

Université Libre de Bruxelles
Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
Faculté des Sciences
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Analyse de la rentabilité financière et des avantages liés à l'isolation thermique : étude de cas adaptés au modèle belge

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par
HOLLAERT, Laurie
en vue de l'obtention du grade académique de
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement
Finalité Gestion de l'Environnement Ma120ECTS ENVI5G-M

Année académique 2013-2014

Promoteur : Prof. Michel HUART

REMERCIEMENTS

Je tiens dans un premier temps à remercier très sincèrement mon promoteur, Monsieur Michel Huart, qui m'a proposé de travailler ce domaine d'actualité particulièrement pertinent. Ses conseils et sa rigueur scientifique ont été d'un apport inestimable pour la réalisation de ce travail. Qu'il trouve l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je tiens également à remercier très sincèrement toutes les personnes ressources ayant contribué de manière directe ou indirecte à la finalisation de ce travail et qui m'ont donné de leur temps et partagé leurs compétences :

La Plate-forme Maison Passive et tout particulièrement Madame Catherine Jacqmin pour m'avoir donné l'opportunité de suivre la formation sur le logiciel PHPP.

Monsieur Bernard Deprez, qui m'a guidé à l'entame de ce travail. La pertinence de ses conseils, son soutien, son expérience scientifique dans le domaine de l'isolation thermique ont été très déterminants pour l'aboutissement de ce mémoire.

Monsieur François Radelet, responsable de la SPRL Isolution, pour sa disponibilité et sa bienveillance à me transmettre les informations concernant les coûts d'isolation.

Monsieur Christophe Hubin, responsable de la SPRL Ecobilan, pour son expertise en matière d'isolation des bâtiments.

Monsieur Olivier Morteihan d'avoir accepté de suivre son cours « Rational use of Energy » le 29 mars 2013, pour sa disponibilité et sa collaboration.

J'adresse mes plus sincères remerciements à mes parents, mon frère, ma famille et tous mes proches et amis, qui m'ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, un immense merci à Antoine, mon compagnon, pour son soutien permanent et son patient travail de relecture et de correction. Merci pour toute son aide et son encouragement ces deux années durant malgré mon manque de disponibilité. Merci d'être là, à mes côtés...

RESUME

Dans un contexte où le réchauffement climatique est omniprésent et attire notre attention à bien des niveaux, il est aujourd'hui important de se focaliser sur les actions à entreprendre dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre. En l'absence de changement radical de notre mode de vie, chaque action et chaque engagement individuel devient déterminant pour assurer la pérennité de notre environnement.

Dans cette optique, l'isolation thermique de nos habitations semble être un point de départ idéal dans ce combat contre les gaz à effet de serre. Davantage que le choix écologique, l'investisseur se tourne aujourd'hui plus que jamais vers une solution rentable à court ou moyen terme pour justifier son investissement. C'est pourquoi nous nous attèlerons dans ce travail à démontrer qu'il est à la fois possible de combiner lutte contre le réchauffement climatique et gain économique substantiel pour un particulier. Pour ce faire, nous nous efforcerons de démontrer la rentabilité de l'isolation thermique, analyse financière à l'appui. Cette dernière prendra en compte de nombreux paramètres, allant du coût de la main d'œuvre et des équipements au taux d'évolution du prix de l'énergie. Puisque la variabilité de certains de ces paramètres tels que l'évolution du prix de l'énergie ou encore les degrés-jours peuvent avoir un impact important sur la rentabilité de l'isolation, une analyse de sensibilité sur base des simulations de Monte Carlo sera également réalisée. Celle-ci déterminera les paramètres significatifs dans la décision d'isoler, et permettra ainsi de tester définitivement la validité de ce projet. Bien que de nombreux cas soient étudiés dans ce mémoire, nous arriverons à la conclusion que la grande majorité des projets d'isolation thermique atteint de manière générale son seuil de rentabilité sur une durée de 15 à 20 ans, à l'exception de quelques cas explicités plus en détail dans ce travail.

Malgré le fait que l'attention du citoyen soit surtout focalisée sur son apport financier et sur un retour sur investissement le plus rapide possible, nous démontrerons que l'isolation thermique permet également la présence d'autres avantages tout aussi importants qu'il incombe de ne pas négliger. Les économies financières d'énergie ne sont donc pas les seuls aspects à prendre en compte puisque l'isolation thermique permet aussi de rejeter moins de CO₂ dans l'atmosphère, mène à un meilleur confort thermique et offre une valeur ajoutée non négligeable au logement.

Dans ce travail, nous soulignerons également l'importance d'entreprendre ce projet d'isolation de manière réfléchie. En effet, dans un souci de qualité et de respect de l'environnement, il est capital de s'informer sur les composantes et propriétés de chaque isolant avant de jeter son dévolu sur le moins coûteux. Un aperçu global sur l'impact environnemental des isolants existants offrira ainsi au citoyen désireux d'investir dans un système d'isolation la possibilité de faire un choix à la fois rentable et éco-responsable.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	3
RESUME	5
TABLE DES MATIERES	7
TABLE DES FIGURES	9
TABLE DES TABLEAUX	10
ABREVIATIONS.....	12
INTRODUCTION	13
1 NOTION DE L'ISOLATION THERMIQUE	15
1.1 Situation actuelle de l'isolation au sein du parc immobilier belge	15
1.2 Notions fondamentales	15
1.3 L'isolation, l'étanchéité à l'air et la ventilation : un trio indissociable	17
1.4 Réglementations.....	23
1.5 Sources des déperditions énergétiques	25
2 CALCUL DES ECONOMIES D'ENERGIE REALISEES GRACE A L'ISOLATION	28
2.1 Besoin de chauffage	28
2.1.1 Apports solaires et apports internes	28
2.1.2 Déperditions conductives.....	29
2.1.3 Déperditions aérauliques	31
2.2 Consommation de chauffage	32
2.3 Économies d'énergie	33
3 INTRODUCTION A L'ANALYSE FINANCIERE	34
4 FACTEURS INTERVENANT DANS L'ANALYSE DE LA RENTABILITE DE L'ISOLATION THERMIQUE	38
4.1 Le coût d'investissement	38
4.1.1 Le coût de l'isolation.....	38
4.1.2 Le coût du système de ventilation.....	39
4.1.3 Les primes éventuelles	39
4.1.4 Crédit d'impôt.....	41
4.1.5 Coût total d'investissement.....	42
4.2 Les économies financières réalisées suite à des travaux d'isolation.....	43
4.2.1 La source d'énergie, le prix de l'énergie et l'évolution du prix de l'énergie	43
4.2.2 Les économies d'énergies annuelles	44

4.2.3 Le taux d'actualisation	50
4.2.4 Calcul total des économies financières	50
5 APPLICATION DE L'ANALYSE FINANCIERE	52
5.1 Cadre d'analyse	52
5.2 Analyses financières appliquée à la maison de type fermette.....	53
5.2.1 Analyse financière sur base des degrés-jours officiels	53
5.2.2 Analyse financière à partir des degrés-jours revisités.....	57
5.3 Analyses financières appliquée à la maison de type villa.....	60
5.3.1 Analyses financières à partir des degrés-jours officiels.....	60
5.3.2 Analyses financières à partir des degrés-jours revisités.....	62
6 ANALYSE DE SENSIBILITE PAR LA SIMULATION MONTE CARLO	65
6.1 Description de la méthode Monte Carlo	65
6.2 Distributions de probabilité.....	65
6.3 Résultats de l'analyse de sensibilité selon les simulations Monte Carlo.....	68
6.3.1 Résultats de la maison type fermette	68
6.3.2 Résultats de la maison type villa	70
7 RECAPITULATIFS DES FACTEURS INFLUENCANT LA RENTABILITE DE L'ISOLATION THERMIQUE	72
7.1 Paramètres avec une influence significative sur la décision d'isoler	72
7.2 Paramètre ayant une influence modérée sur la décision d'isoler.....	74
7.3 Paramètre ayant peu d'influence sur la décision d'isoler	74
8 AVANTAGES QUALITATIFS DE L'ISOLATION THERMIQUE.....	75
8.1 Réduction des émissions de CO ₂	75
8.2 Valeur ajoutée du bien immobilier.....	78
8.3 Amélioration du confort thermique	78
9 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES ISOLANTS	79
CONCLUSION	83
BIBLIOGRAPHIE.....	85
ANNEXES.....	89

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Liens entre isolation, étanchéité à l'air et ventilation	18
Figure 2 : Consommation d'énergie d'un logement selon les quatre systèmes de ventilation	21
Figure 3 : Coût du matériel selon le système de ventilation (euros)	22
Figure 4 : Coût des consommations selon le système de ventilation (euros/an)	22
Figure 5 : Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ officiels)	57
Figure 6 : Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ revisités)	59
Figure 7: Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ officiels)	62
Figure 8 : Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ revisités)	64
Figure 9 : Distribution uniforme du prix de l'isolation de la toiture par l'intérieur.....	66
Figure 10 : Dispersion de la proportion des valeurs autour de la moyenne pour la loi normale ($\mu=0$; $\sigma = 1$).....	66
Figure 11 : Distribution normale du rendement de l'installation de chauffage.....	67
Figure 12 : Coefficients de corrélation des paramètres d'entrée pour la VAN sur 15 ans pour la maison de type fermette	69
Figure 13 : Coefficients de corrélation des paramètres d'entrée pour la VAN sur 15 ans pour la maison de type villa	71

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des techniques d'isolation des murs	19
Tableau 2 : Caractéristiques des quatre systèmes de ventilation.....	21
Tableau 3 : Réglementations relatives à l'isolation thermique en vigueur depuis le 01/01/2014	24
Tableau 4 : Coûts d'isolation selon les techniques utilisées	38
Tableau 5 : Montant des primes d'isolation accordées en Région wallonne.....	40
Tableau 6 : Montant des primes d'isolation accordées en Région flamande	40
Tableau 7 : Montant des primes d'isolation accordées en Région bruxelloise.....	41
Tableau 8 : Prix du gaz naturel et du mazout selon les régions	43
Tableau 9 : Valeurs des degrés-jours en fonction de l'isolation du logement et de sa localisation géographique	47
Tableau 10 : Attribution de valeur fixe aux paramètres stochastiques	53
Tableau 11 : Coût de l'investissement et économies d'énergie pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours officiels	54
Tableau 12 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours officiels (scénario A)	54
Tableau 13 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours officiels (scénario B)	56
Tableau 14 : Economie d'énergie pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours revisités	58
Tableau 15: Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours revisités (scénario A)	58
Tableau 16 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours revisités (scénario B)	59
Tableau 17 : Coût de l'investissement et économies d'énergie pour la maison de type villa sur base des degrés-jours officiels.....	60
Tableau 18: Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours officiels (scénario A)	61
Tableau 19 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours officiels (scénario B)	61
Tableau 20 : Coût de l'investissement et économies d'énergie pour la maison de type villa sur base des degrés-jours revisités.....	63
Tableau 21 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours revisités (scénario A)	63
Tableau 22 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours revisités (scénario B)	63
Tableau 24 : Caractéristiques des distributions des paramètres stochastiques	68
Tableau 25 : Résultat de l'analyse de sensibilité par simulations Monte Carlo pour la maison de type fermette	69
Tableau 26 : Résultat de l'analyse de sensibilité par simulations Monte Carlo pour la maison de type villa	70
Tableau 27 : Coefficient d'émissions de CO ₂	76
Tableau 28 : Emissions de CO ₂ évitées annuellement.....	76
Tableau 29 : Energie grise des isolants.....	80

Tableau 30 : Classification NIBE des isolants.....	81
--	----

ABREVIATIONS

C : Compacité

CFC : chlorofluorocarbures

CO₂ : dioxyde de carbone

CWaPe : Commission wallonne de régulation pour l'énergie

DJ : degrés-jours

GIEC : groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat

kWh : kilowattheure

Mt : mégatonnes

R : Résistance thermique

t : tonnes

TR : temps de retour sur investissement

TRI : taux de rentabilité interne

U : coefficient de transmission thermique

VAN : valeur actuelle nette

μ : espérance

σ : écart-type

INTRODUCTION

Le cinquième rapport d'évaluation « Changement climatique 2014 » du GIEC affirme avec une probabilité supérieure à 95% que la hausse des températures moyennes mondiales relevée depuis le milieu du 20^{ème} siècle est due à l'accumulation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Cette affirmation avait déjà été soulevée en 2007 lors du quatrième rapport du GIEC. Cette même année, le Conseil européen s'est d'ailleurs engagé à réduire d'ici 2020 les émissions globales de gaz à effet de serre de la Communauté européenne d'au moins 20 % par rapport à leurs niveaux de 1990. Cet engagement a pour objectif final de diminuer d'ici 2050 les émissions mondiales d'au moins 50 % par rapport à leurs niveaux de 1990¹. Pour y parvenir, il convient de mettre en place certaines politiques et d'apporter des solutions technologiques dans chacun des secteurs contribuant aux émissions de gaz à effet de serre. En Belgique, celles-ci se répartissent pour l'année 2011 en quatre grands secteurs² :

- l'industrie (47,4%)
- le transport (22,5%)
- le chauffage (18,5%)
- l'agriculture (9,4%)

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons plus spécifiquement sur le secteur du chauffage qui représente à lui seul près d'un cinquième des émissions de gaz à effet de serre. Plus précisément, le chauffage résidentiel représente 14,2% des émissions totales alors que le chauffage tertiaire en représente quant à lui 4,3%. Le secteur du chauffage offre un potentiel d'économie d'énergie facilement et rapidement mobilisable. Aujourd'hui, afin de réduire leur consommation d'énergie, certaines personnes ont comme premier réflexe de passer à une source d'énergie moins couteuse ou de changer leur équipement (par exemple, par l'acquisition d'une nouvelle chaudière). Ces nouveaux postes permettent en effet de réduire certaines déperditions énergétiques mais cela reste insuffisant pour réduire drastiquement leur consommation. Seule une bonne isolation thermique permet de diminuer de façon significative le bilan énergétique du bâtiment. De plus, la Belgique compte une proportion non négligeable d'anciennes constructions qui sont généralement très mal isolées et nécessitent une forte demande en chauffage. Dès lors, l'isolation thermique permettrait à elle seule de diminuer de manière significative les consommations d'énergie de ces logements.

Or, là où le bât blesse, c'est que ces travaux d'isolation exigent un investissement considérable de la part des citoyens qui souhaitent isoler leur logement. Même si les individus sont de plus en plus

¹ Directive 2009/29/CE, p.63.

² VMM, VITO, AWAC, IBGE-BIM, IRCEL-CELINE et ECONOTEC, 2013, p.33.

conscientisés par les problèmes environnementaux, ils ne réalisent en général une action que s'ils savent en retirer un gain économique, ou du moins, s'ils ne doivent pas subir de perte économique. Une étude sur la rentabilité de l'isolation permettrait dès lors d'éclairer la situation actuelle. Ce mémoire a pour objectif d'étudier la rentabilité de l'isolation en fonction de plusieurs paramètres afin de déterminer ceux qui ont une influence significative sur la décision d'isoler un bâtiment. A côté de l'aspect rentabilité de l'isolation thermique, nous exposons également d'autres avantages que présente l'isolation thermique ainsi que l'impact environnemental que peuvent avoir les isolants afin de choisir en tout état de cause.

Méthodologie appliquée

Dans un premier temps, nous aborderons l'isolation thermique sous tous ses aspects : sa situation actuelle au sein du parc immobilier belge, les réglementations mises en place, les notions d'isolation thermique, d'étanchéité à l'air et de ventilation ainsi que les outils évaluant le pouvoir isolant d'un matériau. Nous développerons ensuite la méthodologie employée pour calculer les économies de chauffage réalisées grâce à l'isolation thermique et à un système de ventilation adéquat. Le troisième chapitre sera quant à lui consacré à l'introduction de l'analyse financière. Dans le chapitre suivant, nous présenterons les différents paramètres intervenants dans l'analyse de la rentabilité de l'isolation thermique d'un logement. Dans l'optique de rester dans un cadre d'analyse respectable, nous avons centré notre étude sur deux types de maison quatre façades. À partir des paramètres définis, le cinquième chapitre exposera alors le résultat de l'analyse financière de l'isolation thermique. Puisque la valeur de certains paramètres tels que le coût de l'isolation ne sont pas fixes, il conviendra dès lors d'étudier l'influence de la variabilité de ces facteurs sur la rentabilité de l'isolation. Pour ce faire, une étude de sensibilité via la simulation de Monte Carlo sera réalisée dans le sixième chapitre. Le septième chapitre rassemblera les informations récoltées dans les chapitres précédents en vue de déterminer les paramètres influençant la décision d'isoler un bâtiment. Le chapitre suivant relatera l'ensemble des avantages de l'isolation thermique, lesquels seront différents du point de vue financier. Nous verrons notamment dans ce chapitre le bienfait environnemental que permet l'isolation thermique. Enfin, le dernier chapitre aura pour objectif de conscientiser les citoyens sur les différentes sortes d'isolants, ce qui leur permettra de faire leur choix de manière plus réfléchie.

1 NOTION DE L'ISOLATION THERMIQUE

Afin de garantir la température de confort désirée dans un bâtiment, la principale source de chaleur provient de l'utilisation du chauffage et des apports solaires et internes. Cependant, la chaleur s'échappe bien souvent au travers des parois. La réalisation d'une isolation thermique consiste à mettre en œuvre des techniques capables de restreindre ces échanges de chaleur. Ainsi, l'isolation thermique d'un bâtiment a pour but principal de maintenir en hiver la chaleur dans la maison en limitant les besoins de chauffage, et de conserver la fraîcheur en été. Le principal objectif de l'isolation thermique est donc de diminuer les consommations d'énergie du logement.

1.1 Situation actuelle de l'isolation au sein du parc immobilier belge

En supposant qu'il n'ait subi aucune rénovation, le niveau d'isolation d'un bâtiment dépend principalement de deux facteurs : son année de construction et son nombre de façades. En effet, plus le bâtiment est vieux, plus l'isolation est médiocre voire inexistante pour les maisons construites avant 1945. Jusqu'en 1985, aucune réglementation sur l'isolation n'était d'application. Or, le parc immobilier belge est relativement vieux comparé au reste de l'Europe sachant que 32% des bâtiments datent d'avant 1945 et 80% datent d'avant 1985³. Par conséquent, une grande proportion du parc immobilier belge compte de nombreux bâtiments non isolés ou du moins très faiblement isolés. Le type de bâtiment influence également la consommation d'énergie pour le chauffage. Ainsi, les appartements intégrés dans une structure et entourés d'autres logements consomment de manière générale moins de chauffage au mètre carré qu'une maison quatre façades. Le parc immobilier belge compte 32% de maisons à 4 façades, 18% de maisons à 3 façades, 24,5% de maisons à 2 façades et 24% d'appartements⁴. Cette structure de l'habitat ainsi que l'ancienneté du parc immobilier conduisent à des demandes considérables de chauffage. Il devient par conséquent urgent d'inciter la population belge à opter pour des rénovations énergétiques performantes. Nous développerons dans la suite de ce chapitre les outils mis en œuvre par les Régions pour diminuer ces pertes énergétiques.

1.2 Notions fondamentales

Pour faciliter la compréhension des techniques de l'isolation thermique, nous introduisons au préalable des notions fondamentales inhérentes à l'isolation : la conductivité thermique, la résistance thermique, le coefficient de transmission thermique, le niveau E et le niveau K.

³ VANNESTE Dominique, THOMAS Isabelle et GOOSSENS Luc, p.10.

⁴ Centre de Recherche et d'Information des Organisations et Consommateurs (CRIOC), 2006, p.7.

Conductivité thermique : La conductivité thermique (notée λ) correspond à la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. Elle représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps, sous un gradient de température.

$$\lambda (W/m.K) = q \frac{L}{\Delta T}$$

Où q : Flux thermique (W/m^2)

L : Épaisseur de la surface (m)

T : Température (K)

Il s'avère que plus la conductivité est faible, plus le matériau est isolant.

Résistance thermique : La résistance thermique (notée R) correspond à la capacité d'un matériau à résister au froid et à la chaleur. Elle est déterminée en divisant l'épaisseur du matériau (L) par la conductivité thermique de ce dernier (λ).

$$R (m^2K/W) = \frac{L}{\lambda}$$

Plus la résistance thermique est élevée, plus le matériau est isolant. Si l'on s'intéresse à la résistance thermique d'une paroi, il suffit d'additionner les résistances thermiques de chaque matériau qui la compose.

Coefficient de transmission thermique : Le coefficient de transmission thermique (U) correspond à la déperdition de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. Il est égal à l'inverse de la résistance thermique et s'exprime donc en $\frac{W}{m^2K}$. Le coefficient thermique d'une paroi est par conséquent l'inverse de la somme des résistances de chaque couche.

$$U (W/m^2K) = \frac{\lambda}{L}$$

Plus le coefficient de transmission thermique d'une paroi est faible, moindre sont les déperditions.

Le niveau E correspond au niveau de performance énergétique globale du bâtiment qui résulte du rapport entre sa consommation annuelle d'énergie primaire et celle du même bâtiment pourvu d'un équipement de référence, multiplié par 100. Plusieurs paramètres sont pris en compte dans ce calcul : l'implantation et l'orientation du bâtiment, son niveau d'isolation, son niveau d'étanchéité à l'air, son système de ventilation, son système de chauffage et d'eau, son éclairage, etc.

Plus la valeur E est basse, meilleure est l'efficacité énergétique du bâtiment.

Le niveau K correspond au niveau de l'isolation thermique globale du bâtiment. Il globalise les déperditions par transmission de chaleur à travers les parois délimitant le volume protégé⁵.

Il est calculé sur base de son U_{moyen} et de sa compacité. Cette dernière s'obtient en divisant le volume protégé par la somme des surfaces de déperdition du bâtiment. Plus un bâtiment est compact, plus il est facile d'aboutir à des performances énergétiques élevées.

La formule permettant le calcul du niveau K se présente comme suit :

$$\text{Si } C \leq 1, K = U_{moyen} * 100$$

$$\text{Si } 1 < C < 4, K = U_{moyen} * 300 / (C + 2)$$

$$\text{Si } C \geq 4, K = U_{moyen} * 50$$

Plus la valeur K est basse, meilleure est l'isolation.

1.3 L'isolation, l'étanchéité à l'air et la ventilation : un trio indissociable

Dans le but d'atteindre un bâtiment confortable et peu énergivore, trois axes demandent une attention particulière :

- une isolation thermique correctement mise en œuvre
- une étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment assurée
- une ventilation contrôlée et maintenue en état par un entretien régulier

⁵ Le volume protégé doit comporter au moins tous les espaces chauffés et/ou refroidis (en permanence ou par intermittence) qui font partie du bâtiment examiné ou de l'extension examinée (AGW, 2008).

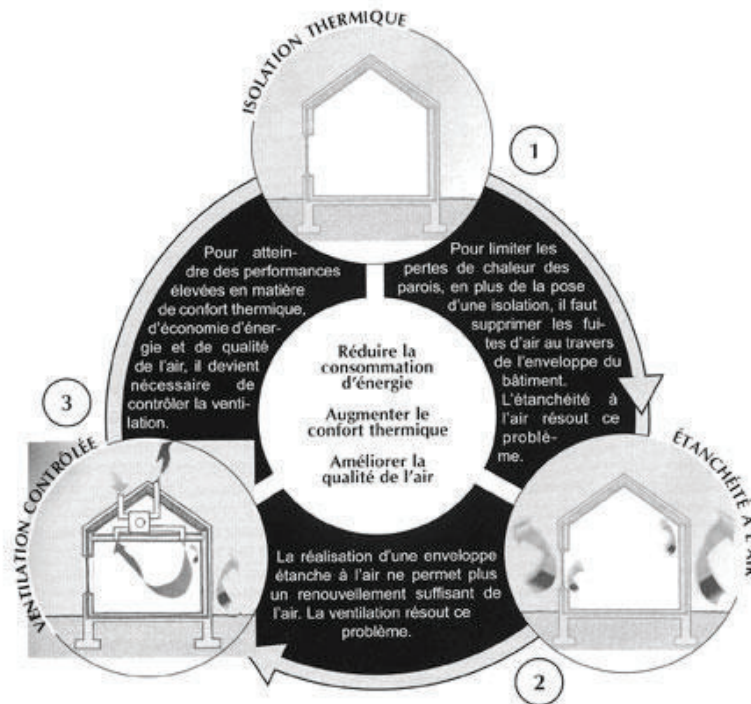


Figure 1 : Liens entre isolation, étanchéité à l'air et ventilation⁶

Isolation

L'isolation thermique permet, comme nous l'avons vu plus haut, une réduction des pertes énergétiques. La perte de chaleur à travers une paroi est mesurée à l'aide du coefficient thermique U défini plus haut. Chaque type de matériau a son propre coefficient de transmission thermique. Plus son épaisseur est élevée, plus son coefficient est important. Il est dès lors important de choisir l'épaisseur optimale de l'isolant en fonction de la paroi à isoler. Généralement, il n'y a aucune difficulté à isoler le toit avec un isolant d'une certaine épaisseur. Cela n'est pas spécialement le cas lorsque l'on souhaite isoler les murs. Les parois à isoler concernent typiquement la toiture, les murs, le sol et les fenêtres. Les techniques d'isolation et les isolants choisis dépendent de la paroi à isoler.

L'isolation des murs peut se faire de trois manières. Par ordre de préférence, il s'agit de

- l'isolation des murs par l'extérieur
- l'isolation par injection/insufflation dans la coulisse
- l'isolation des murs par l'intérieur

⁶ BALTUS C. et GUILLEMEAU J-M, 2004, p.7.

Ces techniques présentent chacune des avantages et des inconvénients. En voici quelques-uns :

Isolation par l'extérieur	Isolation dans la coulisse	Isolation par l'intérieur
😊 Continuité de l'isolation	😊 Préservation de l'aspect extérieur	😊 Préservation de l'aspect extérieur
😊 Évitement de potentiels ponts thermiques ⁷	😊 Aucune perte de place à l'intérieur	😞 Diminution du volume intérieur
😊 Aucune perte de place à l'intérieur	😊 Préservation de l'inertie thermique	😞 Diminution de l'inertie thermique
😊 Étanchéité de la façade améliorée	😞 Limitation de l'épaisseur de l'isolant de la coulisse	😞 Formation/accentuation des ponts thermiques
😊 Préservation de l'inertie thermique ⁸	😞 Accroissement du risque d'infiltration d'eau	😞 Finition intérieure à refaire
😞 Modification de l'aspect extérieur	😞 Formation de potentiels petits ponts thermiques causés par des déchets de mortier	
😞 Nécessité dans de nombreux cas d'un permis d'urbanisme	😞 Uniquement possible si largeur de la coulisse supérieure à 4 mm	

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des techniques d'isolation des murs

La toiture quant à elle, est généralement isolée par l'intérieur. Cependant, elle peut également faire l'objet d'une réhabilitation complète et être isolée par l'extérieur. Lorsque le grenier ne fait pas partie du volume chauffé, au lieu d'isoler la toiture, il est conseillé d'isoler son plancher. Il est en effet beaucoup plus simple et plus économique d'isoler le plancher du grenier plutôt que la toiture inclinée.

Le degré d'isolation d'une fenêtre est, par contre, déterminé par son type de vitrage et son châssis⁹. Cependant, par souci de simplification, nous ne prendrons en compte que le remplacement du type de vitrage dans cette étude.

⁷ Un pont thermique est un point de construction où l'enveloppe isolante est rompue

⁸ L'inertie thermique peut simplement être définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. Cette caractéristique est très importante pour garantir un bon confort notamment en été, c'est-à-dire pour éviter les surchauffes (Energie+, L'inertie thermique, 2014).

⁹ Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, 2008, p1.

Le sol, lui, peut être isolé par le bas lorsque nous y avons accès (vide ventilé) ou par l'intérieur de la maison. La première solution est toujours souhaitable puisqu'elle n'impose pas de procéder à un nouveau revêtement du sol (nouveau carrelage par exemple).

Étanchéité à l'air

L'étanchéité à l'air d'une maison est sa capacité à éviter l'entrée d'air de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment et inversement. Au plus on isole sa maison, au plus on souhaite minimiser les fuites d'air et au plus l'étanchéité devient primordiale. En effet, qui chaufferait son salon en laissant la fenêtre grande ouverte ? L'étanchéité a une influence positive sur la performance énergétique des bâtiments. Si elle est délaissée, des courants d'air froids persisteront à l'intérieur, ce qui diminuera la température des parois engendrant alors une diminution de confort. Les fuites d'air sont principalement situées au niveau des jonctions entre les différentes parois. L'enveloppe isolante doit dès lors être absolument continue.

Ventilation

Dans les anciennes maisons non isolées et peu étanches à l'air, la question de l'aération se pose peu au vu des nombreuses fuites d'air. En revanche, une maison isolée et étanche à l'air peut emprisonner des airs qui peuvent s'avérer malsains dès lors que l'air vicié ne s'échange plus automatiquement avec l'air neuf venant de l'extérieur. La ventilation est donc très importante au risque de se retrouver avec un air chargé en CO₂ et en humidité.

La circulation de l'air s'effectue toujours dans le même sens : l'air frais est amené dans les pièces sèches (living, chambres,..) et est ensuite dirigé au travers d'ouvertures de transfert, sous forme de grilles murales ou de fentes sous les portes, vers les pièces humides (cuisine, salle de bain, wc, etc.), là où la pollution de l'air est la plus importante. Il est ensuite évacué à partir de ces dernières pièces. Il existe deux manières de ventiler un bâtiment : la ventilation naturelle et la ventilation mécanique. La ventilation naturelle consiste à assurer le renouvellement de l'air de manière naturelle grâce aux différences de pression climatique. Dans le cas de la ventilation mécanique, l'amenée et/ou l'évacuation de l'air se fait par l'intermédiaire d'un ventilateur. Selon que l'amenée et l'évacuation soient naturelles ou mécaniques, 4 systèmes de ventilation contrôlée sont possibles :

	Amenée d'air	Evacuation d'air
Système A	Naturelle	Naturelle
Système B	Mécanique	Naturelle
Système C	Naturelle	Mécanique
Système D	Mécanique	Mécanique

Tableau 2 : Caractéristiques des quatre systèmes de ventilation

Afin de limiter les pertes engendrées par le renouvellement de l'air, il est possible dans le cas du système D, appelé système double flux, d'installer un échangeur de chaleur. Ce système récupère la chaleur de l'air vicié pour réchauffer l'air entrant.

Selon le système de ventilation installé, la consommation d'énergie primaire diffère. La figure 2 représente la consommation d'énergie pour une maison de surface énergétique de 100 m² et un volume chauffé de 250 m³ selon les différents systèmes de ventilation¹⁰ :

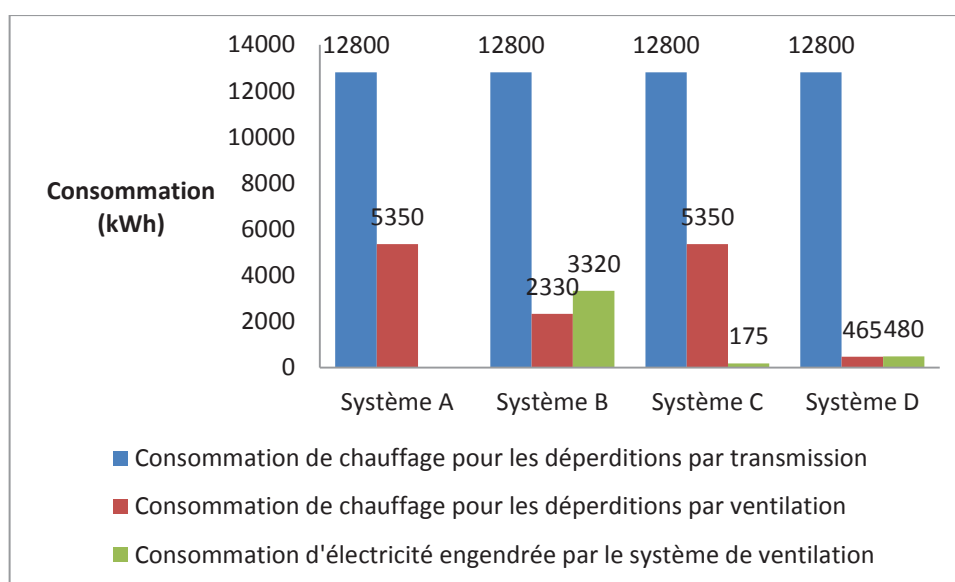


Figure 2 : Consommation d'énergie d'un logement selon les quatre systèmes de ventilation

Les systèmes de ventilation B, C et D créent une consommation supplémentaire d'électricité, mais celle-ci reste très minime par rapport à la consommation d'énergie primaire totale, à l'exception du système de ventilation B. Sur base du graphique, les consommations d'énergie primaire des systèmes de ventilation A, B, C et D s'élèvent respectivement à 18 150 kWh, 18 450 kWh, 18 325 kWh et 13 745 kWh. Le système de ventilation le plus performant est dès lors sans aucun doute le système de ventilation D. Estimons à présent les coûts de matériel de chaque système de ventilation ainsi que leur coût de consommation¹¹.

¹⁰ HAUGLUSTAINE J-M, 2004, p.13.

¹¹ BALTUS C. et GUILLEMEAU J-M, 2004, p.21.

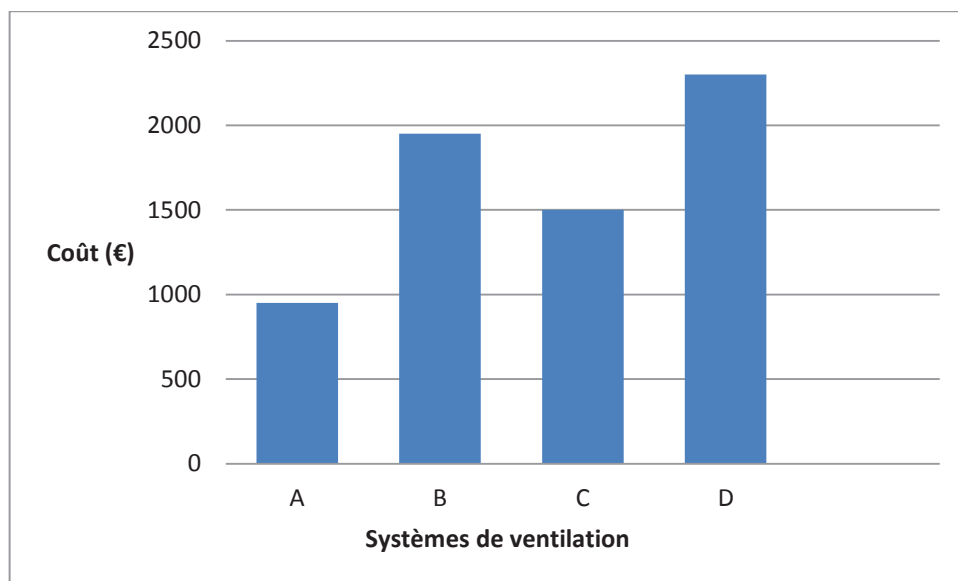


Figure 3 : Coût du matériel selon le système de ventilation (euros)

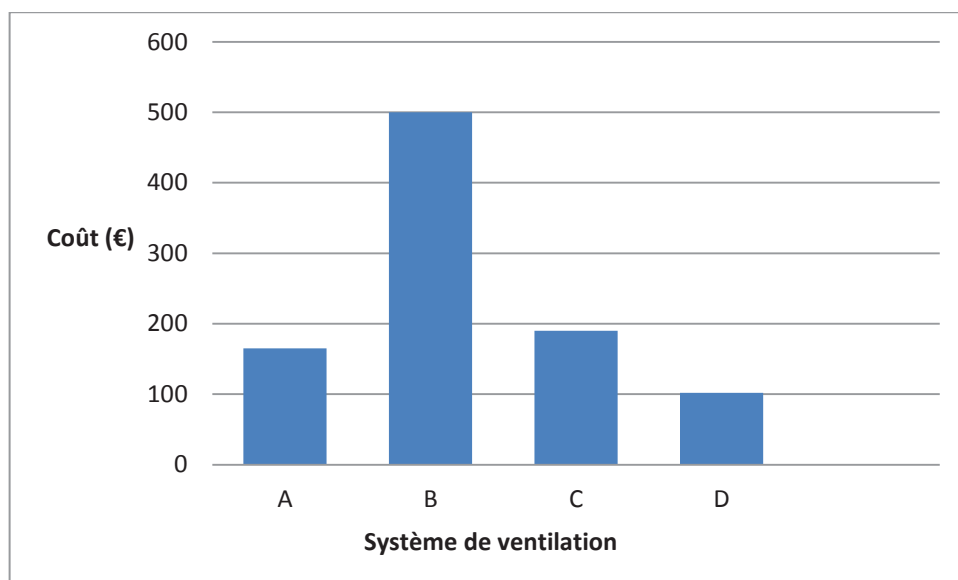


Figure 4 : Coût des consommations selon le système de ventilation (euros/an)

Le système de ventilation A ne nécessite pas un investissement initial élevé et a un coût en termes de consommation relativement respectable. Cependant, étant donné que l'amenée et l'évacuation d'air est réalisée de manière naturelle, les courants d'air et débit d'air sont mal contrôlés faisant du système A le moins confortable de tous. Nous supposons dès lors, dans notre analyse, que toute personne rationnelle, et un minimum informée sur les avantages et désavantages des systèmes de ventilation ne choisira en aucun cas le système A. Ce dernier, même s'il nécessite peu d'investissement initial, ne fournit pas un confort de vie optimal. Quant au système B, il occasionne une consommation d'énergie primaire élevée et un investissement initial élevé. De ce fait, nous ne le prendrons pas non plus en compte dans notre cadre d'étude. Notre analyse se portera dès lors

uniquement sur le système C et le système D avec échangeur de chaleur. De manière générale, lors de travaux générant une isolation thermique de haute performante, il sera préférable d'installer le système double flux avec récupérateur de chaleur. Tandis que pour des rénovations légères, le système C sera préféré.

1.4 Réglementations

Afin de diminuer la consommation d'énergie primaire dans les bâtiments, divers outils se sont mis en place en Belgique. Depuis 1985, se succèdent des réglementations de plus en plus exigeantes sur la Performance Energétique des Bâtiments (PEB). Ces réglementations PEB diffèrent d'une Région à l'autre. Les premières réglementations thermiques en Région wallonne, Région Flamande et Bruxelles Capitale datent respectivement de 1985, 1993 et 2000. Ces réglementations s'appliquent à l'ensemble des bâtiments neufs ainsi qu'à ceux qui font l'objet de travaux de rénovation nécessitant l'obtention d'un permis d'urbanisme. Les réglementations imposent des niveaux d'exigences sur un certain nombre de facteurs qui influencent la consommation énergétique des bâtiments. Ceux-ci varient en fonction de la Région, de la nature des travaux et de l'occupation des bâtiments (habitation individuelle, bureau, enseignement, etc.). Nous retrouvons, au sein des trois Régions, trois types d'exigences :

- des exigences en matière d'isolation thermique des bâtiments (niveau K maximum et valeurs U maximales)
- des exigences en matière de performance énergétique (niveau E minimum)
- des exigences en matière de ventilation et du respect de la limitation du risque de surchauffe.

Pour les maisons individuelles, voici les différentes réglementations relatives à l'isolation thermique des bâtiments en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2014 (applicables uniquement sur les éléments modifiés ou neufs)¹²:

¹² Centre Scientifique et Technique de la Construction, 2014.

	Région Wallonne	Bruxelles- Capitale	Région Flamande
Niveau E minimal	E80	E70	E70
Niveau K maximal	K35	K40	K40
U_{max} murs extérieurs (W/m²K)	0,24	0,24	0,24
U_{max} toiture (W/m²K)	0,24	0,24	0,24
U_{max} fenêtre (W/m²K)	1,8	1,8	1,8
U_{max} sol en contact avec environnement extérieur, sol sur pleine terre, sol au-dessus d'un vide sanitaire (W/m²K)	0,3	0,3	0,3

Tableau 3 : Réglementations relatives à l'isolation thermique en vigueur depuis le 01/01/2014

Les exigences en matière de ventilation pour les trois Régions reposent en grande partie sur la norme NBN D 50-001 qui existe depuis 1991. Cette dernière s'applique également aux constructions neuves et aux habitations ayant subi d'importantes rénovations et définit les exigences relatives au renouvellement d'air dans les bâtiments d'habitation¹³. Elle a pour objectif de garantir une circulation continue de l'air dans l'habitation, et le respect d'un débit nominal¹⁴, minimal et maximal. Afin d'assurer une ventilation correcte, que ce soit pour l'amenée d'air ou pour l'évacuation de l'air, un débit de 3,6 m³/h par m² de surface au sol est nécessaire. Le débit nominal d'un local correspond donc à la multiplication de 3,6 m³/h par la surface au sol du local. Cependant, pour certaines pièces, il faut également respecter un débit minimal et maximal. Ainsi par exemple, pour le living, quelle que soit sa superficie, il faut que le débit soit au minimum de 75 m³/h et au maximum de 150 m³/h. D'autres débits minimum et maximum doivent également être respectés pour les autres pièces¹⁵ (les différentes valeurs des débits peuvent être consultées en Annexe 1 de ce document).

En ce qui concerne l'étanchéité à l'air, Il n'existe pas de réglementation spécifique. Elle est par contre prise en compte dans le calcul de la consommation d'énergie primaire et intervient dès lors dans le calcul du niveau E.

Un deuxième outil mis en œuvre avec pour objectif de diminuer la consommation de chauffage est l'établissement d'un certificat sur la performance énergétique des bâtiments. Afin d'estimer la performance énergétique des bâtiments, la directive européenne 2002/91/CE impose aux Etats

¹³ Le taux de renouvellement d'air (h⁻¹) correspond au nombre de fois par heure où la totalité de l'air d'un local est renouvelé par de l'air neuf extérieur.

¹⁴ Le débit nominal est la quantité d'air que peut traiter un équipement en fonctionnement normal.

¹⁵ FRANCY Simon, HAUGLUSTAINE Jean-Marie, BALTUS Catherine et LIESSE Sophie, 2001, p.16.

membres de mettre en place un système de certification énergétique des bâtiments¹⁶. Désormais, le certificat sur la Performance Énergétique des Bâtiments (certificat PEB) est obligatoire pour toute vente de maison en Belgique¹⁷. Ce certificat renseigne au moyen d'un label énergétique (de A signifiant très bon à G très mauvais) sur la qualité énergétique du bâtiment, ce qui permet aux futurs locataires ou propriétaires d'estimer son efficacité énergétique. Il recommande également les investissements qui permettent d'économiser de l'énergie. Cette nouvelle loi conscientise ainsi les citoyens sur les pertes d'énergie et les techniques mises en œuvre telles que l'isolation thermique pour minimiser ces pertes. La Commission Européenne a d'ailleurs récemment réalisé une étude sur « l'impact des certificats de Performance Énergétique des bâtiments sur les prix de vente et de location dans certains Etats membres de l'UE »¹⁸. Cette dernière souligne l'impact positif du certificat PEB sur les prix de vente et le montant des loyers. Cela montre que les personnes accordent de plus en plus d'importance à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Enfin, un troisième outil mis en place est la Procédure d'Avis Énergétique (PAE) appelé communément l'audit énergétique. L'audit, réalisé par un auditeur agréé, consiste à quantifier les déperditions énergétiques d'une habitation en analysant l'enveloppe du bâtiment, la ventilation mais aussi les systèmes de chauffage et de production d'eau chaude. Contrairement au certificat PEB, il est réalisé sur base volontaire par le propriétaire ou le locataire. Il permet à la personne concernée de connaître les points faibles de son habitation et de lui proposer une liste d'améliorations possibles tout en quantifiant les économies réalisables. L'individu peut, en suivant ces conseils, isoler efficacement son habitation.

1.5 Sources des déperditions énergétiques

Selon l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), les déperditions thermiques d'un logement proviennent¹⁹ :

- Des parois (65 à 75% des déperditions totales)
- Du renouvellement de l'air (20 à 25% des déperditions totales)
- Des ponts thermiques (5 à 10% des déperditions totales)

¹⁶ Directive 2002/91/CE, p65.

¹⁷ Le PEB est obligatoire pour chaque logement mis en vente depuis le 1^{er} mai 2011 en Région Bruxelloise, depuis le 1^{er} juin 2011 en Région Wallonne et depuis le 1^{er} octobre 2008 en Région Flamande (Notaires.be, 2014).

¹⁸ MUDGAL Shailendra et al., 2013, p115.

¹⁹ BAREAU Hélène, 2013, p8.

Déperditions par les parois

Dès lors que nous chauffons un bâtiment, la chaleur s'échappe à travers les parois. De manière générale, la toiture est responsable de 25 à 30% des déperditions thermiques ; les murs de 20 à 25%, les fenêtres de 10 à 15% et enfin le sol de 7%. C'est pourquoi les travaux d'isolation se concentrent davantage sur la toiture et les murs.

Renouvellement de l'air

Afin d'assurer un air sain pour les occupants et de préserver la salubrité des bâtiments, il faut nécessairement renouveler l'air ambiant. En effet, un air non renouvelé accumule l'humidité, les odeurs, les polluants, les poussières, le pollen, ou encore les produits d'entretien. Nous avons donc constaté l'indispensabilité d'un système de ventilation pour éviter la pollution de l'air intérieur et éliminer l'humidité. Les déperditions engendrées par le renouvellement de l'air proviennent des échanges d'air entre l'intérieur et l'extérieur puisque l'air extérieur introduit dans le bâtiment doit être chauffé en hiver et refroidit en été pour atteindre la température intérieure de confort.

Pont thermique

Un pont thermique est un point de construction où l'enveloppe isolante est rompue. Les plus importants se situent entre autre aux jonctions entre la toiture et les murs, entre les murs et les châssis et entre les planchers et les murs. Ainsi en hiver, la température à ces endroits est plus basse que celle des surfaces environnantes. Les ponts thermiques engendrent de ce fait des sensations de paroi froide, des pertes de chaleur et peuvent également être source d'humidité. Dans la réglementation PEB, le terme « pont thermique » n'est volontairement plus employé car il est souvent rattaché à une connotation négative : perte de chaleur, problème de condensation, moisissure, etc. Il a été substitué par le terme « nœud constructif » qui désigne l'ensemble des endroits de l'enveloppe du bâtiment où peuvent apparaître des pertes thermiques supplémentaires. Dès lors, un nœud constructif non géré entraîne un pont thermique. Depuis le 1^{er} juin 2012, la nouvelle réglementation PEB impose la prise en compte des nœuds constructifs dans le calcul des exigences PEB, ce qui influencera le niveau K et E.

Un projet d'isolation thermique doit tenir compte de ces divers mécanismes de déperdition. Une grande partie de la chaleur s'échappe des bâtiments en traversant par conduction les parois extérieures (65 à 75% des déperditions thermiques). Isoler ces parois permet dès lors de réaliser d'importantes économies de chauffage. L'isolation doit être nécessairement accompagnée de la mise en place d'une ventilation correcte afin d'éliminer toute humidité excédentaire. Enfin, lors des travaux d'isolation, il est important de s'assurer que l'isolant soit placé de manière continue et que

tous les raccords des différentes parois ne laissent pas échapper l'air chaud afin d'éviter la création de ponts thermiques.

2 CALCUL DES ECONOMIES D'ENERGIE REALISEES GRACE A L'ISOLATION

Dans ce chapitre, nous calculerons les économies d'énergie qui peuvent être réalisées grâce à des travaux d'isolation thermique et à une meilleure ventilation. Ces économies, accomplies en diminuant la demande de chauffage, correspondent à la différence du besoin de chauffage du bâtiment à l'état initial et du besoin de chauffage pour ce même bâtiment après avoir subi des travaux d'isolation.

Avant de décrire spécifiquement le calcul d'économie d'énergie, notons que toutes les formules renseignées sont issues du logiciel PHPP, un outil important d'aide à la construction de maisons passives. Dans cette optique, ce logiciel décrit notamment les bilans énergétiques, la conception de la ventilation et la définition des besoins de chauffage ; trois aspects qui nous intéressent dans le cadre de ce mémoire.

2.1 Besoin de chauffage

Le logiciel PHPP évalue le besoin de chauffage sur base des apports et des déperditions thermiques. Celui-ci est calculé de la manière suivante :

$$\text{Besoin de chauffage} = \text{déperditions conductives} + \text{déperditions aérauliques} - \text{apports solaires} - \text{apports internes}.$$

2.1.1 Apports solaires et apports internes

Les apports solaires sont déterminés principalement par l'orientation des fenêtres. Les apports internes dépendent quant à eux de la période de chauffe et de la surface de référence énergétique²⁰. Ces définitions pourraient nous amener à croire que ces paramètres sont indépendants des travaux d'isolation. En effet, si un bâtiment est mieux isolé et que sa ventilation est améliorée, il est évident que l'orientation des fenêtres, la période de chauffe et la surface de référence énergétique s'en verront inchangées. Cependant, on peut également affirmer de manière assez logique que les parois isolées gardent mieux la chaleur que les parois non isolées. Ainsi, la température de surface d'un mur creux non isolé est par exemple de l'ordre de 16,5°C alors qu'il est de 19,3°C pour un mur creux isolé²¹. Or, la température de confort ressentie est définie comme la moyenne arithmétique de la température intérieure et de la température des parois. Il s'en suit dès lors qu'une augmentation de

²⁰ La surface de référence énergétique correspond à la surface nette de plancher

²¹ SIMON F. et HAUGLUSTAIN J-M, 1996, p.5

deux degrés de la température des parois à température intérieure constante engendre l'augmentation d'un degré de la température de confort. L'isolation des parois permet ainsi d'atteindre plus vite la température de confort souhaitée. Par conséquent, les apports solaires et internes diffèrent selon que le bâtiment est isolé ou non. Étant donné qu'ils dépendent très fortement du type de bâtiment et de son exposition, il n'est pas aisé de les calculer au vu des nombreuses données à acquérir. Nous ne les calculerons donc pas de manière explicite, mais nous les intégrerons tout de même dans nos futurs calculs grâce à l'indicateur degrés-jours que nous détaillerons par la suite.

2.1.2 Déperditions conductives

Les déperditions conductives constituent plus de 75% des déperditions totales. Elles englobent toutes les déperditions engendrées par les parois (toiture, murs, sols et fenêtres) et par les ponts thermiques. Étant donné que ces déperditions dépendent d'un bâtiment à un autre, il est important de choisir la méthode la plus générale possible. Pour ce faire, nous estimons les déperditions conductives à partir de l'indicateur « Degrés-jours ».

L'indicateur degrés-jours (DJ) permet d'évaluer l'influence du climat sur les besoins en chauffage. Plus précisément, il a été introduit pour permettre la détermination de la quantité de chaleur consommée par un bâtiment sur une période de chauffage donnée et pour effectuer des comparaisons entre des habitations situées dans des zones climatiques différentes. Les degrés-jours sont comptabilisés en additionnant tous les écarts entre la température de confort désirée et la température extérieure moyenne sur tous les jours de la période de chauffe²². La période de chauffe correspond à la situation où la température extérieure moyenne de la journée est inférieure à la température de confort. Ainsi, pour une habitation domestique, les expériences réalisées dans notre pays révèlent qu'en moyenne la température de confort désirée s'élève à 18°C (moyenne sur les 24 heures de la journée)²³.

Mathématiquement, la formule de base pour les degrés-jours est la suivante :

$$\text{Degrés-jours} = \sum_{i=1}^n (\text{Température de confort (18°C)} - \text{Température moyenne extérieure}_i)$$

Où

- n représente le nombre de jours de la période de chauffe

²² HUART Michel, 2013, p45-51

²³ Energie+, Les degrés-jours. En ligne sur <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15567>

- la *température moyenne extérieure* de la journée i correspond à la moyenne arithmétique de la température minimale et maximale de cette même journée

De plus, puisque le bâtiment bénéficie de certains apports comme par exemple le soleil ou la chaleur produite par les occupants et par les équipements, on estime en moyenne à 3°C les apports gratuits dans une habitation. C'est pourquoi en Belgique, nous utilisons souvent le DJ en base 15/15 signifiant qu'il intègre l'écart de température entre la température moyenne extérieure et 15°C.

Comme nous avons vu précédemment que les apports sont plus soutenus lorsque la maison est isolée, nous estimons que les apports varient entre 2 et 2,5°C dans le cas d'une maison non isolée, et entre 3,5 et 4°C dans le cas d'une maison isolée²⁴. Afin de prendre en compte ces apports dans le calcul des degrés-jours, celui-ci est réalisé en additionnant tous les écarts entre la température de confort désirée à laquelle nous retranchons les apports et la température extérieure moyenne sur tous les jours de la période de chauffe.

Formellement, les degrés-jours dans ce mémoire sont calculés de la manière suivante :

$$DJ = \sum_{i=1}^n ((18^{\circ}\text{C} - \text{apports}) - \text{Température moyenne extérieure}_i) \phi$$

Où

- n correspond au nombre de jours où la température extérieure moyenne est inférieure à « $18^{\circ}\text{C} - \text{apports}$ ».
- Les *apports* varient selon l'isolation d'une maison.
- La *température moyenne extérieure de la journée i* correspond à la moyenne arithmétique de la température minimale et maximale de cette même journée.
- $\Phi = 1$ si $((18^{\circ}\text{C} - \text{apport}) - \text{température moyenne extérieure}) > 0$; 0 sinon.

Comme l'accès aux données climatiques journalières sur une année entière n'est pas chose aisée, nous nous baserons sur des données climatiques mensuelles. Ce choix est par ailleurs justifié puisque le logiciel PHPP calcule de manière équivalente les degrés-jours. Formellement, le calcul des degrés-jours s'en verra alors légèrement modifié, puisqu'il se base dès lors sur les températures mensuelles :

$$DJ = \sum_{m=1}^{12} NJ_m ((18^{\circ}\text{C} - \text{apports}) - \text{Température moyenne extérieure}_m)$$

²⁴ Energie+, Les degrés-jours. En ligne sur <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=15567>

Où

- NJ_m représente le nombre de jours présents dans le mois « m ».
- La *température moyenne extérieure du mois « m »* correspond à la moyenne arithmétique de la température minimale et maximale de ce mois.

Sur base de l'indicateur degrés-jours, nous pouvons à présent évaluer les déperditions conductives. Elles sont calculées en considérant l'ensemble des parois :

$$\text{Déperditions conductives annuelles (kWh)} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i * S_i * a_i * DJ * 24h}{1000}$$

Où

- U_i : Coefficient de transmission thermique de la paroi i (W/m^2K)
- S_i : Surface de la paroi i (m^2)
- a_i : facteur correctif
- DJ : Degrés-jours (K)

Ces déperditions sont estimées en sommant les déperditions conductives annuelles de chaque paroi. Étant donné que l'unité des degrés-jours est le jour, il faut multiplier par « 24h » pour convertir les déperditions en heure. Le facteur correctif intervient lorsque certaines parois bénéficient d'une température élevée d'espaces voisins. Ainsi, il vaut 1 pour toutes les déperditions relatives aux parois en contact direct avec l'extérieur, à savoir les murs (excepté les murs mitoyens), les fenêtres et la toiture. Le sol peut, quant à lui, dans certains cas bénéficier de la température élevée du sol ou d'espaces voisins. Nous distinguons trois cas²⁵ :

- Planchers au-dessus d'espaces voisins non à l'abri du gel (vide sanitaire) : $a_i = 1$
- Planchers au-dessus d'espaces voisins à l'abri du gel (caves) : $a_i = 0,67$
- Planchers sur le sol : $a_i = 0,33$

2.1.3 Déperditions aérauliques

Les déperditions que l'on nomme aérauliques constituent le reste des déperditions, à savoir 25% des déperditions totales. Elles sont engendrées par le renouvellement d'air et correspondent à la dépense de chauffage nécessaire pour réchauffer l'air renouvelé.

$$\text{Déperditions aérauliques annuelles (kWh)} = \frac{Tx * V * 0.34 * DJ * 24h}{1000}$$

²⁵ Energie+, le bilan thermique. En ligne <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16807#c20934687>

Où

- T_x : Taux de renouvellement de l'air de référence (h^{-1})
- V : Volume d'air intérieur du bâtiment (m^3)
- $0,34$: Capacité thermique de l'air²⁶ (Wh/m^3K)
- DJ : Degrés-jours (K)

Nous avons vu précédemment qu'il était possible de minimiser les pertes de chaleur en installant un système de ventilation avec récupération de la chaleur. La proportion de la chaleur récupérée dépend du rendement énergétique de l'échangeur de chaleur. Afin de prendre en compte ce dispositif dans notre équation, nous intégrons son rendement énergétique dans le taux de renouvellement de l'air de référence. Ce dernier se formule comme suit²⁷ :

$$\text{Taux de renouvellement de référence} = \text{taux de renouvellement d'air moyen} * (1 - \text{rendement énergétique de l'échangeur})$$

De cette manière, au plus le rendement est meilleur, au plus le taux de renouvellement de référence est faible ce qui engendre des déperditions aérauliques plus faibles. Si le système de ventilation n'est pas pourvu d'un échangeur de chaleur, le rendement énergétique de ce dernier sera nul. Notons que le taux de renouvellement de l'air du système doit être au minimum de $0,3h^{-1}$ (cf. exemple à l'annexe 1).

2.2 Consommation de chauffage

Le besoin en chauffage des bâtiments représente le chauffage nécessaire pour garder la température intérieure à une température constante, et donc pour contrer les déperditions présentées ci-dessus. Cependant, toute installation de chauffage consomme plus d'énergie que ce qui est strictement nécessaire. Ces pertes d'énergie sont évaluées par le facteur « rendement ». Le rendement d'une installation exprime le rapport entre la quantité d'énergie produite par l'appareil et la quantité d'énergie réellement utilisée. Pour assurer la performance énergétique, il est important de veiller à ce que le rendement de l'installation soit le plus élevé possible.

La consommation de chauffage s'exprime de la manière suivante :

$$\text{Consommation de chauffage} = \frac{\text{Besoin de chauffage}}{\text{Rendement du chauffage}}$$

²⁶ La capacité thermique de l'air est la quantité de chaleur nécessaire pour élever de $1^\circ C$ la température d'un mètre cube d'air.

²⁷ Formule issue du Logiciel PHPP 2007 (onglet « besoin de chauffage »)

Par exemple, si nous considérons que le rendement de l'installation est de 80%, cela signifie que pour un besoin de chauffage de 4000 kWh, l'installation de chauffage va consommer 5000 kWh.

L'installation d'un chauffage est composée de 4 parties différentes : la production, la distribution, l'émission et la régulation du système. A chacune de ces étapes, de potentielles pertes de chaleur sont présentes. Ainsi, lors de l'étape de la production d'eau chaude, la chaleur contenue dans le combustible n'est pas entièrement transmise à l'eau. L'eau chaude perd ensuite une partie de sa chaleur en parcourant des locaux non chauffés. Lors de l'émission de la chaleur, une partie de cette dernière est directement perdue sans avoir pu profiter à la pièce (exemple : radiateur placé en dessous d'une fenêtre). Enfin, il apparaît que la chaleur est fournie à des moments inadéquats ou avec une puissance qui n'est pas toujours nécessaire.

Le rendement global du chauffage est obtenu par la multiplication des rendements de ces différents postes de consommation. Dans le cas d'un chauffage local, seuls les rendements de production et d'émission de l'appareil sont considérés. De manière générale, le rendement global d'une bonne installation atteint l'ordre de 80% alors que le rendement d'une ancienne installation approche les 58% dans le meilleur des cas²⁸.

2.3 Économies d'énergie

Il nous est à présent possible de calculer les économies d'énergie réalisées grâce à l'isolation thermique d'un bâtiment donné et à un système de ventilation adéquat. Elles correspondent à la différence entre la consommation de chauffage nécessaire pour un bâtiment non isolé et la consommation de chauffage pour ce même bâtiment une fois isolé et équipé d'un bon système de ventilation.

$$\text{Economies d'énergie annuelles} = \text{consommation de chauffage (bâtiment non isolé)} - \text{consommation de chauffage (bâtiment isolé)}$$

En intégrant l'ensemble des formules de ce chapitre, les économies d'énergie se définissent comme suit :

$$\text{Economies d'énergie} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{U_{iNI} * DJ_{NI} * S_i * a_i * 24h}{1000} + \frac{Tx_{NI} * V * 0.34 * DJ_{NI} * 24h}{1000} \right) - \left(\sum_{i=1}^n \frac{U_{iI} * DJ_I * S_i * a_i * 24h}{1000} + \frac{Tx_I * V * 0.34 * DJ_I * 24h}{1000} \right)}{\text{rendement}}$$

²⁸ Energie+, le chauffage. En ligne sur <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10903>.

3 INTRODUCTION A L'ANALYSE FINANCIERE

L'objectif principal de notre projet consiste à analyser la rentabilité de l'isolation thermique d'un bâtiment. Si l'on se base sur une vision strictement économique, la rentabilité d'un projet est fonction à la fois de l'investissement et des recettes générées. Ainsi, si l'on proposait à une personne d'investir dans un projet qui coûte aujourd'hui 1000 euros, et qui génère des recettes de 5000 euros dès l'année suivante, elle ne refuserait sans doute pas. Par contre, si on lui proposait d'investir dans un projet de même coût mais qui offre cette fois des recettes de 1001 euros deux ans plus tard, personne ne prendrait le risque d'investir. La question qui se pose ici est la suivante : « A partir de quel moment un projet d'isolation est-il rentable » ? Pour répondre à cette question, une analyse financière adaptée à notre projet d'isolation thermique sera réalisée dans la suite de ce mémoire. Il importe toutefois d'expliquer dans un premier temps, les diverses notions inhérentes à l'analyse financière.

Trois indicateurs financiers sont généralement utilisés lorsque l'on souhaite déterminer la rentabilité d'un projet :

- La valeur actuelle nette (VAN)
- Le taux de rendement interne (TRI)
- Le temps de retour sur investissement (TR)

Afin de mieux comprendre ces indicateurs, commençons par introduire au préalable deux notions importantes que sont le taux d'inflation et le taux d'actualisation.

Taux d'inflation et taux d'actualisation

Taux d'inflation

Le taux d'inflation est la dévaluation de l'argent provoquée par l'augmentation constante des prix pour les biens et services. Elle se présente sous forme de pourcentage et est mesurée annuellement au moyen de l'indice des prix à la consommation (IPC).

Taux d'actualisation

Dans l'analyse de la rentabilité d'un projet, soustraire le capital investi aux recettes générées par les économies d'énergie ne suffit pas. En effet, bien que les coûts des travaux d'isolation interviennent principalement lors de la première année, les recettes sont, elles, réalisées chaque année. C'est pourquoi, puisqu'un euro aujourd'hui ne vaut plus un euro demain, il est important de considérer la valeur temporelle de l'argent. Le taux d'actualisation, qui permet de tenir compte de l'évolution de la

valeur de l'argent, est utilisé en ce sens. Il permet ainsi de rendre comparables des flux financiers se produisant à des dates différentes, ce qui nous permettra de calculer la valeur réelle d'un projet.

La détermination du taux d'actualisation dépend de trois paramètres à savoir le taux d'inflation, le taux d'intérêt et la prime de risque. La prime de risque est ajoutée lorsque le projet repose sur de nombreuses incertitudes et traduit l'aversion au risque de l'investisseur.

Bien qu'il constitue un élément majeur de l'analyse financière, le taux d'actualisation reste un sujet très controversé en finance car difficilement déterminable. Le résultat obtenu dépendant directement du taux d'actualisation, une mauvaise estimation de ce dernier peut avoir des impacts importants sur la rentabilité du projet²⁹.

Le taux d'actualisation permet de calculer la valeur actualisée à partir des valeurs « futures » selon le calcul suivant :

$$v_0 = v_n (1+i)^{-n}$$

Où

- v_0 : la valeur actualisée
- v_n : la valeur constatée à l'année n
- n : le nombre d'années
- i : le taux d'actualisation

A titre d'exemple, si l'on considère un taux d'actualisation de 8%, un montant aujourd'hui de 1000 € vaut dans 5 ans 680 euros :

$$1000 (1+0.08)^{-5} = 680$$

Plus le taux d'actualisation est élevé, plus le montant actualisé diminue. De la même manière, plus on avance dans le temps, plus le montant actualisé diminue.

Indicateurs financiers

Maintenant que les notions importantes à notre compréhension ont été introduites, décrivons les indicateurs financiers permettant d'évaluer la rentabilité d'un projet.

²⁹ BREALEY R.A. et al., 2006, p.542.

Valeur actuelle nette

La valeur actuelle nette (VAN) est la différence entre la somme des économies annuelles actualisées sur une période de temps définie et le montant de l'investissement. La valeur actuelle nette est un des critères les plus utilisés en analyse financière pour évaluer si un projet est rentable. Si elle est supérieure à 0, le projet est considéré comme rentable puisqu'il génère de la richesse. Dans le cas inverse, le projet n'est pas rentable pour cette période de temps.

La valeur actuelle nette se calcule de manière générale comme suit :

$$\mathbf{VAN} = \sum_{k=1}^N V_k (1 + i)^{-k} - I_0$$

Où

- N : la durée de vie du projet
- V_k : la valeur à l'année « k »
- i : le taux d'actualisation
- I_0 : le coût de l'investissement

Pour rappel, l'équation $V_k (1 + i)^{-k}$ représente les économies actualisées pour l'année « k ».

Taux de rentabilité interne

Le taux de rentabilité interne (TRI) est le taux pour lequel il y a équivalence entre le montant de l'investissement et l'ensemble des économies annuelles actualisées. En d'autres termes, il s'agit du taux d'actualisation qui annule la valeur actuelle nette. Le TRI est également un outil de décision à l'investissement. S'il est inférieur au taux d'actualisation espéré, le projet n'est pas considéré comme rentable.

Même si le TRI permet de savoir si un projet est rentable, il est préférable d'utiliser la VAN comme critère de référence si nous souhaitons comparer la rentabilité entre différents projets. Ainsi, le projet qui aura la VAN la plus élevée sera le plus rentable.

$$\mathbf{VAN = 0 = \sum_{k=1}^N V_k (1 + \mathbf{TRI})^{-k} - I_0}$$

Où

- N : la durée de vie du projet
- V_k : la valeur à l'année « k »
- I_0 : le coût de l'investissement

Temps de retour sur investissement

Puisqu'en général, nous cherchons à récupérer notre capital investi le plus vite possible, le temps de retour sur investissement (TR) représente le nombre minimum d'année nécessaires à la récupération de son investissement grâce aux économies que l'on aura générées.

Ce nombre minimum d'années (=TR) est le premier « k » pour lequel les économies actualisées générées sont supérieures ou égales à l'investissement de départ :

$$\frac{I_0}{\sum_{k=1}^{TR} V_k (1+i)^{-k}} \leq 1$$

4 FACTEURS INTERVENANT DANS L'ANALYSE DE LA RENTABILITE DE L'ISOLATION THERMIQUE

La rentabilité dépend principalement de deux grands facteurs ; le coût de l'investissement et les économies réalisées grâce à une consommation d'énergie plus réduite. Il est en effet logique d'affirmer que moins l'investissement est coûteux, plus le projet est rentable rapidement. De la même manière, on peut facilement dire qu'une diminution drastique de notre consommation d'énergie offrira une rentabilité plus rapide à notre projet. Puisque nous utiliserons ces deux paramètres dans notre analyse financière, nous les détaillons davantage ci-dessous.

4.1 Le coût d'investissement

Le coût de l'investissement découle essentiellement de quatre éléments :

- Le coût de l'isolation
- Le coût du système de ventilation
- Les éventuelles primes
- Le crédit d'impôt

4.1.1 Le coût de l'isolation

Dans notre cadre d'analyse et quels que soient les travaux d'isolation à réaliser, nous supposons qu'un professionnel prend en charge ces travaux. Les coûts de l'isolation au mètre carré ci-dessous intègrent de ce fait le coût de la main d'œuvre³⁰.

Parois à isoler	Techniques d'isolation	Coût (€/m ²)
Toiture	Par l'intérieur	120-130
	Par l'extérieur	200
	Plancher	25
Mur	Par l'intérieur	120-150
	Mur creux	25
	Par l'extérieur	150-200
Sol	Par le bas	30- 80
	Par le haut	100-150
Fenêtre	Remplacement fenêtre + châssis	200-300

Tableau 4 : Coûts d'isolation selon les techniques utilisées

³⁰ Les coûts d'isolation indiqués ont été fournis par Monsieur François Radelet, responsable de la SPRL Isolation.

4.1.2 Le coût du système de ventilation

Les coûts relatifs au système de ventilation C (main d'œuvre et TVA compris) sont estimés à 2000 euros tandis que les coûts relatifs au système de ventilation D avec échangeur de chaleur sont évalués à 3000 euros³¹.

4.1.3 Les primes éventuelles

Dans cette section, nous détaillons le montant des primes accordées par mètre carré aux citoyens selon la région dans laquelle ils habitent.

Région wallonne

En Région wallonne, les primes dépendent du revenu du ménage. Celle-ci distingue trois catégories de revenu : les revenus dits précaires (revenu annuel maximum s'élevant à 12.900 euros pour une personne isolée et à 17.500 euros pour un couple), les revenus modestes (revenu annuel maximum s'élevant à 25.700 euros pour une personne isolée et à 32.100 euros pour un couple) et enfin les revenus élevés (revenu annuel supérieur à 25.700 euros pour une personne isolée et à 32.100 euros pour un couple).

Sur base de ces revenus, les différentes primes d'isolation appliquées en Région wallonne³² sont détaillées ci-dessous :

Parois à isoler	R (m²K/W)	Primes (€/m²)	Conditions
Isolation toiture	$3,5 \leq R < 4$	10, 12 ou 14 (selon revenu)	max.100m ² /maison/an
	$R \geq 4$	13, 15 ou 17 (selon revenu)	max.100m ² /maison/an
Isolation mur par l'intérieur	$R \geq 1,5$	20, 24 ou 28 (selon revenu)	max.120m ² /maison/an
Isolation mur par l'extérieur	$2 \leq R < 3,5$	30, 36 ou 42 (selon revenu)	max.120m ² /maison/an
	$R \geq 3,5$	50, 56 ou 62 (selon revenu)	max.120m ² /maison/an
Isolation creux du mur	$R \geq 1,5$	10, 12 ou 14 (selon revenu)	max.120m ² /maison/an
Isolation sol par la cave	$2 \leq R < 3,5$	10, 12 ou 14 (selon revenu)	max. 80m ² /maison/an
	$R \geq 3,5$	20, 22 ou 24 (selon revenu)	max. 80m ² /maison/an

³¹ L'estimation des coûts des systèmes de ventilation provient de sites internet consacrés à l'habitat tels que « habitos.be », « livios.be », « selfmatic.be ».

³² SPW – DGO4 – Portail de l'énergie en Wallonie, *Aides et primes – isolation ventilation*, 2014. En ligne <http://energie.wallonie.be/fr/isolation-ventilation.html?IDC=6390>.

Isolation sol sur dalle	$R \geq 1,5$	27, 30 ou 35 (selon revenu)	max. 80m ² /maison/an
Remplacement simple par double vitrage	$U \leq 2$	45, 50 ou 60 (selon revenu)	max 40m ² /maison/an et min 1000 € de facture

Tableau 5 : Montant des primes d'isolation accordées en Région wallonne

En cas d'isolation des murs, de la toiture et/ou du sol, une prime additionnelle de 3 €/m² est appliquée si les isolants choisis sont naturels.

Région flamande

Voici les différentes primes applicables en Région flamande³³ :

Paroi isolée	R (m²K/W)	Primes (€/m²)
Isolation toiture	$R \geq 3,5$	6
	$R \geq 4$	7
	$R \geq 4,5$	8
Isolation mur par l'extérieur	$R \geq 2$	15
Isolation creux du mur	$\lambda \leq 0.065$ W/mK	6
Isolation sol par la cave	$R \geq 1,2$	6
Remplacement simple par double vitrage haut rendement	$U < 1,1$ W/m ² K	12
	$U < 0,8$ W/m ² K	15

Tableau 6 : Montant des primes d'isolation accordées en Région flamande

Nous constatons, au contraire de ce qui se fait en Région wallonne, que les primes pour l'isolation ne sont pas plafonnées. De plus, le montant des primes est indépendant du revenu des demandeurs.

Région bruxelloise

Comme en Région wallonne, le montant des primes est fonction du revenu du ménage. Néanmoins, le barème des revenus dans cette région n'est pas équivalent à celui des Wallons. Ainsi, les ménages qui perçoivent un revenu dit précaire sont ceux dont le revenu est inférieur à 30.000 €/an alors que

³³ Vlaams Energieagentschap (VEA), Brochure premies 2014, 2014. En ligne <http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/premies/premiebrochure2014.pdf>.

ceux qui font partie des revenus modestes ont un revenu compris entre 30.000 €/an et 60.000 €/an. Les ménages qui gagnent plus de 60.000 €/an font quant à eux partie des revenus élevés.

Les différentes primes accordées en Région bruxelloise sont les suivantes³⁴ :

Paroi isolée	R (m ² K/W)	Primes (€/m ²)	Conditions
Isolation toiture	$R \geq 4$	15 , 20 ou 25 (selon revenu)	
Isolation mur par l'intérieur	$R \geq 2$	20, 25 ou 30 (selon revenu)	Max 50% de la facture
Isolation mur par l'extérieur	$R \geq 3,5$	40, 45 ou 50 (selon revenu)	Max 50% de la facture
Isolation creux du mur	$R \geq 1$	8, 10 ou 12 (selon revenu)	Max 50% de la facture
Isolation sol	$R \geq 2$ si dalle de sol $R \geq 3,5$ si plafond de cave ou vide ventilé	20, 25 ou 30 (selon revenu)	
Remplacement simple vitrage par double vitrage haut rendement	$U \leq 1,1$ W/m ² K (ou 1,2 W/m ² K si châssis existant)	10, 15 ou 20 (selon revenu)	- Si $0,6$ W/m ² K < $U \leq 1,1$: + 5 €/m ² de vitrage - Si $U \leq 0,6$ W/m ² K : + 10 €/m ² de vitrage

Tableau 7 : Montant des primes d'isolation accordées en Région bruxelloise

Dans le cas où l'isolant est naturel, une prime additionnelle de 10 €/m² est accordée en cas d'isolation des murs, de la toiture et/ou du sol.

4.1.4 Crédit d'impôt

Les coûts relatifs à l'isolation de la toiture peuvent se déduire fiscalement quelle que soit la région dans laquelle nous habitons. La déduction fiscale s'élève à 30% de la facture. Pour l'année de revenus 2014, le montant maximum de la réduction d'impôt équivaut à 3040 € par habitation³⁵.

³⁴ IBGE, *Mes primes à l'environnement*, 2014. En ligne

<http://www.bruxellesenvironnement.be/Templates/Particuliers/informer.aspx?id=12193&langtype=2060>

³⁵ Service Public Fédéral FINANCES, *Réduction d'impôt pour l'isolation du toit*, Bruxelles, 2014. En ligne http://finances.belgium.be/fr/binaries/Isolation%20du%20toit-2014_tcm307-216753.pdf.

4.1.5 Coût total d'investissement

Sur base de ces informations, nous pouvons définir le coût total d'investissement qui sera utilisé ultérieurement dans notre analyse financière. Ce dernier se calcule en additionnant les coûts liés à l'isolation à ceux du système de ventilation, auxquels nous retranchons les primes et la déduction fiscale de la toiture.

La formule est la suivante :

Coût investissement =

$$\sum_{i=1}^4 \text{Prix_isolation}_i * S_i + \text{cout_ventilation} - \sum_{i=1}^4 \text{Prime_isolation}_i * \min(S_i, \text{plafond}) - \min(\text{Prix_isolation}_{\text{toiture}} * S_{\text{toiture}} * 0,3 ; 3040)$$

Où

- Prix_isolation_i : Prix de l'isolation au mètre carré de la paroi « i » (c'est-à-dire les murs, la toiture, le plancher ou les fenêtres)
- S_i : Surface de la paroi « i »
- Coût_ventilation : Coûts liés à la ventilation
- Prime_isolation_i : Prime de l'isolation de la paroi « i »
- $\min(S_i, \text{plafond})$: Minimum entre la surface de la paroi « i » et le plafond de la prime accordée
- $\min(\text{Prix_isolation}_{\text{toiture}} * S_{\text{toiture}} * 0,3 ; 3040)$: Crédit d'impôt qui correspond à 30% du prix des travaux d'isolation de la toiture avec un montant maximum de 3040 euros

Le premier terme représente les coûts liés aux travaux d'isolation des différentes parois. Pour chaque paroi, nous multiplions le prix de l'isolation par la surface de la paroi à isoler. Le deuxième terme représente les frais liés à la ventilation. Le troisième terme comptabilise les primes octroyées. Ces dernières sont calculées en multipliant les primes d'isolation au mètre carré par la surface de la paroi ou du plafond si ce dernier est atteint. La dernière soustraction estime le crédit d'impôt équivalent à 30% des travaux d'isolation de la toiture pour lequel un montant maximum de 3040 euros est autorisé.

4.2 Les économies financières réalisées suite à des travaux d'isolation

Les économies financières obtenues suite à des travaux d'isolation et de la mise en place d'un système de ventilation adéquat dépendent quant à elles de trois éléments fondamentaux :

- La source d'énergie, le prix de l'énergie et l'évolution du prix de l'énergie
- Les économies d'énergies annuelles, elles-mêmes déterminées par de nombreux facteurs :
 - La surface des parois et le volume intérieur de la maison
 - Le taux de renouvellement de l'air avant et après isolation
 - Les degrés-jours avant et après isolation du bâtiment
 - Le coefficient thermique des parois non isolées et des parois isolées
 - Le rendement du chauffage
- Le taux d'actualisation

4.2.1 La source d'énergie, le prix de l'énergie et l'évolution du prix de l'énergie

Dans cette étude, nous nous focaliserons sur deux types de combustibles fossiles : le gaz naturel et le mazout. Ce choix est argumenté par l'importance de l'utilisation de ces deux sources d'énergie au sein des ménages belges. En effet, la consommation du gaz naturel et du mazout (de chauffage) en 2009 représente respectivement 40% et 33% de la consommation totale au sein des ménages belges³⁶.

En ce qui concerne leur prix, nous nous baserons sur le prix d'achat de l'énergie en mai 2014 pour un ménage belge. Nous remarquons que le gaz naturel est fonction du marché³⁴.

Source d'énergie	Prix (€/kWh)
Gaz naturel – Région wallonne	0,066
Gaz naturel – Région flamande	0,060
Gaz naturel – Région bruxelloise	0,062
Mazout de chauffage (livraison supérieure à 2000 litres)	0,081

Tableau 8 : Prix du gaz naturel et du mazout selon les régions

Bien que ces prix soient valables pour l'année 2014, ceux-ci vont très vite fluctuer au cours du temps puisqu'ils dépendent principalement de l'offre et de la demande. De plus, même si la corrélation n'est pas systématique, le prix de l'énergie dépend également de la hausse et de la baisse du dollar par rapport à l'euro. Si l'on prend l'exemple de 2009, « l'euro est passé de 1,3 dollar en mars [2009] à

³⁶ Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse, 2012.

1,5 dollar fin 2009. Dans le même temps, le baril de pétrole passait de 40 à 70 dollars le baril.»³⁷ Le prix de l'énergie est donc très volatile et difficile à estimer pour les prochaines années. Personne n'a ainsi pu présager l'augmentation considérable du prix de pétrole observée en 2007-2008 sous l'effet du krach financier mondial. Comme nous ne pouvons connaître les valeurs précises du prix de l'énergie dans les prochaines années, nous émettrons deux scénarios.

Scénario A (optimiste) : nous considérons que l'évolution des prix de l'énergie suit le taux d'inflation, évalué à 2,5%.

Scénario B (pessimiste) : nous nous basons sur le taux d'évolution du prix de l'énergie de ces cinq dernières années.

Pour estimer cette évolution, nous nous servons du taux de croissance annuel moyen (TCAM), lequel fournit une indication sur le taux d'évolution moyen d'une période donnée. Il se calcule comme suit :

$$TCAM = \left(\sqrt[n]{\frac{Valeur_{finale}}{Valeur_{initiale}}} - 1 \right)$$

Où n représente la période.

Ainsi, si nous considérons par exemple que la période est exprimée en année et que le montant du prix de l'énergie est passé de 0,065 euros/kWh en 2007 à 0,069 euros/kWh en 2012, le taux de croissance annuel moyen sur ces cinq années est donné par la formule :

$$TCAM = \left(\sqrt[5]{\frac{0,069}{0,065}} - 1 \right) \approx 0,012 = 1,2\%$$

En considérant le TCAM du prix de l'énergie sur les 5 dernières années, l'augmentation des prix du gaz naturel se situe autour de 6,3% par an (entre 2009-2014)³⁸. Quant au mazout, son augmentation est de 10,3% par an pour cette même période. Ces taux sont extrêmement élevés et il apparaît que le maintien de ces taux n'est envisageable que dans le pire des scénarios de volatilité des prix de l'énergie.

4.2.2 Les économies d'énergies annuelles

La surface des parois et le volume intérieur de la maison

Afin d'estimer les surfaces des parois et du volume intérieur de la maison, nous nous sommes basés sur deux types de maisons 4 façades. La première maison que nous avons sélectionnée est une

³⁷ IPF Energies Nouvelles, 2010.

³⁸ CECH Jean et al., 2014, p.12.

maison de type « fermette », alors que la deuxième est davantage une maison de type « villa ». D'autres types de logement, tel qu'une maison mitoyenne ou un appartement auraient également pu faire l'objet d'une étude. Cependant, au vu des nombreuses données à acquérir et des nombreuses analyses à réaliser, notre champ d'étude devait rester relativement limité. Etant donné que ce sont surtout les maisons 4 façades qui sont soumises à d'importantes déperditions de chaleur, nous avons jugé utile de ne traiter que ces dernières tout en les analysant selon deux styles d'architecture différents. Ci-dessous, nous présentons les caractéristiques relatives aux deux maisons sélectionnées, à savoir une maison de type « fermette » et une maison de type « villa ».

Maison de type « fermette »



Cette maison de type fermette est composée d'un étage, d'un grenier non aménagé et d'une cave. Ce type de maison est en général de taille assez importante. La longueur de la maison vaut 11 mètres, la largeur 8 mètres et la hauteur (toiture non comprise) 5,5 mètres. Le volume intérieur de la maison vaut 484m^3 . Quant au mur, il est construit en pierre.

Les surfaces des parois qui nous intéressent dans le cadre de notre étude sont les suivantes :

Parois à isoler	Surface (m^2)
Mur	169
Fenêtre	41
Sol	88
Toiture	115

Maison de type « villa »



Nous considérons dans un deuxième temps une maison plus moderne de type « villa » composée d'un seul étage. L'étage est donc sous les combles. La longueur de la maison vaut 13 mètres, la largeur 7 mètres et sa hauteur (toiture et donc 1^{er} étage non compris) 3 mètres. Le volume intérieur de la maison vaut 324m³. Le mur est quant à lui construit en briques.

Paroi	Surface (m ²)
Mur	98
Fenêtre	28
Sol	91
Toiture	111

Le taux de renouvellement de l'air avant et après isolation

Au vu de la littérature et de discussions avec quelques architectes, nous avons retenu comme taux de renouvellement pour les maisons anciennes 2, les maisons modernes non isolées 1 et enfin les maisons isolées 0,5³⁹.

Les degrés-jours avant et après isolation du bâtiment

Degrés-jours officiels

Le logiciel PHPP nous fournit les données climatiques mensuelles pour plusieurs régions belges : Uccle, Elsenborn, Florennes, Ostende et Saint-Hubert. Grâce à ces données climatiques, nous avons pu estimer les degrés-jours pour ces quelques régions que ce soit pour une maison isolée ou non isolée.

³⁹ Energie+, l'étanchéité à l'air. En ligne <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16838>.

Pour rappel, les degrés-jours se calculent de la manière suivante :

$$DJ = \sum_{m=1}^{12} NJ_m ((18^{\circ}\text{C} - \text{apports}) - \text{Température moyenne extérieure}_m)$$

Comme nous avons considéré que les apports solaires et internes variaient entre 2 et 2,5°C dans le cas d'une maison non isolée, les degrés-jours se calculent en soustrayant la température extérieure mensuelle moyenne à l'intervalle [15,5°C-16°C]. Dans le cas d'une maison isolée, les degrés-jours se calculent quant à eux en soustrayant la température extérieure mensuelle moyenne à l'intervalle [14°C-14,5°C] étant donné que les apports varient entre 3,5 et 4°C.

Région	Degrés-jours dans le cas d'une maison non isolée (Température de confort désirée – apports = [15,5°C-16°C])	Degrés-jours dans le cas d'une maison isolée (Température de confort désirée – apports = [14°C-14,5°C])
Florennes	2072-2255	1525-1707
Elsenborn	2101-2284	1554-1736
Uccle	2157-2339	1609-1792
Ostende	2229-2412	1682-1864
Saint-Hubert	2254-2437	1707-1889

Tableau 9 : Valeurs des degrés-jours en fonction de l'isolation du logement et de sa localisation géographique

En se basant sur ce tableau, il nous est possible de faire varier les degrés-jours pour les maisons non isolées entre 2070 et 2440, avec comme valeur de référence 2254 (moyenne observée). Nous estimons les degrés-jours des maisons isolées sur base de ces dernières valeurs sachant que la différence des apports entre une maison isolée et non isolée varie entre 1 et 2°C. Ainsi, la valeur des degrés-jours d'une maison isolée fluctue entre « *DJ maison non isolée -365 DJ* » et « *DJ maison non isolée - 730 DJ* » avec comme moyenne « *DJ maison non isolée - 548 DJ* ». En considérant que les apports valent 2,5°C pour une maison non isolée et 3,5°C pour une maison isolée, le calcul du différentiel des degrés-jours entre une maison non isolée et une maison isolée se calcule de la manière suivante :

*Différentiel*_{Degréjour}

$$= \sum_{m=1}^{12} NJ_m ((18^{\circ}\text{C} - 2,5^{\circ}\text{C}) - \text{Température moyenne extérieure}_m) - \sum_{m=1}^{12} NJ_m ((18^{\circ}\text{C} - 3,5^{\circ}\text{C}) - \text{Température moyenne extérieure}_m) = \sum_{m=1}^{12} NJ_m * 1 = 365$$

Degrés-jour revisités

En calculant les déperditions des parois d'une maison sur base du calcul officiel des degrés-jours, nous considérons que la température de confort thermique (=18°C) doit être satisfaite 24 heures sur 24. De ce fait, nous avons souhaité introduire un calcul revisité des degrés-jours afin de prendre en compte que dans certains ménages, les habitants baissent fortement le thermostat la journée lorsque la maison est inoccupée ou lorsqu'ils vont se coucher, ne chauffent pas les pièces inoccupées et préfèrent mettre un pull plutôt que d'augmenter le thermostat. Il serait dès lors intéressant d'analyser la valeur des degrés-jours pour ce genre de situations. Nous posons comme hypothèse qu'en moyenne, le ménage chauffe la maison afin d'avoir une température de confort thermique de 18°C pendant 10 heures. Le reste du temps, nous considérons que le ménage utilise de manière rationnelle l'énergie, à savoir qu'il baisse leur thermostat jusque 14°C lorsqu'il quitte la maison ou lorsqu'il décide d'aller se coucher.

Selon ces hypothèses, nous réajustons le calcul des degrés-jours :

$$DJ\text{-}revisités = \sum_{m=1}^{12} NJ_m ((14\text{ }^{\circ}\text{C} - \text{apports}) - \text{Température moyenne extérieure}_m) * \frac{14}{24} + \sum_{m=1}^{12} NJ_m ((18\text{ }^{\circ}\text{C} - \text{apports}) - \text{Température moyenne extérieure}_m) * \frac{10}{24}$$

Suivant les données de températures extérieures mensuelles dont nous disposons, les degrés-jours revisités varient entre 1217 et 1587 avec comme moyenne 1401 dans le cas d'une maison non isolée. Dans le cas d'une maison isolée, les degrés-jours revisités varient entre « *DJ maison non isolée -365 DJ* » et « *DJ maison non isolée - 730 DJ* » avec comme moyenne « *DJ maison non isolée - 548 DJ* ». Nous insistons sur le fait que ce calcul des degrés-jours ne correspond pas officiellement à la définition des degrés-jours. C'est pour cette raison que nous les appelons « degrés-jours revisités ».

Le coefficient thermique des parois non isolées et des parois isolées

Les coefficients thermiques varient fortement d'une maison à une autre, et d'un matériau à un autre. Dans le but de simplifier nos calculs, nous déterminerons des valeurs fixes à ces coefficients. Nous les avons déterminés sur base de la littérature⁴⁰, d'échanges avec des architectes et du seuil minimal obligatoire permettant la perception de primes. Notons que les coefficients thermiques des parois non isolées ont été choisis parmi les valeurs les plus faibles. Par conséquent, on peut s'attendre à des

⁴⁰ Energie+, *Le bilan thermique*. En ligne <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16807#c20934687>
EnerConsult SA Architecte/bureau d'étude. En ligne <http://www.enerconsult.be/fr/architecte-enerconsult.php>

Opti'em Conseil et Etude en Performance Énergétique des bâtiments, *amélioration de l'habitat : thermique du bâtiment*. En ligne <http://www.opti-en.com/batiment.html>.

coefficients plus élevés en réalité, ce qui engendrerait de moins bonnes performances thermiques et donc davantage de déperditions. Dans la même logique, les coefficients thermiques des parois isolées cette fois, ont été choisis parmi les plus élevés impliquant des performances relativement faibles par rapport à la réalité. La valeur de ces deux coefficients a donc été choisie sur base des extrêmes, si bien qu'une variation de ces coefficients s'approchant de la réalité rendrait le projet encore plus rentable.

Les coefficients thermiques choisis pour les différentes parois sont les suivants :

Mur

Paroi	Isolé /Non isolé	U (W/m²K)
Mur creux	Non isolé	1,3
Mur creux	Isolé	0,42
Mur plein brique	Non isolé	1,15
Mur plein brique	Isolé	0,31
Mur plein pierre	Non isolé	1,61
Mur plein pierre	Isolé	0,33

Plancher

Paroi	Isolé /Non isolé	U (W/m²K)
Plancher (sur cave, vide ventilé)	Non isolé	1,38
Plancher (sur cave, vide ventilé)	Isolé	0,3
Plancher (sur sol)	Non isolé	0,43
Plancher (sur sol)	Isolé	0,14

Toiture

Paroi	Isolé /Non isolé	U (W/m²K)
Toiture	Non isolé	2
toiture	Isolé	0,24

Fenêtre

Paroi	Isolé /Non isolé	Coefficient thermique (W/m ² K)
Fenêtre	Non isolée	3,5
Fenêtre	Isolée	1,1

Rendement du chauffage

Puisque le rendement de la plupart des installations de chauffage varie entre 60 et 80%, nous considérons dans notre travail que celui-ci se situe en moyenne autour de 70%. Précisons qu'il existe des installations telles que les pompes à chaleur qui peuvent avoir un rendement de 300 à 400%. Celles-ci ne sont pas prises en compte dans cette étude puisque nous nous concentrons uniquement sur le gaz naturel et le mazout de chauffage.

4.2.3 Le taux d'actualisation

Dans le cadre d'un projet d'isolation, la prime de risque peut être considérée comme quasi nulle puisque l'objectif premier n'est pas de faire du profit mais bien d'atteindre un seuil de rentabilité par rapport à une attitude stoïque (solution conventionnelle).

De nombreux économistes fixent le taux d'actualisation entre 4 et 8% voire plus dans certains cas. Cependant, dans le cadre d'un projet d'isolation, nous tentons d'intégrer les enjeux environnementaux et plus globalement les enjeux du développement durable, ce qui nous amène à donner une importance particulière aux générations futures. Pour remplir cette condition, le taux d'actualisation ne doit pas être trop élevé. Basé sur ces faits, il nous a semblé pertinent de fixer le taux d'actualisation à 3%, sachant que certains environnementalistes prônent l'existence d'un taux d'actualisation négatif⁴¹.

4.2.4 Calcul total des économies financières

En tenant compte du prix de l'énergie et de son évolution, des économies d'énergies annuelles ainsi que du taux d'actualisation, il nous est maintenant possible de calculer le total des économies financières réalisées à la suite de travaux d'isolation et de mise en place d'un système de ventilation adéquat.

⁴¹ BENHAÏM J., 1993.

La formule peut être présentée de façon exhaustive comme telle :

$$\text{Economie financière d'énergie} = \frac{(\sum_{i=1}^n \frac{U_{i,NI} * DJ_{NI} * S_i * a_i * 24h}{1000} + \frac{Tx_{NI} * V * 0.34 * DJ_{NI} * 24h}{1000} - \sum_{i=1}^n \frac{U_{i,I} * DJ_I * S_i * a_i * 24h}{1000} - \frac{Tx_I * V * 0.34 * DJ_I * 24h}{1000})}{\text{rendement}} * \text{Prix_energie}$$

Où

- $U_{i,NI}$: Coefficient de transmission thermique de la paroi i non isolée (W/m^2K)
- $U_{i,I}$: Coefficient de transmission thermique de la paroi i isolée (W/m^2K)
- DJ_{NI} : Degrés-jours pour un logement non isolé (K)
- DJ_I : Degrés-jours pour un logement isolé (K)
- S_i : Surface de la paroi i (m^2)
- a_i : facteur correctif de la paroi i
- Tx_{NI} : Taux de renouvellement de l'air de référence dans un logement non isolé (h^{-1})
- Tx_I : Taux de renouvellement de l'air de référence dans un logement isolé (h^{-1})
- V : Volume d'air intérieur du logement (m^3)
- $0,34$: Capacité thermique de l'air (Wh/m^3K)

Une fois que les économies d'énergie sont chiffrées, nous pouvons calculer les économies financières réalisées après un nombre X d'années :

Economie financière réalisée après x années

$$= \sum_{j=1}^x \text{economie_energie} * \text{prix_energie}_j * (1 + tx_actualisation)^{-j}$$

Le calcul de la valeur actuelle nette se réalise en retranchant le coût d'investissement aux économies financières:

$$VAN = - \text{Cout_isolation} + \sum_{j=1}^x \text{economie_energie} * \text{prix_energie}_j * (1 + tx_actualisation)^{-j}$$

5 APPLICATION DE L'ANALYSE FINANCIERE

Nous avons à présent en notre possession tous les outils nécessaires à la réalisation de notre analyse financière. Puisqu'il nous est impossible d'analyser l'entière des situations, commençons d'abord par poser notre cadre d'analyse. Sur base de ce dernier, nous exposerons les résultats obtenus.

5.1 Cadre d'analyse

Dans le but de déterminer notre cadre d'analyse, il est indispensable de définir certaines hypothèses. Celles-ci ont été choisies sur base de critères objectifs permettant de couvrir les situations les plus souvent rencontrées.

Les hypothèses choisies sont les suivantes :

- Le demandeur fait partie de la catégorie « revenu moyen »
- Le système de ventilation C est installé
- Les travaux d'isolation des murs s'effectuent par l'intérieur
- Les travaux d'isolation de la toiture s'opèrent par l'intérieur
- L'isolation du sol se réalise par le bas pour la maison type « fermette » et par le haut pour la maison type « villa »

Comme nous l'avons vu précédemment, certains de ces paramètres se sont vus attribuer un intervalle de valeur. C'est le cas des travaux d'isolation de la toiture par l'intérieur par exemple. Puisque nous souhaitons réaliser notre analyse financière sur base de paramètres déterministes, lesquels nous permettront d'obtenir une valeur actuelle nette fixe, nous devons allouer à chacun de nos paramètres stochastiques une valeur constante. Pour ce faire, nous prendrons la moyenne des valeurs de ces paramètres.

Paramètres	Valeurs stochastiques	Valeur fixée
Isolation de la toiture par intérieur	120-130 €/m ²	125 €/m ²
Isolation des murs par l'intérieur	120-150 €/m ²	135 €/m ²
Isolation des murs par l'extérieur	150-200 €/m ²	175 €/m ²
Isolation du sol par le bas	30-80 €/m ²	55 €/m ²
Isolation du sol par le haut	100-150 €/m ²	125 €/m ²
Remplacement des fenêtres et châssis	200-300 €/m ²	250 €/m ²

Degrés-jours officiels pour une maison non isolée	2070-2440 DJ	2254 DJ
Degrés-jours officiels pour une maison isolée	1340-2075 DJ	1706 DJ
Degrés-jours revisités pour une maison non isolée	1217-1587 DJ	1401 DJ
Degrés-jours revisités pour une maison isolée	487-1222 DJ	853 DJ
Rendement du chauffage	60-80%	70%

Tableau 10 : Attribution de valeur fixe aux paramètres stochastiques

Rappelons que pour ce qui est du taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout, deux scénarios avaient été envisagés :

- Un scénario A (optimiste) pour lequel le taux d'évolution du gaz naturel et du mazout s'élève à 2,5% par an.
- Un scénario B (pessimiste) pour lequel le taux d'évolution du gaz naturel et du mazout s'élève respectivement à 6,3% et 10,3%.

Sur base de ces différentes hypothèses, présentons les résultats de l'analyse financière pour les deux maisons qui ont été présentées au chapitre précédent.

5.2 Analyses financières appliquée à la maison de type fermette

Notre analyse financière se base à la fois sur les degrés-jours officiels, mais également sur les degrés-jours revisités. Elles se déroulent en deux temps ; nous visualiserons d'abord le coût de l'investissement et les économies d'énergie réalisées grâce à un projet d'isolation, pour enfin déterminer la valeur actuelle nette et le temps de retour sur investissement de notre projet.

5.2.1 Analyse financière sur base des degrés-jours officiels

Calculons tout d'abord l'investissement ainsi que les déperditions évitées dans une maison de type fermette sur base des paramètres définis précédemment.

Coût d'investissement et économies d'énergie

Les résultats obtenus sur base du calcul officiel des degrés-jours (2254 degrés-jours pour une maison non isolée ; 1706 pour une maison isolée) sont détaillés dans le tableau 11. Ceux-ci sont valables pour les trois régions de Belgique.

	Région wallonne	Région bruxelloise	Région flamande
Investissement (sans prime)	54280 €		
Prime	10380 €	10830 €	4988 €

Prime/investissement	19,1 %	20 %	9,2 %
Déperditions avant isolation	68896 kWh/an		
Déperditions après isolation	13362 kWh/an		
Déperditions évitées (=économies d'énergie)	55534 kWh/an		

Tableau 11 : Coût de l'investissement et économies d'énergie pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours officiels

Nos premières observations montrent que l'isolation thermique pour la maison de type fermette permet de réaliser une économie de chauffage de l'ordre de 55534 kWh par an, soit une diminution de plus de 80% de déperditions. En effet, les déperditions liées à cette maison avant le projet d'isolation s'élevaient à 68896 kWh alors qu'elles ne sont plus que de 13362 kWh après isolation. Soulignons que ces valeurs sont tout à fait cohérentes avec les consommations de chauffage moyennes observées en Belgique. Ces dernières varient entre 1500 et 4000 kWh/an dans le cas d'une maison passive, entre 3000 et 9000 kWh/an dans le cas d'une maison basse énergie, entre 8000 et 30000 kWh/an dans le cas d'une maison construite selon les normes actuelles et s'élèvent à plus de 30000 kWh/an dans le cas de maison mal isolée⁴².

Résultats de l'analyse financière

Dans le but de mesurer l'impact de l'évolution du prix de l'énergie, nous commencerons par prendre en compte une augmentation faible des prix de l'énergie (scénario A), pour enfin évaluer les résultats en cas d'envolée des prix des combustibles (scénario B).

SCENARIO A : Taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève à 2,5%						
	Région wallonne		Région bruxelloise		Région flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
VAN (15 ans)	8992 €	21013 €	6236 €	21462 €	-1209 €	15620 €
TRI	5,5%	8,6%	4,8%	8,7%	2,7 %	6,8 %
TR	13 ans	11 ans	14 ans	10 ans	16 ans	12 ans
VAN (20 ans)					14055 €	

Tableau 12 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours officiels (scénario A)

⁴² CREG, 2012, p1-3.

Nous observons dans ce premier scénario que la valeur actuelle nette (VAN) est plus élevée en Région wallonne et bruxelloise qu'en Région flamande, impliquant dès lors un temps de retour sur investissement plus faible. En effet, alors qu'il excède les 21000 euros en Wallonie et à Bruxelles pour les maisons se chauffant au mazout, il dépasse à peine les 15000 euros en Flandre. De la même manière, la différence est considérable en ce qui concerne les habitations équipées du gaz, si bien que le projet n'est toujours pas rentable en Flandre après 15ans (alors que le Wallon a déjà économisé 9000 euros et le Bruxellois plus de 6000 euros). Cela s'explique en grande partie par le montant des primes octroyées dans les deux premières régions, lesquelles sont nettement plus élevées qu'au nord du pays.

Puisque le taux d'actualisation choisi pour la VAN s'élève à 3%, prenant en compte la valeur de l'argent des années futures, les TRI obtenus nous confortent dans notre position puisque de manière générale, une variation à la hausse du taux d'actualisation (créée par exemple par une dévalorisation de l'argent) n'impacterait pas de façon significative le résultat du projet. En effet, à l'exception du scénario gaz en Région flamande, pour lequel le taux d'actualisation devrait valoir 2,7% pour que le projet commence à être rentable sur 15 ans, chaque projet reste rentable tant qu'il ne passe pas en dessous des 3%.

Enfin, si l'on s'en tient uniquement au retour sur investissement, celui-ci culmine à 16 ans pour les maisons situées dans la région où les primes sont les plus faibles et se chauffant avec le carburant le moins coûteux, alors qu'il tombe à 10 et 11 ans pour l'ensemble des maisons se chauffant au mazout en Régions bruxelloise et wallonne.

On dénote aussi que les logements équipés d'une chaudière au mazout s'avèrent être plus rapidement rentables que ceux disposant d'une chaudière au gaz naturel. Ceci s'explique par le simple fait que le prix du mazout est plus élevé que celui du gaz.

Comparons maintenant nos résultats à ceux du scénario B, lesquels sont détaillés ci-dessous :

SCENARIO B : Taux d'évolution du prix du gaz naturel du mazout s'élève respectivement à 6,3% et à 10,3%						
	Région wallonne		Région bruxelloise		Région flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
VAN (15 ans)	27515 €	77967 €	23637 €	78417 €	15631 €	72575 €
TRI	9,4 %	16,8 %	8,7 %	17 %	6,5 %	15 %
TR	11 ans	8 ans	11 ans	8 ans	12 ans	8 ans

Tableau 13 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours officiels (scénario B)

Comme on pouvait s'y attendre, les résultats sont plutôt similaires à ceux obtenus pour le scénario A. Soulignons tout de même que tous les projets sont maintenant rentables en moins de 15 ans, les ménages se chauffant au mazout obtenant même une rentabilité dès la 8^{ème} année. De plus, cette hausse du prix du gaz naturel et du mazout a un impact important sur la VAN à 15 ans, allant même jusqu'à tripler la valeur obtenue dans le premier scénario.

Sur base des résultats de ces deux scénarios, quatre conclusions sont à mettre en évidence pour la maison de type fermette :

- La VAN montre qu'un projet d'isolation est rentable en 15 ans, le gain financier grâce aux déperditions évitées étant relativement important.
- Plus les primes sont importantes, plus le projet est rentable rapidement.
- Plus le prix du gaz naturel ou du mazout augmente, plus le projet est rentable rapidement.

Afin de mieux comprendre l'impact de l'isolation sur les dépenses réalisées chaque année par un investisseur, étudions le cas d'un logement équipé d'un chauffage au gaz naturel dont le prix augmente chaque année de 6,3%. Le choix de ce cas d'étude se justifie par des résultats se situant dans la moyenne des scénarios explorés. Le graphique suivant nous donne une meilleure visibilité quant à l'évolution des dépenses réalisées lorsque l'on isole ou non son bâtiment. Les dépenses engendrées par une maison non isolée sont représentées par la courbe bleue, alors que celles découlant d'une maison isolée sont indiquées en rouge.

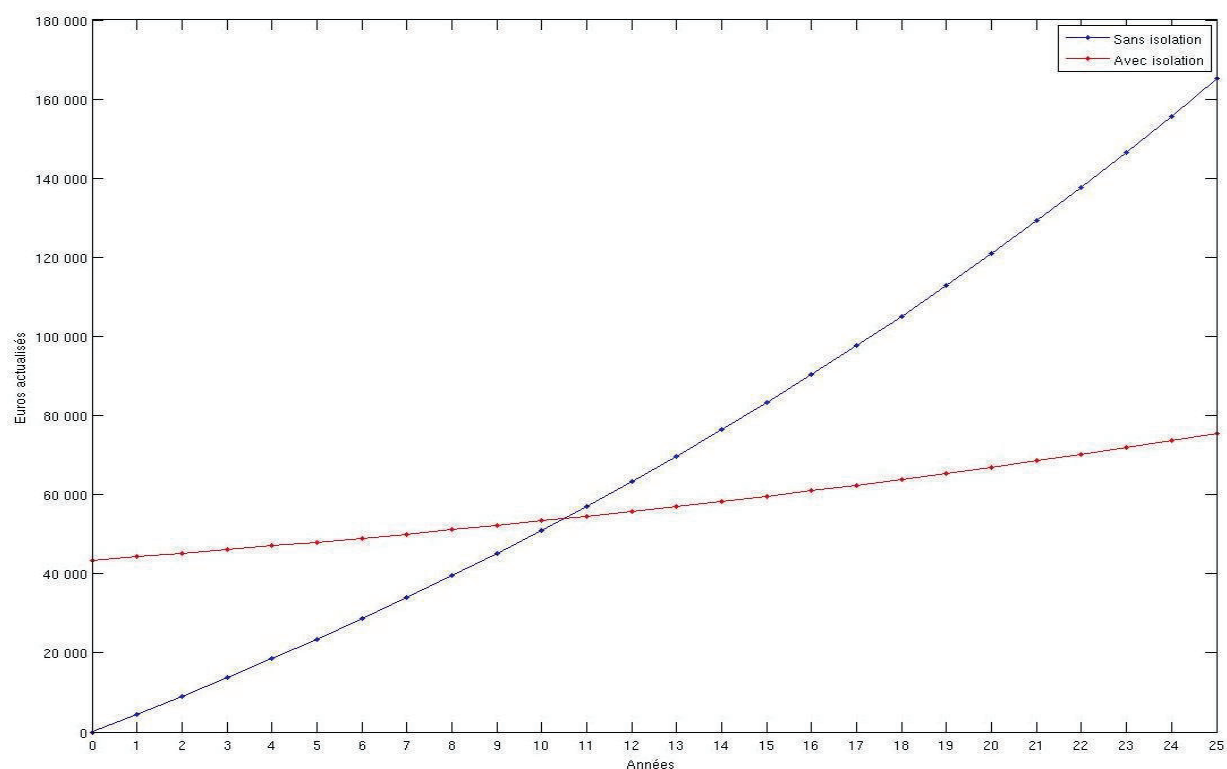


Figure 5 : Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ officiels)

A l'année 0, les dépenses effectuées (en rouge) correspondent à l'investissement des travaux d'isolation (primes comprises), soit 43 450 euros. On observe très facilement que le projet passe le seuil de rentabilité au milieu de la 10^{ème} année, et qu'il permet un gain évolutif au-delà de celle-ci. Isoler sa maison permet dès lors de faire de nombreuses économies.

5.2.2 Analyse financière à partir des degrés-jours revisités

Passons à présent à l'analyse financière sur base des degrés-jours revisités. Nous considérons ici que les paramètres utilisés sont similaires à ceux utilisés dans l'analyse financière intégrant les degrés-jours officiels.

Economies d'énergie

Puisque les coûts d'investissement demeurent inchangés, nous ne les précisons pas à nouveau. Les résultats pour l'économie d'énergie sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

	Région Wallonne	Région Bruxelloise	Région Flamande
Dépense avant isolation	42823 kWh/an		
Dépense après isolation	6680 kWh/an		

Déperditions évitées	36142 kWh/an
-----------------------------	--------------

Tableau 14 : Economie d'énergie pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours revisités

Si l'on considère qu'une personne chauffe son logement en moyenne dix heures par jour à 18 degrés et quatorze heures par jour à 14 degrés, les déperditions évitées pour une maison de type fermette s'élève à 36142 kWh/an. Bien que cette valeur reste conséquente, cela représente 35% de moins que les 55534 kWh/an calculés à partir de la méthode des degrés-jours officiels.

Résultats de l'analyse financière

Si l'on applique la méthode des degrés-jours revisités au scénario A, nous obtenons les résultats suivants :

SCENARIO A : Taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève à 2,5%						
	Région Wallonne		Région Bruxelloise		Région Flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
VAN (15 ans)	-9477 €	-1654 €	-11114 €	-1204 €	-17999 €	-7046 €
TRI	0%	2,5%	-0,6%	2,6%	-2,4%	1,1%
TR	20 ans	16 ans	21 ans	16 ans	25 ans	18 ans
VAN (20 ans)	1449 €	11756 €	-849 €	12206 €	-8065 €	6364 €

Tableau 15: Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours revisités (scénario A)

En comparaison aux résultats obtenus précédemment, plus aucun projet n'est rentable en 15 ans. Le temps de rentabilité s'allonge même jusqu'à 25 ans. Cela s'explique principalement par la diminution importante de déperditions évitées.

Les autres conclusions restent les mêmes que pour l'analyse financière basée sur les degrés-jours officiels, à savoir que les habitations se chauffant au mazout restent davantage rentable que les autres, et que les faibles primes en Région flamande ont un impact négatif sur la rentabilité des projets.

Observons maintenant le détail des résultats du scénario B.

SCENARIO B : taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève respectivement à 6,3% et à 10,3%						
	Région Wallonne		Région Bruxelloise		Région Flamande	
	Scénario	Scénario	Scénario	Scénario	Scénario	Scénario

	gaz	mazout	gaz	mazout	gaz	mazout
VAN (15 ans)	2578 €	35412 €	210 €	35862 €	-7040 €	30020 €
TRI	3,7 %	10,3 %	3,1 %	10,5 %	1,2 %	8,7 %
TR	15 ans	11 ans	15 ans	10 ans	17 ans	11 ans
VAN (20 ans)					12107 €	

Tableau 16 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type fermette sur base des degrés-jours revisités (scénario B)

De manière similaire au scénario A, la diminution des déperditions évitées engendre une diminution importante de la valeur ajoutée nette, impliquant une augmentation du temps de rentabilité. Notons cependant que tous les scénarios sont rentables sur une période de 17 ans maximum.

Sur base des résultats issus de l'analyse financière basée sur les degrés-jours revisités, ajoutons une conclusion pour la maison de type fermette :

- Plus les déperditions évitées sont importantes, plus le projet est rentable rapidement.

Etudions à présent les dépenses actualisées d'une maison isolée et non isolée, lorsque le logement est équipé d'un chauffage au gaz naturel dont le prix augmente chaque année de 6,3%.

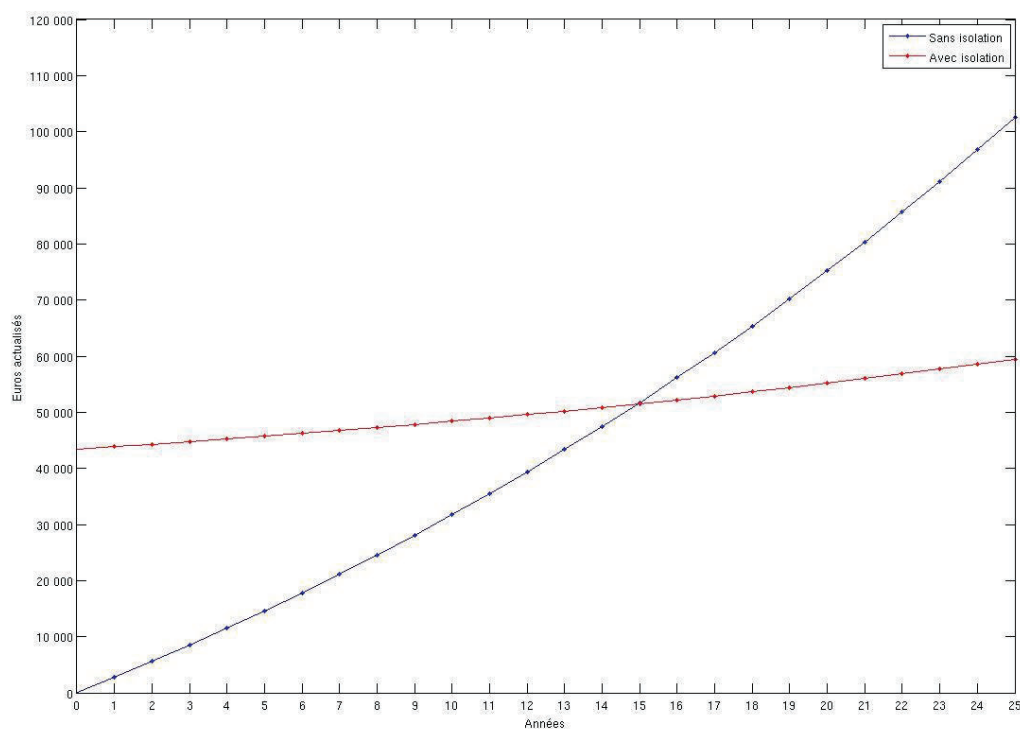


Figure 6 : Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ revisités)

Puisque les déperditions évitées sont 35% moins élevées que lorsque le ménage chauffe 24h/24 son habitation à une température moyenne de 18 degrés, le seuil de rentabilité est uniquement atteint lors de la 15^{ème} année (contre la 10^{ème} année pour les degrés-jours officiels).

5.3 Analyses financières appliquée à la maison de type villa

Pour rappel, la maison de type villa est moins imposante que la maison de type fermette. La surface de ses parois et son volume intérieur sont également moins élevés.

5.3.1 Analyses financières à partir des degrés-jours officiels

Coût d'investissement et économies d'énergie

Nous présentons ci-dessous les résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa selon les valeurs officielles des degrés-jours. Ils sont résumés dans le tableau suivant :

	Région Wallonne		Région Bruxelloise		Région Flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
Investissement (sans prime)	47480 €					
Prime	9549 €		8130 €		4237 €	
%prime/investissement	20,1 %		17,1 %		8,9 %	
Déperditions avant isolation	41610 kWh/an					
Déperditions après isolation	8098 kWh/an					
Déperditions évitées	33512 kWh/an					

Tableau 17 : Coût de l'investissement et économies d'énergie pour la maison de type villa sur base des degrés-jours officiels

Les déperditions évitées restent importantes ; elles s'élèvent à 33512 kWh/an, soit une diminution de plus de 80% par rapport aux déperditions déclarées avant l'isolation du bâtiment. Néanmoins, elles restent inférieures à la maison de type fermette. Ceci s'explique principalement par une surface habitable moins élevée dans ce type d'habitation.

Résultats de l'analyse financière

Etudions maintenant les résultats de l'analyse financière dans le cas du scénario A :

SCENARIO A : Taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève à 2,5%						
	Région Wallonne		Région Bruxelloise		Région Flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
VAN (15 ans)	-6013 €	1241 €	-9366 €	-178 €	-14227 €	-4071 €
TRI	0,83 %	3,4 %	-0,3 %	2,9 %	-1,8 %	1,7 %
TR	18 ans	15 ans	20 ans	16 ans	23 ans	17 ans
VAN (20 ans)	4119		151	12257	-5016	8364

Tableau 18: Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours officiels (scénario A)

En comparaison à la maison de type fermette, on observe directement un allongement du temps de retour sur investissement, laquelle dépasse largement les 15 ans. En effet, il semblerait qu'une surface habitable réduite et qu'une faible évolution du prix du gaz naturel et du mazout ait un impact négatif sur le temps de rentabilité d'un projet d'isolation. Les wallons tirent tout de même leur épingle du jeu, sans doute grâce aux primes plus élevées au sud du pays.

De la même manière, les calculs du scénario B aboutissent aux résultats du tableau ci-dessous :

SCENARIO B : Taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève respectivement à 6,3% et à 10,3%						
	Région Wallonne		Région Bruxelloise		Région Flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
VAN (15 ans)	5165 €	35611 €	1134 €	34192 €	-4065 €	30299 €
TRI	4,6 %	11,3 %	3,3 %	10,8 %	1,84 %	9,5 %
TR	14 ans	10 ans	15 ans	10 ans	17 ans	11 ans
VAN (20 ans)					13690	

Tableau 19 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours officiels (scénario B)

Si dans les années à venir les prix de l'énergie continuent à grimper, le projet d'isolation reste évidemment très rentable, puisque le temps de retour sur investissement est d'au maximum 17 ans. Par contre, si l'évolution du prix de l'énergie devait suivre l'inflation comme c'est le cas pour le scénario A, il faudrait compter environ cinq années supplémentaires avant que le projet ne soit rentable.

Le graphe ci-dessous présente les dépenses actualisées d'une maison isolée et non isolée, lorsque le logement est équipé d'un chauffage au gaz naturel dont le prix augmente chaque année de 6,3%.

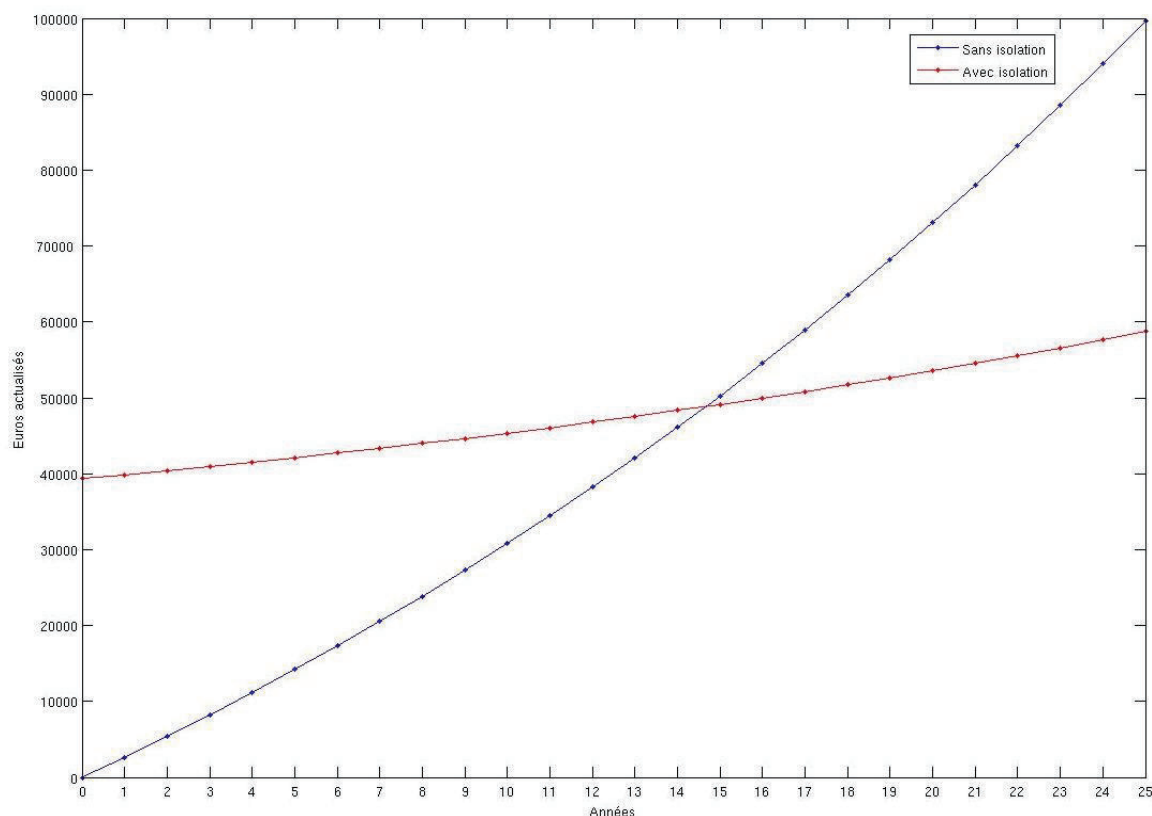


Figure 7: Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ officiels)

Bien que le retour sur investissement annuel soit moins élevé que pour la maison de type fermette, ce projet permet de faire des économies non négligeables dès la 15^{ème} année.

5.3.2 Analyses financières à partir des degrés-jours revisités

Coût d'investissement et économies d'énergie

Comme cela a été fait pour la maison de type fermette, réalisons le même exercice en nous basant sur les degrés-jours revisités.

	Région Wallonne		Région Bruxelloise		Région Flamande	
	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout	Scénario gaz	Scénario mazout
Déperditions avant isolation	25863 kWh/an					
Déperditions après	4048 kWh/an					

isolation	
Déperditions évitées	21814 kWh/an

Tableau 20 : Coût de l'investissement et économies d'énergie pour la maison de type villa sur base des degrés-jours revisités

Nous obtenons un résultat semblable à celui obtenu pour la maison de type fermette, avec une diminution des déperditions supérieure à 80%.

Résultats de l'analyse financière

Les résultats financiers se basant sur le scénario A sont les suivants :

SCENARIO A : Taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève à 2,5%						
VAN (15 ans)	-17155 €	-12433 €	-19833 €	-13852 €	-24355 €	-17744 €
TRI	-4 %	-1,8 %	-5 %	-2,2 %	-6,3 %	-3,2 %
TR	29 ans	23 ans	32 ans	24 ans	37 ans	27 ans
VAN (20 ans)	-10559 €	-4338 €	-13637 €	-5757 €	-18360 €	-9650 €

Tableau 21 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours revisités (scénario A)

Aucun des scénarios proposés n'est rentable sur une période de 15 ans. Au contraire, se comporter de façon responsable (ne pas chauffer quand on est absent par exemple) semble avoir un impact négatif sur le temps de rentabilité d'un projet d'isolation.

Les résultats sur base du scénario B sont quant à eux détaillés ci-dessous :

SCENARIO B : taux d'évolution du prix du gaz naturel et du mazout s'élève respectivement à 6,3% et à 10,3%						
VAN (15 ans)	-9878 €	9940 €	-12997 €	8521 €	-17741 €	4628 €
TRI	-0,4%	5,7%	-1,5%	5,3%	-2,8%	4,2%
TR	19 ans	13 ans	21 ans	14 ans	23 ans	15 ans
VAN (20 ans)	2834 €		-1056 €		-6184 €	

Tableau 22 : Résultats de l'analyse financière pour la maison de type villa sur base des degrés-jours revisités (scénario B)

On observe une rentabilité sous les 15 ans pour les maisons chauffées au mazout, alors que celles au gaz naturel peinent à descendre sous les 20 ans.

On en arrive à la conclusion que pour ce genre de maison, le projet d'isolation reste rentable si le prix de l'énergie suit la même croissance que ces cinq dernières années. Par contre, dans le cas où le prix de l'énergie n'augmente que très peu, le projet d'isolation n'est rentable qu'après 23 voire 37 ans

selon que le ménage se chauffe au mazout ou au gaz, et habite en Région wallonne, flamande ou bruxelloise.

Présentons maintenant les dépenses actualisées d'une maison isolée et non isolée, lorsque le logement est équipé d'un chauffage au gaz naturel dont le prix augmente chaque année de 6,3%.

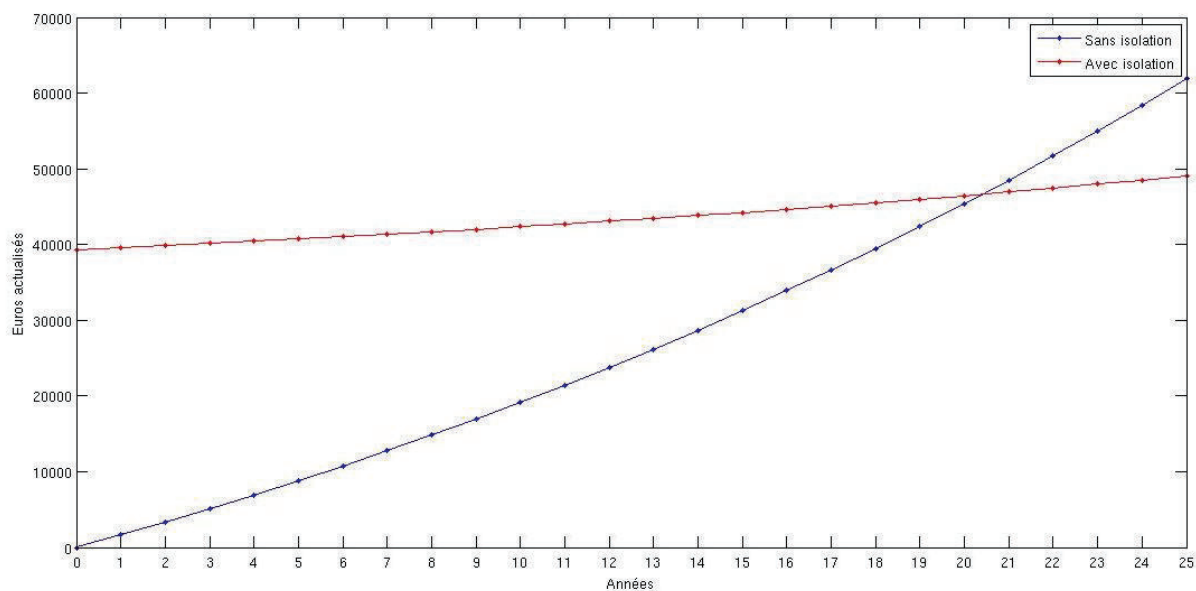


Figure 8 : Dépenses totales actualisées avec ou sans isolation (scénario B - Région bruxelloise - gaz naturel – DJ revisités)

Dans ce cas, le retour sur investissement annuel s'avère beaucoup moins élevé que lorsque le ménage chauffe 24h/24 son habitation. C'est pour cette raison que le seuil de rentabilité est uniquement atteint après sa 20^{ème} année (contre la 15^{ème} année pour les degrés-jours officiels).

6 ANALYSE DE SENSIBILITE PAR LA SIMULATION MONTE CARLO

Dans le chapitre précédent, nous avons réalisé une analyse financière en prenant des valeurs fixes pour l'ensemble des paramètres utilisés. Cependant, la prise en compte de la variabilité de certains d'entre eux a toute son importance si l'on veut évaluer son impact sur la rentabilité de l'isolation. Nous avons par exemple fixé la valeur du rendement de l'installation de chauffage à 70%. Mais qu'en est-il de la rentabilité du projet si cette valeur venait à évoluer ?

Afin de prendre en compte cette variabilité, procédons à une analyse de sensibilité par la simulation Monte Carlo.

6.1 Description de la méthode Monte Carlo

La simulation Monte Carlo permet d'apprécier l'influence des fluctuations des différentes variables d'entrée sur un projet. Pour ce faire, elle substitue une distribution de probabilité⁴³ à chaque variable d'entrée stochastique pour ensuite opérer un grand nombre de tirages aléatoires selon leur distribution de probabilité, avec pour objectif d'évaluer la distribution de probabilité des issues possibles. A chaque simulation, les variables stochastiques sont donc susceptibles de prendre des valeurs différentes selon leur distribution de probabilité. De cette manière, la simulation Monte Carlo indique ce qui pourrait se produire et dans quelle mesure. Ainsi, nous pouvons par exemple estimer la distribution de la valeur actuelle nette ou du taux de rentabilité interne selon la variabilité de certaines variables d'entrées. Sur base de l'analyse de sensibilité par les simulations Monte Carlo, nous serons aptes à déterminer à la fois les paramètres qui influencent le plus le projet d'isolation, mais aussi ceux qui n'ont guère d'influence. Nous serons alors en mesure de savoir quelle(s) variable(s) joue(nt) le plus grand rôle dans la rentabilité de l'isolation.

6.2 Distributions de probabilité

Dans notre étude, les variables d'entrée stochastiques sont réparties selon deux types de distributions:

Une distribution uniforme : Toutes les valeurs prises par la variable ont une chance égale de se réaliser. Il faut simplement définir la valeur minimum et la valeur maximum.

⁴³ Une distribution de probabilité (ou loi de probabilité) associe une probabilité à un ensemble de valeurs.

Dans notre étude, le prix de l'isolation de la toiture par l'intérieur suit par exemple une distribution uniforme avec comme valeur minimale 120 euros/m², et comme valeur maximale 130 euros/m².

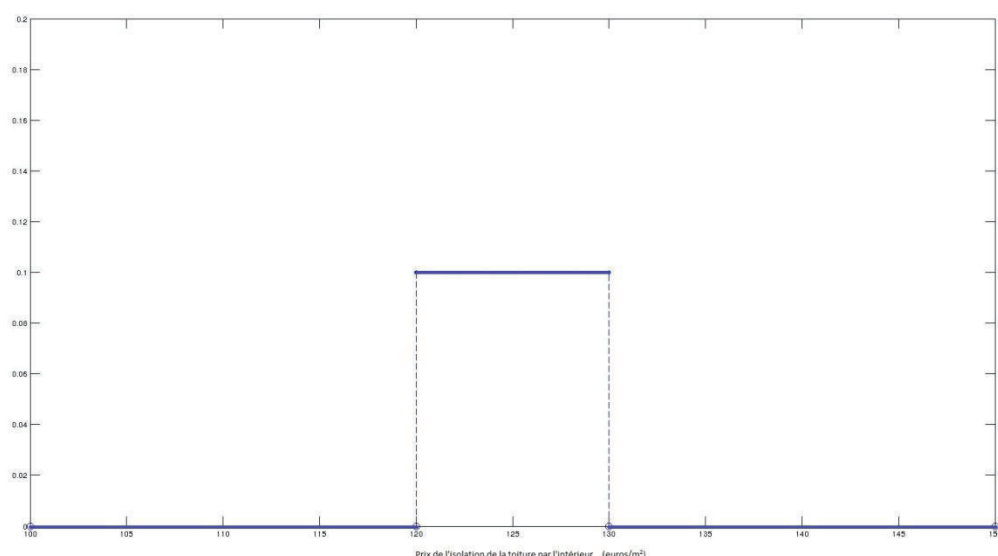


Figure 9 : Distribution uniforme du prix de l'isolation de la toiture par l'intérieur

Une distribution normale : Cette distribution est très connue car elle résume de nombreuses distributions statistiques observées. Elle est définie par l'espérance et l'écart type.

Pour information, l'espérance (μ) est la valeur pour laquelle il y a autant de valeur inférieure et de valeur supérieure. Concernant l'écart-type (σ), il est intéressant de le caractériser en évaluant la proportion de valeurs qui se disperse autour de l'espérance. Ainsi 68% des valeurs sont comprises dans la plage $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$, 95% des valeurs sont comprises dans la plage $[\mu - 2\sigma; \mu + 2\sigma]$ et 99% des valeurs sont comprises dans la plage $[\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma]$. De manière à mieux intégrer ce concept, nous le présentons ci-dessous pour la loi normale de moyenne 0 et d'écart-type 1 :

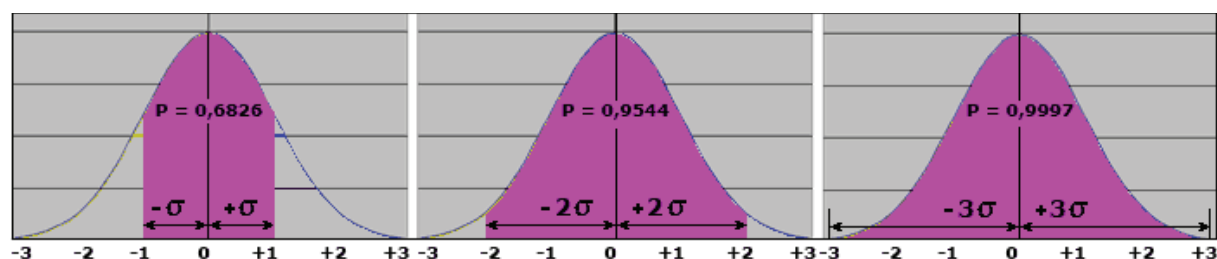


Figure 10 : Dispersion de la proportion des valeurs autour de la moyenne pour la loi normale ($\mu=0$; $\sigma=1$)

Dans notre étude, nous considérons par exemple que le rendement de l'installation de chauffage suit une loi normale de moyenne 70 et d'écart-type 5,11.

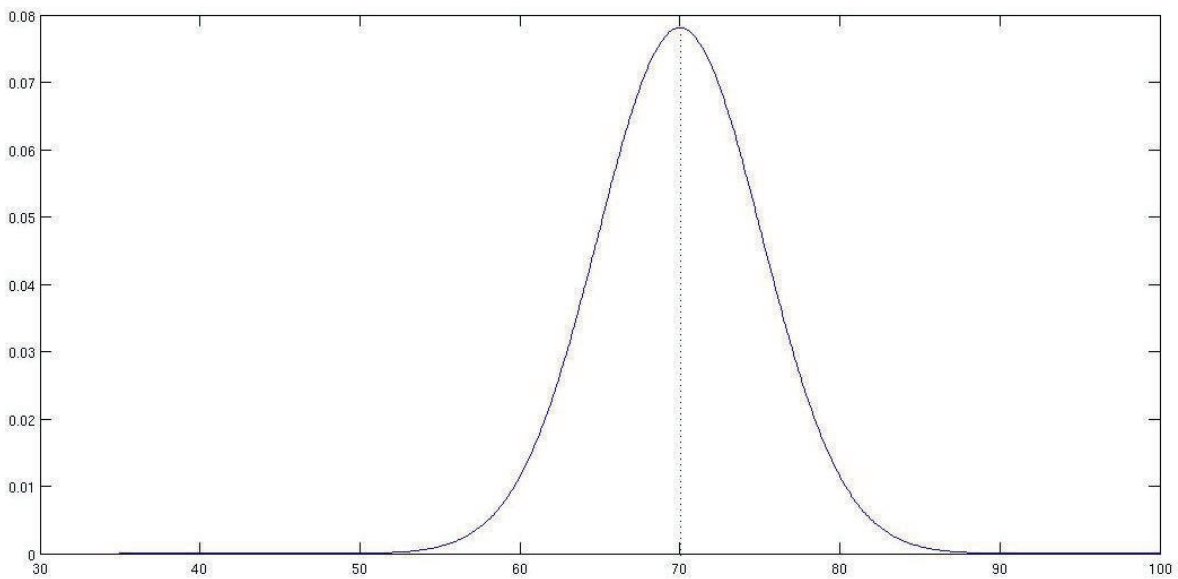


Figure 11 : Distribution normale du rendement de l'installation de chauffage

Dans 95% des cas, le rendement de l'installation vaut entre 59,78 et 80,22% [$\mu - 2\sigma = 70 - 10,22$; $\mu + 2\sigma = 70 + 10,22$].

Listons maintenant, pour chacun des paramètres stochastiques, les distributions choisies.

Paramètres stochastiques		Loi de probabilité	Valeurs
Prix de l'isolation de la toiture par l'intérieur		Uniforme	Valeur minimale = 120 €/m ² ; valeur maximale = 130 €/m ²
Prix de l'isolation des murs	Par l'intérieur	Uniforme	Valeur minimale = 120 €/m ² ; valeur maximale = 150 €/m ²
	Par l'extérieur	Uniforme	Valeur minimale = 150 €/m ² ; valeur maximale = 200 €/m ²
Prix de l'isolation du sol	Par le bas	Uniforme	Valeur minimale = 50 €/m ² ; valeur maximale = 60 €/m ²
	Par le haut	Uniforme	Valeur minimale = 100 €/m ² ; valeur maximale = 150 €/m ²
Prix de l'isolation des fenêtres		Uniforme	Valeur minimale = 200 €/m ² ; valeur maximale = 300 €/m ²
Prix de l'énergie		Uniforme	Valeur minimale = 0,06 €/kWh ; valeur maximale = 0,081 €/kWh
Taux d'évolution du prix du gaz naturel		Uniforme	Valeur minimale = 2,5% ; valeur maximale = 6,3%
Taux d'évolution du prix du mazout		Uniforme	Valeur minimale = 2,5% ; valeur maximale = 10,3%
Prime / Investissement		Uniforme	Valeur minimale = 5% ; valeur maximale = 25%
Degrés-jours d'une maison non isolée		Uniform	Valeur minimale = 1197 ; valeur maximale = 2440 ;

Différentiel de degrés-jours entre une maison non isolée et une maison isolée	Uniforme	Valeur minimale = 365 ; valeur maximale = 730 ;
Rendement du chauffage	Normale	Moyenne = 70% ; écart type = 5,11

Tableau 23 : Caractéristiques des distributions des paramètres stochastiques

Les distributions de certains paramètres sont triviales, puisqu'elles ont été définies de cette manière dans le troisième chapitre. Ainsi, nous avons indiqué par exemple que le prix de l'isolation pour la toiture (par l'intérieur) variait entre 120 et 130 euros du mètre carré.

Par contre, certaines distributions nécessitent quelques explications.

- Au vu du prix du gaz naturel qui est au minimum de 0,06 €/kWh et du prix du mazout qui est de 0,081 €/kWh, nous avons souhaité faire varier le prix de l'énergie (quelle qu'elle soit) entre ces deux valeurs. Grâce à cette variation de prix, nous serons en mesure d'évaluer l'impact potentiel qu'a le prix de l'énergie en 2014 sur la rentabilité de l'isolation.
- Le ratio prime/investissement varie généralement entre 5 et 25% pour toutes régions confondues. Ceci est le résultat de 1000 simulations.

6.3 Résultats de l'analyse de sensibilité selon les simulations Monte Carlo

Le logiciel utilisé pour réaliser les simulations Monte Carlo est le logiciel *@risk 6.0* développé par Palisade Corp. Celles-ci ont été réalisées 5000 fois afin d'obtenir des résultats les plus homogènes possibles.

6.3.1 Résultats de la maison type fermette

Ci-dessous, nous présentons les résultats de l'analyse de sensibilité pour la maison de type fermette.

MAISON TYPE FERMETTE		
Investissement sans prime	Min	32 880 €
	Max	83 159 €
	Moyenne	57 599 €
	Ecart type	12 100 €
Dépenses évitées	Min	24 731 kWh
	Max	78 105 kWh
	Moyenne	43 050 kWh
	Ecart type	8 677 kWh
VAN (15 ans)	Min	-47 083 €
	Max	93 079 €
	Moyenne	6 829 €
	Ecart type	19 607 €
TRI (15 ans)	Min	-7,6 %
	Max	25,9 %

	Moyenne	5,7 %
	Ecart type	5 %
VAN (20 ans)	Min	-39 193 €
	Max	170 034 €
	Moyenne	31 153 €
	Ecart type	28 534 €
TR	Min	6 ans
	Max	37 ans
	Moyenne	14 ans
	Ecart type	4 ans

Tableau 24 : Résultat de l'analyse de sensibilité par simulations Monte Carlo pour la maison de type fermette

Les résultats sont plutôt satisfaisants puisqu'en moyenne, le projet d'isolation est rentable sur 14 ans. Par contre, selon certaines valeurs des paramètres, il faut parfois attendre 37 ans pour récupérer l'investissement de départ.

L'analyse de sensibilité permet également de savoir dans quelle proportion la valeur actuelle nette sur 15 ans est supérieure à zéro. Il s'avère que dans 68,8% des cas, la VAN sur 15 ans est supérieure à zéro (cf. Annexe 2). Par ailleurs, dans 92,4% des cas, la valeur actuelle nette sur 20 ans est supérieure à zéro, ce qui signifie que dans plus de 9 cas sur 10 le projet est rentable sur une période de 20 ans (cf. Annexe 3).

Enfin, l'analyse de sensibilité évalue l'influence de chaque variable d'entrée sur la valeur actuelle nette au moyen des coefficients de corrélation.

Ci-dessous, nous présentons la valeur de ces coefficients de corrélations pour la VAN sur 15 ans :

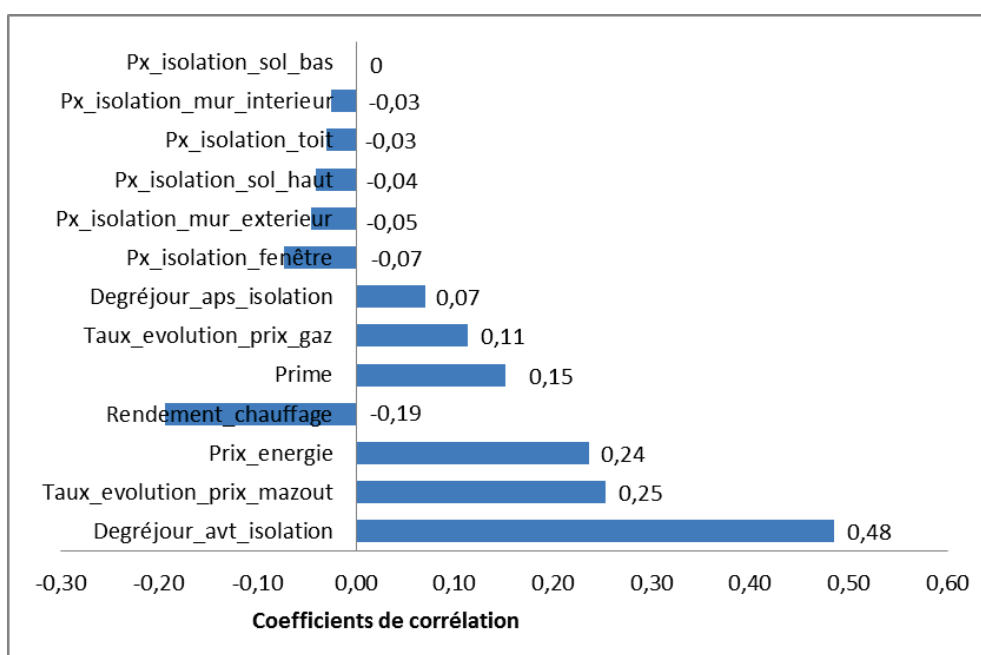


Figure 12 : Coefficients de corrélation des paramètres d'entrée pour la VAN sur 15 ans pour la maison de type fermette

Il en ressort que la valeur des « degrés-jours avant isolation » influence fortement la valeur actuelle nette. Plus la valeur des degrés-jours est élevée, plus vite le projet d'isolation est rentable. Dans un second temps, il apparaît que le taux d'évolution du prix du mazout, le prix de l'énergie et le rendement influencent de manière significative la valeur actuelle nette. Les variables restantes ont quant à elles un coefficient de corrélation inférieur ou égal à 0,15, ce qui reste une influence marginale.

6.3.2 Résultats de la maison type villa

A présent, nous procédons à l'analyse de sensibilité pour la maison de type villa.

MAISON TYPE VILLA		
Investissement sans prime	Min	25 806 €
	Max	71 764 €
	Moyenne	46 230 €
	Ecart type	8 381 €
Dépenses évitées	Min	15 297 kWh
	Max	47 087 kWh
	Moyenne	27 200 kWh
	Ecart type	5 300 kWh
VAN (15 ans)	Min	-36 799 €
	Max	44 372 €
	Moyenne	-3 499 €
	Ecart type	11 846 €
TRI (15 ans)	Min	-9,6%
	Max	20,1%
	Moyenne	1,8%
	Ecart type	4%
VAN (20 ans)	Min	-32 453 €
	Max	94 502 €
	Moyenne	12 110 €
	Ecart type	17 871 €
TR	Min	7 ans
	Max	44 ans
	Moyenne	18 ans
	Ecart type	5 ans

Tableau 25 : Résultat de l'analyse de sensibilité par simulations Monte Carlo pour la maison de type villa

Même si les valeurs actuelles nettes sont moins élevées et que le temps de retour sur investissement est plus long en comparaison à la maison de type fermette, les résultats sont encourageants puisqu'en moyenne le projet d'isolation est rentable sur 14 ans. En complément d'information, l'Annexe 4 informe que le projet d'isolation est rentable après 15 ans dans 46,5% des cas. Dans la même logique, le projet d'isolation est rentable dans 74% des cas après 20 ans (cf. Annexe 5).

Quant aux coefficients de corrélation, ils sont représentés ci-dessous :

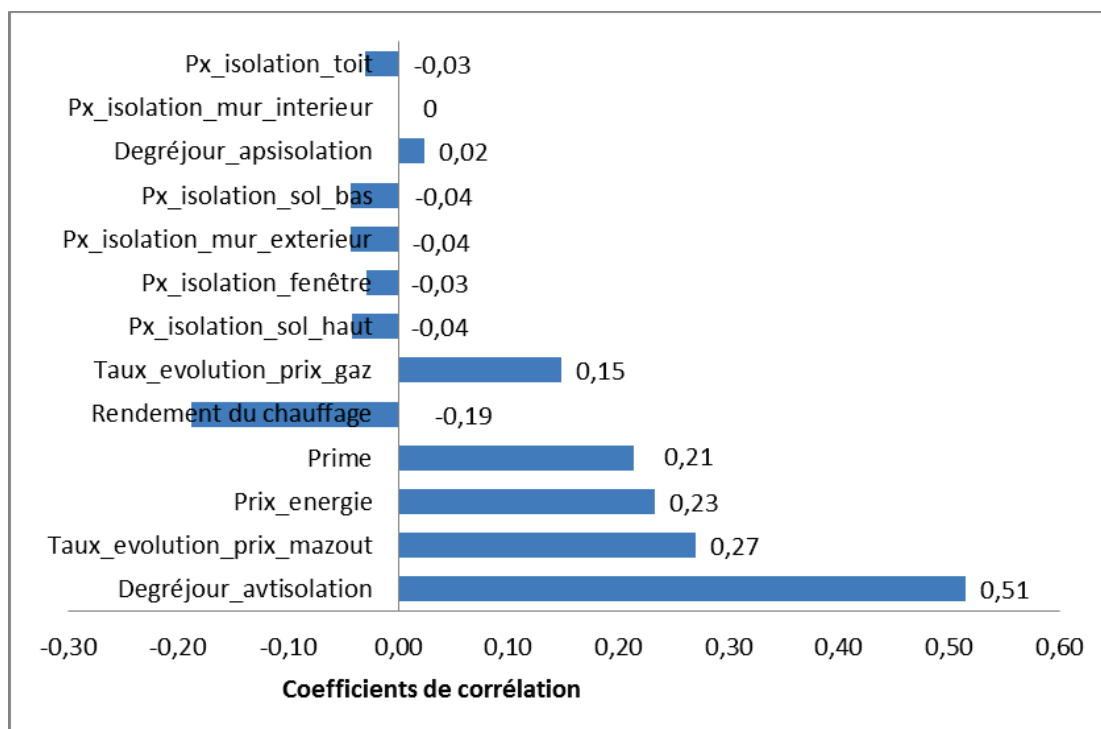


Figure 13 : Coefficients de corrélation des paramètres d'entrée pour la VAN sur 15 ans pour la maison de type villa

Parmi les cinq premiers coefficients de corrélation significatifs, quatre d'entre eux sont similaires à ceux soulignés lors de la maison de type fermette. Il s'agit des degrés-jours avant isolation, du taux d'évolution du prix du mazout, du prix de l'énergie et du rendement du chauffage. Une cinquième variable, dont la valeur de son coefficient de corrélation n'est pas négligeable, est le montant de la prime. Ainsi, la prime a également une influence significative sur la rentabilité de l'isolation dans le cas de la maison de type villa.

7 RECAPITULATIFS DES FACTEURS INFLUENCANT LA RENTABILITE DE L'ISOLATION THERMIQUE

Dans les deux chapitres précédents, nous nous sommes attelés à présenter les résultats de l'analyse financière et de l'analyse de sensibilité selon la méthode de Monte-Carlo. Il s'est avéré que ces résultats fluctuaient en fonction de nombreux paramètres (prix de l'énergie, primes octroyées, etc.). Ce chapitre a pour but de mettre l'accent sur ceux qui stimulent un tant soit peu la prise de décision d'isoler et ceux qui au contraire ont peu d'influence sur la rentabilité du projet.

Dans le premier cas, nos analyses ont retenu quatre catégories de paramètres susceptibles d'avoir une influence significative sur la prise de décision d'isoler un bâtiment ; les degrés-jours, le prix de l'énergie, le taux d'évolution du prix de l'énergie et le rendement. D'un autre côté, la catégorie relative aux coûts de l'isolation semble n'influencer que très peu la rentabilité de l'isolation thermique. Enfin, les primes ont quant à elles une influence sur la rentabilité de l'isolation, mais cette dernière est plutôt réduite.

7.1 Paramètres avec une influence significative sur la décision d'isoler

Les degrés-jours

Comme nous l'avons observé précédemment, la valeur des degrés-jours, et principalement celle avant isolation, a un impact considérable sur la rentabilité du projet. Ainsi, lors de la réalisation de l'analyse financière, il a été démontré que le temps de retour sur investissement pouvait être jusqu'à deux fois plus long en fonction de la valeur des degrés-jours⁴⁴. Ce point a été mis en évidence de façon indiscutable lors de l'analyse de sensibilité grâce au relevé des coefficients de corrélation entre la valeur actuelle nette et les degrés-jours avant l'isolation d'un logement.

Sachant que les degrés-jours sont calculés en fonction de la température moyenne extérieure, on peut donc dire que la valeur de ces derniers varie en fonction de la localisation géographique du logement. Ainsi, un projet d'isolation à Saint-Hubert sera plus vite rentable qu'un projet d'isolation à Florennes étant donné que la température moyenne extérieure à Saint-Hubert est en général plus élevée qu'à Florennes.

⁴⁴ Par exemple, dans le cas de la maison type fermette équipée d'une chaudière au mazout, le projet d'isolation est rentable après 8 ans en Région wallonne si les degrés-jours valent 2254 pour une maison non isolée et 1706 pour une maison isolée. Par contre, si les degrés-jours valent 1401 pour une maison non isolée et 873 pour une maison isolée, le projet d'isolation n'est rentable qu'après 16 ans.

Dans les calculs de notre analyse financière, nous avons également considéré que la valeur des degrés-jours pouvait diminuer si le ménage ne restait que très peu de temps chez lui, diminuait le thermostat lorsqu'il allait se coucher et éventuellement ne chauffait pas les pièces inoccupées. C'est ce que nous avons appelé le calcul « revisité » des degrés-jours. Dans ce cas, la quantité de déperditions évitées grâce à l'isolation thermique sur base de ce calcul s'en voyait diminuée, ce qui avait pour conséquence un temps de retour sur investissement nettement plus long.

Enfin, un troisième facteur peut venir influencer la valeur des degrés-jours, à savoir le réchauffement climatique. Il se peut en effet qu'à l'avenir, la température extérieure moyenne augmente, ce qui aurait pour conséquence une diminution des degrés-jours et donc des déperditions évitées moins élevées. Dans le cas du réchauffement climatique, le temps de retour sur investissement serait dès lors plus long.

Ces trois facteurs, qu'il s'agisse de la localisation géographique, du mode de vie du ménage ou du réchauffement climatique, ont une influence sur la valeur des degrés-jours et de ce fait sur le temps de retour sur investissement.

Le prix de l'énergie

La différence entre le prix du mazout et celui du gaz s'est nettement fait ressentir lors de l'analyse financière de la rentabilité de l'isolation. En effet, un projet d'isolation thermique a une valeur actuelle nette plus élevée lorsque le logement est équipé d'une chaudière au mazout. En d'autres termes, le projet d'isolation thermique est plus rapidement rentable lorsque le ménage se chauffe au mazout.

Le taux d'évolution du prix de l'énergie

Le taux d'évolution du prix de l'énergie a une influence considérable sur la rentabilité du projet d'isolation thermique. Si le prix de l'énergie augmente dans des proportions aussi importantes que ces cinq dernières années, le projet d'isolation est évidemment rentable plus rapidement. Dès lors, en l'absence de renseignements sur le futur taux d'évolution du prix de l'énergie, la meilleure chose à faire consiste à se protéger de toute éventuelle volatilité des prix. Dans cette optique, il est conseillé d'opter pour une isolation thermique plutôt que d'encaisser d'éventuels coûts exorbitants d'énergie.

Le rendement

Les analyses de corrélation ont révélé que le rendement de l'installation de chauffage impacte la rentabilité d'un projet d'isolation. Dès lors, plus le rendement de l'installation de chauffage est faible, plus vite le projet sera rentable. Dans le cas où le rendement d'un système de chauffage est très

faible, en complément des travaux d'isolation, il est souhaitable d'envisager le remplacement complet de sa chaudière.

7.2 Paramètre ayant une influence modérée sur la décision d'isoler

Les primes

De manière triviale, plus les primes accordées sont élevées, plus vite le projet d'isolation est rentable. Néanmoins, bien que les primes accordées aux habitants de la Région wallonne représentent parfois le double des primes accordées aux habitants en Région flamande, le temps de retour sur investissement ne s'en voit de manière générale réduit que d'un an. Cependant, les résultats issus de l'analyse de sensibilité soulignent que les primes influencent quelque peu la rentabilité. C'est pourquoi nous pouvons dire que les primes permettent d'accélérer la rentabilité d'un projet d'isolation, sans pour autant que ce dernier ne soit conditionné par le montant de celles-ci.

7.3 Paramètre ayant peu d'influence sur la décision d'isoler

Les coûts d'isolation

Si l'on prend comme postulat que l'on base nos calculs sur une même technique d'isolation (exemple : isoler la toiture par le haut), l'analyse des coefficients de corrélation révèle que les coûts d'isolation n'influencent que très peu la valeur actuelle nette d'un projet. Ainsi, si l'isolation du toit par le haut est de 130 euros le mètre carré plutôt que 120 euros le mètre carré, cela n'impactera que très faiblement la rentabilité de l'isolation. C'est pour cette raison qu'il est important de prendre en compte l'ensemble des propriétés des isolants avant de jeter son dévolu sur le moins coûteux.

8 AVANTAGES QUALITATIFS DE L'ISOLATION THERMIQUE

L'analyse financière ne tient compte, comme son nom l'indique, que des aspects financiers du projet d'isolation thermique. Cependant, il est indispensable de ne pas oublier lorsque l'on décide d'investir dans l'isolation de prendre en considération les avantages qualitatifs. Nous en avons listé trois :

1. Réduction des émissions de CO₂
2. Valeur ajoutée du bien immobilier
3. Meilleur confort thermique

8.1 Réduction des émissions de CO₂

Dans ce travail, nous avons constaté que l'isolation thermique permettait de diminuer de manière significative les déperditions d'énergie d'un logement. C'est pourquoi nous pouvons affirmer que ces économies d'énergie ont un impact certain sur l'environnement étant donné la quantité non négligeable de CO₂ émise dans l'atmosphère suite à la combustion d'énergie fossile.

Le gain annuel en termes d'émissions de CO₂ est calculé de la manière suivante :

$$\text{Émissions de CO}_2 \text{ évitées par an} = \text{nombre de kWh économisés par an} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{an}} \right) * \text{émissions de CO}_2 \text{ des combustibles} \left(\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} \right)$$

Le nombre de kWh économisés par an a été inventorié pour la maison type « villa » et la maison type « fermette » dans le cinquième chapitre. Ce nombre varie selon que l'on considère que la température de 18°C doit être atteinte 24 heures sur 24 (scénario « degrés-jours officiels ») ou selon que le ménage baisse fortement le thermostat à certains moments (scénario « degrés-jours revisités »). Quant aux émissions de CO₂ émises par les combustibles, nous nous basons sur les données issues de la CWaPE. Pour les calculer, cette dernière ne se focalise pas uniquement sur les émissions libérées lors de la combustion du combustible mais totalise également les émissions induites par la préparation (extraction, raffinage, conditionnement), le transport, la mise à disposition du combustible et éventuellement le traitement des déchets issus de la combustion. Toutefois, elle ne prend pas en compte l'énergie grise contenue dans les équipements de production. Le tableau suivant reprend les coefficients d'émissions de CO₂ définis par la CWaPE⁴⁵ :

⁴⁵ CWaPE ; ADEME, 2010, p59 ; HUART, 2007, p32.

Type d'énergie	Coefficient d'émissions de CO ₂ (gCO ₂ /kWh)
Gaz naturel	251
Mazout	306

Tableau 26 : Coefficient d'émissions de CO₂

Sur base de ces informations, il nous est possible de calculer le gain annuel des émissions de CO₂ grâce à l'isolation thermique :

Type de maison	Scénario degrés-jours	Type d'énergie	Emissions de CO ₂ évitées annuellement
Maison type fermette	Scénario degrés-jours officiels (déperditions évitées = 55534 kWh/an)	Gaz naturel	13,9 tCO ₂ /an
		Mazout	17 tCO ₂ /an
	Scénario degrés-jours revisités (déperditions évitées = 36142 kWh/an)	Gaz naturel	9,1 tCO ₂ /an
		Mazout	10,1 tCO ₂ /an
Maison type villa	Scénario degrés-jours officiels (déperditions évitées = 33512 kWh/an)	Gaz naturel	8,4 tCO ₂ /an
		Mazout	10,3 tCO ₂ /an
	Scénario degrés-jours revisités (déperditions évitées = 21814 kWh/an)	Gaz naturel	5,5 tCO ₂ /an
		Mazout	6,7 tCO ₂ /an

Tableau 27 : Emissions de CO₂ évitées annuellement

En sachant que le parc immobilier belge compte 852 373 maisons 4 façades érigées avant 1981⁴⁶ et qu'une maison isolée émet en moyenne 10tCO₂ de moins qu'une maison non isolée, l'hypothèse que 20% de ces habitations réalise un projet d'isolation thermique permettrait d'éviter l'émission annuelle de 1,7MtCO₂.

Etant donné que le secteur du chauffage est responsable d'environ 18,3Mt d'émissions de CO₂⁴⁷, isoler 20% du parc immobilier permettrait de diminuer de 9% les émissions relatives au secteur du chauffage. Augmenter davantage le nombre de maisons 4 façades, de maisons mitoyennes ou d'appartements à isoler permettrait aisément de réduire encore plus ces émissions. Par ailleurs, une fois sa maison isolée, le choix d'une installation de chauffage appropriée (poêle au bois, pompe à chaleur, ...) permet également de diminuer sa consommation d'énergie.

Enfin, il nous a semblé pertinent de déterminer le montant à investir pour la réduction d'une tonne de CO₂, par l'intermédiaire d'un indicateur appelé « efficacité environnementale à l'euro investi ». Ce dernier est calculé de la manière suivante :

$$\text{Efficacité environnementale à l'euro investi} = \text{Investissement brut} / \text{Emissions évitées}$$

Sachant que l'isolation thermique a une durée de vie d'au minimum 25 ans⁴⁸ et que le gain annuel d'émission de CO₂ s'élève en moyenne à 10tCO₂, la quantité d'émissions évitées correspond à 250 tCO₂. Quant à l'investissement brut, il s'élève grossièrement à 50 000 euros selon les résultats des analyses financières décrits au chapitre 5. La valeur de notre indicateur atteint dès lors 200 euros/tCO₂ évitées.

À titre de comparaison, l'installation de panneaux photovoltaïques d'une puissance de 3,8 kWc coûte environ 9000 euros et permet d'économiser 37tCO₂ sur 25 ans⁴⁹. Le ratio investissement/émissions évitées s'élève dès lors à 243 euros/tCO₂ évitées.

Tous ces chiffres démontrent que le projet d'isolation thermique permet un gain non négligeable d'émissions de CO₂ dont l'analyse financière de la rentabilité de l'isolation thermique ne tient pas compte. Notons cependant que les gains des émissions de gaz à effet de serre sont intrinsèquement monétarisées au moyen des primes. En effet, afin de parvenir à une réduction des émissions de CO₂, les régions fournissent aux citoyens des incitants, l'un d'eux étant la prime de l'isolation.

⁴⁶ SPF Economie, 2009, p5

⁴⁷ United Nations Framework Convention on Climate Change, Greenhouse Gaz Inventory Data, <http://unfccc.int/di/DetailedByParty/Event.do?event=go>.

⁴⁸ Nous verrons dans la suite du mémoire que les isolants ont au minimum une durée de vie de 25 ans.

⁴⁹ APERE Asbl, Simulateur financier photovoltaïque, <http://www.apere.org/index/node/139>.

8.2 Valeur ajoutée du bien immobilier

Lors de l'achat d'un logement, les acheteurs potentiels s'informent de plus en plus sur les performances énergétiques des logements. Pour rappel, une étude menée par la Commission Européenne avait d'ailleurs démontré l'impact positif du certificat PEB sur les prix de vente⁵⁰. Les acheteurs sont en effet conscients que leur consommation d'énergie, principalement dépendante du niveau d'isolation de la maison aura un impact non négligeable sur leur frais mensuels. Ainsi, une maison isolée présente l'avantage de voir sa consommation d'énergie réduite et par conséquent sa note énergétique. Cependant, cet avantage n'est en aucun cas reflété dans l'analyse financière de l'isolation thermique. Une manière de le quantifier pourrait être d'introduire dans l'équation de l'analyse financière la valeur ajoutée du bien immobilier grâce à l'isolation thermique. Toutefois, la détermination de cette valeur reste très complexe.

8.3 Amélioration du confort thermique

Pour rappel, le confort thermique est déterminé par la température de l'air ainsi que par celle des parois. Puisque l'isolation thermique permet d'augmenter la température des parois, réduisant ainsi l'écart entre la température de l'air et des parois, cela engendre un meilleur confort. Cependant, l'amélioration du confort est quant à elle purement qualitative, et n'intervient donc pas dans l'analyse de la rentabilité de l'isolation. Une piste pour l'inclure pourrait être de s'inspirer de la technique de l'évaluation contingente⁵¹. On utilise l'évaluation contingente pour attribuer la valeur à des éléments d'écosystème hors-marché (exemple : pollution sonore des avions). Pour ce faire, elle identifie les « consentements à payer et à recevoir des individus » via l'administration de questionnaires et de mise en situation. Typiquement, l'individu interrogé devra monétariser son consentement à subir la pollution sonore des avions. En s'inspirant de cette démarche, nous pourrions évaluer le consentement des gens à payer pour avoir un meilleur confort par l'intermédiaire de questionnaires auto administrés et inclure ce consentement dans notre analyse financière.

⁵⁰ MUDGAL Shailendra et al., 2013, p115.

⁵¹ BAULER T., 2014, p24-34.

9 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES ISOLANTS

Dans les chapitres précédents, nous avons vu qu'il était souhaitable d'obtenir pour chaque paroi le plus petit coefficient thermique. Pour rappel, la manière d'obtenir un coefficient thermique plus faible consiste à juxtaposer des matériaux isolants à la paroi. Lors de ses travaux d'isolation, il est donc judicieux de choisir le matériau isolant qui a les meilleures propriétés thermiques, c'est-à-dire qui a la résistance thermique la plus élevée. Cependant, dans une démarche d'éco-construction, il est essentiel de ne pas choisir le matériau d'isolant uniquement sur base de ses performances thermiques. En effet, d'autres propriétés toutes aussi importantes doivent intervenir dans les critères de choix⁵² :

- Propriétés techniques : le comportement au feu et à l'humidité, la perméabilité à la vapeur d'eau, le type de mise en œuvre, la stabilité dans le temps, l'isolation acoustique, etc.
- Propriétés environnementales : l'impact énergétique de la production ou du transport, l'impact sur la santé, le traitement en fin de vie, etc.
- Propriétés économiques : le prix du matériau, de sa mise en œuvre et de sa maintenance

Nous pouvons distinguer les isolants en trois grandes catégories :

- Les isolants de synthèse : polyuréthane, polystyrène
- Les isolants en fibre minérale : laine de verre/roche, perlite expansée, béton cellulaire
- Les isolants en fibre animale ou végétale : bois, chanvre, paille, laine de mouton, laine de lin

Notons que chacun de ces isolants a un impact environnemental décroissant selon la catégorie dans laquelle ils se trouvent (impact élevé pour les isolants de synthèse, moyen pour les isolants en fibre minérale et faible pour les isolants en fibre animale ou végétale). Les isolants de synthèse sont très défavorables d'un point de vue environnemental car ils sont produits à partir du pétrole, soit une ressource limitée et non renouvelable. Les procédés de fabrication sont donc énergétiquement coûteux. De plus, ces deux isolants (polyuréthane et polystyrène) contiennent des substances telles que des CFC qui appauvrissent la couche d'ozone. Les laines de verre ou de roche proviennent de matériaux abondants présents en Europe et sont partiellement composées de matériaux recyclés, ce qui diminue leur impact environnemental. Cependant, leur procédé de fabrication reste très énergivore. Les isolants en fibre végétale ou animale combinent quant à eux un matériau abondant et/ou renouvelable et un procédé de fabrication peu énergivore. Leur élimination se réalise par

⁵² Bruxelles Environnement, 2010, p11.

compostage ou par valorisation thermique. D'un point de vue strictement environnemental, ce sont eux qu'il faut privilégier.

Afin d'évaluer de manière globale l'impact environnemental des isolants, nous arborons deux concepts, à savoir l'énergie grise et la classification de NIBE.

Energie grise

Une première manière d'évaluer l'impact environnemental des matériaux est d'évaluer leur énergie grise. L'énergie grise représente la quantité d'énergie nécessaire à l'ensemble du cycle de vie d'un matériau : la production, l'extraction et le transport des matières premières, la transformation des matières, la fabrication du matériau, la mise en œuvre, l'utilisation et le recyclage. Ci-dessous, nous quantifions l'énergie grise des principaux isolants⁵³ :

Isolant	Energie grise (kWh/m ³)
Laine de lin	38 à 57
Cellulose	50 à 158
Polystyrène expansé	500
Polyuréthane	974
Laine de roche	123 à 1006
Laine de verre	242 à 1344

Tableau 28 : Energie grise des isolants

Parmi ces isolants, la laine de lin semble la moins énergivore. Par contre, la laine de roche et la laine de verre qui sont deux isolants fréquemment utilisés pour l'isolation des murs et des toitures peuvent dans certains cas être très énergivores. Le polyuréthane fréquemment utilisé lui aussi dans les projets d'isolation affiche un bilan en énergie grise très élevé. Cependant, la valeur seule de l'énergie grise des isolants ne nous renseigne nullement sur leur durée de vie ni leur performance thermique. C'est pourquoi, il nous paraît indispensable d'introduire un second concept qui tient compte notamment de ces critères.

Classification NIBE

L'institution NIBE a réalisé une classification des isolants sur base de leur énergie grise, sur base de leur effet sur l'environnement et la santé et sur base du recyclage. Elle classifie les matériaux de 1 (à recommander) à 7 (à éviter) en considérant l'impact environnemental des matériaux isolants dans sa globalité. Il arrive que les isolants non écologiques se voient attribuer une meilleure classification que les isolants dits écologiques. Ceci s'explique par une performance thermique plus faible des isolants écologiques, impliquant l'utilisation d'une quantité beaucoup plus importante de matériaux écologiques pour atteindre le même pouvoir isolant qu'un matériau non écologique.

⁵³ PlatformEco, En ligne sur http://platformeco.com/?page_id=2801.

Ci-dessous, nous présentons la classification NIBE des principaux isolants en fonction des parois à isoler :

	Origine	Mur	Toiture (inclinée)	Sol	Durée de vie	Recyclage en fin de vie
Laine de lin	/	3a (choix acceptable)	3b (choix acceptable)	3a (choix acceptable)	/	Broyage et épandage agricole ou compostage
Cellulose	UE	1c (meilleur choix)	1a (meilleur choix)	4a (moins bon choix)	25 ans	Compostage ou incinération
Polystyrène expansé	Monde	2b (bon choix)	2c (bon choix)	4c (moins bon choix)	>25 ans	Incinération ou mise en décharge
Polyuréthane	Monde	4c (moins bon choix)	5a (choix à déconseiller)	7a (choix inacceptable)	>25 ans	Incinération ou mise en décharge
Laine de roche	UE	2a (bon choix)	4a (moins bon choix)	4c (moins bon choix)	>25 ans	Incinération ou mise en décharge
Laine de verre	UE	1b (meilleur choix)	1c (meilleur choix)	3c (choix acceptable)	>25 ans	Incinération ou mise en décharge

Tableau 29 : Classification NIBE des isolants

Si l'on en croit cette classification, la laine de verre s'avère être un meilleur choix que la laine de lin alors que son énergie grise est plus élevée. L'explication provient notamment d'une meilleure conductivité thermique des laines de verre. En effet, ces dernières affichent une conductivité thermique allant de 0,030 W/mK à 0,040 W/mK tandis que celle des laines de lin se situe entre 0,037W/mK à 0,042W/mK et peut même monter jusqu'à 0,047W/mK en fonction du taux d'humidité. De plus, comme la laine de lin est issue de matière première de qualité variable, la conductivité thermique peut dans certains cas ne pas être garantie.

La classification NIBE confirme par contre que le polyuréthane a un impact environnemental conséquent et déconseille fortement son utilisation, quelle que soit la paroi à isoler.

La laine de roche est également à proscrire pour ce qui est d'isoler sa toiture ou son sol.

Quant à la cellulose qui a une énergie grise relativement faible, on conseille fortement son utilisation lors de l'isolation des murs et de la toiture.

Cependant, il ne faut pas oublier que le prix joue également un rôle non négligeable dans le choix de l'isolant à utiliser. Bien que la cellulose semble être le meilleur choix en combinant la classification

NIBE (meilleur choix) et l'énergie grise (deuxième isolant le moins énergivore), le prix est comparativement plus élevé que les autres matériaux isolants. Ceux-ci sont détaillés ci-dessous⁵⁴ :

Isolant	Coût pour 100 mm d'épaisseur (€/m²)
Laine de lin	15
Cellulose	20
polystyrène expansé	10
Polyuréthane	20
Laine de roche	5 à 10
Laine de verre	3 à 8

Tableau 30 : Coût des isolants pour 10 cm d'épaisseur

Si l'on analyse les prix du marché et malgré le fait que son énergie grise soit la plus élevée, le prix avantageux de la laine de verre explique son utilisation si fréquente dans les travaux d'isolation.

⁵⁴ Coûts fournis par Monsieur Christophe Hubin, responsable de la SPRL Ecobilan

CONCLUSION

La question de l'isolation de son habitation se pose lorsque l'on devient propriétaire et/ou lorsqu'on décide de rénover. On observe aujourd'hui que trop de consommateurs hésitent à investir car cela représente un coût non négligeable.

La question que l'on se pose dès lors dans ce mémoire est la suivante : Est-il aujourd'hui rentable en Belgique d'investir dans un projet d'isolation thermique pour son bâtiment ? La réponse est oui ! Pour répondre à cette question, de nombreux paramètres intervenant dans la rentabilité de l'isolation ont été analysés dans le cadre d'une analyse financière poussée. Pour obtenir une évaluation de la stabilité de nos conclusions quant à ce projet d'isolation, en grande partie remise en cause par des paramètres fluctuants (prix de l'énergie, degrés-jours), une analyse de sensibilité de Monte Carlo a été réalisée. La conclusion obtenue reste encourageante, un projet d'isolation s'avérant rentable en moyenne sur une période de 15 à 20 ans. Bien que de nombreux cas aient été analysés, le scénario le plus optimiste montre qu'il est possible d'obtenir une rentabilité après 6 années alors que le scénario le plus pessimiste indique une rentabilité après seulement 44 ans. Ceci s'explique dans le premier cas par une hausse importante du prix de l'énergie, une consommation de chauffage exagérée, une grande surface habitable et un rendement faible de l'installation de chauffage ; alors que le second est le résultat d'un gain moindre suite à un taux d'évolution de l'énergie relativement faible, une utilisation très rationnelle de l'énergie, une surface de chauffage plus petite et un rendement élevé du chauffage. C'est pourquoi isoler son habitation implique une analyse au cas par cas, pour laquelle de nombreux facteurs doivent être pris en compte (région, type d'habitation, prix de l'énergie, conjoncture économique, etc.) comme ce fût le cas tout au long de ce travail. Soulignons que les primes à l'isolation offertes par les régions ne devraient pas être la raison principale de notre investissement. Bien qu'elles permettent d'alléger le budget des ménages, leur montant ne permet pas d'accélérer de manière significative la durée de rentabilité de notre projet d'isolation. Quelles que soit les primes que nous percevons, nous vous encourageons dès lors à franchir le pas et à ne pas hésiter à isoler votre habitation. Dans la même lignée, étant donné que le taux d'évolution de l'énergie est assez imprévisible, il est recommandé de se prémunir d'une potentielle volatilité des prix en isolant au minimum les parois qui engendrent le plus de déperditions d'énergie.

L'aspect rentabilité ayant été démontré, d'autres avantages d'ordre qualitatifs ont également été soulignés. Une hausse du confort thermique ou une augmentation de la valeur ajoutée de l'habitation représentent à eux seuls des bénéfices apportés par l'isolation. Soulignons également que d'un point de vue environnemental, cet investissement offre beaucoup plus qu'un gain d'énergie

quand on sait qu'isoler 20% du parc immobilier belge quatre façades permettrait de diminuer de 9% les émissions de gaz à effet de serre relatives au secteur du chauffage.

Nous avons ensuite insisté sur l'importance de se renseigner sur le choix de l'isolant nécessaire à des travaux d'isolation. En effet, chaque type d'isolant a ses propriétés propres, parmi lesquelles nous retrouvons le coût, la performance ou encore l'espérance de vie d'un isolant. Le choix d'un isolant peu coûteux peut par exemple s'avérer être une erreur quand on sait que ce dernier a une durée de vie moins longue et devra être remplacé plus rapidement qu'un isolant un peu plus cher. De plus, si l'on en croit l'analyse de sensibilité effectuée, un différentiel dans le prix de l'isolation n'impacterait que très faiblement le temps de retour sur investissement du projet de l'isolation. En tant qu'acteur soucieux de notre environnement, il est donc souhaitable de se renseigner sur les impacts environnementaux que comportent ces isolants, afin de porter son choix sur celui qui aura un impact minime sur l'environnement. Bien que l'isolation offre un gain financier substantiel à son auteur, son but premier est de prendre soin de l'environnement dans lequel nous vivons. Un aspect bien trop souvent oublié en cette période de crise économique...

BIBLIOGRAPHIE

ADEME. *Guide des facteurs d'émissions Version 6.1 Chapitre 2 : Facteurs associés à la consommation directe d'énergie*, 2013, 69 p.

APERe Asbl, Simulateur financier photovoltaïque, <http://www.apere.org/diffuser/pv/>

Arrêté du Gouvernement wallon du 17 avril 2008 déterminant la méthode de calcul et les exigences, les agréments et les sanctions applicables en matière de performance énergétique et de climat intérieur des bâtiments (article 5.2 de l'annexe I : subdivision du bâtiment), Moniteur Belge, Bruxelles, juillet 2008.

BALTUS C. et GUILLEMEAU J-M, *La ventilation mécanique : guide pratique pour les installateurs de techniques spéciales*, DGTRE et FFC, Bruxelles, 2004, 58p.

BAREAU Hélène, *Isoler son logement pour réduire les dépenses d'énergie et améliorer le confort d'un logement existant*, Guide « Mon habitation » de l'ADEME : construire et rénover, 2013, 35p. En ligne http://www.ecocitoyens.ademe.fr/sites/default/files/guide_ademe_diagnostique_performance_energetique.pdf. Consulté le 20 septembre 2013.

BAULER T., « *Chapitre 3 : Externalités environnementales et leur valuation monétaire* ». Dans le cadre du cours Economie des ressources naturelles et de l'environnement, Bruxelles, ULB, 22 mars 2014, 43p. En ligne http://tbauler.pbworks.com/w/file/fetch/79424519/EconEnv-2013-14_se%CC%81ance4.pdf. Consulté le 29 juin 2014.

BENHAÏM J., « *Choix du taux d'actualisation social et environnement* », Revue française d'économie, Volume 8, numéro 3, p 111-147., 1993.

Bureau Fédéral du Plan et SPF Economie (DGSIE), *Perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030*. Réalisé par D. DEVOGELAER et D. GUSBIN, Bruxelles, 2011, 165 p.

Bureau Fédéral du Plan. 2013. *Perspectives économiques 2013-2018*. Coordonné par M. ENGLERT, I. LEBRUN, D. BASSILIERE, F. BOSSIER et I. BRACKE, Bruxelles, 181 p.

Centre de Recherche et d'Information des Organisations et Consommateurs (CRIOC), *L'isolation des logements en Belgique*, Bruxelles, mars 2006, 50p.

Centre Scientifique et Technique de la Construction, Réglementation relative à l'isolation thermique des bâtiments en Belgique, février 2014, 7p. En ligne

http://www.cstc.be/homepage/download.cfm?dtype=na_energy&doc=PEB%20Exigences%20maj%20201402.pdf&lang=fr%20exigence%20thermique.

CECH Jean, GILLY Nathalie, HAVEAUX Christophe, HUART Michel, RICHIR Denis et RIETY Gérard, Prix d'achat de l'énergie par les ménages, *Renouvelle*, Webmag n°65, juin 2014. En ligne <http://www.apere.org/doc/Renouvelle65.pdf>.

Centre Interdisciplinaire de Formation de Formateurs de l'Université de Liège (CIFFUL), *La procédure d'avis énergétique*. Coordonné par P. WAGELMANS P., J-M. GUILLEMEAU et J. WAGELMANS. Namur, Service Public de Wallonie DG04, 2013, 96 p.

Directive 2002/91/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2002 sur la performance énergétique des bâtiments, 32002L0091, JO du 4 janvier 2003, entrée en vigueur le 4 janvier 2006, p. 65-71.

Energy Information Administration (EIA), *Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040*. DOE/EIA-0383, Washington, 2013, 244 p.

FRANCY Simon, HAUGLUSTAINE Jean-Marie, BALTUS Catherine et LIESSE Sophie, *la ventilation et l'énergie – Guide pratique pour les architectes*, Ministère de la Région wallonne, 2001, 107p.

HAUGLUSTAINE J-M, *Pour une amélioration de la performance énergétique des logements neufs*, Région Wallonne, 2004, 24p. En ligne sur http://www.maison-passive.be/resources/Construire_Energie_Prof.pdf. Consulté le 21 juin 2014.

HAUGLUSTAINE J-M et SIMON F., *L'isolation thermique des murs creux - Guide pratique pour les architectes*, UCL - ULg, Ministère de la Région Wallonne - DGTRE, 1996, 64p. En ligne <http://energie.wallonie.be/servlet/Repository/mur-creux1.pdf?ID=6382>. Consulté le 5 juin 2014.

HUART Michel (1), «01c Energie : Prix », Dans le cadre du cours Energie et environnement 2013-2014, Bruxelles, Facultés des sciences de l'ULB, version 21/11/2013, 39 p. En ligne http://mecapp42.ulb.ac.be/atm/foldercours/ENVIF449_Folder/DocENVIF449/01cValeur. Consulté le 6 mai 2014.

HUART Michel (2), «02b Recours à l'énergie : Consommations d'énergie », Dans le cadre du cours Energie et environnement 2013-2014, Bruxelles, Facultés des sciences de l'ULB, 2013, 60 p. En ligne http://mecapp42.ulb.ac.be/atm/foldercours/ENVIF449_Folder/DocENVIF449/02bconso. Consulté le 21 juin 2014.

HUART Michel(3), «Calculez les émissions de CO₂ évitées par votre chauffe-eau solaire». Dans la revue *Renouvelle (Regards sur les énergies renouvelables)*, 4^{ème} trimestre 2007, n°22, Belgique : APERe asbl, p. 32.

IBGE, Mes primes à l'environnement, 2014. En ligne

<http://www.bruxellesenvironnement.be/Templates/Particuliers/informer.aspx?id=12193&langtype=2060>

IFP Energies nouvelles, *Comprendre les variations du prix du pétrole*, décembre 2010. En ligne

<http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/espace-decouverte/tous-les-zooms/marches-petroliers-et-crise-de-la-dette-tendances-et-enjeux/comprendre-les-variations-du-prix-du-petrole-decembre-2010>.

Consulté le 1 novembre 2013.

Informazout asbl, Primes pour l'isolation, 2014. En ligne <http://www.informazout.be/fr/primes/pour-mesures-economiques-d-energie/isolation>. Consulté le 1 juin 2014.

Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, Infos Fiche-Energie : L'isolation des fenêtres, Bruxelles, Janvier 2008, 5p. En ligne

http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/IF_Energie_ISO05_Part_FR.PDF.

Consulté le 10 juillet 2013.

Institut Bruxellois de Statistique et d'Analyse, *Environnement et Energie : tableau 12.3.1.3*

Consommation totale finale d'énergie dans le secteur du logement selon le vecteur énergétique : années-repères, janvier 2012. En ligne http://www.ibsa.irisnet.be/themes/environnement-et-energie#.U7fh_Pl_tqV.

JESS, Noémie, Dorian ROUCHER, Jean-Baptiste BERNARD et Guillaume CLEAUDE. « Dossier : comment prévoir le prix du pétrole ? ». *Note de Conjoncture*, Insee, 2013, p.41-58.

MUDGAL Shailendra, LYONS Lorcan, COHEN François, Bio Intelligence Service, LYONS Ronan, Oxford University, FEDRIGO-FAZI Doreen & IEEP, *Energy performance certificates in buildings and their impact on transaction prices and rents in selected EU countries*, Final report prepared for European Commission (DG Energy), avril 2013, 158p.

Notaire.be, *Performance énergétique des bâtiments (PEB)*, 2014, disponible sur

<http://www.notaire.be/acheter-louer-emprunter/vente--achat--generalites/performance-energetique-des-batiments-peb>. Consulté le 1 novembre 2013.

OCDE, « Inflation (IPC) ». Dans *Panorama des statistiques de l'OCDE 2013 : Economie, environnement et société*, Éditions OCDE, 2013, p. 94-95. En ligne <http://dx.doi.org/10.1787/factbook-2013-36-fr>.

Consulté le 14 mars 2014.

Service Public Fédéral FINANCES, Réduction d'impôt pour l'isolation du toit, Bruxelles, 2014. En ligne http://finances.belgium.be/fr/binaries/Isolation%20du%20toit-2014_tcm307-216753.pdf.

SPF, « Service Public Fédéral des FINANCES : Rénovation et TVA ». En ligne <http://finances.belgium.be/fr/particuliers/habitation/renovation/>. Consulté le 15 octobre 2013.

TU BÂTIS JE RÉNOVE, « Ma maison mon énergie les stratégies gagnantes », dans le magazine immoweb.mag Energie, Bruxelles, Edition 2014, 114 p.

VANNESTE Dominique, THOMAS Isabelle et GOOSSENS Luc, *Le logement en Belgique*, Enquête socio-économique 2001, Monographies 2 , Bruxelles : Politique scientifique fédérale – SPF Economie, 2007, 211p.

Vlaams Energieagentschap (VEA), Brochure premies 2014, 2014. En ligne <http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/premies/premiebrochure2014.pdf>.

VMM, VITO, AWAC, IBGE-BIM, IRCEL-CELINE et ECONOTEC. 2013. *Belgium's greenhouse gas inventory (1990-2010)*. National Inventory Report submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol, 269p.

WIART, Jacques, «*La rentabilité financière des installations « énergies renouvelables » et des habitations énergétiquement performantes des particuliers : analyse et adéquation de l'offre bancaire*», Etude réalisée dans le cadre d'un master en Management et Administration des entreprises. Institut d'Administration des Entreprises de Grenoble, 2008 , 68 p.

Sites internet

EnerConsult SA Architecte/bureau d'étude. En ligne <http://www.enerconsult.be/fr/architecte-enerconsult.php>

Energie+ version 8, Architecture et Climat, UCL, réalisé avec le soutien de la Wallonie - DGO4 - Département de l'Energie et du Bâtiment Durable. <http://www.energieplus-lesite.be/>.

Habitos.be : <http://habitos.be/fr/#slide1>

Livos.be : <http://www.livos.be/fr/>

Opti'em Conseil et Etude en Performance Energétique des bâtiments. En ligne <http://www.opti-en.com/batiment.html>.

Palisade : <http://www.palisade.com/fr/>

PlateformEco : <http://plateformeco.com/>

SPW – DGO4 – Portail de la Wallonie : <http://www.wallonie.be/>

Entretiens, salons, formations

Artexis Expo. 2013. « Salon Energie et Habitat », 26 octobre 2013, Namur.

Entretien à Namur avec Monsieur Hubin le 28 novembre 2013.

Entretien à Namur avec Monsieur Radelet le 10 juin 2014.

Entretien à Bruxelles avec Monsieur Bernard Deprez le 24 avril 2014.

Formation PHPP à Charleroi le 11 février 2014.

Participation au cours « Rational use of Energy » donné par Monsieur Olivier Morteihan à l'ULB le 29 mars 2013.

**ANNEXE 1 : Exigences relatives aux amenées d'air et aux évacuations d'air selon la norme NBN D50
– 001**

	Local	Débit nominal
Règle générale		3,6 m ³ /h par m ² de surface au sol
Amenée d'air	Living	min. 75 m ³ /h max. 150 m ³ /h
	Chambres, locaux d'études et de jeux	min. 25 m ³ /h max. 36 m ³ /h par pers.
	Autres locaux	3,6 m ³ /h par m ² de surface au sol
Évacuations d'air	Cuisines fermées, SDB, buanderies	min. 50 m ³ /h max. 75 m ³ /h
	Cuisines ouvertes	min. 75 m ³ /h
	WC	min. 25 m ³ /h

Source : Institut belge de normalisation, *NBN D50-001 Dispositifs de ventilation dans les bâtiments d'habitation*, octobre 2011.

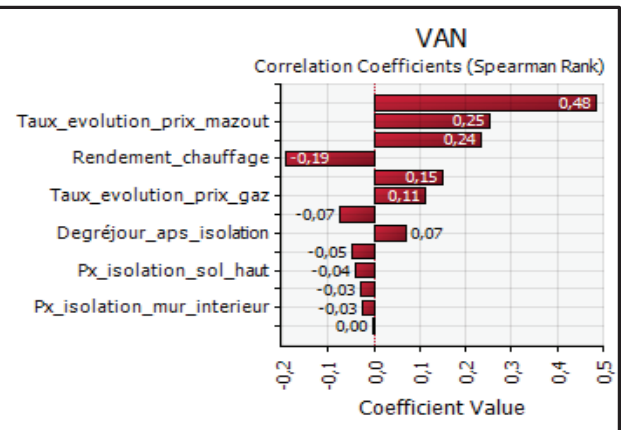
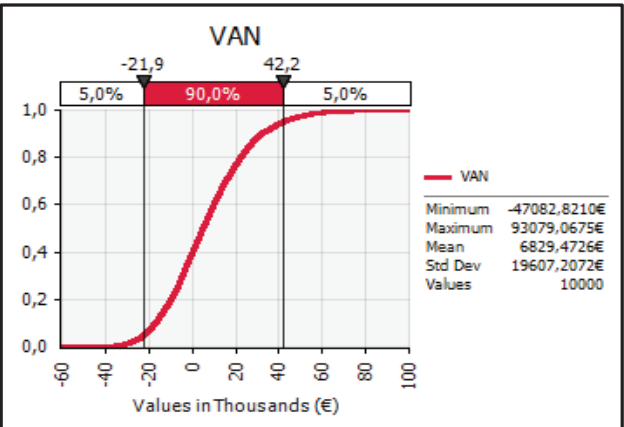
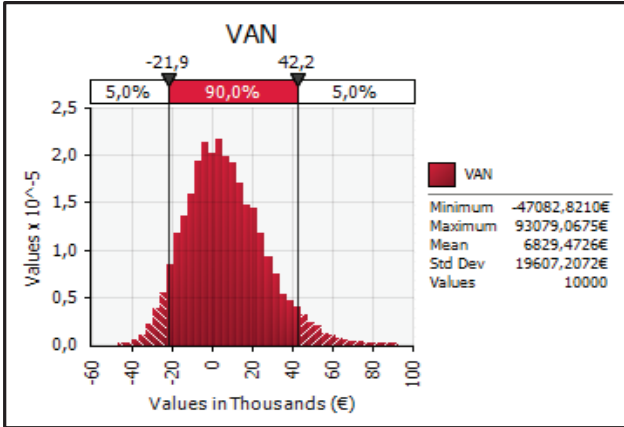
Exemple utile à la compréhension de la notion du taux de renouvellement de l'air de référence.

Considérons une habitation dont la superficie habitable soit de 100 m^2 , pour un volume habitable de 250 m^3 .

	Local	Surface (m^2)	Débits (m^3/h)	Total (m^3/h)
Amenée d'air	Séjour	35	126	216
	Chambre 1	15	54	
	Chambre 2	12	36	
Évacuations d'air	Cuisine	15	75	150
	SDB	12	52	
	WC	1,5	25	

Le débit d'amenée d'air neuf pour cet exemple est de $216 \text{ m}^3/\text{h}$, ce qui équivaut à un renouvellement d'air de $0,86 \text{ vol/h}$ ($=216/250$).

Annexe 2 : Analyse de sensibilité par les simulations Monte Carlo : résultats de la valeur actuelle nette sur 15 ans pour la maison de type fermette

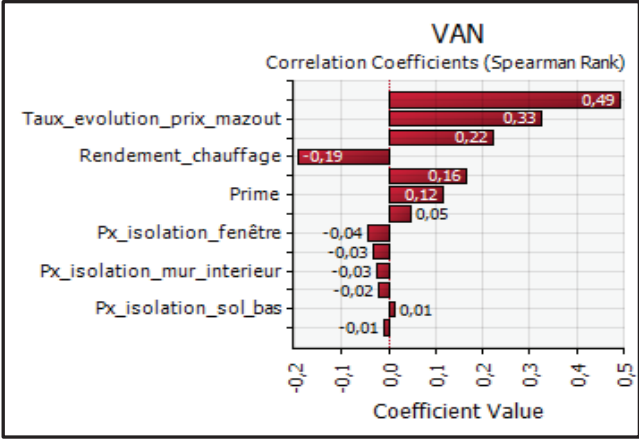
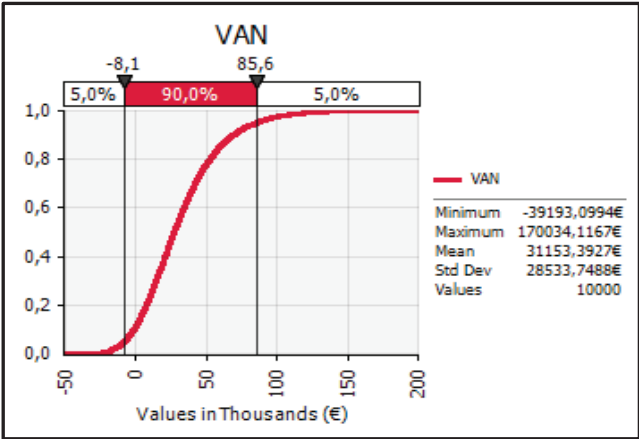
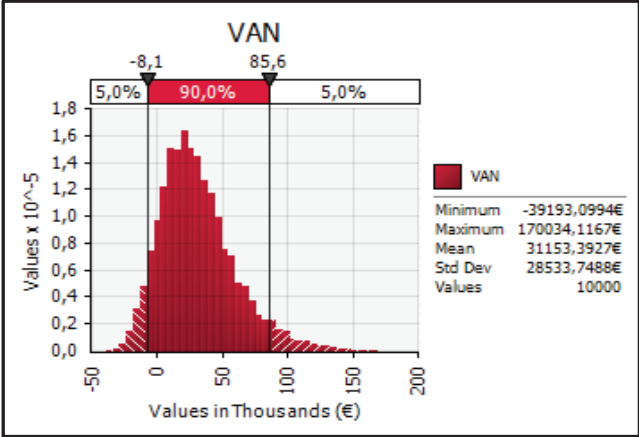


Simulation Summary Information		
Number of Simulations	1	
Number of Iterations	10000	
Number of Inputs	37	
Number of Outputs	31	
Sampling Type	Latin Hypercube	
Simulation Start Time	7/29/14 18:06:18	
Simulation Duration	00:00:09	
Random # Generator	Mersenne Twister	
Random Seed	382897365	

Summary Statistics for VAN			
Statistics		Percentile	
Minimum	-47.082,82 €	5%	-21.887,76 €
Maximum	93.079,07 €	10%	-16.955,29 €
Mean	6.829,47 €	15%	-13.047,23 €
Std Dev	19.607,21 €	20%	-9.743,23 €
Variance	384442575,9	25%	-6.854,67 €
Skewness	0,56428144	30%	-4.479,33 €
Kurtosis	3,536901445	35%	-2.159,61 €
Median	4.964,32 €	40%	300,28 €
Mode	2.477,79 €	45%	2.675,82 €
Left X	-21.887,76 €	50%	4.964,32 €
Left P	5%	55%	7.573,44 €
Right X	42.175,23 €	60%	9.942,75 €
Right P	95%	65%	12.695,19 €
Diff X	64.063,00 €	70%	15.646,71 €
Diff P	90%	75%	18.934,99 €
#Errors	0	80%	22.367,24 €
Filter Min	Off	85%	26.546,44 €
Filter Max	Off	90%	32.166,19 €
#Filtered	0	95%	42.175,23 €

Regression and Rank Information for VAN			
Rank	Name	Regr	Corr
1	Degréjour_avt_isolation	0,491	0,484
2	Taux_evolution_prix_mazout	0,300	0,252
3	Prix_energie	0,239	0,235
4	Rendement_chauffage	-0,229	-0,194
5	Prime	0,169	0,151
6	Taux_evolution_prix_gaz	0,118	0,113
7	Degréjour_aps_isolation	0,071	0,070
8	Px_isolation_fenêtre	-0,055	-0,073
9	Px_isolation_mur_exterieur	-0,048	-0,046
10	Px_isolation_sol_haut	-0,044	-0,041
11	Px_isolation_toit	-0,026	-0,030
12	Px_isolation_mur_interieur	-0,021	-0,026
13	Px_isolation_sol_bas	0,000	-0,002847417

Annexe 3 : Analyse de sensibilité par les simulations Monte Carlo : résultats de la valeur actuelle nette sur 20 ans pour la maison de type fermette

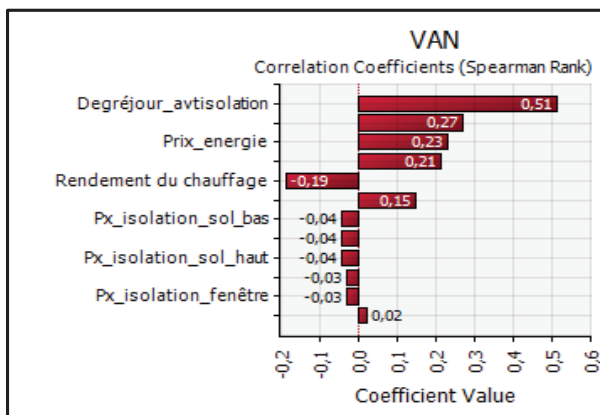
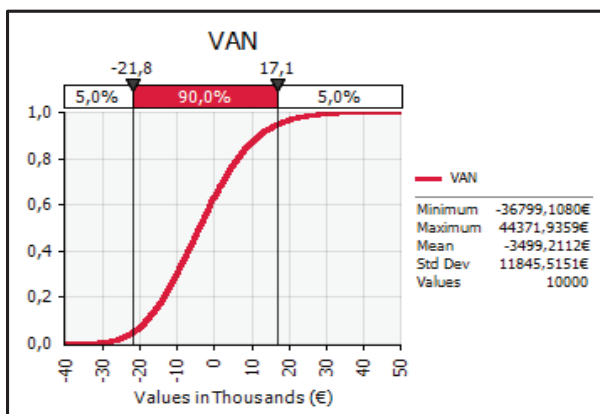
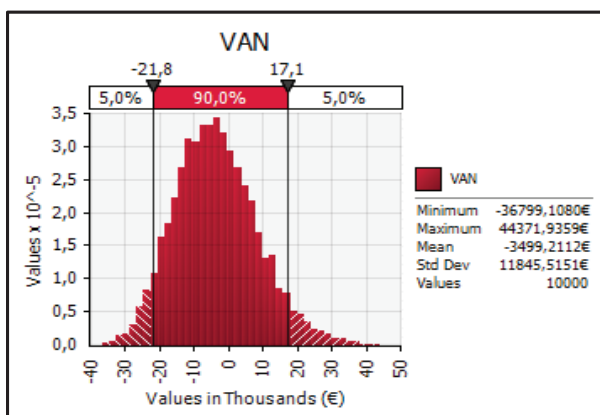


Simulation Summary Information	
Number of Simulations	1
Number of Iterations	10000
Number of Inputs	37
Number of Outputs	31
Sampling Type	Latin Hypercube
Simulation Start Time	7/29/14 0:07:28
Simulation Duration	00:00:14
Random # Generator	Mersenne Twister
Random Seed	1077887916

Summary Statistics for VAN			
Statistics		Percentile	
Minimum	-39.193,10 €	5%	-8.090,40 €
Maximum	170.034,12 €	10%	-1.418,84 €
Mean	31.153,39 €	15%	3.494,93 €
Std Dev	28.533,75 €	20%	7.550,30 €
Variance	814174820,2	25%	11.004,92 €
Skewness	0,862623698	30%	14.201,22 €
Kurtosis	4,046254761	35%	17.479,56 €
Median	26.974,22 €	40%	20.742,56 €
Mode	22.330,85 €	45%	23.755,04 €
Left X	-8.090,40 €	50%	26.974,22 €
Left P	5%	55%	30.518,90 €
Right X	85.612,30 €	60%	33.983,50 €
Right P	95%	65%	37.944,79 €
Diff X	93.702,69 €	70%	41.925,07 €
Diff P	90%	75%	46.561,24 €
#Errors	0	80%	52.504,44 €
Filter Min	Off	85%	59.270,43 €
Filter Max	Off	90%	68.963,05 €
#Filtered	0	95%	85.612,30 €

Regression and Rank Information for VAN			
Rank	Name	Regr	Corr
1	Degréjour_avt_isolation	0,496	0,493
2	Taux_evolution_prix_mazout	0,381	0,326
3	Prix_energie	0,240	0,222
4	Rendement_chauffage	-0,195	-0,192
5	Taux_evolution_prix_gaz	0,138	0,165
6	Prime	0,100	0,117
7	Degréjour_aps_isolation	0,051	0,047
8	Px_isolation_sol_haut	-0,032	-0,031
9	Px_isolation_fenêtre	-0,030	-0,044
10	Px_isolation_mur_interieur	-0,022	-0,026
11	Px_isolation_toit	0,000	-0,022443214
12	Px_isolation_sol_bas	0,000	0,014605471
13	Px_isolation_mur_exterieur	0,000	-0,009157271

Annexe 4 : Analyse de sensibilité par les simulations Monte Carlo : résultats de la valeur actuelle nette sur 15 ans pour la maison de type villa

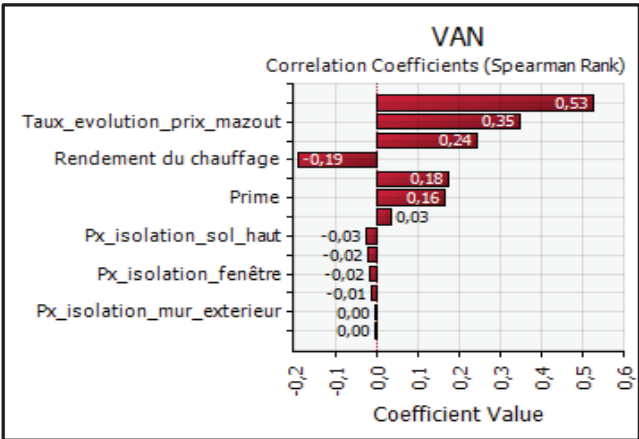
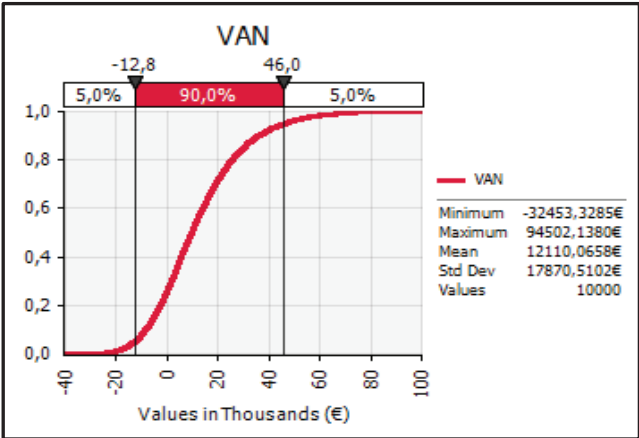
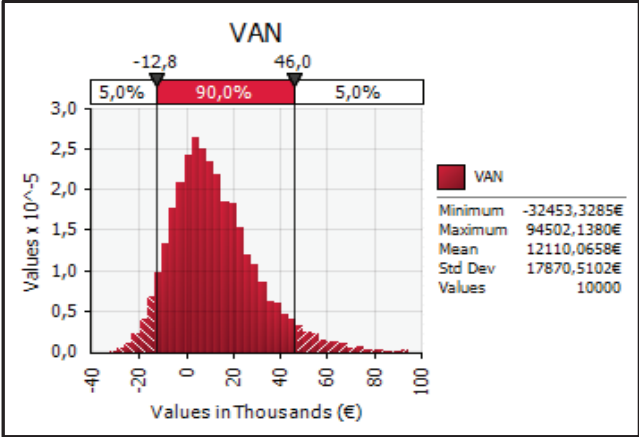


Simulation Summary Information	
Number of Simulations	1
Number of Iterations	10000
Number of Inputs	27
Number of Outputs	21
Sampling Type	Latin Hypercube
Simulation Start Time	7/29/14 18:45:18
Simulation Duration	00:00:06
Random # Generator	Mersenne Twister
Random Seed	841986032

Summary Statistics for VAN			
Statistics		Percentile	
Minimum	-36.799,11 €	5%	-21.802,11 €
Maximum	44.371,94 €	10%	-18.329,56 €
Mean	-3.499,21 €	15%	-15.706,22 €
Std Dev	11.845,52 €	20%	-13.537,43 €
Variance	140316228,3	25%	-11.851,53 €
Skewness	0,340164079	30%	-10.275,71 €
Kurtosis	3,08418398	35%	-8.696,46 €
Median	-4.100,79 €	40%	-7.149,95 €
Mode	-1.613,05 €	45%	-5.585,81 €
Left X	-21.802,11 €	50%	-4.100,79 €
Left P	5%	55%	-2.638,86 €
Right X	17.072,35 €	60%	-1.251,93 €
Right P	95%	65%	492,44 €
Diff X	38.874,46 €	70%	2.267,00 €
Diff P	90%	75%	4.086,08 €
#Errors	0	80%	6.196,70 €
Filter Min	Off	85%	8.698,26 €
Filter Max	Off	90%	12.237,50 €
#Filtered	0	95%	17.072,35 €

Regression and Rank Information for VAN			
Rank	Name	Regr	Corr
1	Degréjour_avtisolation	0,540	0,515
2	Taux_evolution_prix_mazout	0,301	0,269
3	Prix_energie	0,270	0,232
4	Prime	0,222	0,213
5	Rendement du chauffage	-0,210	-0,188
6	Taux_evolution_prix_gaz	0,145	0,148
7	Px_isolation_sol_haut	-0,055	-0,043
8	Px_isolation_fenêtre	-0,038	-0,030
9	Px_isolation_mur_exterieur	-0,038	-0,044
10	Px_isolation_sol_bas	-0,036	-0,044
11	Degréjour_apsisolation	0,032	0,024
12	Px_isolation_mur_interieur	-0,020	0,000
13	Px_isolation_toit	-0,019	-0,030

Annexe 5 : Analyse de sensibilité par les simulations Monte Carlo : résultats de la valeur actuelle nette sur 20 ans pour la maison de type villa



Simulation Summary Information	
Number of Simulations	1
Number of Iterations	10000
Number of Inputs	27
Number of Outputs	21
Sampling Type	Latin Hypercube
Simulation Start Time	7/29/14 18:42:06
Simulation Duration	00:00:08
Random # Generator	Mersenne Twister
Random Seed	963504982

Summary Statistics for VAN			
Statistics		Percentile	
Minimum	-32.453,33 €	5%	-12.766,36 €
Maximum	94.502,14 €	10%	-8.455,36 €
Mean	12.110,07 €	15%	-5.198,23 €
Std Dev	17.870,51 €	20%	-2.634,88 €
Variance	319355133,1	25%	-335,06 €
Skewness	0,808103025	30%	1.668,31 €
Kurtosis	3,935984874	35%	3.740,46 €
Median	9.617,87 €	40%	5.522,33 €
Mode	3.880,36 €	45%	7.589,73 €
Left X	-12.766,36 €	50%	9.617,87 €
Left P	5%	55%	11.733,88 €
Right X	45.966,37 €	60%	14.005,48 €
Right P	95%	65%	16.430,10 €
Diff X	58.732,73 €	70%	19.023,15 €
Diff P	90%	75%	21.992,67 €
#Errors	0	80%	25.577,62 €
Filter Min	Off	85%	30.084,29 €
Filter Max	Off	90%	36.083,33 €
#Filtered	0	95%	45.966,37 €

Regression and Rank Information for VAN			
Rank	Name	Regr	Corr
1	Degréjour_avtisolation	0,524	0,526
2	Taux_evolution_prix_mazout	0,394	0,348
3	Prix_energie	0,255	0,242
4	Rendement du chauffage	-0,207	-0,193
5	Taux_evolution_prix_gaz	0,156	0,176
6	Prime	0,124	0,165
7	Degréjour_apsisolation	0,047	0,034
8	Px_isolation_sol_haut	-0,032	-0,027
9	Px_isolation_fenêtre	-0,023	-0,018
10	Px_isolation_sol_bas	-0,023	-0,022
11	Px_isolation_toit	0,000	-0,014420811
12	Px_isolation_mur_interieur	0,000	-0,002885065
13	Px_isolation_mur_exterieur	0,000	-0,002586492