# 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 environnementale de la production d'eau chaude sanitaire d'un ménage

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par MOURTADA, Karim

en vue de l'obtention du grade académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement Finalité Gestion de l'Environnement Ma120 ECTS ENVI5G-M

Année Académique: 2014-2015

Directeur: Prof. Michel HUART

#### REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je voudrais adresser mes plus vifs remerciements aux personnes qui m'ont apporté leur concours dans la réalisation de ce projet durant ces deux riches et passionnantes années du Master en sciences et gestion de l'environnement:

A mon directeur, Michel Huart qui a accepté d'encadrer ce mémoire en environnement, après avoir suivi mon premier mémoire en sciences appliquées il y a plus de dix ans ! Il a su une nouvelle fois m'orienter judicieusement dans mes recherches et me donner des conseils avisés...

A mes assesseurs, Wouter Achten, Marc Degrez et Pierre D'Ans qui m'ont suggéré de nombreuses pistes de réflexion et prodigué des précieux conseils, en particulier sur la compréhension, l'utilisation et l'interprétation des analyses du cycle de vie...

A Vanessa Zeller qui m'a aidé à comprendre comment utiliser le logiciel SimaPro et la base de données Ecolnvent et m'a aussi donné accès au terminal dans des délais assez serrés...

A Adel El Gammal, qui m'a transmis plusieurs clés pour comprendre l'évolution du secteur photovoltaïque, ses principales caractéristiques et ses perspectives...

Aux membres de la « running team » dont les encouragements m'ont permis une nouvelle fois de franchir la ligne d'arrivée d'un marathon...

Au groupe de « harcèlement solidaire » dont le soutien sans faille m'a permis de maintenir une motivation à toute épreuve pour terminer ce travail...

Enfin à la famille, aux proches et aux amis qui par leurs gestes d'attention quotidiens, aussi insignifiants soient-ils, ont contribué à la réalisation de ce mémoire...

A vous tous, mille mercis.

#### RÉSUMÉ

La consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels représente plus de 25% de la consommation totale d'énergie primaire dans l'Union européenne. Pour les besoins en chaleur, la proportion est approximativement de 75% pour le chauffage et 25% pour l'eau chaude sanitaire (ECS). Mais la part relative de l'eau chaude sanitaire des ménages est appelée à augmenter, en même temps que diminue la demande en chauffage, notamment grâce aux normes plus strictes en matière de performances énergétiques des bâtiments.

Traditionnellement, l'étude des processus de production de l'eau chaude sanitaire et de la chaleur était limitée aux aspects techniques et économiques des différentes solutions. Les développements récents de l'analyse des impacts environnementaux, liés en particulier à la méthode de l'analyse du cycle de vie (ACV), ont apporté une nouvelle dimension à ce domaine de recherche qui tient compte désormais des impacts sur l'ensemble du cycle de vie des générateurs de chaleur, et plus seulement sur la phase d'utilisation.

L'analyse environnementale, combinée aux études techniques et à l'évaluation des coûts des différents types de production d'ECS permet de déterminer les impacts non plus seulement qualitativement mais aussi quantitativement. Elle donne la possibilité en particulier de comparer dans le détail des solutions intégrant des énergies renouvelables, entre elles et avec une solution de référence, par exemple constituée d'une chaudière murale au gaz.

Enfin les analyses coûts-bénéfices et le concept d'efficience écologique donnent la possibilité de réaliser des arbitrages entre les technologies sur base d'arguments concrets techniques, économiques et environnementaux. Ces outils d'évaluation pourraient contribuer à promouvoir la pratique d'une écologie industrielle à grande échelle grâce à une approche transversale et intégrée des filières classiques de gestion de l'environnement comme l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et le recyclage. Si le calcul des impacts environnementaux peut donner de précieuses informations, il reste néanmoins très dépendant de la qualité des données recueillies et des hypothèses posées. De même, une excellente connaissance des processus reste requise pour la fiabilité de la modélisation. Mais bien appliquée, cette méthode peut réellement relier la technologie au développement durable.

**Mots-clés** : énergie, économie, environnement, eau chaude sanitaire, gaz à effet de serre, énergies renouvelables, analyse du cycle de vie, impacts environnementaux.

## Table des matières

Remer	erciements	i
Résum	mé	iii
Liste d	des figures	vi
Liste d	des tableaux	vii
Partie	e I : Introduction	1
Partie	e II : Mise en contexte	3
Chap	apitre 1 : L'eau chaude sanitaire	3
1.1	Répartition des consommations	3
1.2	Confort d'utilisation	4
1.3	Qualité de l'eau	5
1.4	Normes et exigences hygiéniques	6
1.5	Utilisation rationnelle de l'énergie (URE)	7
Chap	apitre 2 : Une multitude de techniques	11
2.1	Systèmes traditionnels et innovations scientifiques	11
2.2	Les chaudières	12
2.3	Les ballons accumulateurs	13
2.4	Le chauffe-eau solaire	13
2.5	Les pompes à chaleur	14
2.6	Les systèmes photovoltaïques	15
2.7	Les boilers thermodynamiques	15
2.8	Choix des systèmes retenus	16
Partie	e III : Analyse multicritère	17
Chap	apitre 3 : Méthodologie	17
Chap	apitre 4 : Analyse technique	19
<b>4</b> 1	Rendements des chaudières	19

4.2	Rendement des boilers thermodynamiques	20
4.3	Rendement des systèmes solaires thermiques	22
4.4	Rendement des systèmes photovoltaïques	23
4.5	Disponibilité des ressources	25
4.6	Consommations par technique	28
4.7	Bilan énergétique	30
Cha	pitre 5 : Analyse économique	35
5.1	Hypothèses	35
5.2	Coûts par technique	36
5.3	Bilan économique	47
Cha	pitre 6 : Analyse environnementale	51
6.1	Impact environnemental	51
6.2	Analyse du cycle de vie	52
6.3	Hypothèses de la modélisation	53
6.4	Résultats	60
6.5	Interprétation	63
Cha	pitre 7 : Analyse coûts-bénéfices	67
7.1	Coût en fonction de l'impact environnemental	67
7.2	Limites de l'analyse	68
Partie	IV : Conclusions	71
Bibliog	graphie	73
Annex	es	79
Ann	exe 1: Simulation du rendement d'une installation solaire thermique	79
Ann	exe 2 : Structure de coûts par technique	80
Ann	exe 3 : Résultats de l'analyse des impacts	91
Ann	exe 4 : Arbres d'impacts pour le système PAC - PV	94

# LISTE DES FIGURES

Figure 1: Répartition des consommations énergétiques des ménages	3
Figure 2: Températures d'utilisation de l'ECS	4
Figure 3: Débits d'utilisation de l'ECS	5
Figure 4: Définition de la dureté de l'eau	6
Figure 5: Parts relatives de l'ECS et du chauffage	8
Figure 6: Réponse PEB à la diminution nette des besoins en énergie	8
Figure 7: Evolution de la puissance photovoltaïque installée en Belgique (MWc/année)	11
Figure 8: Schéma hydraulique d'une installation solaire thermique	14
Figure 9: Schémas de principe de PAC fonctionnant en aérothermie	14
Figure 10: Principe des systèmes photovoltaïques	15
Figure 11: Installation et détails d'un boiler thermodynamique	16
Figure 12: Rendements des chaudières	20
Figure 13: Fonctionnement d'un boiler thermodynamique	21
Figure 14: Rendements des capteurs solaires thermiques	23
Figure 15: Principe de l'effet photoélectrique	24
Figure 16: Rendements des cellules photovoltaïques	25
Figure 17: Scénarios de réalisation du pic de production pétrolier	26
Figure 18: Parc de production d'électricité en Belgique en 2013	31
Figure 19: Coûts de revient par kWh d'ECS	47
Figure 20: Structure des coûts par kWh d'ECS	48
Figure 21: Analyse du cycle de vie des structures énergétiques	52
Figure 22: Normalisation des impacts I	62
Figure 23: Normalisation des impacts pour les techniques les plus courantes	64

Figure 24: Analyse d'incertitude pour les systèmes PAC+Solaire+PV et PAC+PV	66
Figure 25: Analyse coûts-bénéfices appliquée à la production d'ECS	67

### LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Consommations finales des différentes techniques	30
Tableau 2: Consommations primaires des différentes techniques	32
Tableau 3: Caractéristiques des différentes techniques de production d'ECS	32
Tableau 4: Coûts pour une chaudière au gaz	37
Tableau 5: Coûts pour un ballon électrique:	38
Tableau 6: Coûts pour un système solaire thermique avec appoint au gaz	39
Tableau 7: Coûts pour un système solaire thermique avec appoint électrique	41
Tableau 8: Coûts pour une pompe à chaleur sanitaire	42
Tableau 9: Coûts pour un ballon électrique + un système photovoltaïque	43
Tableau 10: Coûts pour une pompe à chaleur sanitaire + un système photovoltaïque	44
Tableau 11: Coûts pour une PAC sanitaire + un système solaire thermique	45
Tableau 12: Coûts pour une PAC sanitaire + solaire thermique + photovoltaïque	46
Tableau 13: Structure de coût par technique	47
Tableau 14: Structure de coût normalisée par technique	47
Tableau 15: Facteurs de normalisation des impacts	61
Tableau 16: Impacts environnementaux normalisés	61
Tableau 17: Impacts sur le changement climatique	62

#### PARTIE I: INTRODUCTION

L'énergie est partout. Elle fait partie de notre quotidien. Elle fait tourner notre industrie. Elle fait rouler nos voitures, voguer nos navires et voler nos avions. Elle est à la base de notre alimentation. Elle est indispensable pour nos communications, en particulier pour nos smartphones de plus en plus énergivores. Elle nous permet de chauffer, d'éclairer et de disposer du plus haut niveau de confort dans nos logements. Mais elle est également l'une des principales sources de gaz à effet de serre au niveau mondial avec des niveaux d'émissions humaines jamais atteints jusqu'à présent. En particulier les énergies fossiles - le charbon, la lignite, le pétrole et ses dérivés, et le gaz naturel - sont devenues les principales émettrices de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

La réalité du changement climatique est désormais indiscutable ; il est formellement attesté, grâce notamment au travail du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) qui depuis 1990, année de la parution de son premier rapport, a clairement mis en évidence la contribution majeure du forçage anthropique sur l'augmentation du niveau moyen des températures sur la Terre. Le cinquième rapport scientifique, paru en 2014, a confirmé une augmentation de la température moyenne sur les terres émergées et les océans de +0,84°C entre 1850 et 2012, tout en affirmant parallèlement que « le réchauffement du système climatique est sans équivoque et, depuis les années 1950, beaucoup de changements observés sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, le niveau des mers s'est élevé et les concentrations des gaz à effet de serre ont augmenté » [IPCC, 2014].

Le Protocole de Kyoto, signé en 1997 mais entré en vigueur seulement en 2005, se voulait être un accord juridiquement contraignant, pour réduire les émissions mondiales de 5% en 2012 par rapport à 1990. Elles ont augmenté dans la réalité de 34% et ce n'est que péniblement que l'Europe, qui fait figure de bon élève avec une réduction de ses émissions de 18%, a obtenu la prolongation du Protocole jusqu'en 2017. Les espoirs reposent désormais sur la Conférence de Paris fin 2015.

Tous les secteurs ont déjà dû réaliser des efforts pour réduire leurs émissions et devront indubitablement les poursuivre. Le secteur de l'habitat peut-être même plus que les autres. En premier

lieu au niveau de l'isolation et du chauffage des bâtiments, ensuite pour ce qui concerne les applications électro-ménagères, enfin pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS), qui y prend une part toujours plus grande. C'est aussi dans le secteur de l'habitat que les modes et habitudes de consommation énergétiques sont en train de changer le plus rapidement, en partie sous l'impulsion de normes de plus en plus sévères imposée par la performance énergétique des bâtiments.

D'un besoin en chauffage représentant la majorité de la consommation énergétique des ménages dans les logements construits jusqu'il y a une dizaine d'années, cette part a fortement régressé dans les nouveaux bâtiments, au profit des consommations d'eau chaude sanitaire et d'électricité. L'accroissement de la part relative de l'électricité s'explique par l'explosion des applications électroménagères et électroniques pour les loisirs. Mais avec la généralisation des normes basse-énergie et/ou quasi-passives pour les nouvelles constructions, la production d'ECS est appelée à prendre une part de plus en plus importante dans la consommation énergétique des ménages. Les économies énergétiques potentielles dans le secteur de l'habitat seront donc à l'avenir proportionnellement plus grandes sur la partie sanitaire de la production de chaleur.

C'est sur ce créneau qu'on a pu observer l'apparition d'une multitude de nouvelles techniques ces dernières années. A côté des chauffe-eau instantanés, des chaudières classiques, et d'une production d'eau chaude sanitaire à l'aide de boilers électriques, bon nombre de nouvelles technologies se sont diffusées. Parmi celles-ci, citons les chauffe-eau solaires individuels, les pompes à chaleur, les boilers thermodynamiques complétés ou pas par des systèmes photovoltaïques, les micro-cogénérations et les piles à combustibles.

Devant une telle variété de techniques, caractérisées par des coûts de production, des rendements d'exploitation et des prix des combustibles très différents, il n'est pas toujours aisé de distinguer de prime abord quelles sont les technologies globalement les plus économiques sur leur durée d'utilisation, et encore moins d'en évaluer l'impact environnemental. Les paramètres à prendre en compte sont multiples : le coût du matériel, le coût du placement, les coûts d'entretien, les coûts et qualités des combustibles éventuels, les rendements de transformation, la facilité du recyclage, les rejets et émissions aux différentes étapes du cycle de vie...

Ce travail propose d'identifier les différentes technologies de production d'eau chaude sanitaire au niveau des ménages et, partant, de réaliser une analyse multicritère afin de déterminer les solutions les plus performantes des points de vue technique, économique et environnemental.

#### **CHAPITRE 1: L'EAU CHAUDE SANITAIRE**

#### 1.1 RÉPARTITION DES CONSOMMATIONS

La consommation énergétique dans les bâtiments résidentiels représente une large proportion de l'utilisation globale de l'énergie, approximativement 26% de la consommation totale d'énergie primaire dans l'Union européenne [EUROSTAT, 2014]. L'eau chaude sanitaire (ECS) est l'expression couramment utilisée pour désigner l'eau réchauffée à des fins domestiques dans les bâtiments. L'ECS peut être produite par différents moyens et est envoyée par l'intermédiaire d'un réseau de tuyauteries vers les points de puisage habituels, tels que lavabos, douches, baignoires, éviers, machines à laver, lave-vaisselle, etc.

La production d'eau chaude nécessite l'utilisation d'énergie, d'origine fossile ou renouvelable selon les cas, en plus de celle disponible pour le chauffage, l'éclairage et l'électro-ménager. A titre indicatif les besoins énergétiques totaux d'un ménage belge s'élèvent à 40500 kWh/an. Le graphique suivant reprend la répartition de ces consommations pour un ménage wallon en 2004 :

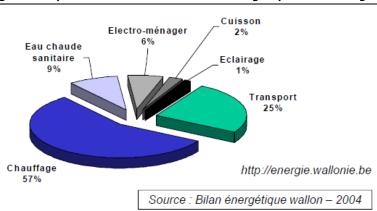


Figure 1: Répartition des consommations énergétiques des ménages

Source : Cours Envi-F449 « Energie et environnement »

L'eau chaude sanitaire ne représente en moyenne que 10 à 15% de la dépense énergétique globale des ménages. Mais ceci est une moyenne valable pour l'ensemble du parc immobilier et certains besoins ont nettement augmentés ces dernières années en même temps que le niveau de confort des nouveaux bâtiments. Les produits 'tendance' comme les douches tropicales, les jacuzzis et les bains vapeur augmentent considérablement la consommation d'énergie. Les consommations quotidiennes d'ECS peuvent aussi changer considérablement d'un ménage à l'autre en fonction des applications et du niveau de vie. La moyenne se situe entre 30 et 60 litres d'eau chaude à 60°C par personne et par jour ¹. Une consommation d'eau de 30 litres par jour et par personne correspondra à une consommation d'eau annuelle de 10,95 m³/pers.

#### 1.2 CONFORT D'UTILISATION

Les installations de production et de distribution d'ECS doivent rencontrer les exigences des utilisateurs en matière de production d'une quantité d'eau chaude à une température et en un laps de temps donnés. Il existe dans la littérature plusieurs normes qui décrivent la production d'ECS; parmi celles-ci citons la NBN 345 (norme belge), la norme ISSO (Pays-Bas) et la norme Recknagel<sup>2</sup>.

Figure 2: Températures d'utilisation de l'ECS

Application	NBN 345	ISSO	Dockpagal
Application	INDIN 343	1550	Recknagel
Lavage des mains	35°C	40°C	35°C
Lavabo	40	40	40
Douche	40	37	40-45
Bain	40	37	40
Vaisselle: machine (hôtels,)	/ 4	55-65	
Vaisselle : à la main	55	50	55
Bain de pieds		-	30-35
Boulangerie		-	70
Blanchisserie	_	-	75

Source : Présentation sur le principe des installations d'ECS - Viessmann 2011

<sup>1</sup> IBGE, INFO-FICHE ENERGIE – La production d'eau chaude sanitaire (ECS 01), Janvier 2008.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Du nom de l'ingénieur allemand Helmut Recknagel, qui publia en 1897 un manuel de chauffage et de climatisation qui porte son nom. Ce manuel fait encore chaque année l'objet d'une mise à jour et s'est imposé au fil du temps comme une véritable référence dans le domaine de l'HVAC.

La figure suivante illustre aussi les débits usuels d'utilisation de l'ECS à une température de 60°C pour différentes applications:

Figure 3: Débits d'utilisation de l'ECS

Application	DIN 1988 (D)	ISSO (NI)	AICVF (F)	NBN EN 806-2
	l/min à 60°C			
Lavabo	4.2	2.5	2.75	3.6
Douche	9	3.6	2.75 à 4.4	5.4 à 7.2
Bain	9	8.2	7.15 à 11	10.5 à 14.5
Evier	4.2	5	5	8 à 11

Source : Présentation sur le principe des installations d'ECS - Viessmann 2011

Le temps d'attente quant à lui est le délai pour que l'eau soit amenée à une température supérieure à 37°C, après l'ouverture du robinet. Il sera fonction de la longueur et du diamètre de la conduite, du type de matériau de la conduite, et de la vitesse de l'écoulement (débit de puisage). Le confort dépendra fortement de ce temps d'attente et il est parfois règlementé.

#### 1.3 QUALITÉ DE L'EAU

Des critères de potabilité de l'eau existent selon les régions. Par exemple à Bruxelles, c'est Vivaqua qui contrôle la qualité de l'eau. Son laboratoire analyse les échantillons d'eau prélevés au niveau des captages, des stockages et des réseaux d'adduction et de distribution. L'eau distribuée doit répondre à des exigences de qualité concernant plus de 55 paramètres. Il s'agit principalement de paramètres microbiologiques, chimiques, radiochimiques, et d'indicateurs divers<sup>3</sup>.

Un autre paramètre de qualité important est la dureté de l'eau qui représente la teneur en calcium et en magnésium dissous dans l'eau. La dureté de l'eau est généralement exprimée en degrés français (°f ou °fH). Elle est parfois exprimée en degrés allemands (°dH).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Site internet de Vivaqua: http://www.vivaqua.be/fr/espace-clients/durete-et-composition-de-leau

Figure 4: Définition de la dureté de l'eau

4 mg/l de calcium
 2,43 mg/l de magnésium
 10 ppm ou 10 mg/l de carbonate de calcium
 0,1 millimole par litre de carbonate de calcium (mmol/l)
 0,2 milliéquivalent par litre de carbonate de calcium (méq/l)
 0,56 degré allemand (°dH)

Source: Vivaqua

Le degré de dureté de l'eau peut alors être déterminé d'après l'échelle suivante :

de 0 à 5°fH: eau très douce de 5 à 15°fH: eau douce

de 15 à 25°fH: eau moyennement dure

de 25 à 40°fH: eau dure > à 40°fH: eau très dure

Ce critère de dureté de l'eau sera particulièrement important pour les techniques de production d'ECS car au plus l'eau est dure et au plus l'installation sera sensible à la précipitation du calcaire (carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>) à haute température. L'eau devra alors être traitée et adoucie afin de limiter l'entartrage, et donc le remplacement prématuré des échangeurs de chaleur.

#### 1.4 NORMES ET EXIGENCES HYGIÉNIQUES

La légionellose est une infection pulmonaire provoquée par une bactérie appelée « légionnelle »: pour éviter son développement entre 25 et 45°C, il faut une production d'ECS à une température supérieure à 50°C et une distribution d'eau de ville isolée des tuyaux de chauffage pour éviter l'élévation de température.

Ses stades de développement correspondent à des gammes de températures très précises :

 $t^{\circ} < 20^{\circ}C$  Etat latent  $25^{\circ}C < t^{\circ} < 45^{\circ}C$  Prolifération  $32^{\circ}C < t^{\circ} < 42^{\circ}C$  Optimum  $50^{\circ}C < t^{\circ}$  90 % des bactéries meurent dans les 2 à 6 h  $60^{\circ}C < t^{\circ}$  90 % des bactéries meurent dans les 5 minutes

#### 1.5 UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE (URE)

Limiter la consommation et les besoins énergétiques est devenu la règle de base pour la conception de nouvelles installations et pour les rénovations. L'adage selon lequel « la meilleure énergie est celle que l'on ne consomme pas » reste d'application pour la production de l'eau chaude sanitaire. Quelques règles de bonne pratique méritent d'être rappelées :

- Éviter le surdimensionnement des ballons accumulateurs de l'ECS qui génèreront d'importantes déperditions de chaleur et veiller à l'entourer d'une bonne isolation thermique.
- Eviter les températures de production trop élevées afin d'éviter les risques de brûlures au-delà des plages de réglage des mitigeurs thermostatiques, tout en respectant la règlementation concernant la prévention de la légionellose. L'ECS sera souvent produite entre 55 et 60 °C.
- Réduire au minimum les longueurs des tuyauteries de distribution d'ECS vers les points de puisage, en particulier l'utilisation des boucles de circulation, particulièrement énergivores.
- Et bien-sûr couper les installations en cas d'absence prolongée, que ce soit pour le chauffage ou l'eau chaude sanitaire.

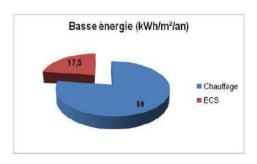
Par ailleurs, le cadre réglementaire concernant la conception technique des bâtiments a très rapidement évolué ces dernières années. Que cela concerne la Performance Energétique des Bâtiments (PEB) dans les 3 Régions du pays, l'accord « Passif 2015 » à Bruxelles qui impose un standard quasi-passif à tous les nouveaux bâtiments bruxellois, la directive européenne 2009/121/CE<sup>4</sup>, dite d'écoconception ou ErP - Energy-related Products - qui vise à réduire les consommations de tous les appareils qui utilisent de l'énergie, le cadre réglementaire a été considérablement renforcé et a fortement réduit la demande en énergie des nouvelles constructions. La part relative de l'eau chaude sanitaire s'est vue renforcée dans le bilan énergétique global.

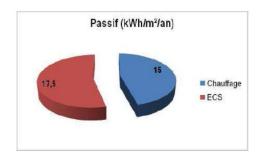
Lorsque la performance énergétique des bâtiments approche celle du passif, en passant par des stades intermédiaires comme la basse et la très basse énergie, les besoins énergétiques résiduels peuvent être couvert presque totalement par des énergies renouvelables, ce qui permettrait de rencontrer les objectifs ambitieux de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 20 % voire plus à l'horizon 2020 pour une ville comme Bruxelles [IBGE, Rapport technique bâtiments exemplaires, 2011, pg. 3].

7

 $<sup>^4</sup>$  Éco<br/>conception pour les appareils consommateurs d'énergie - EUR-Lex - http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?qid=1419899326189&uri=URISERV:en0018

Figure 5: Parts relatives de l'ECS et du chauffage





Source : IBGE - RAPPORT TECHNIQUE - Comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et les immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie, 2010

L'enjeu est donc de déterminer les systèmes les mieux appropriés pour assurer conjointement la couverture des besoins de chaleur de chauffage et d'ECS dans les maisons individuelles ou les logements collectifs en rénovation basse énergie et en conception passive. Cela en garantissant une efficacité énergétique et environnementale pour un confort optimal.

240 200 Närmebedarf [kWh/(m²-a)] 160 120 80 40 Niedrigenergie-Gebäude-Gebäude **Passivhaus** Gebäude bestand ab 1984 ab 1995 haus Anteil Wärmerückgewinnung Lüftungswärmebedarf (Verluste durch Luftaustausch) Transmissionswärmebedarf (Verluste über die Gebäudehülle)

Figure 6: Réponse PEB à la diminution nette des besoins en énergie

Wärmebedarf für Trinkwassererwärmung

Source: Présentation sur le principe des installations d'ECS - Viessmann 2011

Que ce soit dans le cadre d'une conception ou d'une rénovation, la performance énergétique d'un bâtiment conditionnera le choix des systèmes de production de chaleur pour le chauffage et pour l'eau chaude sanitaire. Plus on tend vers le passif et vers la performance, et plus le choix sera orienté vers

un système de production qui met la priorité sur les besoins en ECS, en particulier lorsque l'ECS est produite à partir d'énergies renouvelables.

Si on suppose qu'une douche débite 10 litres/min d'eau à 40°C pendant 5 minutes. La quantité d'énergie nécessaire au chauffage de cette eau en supposant une arrivée d'eau froide à 10°C est de:

50 litres x 1,16 Wh/litre/°C x 
$$(40^{\circ}C - 10^{\circ}C) = 1,74 \text{ kWh/douche}$$

Un bain de 100 litres nécessite de la même manière une énergie de:

100 litres x 1,16 Wh/litre/°C x 
$$(40^{\circ}C - 10^{\circ}C) = 3,48 \text{ kWh/bain}$$

La consommation d'un ménage belge est de 170 litres/jour d'eau chaude à 55°C pour une famille type de quatre personnes, soit +- 3240 kWh/an d'énergie utile pour l'ECS. Pour un ménage économe de quatre personnes, elle sera plutôt de 100 litres/jour d'eau chaude à 55°C, soit +- 1900 kWh/an.

Dans le cadre de ce mémoire, nous ferons l'hypothèse qu'un ménage de 4 personnes a une consommation moyenne de 200 l/jour à 45°C, ce qui correspond une à utilisation de l'ECS de 50 l par jour et par personne à 45°C. Sur base annuelle, cela correspond à une énergie de près de 3000 kWh.

C'est la consommation de référence que nous prendrons en compte pour évaluer l'efficacité, la rentabilité et l'impact environnemental des différentes techniques de production. Nous sommes conscients que cette valeur peut paraître élevée, notamment au vu de l'évolution de la taille moyenne de plus en plus petite des ménages, mais il s'agit avant tout d'une base de calcul qui pourra à tout moment être adaptée par la suite.

#### CHAPITRE 2: UNE MULTITUDE DE TECHNIQUES

#### 2.1 Systèmes traditionnels et innovations scientifiques

Il existe actuellement de nombreuses techniques de production d'eau chaude sanitaire, certaines utilisant des combustibles fossiles et d'autres des sources renouvelables comme le soleil, la géothermie ou le bois. Divers paramètres interviennent dans le choix des combustibles : leur prix, leur disponibilité, leur pouvoir calorifique et leurs rejets dans l'atmosphère. Au moment de leur combustion, les énergies fossiles dégagent en effet des émissions de dioxyde de soufre (SO2), d'oxydes d'azote (NOx), de suie, et bien-sûr de dioxyde de carbone (CO2), responsable de l'effet de serre et du réchauffement climatique. Dans les 30 dernières années, de multiples alternatives aux énergies fossiles pour la production d'ECS ont vu le jour, notamment les capteurs solaires thermiques, les pompes à chaleur et les chaudières à bois.

Même si les chaudières individuelles au gaz ou au mazout restent des références incontournables pour ce qui concerne la production sanitaire, nombre de techniques ont émergé ces dernières années pour se substituer à ces standards. Ainsi suite au renforcement de la réglementation PEB, et aux politiques d'appui financier aux nouvelles technologies, la croissance du nombre d'installations solaires thermiques et photovoltaïques a été spectaculaire ces dernières années en Belgique, tout en marquant un coup d'arrêt brutal en 2013, au moment de la réduction des subventions.

■ Flandre ■ Bruxelles 

Figure 7: Evolution de la puissance photovoltaïque installée en Belgique (MWc/année)

Source: Site internet d'Energie Facteur 4 - EF4

Les pompes à chaleur ont aussi connu un essor remarquable et sont envisagées de plus en plus fréquemment comme seuls générateurs de chaleur dans les nouvelles constructions, tant pour le chauffage que la production sanitaire. L'avantage d'envisager l'installation d'une PAC en *mode monovalent*, i.e. sans autre générateur de chaleur en appoint par opposition au *mode bivalent*, est qu'il ne faut alors fournir que de l'énergie électrique au nouveau bâtiment. Les raccordements en gaz ou l'installation d'une cuve au mazout deviennent inutiles. Dès lors que les puissances requises pour chauffer des bâtiments à « basse-énergie » sont de plus en plus faibles<sup>5</sup>, il n'y a plus aucun inconvénient à y installer des générateurs de chaleur qui fonctionnent entièrement à partir de sources d'énergie renouvelables comme les pompes à chaleurs géothermiques, qui captent la chaleur soit au moyen de sondes verticales, soit via un champ de captation horizontale. Ou encore les pompes à chaleur aérothermiques qui utilisent la chaleur de l'air extérieur.

Enfin évoquons aussi quelques technologies d'avant-garde, pour lesquelles nous disposons à ce stade de trop peu de recul pour affirmer qu'elles se généraliseront dans le futur. Dans cette catégorie, on peut notamment citer les micro-cogénérations et les piles à combustibles, qui sont actuellement encore des niches technologiques inaccessibles pour le grand public<sup>6</sup>, mais néanmoins une réelle vitrine pour les industriels qui ont fait de ces techniques des exemples emblématiques de leur savoirfaire. Après le Japon<sup>7</sup>, ce type de techniques commence à arriver en Europe, mais elles n'en sont encore qu'à leur première génération et leur survie dépendra largement de leur aptitude à démontrer qu'elles peuvent être rentables à long terme sans subsides. Or les premiers retours d'expérience tendent à montrer au contraire que la rentabilité auprès des ménages ne serait atteinte que dans des conditions d'exploitation très particulières, correspondant davantage à l'exception qu'à la règle. Ces techniques ne seront pas discutées plus avant dans le cadre du présent travail.

#### 2.2 LES CHAUDIÈRES

Les chaudières sont des appareils, pouvant être à application domestique ou industrielle selon leur puissance, qui permettent de transférer en continu de l'énergie thermique à un fluide caloporteur, le plus fréquemment de l'eau. L'énergie thermique ainsi créée dans la chaudière peut provenir de

-

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Il n'est plus rare de voir désormais des maisons unifamiliales de 200 m² de surface habitable avec des déperditions thermiques inférieures à 50 W/m², soit une puissance totale de moins de 10 kW.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Rien que le coût du matériel, sans prendre en compte l'installation, tourne autour de +- 18.000 à 20.000 € pour une micro-cogénération et autour +- 25.000 à 30.000 € pour une pile à combustible domestique.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> En mai 2013, il y avait environ 21000 exemplaires de piles à combustible domestiques déjà installées au Japon! Il s'agit d'un modèle commercialisé par la société Panasonic et capable de délivrer en continu des puissances d'environ 0,75 kW<sub>e</sub> et 1,1 kW<sub>th</sub>.

différents types de combustibles. Pour les installations domestiques la chaleur est le plus souvent dégagée par la combustion de gaz naturel, de propane, de mazout ou de bois (bûches ou pellets). Plus rarement la chaleur est obtenue par d'autres sources comme par exemple des poêles au charbon ou des chauffe-eau électriques. Pour les besoins domestiques, divers modèles de chaudières combinées ont été développés, permettant dans le même appareil compact de produire à la fois la chaleur pour le chauffage et l'eau chaude instantanément via un échangeur à plaques.

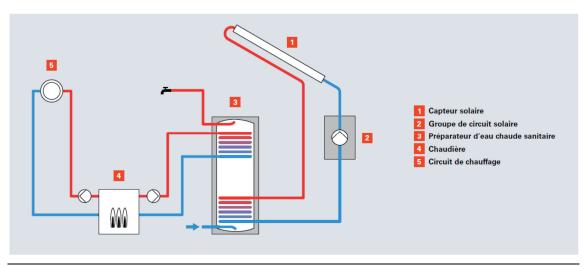
#### 2.3 LES BALLONS ACCUMULATEURS

Les productions instantanées d'ECS peuvent dans certains cas se révéler insuffisantes en débit, notamment dans des cas où les consommations sont relativement importantes. Une alternative peut être alors de placer un ballon accumulateur, habituellement de 100 à 200 litres chez les particuliers. Un tel ballon présente l'avantage de disposer d'une réserve d'eau chaude en permanence à température. Ce type de ballon peut soit être relié à une chaudière classique via un échangeur, soit être complètement autonome. Dans ce dernier cas, on parlera de boiler au gaz, au mazout ou électrique selon le vecteur énergétique utilisé.

#### 2.4 LE CHAUFFE-EAU SOLAIRE

Un chauffe-eau solaire individuel (CESI) est un système destiné à préchauffer une partie de l'eau chaude sanitaire à partir du rayonnement solaire direct ou diffus. Ces systèmes sont composés des capteurs solaires proprement dits (plans ou tubulaires), d'un ballon accumulateur, généralement entre 250 et 400 litres chez les particuliers, ainsi que d'accessoires de pompes et de régulation. Ce type de production d'ECS utilise, mis à part la faible consommation électrique des auxiliaires, une source d'énergie complètement renouvelable mais en Belgique elle doit néanmoins être complétée, par un générateur de chaleur d'appoint reposant sur d'autres sources énergétiques telles que les combustibles fossiles, l'électricité ou la biomasse.

Figure 8: Schéma hydraulique d'une installation solaire thermique

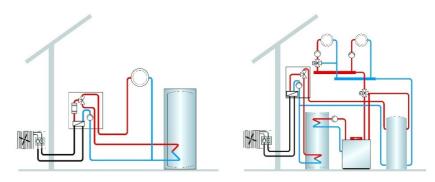


Source: Viessmann - Brochure technique sur le solaire thermique - 2014

#### 2.5 LES POMPES À CHALEUR

Une pompe à chaleur (PAC) est un appareil qui permet de prélever la chaleur d'un milieu émetteur, appelé source froide, et de l'amener vers un autre milieu, fréquemment un bâtiment, considéré comme récepteur ou source chaude. On parle de géothermie quand la source froide est le sol (via des forages verticaux ou des nappes de collecteurs horizontaux) ou d'aérothermie la chaleur est prise dans l'air ambiant. Les PAC peuvent fonctionner en mode de chauffage lorsqu'on désire augmenter la température de la source chaude ou en mode frigorifique lorsqu'on désire abaisser la température de la source froide. Dans tous les cas une alimentation électrique est nécessaire pour actionner le compresseur intégré au circuit interne et il n'y a plus de combustible fossile nécessaire au fonctionnement du système.

Figure 9: Schémas de principe de PAC fonctionnant en aérothermie



Source : Viessmann - Brochure sur les pompes à chaleur - 2014

Dans le cas d'un fonctionnement en mode chauffage, il est possible de raccorder un ballon accumulateur qui permettra de produire l'ECS au départ de la pompe à chaleur, avec ou sans appoint selon les conditions. Les rendements (Coefficient of Performance - COP) vont dépendre des températures des sources froides, de la qualité de la machine (compresseur, détendeur, régulation électronique...), des technologies utilisées (inverter, scroll...) et du gaz frigorifique (R410A, CO2...).

#### 2.6 LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

La production d'électricité au moyen de modules photovoltaïques repose sur le principe de l'effet photoélectrique à partir du rayonnement solaire. Ces cellules produisent un courant continu qui est converti en courant alternatif par un onduleur. Ensuite le courant peut soit être consommé directement pour les différents appareils électro-ménagers et l'éclairage domestique, soit être injecté dans le réseau de distribution en cas d'excédent. Si la production d'eau chaude sanitaire s'effectue exclusivement au moyen d'un boiler électrique, d'une pompe à chaleur ou de tout autre appareil utilisant l'électricité, les modules PV pourront directement y contribuer.

Figure 10: Principe des systèmes photovoltaïques



Source : Base de données de photos Viessmann

#### 2.7 LES BOILERS THERMODYNAMIQUES

Les boilers thermodynamiques ne sont rien d'autre que des petites pompes à chaleur qui prélèvent des calories dans l'air pour les restituer à l'eau chaude sanitaire contenue dans le boiler. Ils peuvent dès lors être vus comme des boilers électriques « améliorés » dans la mesure où ils

consommeront à l'usage 2,5 à 3 fois moins d'énergie finale. Comme l'alimentation de ce type de ballons est purement électrique, ils pourront dans tous les cas être couplés à des systèmes photovoltaïques, ainsi qu'à des systèmes solaires thermiques pour certains modèles.

Figure 11: Installation et détails d'un boiler thermodynamique





Source: Viessmann - Brochure boilers thermodynamiques - 2014

#### 2.8 CHOIX DES SYSTÈMES RETENUS

Etant donné la l'éventail de techniques disponibles, nous étudierons plus en détails trois solutions et leurs combinaisons, qui correspondent aux installations les plus souvent rencontrées et qui seront comparées à une solution classique de référence, à savoir la chaudière murale au gaz qui est devenue le standard dans les logements individuels. Il faut à nouveau préciser que nous avons décidé dès le départ d'étudier exclusivement le cas des logements individuels - maisons unifamiliales et appartements - qui disposent de leur propre système de production d'eau chaude sanitaire. Nous avons décidé de comparer la chaudière au gaz à trois autres techniques parmi les plus répandues :

- Un chauffe-eau solaire individuel (CESI)
- Une installation photovoltaïque couplée à un boiler électrique
- Une pompe à chaleur sanitaire (ballon thermodynamique)

Notons qu'il s'agit dans les 3 cas de systèmes exclusivement destinés à la production d'eau chaude sanitaire, nous n'avons pas étudié de systèmes combinés chauffage-ECS. D'une part car cela complexifie fortement la technique des systèmes étudiés, et surtout d'autre part car avec le renforcement des normes PEB, on s'oriente de plus en plus vers une production des besoins en chaleur dans les nouveaux bâtiments couverte par les énergies renouvelables, en maintenant les énergies fossiles dans un rôle d'appoint.

#### PARTIE III: ANALYSE MULTICRITÈRE

#### CHAPITRE 3: MÉTHODOLOGIE

Les deux premiers chapitres nous ont permis de caractériser les besoins en eau chaude sanitaire (ECS) puis de passer en revue l'état de l'art des principales techniques qui permettent de la produire aujourd'hui au niveau des ménages.

Dans la suite, l'analyse multicritère sera réalisée en suivant les étapes énumérées ci-dessous :

- La définition d'une référence qui servira d'étalon à toutes les comparaisons ultérieures.
   Dans le cadre de ce mémoire, ce sera la chaudière murale au gaz qui servira de point de repère par rapport aux autres techniques.
- 2) Une comparaison des rendements des différentes techniques : cette étape permettra de visualiser les performances intrinsèques à chaque technologie en faisant entre autres appel aux notions de rendement, d'efficacité et de consommation en énergie pour produire l'eau chaude sanitaire. Il s'agira aussi de qualifier, et quantifier, les flux d'énergie entrants et sortants.
- 3) Une comparaison financière qui reprendra non seulement les coûts liés au matériel et à l'installation mais aussi ceux qui découlent de l'exploitation sur la durée de vie des différentes technologies. Ce calcul aboutira concrètement à donner un coût en €/kWh à l'ECS produite par chacune des techniques.
- 4) Une comparaison environnementale : cette partie décrira d'abord la méthode d'analyse des impacts environnementaux du recours à l'énergie de David JC MacKay qui est utilisée pour estimer l'énergie grise. Ensuite l'examen sera approfondi avec l'analyse du cycle de vie détaillée des techniques étudiées en utilisant les données renseignées par la base de données Ecolnvent qui compile plusieurs milliers d'ACV produites dans le monde entier.

5) Enfin une interprétation des résultats et la mise en évidence des techniques de production les plus neutres par rapport à l'environnement. Celle-ci sera réalisée notamment au moyen d'une analyse coûts-bénéfices permettant de croiser les résultats des analyses économique et environnementale.

Dans la suite, la plupart des calculs ont été réalisés sur des techniques appartenant à la gamme du même fabricant de matériel de chauffage, à savoir le groupe industriel allemand Viessmann. Ce choix ne doit pas être interprété comme un parti pris pour une marque par rapport aux autres, mais plutôt comme un souci de pouvoir confronter différents appareils disposant de fiches techniques standardisées, d'une iconographie uniformisée pour les photos et les vues d'artiste, ainsi que d'un large éventail de schémas hydrauliques obéissant aux mêmes conventions pour tout l'assortiment. Or parmi les fabricants présents sur le marché, Viessmann est quasiment le seul à proposer une gamme complète, des « simples » chaudières au gaz aux prototypes futuristes de piles à combustibles domestique. Un autre avantage à examiner un ensemble d'articles au sein de la même gamme, était aussi de pouvoir comparer des prix établis avec la même stratégie commerciale, donc plus ou moins avec les mêmes marges.

Autrement dit, même si Viessmann est classé a priori comme une marque « haut de gamme », le fait de comparer presque exclusivement les tarifs d'un seul fabricant renforce la cohérence et la fiabilité de la comparaison des coûts entre les différents matériels.

#### CHAPITRE 4: ANALYSE TECHNIQUE

Afin de réaliser la comparaison technique entre les différents types de production d'eau chaude sanitaire, nous avons retenu les paramètres suivants à étudier : les rendements de production, la disponibilité de la ressource énergétique, la nécessité d'un stockage et le temps de réaction du système<sup>8</sup>.

#### 4.1 RENDEMENTS DES CHAUDIÈRES

Le calcul des rendements des chaudières à condensation est donné par la formule suivante:

$$\eta_k = 1 - \frac{(q_A + q_S)}{100} + \left[\frac{(H_S - H_i)}{H_i} x \alpha\right]$$

Avec les différents paramètres suivants:

<sup>η</sup> k = rendement de la chaudière [%]

 $q_A$  = pertes par les fumées [%]

 $q_S$  = pertes par rayonnement [%]

 $\alpha$  = coefficient de condensation

 $H_S$  = pouvoir calorifique supérieur

 $H_i$  = pouvoir calorifique inférieur

Par rapport à une chaudière conventionnelle, la formule du rendement est élargie de la partie liée à la condensation. La chaleur latente de la condensation se rajoute à la chaleur sensible. Avec les constantes spécifiques au combustible Hs et Hi (pouvoir calorifique inférieur et supérieur), la part de la condensation est fixée par le coefficient de condensation. Il donne le rapport entre la quantité des condensats effectivement produits dans une chaudière à condensation et la quantité des condensats théoriquement possible. Plus la quantité des condensats effective est élevée, plus efficace est la chaudière à condensation.

Plus la température des fumées est basse, plus grande est la quantité des condensats et donc le coefficient de condensation  $\alpha$ . Simultanément, une température plus basse des fumées, par exemple

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Ces paramètres de comparaison sont en partie inspirés par le rapport technique de l'IBGE sur les bâtiments exemplaires, « comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et les immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie », 2008.

vis-à-vis d'une chaudière basse température, diminue également les pertes par fumées. Ceci signifie que pour les chaudières à condensation, en plus du gain de chaleur obtenu par la condensation, le meilleur rendement énergétique résulte en plus également de pertes moins élevées des fumées. A titre d'exemple, la figure suivante reprend des rendements globaux annuels de différents types de chaudières:

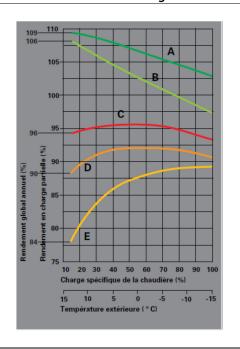


Figure 12: Rendements des chaudières

- A Chaudière gaz à condensation 40/30°C
   B Chaudière gaz à condensation 75/60°C
   C Chaudière basse température (sans limitation inférieure)
   D Chaudière de 1987 (limitation inférieure
- de la température: 40°C)

  E Chaudière de 1975 (température
- E Chaudière de 1975 (température permanente de l'eau de chaudière: 75°C)

Source: Dossier technique à condensation, Viessmann - 2006

#### 4.2 RENDEMENT DES BOILERS THERMODYNAMIQUES

Les rendements des pompes à chaleur sont donnés par leur COP<sup>9</sup> pour des températures de source froide et de source chaude bien déterminées. Selon les applications et les sources de chaleur froide et chaude<sup>10</sup>, les COP usuels atteignent la plupart du temps des valeurs comprises entre 3,5 et 5,5. Dans le cas d'un boiler thermodynamique, le point de mesure spécifique repris dans les normes pour la production d'eau chaude sanitaire est une température d'entrée de l'air à 15°C et une

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> COP = Coefficient of Performance, pour rappel il s'agit du rapport entre l'énergie thermique utile livrée par la pompe à chaleur et l'énergie électrique consommée.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> La source froide d'une pompe à chaleur est le milieu dans lequel est prise la chaleur (eau, air ou sol) et la source chaude est le vecteur énergétique qui va être réchauffé. Typiquement de l'eau de chauffage pour un système de chauffage par le sol, de convecteurs ou de radiateurs ou alors de l'eau chaude sanitaire.

production sanitaire de 15 à 45°C. Dans ces conditions le COP mesuré selon la norme EN 255-3 est donc de 3,7, ce qui signifie que 1 kWh électrique peut fournir 3,7 kWh électrique!

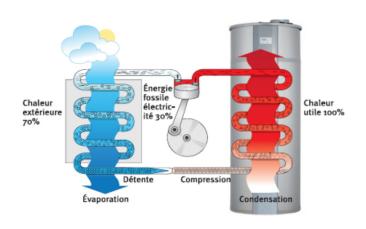


Figure 13: Fonctionnement d'un boiler thermodynamique

Source : Présentation des PAC sanitaires, Viessmann - 2008

Cependant de récentes études de l'Adème<sup>11</sup> viennent jeter un froid sur ces résultats remarquables au premier abord. L'Agence française pour le Développement et la Maîtrise de l'énergie a en effet réalisé depuis 2010 plusieurs campagnes de tests sur des installations de chauffe-eau thermodynamiques et les résultats se sont révélés très décevants : les mesures ont montré que les performances réelles étaient très inférieures au COP<sup>12</sup> de laboratoire de l'ordre de 3,5 à 3,7.

Dans beaucoup de cas, des problèmes de mise en œuvre ont été constatés, dégradant fortement les performances de l'appareil. Soit les machines étaient raccordées directement sur l'air ambiant, et dans le volume chauffé de l'habitation et un refroidissement pouvant atteindre 5 à 6°C a été observé, générant des surconsommations de chauffage. Soit elles étaient placées à l'inverse dans un endroit non chauffé, ce qui augmentait les pertes et de surcroit la consommation électrique. La seule configuration valable est celle où le ballon est placé à l'intérieur mais est alimenté avec de l'air extérieur via des gaines de ventilation.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Etude de l'ADEME citée dans l'article « Le chauffe-eau thermodynamique à l'épreuve », du n°76 de la revue « La Maison écologique ».

 $<sup>^{12}</sup>$  Le COP d'une pompe à chaleur ou d'un ballon thermodynamique est le quotient  $^{COP} - \frac{|Q|}{W}$  où Q est la chaleur utile à l'échangeur et W est le travail mécanique absorbé par le compresseur. Une PAC avec un COP de 3,5 apporte donc en théorie 3,5 kWh d'énergie thermique pour 1 kWh d'énergie électrique absorbée.

Malgré cela les COP réellement mesurés sur base annuelle ne dépassaient pas 1,5 à 2. Ces mauvais résultats s'expliquent par le surdimensionnement du boiler à 300L, alors que 200 ou 250L à température sont souvent suffisants, et par les pertes thermiques statiques qu'il génère qui sont de l'ordre de 1 à 3 kWh par 24 heures! Nous sommes ici confrontés à une des limites de ces techniques qui est la faible vitesse de production de l'ECS. Au plus grande est la demande en confort sanitaire et au plus gros devra être le ballon accumulateur pour pouvoir répondre au débit de pointe souhaité. Mais au plus importantes seront aussi les pertes thermiques diffusées par les parois du ballon.

Une solution à ce problème semble être la PAC au CO<sub>2</sub>, qui utilise donc le dioxyde de carbone comme gaz réfrigérant et est beaucoup mieux adapté pour une production à haute température, autour de 65° ou 80°C, là où les réfrigérants traditionnels montent péniblement à 54 ou 60°C.

Mais même dans ce dernier cas qui sort du lot, l'installation monitorée n'a atteint qu'un COP annuel de 2,4 à la place de 3,42 obtenu en laboratoire. Un coefficient de performance de 2,4 reste bien entendu intéressant par rapport à un boiler purement électrique. Par contre son intérêt environnemental est à relativiser dès le moment où on tient compte d'un mix électrique du réseau qui nécessite 3 kWh d'énergie primaire pour 1 kWh d'électricité disponible à la prise.

#### 4.3 RENDEMENT DES SYSTÈMES SOLAIRES THERMIQUES

Le rendement des capteurs solaires thermiques s'exprime en seconde approximation par la formule suivante:

$$\eta = \eta_0 - \alpha_1 \left( \underline{T_m - T_a} \right) - \alpha_2 \left( \underline{T_m - T_a} \right)^2$$

$$G$$

 $\eta$  = rendement global du capteur solaire

 $\eta_0$  = rendement optique du système vitre-absorbeur et du contact thermique entre absorbeur et fluide caloporteur

 $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  = respectivement coefficients linéaire et quadratique de pertes thermiques entre l'absorbeur et l'ambiance (exprimé en W.m².°C-¹ pour  $\alpha_1$  et W.m².°C-² pour  $\alpha_2$ )

T<sub>m</sub> = température moyenne de fonctionnement de l'absorbeur

T<sub>a</sub> = température ambiante

G = éclairement énergétique incident (en  $W/m^2$ )

Ce rendement dépendra d'une part des caractéristiques intrinsèques du capteur solaire, comme le vitrage, l'absorbeur sélectif, la transmission du fluide caloporteur et l'isolation thermique, et d'autre

part évidemment des conditions météorologiques extérieures, de la propreté du vitrage, des ombres portées, du type de stockage et de l'éfficacité de l'échangeur [MOURTADA, 2004].

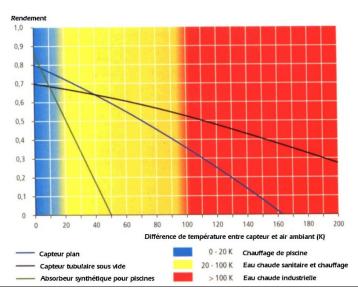


Figure 14: Rendements des capteurs solaires thermiques

Source : Typologie des capteurs solaires – Document du bureau 3E. Séminaire technique pour les bureaux d'études – Namur le 28 novembre 2003.

Toutefois si on prend en compte l'ensemble des composants du système solaire thermique, c.-à-d. en plus des capteurs solaires, le ballon accumulateur, les tuyauteries de raccordement et le circulateur alors le rendement global n'est plus de 70 à 80% mais de +- 25 % (voir simulation à l'Annexe 1). Cela représente la part d'énergie incidente sur les capteurs qui est effectivement récupérée dans le ballon pour chauffer l'eau sanitaire. Il s'agit donc d'un rendement pertinent pour évaluer l'efficacité d'un système mais comme il s'agit d'énergie gratuite et surtout d'origine entièrement renouvelable, ces « pertes » auront bien entendu nettement moins d'incidence sur l'environnement.

#### 4.4 RENDEMENT DES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

L'énergie photovoltaïque résulte de la conversion directe de la lumière en énergie électrique. A cette fin des semi-conducteurs sont utilisés, comme le silicium, l'arseniure de gallium, le tellurure de cadmium ou des alliages de couches minces CIGS - cuivre-indium-gallium-sélénium. Les cellules en silicium polycristallin sont certainement les plus utilisées actuellement avec plus de 80% du marché. Une cellule solaire de silicium est formée de deux couches jointes mais « dopées » différemment. La couche qui fait face à la lumière est dopée négativement avec du phosphore et présente par

conséquent un excès d'électrons ; il s'agira de l'électrode négative. La couche sous-jacente est dopée positivement au bore et présentera un déficit d'électron (des trous) ; ce sera l'électrode positive. A la couche limite se crée alors un champ électrique polarisé grâce aux recombinaisons électrons-trous. Lorsque les rayons du soleil, ou simplement la lumière, impacte les cellules, des électrons sont libérés. Les électrons et les trous se concentrent au niveau des contacts électriques, ce qui produit une tension continue entre les faces avant et arrière de la cellule. C'est ce qu'on appelle l'effet photo-électrique de la jonction P-N.

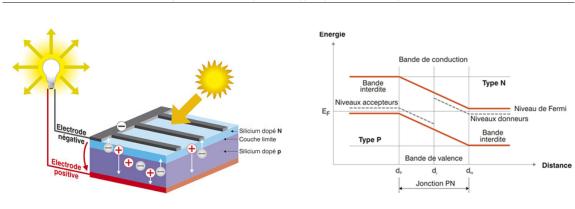


Figure 15: Principe de l'effet photoélectrique

Source : Site internet Energieplus - DG04 Direction Générale wallonne Architecture et Climat

Ensuite le courant continu observé passe par un transformateur, appelé « onduleur », qui le convertira en courant alternatif monophasé ou triphasé, utilisable dans les applications domestiques. Le rendement d'une cellule est le ratio entre l'énergie lumineuse reçue à sa surface et l'énergie électrique produite.

Le rendement d'une cellule photovoltaïque serait d'environ 85% si chaque photon pouvait transférer toute son énergie à un électron. Cependant, ceci n'est pas le cas vu que le transfert d'énergie peut se faire uniquement si la bande d'énergie propre à chaque semi-conducteur est atteinte. Ainsi, les photons avec une énergie inférieure à cette valeur type ne pourront participer à l'effet photovoltaïque (leur énergie sera convertie en chaleur) et les photons avec une énergie supérieure à cette valeur type ne pourront transmettre que l'énergie propre au semi-conducteur (tout excès est alors perdu). Dans les cellules actuelles, ces deux effets limitent le rendement théorique des cellules à 50% [Systèmes solaires, juillet 2006].

Figure 16: Rendements des cellules photovoltaïques

	Туре	Rendement cellule (en labo)	Module (en labo)	Module (commercial)	Niveau de développement
			1ère gér	nération	
	Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
	Silicium polycristallin	20,30%	16,20%	11-15%	Production industrielle
			2e gén	ération	
	Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
	Silicium cristallin en couche mince		9,40%	7%	Production industrielle
	CIS	19,30%	13,50%	9-11 %	Production industrielle
	CdTe	16,70%		6-9%	Prêt pour la production
			3e gén	ération	<u> </u>
400,000,000	Cellule organique	5,70%			Au stade de la recherche
*37777777	Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Au stade de la recherche
	Cellules multi- jonctions	39%*	25-30%**		Au stade de la recherche production exclusivemen pour applications spatial

'sous concentration de 236 solelis

" Module triple jonction GainP/AsGa/G/Ge

Source : Systèmes Solaires - hors série spécial recherche solaire - juillet 2006

Source: Revue Systèmes Solaires - Hors-série spécial recherche solaire - juillet 2006

Dans les meilleurs des cas, les cellules commerciales ont des rendements de l'ordre de 20 à 25 %. Des rendements de l'ordre de 40% ont toutefois déjà été atteints en laboratoire pour des cellules multijonction mais vu leur coût exorbitant <sup>13</sup>, ces applications sont réservées à l'heure actuelle exclusivement au domaine spatial.

#### 4.5 **DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES**

Si on se penche à présent sur la disponibilité de chacune de ces ressources, il faut évidemment faire la distinction entre énergies fossiles et renouvelables. D'une part avec les quantités extraites de pétrole et de gaz naturel qui sont inexorablement appelées à diminuer. Même s'il y a encore des controverses sur le moment où devrait se produire le pic pétrolier, l'arrivée du pic puis le recul de la production pétrolière à un rythme plus ou moins rapide selon les modèles, ne fait plus aucun doute.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Les panneaux photovoltaïques de dernière génération montés sur les satellites sont constitués de cellules en arseniure de gallium à triple jonction et ont actuellement un coût de USD 40 \$/cm²...

Tous liquides sauf agrocarburants

Tous liquides sauf agrocarburants

IEA

Bauquis
Laherrère
Campbell

Figure 17: Scénarios de réalisation du pic de production pétrolier

Source : Conférence sur le Pic pétrolier - Patrick Brocorens - ULB 14 octobre 2014

D'autre part, l'uranium qui est utilisé comme combustible pour la production d'électricité dans les réacteurs nucléaires pourrait bien voir ses réserves diminuer assez rapidement. Car le visage du nucléaire de demain dépendra de l'évolution des ressources en uranium, elles-mêmes liées à l'évolution du parc mondial de réacteurs. Avec le nombre actuel de réacteurs, les besoins en matières premières semblent couverts pour les 200 à 400 prochaines années. Mais si le nombre de réacteurs est multiplié par 5 à l'horizon 2050, ce qui n'a rien d'impossible au regard des programmes ambitieux de construction de nouvelles centrales dans des pays comme la Chine, l'Inde ou la Russie, alors la filière électronucléaire pourrait se retrouver à court d'uranium avant la fin du siècle<sup>14</sup>.

Pour ce qui concerne les énergies renouvelables, rappelons que nous nous sommes limités dès le départ aux technologies de production d'eau chaude sanitaire au niveau des ménages, ce qui écartait les pompes à chaleur géothermiques et les chaudières à bois, biomasse ou pellets principalement destinées au chauffage, de même que l'hydro-électrique ou l'éolien, qui pourraient certes sur papier faire office de source d'électricité pour l'ECS, mais qui ne sont en pratique jamais des énergies utilisées exclusivement pour ce type de production. Suite à cette sélection, il reste les boilers thermodynamiques qui sont une sous-famille des PAC aérothermiques, mais seulement destinés à la production d'ECS, et l'énergie solaire tant thermique que photovoltaïque.

Tant l'air ambiant que le soleil sont des ressources gratuites et illimitées. Il faut cependant remarquer que dans tous les cas les PAC auront toujours besoin d'électricité pour fonctionner et bien souvent l'origine (et le coût) de l'électricité seront les éléments déterminants à prendre en compte à côté du COP. Le rayonnement solaire constitue quant à lui une ressource inépuisable, du moins à l'échelle

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Dossier nucléaire en ligne du Centre National pour la Recherche Scientifique (CNRS - France) – consulté à l'adresse http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosnucleaire/

humaine. Mais il faut pour la Belgique encore rappeler la limitation donnée par le nombre d'heures d'ensoleillement. On estime généralement que l'énergie totale reçue en un an par une surface de 1 m² est de l'ordre de 1000 kWh, dont 60% de rayonnement diffus. Ce rayonnement présente toutefois un inconvénient majeur : son intensité peut varier dans de larges limites de temps. Ainsi, sur les 1000 kWh/m² annuels en Belgique, 750 kWh arrivent entre le 15 avril et le 15 octobre et seulement 250 kWh/m² du 15 octobre au 15 avril ! Il faudra dès lors résoudre plusieurs problèmes : obtenir des conditions de captage optimales pour ce type de rayonnement, le convertir en d'autres formes d'énergie plus facilement utilisable, pallier à l'irrégularité de l'approvisionnement par des solutions de stockage et prévoir des solutions d'appoint énergétique [MOURTADA, 2004].

Un autre élément important à prendre en considération est que contrairement aux chaudières gaz ou mazout qui sont capables de fournir une pointe de puissance instantanément pour produire l'eau chaude en quelques minutes, toutes les solutions impliquant une production d'ECS par énergie solaire, par pompe à chaleur ou simplement via un boiler électrique devront nécessairement prévoir un certain volume de stockage. Cela est lié au mode de fonctionnement par accumulation de ces techniques, qui ont besoin de plusieurs heures pour produire l'ECS. Pour assurer un minimum de confort aux utilisateurs, il est fréquent de prévoir des boilers de 100 à 300 L.

Une étude réalisée par le CERAA<sup>15</sup>, ayant pour thème « les potentialités de l'application des principes de la maison passive en Région de Bruxelles-Capitale » [CERAA, 2008] a permis d'établir que la surface moyenne par appartement est de 85m². En prenant en compte les contraintes d'encombrement ou d'ombrage, le calcul des surfaces de toitures disponibles pour le placement de panneaux solaires (thermiques ou photovoltaïques) donne entre +- 28 m² pour tout type de toiture, à 2 versants ou plate, ce qui est suffisant pour 5 à 6 installations solaires thermiques ou 2 petites installations photovoltaïques.

Compte-tenu des différentes techniques énumérées au chapitre précédent, il est utile de discuter à ce stade la concurrence entre le solaire thermique et le photovoltaïque pour la production d'ECS :

- Selon ses paramètres de dimensionnement et d'installation, le solaire thermique peut produire +- 350 à 500 kWh<sub>th</sub>/(m².an) de chaleur pour les besoins sanitaires
- Selon les puissances et les rendements, le photovoltaïque peut de son côté couvrir environ +-120 à 160 kWh<sub>e</sub>/(m².an)

-

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Centre d'Etude, de Recherche et d'Action en Architecture, localisé à Bruxelles.

Ce qui signifie que concrètement, il faudra en moyenne une surface photovoltaïque trois fois plus grande que pour le thermique pour produire une même quantité d'énergie. Or nous avons vu précédemment que dans la réalité, le COP des boilers thermodynamiques dépasse rarement 2,5 pour produire de l'ECS de 10 à 45°C. Ce qui signifie que 1m² de PV produira in fine entre 300 à 400 kWh<sub>th</sub>/(m².an). Ce qui reste malgré tout inférieur aux performances des systèmes solaires thermiques.

# 4.6 Consommations par technique

En reprenant notre consommation type de 200L à 45°C par jour par ménage, avec l'équation :

 $Q = m Cp \Delta T$ 

avec Q =la quantité de chaleur

m = la masse d'eau chaude

Cp = la chaleur spécifique de l'eau

 $\Delta T$  = la différence entre les températures initiale et finale

 $Q = 0.2 \text{ X } 1.1625 \text{ X } 35 \text{ X } 365 \approx 3000 \text{ kWh par an pour la production d'ECS}.$ 

Cela donne les consommations suivantes exprimées en énergie finale:

• Chaudières au gaz :

En supposant un rendement annuel global de 80% pour l'ECS :

3000 kWh/0,8 = **3750 kWh** 

• Ballons électriques :

En supposant un rendement de conversion électrique global de 95% et des pertes statiques de 1,5 kWh/24h pour un ballon de 200L:

(3000 kWh + (1.5 kWh/j\*365 jours)) / 0.95 = 3734 kWh

• Ballons solaires + appoint chaudière:

En supposant un ballon solaire de 250L ayant des pertes statiques de 0,89 kWh/24h, une chaudière au gaz en appoint d'un rendement de 80% et une fraction solaire de 50%<sup>16</sup> de l'énergie utile:

$$(1500 \text{ kWh} + (0.89 \text{ kWh/j}*365 \text{ jours})) / 0.8 = 2281 \text{ kWh}$$

<sup>16</sup> La fraction solaire est le pourcentage des besoins énergétiques utiles effectivement couverts par les apports énergétiques du chauffe-eau solaire.

Notons que 2281 kwh serait la consommation totale si les pertes du ballon étaient prises en charge par la chaudière. Or comme elles représentent +- 10% de la consommation totale, il est parfaitement possible de considérer qu'elles seront compensées, dans ce cas-ci et dans les cas suivants, par une augmentation de la production du système solaire thermique. Le bilan devient donc :

$$(1500 \text{ kWh}) / 0.8 = 1875 \text{ kWh}$$

• Ballons solaires + appoint électrique:

En supposant un ballon solaire de 250L ayant des pertes statiques de 0,89 kWh/jour, avec un appoint électrique doté d'un rendement de conversion de 95% :

$$(1500 \text{ kWh}) / 0.95 = 1579 \text{ kWh}$$

## • Pompe à chaleur sanitaire:

En supposant un ballon accumulateur de 250L, ayant des pertes statiques de 0,768 kWh/jour, un COP selon la nouvelle norme de 2,85<sup>17</sup>, une température d'air à l'entrée de 7°C et une température d'ECS de 10 à 55°C. Il s'agit ici du COP nominal, puisqu'il n'est pas encore tenu compte des pertes statiques.

$$(3000 \text{ kWh} + (0.768 \text{ kWh/j*365 jours})) / 2.85 = 1151 \text{ kWh}$$

# • Pompe à chaleur sanitaire + solaire thermique

En reprenant les hypothèses précédentes relatives au boiler thermodynamique de 250L et en lui ajoutant un système solaire thermique tel que défini plus haut, délivrant une fraction solaire de 50%. Les capteurs solaires thermiques sont raccordés au ballon de la PAC via une spirale incorporée en usine.

$$(1500 \text{ kWh}) / 2,85 = 526 \text{ kWh}$$

#### • Photovoltaïque :

En supposant qu'un système photovoltaïque produit de l'ECS par l'intermédiaire d'un ballon de 200L chauffé électriquement, avec un rendement de conversion électrique de 95% et des pertes statiques de 1,5 kWh/jour. Il faut donc couvrir (3000 kWh + (1,5 kWh/j\*365 jours)) / 0,95 = **3734 kWh** En supposant un facteur de conversion de 0,85 kWh par kWc en Belgique, il faudra une puissance de:

3734/0,85 = 4393 Wc ≈ 4,5 kWc pour produire l'ECS seulement à partir de PV

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> La nouvelle norme EN 16147 a remplacé la EN 255-3, et définit un protocole de mesure des COP des boilers thermodynamiques beaucoup plus réaliste. Celui-ci intègre à présent un cycle complet de performances de la machine sur 24h avec la simulation d'un puisage standard d'eau chaude (au lieu d'1h précédemment). Ces nouveaux COP normatifs tournent en moyenne autour de 2,5. Cependant en pratique, compte-tenu des pertes statiques, le COP réel sera plus faible [BOULANGER, 2013].

• Pompe à chaleur sanitaire + photovoltaïque :

En reprenant les hypothèses de la pompe à chaleur sanitaire de COP 2,85 avec ballon de 250L ayant des pertes statiques de 0,768 kWh/jour.

Il faut couvrir une demande en électricité (3000 kWh + (0,768 kWh/j\*365 jours)) / 2,85 = **1151 kWh** 1151/0,85 = 1354 Wc  $\approx$  **1,5 kWc pour produire l'ECS à partir de PAC + PV** 

• Pompe à chaleur sanitaire + solaire thermique + photovoltaïque :

C'est conceptuellement la solution la plus séduisante puisqu'elle combine 3 productions énergétiques renouvelables. Les capteurs solaires couvrent une fraction de 50% de la production d'ECS. Le COP de 2,85 de la pompe à chaleur permet d'en produire 30% et les 20% d'énergie électrique encore à fournir au compresseur de la PAC le sont par des panneaux photovoltaïques.

La demande en électricité est de : (1500 kWh) / 2,85 = 526 kWh

526/0,85 = 620 Wc ≈ 0,65 kWc pour produire l'ECS à partir de PAC + Solaire + PV

En toute rigueur, il faut aussi tenir compte d'un phénomène de vieillissement des cellules photovoltaïques sur la durée de vie des systèmes. La plupart des fabricants de modules garantissent 90% de puissance nominale après 10 ans et 80% après 25 ans. Pour compenser cette perte de production, il faudrait donc en théorie majorer les puissances crêtes de 20% pour être certain de produire encore suffisamment d'électricité après 25 ans.

Les systèmes photovoltaïques évoqués aux trois derniers points deviennent respectivement :

 $4,393/0,8 \approx 5,5$  kWc pour produire l'ECS seulement à partir de PV  $1,354/0,8 \approx 1,75$  kWc pour produire l'ECS à partir de PV + PAC  $0,620/0,8 \approx 0,8$  kWc pour produire l'ECS à partir de PV + PAC + Solaire

#### 4.7 BILAN ÉNERGÉTIQUE

Les consommations des différentes techniques exprimées en énergie finale sont reprises en résumé dans le tableau suivant :

Tableau 1: Consommations finales des différentes techniques										
	6	Elec	Sol +	Sol+	PAC	PAC		PAC +	PAC +	PAC + Sol
	Gaz	Elec	Gaz	Elec			PAC	PAC	PV	PV
kWh	3750	3734	1875	1579	1151	3734	1151	526	526	

Dans ce tableau nous avons maintenu volontairement les consommations électriques en lien avec des systèmes photovoltaïques car, même s'il s'agit d'une consommation que l'utilisateur final ne verra plus, elle est bien réelle et l'électricité produite par les modules PV pourrait très bien alimenter d'autres systèmes si cette consommation était plus faible. La différence est très nette par exemple entre une installation PV seule et un système combiné PAC + PV.

Sans surprise, c'est la production d'ECS exclusivement à partir d'électricité qui consomme le plus d'énergie finale pour l'utilisateur et les productions qui incluent une PAC qui sont les plus économes. Même si la remarque paraît évidente, les PAC et le PV doivent être alimentés en énergie électrique alors que les chaudières le sont en énergie thermique. Cela ne fait pas de différence d'un point de vue énergétique au niveau des consommations finales chez les particuliers, par contre cela prend toute son importance dès qu'on raisonne en termes d'énergie primaire.

En Belgique, les centrales thermiques assurent aujourd'hui la base de la production: centrales nucléaires, cycles combinés turbine gaz vapeur et centrales classiques au gaz ou au fioul. Les unités de cogénérations, les stations hydrauliques de pompage-turbinage, les parcs éoliens, le photovoltaïque

et la biomasse complètent la production.

Parc de production d'électricité-Belgique (2013) Source : Fact & figure Elia Eo En Un (sa So So Cc Cogen 1.780 MW Solaire PV: 2.652 MW Raccordé GRD Gaz nat 4.280 MW 820 MW 548 MW Nucléaire 5.926 MW Ce Ce Au

Figure 18: Parc de production d'électricité en Belgique en 2013

Source: ULB - Cours ENVI-F449 Energie et environnement - 2015

Raccordé GRT

Toutes ces unités ont des performances différentes et en tenant compte des pertes de transport et de distribution, un rendement moyen de 40% peut être considéré en première approximation. Le logiciel PEB applique d'ailleurs lui aussi le coefficient de conversion moyen de 2,5 (r = 40%)<sup>18</sup>.

En appliquant ce coefficient correctif aux valeurs du tableau 1, mais uniquement aux consommations électriques fournies par le réseau, i.e. la production électrique pure, celle combinée avec le solaire thermique et celle à l'aide de la PAC, on trouve les consommations en énergie primaire. La production photovoltaïque étant décentralisée sur les logements, on peut considérer que 100% de l'énergie convertie par l'onduleur est transmise directement aux habitations sans pertes. Le tableau 2 peut alors être établi :

Tableau 2: Consommations primaires des différentes techniques									
	6	Floo	Sol +	Sol+	DAG	PV	PAC +	PAC +	PAC + Sol
	Gaz	Elec	Gaz	Elec	PAC		PV	PV	Sol
kWh	3750	9335	1875	3948	2878	3734	1151	1315	526

Ce tableau permet de quantifier les différences de consommations en énergie primaire pour 3000 kWh d'ECS produits par an. Les résultats confirment que la production électrique pure est la plus énergivore des possibilités alors que la combinaison PAC + Solaire + PV est la plus économe. On remarquera en particulier que l'énergie primaire destinée à l'ensemble PAC + Solaire + PV représente près de 5% de l'énergie primaire d'une production par ballon électrique, pour la même quantité d'ECS! En résumé nous obtenons le tableau 3 qui reprend les caractéristiques des systèmes étudiés.

Tableau 3: Caractéristiques des différentes techniques de production d'ECS						
	Gaz	Ballon élec	Sol + Gaz	Sol + Elec	PAC	
kWh finaux	3750	3734	1875	1579	1151	
kWh primaires	3750	9335	1875	3948	2878	
Ressource	Fossile	Mix réseau	Renouvelable + fossile	Renouvelable + mix réseau	Renouvelable + mix réseau	
Nécessité stockage	Non	Oui 200L	Oui 250L	Oui 250L	Oui 250L	
Temps de réaction	Instantané	Accumulation	Accumulation + Instantané	Accumulation	Accumulation	

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Cours ENVI-F449 - Energie et environnement, partie 04-A « Le secteur électrique », pg 18. Par ailleurs, le site Energie+ qui est une des références en Wallonie en matière de dimensionnement des techniques spéciales dans le bâtiment prend en considération un rendement moyen primaire de 38%.

-

	Ballon élec + PV	PAC + PV	PAC + Sol	PAC + Sol + PV
kWh finaux	3734	1151	526	526
kWh primaires	3734	1151	1315	526
Ressource	Renouvelable	Renouvelable	Renouvelable +	Renouvelable
Ressource	100%	100%	mix réseau	100%
Nécessité stockage	Oui	Oui	Oui	Oui
Necessite stockage	200L	250L	250L	250L
Temps de réaction	Accumulation	Accumulation	Accumulation	Accumulation

Notons que ce tableau ne tient pas encore compte des consommations électriques des auxiliaires qui peuvent ne pas être négligeables, comme nous le verrons par la suite.

Néanmoins une première conclusion est que l'usage d'énergies alternatives, à la place du système de référence constitué par la chaudière murale à gaz, impose nécessairement le placement d'un ballon accumulateur car aussi bien pour un ballon électrique que pour un chauffe-eau solaire ou une pompe à chaleur, l'eau chaude sanitaire sera produite par accumulation. Ce qui imposera de dimensionner le ballon en conséquence pour répondre aux besoins plus ou moins importants du ménage, et amènera par ailleurs d'autres contraintes liés à l'encombrement et au poids du ballon.

Un second point qui découle directement du premier est que, indépendamment du système utilisé, les pertes statiques des ballons accumulateurs sont très loin d'être négligeables. Elles sont proportionnelles à la surface de déperdition des ballons et aussi à leur rapport  $\frac{Surface}{Volume}$ . Ce qui veut dire qu'elles diminuent proportionnellement quand la taille du ballon augmente mais il n'empêche que pour des petits ballons à usage domestique, elles restent de l'ordre de 10 à 15% de la consommation utile, ce qui est énorme.

# CHAPITRE 5 : ANALYSE ÉCONOMIQUE

La partie précédente a permis de détailler les performances techniques, les rendements et les consommations effectives en énergie primaire. Dans cette section, nous aborderons les aspects économiques, en particulier les coûts des différents types de matériel, de la main d'œuvre pour les installer et de la maintenance sur leur durée de vie. Ces données mises en rapport avec les consommations énergétiques permettront in fine de parvenir à un coût global en €/kWh d'ECS.

#### 5.1 HYPOTHÈSES

Comme annoncé précédemment, nous nous sommes basés principalement sur la gamme du fabricant de matériel de chauffage Viessmann pour pouvoir estimer des prix. Les prix ont été décomposés de la manière la plus précise possible entre coût du matériel, coût de l'installation, coût de la maintenance et coût de l'énergie d'utilisation.

Pour rappel, les chaudières murales au gaz ont une durée de vie approximative de 12 à 15 ans, les pompes à chaleur de 20 à 25 ans, les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques de 25 à 30 ans. Pour les besoins de cette étude, nous avons pris en compte des durées de vie moyennes respectives de 12,5 ans pour les chaudières et boilers électriques, et de 25 ans pour, les PAC et les installations solaires. Pour ce qui concerne les chaudières murales, une durée de vie de 12,5 ans parait peu mais il s'agit du temps moyen de remplacement sur le marché, même si une bonne qualité de matériel et un entretien régulier pourront sensiblement rallonger ce laps de temps. Ces multiples de 12,5 années permettront aussi de combiner les différentes techniques plus facilement entre elles.

L'évolution des prix dans le temps, notamment vis-à-vis des coûts d'exploitation, de maintenance et d'entretien, devra être corrigée de la valeur de l'inflation. Pour pouvoir comparer les prix courants entre eux, ils devront être exprimés en prix constants avec la même année de référence selon la formule :

*Prix* année N exprimés en 
$$\in_Y$$
 = Prix courant année N x  $(1+i)^{(Y-N)}$ 

Avec i l'inflation moyenne sur la période ; dans le cadre de ce travail, une inflation de 2% par an sera prise en compte, ce qui est une hypothèse plutôt assez conservatrice car on trouve souvent dans la littérature des valeurs d'inflation moyenne des combustibles fossiles supérieures à 5% voire à 8%.

#### 5.2 **Coûts PAR TECHNIQUE**

Pour éviter d'alourdir le texte inutilement, seuls les coûts totaux et les coûts énergétiques annuels d'utilisation ont été repris directement dans les tableaux ci-dessous. La ventilation détaillée des calculs pour chacune des techniques pourra être retrouvée dans les annexes. Tout comme le calcul du coût d'exploitation moyen annuel et du coût de revient de chaque installation n'a été développé que pour la chaudière murale, le calcul précis se trouvant à l'Annexe 2.

Les coûts de l'énergie considérés sont ceux en vigueur au mois d'août 2015, soit 5,9 c€/kWh pour le gaz, 16c€/kWh pour l'électricité de nuit et 24c€/kWh pour l'électricité de jour.

-Pour les circulateurs des installations solaires thermiques qui fonctionnent forcément de jour mais une partie en heures creuses (WE et matin en été), nous avons tenu compte de 22c€/kWh

-Pour les régulations et les chaudières pouvant fonctionner toute l'année, tarif moyen de 20c€/kWh

-Pour les PAC et les ballons électriques, nous faisons l'hypothèse la plus favorable financièrement, une accumulation exclusivement au tarif de nuit 0,16 c€/kWh

## • Chaudières au gaz :

Dès le départ, les limites des systèmes étudiés avaient clairement été définies : il s'agissait exclusivement d'examiner différentes techniques de production d'ECS. Néanmoins dans le cas de chaudières murales classiques, les modèles les plus souvent placés fournissent une production combinée de chauffage et d'eau chaude. C'est le même appareil qui fournit les deux fonctions.

Pour contourner cette difficulté et afin de donner une évaluation correcte du prix pour la fonction de production d'ECS, nous avons posé une hypothèse supplémentaire qui est la répartition du nombre d'heures de fonctionnement entre la production de chaleur pour l'ECS à +- 25%, et celle relative au chauffage à +- 75%. Cette clé de répartition correspond en fait au partage de la demande dans des bâtiments satisfaisant aux normes PEB actuelles. Par corollaire, nous faisons aussi les hypothèses que la répartition des coûts entre ECS et chauffage suit celle de la production de chaleur 25/75 et que la consommation électrique annuelle de la chaudière est de 200 kWh, dont 50 kWh pour l'ECS.

Selon les données recueillies, le tableau suivant peut alors être établi :

Tableau 4: Coûts pour une chaudière au gaz

Description des coûts	Prix HTVA	Prix TVAC	Prix pour
matériels/installation/entretien			l'ECS 25%
Modèle de base de chaudière murale à condensation			
Type Viessmann Vitodens 100-W combi 26 kW			
+ Accessoires			
+ Mais d'œuvre pour l'installation			
+ Entretien sur 12,5 ans	5193,1 €	6283,64 €	1570,91 €
Coût combustible ECS sur 12,5 ans à 5,9 c€/kWh =			
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 3542,4 €	+ 4286,27 €	+ 4286,27 €
Coût électricité sur 12,5 ans à 20 c€/kWh =			
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 640,43 €	+ 774,92 €	+ 193,73
TOTAL	9376 €	11345 €	6051 €
	HTVA	TVAC	TVAC

Les consommations utile et finale de la chaudière au gaz étaient respectivement de 3000 kWh et de 3750 kWh pour l'eau chaude sanitaire.

Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de :

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie (gaz + \'elec)}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{(4286,27+193,73)}{3000} / \frac{12,5}{12,5} = \textbf{11,95} \ c \in /\textit{kWh}$$

Le coût de revient par kWh utile produit pour l'ECS pendant 12,5 ans sera de :

$$\frac{\textit{Coût total}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{6051}{12,5 \times 3000} = \textbf{16}, \textbf{14} \ \textit{c} \in /\textit{kWh}$$

# • Ballon électrique :

Bien que peu performants d'un point de vue du bilan primaire, nous avons néanmoins maintenu le boiler électrique pour l'analyse économique afin d'en évaluer les écarts de coûts à l'exploitation par rapport à la chaudière de référence et aux autres techniques. Une fois n'est pas coutume, nous avons retenu ici un boiler électrique de la gamme de Renova - Bulex, ce genre de matériel n'existant pas dans la gamme de Viessmann.

C'est précisément le modèle de boiler mv 4818-1gm-200 l avec groupe de sécurité qui a été pris pour la comparaison. Le modèle choisi possède une anode active permanente en titane contre la corrosion

et une résistance électrique stéatite<sup>19</sup>. Ces deux éléments nous permettront de poser l'hypothèse qu'aucun entretien récurrent n'est nécessaire et que sa durée de vie approximative est de 12,5 ans. De plus nous supposons qu'il est mis à température avec le courant de nuit.

Nous obtenons le tableau suivant :

Tableau 5: Coûts	pour un	ballon é	lectrique:
------------------	---------	----------	------------

•		
Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	Prix TVAC
Modèle de boiler électrique à anode active et résistance		
stéatite. Type Renova Bulex mv 4818-1gm-200 l		
+ Main d'œuvre pour installation	+ 823,55 €	+ 976,5 €
Coût électricité sur 12,5 ans à 16 c€/kWh		
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 9565,47 €	+ 11574,22 €
TOTAL	10389 €	12571 €
	HTVA	TVAC

Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de **30,86 c€/kWh**Le coût de revient par kWh utile produit pendant 12,5 ans sera de : **33,5 c€/kWh** 

En attendant la comparaison globale, on peut d'emblée remarquer que les économies réalisées à l'achat du matériel, dues à son faible coût, à sa simplicité d'installation et à l'absence d'entretien régulier, sont très largement contrebalancées par le coût de l'électricité du réseau. Même en prenant le tarif de nuit de 16 c€/kWh, les coûts d'exploitation moyens et de revient du boiler électrique pour l'ECS sont plus du double de ceux d'une chaudière murale.

# • Ballon solaire + appoint chaudière:

Pour ce qui concerne le solaire thermique, nous revenons à la gamme de Viessmann avec un ensemble constitué de deux capteurs solaires montés en toiture, chacun d'une surface optique de 2m², raccordés à un ballon de 250L. Les pertes statiques de ce ballon sont de 0,89 kWh/24h. L'ensemble comprend une pompe de puissance maximale 40W qui fait circuler le fluide caloporteur entre les capteurs solaires et le ballon quand la différence de température est favorable. Il y également une régulation électronique qui reste allumée en permanence pour commander le système et absorbe une puissance électrique de 1,5W. L'entretien recommandé consiste à remplacer le fluide caloporteur (éthylène-

<sup>19</sup> La stéatite est une roche très tendre et résistante composée de talc. Elle est utilisée dans les boilers électriques pour servir de barrière entre la résistance électrique et l'eau à chauffer.

glycol) au moins tous les 5 ans, à vérifier la pression du vase d'expansion et à nettoyer si nécessaire la face vitrée des capteurs solaires. Il n'y a pas réellement d'entretien à prévoir chaque année, mais on peut budgéter en moyenne +- 25€/an pendant 25 ans. Nous prenons comme hypothèse que la chaleur d'appoint est fournie par une chaudière au gaz dont il faut prévoir 2 exemplaires car leur durée de vie moyenne est estimée à +- 12,5 ans.

Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	Prix TVAC
Ensemble de capteurs solaires thermique + accumulateur		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2m² + ballon 250L		
+ Accessoires		
+ Main d'œuvre		
+ Entretien sur 25 ans	+ 5951,38 €	+ 7201,17 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires solaires: circulateur		
et régulation en euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans :	+ 766,49 €	+ 927,46 €
Modèle de base de chaudière murale à condensation (25%)		
Type Viessmann Vitodens 100-W combi 26 kW x 2		
+ Accessoires		
+ Mais d'œuvre pour l'installation		
+ Remplacement et entretien sur 25 ans	+ 2721,36 €	+ 3292,85 €
Coût combustible d'appoint sur 25 ans à 5,9 c€/kWh		
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 3629,84 €	+ 4392,11 €
Coût électricité chaudière 50kWh/an sur 25 ans à 20 c€/kWh		
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 410,15 €	+ 496,28 €
TOTAL	13479 €	16310 €
	HTVA	TVAC

Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de : **7,75 c€/kWh**Le coût de revient global (solaire + chaudières) par kWh utile pendant 25 ans sera de : **21,75 c€/kWh** 

L'estimation du coût de revient spécifique à l'installation solaire thermique par quantité de chaleur solaire produite se fait à partir de la notion de « coût du chauffe-eau solaire par kWh de gaz utilisé ». Le coût du chauffe-eau solaire par kWh de combustible économisé est calculé de la manière suivante:

$$C_{CES} = \frac{INV}{n \, x \, (A_{solaire}/\eta_{chaudière})} \, x \, 100$$

C<sub>CES</sub> = coût du Chauffe-Eau Solaire par kWh de gaz économisé (en c€/kWh de gaz).

INV = investissement total du CES, hors subsides (en €).

n = durée de vie escomptée du chauffe-eau solaire (en années).

A<sub>solaire</sub> = apport énergétique solaire annuel (en kWh/an).

 $\eta_{chaudière}$  = rendement global annuel de l'installation existante (en %).

Notons que le ratio (A<sub>solaire</sub> / η<sub>chaudière</sub>) donne le montant de l'énergie d'appoint économisée.

Et donc:

$$C_{CES} = \frac{8128,63}{25 \, x \, (1825/0,80)} \, x \, 100 = 14,25 \, \text{c} \text{-kWh}$$

Ce qui amène à certaines considérations d'ordre économique :

Si économiser un kWh de gaz avec un chauffe-eau solaire "coûte" moins cher que le prix commercial actuel du kWh de gaz, alors il y a un intérêt économique dans l'installation d'un chauffe-eau solaire pour produire une partie de l'eau chaude. Par contre, si ce coût est plus élevé que le prix actuel du gaz sur le marché, l'attrait économique de l'opération est moindre [MOURTADA, 2004]

Selon ce concept, « le coût par kWh de gaz économisé » est de 14,25 c€/kWh, ce qui est plus du double du prix du gaz de 5,9 kWh. Cela tient en partie à des prix actuels très bas des énergies fossiles au niveau mondial. De plus, étant donnée la productivité par m² installé en Belgique, de l'ordre 350 à 500 kWh par an, les installations solaires thermiques ont encore fréquemment besoin de subsides pour être rentables. Nous ne rentrerons pas dans le détail du calcul de rentabilité en déduisant les primes car il existe une multitude d'aides financières qui ont des montants différents selon la Région où on habite, selon qu'il s'agisse d'une habitation neuve ou existante et selon le niveau de revenu du demandeur, et cela complexifierait inutilement l'analyse de traiter chaque cas particulier.

Notons simplement que ces primes ont généralement des montants de base compris entre 1500 et 2500 € et qu'elles sont plafonnées à 50% de l'investissement. Ce niveau maximal de subside permettrait dans notre cas de réduire le coût par kWh économisé de moitié, soit 7,125 c€/kWh ce qui comblerait une partie de la différence mais reste au moins 1 cent au-dessus du prix du gaz.

Bien entendu la rentabilité globale du système solaire thermique dépendra directement du type de combustible utilisé pour le générateur de chaleur d'appoint. D'un point de vue strictement financier

avec les conditions de marché actuelles <sup>20</sup>, le kWh thermique produit par des capteurs solaires reviendra, en tenant compte des primes, entre 10 et 20 % plus cher que le kWh issu de la combustion du gaz ou du mazout. Par contre, il sera beaucoup plus compétitif dès que les prix de l'énergie repartiront à la hausse et dans le cas d'une production d'ECS à partir d'électricité. C'est ce qui est démontré au paragraphe suivant.

# • Ballon solaire + appoint électrique:

Les mêmes hypothèses que précédemment ont été reprises pour ce qui concerne le système solaire thermique. La seule différence dans ce cas-ci est que l'appoint est donné par une résistance électrique alimentée par le réseau. Pour rappel, nous avons considéré un prix de l'électricité de 0,24 €/kWh le jour et 0,16 €/kWh la nuit.

Tableau 7: Coûts pour un système solaire thermique avec appoint électrique

Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	PRIX TVAC
Ensemble de capteurs solaires thermique + accumulateur		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2m² + ballon 250L		
+ Accessoires		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 6171,38 €	+ 7467,37€
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 9843,64 €	+ 11911 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires: circulateur et		
régulation en euros avec 2 % d'inflation pdt 25 ans	+ 766,49 €	+ 927,46 €
TOTAL	16782 €	20306 €
	HTVA	TVAC

Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de : 17,12 c€/kWh

Le coût de revient global (solaire + électrique) par kWh utile pendant 25 ans sera de : 27,07 c€/kWh

Le coût par kWh d'électricité économisé devient: 17,48 c€/kWh

Le coût du kWh électrique évité est de 17,48 c€, ce qui est inférieur au tarif électrique de jour de 24 c€/kWh et rend le solaire thermique compétitif sans aucune prime par rapport au tarif électrique de

<sup>20</sup> Avec un prix du gaz naturel de 5,9 c€/kWh, un prix du mazout de 6,1 c€/kWh, un tarif heures creuses de l'électricité à 16 c€/kWh et un tarif heures pleines de 24 c€/kWh.

jour. Avec les primes en vigueur de l'ordre de 50% de l'investissement, l'installation solaire thermique devient aussi rentable par rapport au tarif de nuit.

# • Pompe à chaleur sanitaire:

Pour cette section, nous avons à nouveau pris un article de la gamme Viessmann, à savoir le nouveau ballon thermodynamique Vitocal 060-A, qui est un ballon d'une contenance de 250L surmonté par une petite PAC air-eau de 1,5 kW. Cette pompe à chaleur miniature produit l'eau chaude à partir de la chaleur puisée dans l'air ambiant de l'habitation ou de l'air extérieur via des gaines. Selon la nouvelle norme EN 16147, le COP est égal à 2,85. Les taux de TVA considérés sont de 21% sur le matériel et l'électricité. La durée de vie minimale est évaluée à 25 ans, soit +- 50.000 heures de fonctionnement du compresseur.

Tableau 8: Coûts	pour une pompe	à chal	eur sanitaire
------------------	----------------	--------	---------------

rancas er court pour ant pempe a ent		
Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 3120,38 €	+ 3775,66 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 7553,35 €	+ 9139,55 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires sur 25 ans:		
régulation en euros avec 2 % d'inflation pdt 25 ans	+ 107,79 €	+ 130,42 €
TOTAL	10782 €	13046 €
	HTVA	TVAC

Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de : 12,36 c€/kWh Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de : 17,39 c€/kWh

A nouveau remarquons que nous n'avons pas tenu compte d'éventuelles primes à l'achat mais elles existent jusqu'à concurrence de 750 €, ce qui améliore encore la rentabilité de l'investissement.

## • Ballons électriques + photovoltaïque :

Enfin pour ce qui concerne les systèmes alimentés en tout ou en partie par une installation PV, ce sont les hypothèses concernant la technique de base de production d'ECS qui restent d'application, c'est-à-dire ici le simple boiler électrique auquel on adjoint l'installation photovoltaïque. Celle-ci a une durée de vie estimée à 25 ans. Il n'y a quasiment pas d'entretien à prévoir si ce n'est le remplacement de l'onduleur après +- 15 ans ainsi que des inspections visuelles occasionnelles sur la propreté de la face vitrée des modules. Les modules photovoltaïques ont été aussi choisi dans la gamme de Viessmann, plus précisément le module Vitovolt 200 type P255BB (255 Wc) ainsi qu'un onduleur de marque SMA de type SB 5000 TL-21.

Tableau 9: Coûts pour un ballon électrique + un système photovoltaïque			
Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	Prix TVAC	
Modèle de boiler électrique à anode active et résistance stéatite			
Type Renova Bulex mv 4818-1gm-200 l x 2			
+ Main d'œuvre pour l'installation	+ 1878,4 €	+ 2272,87 €	
Installation PV complète de 5610 Wc - 22 modules Vitovolt			
P255BB + onduleur SMA SB 5000 TL-21 + accessoires			
+ Main d'œuvre pour l'installation			
+ Entretien sur 25 ans	+ 13067 €	+ 15811,07€	
TOTAL	14945,4 €	18084 €	
	HTVA	TVAC	

Avec la production photovoltaïque, le coût moyen annuel sera nul pour produire l'ECS: **0 c€/kWh**Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de: **24,11 c€/kWh**Il s'agit bien du coût global « all-in » de la production sanitaire sur les 25 ans de durée de vie du système photovoltaïque, matériel, main d'œuvre et maintenance inclus.

# • Pompe à chaleur sanitaire + photovoltaïque :

La combinaison d'une PAC sanitaire avec un système photovoltaïque conduit à réduire la puissance crête des modules (si l'installation n'est dimensionnée que pour l'eau sanitaire).

Tableau 10: Coûts pour une pompe à chaleur sanitaire + un système photovoltaïque

Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 3120,38 €	+ 3775,66 €
Installation PV complète de 1785Wc - 7 modules Vitovolt		
P255BB + onduleur SMA SB 1,5 VL40 + accessoires		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien	+ 5422,17 €	+ 6560,83 €
TOTAL	8543 € HTVA	10336 € TVAC

Ici à nouveau le coût moyen annuel sera nul pour produire l'ECS grâce au photovoltaïque: **0 c€/kWh**Et le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de: **13,78 c€/kWh** 

Tout comme pour les installations solaires thermiques et les pompes à chaleur, les systèmes photovoltaïques peuvent encore bénéficier d'un certain nombre d'aides financières de la part des pouvoirs publics en Wallonie et à Bruxelles. Comme précédemment, nous ne les examinerons pas dans les détails. Pour simplifier, on peut dire que désormais les aides sont limitées seulement aux 3 premiers kWc de l'installation et qu'elles permettent encore de récupérer de 30 à 50 % de l'investissement.

En considérant une prime de 30% sur la partie photovoltaïque et une prime de 750 € à l'achat d'un boiler thermodynamique, le coût de revient effectif par kWh s'avère être plus attractif :

$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{7618,2}{25\ x\ 3000} = 10,16\ c \in /kWh$$

Ces calculs de rentabilité qui mettent en avant les primes pour les installations fonctionnant aux énergies renouvelables sont des outils très appréciés par les vendeurs mais ils ont le défaut d'avoir « financiarisé » l'investissement, en renvoyant à l'arrière-plan les avantages techniques et environnementaux des différentes technologies. C'est le problème qu'il y a eu au moment du lancement des premiers régimes d'aides en Flandre et en Wallonie, avec une rémunération de la production photovoltaïque sous forme de « certificats verts » à un niveau tellement élevé que le PV en est devenu pendant plusieurs années un produit financier plus rentable que n'importe quel placement boursier. Les investissements massifs qui ont suivi dans le photovoltaïque ont conduit les pouvoirs publics à devoir payer des montants de certificats verts insoutenables à long terme, ce qui a

amené à une réduction drastique des niveaux des primes et en parallèle à une crise de confiance majeure dans l'opinion. Ceci alors que les prix d'achat des modules PV ont été divisés par 4 entre 2008 et 2015! On se retrouve ainsi aujourd'hui dans la situation paradoxale où les installations PV n'ont jamais été aussi rentables intrinsèquement, mais leurs ventes se sont effondrées par rapport à la période 2008-2012.

La confiance dans les énergies renouvelables revient lentement mais il est indispensable qu'elles redeviennent aux yeux du public un investissement reconnu pour ses bénéfices techniques et environnementaux, plutôt qu'un jackpot financier.

# • Pompe à chaleur sanitaire + solaire thermique :

Une variante intéressante est la combinaison de la PAC sanitaire avec des capteurs solaires thermiques. Il s'agit en réalité d'un boiler thermodynamique ordinaire avec un ballon de 250L, mais avec une spirale intégrée à l'intérieur pour se raccorder à des capteurs solaires thermiques. Le concept est de préchauffer l'ECS d'abord avec l'énergie solaire avant de l'amener à température de 55 ou 60 °C avec la PAC.

Tableau 11: Coûts pour une PAC sanitaire + un système solaire thermique		
Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 3561,38 €	+ 4309,27 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 3451,83 €	+ 4176,72 €
Ensemble de capteurs solaires thermique		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2,32 m²		
+ Accessoires		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 5392,38 €	+ 6524,78€
Coût de fctment des auxiliaires solaires circulateur et		
régulation en euros avec 2 % d'inflation pdt 25 ans :	+ 750,50€	+ 908,1 €
TOTAL	13156 €	15918 €
	HTVA	TVAC

Le coût énergétique moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de : **6,78 c€/kWh** Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de : **21,22 c€/kWh** 

• Pompe à chaleur sanitaire + solaire thermique + photovoltaïque :

Enfin pour terminer, évoquons la ou l'une des solutions probablement les moins polluantes en fonctionnement pour l'environnement qui est la combinaison d'un boiler thermodynamique avec des capteurs thermiques et des panneaux photovoltaïques. Nous reprenons intégralement les éléments de la configuration précédente auxquels une installation PV est ajoutée pour produire l'électricité de la pompe à chaleur.

Tableau 12: Coûts pour une PAC sanitaire + solaire thermique + photovoltaïque

Description des coûts matériels/installation/entretien	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 3561,38 €	+ 4309,71 €
Ensemble de capteurs solaires thermique		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2,32 m²		
+ Accessoires		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien sur 25 ans	+ 5392,38 €	+ 6524,78 €
Installation PV complète de 1275Wc - 5 modules Vitovolt		
P255BB + onduleur SMA SB 1,5 VL40 + accessoires		
+ Main d'œuvre pour l'installation		
+ Entretien	+ 3230,98 €	+ 3909,49 €
TOTAL	12185 €	14743 €
	HTVA	TVAC

Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera encore une fois nul grâce au système photovoltaïque : 0 c€/kWh

Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de : 19,66 c€/kWh

## 5.3 BILAN ÉCONOMIQUE

En résumé nous pouvons établir à présent un tableau synthétique qui reprend pour chacune des techniques une structure des coûts pour le matériel, l'installation, la maintenance et l'exploitation.

Tableau 13: Structure de coût par technique

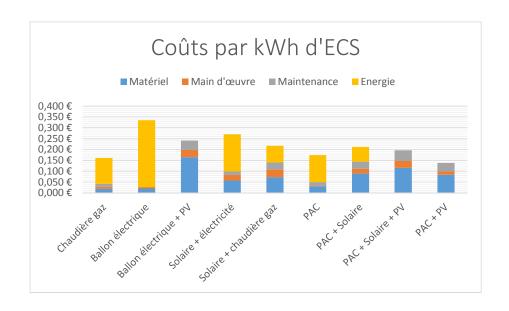
		Matériel	Main d'œuvre	Maintenance	Energie	Total	
Chaudière gaz		724€	363 €	484 €	4.480 €	6.051€	sur 12,5 ans
Ballon électrique		755 €	242 €	0€	11.574€	12.571 €	sur 12,5 ans
Ballon électrique +	PV	12.347 €	2.488 €	3.249 €	0€	18.084 €	sur 25 ans
Solaire + électricité		4.291€	1.936 €	1.241 €	12.838€	20.306 €	sur 25 ans
Solaire + chaudière	gaz	5.481€	2.531€	2.481 €	5.816€	16.310 €	sur 25 ans
PAC		2.293 €	242 €	1.241 €	9.270€	13.046 €	sur 25 ans
PAC + Solaire		6.658€	1.694 €	2.481 €	5.085 €	15.919€	sur 25 ans
PAC + Solaire + PV		8.631 €	2.420 €	3.691 €	0€	14.743 €	sur 25 ans
PAC + PV		6.261€	1.210€	2.866 €	0€	10.336 €	sur 25 ans

Mais tous les coûts ne peuvent pas encore être directement comparés puisque certains systèmes ont été évalués sur 12,5 ans et d'autres sur 25 ans. Afin de réaliser une analyse fiable, il faut par conséquent « normaliser » les coûts en les réduisant à une unité d'eau chaude sanitaire produite, soit 1kWh. L'hypothèse de départ était une consommation de 3000 kWh d'ECS par an. Ce qui nous amène au tableau de coûts normalisés et aux diagrammes suivants:

Tableau 14: Structure de coût normalisée par technique

	Matériel	Main d'œuvre	Maintenance	Energie	Total	Rang
Chaudière gaz	0,019€	0,010€	0,013€	0,119€	0,161€	2
Ballon électrique	0,020€	0,006 €	0,000€	0,309 €	0,335 €	9
Ballon électrique + PV	0,165€	0,033 €	0,043 €	0,000 €	0,241 €	7
Solaire + électricité	0,057€	0,026 €	0,017€	0,171€	0,271 €	8
Solaire + chaudière gaz	0,073 €	0,034 €	0,033 €	0,078 €	0,217€	6
PAC	0,031€	0,003 €	0,017€	0,124€	0,174 €	3
PAC + Solaire	0,089€	0,023 €	0,033 €	0,068 €	0,212€	5
PAC + Solaire + PV	0,115€	0,032 €	0,049 €	0,000 €	0,197€	4
PAC + PV	0,083 €	0,016 €	0,038 €	0,000 €	0,138 €	1

Figure 19: Coûts de revient par kWh d'ECS



Les résultats sont assez expressifs : d'une part la technique la plus chère est clairement et de très loin la production purement électrique de l'ECS qui est pénalisée par le prix de l'électricité. Ceci même en ayant considéré que les ballons électriques sont mis à température avec le tarif de nuit ; la différence aurait certainement été encore plus nette avec le tarif de jour. Avec un coût moyen de 0,335 €/kWh sur toute la durée de vie du matériel, les ballons électriques ont un prix qui est plus du double de la solution la moins chère, la pompe à chaleur sanitaire combinée à du photovoltaïque, qui revient à 0,138 €/kWh, à un coût plus bas que la référence de la chaudière au gaz !

Structure des coûts par kWh d'ECS

Matériel Main d'œuvre Maintenance Energie

Maintenance Energie

Maintenance Energie

Charlière gal Ballon de Energie

Figure 20: Structure des coûts par kWh d'ECS

Avant de poursuivre l'analyse, précisons que nous avons volontairement envisagé des investissements à partir de zéro, comme s'il s'agissait à chaque fois d'une installation neuve qui nécessite l'achat du

générateur de chaleur basé sur les énergies renouvelables mais aussi de son appoint éventuel. Dans la réalité, ce seront fréquemment des investissements complémentaires effectués en rénovation avec une chaudière déjà présente pour l'appoint. De même, la TVA a été prise en compte à un niveau de 21% pour le matériel, la main d'œuvre, l'entretien et l'énergie. Dans certains cas, elle peut être ramenée à 6% en rénovation, mais notre approche était celle d'une installation pour une construction neuve.

De manière générale, on observe que toutes les techniques dont la structure de coût contient une part importante d'alimentation en énergie pendant la phase d'exploitation se retrouvent parmi les plus chères du classement. La chaudière au gaz fait figure d'exception à la deuxième place du classement mais c'est surtout lié au prix du marché qui pour le moment avec un prix du gaz naturel de +- 5,9 c€/kWh se trouve à un niveau plancher sur les dernières années.

Parmi les énergies renouvelables, on s'aperçoit aussi que le solaire thermique est à la peine. Même s'il permet de produire la moitié de l'énergie nécessaire à l'ECS, il est doublement pénalisé : d'une part il doit obligatoirement être couplé avec un générateur de chaleur d'appoint, ce qui veut dire alourdir l'investissement d'une chaudière, d'une résistance électrique ou d'une PAC. Et d'autre part ces systèmes d'appoints sont caractérisés par des consommations importantes en électricité ou en gaz. Les coûts des systèmes solaires thermiques continuent à être relativement élevés par rapport à leur production énergétique nette. Financièrement, les installations solaires thermiques combinées avec un appoint au gaz ou électrique arrivent sixième et huitième du classement.

Enfin on constate que quatre des cinq systèmes les plus performants économiquement, intègrent une PAC seule ou en combinaison avec d'autres techniques. Cela est dû au COP des pompes à chaleur qui permet de réduire par un facteur 2,5 à 3 (2,85 dans notre cas) les consommations électriques finales destinées au fonctionnement du compresseur. Et ce ne sont pas forcément les techniques qui génèrent les consommations finales les plus faibles par an qui seront les plus économiques sur leur durée de vie. Les ensembles PAC+Solaire et PAC+Solaire+PV sont les plus compétitifs à l'usage mais leur rentabilité à long terme est réduite en raison de la lourdeur des investissements initiaux. Les bons résultats de la solution PAC+PV s'expliquent enfin par la combinaison de deux techniques dont la mise en œuvre est relativement simple, qui demandent assez peu de maintenance, et pour lesquelles il n'y aura pas de facture d'énergie en phase d'exploitation.

# CHAPITRE 6: ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

#### 6.1 IMPACT ENVIRONNEMENTAL

L'impact environnemental du recours à l'énergie englobe tous les impacts des activités de la chaîne de conversion énergétique y compris le cycle de vie des équipements. La dépense énergétique totale d'un produit ou d'un service est la somme de toutes les énergies consommées au cours de son cycle de vie. Fréquemment on la divise en quatre phases [MACKAY, 2009, Chap. 15):

- Phase M Matières premières: cette phase correspond à l'extraction et au traitement des matières premières en vue d'en faire des unités usinables par les fabricants. Les coûts énergétiques de cette phase incluent les coûts de transport pour acheminer les matières premières jusqu'à leur destination suivante, la production ou manufacture.
- Phase P Production: les matières premières sont transformées en des produits manufacturés. Les coûts énergétiques de cette phase incluent leur conditionnement et leur transport.
- Phase U Utilisation : consommation d'énergie lors de l'utilisation.
- Phase D Destruction: Cette phase comprend la dépense énergétique induite par l'élimination du « déchet » ou par sa transformation en matières premières (recyclage).

Pour déterminer avec précision la quantité d'énergie consommée durant toute la vie d'un produit/service, chacune des phases doit être estimée et additionnée. Mais dans la plupart des cas, la dépense énergétique totale est dominée par une des quatre phases. Une estimation précise la dépense énergétique de la phase dominante permet alors d'obtenir une estimation raisonnable de la dépense énergétique totale. Pour les énergies fossiles, la phase dominante est souvent celle de l'utilisation. Pour les énergies renouvelables, ce sera plus partagé entre les phases M, P et U selon les applications.

On appelle « énergie grise » la consommation d'énergie de toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou service hors consommation de son utilisation, soit la somme des phases M+P+D. Ces étapes sont

simplifiées si on analyse le cycle de vie de la ressource énergétique (N1), l'étape de conversion finale (N2) et l'analyse du cycle de vie des équipements (N3) [HUART, 2014].

On distingue alors :

- N1 la préparation de l'énergie finale avec toutes les étapes depuis la ressource jusqu'à l'énergie finale et le traitement post-conversion. Cette phase est parfois subdivisée en N1 amont, qui correspond à l'extraction, au transport, au stockage, et au conditionnement des combustibles, et N1 aval qui correspond à la gestion des déchets et au recyclage
- N2 la conversion finale de la ressource de l'énergie finale en énergie utile
- N3 l'énergie incorporée (énergie grise) dans les équipements utilisés lors de la conversion finale

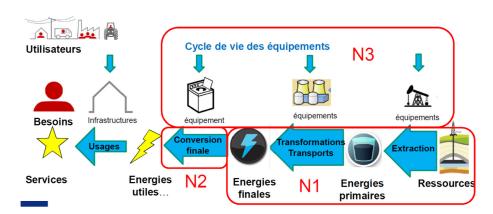


Figure 21: Analyse du cycle de vie des structures énergétiques

Source: ULB - Cours ENVI-F449 Energie et environnement - 2015

En se focalisant par exemple sur les émissions de CO<sub>2</sub>, on peut en déterminer les quantités libérées dans l'atmosphère à partir du type de source d'énergie brute, de la quantité d'énergie consommée et des coefficients N1 (préparation du combustible), N2 (quantité unitaire de CO<sub>2</sub> émise pendant la combustion) et N3 (énergie grise des équipements). Dans la pratique, s'il est possible en général de calculer N1 et N2 à partir de l'étude du procédé concerné, il est en revanche beaucoup plus difficile de connaître N3 et l'énergie grise utilisée lors de la conversion finale, à moins de recevoir directement des informations précises de la part des fabricants mais ceux-ci se retranchent fréquemment derrière le secret industriel pour ne pas communiquer à ce sujet.

# 6.2 ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Dans le cadre de ce travail, nous avons finalement décidé de comparer des analyses du cycle de vie (ACV), afin d'étudier les impacts sur l'environnement des différentes techniques de production d'eau chaude sanitaire. Au départ l'ACV est une méthode qui a été développée dans les années 70 par et pour l'industrie afin d'analyser le profil environnemental, la consommation des ressources et les aspects énergétiques des entreprises [ACHTEN, 2015].

L'Analyse du Cycle de Vie peut être définie comme une technique de quantification des impacts environnementaux associés au cycle de vie complet d'un produit ou d'un service. L'ACV permet d'en calculer les impacts/profils énergétique et environnemental, de comparer la performance environnementale des produits et systèmes de production et d'identifier les éventuelles options d'optimisation. Il s'agit donc d'un outil d'aide à la décision, dont les résultats permettent de comparer deux solutions ou produits entre eux. Il peut être utilisé pour des besoins d'écoconception et de design des produits, de sensibilisation des consommateurs, de planification stratégique ou encore de recommandations pour des politiques publiques [ACHTEN, 2015].

Quatre grandes catégories d'impacts environnementaux peuvent être définies:

- 1. Les impacts sur la santé humaine avec les accidents graves et risques sanitaires associés à l'activité du point de vue des transports, de la conversion énergétique, des déchets, etc.
- 2. Les impacts sur la qualité des écosystèmes avec par exemple les pollutions (air, eau, sol, biosphère) ou l'espace occupé par l'activité énergétique.
- 3. Les impacts des émissions de CO2, CH4 et autres gaz à effet de serre sur les changements climatiques.
- 4. L'épuisement des ressources naturelles

#### 6.3 Hypothèses de la modélisation

Nous avons comparé l'impact environnemental des différentes solutions via l'analyse respective de leur cycle de vie. Les données utilisées sont celles de la base de données mondiale EcoInvent utilisée via le logiciel professionnel SimaPro<sup>21</sup>. Pour ce faire nous avons choisi des profils types d'installations de boiler électrique, d'installation solaire thermique, de système photovoltaïque et de pompe à chaleur qui ont, ainsi que plusieurs de leurs combinaisons, été comparés avec une solution de

<sup>21</sup> L'accès à SimaPro s'est fait à l'ULB sur le terminal du local UD3.201. Toutes les données et graphiques d'ACV dont il est question dans la suite ont été générés à partir de cet ordinateur et peuvent y être retrouvés pour d'éventuelles études ultérieures.

référence, une chaudière au gaz à condensation. Il y a principalement deux types d'approches possibles. D'une part l'approche attributionelle qui réalise une modélisation du système dans laquelle les entrées et les sorties sont attribuées à l'unité fonctionnelle et qui décrit les caractéristiques

environnementales du cycle de vie d'un produit en considérant que les limites du système sont isolées.

D'autre part l'approche conséquentielle qui vise à prendre en compte comment le cycle de vie d'un

produit affecte d'autres processus en conséquence d'un changement dans la demande de l'unité

fonctionnelle. Dans ce cas-ci nous adopterons l'approche attributionelle qui est mieux adaptée à

l'analyse de produits déjà existants sur le marché alors que l'approche conséquentielle étudiera mieux

l'arrivée de nouveaux produits [ACHTEN, 2015].

Voici pour chacune des techniques, les hypothèses qui ont été prises en compte pour la

modélisation des processus sur le logiciel SimaPro. Pour pouvoir les comparer entre elles nous avons

repris exclusivement des processus de production de chaleur ayant la même unité fonctionnelle (1

MJ). Les modules-types de la base de données EcoInvent ont tous été adaptés et parfois créés de

toutes pièces pour coller le plus possible aux solutions étudiées:

Chaudière au gaz :

Module: heat production, natural gas, at boiler condensing modulating <100kW BE

Il s'agit de la référence par rapport à laquelle nous allons comparer les autres techniques. Le module

choisi reprend une chaudière au gaz modulante et à condensation avec une puissance inférieure à 100

kW. La puissance habituelle des chaudières murales chez les particuliers dépasse rarement les 35 kW,

mais cette différence de puissance n'est pas un problème puisque tous les impacts sont ramenés à la

production de l'unité fonctionnelle, à savoir 1 MJ. Nous faisons l'hypothèse que la différence d'impact

ne dépassera pas l'ordre de grandeur du facteur d'échelle. L'alimentation électrique est celle du mix

électrique basse tension du réseau belge. Les autres paramètres par défaut n'ont pas été modifiés.

Chaudière au mazout :

Module: heat production, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating BE

Les chaudières au mazout n'étaient pas reprises dans notre étude mais comme un module-type était

disponible dans Ecolovent, nous l'avons repris seulement à titre de comparaison. Ce module concerne

une chaudière au mazout de 10 kW non modulante et non à condensation. A nouveau la puissance

54

n'est pas exactement celle étudiée, mais comme l'unité fonctionnelle est aussi le MJ, la différence relèvera du facteur d'échelle. L'alimentation électrique est aussi celle du mix électrique basse tension du réseau belge. Les autres paramètres par défaut n'ont pas été modifiés.

## • Boiler électrique

Heat, electric tank, one-family house, for hot water {BE}

Il s'agit d'un simple ballon auquel une résistance électrique a été ajoutée. Nous avons repris l'élémenttype qui représente les ballons d'un volume de 600L et la résistance électrique de 5 kW qui se trouve aussi dans la base de données. A noter que le volume de 600L est trop gros par rapport au cas étudié (200L) mais comme il s'agit d'une démarche d'ACV comparative, ce ne sera pas gênant car tous les ballons auront un volume de 600L. L'effet généré par le ballon sur les impacts environnementaux sera identique dans tous les systèmes, même s'il est plus gros que la réalité. Par contre les pertes thermiques modélisées sont bien celles d'un ballon de 200L, à savoir 1,5 kWh/24h, qui correspond à notre boiler électrique Rénova-Bulex.

La fraction de l'impact environnemental total du ballon électrique pour produire 1 MJ utile à la production d'ECS est le rapport :

$$\frac{1}{12.5 \, ans \, x \, 3000 \, kWh \, x \, 3.6 \, MJ/kWh} = \frac{1}{135000} = 7,4074 \, x \, 10^{-6} \, p$$

L'électricité utilisée tient compte de l'énergie finale, pertes comprises, pour produire 1 MJ utile:

$$\frac{\left[3000 \, kWh + \left(1,5 \, \frac{kWh}{j} \, x \, 365 \, j\right)\right] / 0,95}{3000 \, kWh \, x \, 3,6 \, MJ/kWh} = \frac{3734,2}{10800} = 0,3458 \, kWh \, par \, MJ$$

Unité fonctionnelle	1 MJ
Auxiliary heating unit, electric, 5kW	7,4074 E-6 p
Hot water tank, 600l	7,4074 E-6 p
Electricity, low voltage	0,3458 kWh

#### Boiler électrique + photovoltaïque

Module: Heat, electric tank + PV 3 kWp, one-family house, for hot water {BE}

Ce cas-ci correspond exactement en tous points au système précédent, à part l'alimentation électrique apportée par un système photovoltaïque à la place du mix électrique basse tension belge. Comme nous l'avons vu dans la partie technique, il devrait y avoir 5,5 kWc de puissance PV pour alimenter le système or le module-type de Ecolnvent ne reprend que des systèmes de 3 kWc. Nous ferons donc aussi l'hypothèse que la différence relève du facteur d'échelle, car tous les modules PV sont strictement identiques entre eux, par conséquent l'impact unitaire par kWh produit sera le même. Il y aura pour être rigoureux une légère différence au niveau de l'onduleur mais qui sera a priori négligeable. Le type de module pris en compte est du PV polycristallin placé en toiture inclinée car c'est de très loin la technologie photovoltaïque la plus répandue.

Unité fonctionnelle	1 MJ
Auxiliary heating unit, electric, 5kW	7,4074 E-6 p
Hot water tank, 600l	7,4074 E-6 p
Electricity, low voltage, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si	0,3458 kWh

• Solaire thermique + chaudière au gaz

Module: heat production, at hot water tank, solar+gas, flat plate, one-family house BE

Nous utilisons à nouveau le ballon type de 600L, mais avec les pertes thermiques modélisées sur bases des caractéristiques du ballon solaire de Viessmann de 250L, 0,89 kWh/24h. Nous posons aussi l'hypothèse que le système solaire thermique fournit 1500 kWh d'énergie utile à la production d'ECS et que la chaudière assure l'appoint pour l'autre moitié. Pour ce système et tous les systèmes suivants qui possèdent aussi des capteurs solaires thermiques, rappelons que les pertes du ballon sont compensées par la production solaire gratuite, plutôt que par l'appoint. Cette hypothèse est parfaitement réaliste dès lors qu'il s'agit de +-10% de la production d'énergie utile et que nous restons dans les limites des possibilités techniques du système, soit :

$$\left[1500 \, kWh + \left(0.89 \, \frac{kWh}{j} x \, 365 \, j\right)\right] = 1500 + 324,25 = 1824,25 \, kWh$$

Cette énergie est produite par 4,02 m² de surface d'absorption, soit 453,79 kWh/m², qui est une bonne productivité mais encore de l'ordre du possible pour une grosse consommation.

La part de la chaudière au gaz dans la production de l'ECS est de :

0,5 MJ (moitié de l'énergie utile) sur un total de 
$$(1+\frac{324,25}{3000})=1,108~MJ$$

Donc la part relative de la chaudière pour produire 1 MJ dans le processus est de  $\frac{0.5}{1,108} = 0.4512 \, MJ$ 

Nous faisons encore l'hypothèse que le nombre d'heures annuelles de fonctionnement du circulateur solaire sera en première approximation égal au nombre de kWh produits par an, soit 1824,25. La part d'électricité dans le fonctionnement du système solaire thermique se calcule en prenant en compte une puissance maximale de 40W (pompe modélisée dans EcoInvent) pendant 1824,25h pour le circulateur et de 1,5W pendant 8760h pour la régulation :

$$\frac{[(40 W x 1824,25h) + (1,5 W x 8760h)]}{[3000 kWh x 3,6 \frac{MJ}{kWh}]} = \frac{86,11}{10800} = 7,9731 \ 10^{-3} kWh par MJ$$

La part de l'infrastructure des capteurs solaires dans la production d'un MJ de chaleur sera :

$$\frac{1}{25 \text{ ans } x \text{ } 1824,25 \text{ } kWh \text{ } x \text{ } 3,6 \text{ } MJ/kWh} = \frac{1}{1164182,5} = 6,09 \text{ } x \text{ } 10^{-6} \text{ } p$$

L'électricité pour la chaudière est déjà comprise dans le processus « Heat, central or small-scale natural gas » et ne doit pas être comptée deux fois.

Unité fonctionnelle	1 MJ
Solar collector system, Cu flat plate collector, one-family house	6,09 E-6 p
Heat, central or small-scale, natural gas {BE}	0,4512 MJ
Electricity, low voltage	7,9731 E-3 kWh

Solaire thermique + résistance électrique
 Heat, thermal solar+electric, one-family house, for hot water {BE}

Le système solaire thermique fournit 1500 kWh d'énergie utile à la production d'ECS plus les pertes du ballon. La résistance électrique assure l'appoint pour les 1500 autres kWh.

La part de l'appoint électrique est calculée comme suit :

$$\frac{1}{25 \, ans \, x \, 1500 \, x \, 3,6 \, MJ/kWh} = \frac{1}{135000} = 7,4074 \, x \, 10^{-6} \, p$$

La part d'électricité dans le fonctionnement du système se calcule en prenant en compte une puissance de 40W pendant 1824,25h pour le circulateur, 1,5W pendant 8760h pour la régulation et l'électricité utilisée par l'appoint électrique:

$$\frac{[(73 \text{ kWh}) + (13,14 \text{ kWh}) + (1500 \text{ kWh})/0,95]}{[3000 \text{ kWh } x \text{ 3,6} \frac{MJ}{kWh}]} = \frac{1651,94}{10800} = 0,1541 \text{ kWh}$$

Unité fonctionnelle 1 MJ

Solar collector system, Cu flat plate collector, one-family house 6,09 E-6 p

Auxiliary heating unit, electric, 5kW 7,4074 E-6 p

Electricity, low voltage 0,1541 kWh

## Boiler thermodynamique

Module: heat production, air-water heat pump 10kW {BE}

Pour le cas de figure des ballons thermodynamiques, nous n'avons pas trouvé de données complètement équivalentes dans la base de données EcoInvent mais un module décrivait les impacts d'une PAC air/eau de 10 kW. Dans notre cas, il ne s'agit que d'une puissance de 1,5 kW mais nous avons fait l'hypothèse que l'erreur liée au facteur d'échelle est négligeable pour une unité fonctionnelle de 1 MJ car le reste du processus est complètement similaire et l'architecture interne du cycle de la PAC est rigoureusement identique.

L'impact des infrastructures de la PAC se calcule comme ci-dessous :

$$\frac{1}{25 \, ans \, x \, 3000 \, x \, 3.6 \, MJ/kWh} = \frac{1}{270000} = 3,7037 \, 10^{-6} \, p$$

La consommation d'électricité par MJ utile d'ECS devient :

$$\frac{\left(3000 + 0.768 \frac{kWh}{j} x \ 365 j\right) / 2.85}{\left[3000 \ kWh \ x \ 3.6 \frac{MJ}{kWh}\right]} = \frac{1150.99}{10800} = 0.10657 \ kWh$$

Il y a également une hypothèse de fuite lente du réfrigérant R134 sur la durée de vie de l'appareil, qui se produit pendant le fonctionnement du cycle de la PAC :

$$\frac{1,35 \, kg}{25 \, ans \, x \, 3000 \, x \, 3,6 \, MJ/kWh} = 5 \, 10^{-6} \, kg \, par \, MJ \, produit$$

Unité fonctionnelle 1 MJ

Refrigerant R134 5 E-6 kg

Heat pump (pour 3000 kWh utile) 3,7037 E-6 p

Electricity, low voltage 0,10657 kWh

Boiler thermodynamique + solaire thermique

Module: Heat production, air-water heat pump 10kW + Thermal solar {BE}

Solaire thermique: 1500 kWh utiles + pertes ballon, PAC: 1500 autres kWh L'impact des capteurs solaires thermiques se calcule comme ci-dessous:

$$\frac{1}{25 \, ans \, x \, 1780,32 \, x \, 3,6 \, MJ/kWh} = \frac{1}{160228,8} = 6,2411 \, 10^{-6} \, p$$

La part d'électricité dans le fonctionnement du système solaire thermique se calcule en prenant en compte une puissance de 40W pendant 1780,32h pour le circulateur et de 1,5W pendant 8760h pour la régulation :

$$\frac{(71,21 \, kWh) + (13,4 \, kWh)}{[3000 \, kWh \, x \, 3,6 \frac{MJ}{kWh}]} = 0,00781 \, kWh$$

La part de la PAC dans la production d'ECS est de :

0,5 MJ sur un total de 
$$(1 + \frac{280,32}{3000}) = 1,09344 MJ$$

Et donc la part relative de la PAC pour produire 1 MJ est de  $\frac{0.5}{1.09344} = 0.4573 \, MJ$ 

Unité fonctionnelle 1 MJ
Solar collector system 6,2411 E-6 p
Heat pump (pour 1500 kWh utile) 0,4573 MJ
Electricity, low voltage 0,00781 kWh

Note : le module de la PAC a été adapté pour ce cas, pour tenir compte de 1500 kWh de production au lieu de 3000, et donc 2 fois moins de fuites de réfrigérant et moins d'électricité consommée.

Boiler thermodynamique + solaire thermique + photovoltaïque

Module: Heat production, air-water heat pump 10kW + Thermal solar + PV {BE}

Solaire thermique : 1500 kWh utiles + pertes ballon, PAC : 1500 autres kWh. Le PV remplace complètement le mix électrique du réseau. Les paramètres sont les mêmes que pour le cas précédent à part pour l'alimentation électrique :

Unité fonctionnelle 1 MJ

Solar collector system 6,2411 E-6 p

Heat pump (pour 1500 kWh utile) 0,4573 MJ

Electricity, low voltage, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si 0,00781 kWh

Boiler thermodynamique + photovoltaïque

Module: heat production, air-water heat pump 10kW + PV {BE}

Enfin ce dernier cas se ramène également au boiler thermodynamique dont seule l'alimentation électrique a été remplacée par une installation photovoltaïque.

Unité fonctionnelle 1 MJ

Refrigerant R134 5 E-6 kg

Heat pump 3,7037 E-6 p

Electricity, low voltage, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si 0,10657 kWh

#### 6.4 **RÉSULTATS**

Les résultats normalisés sont exprimés par point, c'est-à-dire que la méthode utilisée, Impact 2002+, utilise comme référence l'impact annuel d'un européen moyen dans les quatre catégories afin de pouvoir comparer les impacts entre eux. On utilise les valeurs de référence suivantes pour la normalisation (valeurs méthode Impact 2002+ version Q2.2):

Tableau 15: Facteurs de normalisation des impacts

Catégorie de dommages	Facteur de normalisation	Unité
Santé humaine	0,0071	$\left[\frac{DALY}{pers/an}\right]$
Qualité des écosystèmes	13.800	$\left[\frac{PDF.m^2.an}{pers/an}\right]$
Changement climatique	11.600	$\left[\frac{\log CO2 - eq}{pers/an}\right]$
Ressources	152.000	$\left[\frac{\text{MJ}}{pers/an}\right]$

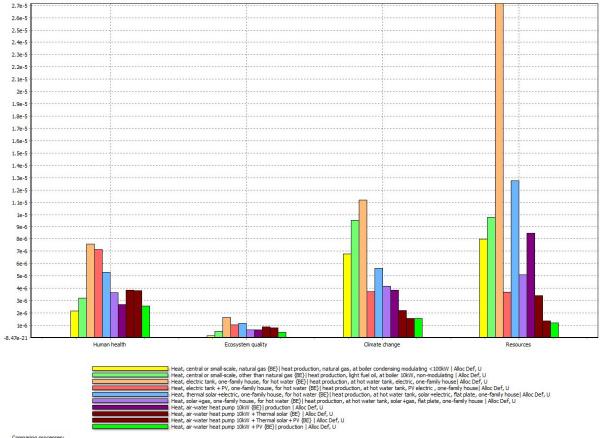
- Le DALY = Disability Adjusted Life Years est l'Espérance de Vie Corrigée de l'Invalidité. C'est un indicateur servant à mesurer le nombre cumulé d'années perdues en raison d'un handicap, d'une mauvaise santé ou d'une mort précoce. Le facteur de normalisation de 0,0071 DALY/pers.an correspond donc à une réduction moyenne de 2,59 jours par an d'espérance de vie pour un européen.
- Le PDF = Potentially Disappeared Fraction of species, c'est un indicateur de dommages sur les écosystèmes. Ce facteur de normalisation nous donne la fraction potentielle d'espèces disparues sur 1 m² et pour une année à cause de l'action d'un européen moyen.
- 11600 kg de CO<sub>2</sub>-eq est la quantité annuelle moyenne de gaz à effet de serre émise dans l'atmosphère par un européen.
- Le facteur de normalisation des ressources représente la consommation moyenne en Europe d'énergie non renouvelable par personne et par an, soit 152.000 MJ.

L'intégralité des résultats figure à l'Annexe 3, seules les figures les plus importantes ont été reprises ci-dessous :

Tableau 16: Impacts environnementau	x normalisés	malisés
-------------------------------------	--------------	---------

	Gaz	Mazout	Elec	Elec+PV	Solar+Elec	
Human health	2,1459E-06	3,1893E-06	7,5921E-06	7,1332E-06	5,3088E-06	Pt
Ecosystem quality	1,5267E-07	5,3672E-07	1,6461E-06	1,0524E-06	1,1763E-06	
Climate change	6,7816E-06	9,5481E-06	1,1204E-05	3,7469E-06	5,6246E-06	
Resources	7,9852E-06	9,7976E-06	2,7146E-05	3,678E-06	1,2735E-05	
	Solar+Gaz	PAC	PAC+Sol	PAC+Sol+PV	PAC+PV	
Human health	3,6521E-06	2,6876E-06	3,8504E-06	3,8105E-06	2,5462E-06	Pt
Ecosystem quality	6,4424E-07	6,4398E-07	8,6964E-07	8,1796E-07	4,6099E-07	
Climate change	4,1899E-06	3,8471E-06	2,1999E-06	1,5508E-06	1,5487E-06	
Resources	5,0741E-06	8,449E-06	3,4141E-06	1,3714E-06	1,2155E-06	

Figure 22: Normalisation des impacts I



Comparing processes; Method: IMPACT 2002+ V2.12 / IMPACT 2002+ / Normalization / Excluding long-term emissions

Pour valider ces résultats, le plus intuitif est d'examiner les impacts générés sur le changement climatique. Ces impacts seront dans ce cas-ci très majoritairement provoqués par des émissions de dioxyde de carbone. Un pt correspond à l'émission de 11600 kg de CO<sub>2</sub>. On peut donc convertir les impacts équivalents en kg de CO<sub>2</sub> par kWh d'énergie utile. Pour rappel, l'unité fonctionnelle est le MJ.

Tableau 17: Impacts sur le changement climatique

rubicuu 17. impuets sui le changement emmanque										
Gaz	Mazout	Elec	Elec+PV	Solar+Elec						
6,7816E-06	9,5481E-06	1,1204E-05	3,7469E-06	5,6246E-06	Pt					
0,07867	0,11076	0,12997	0,04346	0,06525	kg CO2/MJ					
0,28320	0,39873	0,46787	0,15647	0,23488	kg CO2/kWh					
Solar+Gaz	PAC	PAC+Sol	PAC+Sol+PV	PAC+PV						
4,1899E-06	3,8471E-06	2,1999E-06	1,5508E-06	1,5487E-06	Pt					
0,04860	0,04463	0,02552	0,01799	0,01796	kg CO2/MJ					
0,17497	0,16066	0,09187	0,06476	0,06467	kgCO2/kWh					
	Gaz 6,7816E-06 0,07867 0,28320 Solar+Gaz 4,1899E-06 0,04860	Gaz         Mazout           6,7816E-06         9,5481E-06           0,07867         0,11076           0,28320         0,39873           Solar+Gaz         PAC           4,1899E-06         3,8471E-06           0,04860         0,04463	Gaz         Mazout         Elec           6,7816E-06         9,5481E-06         1,1204E-05           0,07867         0,11076         0,12997           0,28320         0,39873         0,46787           Solar+Gaz         PAC         PAC+Sol           4,1899E-06         3,8471E-06         2,1999E-06           0,04860         0,04463         0,02552	Gaz         Mazout         Elec         Elec+PV           6,7816E-06         9,5481E-06         1,1204E-05         3,7469E-06           0,07867         0,11076         0,12997         0,04346           0,28320         0,39873         0,46787         0,15647           Solar+Gaz         PAC         PAC+Sol         PAC+Sol+PV           4,1899E-06         3,8471E-06         2,1999E-06         1,5508E-06           0,04860         0,04463         0,02552         0,01799	Gaz         Mazout         Elec         Elec+PV         Solar+Elec           6,7816E-06         9,5481E-06         1,1204E-05         3,7469E-06         5,6246E-06           0,07867         0,11076         0,12997         0,04346         0,06525           0,28320         0,39873         0,46787         0,15647         0,23488           Solar+Gaz         PAC         PAC+Sol         PAC+Sol+PV         PAC+PV           4,1899E-06         3,8471E-06         2,1999E-06         1,5508E-06         1,5487E-06           0,04860         0,04463         0,02552         0,01799         0,01796					

Selon le site « EnergiePlus » on a les émissions suivantes pour la phase d'utilisation :

Gaz naturel : 0.198 kg CO₂/kWh
 Mazout : 0.264 kg CO₂/kWh
 Électricité : 0.29 kg CO₂/kWh

Ce qui nous permet de valider déjà les résultats des 3 premières productions d'ECS à partir de gaz, de mazout et d'électricité, car les proportions entre les émissions de ces trois générateurs de chaleur sont respectées et de plus l'ordre de grandeur de +- 50% plus élevé que les émissions de la phase d'utilisation sont plausibles. Pour la quatrième production d'ECS qui est une combinaison d'un boiler électrique avec du PV, les impacts sont 3 fois moins importants que pour la production électrique pure, ce qui correspond au gain par rapport aux pertes de production et de distribution de l'énergie primaire (facteur 2,5 à 3). Les 2 productions d'ECS suivantes représentent des systèmes solaires thermiques combinés avec respectivement un appoint électrique et au gaz, ce qui permet d'en réduire les impacts de +- 50%. L'ampleur de la réduction des émissions dépendra du fait que les appoints électriques ont un meilleur rendement de conversion que les appoints au gaz.

Enfin, pour les quatre dernières productions d'ECS, faites entre autres à partir de pompes à chaleur, on remarque que la PAC seule (7ème série) a un impact de l'ordre de 2,85 fois plus petit que la production électrique pure (3ème série), ce qui est bien la valeur du COP. Le solaire thermique combiné à la PAC (8ème série) permet de réduire l'impact de celle-ci sur les émissions de CO<sub>2</sub> de près de 50%. Les deux derniers cas (série 9 et 10) sont les copies conformes des deux cas précédents mais avec une alimentation photovoltaïque à la place de l'alimentation du réseau électrique. On voit clairement à nouveau l'impact de l'électricité réduit d'un facteur 2,5 en comparant le système PAC et PAC+PV. Enfin les impacts des séries 9 et 10 sur les émissions de carbone sont très proches car dans les 2 cas, toute l'énergie d'utilisation est produite par des sources renouvelables.

#### 6.5 Interprétation

Les résultats montrent en premier lieu clairement la prépondérance des impacts environnementaux des systèmes qui utilisent principalement l'électricité du réseau pour produire l'eau chaude sanitaire. Que cela soit avec une production via un boiler électrique ou en appoint d'un système solaire thermique, l'énergie primaire utilisée alourdit d'un facteur 2,5 l'impact environnemental de l'énergie finale au niveau de l'utilisateur. Cela fait de l'électricité du réseau le mode de production de loin le plus pénalisant dans les quatre grandes catégories d'impacts, en particulier pour ce qui est de l'épuisement des ressources. Non seulement parce que les pertes de production et de distribution sont fréquemment supérieures à 50% pour les centrales électriques, mais en plus car la production électrique de ces centrales est assurée à près de 80% par des combustibles fossiles : gaz, fioul, charbon et uranium.

Ensuite et sans surprise, on trouve les générateurs de chaleur qui utilisent le gaz et le mazout pour produire l'ECS. Ces combustibles présentent l'avantage de réduire fortement les impacts par rapport à l'électricité du réseau sur la santé humaine et la qualité des écosystèmes, mais maintiennent un niveau élevé d'émissions de gaz à effet de serre et bien-sûr d'épuisement des ressources en tant qu'énergies fossiles. Parmi les impacts sur la santé humaine, c'est la formation de particules fines qui a les conséquences les plus importantes.

Les installations solaires thermiques permettent de réduire à peu près de moitié l'impact environnemental sur le changement climatique mais augmentent en parallèle les impacts sur la santé humaine, les écosystèmes et l'épuisement des ressources en raison des opérations d'extraction du cuivre et d'autres matières premières, puis des divers traitements pouvant générer des émissions de particules dans l'atmosphère. Les impacts globaux amenés par la combinaison avec une source de chaleur d'appoint seront déterminés par la combinaison linéaire des impacts environnementaux des techniques respectives selon leur part relative dans le processus.

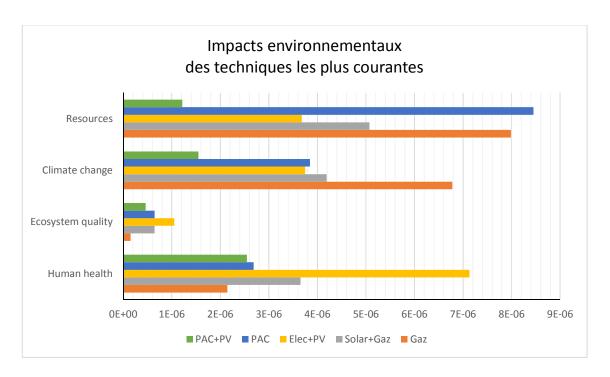


Figure 23: Normalisation des impacts pour les techniques les plus courantes

Ce sont les boilers thermodynamiques, seuls ou en combinaison avec des installations solaires thermiques et/ou photovoltaïques qui ont les impacts les plus faibles sur le changement climatique.

Ils permettent de réduire fortement l'utilisation d'énergie primaire grâce à leur COP de 2,85 et les impacts seront d'autant plus faibles que moins d'énergie primaire est utilisée pendant la phase d'utilisation, grâce à l'ajout de capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques. Parmi les quatre configurations, la PAC seule a le plus gros impact lié à sa consommation électrique du réseau, puis vient la combinaison PAC+Solaire thermique, puis encore l'ensemble PAC+Solaire+PV puis enfin le système qui parait avoir le moins d'impact environnemental, la PAC+PV.

Pour terminer, remarquons que les systèmes alimentés électriquement en énergie photovoltaïque ne consomment plus d'énergie fossile, mais ils continuent malgré tout à avoir un impact environnemental. L'ensemble boiler électrique + PV réalise des scores parmi les plus mauvais pour ce qui concerne la santé humaine et la qualité des écosystèmes. Ceci est dû au procédé de production du silicium de pureté suffisante pour le photovoltaïque, notamment de l'étape de raffinage de la silice à l'état naturel en silicium métallurgique, puis de la purification chimique qui en fait un silicium de qualité solaire. Cette dernière opération donne lieu au rejet dans l'environnement de tétrachlorure de silicium et de chlore. Il ne faut pas perdre de vue non plus que l'onduleur et le câblage électrique induisent également des impacts importants, notamment pour le cuivre et les terres rares qu'ils contiennent. La catégorie d'impact concernant l'épuisement des ressources en combustibles fossiles est prépondérante [GERBINET et al.,2011].

Et ce sera finalement le système combiné PAC+PV qui aura le plus faible impact global car l'électricité à fournir en appoint au ballon thermodynamique devient très faible grâce au COP, ce qui réduit d'autant la taille et les impacts du système photovoltaïque. A noter que la combinaison PAC+Solaire thermique+PV aura des performances légèrement moins bonnes car les impacts liés au système solaire thermique, surtout en termes d'extraction et d'épuisement des ressources, sont plus importants que ceux liés à la plus grande taille du système photovoltaïque.

Etant donné la proximité étroite des résultats entre les systèmes PAC+PV et PAC+Solaire+PV, une analyse complémentaire a été réalisée pour lever l'incertitude sur les résultats. La probabilité que les impacts soient plus grands pour l'une ou l'autre technique a été calculée par le programme EcoInvent en compilant les données d'incertitude dans toutes les catégories et en prenant en compte un intervalle de confiance de 95%. Cette analyse a effectivement confirmé que la probabilité que les impacts environnementaux du système PAC+Solaire+PV est plus grande dans les catégories de la santé humaine, de la qualité des écosystèmes et de l'épuisement des ressources. Par contre l'analyse a nuancé le premier résultat calculé qui donnait l'impact sur le changement climatique très légèrement inférieur pour le système PAC+PV. En effet selon l'étude d'incertitude, la probabilité que les émissions

de gaz à effet de serre de l'ensemble PAC+PV soient inférieures à celles du système PAC+Solaire+PV n'est que de 40%! L'occasion aussi de rappeler que les impacts des différents indicateurs sont évalués chacun avec une certaine probabilité et qu'une incertitude parfois importante peut affecter les résultats, comme pour les indicateurs d'acidification aquatique et d'eutrophisation aquatique pour lesquels des données représentatives peuvent manquer.

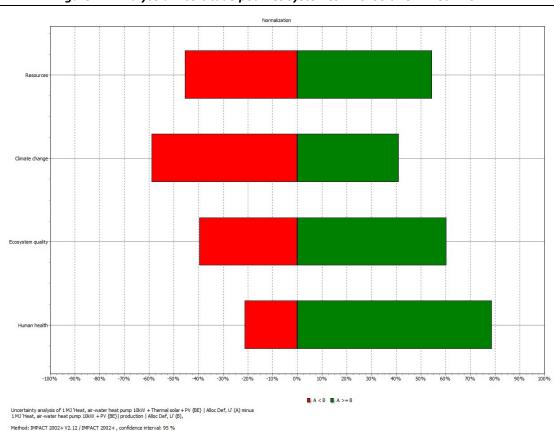


Figure 24: Analyse d'incertitude pour les systèmes PAC+Solaire+PV et PAC+PV

Les arbres d'impacts ont été générés pour l'ensemble PAC+PV et sont disponibles à l'Annexe 4. Ils montrent en particulier les impacts de la fabrication des « wafers » de silicium pour le photovoltaïque et les impacts du cuivre qui entre dans la fabrication des pompes à chaleur.

Pour ce qui concerne le photovoltaïque, plusieurs pistes sont à l'étude pour en réduire à la fois les coûts et les impacts à moyen terme; bien que 80% du marché soit dominé par les modules polycristallins, les couches minces CIGS et CdTe <sup>22</sup> continuent à faire l'objet d'importants développements pour en réduire le coût. La plus faible épaisseur de leur substrat actif (de seulement quelques microns) pourrait conduire à réduire la quantité de matière utilisée et donc les impacts.

66

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Cellules PV Cuivre-Indium-Gallium-Selenium et Tellurure de Cadmium.

# CHAPITRE 7 : ANALYSE COÛTS-BÉNÉFICES

A présent que nous avons obtenu des résultats sur les aspects économiques et environnementaux, ils peuvent être mis en parallèle pour réaliser une analyse coûts-bénéfices [JOLLIET et al., 2010]. Pour ce faire, il est utile de disposer l'ensemble des solutions étudiées dans un graphique à deux dimensions représentant le coût en fonction de l'impact environnemental. Les axes sont centrés sur la solution de référence, à savoir toujours notre chaudière au gaz à condensation.

#### 7.1 COÛT EN FONCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

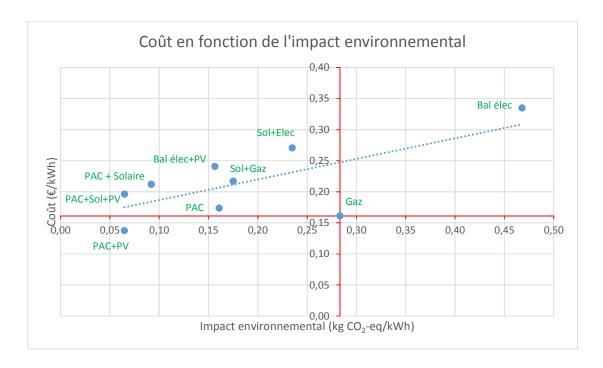


Figure 25: Analyse coûts-bénéfices appliquée à la production d'ECS

Par rapport à notre scénario de référence, quatre alternatives se présentent :

• Le premier scénario correspond au quadrant inférieur gauche; cette situation permet de réduire à la fois les charges environnementales et les coûts. C'est une situation « win-win » où l'environnement et le consommateur sortent tous les deux gagnants. Dans le cadre de notre étude, seule la combinaison de la PAC sanitaire avec le photovoltaïque se retrouve dans ce cas de figure, et permet donc d'améliorer à la fois l'impact sur l'environnement et de diminuer le coût global de la production d'ECS pour le consommateur, pour autant qu'il ait les moyens financiers de payer le prix et le placement du matériel en une fois.

• Le deuxième cas correspond à des scénarios qui ont des potentialités d'amélioration environnementale dans le quadrant supérieur gauche, toutefois à un coût financier plus important que la référence. C'est la situation de la quasi-totalité des alternatives qui incluent des énergies renouvelables, que ce soit le boiler thermodynamique, le solaire thermique ou le photovoltaïque. Le principe est alors de favoriser le scénario ou la marge d'amélioration environnementale est la plus grande, grâce au concept d'efficience écologique :

$$\eta = \frac{\Delta E}{\Delta C}$$

Avec  $\Delta E$  la réduction de l'impact environnemental et  $\Delta C$  l'augmentation du coût. Ce rapport peut être calculé pour évaluer deux scénarios différents, mais également au sein d'un seul scénario, pour déterminer dans quelle étape du cycle de vie investir en priorité. En particulier l'efficience énergétique pourrait permettre aux pouvoir publics de déterminer quelles technologies doivent faire l'objet des priorités au niveau des primes et subsides.

- Le troisième cas dans le quadrant supérieur droit est une situation « lose-lose » puisqu'il mène à un accroissement des charges environnementales et économiques ; c'est typiquement le cas du boiler électrique alimenté par le mix électrique belge.
- Enfin le dernier cas de figure dans le quadrant inférieur droit est une situation plus favorable sur le plan financier, mais défavorable écologiquement. C'est la vision purement économique de court terme où l'équilibre budgétaire prime sur l'intérêt environnemental.

#### 7.2 LIMITES DE L'ANALYSE

Nous avons repris pour les différentes techniques des hypothèses les plus réalistes possibles pour la modélisation, cependant un certain nombre de limites à cette analyse doivent être mentionnées :

Il y a deux aspects à prendre en compte principalement pour le recyclage: d'un côté les modules modélisés dans EcoInvent incluent souvent des hypothèses sur un certain pourcentage de matériaux recyclés qui entrent dans la fabrication du produit. C'était bien le cas pour les matières premières prises en compte dans les modules utilisés, par exemple pour l'acier, le cuivre, etc. Par contre il est assez délicat de poser des hypothèses sur le démantèlement en fin de vie car on ne sait pas dire aujourd'hui ce que seront ces filières dans 20 ou 30 ans. Le recyclage est clairement une des limites

actuelles des études d'impacts. Une réelle analyse détaillée doit nécessairement être menée et se baser non seulement sur les fiches techniques des fabricants mais également sur les caractéristiques physiques des matériaux qui entrent dans la fabrication des différents produits. La soustraction dans la modélisation des impacts évités par l'éventuelle recyclabilité des produits n'implique forcément qu'ils seront recyclés dans la réalité. Cela pourrait même s'apparenter à du « greenwashing ». De telles études détaillées ne peuvent être menées qu'en étroite collaboration avec les fabricants.

Tous les processus comparés étaient des processus de création de chaleur avec la même unité fonctionnelle (le MJ), et utilisant le mix électrique belge pour leur alimentation en électricité. Cependant l'infrastructure modélisée dans ces produits correspond à une moyenne pondérée des impacts de production observés dans le monde entier, mais n'est pas forcément liée au processus étudié. Ce qui signifie que les résultats sont représentatifs mais peuvent néanmoins inclure une marge d'erreur liée au contexte local de la production, même si le processus de production est partout similaire. La législation, le climat, le mix énergétique local utilisé pour une production vendue à l'échelle globale, etc sont autant d'aspects importants qui doivent être pris en compte au cas par cas pour les études d'impact [DEGREZ, 2014].

Fréquemment, on limite l'analyse à une partie de la vie du produit. Beaucoup d'entrées dans EcoInvent sont modélisées selon le schéma « Cradle-to-gate », qui ne correspond qu'aux phases de mise en forme des matériaux et de production. C'est pratique pour procéder à des comparaisons mais il faut rester attentif à la non-prise en compte de certaines étapes, à la représentativité des données issues de périodes différentes, à des pratiques industrielles qui sont évolutives dans le temps et à des changements de fonctionnalité pour un même produit [DEGREZ, 2014]. Dans le cas des modules énergétiques, la consommation de la phase d'utilisation est également modélisée. Dans ce cas nous ne sommes plus vraiment dans une modélisation « Cradle-to-gate », et pas encore « Cradle-to-grave » ; on pourrait appeler cette étape « Cradle-to-use ».

Les systèmes avec les impacts environnementaux les plus faibles sont aussi ceux qui disposent d'un système photovoltaïque pour produire localement l'électricité nécessaire à leur fonctionnement. Cependant la modélisation sur Ecolnvent implique que toute l'électricité produite par les modules photovoltaïques est autoconsommée et qu'il n'y a pas de kilowattheures consommés du réseau. Or c'est très loin d'être le cas ; dans la réalité, en moyenne à peine 30 à 40% de la production PV est autoconsommée chez les particuliers, le reste est rejeté sur le réseau électrique. Cela signifie aussi que 60% de la consommation électrique provient encore du mix électrique classique du réseau, avec les impacts environnementaux vus précédemment.

Autrement dit, il ne suffit pas de placer des modules photovoltaïques sur le toit pour réduire son empreinte environnementale, encore faut-il que l'électricité produite soit autoconsommée. En principe l'autoconsommation de l'électricité photovoltaïque a lieu directement quand il y a des charges actives dans le réseau domestique ; le courant produit y est alors directement injecté. Mais le reste du temps, le décalage temporel entre la production photovoltaïque, dont le maximum est produit en milieu de journée, et la consommation électrique de pointe des ménages, qui survient en début de soirée, implique de mettre en œuvre des moyens de contrôle et de stockage de l'électricité pour pouvoir consommer un maximum d'électricité d'origine photovoltaïque.

A l'échelle du particulier, ceci n'est possible qu'en mettant en place un monitoring très fin des flux d'électricité entrants et sortants à travers des « compteurs intelligents » capables de mesurer la disponibilité de la ressource photovoltaïque en temps réel et par conséquent aussi d'activer simultanément des « gros consommateurs » tels que les lave-linge ou les lave-vaisselle.

L'autre alternative est de promouvoir le stockage d'énergie chez les ménages au moyen de batteries qui se chargent en se déchargent pour compenser le décalage entre production et consommation. Mais même des batteries de 5 kWh ne permettraient d'atteindre qu'un taux d'autoconsommation de 60 à 65% [SMA Solar Technology, 2014]. Il est donc extrêmement difficile à l'échelle du ménage de parvenir en même temps à un taux d'autosuffisance correct et à un taux d'autoconsommation important sans surdimensionner de coûteuses batteries.

Les réseaux électriques n'ont pas été conçus dans une optique de décentralisation et les premiers raccordements ont été réalisés sans imposer de contraintes techniques complexes, les gestionnaires considérant que les marges de manœuvre des réseaux absorberaient ces étranges sources décentralisées. Mais l'augmentation continue du taux de pénétration de ces générations décentralisées impose de repenser le réseau électrique, du niveau transport à la distribution, en prenant en compte au niveau des investissements les effets spécifiques liés à la décentralisation [MASSON G, 2009]. On pourrait dès lors se demander si le modèle qui promeut l'autoconsommation électrique maximale de l'électricité photovoltaïque au niveau des ménages est bien la meilleure solution. C'est indubitablement la solution qui suppose le moins d'investissement de la part des gestionnaires des réseaux de distribution. Par contre en termes d'efficacité, d'adéquation entre production et consommation et d'économies d'échelles, il y aurait certainement matière à envisager l'autoconsommation non plus au niveau des ménages, mais au niveau du quartier ou du village. Dans tous les cas une véritable intégration des sources d'énergie renouvelables et des productions décentralisées au réseau électrique est plus que souhaitable.

# **PARTIE IV: CONCLUSIONS**

Cette étude a permis l'extension des domaines classiques d'analyse techniques et économiques aux impacts environnementaux des systèmes de production d'eau chaude sanitaire des ménages. Parfois avec des résultats inattendus par leur ampleur: alors que les capteurs solaires thermiques sont trois fois plus efficaces que les modules photovoltaïques en termes de production énergétique finale par m², la combinaison ballon électrique et PV produira 10% d'émissions de CO₂ en moins que l'ensemble solaire thermique et chaudière au gaz. De même les ballons électriques alimentés par le mix électrique belge sont de très loin les matériels les plus économiques à l'achat mais se révèlent être de véritables gouffres financiers et des calamités pour l'environnement dans leur phase d'utilisation.

Les résultats en termes d'impacts sur la santé humaine, la toxicité des écosystèmes et surtout l'épuisement des ressources naturelles ne sont pas non plus à négliger. Ainsi un système de pompe à chaleur sanitaire alimenté par de l'électricité photovoltaïque consommera 95% de ressources naturelles en moins qu'une production d'eau chaude réalisée via un ballon électrique raccordé au réseau belge! Les processus d'extraction et de mise en forme des matières premières en amont, comme le cuivre pour les capteurs solaires thermiques et le processus de raffinage du silicium pour le photovoltaïque, peuvent avoir des conséquences extrêmement dommageables tant sur la santé humaine que sur les écosystèmes.

Ces quelques exemples nous montrent à quel point il est important de ne plus penser les installations des unités de production d'eau chaude sanitaire en tant que simples composants ponctuels, chacun caractérisés individuellement par un rendement, un prix et une émission nominale de CO<sub>2</sub>. De plus en plus à l'avenir il faudra les considérer en tant que systèmes intégrés, avec réservoirs de stockage, pompes et auxiliaires, dont les performances finales seront à évaluer dans leur globalité sur leur durée de vie au moyen d'outils comme l'analyse coûts-bénéfices, permettant de réaliser des arbitrages entre les technologies sur base d'arguments technico-économico-environnementaux.

Ces méthodes d'analyse des impacts environnementaux sont malheureusement encore peu pratiquées par les industriels dans la phase de conception des produits. Il faut espérer que la récente directive européenne « Ecodesign », qui obligera dans un proche avenir les fabricants à ne plus seulement labelliser les composants mais aussi les systèmes dans leur entièreté, amènera à une

réflexion plus large de la part des ingénieurs sur l'utilité de la modélisation de tout le cycle de vie en amont de la production. En particulier, le concept d'efficience écologique est un outil remarquable qui, utilisé systématiquement, pourrait promouvoir la pratique d'une écologie industrielle à grande échelle grâce à une approche transversale et intégrée des filières classiques de gestion de l'environnement comme l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et le recyclage. Si le calcul des impacts environnementaux peut donner de précieuses informations, il reste néanmoins très dépendant de la qualité des données recueillies et des hypothèses posées. De même, une excellente connaissance des processus reste requise pour la fiabilité de la modélisation. Mais bien appliquée, cette méthode peut réellement relier la technologie au développement durable.

Dans le cadre de la production d'eau chaude sanitaire, cette analyse sera d'autant plus importante dans les bâtiments à basse énergie ou passifs où l'ECS aura la plus grande part relative de la demande en chaleur. Les techniques de production basées sur les énergies renouvelables pourraient même devenir la norme d'ici quelques années pour les habitations neuves individuelles. Pour les grands immeubles d'habitation, la diffusion de ces techniques est pour le moment limitée par la puissance de pointe instantanée qui est trop faible. Néanmoins un préchauffage avant la mise à température par des combustibles fossiles reste dans tous les cas possible. Par ailleurs des développements mêlant chauffage, eau sanitaire, techniques solaires et ventilation sont attendus dans un avenir proche. Au vu de leurs avantages incontestables aux plans technique, économique et environnemental, les ballons thermodynamiques auront certainement un rôle grandissant pour la production d'ECS du futur. En élargissant les gammes disponibles à des ballons de volume plus petits et plus grands, les PAC sanitaires pourraient trouver un nouveau public auprès des ménages mais aussi dans les grands bâtiments. En combinant ces techniques avec des installations solaires, en particulier photovoltaïques et des fonctions de régulation intelligentes, il serait déjà possible de proposer de nouvelles solutions alternatives aux énergies fossiles à court terme.

Il reste beaucoup à faire sur le terrain des économies d'énergie. La Belgique, et singulièrement Bruxelles avec son parc immobilier vétuste, présentent encore un vaste potentiel de réduction des consommations énergétiques. La nécessité d'une diminution drastique des émissions de gaz à effet de serre pour lutter contre le changement climatique, les prix des combustibles fossiles à la hausse sur le long terme et l'impératif de se conformer aux normes sur la performance énergétique des bâtiments devront amener à des initiatives pour moderniser les installations techniques. La prise en compte des impacts environnementaux sera dans ce cadre un critère déterminant pour le développement de systèmes énergétiques plus efficaces et la marche vers la transition énergétique.

# **BIBLIOGRAPHIE**

ACHTEN, Wouter, Cours Envi-F518 « Méthode d'analyse et de gestion des impacts environnementaux », Université Libre de Bruxelles, 2014-2015.

ACHTEN, Wouter et BAULER Thomas, Cours Envi-F448 « Management environnemental », Université Libre de Bruxelles, 2013-2014.

ACKET Claude et BACHER Pierre, « Diviser par quatre les rejets de CO2 dus à l'énergie : le scénario Négatep », Revue de l'Énergie, 07/2010, Numéro 596.

BARRAQUÉ, Bernard, ISNARD Laure et MONTGINOUL Marielle, « Baisse des consommations d'eau potable et développement durable », Responsabilité & Environnement, 07/2011, Numéro 63.

BINE Informationsdienst, « Utilisation économiquement rentable de l'énergie solaire dans les logements », article paru dans la revue L'entreprise, Mai 2015.

BOULANGER, Vincent, « Le chauffe-eau thermodynamique à l'épreuve », La Maison écologique, N°76, pp. 42-43, Août-Septembre 2013.

BRUXELLES-ENVIRONNEMENT, « Bilan énergétique de la Région Bruxelles-Capitale 2012 », Juin 2014.

BRUXELLES-ENVIRONNEMENT, INFO-FICHE ENERGIE – La production d'eau chaude sanitaire (ECS 01), Janvier 2008.

BRUXELLES-ENVIRONNEMENT, INFO-FICHE ENERGIE – Les sources d'énergie pour la production d'eau chaude (ECS 02), Janvier 2008.

BRUXELLES-ENVIRONNEMENT, INFO-FICHE ENERGIE – Les différences entre le boiler et le chauffe-eau (ECS 03), Janvier 2008.

BRUXELLES-ENVIRONNEMENT, INFO-FICHE ENERGIE – L'entretien des installations sanitaires (ECS 04), Janvier 2009.

BRUXELLES-ENVIRONNEMENT, INFO-FICHE ENERGIE – Acquérir une nouvelle chaudière et l'entretenir (ECS 05), Janvier 2008.

BRUXELLES-ENVIRONEMENT, RAPPORT TECHNIQUE – BATIMENTS EXEMPLAIRES – Comparatif des systèmes de chauffage et ECS pour les maisons individuelles et les immeubles à appartements en conception passive et rénovation basse énergie, Septembre 2010.

CARNEVALE, E., LOMBARDI L., ZANCHI L., « Life Cycle Assessment of solar energy systems: Comparison of photovoltaic and water thermal heater at domestic scale », University of Florence - Italy and Niccolo Cusano University – Rome, 2014.

CERAA – Centre d'Etude, de Recherche et d'Action en Architecture, « L'application de principes de la maison passive en Région de Bruxelles-Capitale », 146 pages ; étude commandée par l'IRSIB et l'IBGE, Juin 2008.

CIRAIG - Centre Interuniversitaire sur le cycle de vie des produits, procédés et services – Ecole Polytechnique de Montréal, « Rapport technique : analyse du cycle de vie des filières de production de chaleur décentralisée à petite échelle », document préparé pour le compte d'Hydro-Québec, Juin 2013.

DEGREZ, Marc, Cours Envi-F402 « Industrie et gestion des déchets et des effluents », Université Libre de Bruxelles, 2013-2014.

DEGREZ, Marc, Cours Envi-H500 « Recyclage matière : enjeux et contraintes, cas des emballages », Université Libre de Bruxelles, 2014-2015.

EICHER, Sara, HILDBRAND, Catherine, KLEIJER, Annelore, BONY, Jacques, BUNEA, Mircea, CITHERLET, Stéphane, « Life cycle impact assessment of a solar assisted heat pump for domestic hot water production and space heating », HEIG-VD, LESBAT, Yverdon-les-Bains - Switzerland, 2013.

EUROSTAT, « Energy, transport and environment indicators », 2014.

FAMERÉE, Bénédicte, « Le Gallium, un métal rare, inépuisable grâce à sa production secondaire - Impacts et enjeux environnementaux et économiques de sa production jusqu'à sa récupération », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du grade de Master en gestion de l'environnement, IGEAT - Université Libre de Bruxelles, 2012.

GENKINGER, Andreas, DOTT, Ralf et AFJEI, Thomas, « Combining heat pumps with solar energy for domestic hot water production », Institut Energie am Bau, Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Muttenz - Switzerland, 2012.

GERBINET, S., BELBOOM, S. et LEONARD A., Article « Évaluation de l'impact environnemental lié à la production d'électricité d'origine photovoltaïque par analyse du cycle de vie », Laboratoire de Génie Chimique - Procédés et Développement durable, Université de Liège, 2011.

HABERSCHILL, Philippe, GUITARI, Imed et LALLEMAND, André, « Comportement dynamique d'une pompe à chaleur au CO 2 en cycles sous critique et transcritique », International Journal of Refrigeration, 2007, Volume 30, Numéro 4.

HAILLOT, D., NEPVEU, F. et GOETZ, V., « High performance storage composite for the enhancement of solar domestic hot water systems », Solar Energy, 01/2012, Volume 86, Numéro 1.

HANNON, Etienne, PATTYN, Frank et TISON, Jean-Louis, Cours Envi-F405 « Climat : science et politique », Université Libre de Bruxelles, 2013-2014.

HERNANDEZ Patxi, KENNY, Paul, « Net energy analysis of domestic solar water heating installations in operation », University College Dublin - Ireland and Tecnalia, Gipuzkoa - Spain, 2012.

HUART, Michel, Cours Envi-F449 « Energie et environnement », Université Libre de Bruxelles, 2014/2015.

IGEAT – ULB, Conférence : « Le pic pétrolier mondial : quels rôles jouent les hydrocarbures non conventionnels ? Quelles sont les conséquences possibles ? », le 14 octobre 2014.

IGEAT – ULB, Conférence : « Peut-on envisager une Belgique 100% renouvelable en 2050 en matière de production d'électricité, de chauffage et de transports ? », le 14 novembre 2014.

IPCC: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, 151 pp, November 2014.

JANSSEN, Rod, EuroACE, « Towards energy efficient buildings in Europe », London, June 2004.

JOLLIET, Olivier, MARGNI, Manuele, CHARLES Raphaël, HUMBERT, Sébastien, PAYET Jérôme, REBITZER, Gerald and ROSENBAUM, Ralph, «IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology», Industrial Ecology & Life Cycle Systems Group, GECOS, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL), Lausanne, Switzerland.

JOLLIET, Olivier, SAADÉ, Myriam, CRETTAZ, Pierre et SHAKED Shanna, « Analyse du cycle de vie, comprendre et réaliser un écobilan », 2ème édition, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2010.

KHIARI, B. and BEN MABROUK, S, « Technical and economic survey of low enthalpy solar installations for heating sanitary water », Desalination, 2004, Volume 165.

MACKAY, David J.-C., « Sustainable Energy – without the hot air », UIT Cambridge 2007.

MASSON, Gaëtan, « Enjeux et défis de l'intégration de productions décentralisées et renouvelables sur les réseaux électriques », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du grade de Master en gestion de l'environnement, IGEAT – Université Libre de Bruxelles, 2009.

MOURTADA, Karim, « Etude de faisabilité d'une installation solaire thermique sur les campus de l'ULB », Mémoire de fin d'études pour l'obtention du grade d'ingénieur civil mécanicien, Ecole Polytechnique, Université Libre de Bruxelles, Mai 2004.

POUCHARD, Alexandre, « Climat : 5 rapports du GIEC, 5 chiffres alarmants », Article du quotidien Le Monde, paru le 04.11.2014.

PRÉVOT, Henri, « Energie et changement climatique: diviser par trois en trente ans nos émissions de gaz carbonique: Un effort inutile? », Réalités Industrielles, 08/2003.

REMY, Quentin, « La rentabilité des pompes à chaleur dans le secteur des maisons unifamiliales », Travail de fin d'études pour l'obtention du grade de Master en sciences de l'ingénieur industriel, Haute Ecole en Hainaut – Campus technique, Mai 2015.

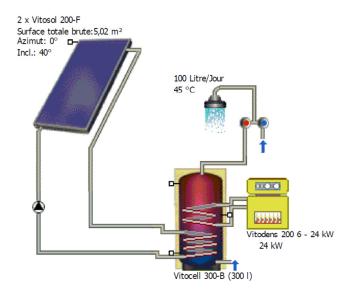
SMA SOLAR TECHNOLOGY, « Guide de planification SMA Smart Home, la solution système pour plus d'autonomie », 2004-2014.

SYSTEMES SOLAIRES – Le Journal des énergies renouvelables, « hors-série spécial recherche solaire » – Juillet 2006.

TAÏLEB, Mehdi, « Application de la méthode Analyse du Cycle de Vie à l'énergétique dans le bâtiment », Mémoire présenté pour l'obtention de l'Examen probatoire du Cycle Ingénieur – Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), Paris, 2006.

# **ANNEXES**

#### ANNEXE 1: SIMULATION DU RENDEMENT D'UNE INSTALLATION SOLAIRE THERMIQUE



### Résultats de la simulation annuelle

Puissance installée:	3,51 kW	
Surface de capteurs installée (brute): Irradiation sur la surface du capteur (Surface de	5,02 m² 4,94 MWh	1.062,46 kWh/m²
référence):		
Energie délivrée par les capteurs:	1.363,43 kWh	292,96 kWh/m <sup>2</sup>
Energie délivrée par le circuit de capteurs:	1.208,68 kWh	259,71 kWh/m²
Energie fournie pour le chauffage eau chaude sanitaire:	1481,52 kWh	
Energie système solaire pour l'ecs:	1208,68 kWh	
Apport d'énergie pour l'appoint:	787,58 kWh	
Economie Gaz naturel H:		146,2 m³
Emission de CO2 évitée:		309,17 kg
Taux de couverture eau chaude:		60,5 %
Fraction de l'énergie économisé (EN 12976):		57,3 %
Rendement système:		24,4 %

Annexe 2 : Structure de coûts par technique

1/ Chaudière murale à gaz	Prix HTVA	Prix TVAC	Prix pour
			l'ECS 25%
Modèle de base de chaudière murale à condensation			
Type Viessmann Vitodens 100-W combi 26 kW	+ 1892 €	+ 2289,32 €	+ 572,33 €
Accessoires de tubage de la cheminée	+ 500 €	+ 605 €	+151,25 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 12			
heures à un coût de 50€/h → 2 x 12 h x 50 €/h =	+ 1200 €	+ 1452 €	+ 363 €
Entretien²³ sur la durée de vie de la chaudière – 100 €			
par an pdt 12,5 ans =	1250€	1512,5 €	378,13€
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 1601 €	+ 1937,30 €	+ 484,33 €
Coût combustible ECS sur 12,5 ans à 5,9 c€/kWh =			
→12,5 x 3750 kWh x 0,059 €/kWh =	2765,63€	3346,4 €	3346,4
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 3542,4 €	+ 4286,27 €	+ 4286,27 €
Coût électricité sur 12,5 ans à 20 c€/kWh =			
→ 12,5 x 200 kWh x 0,20 €/kWh =	+ 500 €	605€	151,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 640,43 €	+ 774,92 €	+ 193,73
TOTAL	9376 €	11345 €	6051 €
	HTVA	TVAC	TVAC

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie (gaz + \'elec)}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{(4286,27+193,73)}{3000} / \frac{12,5}{12,5} = 11,95 \ c \in /kWh$$

Le coût de revient par kWh utile produit pendant 12,5 ans sera de :

$$\frac{\textit{Coût total}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{6051}{12.5 \times 3000} = 16.14 \text{ c} \text{€/kWh}$$

<sup>23</sup> L'entretien est obligatoire tous les 2 ans en Wallonie et tous les 3 ans à Bruxelles mais nous faisons l'hypothèse ici que l'appareil est entretenu chaque année « en bon père de famille ».

2/ Ballon électrique	Prix HTVA	Prix TVAC
Modèle de boiler électrique à anode active et résistance		
stéatite. Type Renova Bulex mv 4818-1gm-200 l	+ 623,55 €	+ 754,5 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 2 heures		
à un coût de 50€/h →2 X 2 h X 50 €/h =	+ 200 €	+ 242 €
Pas d'entretien sur le ballon	0€	0€
Coût électricité sur 12,5 ans à 16 c€/kWh		
→ 12,5 X 3734 kWh X 0,16 €/kWh =	7468 €	9036,28€
En euros avec 2% d'inflation pendant 12,5 ans =	+ 9565,47 €	+ 11574,22 €
TOTAL	10389 €	12571 €
	HTVA	TVAC

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'electricit\'e}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{11574,22}{3000} = 30,86 \ c \in /kWh$$

Le coût de revient par kWh utile produit pendant 12,5 ans sera de :

$$\frac{\textit{Coût total}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{12571}{12,5 \times 3000} = 33,5 \ c \in /kWh$$

3/ Ballon solaire + appoint au gaz	Prix HTVA	Prix TVAC
Ensemble de capteurs solaires thermique + accumulateur		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2m² + ballon 250L	+ 2694 €	+ 3259,74 €
Accessoire de montage et raccordements en toiture inclinée	+ 632 €	+ 764,72 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 16 heures à		
un coût de 50€/h →2 x 16 h x 50 €/h =	+ 1600 €	+ 1936 €
Entretien sur la durée de vie du système –		
→ 25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires solaires:		
Circulateur : 25 x 40W x 1825h =1825 kWh		
→ 1825 x 0,22 €/kWh =	401,5€	485,82 €
Régulation : 25 x 1,5W x 8760h = 328,5 kWh		
→ 328,5 x 0,20 €/kWh =	65,7 €	79,50€
En euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans =	+ 766,49 €	+ 927,46 €
Modèle de base de chaudière murale à condensation (25%)		
Type Viessmann Vitodens 100-W combi 26 kW x 2		
→{1892 + [1892 x (1,02^12,5)]} x 25% =	+ 1078,85 €	+ 1305,41 €
Accessoires de tubage de la cheminée	+ 125 €	+ 151,25 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pdt 18 heures à un		
coût de 50€/h (25 %) →2 x [12 +6 x (1,02^12,5)] x 50 x 25% =	+ 492,13 €	+ 595,48 €
Entretien²4 sur la durée de vie de la chaudière – 100 € par an		
pdt 25 ans (25%) =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût combustible d'appoint sur 25 ans à 5,9 c€/kWh		
25 x 1500 kWh x 0,059 €/kWh =	2212,5€	2677,13€
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 3629,84 €	+ 4392,11 €
Coût électricité sur 25 ans à 20 c€/kWh =		
→ 25 x 50 kWh x 0,20 €/kWh =	+ 250 €	302,5€
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 410,15 €	+ 496,28 €
TOTAL	13479 €	16310 €
	HTVA	TVAC

 $<sup>^{24}</sup>$  L'entretien est obligatoire tous les 2 ans en Wallonie et tous les 3 ans à Bruxelles mais nous faisons l'hypothèse ici que l'appareil est entretenu chaque année « en bon père de famille ».

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{(927,46+4392,11+496,28)}{3000} / \frac{1}{25} = 7,75 \ c \cdot \text{C}/\textit{kWh}$$

Le coût de revient global (solaire + chaudières) par kWh utile produit pendant 25 ans sera de :

$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{16310}{25\ x\ 3000} = 21,75\ c \in /kWh$$

4/ Ballon solaire + appoint électrique	Prix HTVA	PRIX TVAC
Ensemble de capteurs solaires thermique + accumulateur		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2m² + ballon 250L	+ 2694 €	+ 3259,74 €
Accessoire de montage en toiture inclinée + tuyauteries		
de raccordement vers le ballon solaire + résistance	+ 852 €	+ 1030,92 €
électrique		
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 16 heures		
à un coût de 50€/h →2 x 16 h x 50 €/h =	+ 1600 €	+ 1936 €
Entretien sur la durée de vie du système –		
25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires sur 25 ans:		
Circulateur : 25 x 40W x 1825h = 1825 kWh		
→ 1825 x 0,22 €/kWh =	401,5 €	485,82 €
Régulation : 25 x 1,5W x 8760h = 328,5 kWh		
→ 328,5 x 0,20 €/kWh =	65,7 €	79,50 €
En euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans =	+ 766,49 €	+ 927,46 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
25 x 1500 kWh x 0,16 €/kWh =	6000€	7260 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 9843,64 €	+ 11911 €
TOTAL	16782 €	20306 €
	HTVA	TVAC

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{(11911 + 927,46)}{3000} / \frac{1}{25} = 17,12 \ c \in /kWh$$

Le coût de revient global (solaire + électrique) par kWh utile produit pendant 25 ans sera de :

$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{20306}{25\ x\ 3000} = 27,07\ c \in /kWh$$

Le coût par kWh d'électricité économisé devient:

$$C_{CES} = \frac{INV}{n \, x \, (A_{solaire}/\eta_{r\acute{e}sistance})} \, x \, 100 = \frac{8394,83}{25 \, x \, (1825/0,95)} \, x \, 100 = 17,48 \, c \in /kWh$$

5/ Ballon électrique + installation photovoltaïque	Prix HTVA	Prix TVAC
Modèle de boiler électrique à anode active et résistance stéatite		
Type Renova Bulex mv 4818-1gm-200 l x 2		
{623,55 + [623,55 x (1,02^12,5)]} =	+ 1422,23 €	+ 1720,90 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 4 heures à un		
coût de 50€/h pour installation de 2 boilers électriques sur 25		
ans 2 x [2 + 2 x (1,02^12,5)] x 50 =	+ 456,17 €	+ 551,97 €
Pas d'entretien sur le ballon	0€	0€
Coût électricité sur 25 ans à 16 c€/kWh		
→ 25 X 3734 kWh X 0,16 €/kWh =	<del>14936 €</del>	18071,56 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 24504,09 €	+ <del>29649,95 €</del>
Installation PV complète de 5610 Wc - 22 modules Vitovolt		
P255BB + onduleur SMA SB 5000 TL-21 + accessoires	+ 8782 €	+ 10626,22€
Montage sur toit en tuiles et raccordements électriques		
onduleur: 2 hommes pendant 16h à 50 €/h →2 x 16h x 50 €/h =	+ 1600 €	+ 1936 €
Entretien - onduleur à remplacer après 15 ans		
→1995*(1,02^15) =	+ 2685 €	+ 3248,85 €
TOTAL	14945,4 €	18084 €
	HTVA	TVAC

Avec la production photovoltaïque, le coût moyen annuel sera nul pour produire l'ECS.

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = 0 \in /kWh$$

Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de :

$$\frac{\textit{Co\^{u}t total}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{18084}{25 \text{ x } 3000} = 24,11 \text{ c} \in /kWh$$

6/ Pompe à chaleur sanitaire	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L	+ 1895 €	+ 2292,95 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 2 heures		
à un coût de 50€/h → 2 x 2 h x 50 €/h =	+ 200 €	+ 242 €
Entretien sur la durée de vie du système – anode Mg		
25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25€
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
25 x 1151 kWh x 0,16 €/kWh =	4604 €	5570,84 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 7553,35 €	+ 9139,55 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires sur 25 ans:		
Régulation : 25 x 1,5W x 8760h = 328,5 kWh		
→ 328,5 x 0,20 €/kWh =	65,7€	79,50 €
En euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans =	+ 107,79 €	+ 130,42 €
TOTAL	10782 €	13046 €
	HTVA	TVAC

Pour le boiler thermodynamique, le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de :

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{(9139,55+130,42)/_{25}}{3000} = 12,36 \ c \in /kWh$$

Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de :

$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{13046}{25\ x\ 3000} = 17,39\ c€/kWh$$

7/ PAC sanitaire + solaire thermique	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L	+ 2336 €	+ 2826,56 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 2 heures		
à un coût de 50€/h →2 x 2 h x 50 €/h =	+ 200 €	+ 242 €
Entretien sur la durée de vie du système – anode Mg		
25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
25 x 526 kWh x 0,16 €/kWh =	2104€	2545,84 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 3451,83 €	+ 4176,72 €
Ensemble de capteurs solaires thermique		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2,32 m²	+ 2694 €	+ 3259 €
Accessoire de montage en toiture inclinée + tuyauteries		
de raccordement vers le ballon solaire	+ 473 €	+ 572,33 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 12 heures		
à un coût de 50€/h → 2 x 12 h x 50 €/h =	+ 1200 €	+ 1452 €
Entretien sur la durée de vie du système		
<b>→</b> 25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires sur 25 ans:		
Circulateur : 25 x 40W x 1781h = 1781 kWh		
→ 1781 x 0,22 €/kWh =	391,75€	474,02 €
Régulation Sol. + PAC: 25 x 1,5W x 8760h = 328,5 kWh		
→ 328,5 x 0,20 €/kWh =	65,7€	79,50 €
En euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans =	+ 750,50€	+ 908,1 €
TOTAL	13156 €	15918 €
	HTVA	TVAC

Le coût énergétique moyen annuel par kWh utile d'ECS sera de :

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \frac{(4176,72 + 908,1)}{3000} / \frac{1}{25} = 6,78 \, c \in /kWh$$

Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de :

$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{15918}{25\ x\ 3000} = 21,22\ c \in /kWh$$

8/ PAC sanitaire + photovoltaïque	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L	+ 1895 €	+ 2292,95 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 2 heures		
à un coût de 50€/h	+ 200 €	+ 242 €
Entretien sur la durée de vie du système – anode Mg		
25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
25 x 1151 kWh x 0,16 €/kWh =	4604 €	<del>5570,84 €</del>
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ <del>7553,35 €</del>	+ <del>9139,55 €</del>
Coût du fonctionnement des auxiliaires sur 25 ans:		
Régulation : 25 x 1,5W x 8760h = 328,5 kWh		
→ 328,5 x 0,20 €/kWh =	<del>65,7 €</del>	<del>79,50</del> €
En euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans =	+ <del>107,79 €</del>	<del>+ 130,42 €</del>
Installation PV complète de 1785Wc - 7 modules Vitovolt		
P255BB + onduleur SMA SB 1,5 VL40 + accessoires	+ 3279 €	+ 3967,59 €
Montage sur toit en tuiles et raccordements électriques		
onduleur : 2 hommes pendant 8h à 50 €/h	+ 800 €	+ 968 €
2 x 8 h x 50 €/h =		
Entretien - onduleur à remplacer après 15 ans		
<b>→</b> 998*(1,02^15) =	+ 1343,17	+ 1625,24
TOTAL	8543 € HTVA	10336 € TVAC

Ici à nouveau le coût moyen annuel sera nul pour produire l'ECS grâce au photovoltaïque :

$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = \ 0 \ \textit{€/kWh}$$

Et le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de:

$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{10336}{25\ x\ 3000} = 13{,}78\ c{\in}/kWh$$

9/ PAC sanitaire + solaire thermique + photovoltaïque	Prix HTVA	PRIX TVAC
PAC sanitaire – Boiler thermodynamique		
Type Viessmann Vitocal 060-A 1,5 kW + ballon 250L	+ 2336 €	+ 2826,56 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 2 heures		
à un coût de 50€/h →2 x 2 h x 50 €/h =	+ 200 €	+ 242 €
Entretien sur la durée de vie du système – anode Mg		
25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût électricité d'appoint sur 25 ans à 16 c€/kWh		
25 x 536 kWh x 0,16 €/kWh =	<del>2104 €</del>	<del>2545,84 €</del>
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 3451,83 €	+ 4 <del>176,72 €</del>
Ensemble de capteurs solaires thermique		
Type Viessmann Ensemble 2 x 2,32 m²	+ 2694 €	+ 3259 €
Accessoire de montage en toiture inclinée + tuyauteries		
de raccordement vers le ballon solaire	+ 473 €	+ 572,33 €
Main d'œuvre installation à 2 hommes pendant 12 heures		
à un coût de 50€/h →2 x 12 h x 50 €/h =	+ 1200 €	+ 1452 €
Entretien sur la durée de vie du système –		
<b>→</b> 25 € par an pdt 25 ans =	625€	756,25 €
En euros avec 2% d'inflation pendant 25 ans =	+ 1025,38 €	+ 1240,71 €
Coût du fonctionnement des auxiliaires sur 25 ans:		
Circulateur : 25 x 40W x 1781h = 1781 kWh		
→ 1781 x 0,22 €/kWh =	-391,75 €	<del>474,02 €</del>
Régulation Sol. + PAC: 25 x 1,5W x 8760h = 328,5 kWh		
→ 328,5 x 0,20 €/kWh =	<del>65,7 €</del>	<del>79,50 €</del>
En euros avec 2 % d'inflation pendant 25 ans =	<del>+ 750,50€</del>	+ 908,1 €
Installation PV complète de 1275Wc - 4 modules Vitovolt		
P255BB + onduleur SMA SB 1,5 VL40 + accessoires	+ 1631 €	+ 1973,51 €
Montage sur toit en tuiles et raccordements électriques		
onduleur : 2 hommes pendant 6h à 50 €/h	+ 600 €	+ 726 €
2 x 6 h x 50 €/h =		
Entretien - onduleur à remplacer après 15 ans		
→743*(1,02^15) =	+ 999,98 €	+ 1209,98 €

TOTAL	12185 €	14743 €
	HTVA	TVAC

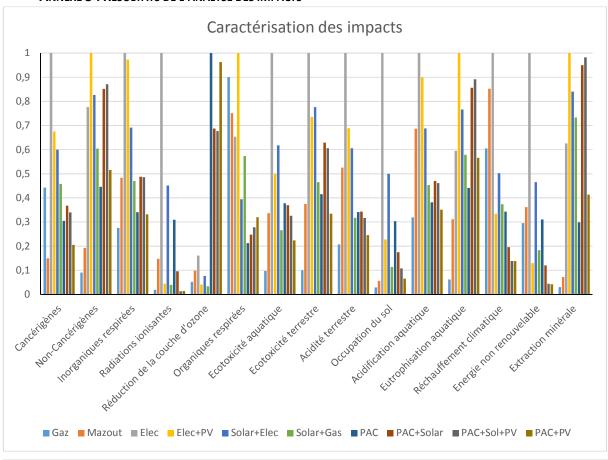
Le coût d'exploitation moyen annuel par kWh utile d'ECS sera encore une fois nul grâce au système photovoltaïque :

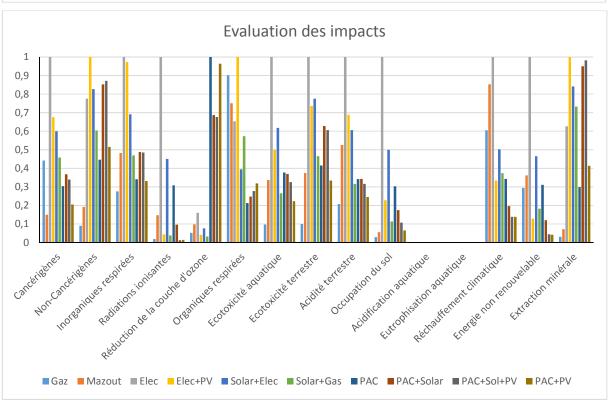
$$\frac{\textit{Coût moyen annuel en \'energie}}{\textit{Energie utile pour la production d'ECS}} = 0 \ c \in /kWh$$

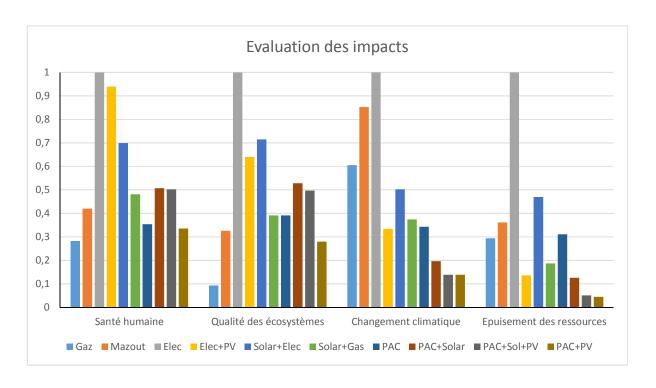
Le coût de revient par kWh utile produit pendant 25 ans sera de :

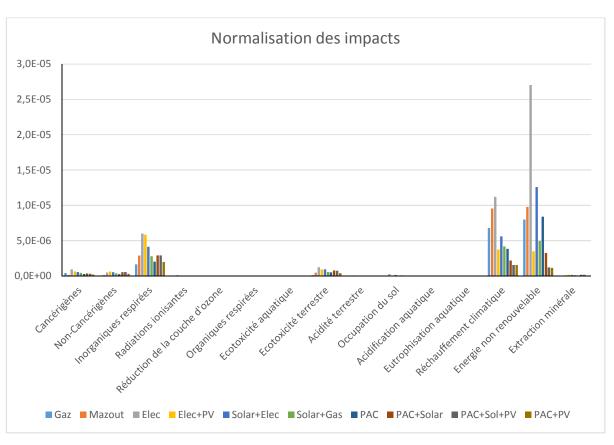
$$\frac{Coût\ total}{Energie\ utile\ pour\ la\ production\ d'ECS} = \frac{14743}{25\ x\ 3000} = 19,65\ c \in /kWh$$

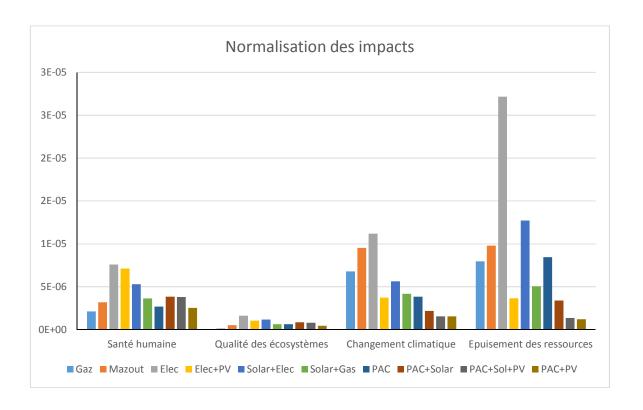
ANNEXE 3: RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES IMPACTS

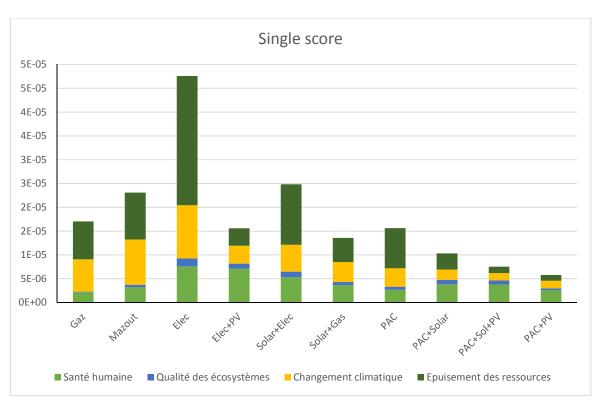












ANNEXE 4: ARBRES D'IMPACTS POUR LE SYSTÈME PAC - PV

