



Directive d'efficacité énergétique
2023/1791/EU – ART. 25 – Annexe X
Potentiel d'efficacité en matière de chaleur et de froid

Annexe F : Analyse coûts-avantages

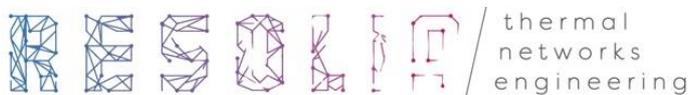


Table des matières

Introduction	4
Définition des paramètres technico-financiers	4
1. Paramètres liés aux technologies de chauffage	5
1.1. Paramètres “hors-coûts”.....	8
1.2. Paramètres de coûts	9
2. Paramètres liés aux réseaux d'énergie thermique.....	10
3. Paramètres liés aux vecteurs énergétiques.....	12
4. Paramètres liés au contexte financier	13
5. Paramètres liés à l'octroi de subsides	13
Définition des scénarios	15
1. Profil 1 – Commune urbaine ou périurbaine à forte densité énergétique.....	15
1.1. Couverture énergétique.....	15
1.2. Paramètres technico-financiers	17
2. Profil 2 - Parc d'immeubles résidentiels	21
2.1. Couverture énergétique.....	21
2.2. Paramètres technico-financiers	22
3. Profil 3 - Site industriel.....	26
3.1. Couverture énergétique.....	26
3.2. Paramètres technico-financiers	26
4. Profil 4 - Nouveau quartier.....	31
4.1. Couverture énergétique.....	31
4.2. Paramètres technico-financiers	32
Analyse coûts-avantages	36
1. Analyse économique	36
1.1. Composantes de coûts.....	36
1.2. Valeur actualisée et annualisée des coûts nets.....	39
1.3. Résultats analyse économique.....	39
2. Analyse de sensibilité	39
3. Analyse environnementale.....	39
Bibliographie	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres de coûts liés à la chaufferie dépendant des technologies de chauffage	7
Tableau 2 : Paramètres de coûts liés à la source d'énergie thermique	7
Tableau 3 : Paramètres de coûts liés aux RET dépendant du régime de température.....	10
Tableau 4 : Coût du réseau par mètre en fonction de la puissance	11
Tableau 5 : Coûts de supervision et de gestion des RET en fonction de la puissance installée du client	12
Tableau 6 : Paramètres liés aux vecteurs énergétiques.....	13
Tableau 7 : Paramètres liés aux vecteurs énergétiques.....	13
Tableau 8 : Coûts et subsides des études AMUREBA	14
Tableau 9 : Couverture énergétique des scénarios du profil 1.....	16
Tableau 10 : Paramètres technico-financiers du profil 1.....	20
Tableau 11 : Couverture énergétique des scénarios du profil 2.....	21
Tableau 12 : Paramètres technico-financiers du profil 2.....	25
Tableau 13 : Couverture énergétique des scénarios du profil 3.....	26
Tableau 14 : Paramètres technico-financiers du profil 3.....	30
Tableau 15 : Couverture énergétique des scénarios du profil 4.....	31
Tableau 16 : Paramètres technico-financiers du profil 4.....	35

Introduction

Cette annexe présente la méthodologie utilisée pour effectuer l'analyse coûts-avantages. Cette dernière se divise en plusieurs étapes clés détaillées dans la suite de ce document à savoir :

- Définition des paramètres technico-financiers relatifs aux différentes sources d'énergie et à la taille des consommateurs ;
- Définition de profils représentatifs des consommateurs de Wallonie (non détaillé dans cette annexe car bien explicité dans le rapport) ;
- Définition de scénarios étudiant différents mix énergétiques pour couvrir les besoins de chaleur des profils susmentionnés ;
- Analyse économique ;
- Analyse de sensibilité ;
- Analyse environnementale.

Définition des paramètres technico-financiers

Différents paramètres sont utilisés dans l'analyse coûts-avantages. Ces derniers sont détaillés dans cette section et regroupés en 5 thématiques :

- Les paramètres liés aux **technologies** (sources de chaleur) et à la **chaufferie** :
 - Durée de vie [années]
 - Rendement thermique [%] / COP
 - Rendement électrique [%]
 - Vecteur énergétique
 - CAPEX chaufferie [€/kW]
 - OPEX (maintenance de la chaufferie) [€/kW]
 - CAPEX du sourcing [€/kW]
 - Subsidés [%CAPEX]
- Les paramètres liés au **réseau d'énergie thermique** en fonction du régime de température :
 - Durée de vie [années]
 - Pertes thermiques [%]
 - CAPEX du réseau [€/m]
 - CAPEX réseau secondaire et raccordement [% CAPEX sourcing + réseau]
 - OPEX (supervision et gestion) [€/MWh]
- Les paramètres liés aux **vecteurs énergétiques** :
 - Coûts de l'énergie [€/kWth]
 - Inflation [%]
 - Emission de CO₂ [grCO₂/kWh]
- Les paramètres liés au **contexte financier** :
 - Taux actuariel [%]
 - Amortissement financier [années]
 - Taux d'inflation des CAPEX [%]
 - Taux d'inflation des OPEX [%]
 - Taux d'inflation du coût du CO₂ [%]
 - Tarif des certificats verts [€/CV]
- Les paramètres liés aux **subsidés** :
 - Coût des études et subsidés accordés [€]

1. Paramètres liés aux technologies de chauffage

Le Tableau 1 et le Tableau 2 reprennent les différents paramètres utilisés pour déterminer les coûts de chaufferie en fonction de la technologie considérée. Ces paramètres, leurs hypothèses et leurs sources sont détaillés dans les sections suivantes.

Il est à noter que deux types de technologies “chaleur fatale” sont considérées dans cette étude. En effet, ne sachant prédire la température de la source à l’échelle de la Wallonie, plusieurs niveaux de températures sont envisagés. La “chaleur fatale (PAC)” couvre les sources “basse température” (+- 30°C) qui sont rehaussées pour être compatibles dans des réseaux d’énergie thermique haute température (+- 70°C). La “chaleur fatale (échangeur)” couvre les cas où la chaleur est directement disponible à la température désirée auquel cas seul un échangeur de chaleur est nécessaire dans la chaufferie.

Technologie	Durée de vie	COP / Rendement (thermique)	Rendement électrique	Energie	CAPEX Chaufferie (€/kW)			OPEX Maintenance (€/kW)			Subsides (%CAPEX)
					Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	
Aérothermie (PAC)	15	2,9	/	Electricité	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	7,5%
				432	1.250	825	432	30	17,7	10,2	
Aérothermie haute température (PAC)	20	2,9	/	Electricité	598,4			17,2			7,5%
Géothermie fermée peu profonde (PAC)	15	4,5	/	Electricité	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	15%
				338	1.050	700	338	25	15	8	
Géothermie ouverte peu profonde (PAC)	15	5,5	/	Electricité	338			16			15%
Aquathermie (PAC)	15	4,5	/	Electricité	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	10%
				338	1.050	700	338	25	15	8	
Géothermie profonde (échangeur de chaleur)	20	10	/	Electricité	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	18%
				100	150	125	100	3,75	3,75	3,75	
Cogénération biomasse	15	50%	20%	Biomasse solide	7.000			86,4			20%
Cogénération biogaz	15	58%	35%	Biogaz	2.240			86,4			20%
Chaleur fatale (PAC)	15	6		Chaleur fatale	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	20%
				338	1.050	700	338	25	15	8	
Chaleur fatale (échangeur)	20	50		Chaleur fatale	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	20%
				100	150	125	100	3,75	3,75	3,75	

Chaudière à condensation	20	90%		Gaz naturel	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	0%
				110	412	235	110	18	9	3	
Chaudière d'appoint centrale au biogaz	20	95%		Biogaz	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	15%
				110	412	235	110	18	9	3	
Chaudière biomasse	20	85%		Biomasse	Petit	Moyen	Grand	Petit	Moyen	Grand	8%
				400	1.212	725	400	21	13	7	

Tableau 1 : Paramètres de coûts liés à la chaufferie dépendant des technologies de chauffage

Technologie	Durée de vie	CAPEX - Sourcing (€/kW)
Géothermie fermée peu profonde	40	2.000
Géothermie ouverte peu profonde	40	900
Aquathermie	40	400
Géothermie profonde	40	6.200

Tableau 2 : Paramètres de coûts liés à la source d'énergie thermique

1.1. Paramètres “hors-coûts”

Durée de vie

La durée de vie des technologies est estimée sur base de données internes et de données provenant du site Energie Plus.

A l'exception de la PAC aérothermique haute température ([Clade, 2024](#)), toutes les technologies nécessitant une pompe à chaleur ont une durée de vie de 15 ans. Au-delà de cette dernière, la PAC doit être remplacée.

Les technologies ne fonctionnant qu'à l'aide d'un échangeur de chaleur comme la géothermie profonde ou la chaleur fatale haute température ont une durée de vie de 20 ans.

Enfin, les installations de cogénération ont une durée de vie de 15 ans tandis que les chaudières ont une durée de vie de 20 ans.

Rendements / COP

Les rendements et COP des technologies sont estimés sur base de données internes et de données provenant du site Energie Plus.

Concernant les pompes à chaleur, les PAC aérothermiques sont les seules à être utilisées comme solutions de chauffage individuel. Toutefois, couplées à d'autres technologies les PAC aérothermiques voient leur COP augmenter significativement de part une utilisation moindre et plus optimisée de ces dernières.

Le COP de la géothermie ouverte est légèrement supérieur à celui de la géothermie fermée puisque la géothermie ouverte puise directement l'eau du sol et ne nécessite pas de transfert de chaleur supplémentaire entre sondes et sol.

L'aquathermie économise également un transfert de chaleur. Toutefois, la température de la source est plus variable que le sous-sol dès lors son COP est similaire à celui de la géothermie fermée.

En ce qui concerne la chaleur fatale basse température et donc nécessitant une PAC¹, le COP est dérivé à partir d'un COP théorique ([Zehnder, 2004](#)) et d'un COP réaliste observé.

Ensuite, les technologies fonctionnant avec uniquement des échangeurs de chaleur sont celles qui bénéficient des meilleurs COP, en particulier la chaleur fatale qui ne nécessite de l'électricité que pour alimenter les pompes de circulation.

En ce qui concerne les chaudières et cogénérations, leurs rendements proviennent de plusieurs sources :

- Cogénération biogaz & gaz, chaudière biogaz et biomasse : ([Bruxelles-Environnement, 2024](#))
- Cogénération biomasse : ([ADEME, 2016](#))
- Chaudière gaz : ([Deplasse, 2020](#))

¹ Pour rappel, ne connaissant pas la température des sources de chaleur fatale, deux technologies sont considérées pour la récupération de chaleur fatale (simple échangeur et pompe à chaleur). Dès lors, l'hypothèse effectuée dans cette analyse est que 50% de la chaleur est couverte par de la chaleur fatale haute température (échangeur) et l'autre moitié par de la chaleur fatale basse température nécessitant une PAC (ce qui engendre un COP).

1.2. Paramètres de coûts

CAPEX/OPEX chaufferie

Sauf précisé autrement, tous les coûts (colonnes “CAPEX Chaufferie” et “OPEX Maintenance”) proviennent de l’étude similaire de Bruxelles Environnement menée pour la Région Bruxelles-Capitale ([Bruxelles-Environnement, 2024](#)). Ces coûts sont divisés en 3 catégories de tailles correspondant à la puissance installée du consommateur :

- Petit → En dessous de 20 kW
- Moyen → Entre 20 et 50 kW
- Grand → Au-dessus de 50 kW

Les technologies pour lesquelles les coûts proviennent d’autres sources sont les suivantes :

- Aérothermie haute température (PAC) : Les coûts d’investissement sont basés sur plusieurs devis de pompes à chaleur aérothermiques haute température ([Clade, 2024](#)). Une moyenne des coûts par unité de puissance (€/kW) a été faite pour ressortir une valeur représentative.
- Cogénération biomasse : Les coûts d’investissement de la cogénération biomasse proviennent du rapport de l’ADEME sur les coûts des énergies renouvelables ([ADEME, 2016](#))². Les données utilisées afin de dériver un CAPEX en €/kWth pour cette technologie sont les investissements (€/kWe) et les rendements (électrique et global). Enfin, comme les données proviennent de 2011, une inflation de 1% est considérée.
- Cogénération gaz naturel : Le CAPEX de cette technologie provient de la précédente stratégie chaleur ([Deplasse, 2020](#)). Comme les données datent d’il y a 4 ans, une inflation de 1,8% (voir sections suivantes) est considérée.

CAPEX Sourcing

Le sourcing du réseau (voir Tableau 2) couvre les infrastructures et équipements à mettre en place afin d’avoir accès à la source de chaleur. Cela ne concerne que quelques technologies dont la géothermie et l’aquathermie. Les coûts de géothermie peu profonde sont des ordres de grandeur dérivés à partir des coûts de forage par mètre de sable ou de socle et de la puissance type par mètre de sous-sol (pour la géothermie fermée) ou d’un puits (pour la géothermie ouverte). Les coûts d’aquathermie quant à eux ont été déterminés et validés par Extraqt. Enfin, les coûts de géothermie profonde proviennent de données internes. Ces coûts viennent s’additionner aux coûts de chaufferie lors de l’analyse. Toutefois, la durée de vie des équipements couverts par les coûts de sourcing est de 40 ans contre 15/20 pour les PAC/chaudières/cogénérations qui composent les chaufferies des réseaux.

Subsides

Les subsides repris dans le Tableau 1 peuvent être appliqués sur la chaufferie (PAC, échangeur, etc.) et le sourcing du réseau (ex : pompage, forage, géothermique, etc.). Ils proviennent de la révision des aides UDE³, “destinées à faciliter le développement de certaines activités ou de certaines régions économiques, quand elles n’altèrent pas les conditions des échanges dans une mesure contraire à l’intérêt commun” ([UE, 2012](#)). Il est à noter que les consommateurs résidentiels (profils 2 & 4) et les grands industriels (profil 3) ne bénéficient pas de ces aides à l’exception de ceux qui proposent de la récupération de chaleur fatale.

² Les versions ultérieures de ce rapport ne reprennent plus de valeurs pour les cogénérations biomasse.

³ La révision est en cours, dès lors les valeurs utilisées dans ce rapport n’ont pas encore été officiellement validées.

2. Paramètres liés aux réseaux d'énergie thermique

Les paramètres concernant les RET sont repris dans les tableaux ci-dessous. Le Tableau 3 contient les paramètres liés au régime de température du réseau, le Tableau 4 contient les coûts du réseau physique par longueur et gamme de puissance et le Tableau 5 contient les OPEX de supervision et de gestion. Ces tableaux couvrent les composantes du réseau suivantes : réseau principal et secondaire, sous-stations et OPEX de gestion et supervision.

Les hypothèses et sources du Tableau 3 sont les suivantes :

- L'infrastructure des réseaux (principalement les canalisations) sont des assets dont la durée de vie est assez longue et ne varie pas beaucoup en fonction du régime de température. Dans cette étude, la durée de vie du réseau est estimée à 40 ans.
- En ce qui concerne les pertes thermiques, une distinction est faite entre les réseaux basse température (environ 35°C maximum) et ceux haute température (autour de 70 °C). En effet, plus la température de l'eau qui circule dans les canalisations est élevée, plus les pertes le sont également. Une valeur unique par régime de température a été fixée pour évaluer les pertes⁴. Toutefois, ces dernières dépendent de plusieurs facteurs (coût et isolation des conduites, travaux de placement des conduites, régulation du réseau etc.) et peuvent donc être optimisées. Sans connaître le design détaillé des scénarios évalués, il est impossible d'évaluer les pertes dès lors, une valeur moyenne a été retenue, sachant qu'elle peut diminuer pour autant que les réseaux soient développés et régulés de manière efficace.
- Enfin, pour le piquage (i.e. lien entre réseau primaire et consommateur) et le raccordement (les sous-stations), un pourcentage du CAPEX est considéré pour couvrir ces dépenses (% observé en pratique). Ce pourcentage est plus élevé en basse température dû à la préparation d'eau chaude sanitaire qui demande des équipements supplémentaires. Il est à noter que ce pourcentage pourrait varier en fonction des profils et scénarios étudiés car le nombre et le type de consommateurs et donc de raccordements varie. Toutefois, un pourcentage fixe est considéré dans cette étude car bien que les profils soient différents, il est estimé que la "complexité" des raccordements est similaire. En effet, les profils 1, 2 et 4 couvrent un grand nombre de consommateurs, ce qui implique la gestion de nombreux raccordement et nombreuses démarches. A l'inverse, le profil 3 couvre moins de consommateurs mais l'équilibrage est plus complexe.

Les coûts de réseau (Tableau 4) et OPEX de supervision et gestion (Tableau 5) proviennent de l'étude réalisée pour la Région Bruxelles-Capitale ([Bruxelles-Environnement, 2024](#)).

Régime de température	Durée de vie	Pertes	CAPEX - Piquage/Raccordement (% CAPEX)
Basse température	40	8%	30%
Haute température	40	15%	20%

Tableau 3 : Paramètres de coûts liés aux RET dépendant du régime de température

⁴ Pour cette analyse, les pertes sont considérées stables dans le temps.

Pmax	Réseau HT	Réseau BT
MW	€/m	€/m
0,2	751	822
0,5	869	1.003
1	1.038	1.191
2	1.191	1.489
3	1.408	1.729
4	1.489	1.897
5	1.642	2.113
6	1.729	2.113
7	1.897	2.373
8	1.897	2.571
9	1.934	2.663
10	2.113	2.862
11	2.113	2.862
12	2.205	2.862
13	2.205	3.153
14	2.373	3.240
15	2.571	3.240
16	2.663	3.345
17	2.663	3.345
18	2.663	3.345
19	2.862	3.543
20	2.862	3.648
30	3.345	4.290
40	3.757	4.930
50	4.063	5.396
60	4.290	5.994
70	4.627	6.460
80	5.169	6.814
90	5.396	7.073
100	5.744	7.323
120	5.994	8.197
140	6.460	
160	7.073	
180	7.073	
200	7.930	
250	8.197	

Tableau 4 : Coût du réseau par mètre en fonction de la puissance

Taille client	Coûts supervision /Gestion (€/MWh)
Petits (< 20 kW)	6,4
Moyens (20-50 kW)	4,4
Grands (< 50 kW)	2,4

Tableau 5 : Coûts de supervision et de gestion des RET en fonction de la puissance installée du client

3. Paramètres liés aux vecteurs énergétiques

Les paramètres concernant les vecteurs énergétiques sont repris dans le tableau ci-dessous. Les sources et hypothèses sont les suivantes :

Coût de l'énergie

Les coûts du gaz naturel, de l'électricité et de la biomasse pour les résidentiels proviennent de statistiques belges ([Energie Commune, 2024](#)) au 1er janvier 2024⁵.

Les coûts du gaz naturel, de l'électricité pour les industriels proviennent de données semestrielles de Eurostat pour la Belgique ([eurostat, 2023](#)). Les données les plus récentes sont celles du second semestre de 2023.

Les coûts du biogaz, de la biomasse industrielles et de la chaleur fatale sont repris de la stratégie chaleur de la Région Bruxelles-Capitale ([Bruxelles-Environnement, 2024](#)).

Enfin, le tarif d'injection de l'électricité est la moyenne des tarifs d'injection simples de plusieurs fournisseurs pour mai 2024 ([Mon energie verte, 2024](#)).

Inflation

Les taux d'inflation sont repris de la précédente stratégie chaleur de la Wallonie ([Deplasse, 2020](#)) avec comme borne inférieure le taux actuariel de 1,7% (voir Section 4).

Emissions de CO₂

Les émissions du gaz naturel, de l'électricité et de la biomasse proviennent des données mises à disposition par l'agence wallonne de l'air et du climat ([AwAC, s. d.](#)). Pour la biomasse, la moyenne des émissions des bûches, plaquettes et pellets est utilisée. En ce qui concerne le biogaz, les données proviennent de l'ADEME ([ADEME, s. d.](#)).

⁵ Le coût de la biomasse est une moyenne des 4 technologies reprises dans l'outil.

Vecteur énergétique	Coût €/kWh	Inflation	Emissions grCO2/kWh
Gaz naturel - Résidentiel	0,0970 €	2%	241,4
Gaz naturel - Industrie	0,0522 €	2%	241,4
Biogaz	0,1200 €	2%	44,5
Biomasse solide - Résidentiel	0,0705 €	1,7%	44
Biomasse - Industrie	0,0500 €	1,7%	44
Chaleur fatale - Industrie	0,0120 €	1,7%	0
Electricité - résidentiel	0,3790 €	4%	216
Electricité - Industrie	0,1760 €	3%	216
Injection Electricité	0,0314 €	2%	/

Tableau 6 : Paramètres liés aux vecteurs énergétiques

4. Paramètres liés au contexte financier

La plupart des paramètres liés au contexte financier sont repris de l'étude précédente ([Deplasse, 2020](#)), et leurs sources sont détaillées dans l'annexe au Chapitre 10 de cette étude. L'amortissement financier correspond à la durée de vie du plus long asset, dans ce cas le réseau d'énergie thermique. Enfin, le tarif des certificats verts correspond au prix de vente minimum garanti par Elia ([SPW Energie, 2024](#)).

Contexte financier	Unité	Valeur
Taux actuariel	%/an	1,70%
Amortissement financier	années	40
Inflation CAPEX (équipements)	%/an	1,80%
Inflation OPEX (exploitation)	%/an	1,80%
Inflation coût CO2	%/an	1,00%
Tarif certificats verts (CV)	€/CV	65

Tableau 7 : Paramètres liés aux vecteurs énergétiques

5. Paramètres liés à l'octroi de subsides

Trois catégories de subsides sont considérées dans cette analyse :

- La vente de certificats verts ;
- Les subsides (AMUREBA) octroyés pour les études et audits (Tableau 8) ;
- Les aides UDE octroyées pour les équipements (chaudière biomasse, PAC, échangeurs, etc.) (Tableau 1 & Tableau 2).

Le vente de **certificats verts** ne concerne que les installations de cogénération renouvelables (biogaz et biomasse). Le nombre de certificats verts en fonction du vecteur énergétique et calculé sur base de l'outil mis à disposition du SPW est repris de la précédente stratégie chaleur ([Deplasse, 2020](#)). Les coefficients utilisés pour obtenir ce nombre (voir chapitre suivant) sont les suivants :

- Biogaz : 2,5
- Biomasse : 2

En ce qui concerne les études et audits, un coût total (pour des études d'audit global et études de faisabilité) est estimé en fonction des scénarios présentés précédemment. Les montants des subsides sont repris à partir du nouvel Arrêté AMUREBA récemment publié par le SPW. Aucun subside n'est considéré pour les scénarios qui ne sont pas totalement décarbonés. De plus, aucune aide AMUREBA n'est accordée pour les consommateurs résidentiels. Dès lors, les profils 2 et 4 ne bénéficient pas de subsides.

Scénario	Coût [€]	Subsides [€]
SB1	0	0
SA1.1	30.000	0
SA1.2	100.000	60.000
SA1.3	100.000	60.000
SA1.4.1	100.000	60.000
SA1.4.2	100.000	60.000
SA1.5	100.000	60.000
SB2	0	0
SA2.1	0	0
SA2.2	0	0
SA2.3.1	0	0
SA2.3.2	0	0
SB3	0	0
SA3.1	30.000	0
SA3.2	100.000	60.000
SA3.3	100.000	60.000
SB4	10.000	5.000
SA4.1	0	0
SA4.2	0	0
SA4.3	0	0
SA4.4.1	0	0
SA4.4.2	0	0
SA4.5	0	0

Tableau 8 : Coûts et subsides des études AMUREBA

Définition des scénarios

Chaque profil est associé à un scénario de base (SB) dans lequel les besoins de chaleur sont couverts de manière individuelle par des technologies installées au sein des bâtiments. L'analyse compare ce scénario de base à des scénarios alternatifs dans lesquels les besoins de chaleur sont couverts via des réseaux d'énergie thermique dont la source d'énergie varie en fonction du scénario.

La plupart des scénarios présentent des solutions avec plusieurs sources d'énergie dès lors, la demande couverte par ces différentes sources doit être définie suivant des critères dépendants des profils étudiés. Les choix concernant ces couvertures énergétiques sont détaillés dans la section ci-dessous. Pour chaque profil, un récapitulatif des paramètres technico-financiers est également présenté.

1. Profil 1 – Commune urbaine ou périurbaine à forte densité énergétique

1.1. Couverture énergétique

Comme mentionné dans le rapport principal, dans le profil 1 seule une partie de la commune (30%) étudiée est considérée comme reliée à un réseau d'énergie thermique dans les scénarios alternatifs, l'analyse porte donc uniquement sur cette partie qui est celle qui varie entre les différents scénarios.

Il est toutefois considéré que le scénario de base, à l'échelle de la commune, ne soit plus entièrement fossile. En effet, il contient différentes sources de chauffage individuelles, des pompes à chaleur (PAC) aérothermiques et des chaudières à condensation au gaz naturel. Le ratio entre ces deux sources est basé sur la part des ménages connectés au gaz dans la commune étudiée (Farciennes) ([Iweps, 2022](#)). Il apparaît que 52% des ménages sont connectés au gaz. Ces derniers restent donc au gaz naturel tandis que des PAC aérothermiques couvrent les 48% restants.

Cependant comme mentionné précédemment, seuls 30% des besoins sont étudiés dans l'analyse coûts-avantages. Puisque les scénarios alternatifs étudient des solutions de chaleur en partie décarbonées, les 30% couverts par l'analyse sont pris parmi les ménages connectés au gaz naturel.

La couverture en énergie de ces 30% est reprise dans le Tableau 9 et la justification de cette dernière par scénario est la suivante :

- SB1 : Voir explications ci-dessus
- SA1.1 : 90% cogénération → Couverture choisie pour assurer un fonctionnement de 5.000 h/an, valeur nécessaire pour valoriser l'installation de cogénération, tout en maximisant la part d'énergie couverte par la technologie primaire.
- SA1.2 : 85% récupération de chaleur fatale → En théorie, la chaleur fatale pourrait couvrir 100% de la demande. Ceci dit, il est important d'avoir une seconde technologie en back-up en cas de problème technique. Dès lors, afin d'éviter de payer plusieurs fois les coûts d'énergie, le ratio 85/15 est utilisé.
- SA1.3 : 90% géothermie profonde → Mêmes hypothèses que pour la cogénération.

- SA1.4-5 : 60% géothermie peu profonde/aquathermie → Couverture choisie afin de maximiser la part d'énergie couverte par la technologie primaire tout en gardant une combinaison de fonctionnement optimale entre les deux technologies.

Profils et scénarios			
Couverture énergétique par technologie détaillée par scénario de chaque profil de consommation	Solution individuelle	Solution collective - RET	
	Technologie 1	Technologie principale	Technologie d'appoint/ backup
Profil 1 – Commune urbaine ou périurbaine à forte densité énergétique			
SB1 – Source de chauffage individuelle	100% chaudière à condensation	/	/
SA1.1 – Cogénération gaz reliée à un RET et chaudière d'appoint centrale au biogaz (back-up)	/	90% Cogénération gaz	10% Chaudière d'appoint biogaz
SA1.2 – Chaleur fatale distribuée par RET et chaudière d'appoint central au biogaz (back-up)	/	85% Récupération de chaleur fatale	15% Chaudière d'appoint biogaz
SA1.3 – Installations géothermiques profondes reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	90% Géothermie profonde	10% PAC aérothermique haute température
SA1.4.1 – Installations géothermiques peu profondes fermées reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	60% Géothermie peu profonde fermée	40% PAC aérothermique
SA1.4.2 – Installations géothermiques peu profondes ouvertes reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	60% Géothermie peu profonde ouverte	40% PAC aérothermique
SA1.5 – Installations aquathermiques reliée à un RET et et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	60% Aquathermie	40% PAC aérothermique

Tableau 9 : Couverture énergétique des scénarios du profil 1

1.2. Paramètres technico-financiers

Le Tableau 10 reprend l'ensemble des paramètres technico-financiers pour les scénarios du profil 1. Quelques détails restent à être précisés :

- Comme mentionné précédemment, certaines technologies ont plusieurs CAPEX en fonction de la puissance installée. Le profil 1 ne se concentre que sur la demande résidentielle et tertiaire dès lors, pour le SB1 le CAPEX est une moyenne entre la valeur des petits et des moyens (voir Tableau 1). Les CAPEX des scénarios alternatifs correspondent toujours à la valeur des grands consommateurs puisque l'installation est centralisée et donc bien supérieure à 50 kW.
- Le choix du vecteur énergétique et plus précisément de son caractère résidentiel ou industriel dépend également des consommateurs. Dans ce cas, la solution individuelle concerne des clients résidentiels et tertiaires dès lors, le tarif résidentiel est appliqué. Dans les cas d'un RET (solutions alternatives) par contre, l'achat d'énergie est groupé, le tarif industriel est donc appliqué.
- La puissance thermique est soit dérivée du rapport entre la demande couverte et les heures de fonctionnement de la technologie, soit obtenue à partir d'un ratio de puissances entre la technologie primaire et secondaire pour s'assurer de pouvoir couvrir la pointe et/ou d'avoir un backup suffisant si l'une des technologies tombe en panne. Cela vaut pour tous les profils.
- La puissance électrique est obtenue à partir de la puissance thermique et des rendements thermiques et électriques. Cela vaut pour tous les profils.
- La longueur du réseau est obtenue en divisant la demande totale couverte par la densité linéique de la commune.
- Le subside sourcing pour le réseau correspond au subside de la technologie primaire dans le cas où des installations sont nécessaires pour récupérer la chaleur (ex : sondes, pompages, etc.). Cela vaut pour tous les profils.
- Les clients étant résidentiels et tertiaires, une hypothèse de puissance a été prise comme pour les CAPEX pour fixer les OPEX du réseau. La valeur retenue est la moyenne des OPEX des petits et moyens consommateurs (voir Tableau 5).

	Scénario de base (SB1)	Scénario alternatif (SA 1.1)	Scénario alternatif (SA 1.2)		Scénario alternatif (SA 1.3)	Scénario alternatif (SA 1.4.1)	Scénario alternatif (SA 1.4.2)	Scénario alternatif (SA 1.5)
Description générale du scénario	Source de chauffage individuelle	RET Cogénération au gaz + chaudière appoint/back-up au biogaz	RET avec récupération de chaleur fatale + chaudière appoint/back-up au biogaz		RET Géothermie profonde + appoint/back-up PAC aérothermique haute température	RET Géothermie peu profonde fermée + appoint/back-up PAC aérothermique	RET Géothermie peu profonde ouverte + appoint/back-up PAC aérothermique	RET Aquathermie + appoint/back-up PAC aérothermique
Couverture communale	30%	30%	15%	15%	30%	30%	30%	30%
Technologie primaire	Chaudière à condensation	Cogénération gaz naturel	Chaleur fatale (PAC)	Chaleur fatale (échangeur)	Géothermie profonde (échangeur de chaleur)	Géothermie fermée peu profonde (PAC)	Géothermie ouverte peu profonde (PAC)	Aquathermie (PAC)
Couverture	100%	90%	85%	85%	90%	60%	60%	60%
Durée de vie	20	15	15	20	20	15	15	15
Réinvest	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
CAPEX unitaire (EUR/kWth)	323,5	2240	100%	100	100	338	338	338
Subside Investissement (% CAPEX)	0%	0%	20%	20%	18%	15%	15%	10%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)	13,5	86,4	8	3,75	3,75	8	16	8
Rendement thermique (%)	90%	58%	/	/	/	/	/	/
Rendement électrique (%)	/	35%	/	/	/	/	/	/
Coefficient de performance (chaud)	/	/	6	50	10	4,5	5,5	4,5
Production annuelle thermique (kWh/an)	28.880.100	25.992.090	12.274.043	12.274.043	25.992.090	17.328.060	17.328.060	17.328.060

Source d'énergie	GazResid	GazIndu	Eleclndu	ChalFat	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu
Puissance thermique chaufferie (kW)	15.611	5.198,4	3.387,56	3.387,56	5.198	4.839	4.839	4.839
Puissance électrique (kW)	/	3.137,0	/		/	/	/	/
Technologie secondaire		Chaudière d'appoint centrale au biogaz	Chaudière d'appoint centrale au biogaz	Chaudière d'appoint centrale au biogaz	Aérothermie haute température (PAC)	Aérothermie (PAC)	Aérothermie (PAC)	Aérothermie (PAC)
Couverture		10%	15%	15%	10%	40%	40%	40%
Durée de vie		20	20	20	20	15	15	15
Reinvest		100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Capex unitaire (EUR/kW)		110	110	110	598,4	432	432	432
Subside Investissement (% CAPEX)		15%	15%	15%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)		3	3	3	10,2	10,2	10,2	10,2
Rendement thermique saisonnier sur PCS (%)		95%	95%	95%	/	/	/	/
Coefficient de performance (chaud ou froid)		/	/	/	4,5	4,5	4,5	4,5
Production annuelle thermique (kWh/an)		2.888.010	2.166.008	2.166.008	2.888.010	11.552.040	11.552.040	11.552.040
Source d'énergie		Biogaz	Biogaz	Biogaz	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu
Puissance thermique chaufferie (kW)		4.480	3.388	3.388	4.480	6.775	6.775	6.775
Réseau	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Couverture		30%	15%	15%	30%	30%	30%	30%
Durée de vie (ans)		40	40	40	40	40	40	40
Longueur du réseau (m)		13.139	6.570	6.570	13.139	13.139	13.139	13.139

CAPEX réseau (EUR/m)		1.934	1.729	1.729	1.934	2.113	2.113	2.113
CAPEX sourcing (EUR)		0	0	0	32.230.192	9.678.736	4.355.431	1.935.747
CAPEX piquage/raccordement (%CAPEX)		20%	20%	20%	20%	30%	30%	30%
Subside sourcing (% CAPEX)		0%	20%	20%	18%	15%	15%	10%
OPEX (€/MWh)		5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Pertes de distribution (%)		15%	15%	15%	15%	8%	8%	8%

Tableau 10 : Paramètres technico-financiers du profil 1

2. Profil 2 - Parc d'immeubles résidentiels

2.1. Couverture énergétique

La couverture en énergie de la demande en chaleur du profil 2 est reprise dans le Tableau 11 et la justification de cette dernière par scénario est la suivante :

- SB2 : 58% PAC aérothermique / 42% chaudières à condensation → Couverture fixée d'après le nombre de logements résidentiels dont le vecteur énergétique principal est le gaz naturel (voir bilans énergétiques de la Wallonie).
- SA2.1 : 100% chaudière biomasse (en cascade) → Couverture possible lorsque la puissance installée est conséquente et que les besoins estivaux sont minimes.
- SA2.2 : 85% récupération de chaleur fatale → Voir justification profil 1.
- SA2.3 : 60% géothermie peu profonde → Voir justification profil 1.

Profils et scénarios				
Couverture par technologie détaillée par scénario de chaque profil de consommation	Solution individuelle		Solution collective - RET	
	Technologie 1	Technologie 2	Technologie principale	Technologie d'appoint/ backup
Profil 2 – Parc d'immeubles résidentiels				
SB2 - Source de chauffage par bâtiment	58% PAC aérothermique	42% Chaudière à condensation	/	/
SA2.1 – Chaudières biomasse solide reliées à un RET	/	/	100% Chaudière biomasse solide	
SA2.2 – Chaleur fatale distribuée par RET et chaudière d'appoint centrale au biogaz (back-up)	/	/	85% Récupération de chaleur fatale	15% Chaudière d'appoint biogaz
SA2.3.1 – Installations géothermiques peu profondes fermées reliées à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	/	60% Géothermie peu profonde fermée	40% PAC aérothermique
SA2.3.2 – Installations géothermiques peu profondes ouvertes reliées à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	/	60% Géothermie peu profonde ouverte	40% PAC aérothermique

Tableau 11 : Couverture énergétique des scénarios du profil 2

2.2. Paramètres technico-financiers

Le Tableau 12 reprend l'ensemble des paramètres technico-financiers pour les scénarios du profil 2. Quelques détails restent à être précisés :

- Le profil 2 ne se concentre que sur des immeubles résidentiels dès lors, pour les CAPEX de tous les scénarios correspondent toujours à la valeur des grands consommateurs (voir Tableau 1) puisque l'installation est centralisée et donc bien supérieure à 50 kW.
- Le choix du vecteur énergétique et plus précisément de son caractère résidentiel ou industriel dépend des consommateurs. Dans ce cas, la solution individuelle concerne des clients résidentiels dès lors, le tarif résidentiel est appliqué. Dans les cas d'un RET (solutions alternatives) par contre, l'achat d'énergie est groupé, le tarif industriel est donc appliqué.
- La longueur du réseau est obtenue en divisant la demande totale couverte par la densité linéique d'un projet du même type (quartier d'immeubles résidentiels).
- Les clients étant résidentiels, la valeur retenue correspond aux OPEX des petits consommateurs (voir Tableau 5).

	Scénario de base (SB2)	Scénario alternatif (SA 2.1)	Scénario alternatif (SA 2.2)		Scénario alternatif (SA 2.3.1)	Scénario alternatif (SA 2.3.2)
Description générale du scénario	Source de chauffage individuelle	RET Chaudière biomasse solide + chaudière d'appoint/back-up biogaz	RET avec récupération de chaleur fatale + chaudière appoint/back-up au biogaz		RET Géothermie peu profonde fermée + appoint/back-up PAC aérothermique	RET Géothermie peu profonde ouverte + appoint/back-up PAC aérothermique
Couverture communale	100%	100%	50%	50%	100%	100%
Technologie primaire	Aérothermie (PAC)	Chaudière biomasse	Chaleur fatale (PAC)	Chaleur fatale (échangeur)	Géothermie fermée peu profonde (PAC)	Géothermie ouverte peu profonde (PAC)
Couverture	58%	100%	85%	85%	60%	60%
Durée de vie	15	20	15	20	15	15
Réinvest	100%	100%	100%	100%	100%	100%
CAPEX unitaire (EUR/kWth)	432	400	338	100	338	338
Subside Investissement (% CAPEX)	0%	0%	20%	20%	0%	0%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)	10,2	7	8	3,75	8	16
Rendement thermique (%)	/	85%	/	/	/	/
Rendement électrique (%)	/	/	/	/	/	/
Coefficient de performance (chaud)	2,9	/	6	50	4,5	5,5
Production annuelle thermique (kWh/an)	3.339.315,2	5.757.440	2.446.912	2.446.912	3.454.464	3.454.464
Source d'énergie	ElecResid	BiomasseIndu	ElecIndu	ChalFat	ElecIndu	ElecIndu
Puissance thermique chaufferie (kW)	1.805	1.929,52	675,33	675,33	965	965

Puissance électrique (kW)	/	/	/	/	/	/
Technologie secondaire	Chaudière à condensation		Chaudière d'appoint centrale au biogaz	Chaudière d'appoint centrale au biogaz	Aérothermie (PAC)	Aérothermie (PAC)
Couverture	42%		15%	15%	40%	40%
Durée de vie	20		20	20	15	15
Reinvest	100%		100%	100%	100%	100%
Capex unitaire (EUR/kW)	110		110	110	432	432
Subside Investissement (% CAPEX)	0%		0%	0%	0%	0%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)	3		3	3	10,2	10,2
Rendement thermique saisonnier sur PCS (%)	90%		95%	95%	/	/
Coefficient de performance (chaud ou froid)	/		/	/	4,5	4,5
Production annuelle thermique (kWh/an)	2.418.125		431.808	431.808	2.302.976	2.302.976
Source d'énergie	GazResid		Biogaz	Biogaz	ElecIndu	ElecIndu
Puissance thermique chaufferie (kW)	1.307		675	675	1.351	1.351
Réseau	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Couverture		100%	50%	50%	100%	100%
Durée de vie (ans)		40	40	40	40	40
Longueur du réseau (m)		963	481	481	963	963
CAPEX réseau (EUR/m)		1.038	1.038	1.038	1.191	1.191
CAPEX sourcing (EUR)		0	0	0	1.929.520	868.284

CAPEX piquage/raccordement (%CAPEX)		20%	20%	20%	30%	30%
Subside sourcing (% CAPEX)		0%	20%	20%	0%	0%
OPEX (€/MWh)		6,4	6,4	6,4	6,4	6,4
Pertes de distribution (%)		15%	15%	15%	8%	8%

Tableau 12 : Paramètres technico-financiers du profil 2

3. Profil 3 - Site industriel

3.1. Couverture énergétique

La couverture en énergie de la demande en chaleur du profil 3 est reprise dans le Tableau 13 et la justification de cette dernière par scénario est la suivante :

- SB3 : 100% chaudières à condensation → Couverture fixée afin d’assurer divers besoins en température éventuellement nécessaires pour des procédés industriels. Les PAC aérothermiques sont dans ce cas moins cohérentes.
- SA3.1-SA3.2 : 90% cogénération → Voir justification profil 1.
- SA3.3 : 85% récupération de chaleur fatale → Voir justification profil 1.

Profils et scénarios			
Couverture par technologie détaillée par scénario de chaque profil de consommation	Solution individuelle	Solution collective - RET	
	Technologie 1	Technologie principale	Technologie d'appoint/ backup
Profil 3 – Site industriel			
SB3 – Source de chauffage décentralisée par bâtiment	100% Chaudière à condensation	/	/
SA3.1 - Cogénération gaz reliée à un RET et chaudière d'appoint centrale au biogaz (back-up)	/	90% Cogénération au gaz	10% Chaudière d'appoint biogaz
SA3.2 – Cogénération biomasse solide reliée à un RET et chaudière d'appoint centrale au biogaz (back-up)	/	90% Cogénération biomasse solide	10% Chaudière d'appoint biogaz
SA3.3 - Chaleur fatale industrielle distribuée par RET et chaudière d'appoint centrale au biogaz (back-up)	/	85% Récupération de chaleur fatale	15% Chaudière d'appoint biogaz

Tableau 13 : Couverture énergétique des scénarios du profil 3

3.2. Paramètres technico-financiers

Le Tableau 14 reprend l’ensemble des paramètres technico-financiers pour les scénarios du profil 3. Quelques détails restent à être précisés :

- Le profil 3 ne se concentre que sur des consommateurs industriels dès lors, pour les CAPEX de tous les scénarios correspondent toujours à la valeur des grands consommateurs (voir Tableau 1).
- Concernant, le choix du vecteur énergétique, dans ce cas, la solution individuelle concerne des clients industriels dès lors, le tarif industriel est appliqué pour tous les scénarios.
- La longueur du réseau est obtenue en divisant la demande totale couverte par la densité linéique d’un projet du même type (zoning industriels).

Les clients étant industriels, la valeur retenue correspond aux OPEX des grands consommateurs (voir Tableau 5).

	Scénario de base (SB3)	Scénario alternatif (SA 3.1)	Scénario alternatif (SA 3.2)	Scénario alternatif (SA 3.3)	
Description générale du scénario	Source de chauffage individuelle	RET Cogénération au gaz + chaudière appoint/back-up au biogaz	RET Cogénération biomasse solide + chaudière d'appoint/back-up biogaz	RET avec récupération de chaleur fatale + chaudière appoint/back-up au biogaz	
Couverture communale	100%	100%	100%	50%	50%
Technologie primaire	Chaudière à condensation	Cogénération gaz naturel	Cogénération biomasse	Chaleur fatale (PAC)	Chaleur fatale (échangeur)
Couverture	100%	90%	90%	85%	85%
Durée de vie	20	15	15	15	20
Réinvest	100%	100%	100%	100%	100%
CAPEX unitaire (EUR/kWth)	110	2240	7.000	338	100
Subside Investissement (% CAPEX)	0%	0%	0%	0%20%	20%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)	3	86,4	86,4	8	3,75
Rendement thermique (%)	90%	58%	50%	/	/
Rendement électrique (%)	/	35%	20%	/	/
Coefficient de performance (chaud)	/	/	/	6	50
Production annuelle thermique (kWh/an)	15.000.000	13.500.000	13.500.000	6.375.000	6.375.000
Source d'énergie	GazIndu	GazIndu	BiomasseIndu	ElecIndu	ChalFat
Puissance thermique chaufferie (kW)	8.108	2.700	2.700,00	1.759,46	1.759,46
Puissance électrique (kW)	/	/	/	/	

Technologie secondaire		Chaudière d'appoint centrale au biogaz			
Couverture		10%	10%	15%	15%
Durée de vie		20	20	20	20
Reinvest		100%	100%	100%	100%
Capex unitaire (EUR/kW)		110	110	110	110
Subside Investissement (% CAPEX)		0%	0%	0%	0%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)		3	3	3	3
Rendement thermique saisonnier sur PCS (%)		95%	95%	95%	95%
Coefficient de performance (chaud ou froid)		/	/	/	/
Production annuelle thermique (kWh/an)		1.500.000	1.500.000	1.125.000	1.125.000
Source d'énergie		Biogaz	Biogaz	Biogaz	Biogaz
Puissance thermique chaufferie (kW)		2.327	2.327	1.759	1.759
Réseau	NON	OUI	OUI	OUI	OUI
Couverture		100%	100%	50%	50%
Durée de vie (ans)		40	40	40	40
Longueur du réseau (m)		3.659	3.659	1.829	1.829
CAPEX réseau (EUR/m)		1.642	1.642	1.408	1.408
CAPEX sourcing (EUR)		0	0	0	0

CAPEX piquage/raccordement (%CAPEX)		20%	20%	20%	20%
Subside sourcing (% CAPEX)		0%	0%	20%	20%
OPEX (€/MWh)		2,4	2,4	2,4	2,4
Pertes de distribution (%)		15%	15%	15%	15%

Tableau 14 : Paramètres technico-financiers du profil 3

4. Profil 4 - Nouveau quartier

4.1. Couverture énergétique

La couverture en énergie de la demande en chaleur du profil 4 est reprise dans le Tableau 15 et la justification de cette dernière par scénario est la suivante :

- SB4 : 100% PAC aérothermiques → Couverture fixée en partant du principe que tout nouveau quartier doit être 100% décarboné.
- SA4.1 : 90% cogénération → Voir justification profil 1.
- SA4.2 : 90% chaudière biomasse → Couverture choisie pour couvrir un maximum des besoins hivernaux via la chaudière biomasse tout en maintenant un nombre d'heures de fonctionnement viable .
- SA4.3 : 90% géothermie profonde → Voir justification profil 1.
- SA4.4-5 : 60% géothermie peu profonde/aquathermie → Voir justification profil 1.

Profils et scénarios			
Couverture par technologie détaillée par scénario de chaque profil de consommation	Solution individuelle	Solution collective - RET	
	Technologie 1	Technologie principale	Technologie d'appoint/backup
Profil 4 - Nouveaux quartiers			
SB4 – Pompes à chaleur aérothermiques	100% PAC aérothermique	/	/
SA4.1 – Cogénération biogaz reliée à un RET et chaudière d'appoint centrale au biogaz (back-up)	/	90% Cogénération biogaz	10% Chaudière d'appoint biogaz
SA4.2 – Chaufferie biomasse solide reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	90% Chaudière biomasse solide	10% PAC aérothermique haute température
SA4.3 – Installations géothermiques profondes reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	90% Géothermie profonde	10% PAC aérothermique haute température
SA4.4.1 – Installations géothermiques peu profondes fermées reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	60% Géothermie peu profonde fermée	40% PAC aérothermique
SA4.4.2 – Installations géothermiques peu profondes ouverte reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	60% Géothermie peu profonde ouverte	40% PAC aérothermique
SA4.5 – Installations aquathermiques reliée à un RET et pompe à chaleur aérothermique (back-up)	/	60% Aquathermie	40% PAC aérothermique

Tableau 15 : Couverture énergétique des scénarios du profil 4

4.2. Paramètres technico-financiers

Le Tableau 16 reprend l'ensemble des paramètres technico-financiers pour les scénarios du profil 4. Quelques détails restent à être précisés :

- Le profil 4 ne se concentre que sur des nouveaux quartiers résidentiels (avec possibilité de tertiaires) dès lors, pour le SB4 le CAPEX est une moyenne entre la valeur des petits et des moyens (voir Tableau 1). Les CAPEX des scénarios alternatifs correspondent toujours à la valeur des grands consommateurs puisque l'installation est centralisée et donc bien supérieure à 50 kW.
- Le choix du vecteur énergétique et plus précisément de son caractère résidentiel ou industriel dépend des consommateurs. Dans ce cas, la solution individuelle concerne des clients résidentiels (voire tertiaires) dès lors, le tarif résidentiel est appliqué. Dans les cas d'un RET (solutions alternatives) par contre, l'achat d'énergie est groupé, le tarif industriel est donc appliqué.
- La longueur du réseau est égale à celle du quartier "Bella Vita" servant d'exemple pour ce profil ([Veolia, s. d.](#)).
- Les clients étant résidentiels et tertiaires, la valeur en OPEX est la moyenne des OPEX des petits et moyens consommateurs (voir Tableau 5).

	Scénario de base (SB4)	Scénario alternatif (SA 4.1)	Scénario alternatif (SA 4.2)	Scénario alternatif (SA 4.3)	Scénario alternatif (SA 4.4.1)	Scénario alternatif (SA 4.4.2)	Scénario alternatif (SA 4.5)
Description générale du scénario	Source de chauffage individuelle	RET Cogénération au biogaz + chaudière appoint/back-up au biogaz	RET Chaudière biomasse solide + chaudière d'appoint/back-up biogaz	RET Géothermie profonde + appoint/back-up PAC aérothermique haute température	RET Géothermie peu profonde fermée + appoint/back-up PAC aérothermique	RET Géothermie peu profonde ouverte + appoint/back-up PAC aérothermique	RET Aquathermie + appoint/back-up PAC aérothermique
Couverture communale	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Technologie primaire	Aérothermie (PAC)	Cogénération biogaz	Chaudière biomasse	Géothermie profonde (échangeur de chaleur)	Géothermie fermée peu profonde (PAC)	Géothermie ouverte peu profonde (PAC)	Aquathermie (PAC)
Couverture	100%	90%	90%	90%	60%	60%	60%
Durée de vie	15	15	20	20	15	15	15
Réinvest	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
CAPEX unitaire (EUR/kWth)	1.037,5	2.240	400	100	338	338	338
Subside Investissement (% CAPEX)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)	23,85	86,4	7	3,75	8	16	8
Rendement thermique (%)	/	58%	85%	/	/	/	/
Rendement électrique (%)	/	35%		/	/	/	/
Coefficient de performance (chaud)	2,9	/	/	10	4,5	5,5	4,5
Production annuelle thermique (kWh/an)	4.217.000	3.795.300	3.795.300	3.795.300	2.530.200	2.530.200	2.530.200
Source d'énergie	ElecResid	Biogaz	BiomasseIndu	ElecIndu	ElecIndu	ElecIndu	ElecIndu

Puissance thermique chaufferie (kW)	2.279	759,1	1265,1	759	707	707	707
Puissance électrique (kW)	/	458,1		/	/	/	/
Technologie secondaire		Chaudière d'appoint centrale au biogaz	Aérothermie haute température (PAC)	Aérothermie haute température (PAC)	Aérothermie (PAC)	Aérothermie (PAC)	Aérothermie (PAC)
Couverture		10%	10%	10%	40%	40%	40%
Durée de vie		20	20	20	15	15	15
Reinvest		100%	100%	100%	100%	100%	100%
Capex unitaire (EUR/kW)		110	598,4	598,4	432	432	432
Subside Investissement (% CAPEX)		0%	0%	0%	0%	0%	0%
OPEX (maintenance chaufferie) (EUR/kWth)		3	10,2	10,2	10,2	10,2	10,2
Rendement thermique saisonnier sur PCS (%)		95%	/	/	/	/	/
Coefficient de performance (chaud ou froid)		/	/	4,5	4,5	4,5	4,5
Production annuelle thermique (kWh/an)		421.700	421.700	421.700	1.686.800	1.686.800	1.686.800
Source d'énergie		Biogaz	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu	Eleclndu
Puissance thermique chaufferie (kW)		654	148	654	989	989	989
Réseau	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI
Couverture		100%	100%	100%	100%	100%	100%
Durée de vie (ans)		40	40	40	40	40	40
Longueur du réseau (m)		6.000	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
CAPEX réseau (EUR/m)		1.038	1.038	1.038	1.038	1.038	1.038

CAPEX sourcing (EUR)		0	0	4.706.172	1.413.265	635.969	282.653
CAPEX piquage/raccordement (%CAPEX)		20%	20%	20%	30%	30%	30%
Subside sourcing (% CAPEX)		0%	0%	0%	0%	0%	0%
OPEX (€/MWh)		5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Pertes de distribution (%)		15%	15%	15%	8%	8%	8%

Tableau 16 : Paramètres technico-financiers du profil 4

Analyse coûts-avantages

L'analyse effectuée dans cette étude se déroule en plusieurs étapes détaillées dans les sections ci-dessous. Elle est effectuée à l'aide d'un code python en annexe. Dès lors, des références vers ce code seront utilisées tout au long de ce chapitre, elles seront reconnaissables grâce à leur `police` spécifique.

La première étape se concentre sur l'analyse économique c'est-à-dire la comparaison des valeurs actualisées et annualisées nettes des scénarios ainsi que de chaque composante de coût et de leurs coûts cumulés dans le temps.

Ensuite, vient une analyse de sensibilité dans laquelle les CAPEX, OPEX, coût et inflation de l'énergie varient indépendamment les uns des autres.

Enfin, une analyse environnementale clôture le chapitre en se concentrant sur les émissions de CO₂ et l'ajout d'un coût à ce facteur.

1. Analyse économique

La méthode utilisée pour cette analyse est la suivante. Les coûts sont divisés en plusieurs composantes. La valeur de chacune de ces composantes est calculée sur toute la durée de vie de l'analyse puis actualisée et annualisée. Le détail du calcul des composantes se trouve ci-après.

1.1. Composantes de coûts

CAPEX chaufferie

La formule pour calculer le CAPEX de la chaufferie pour toutes les technologies se trouve dans la fonction `capex()` du fichier `Fonction.py`⁶. Elle s'exprime comme suit :

$$CAPEX [\text{€}] = CAPEX_{Puiss}[\text{€/kW}] * Puiss [kW] * (1 + inflation_{CAPEX})^{année 7}$$

La subtilité à prendre en compte pour le calcul du CAPEX est celle du réinvestissement. Ce pourcentage doit être pris en compte lorsque la fin de vie de la technologie est atteinte. De ce cas-ci, le réinvestissement est de 100%, il n'y a donc que le facteur d'inflation qui impacte le CAPEX. Enfin, il faut également prévoir la gestion de la fin de la durée de l'analyse qui ne coïncide potentiellement pas avec la fin de la durée de vie de la technologie, dans ce cas, une partie du CAPEX est soustraite au réinvestissement.

CAPEX réseau

La formule pour calculer le CAPEX du réseau se trouve dans la fonction `capex_reseau()` du fichier `Fonction.py`. Elle s'exprime comme suit :

⁶ Toutes les fonctions se trouvent dans ce document.

⁷ Dans ce cas-ci le paramètre `année` est soit égal à 0 soit à l'année correspondant au réinvestissement du CAPEX.

$$CAPEX_{\text{Réseau\&Sourcing}} [\text{€}] = CAPEX_m [\text{€/m}] * Longueur_{\text{réseau}} [m] + CAPEX_{\text{sourcing}} [\text{€}]$$

$$CAPEX [\text{€}] = (1 + \%_{\text{piquage\&raccordement}}) * CAPEX_{\text{Réseau\&Sourcing}} [\text{€}]$$

Ce CAPEX n'est calculé qu'une fois lors de la première année étant donné que la durée de l'analyse est égale au temps de vie du réseau.

CAPEX total

Le CAPEX total est la somme des deux CAPEX, à savoir que le CAPEX chaufferie sera calculé autant de fois que de technologies. Une composante étude AMUREBA vient s'ajouter à ce CAPEX, il s'agit simplement de l'addition de la valeur comprise dans le Tableau 8.

Non-energy OPEX⁸ chaufferie

Les OPEX de maintenance de la chaufferie se calculent comme le CAPEX de la chaufferie. La formule se trouve dans la fonction `opex_maintenance_chaufferie()` du fichier `Fonction.py`. Elle s'exprime comme suit :

$$OPEX_{\text{NonEn}} [\text{€}] = OPEX_{\text{Puiss}} [\text{€/kW}] * Puiss [kW] * (1 + inflation_{\text{OPEX}})^{\text{année}}$$

Non-energy OPEX réseau

Les OPEX de supervision et de gestion dépendent de la consommation dès lors la formule, qui se trouve dans la fonction `opex_supervision()` du fichier `Fonction.py`, s'exprime comme suit :

$$OPEX_{\text{NonEn}} [\text{€}] = OPEX_{\text{Puiss}} [\text{€/kW}] * Puiss [kW] * (1 + inflation_{\text{OPEX}})^{\text{année}}$$

Energy OPEX (combustibles & électricité)

Les OPEX concernant l'énergie varie en fonction du type de système (individuel ou RET). Il n'y a pas de distinction entre la manière de calculer les OPEX combustibles et les OPEX électricité. La formule se trouve dans la fonction `energy_opex()` du fichier `Fonction.py` et s'exprime comme suit :

Si solution individuelle :

$$Energie_{\text{finale}} [kWh/an] = Energie_{\text{consom}} [kWh/an] / Efficacité_{\text{COP-Rend}}$$

Si RET :

$$Energie_{\text{finale}} [kWh/an] = (Energie_{\text{consom}} [kWh/an] / (1 - pertes[\%])) / Efficacité_{\text{COP-Rend}}^9$$

$$OPEX_{\text{En}} [\text{€}] = Energie_{\text{finale}} [kWh/an] * Coût_{\text{En}} [\text{€/kWh}] * (1 + inflation_{\text{En}})^{\text{année}}$$

Charges financières

Les charges financières qui traduisent, les coûts liés aux intérêts de remboursement d'un emprunt (dans ce cas-ci, lié au remboursement du CAPEX) se calculent comme suit :

⁸ Le terme "Non-energy OPEX" désigne des OPEX qui ne sont pas liés à l'achat ou à la revente d'énergie, il comprend donc la maintenance, la supervision, la gestion clients etc.

⁹ D'autres formules font référence à l'énergie finale ultérieurement. Cette dernière est toujours calculée de la même manière.

- Premièrement, la dotation aux amortissements est calculée via la formule suivante qui se trouve dans la fonction `dotation()` du fichier `Fonction.py`

Pour toute année où le CAPEX est non nul :

$$Dotation [\text{€/an}] = -CAPEX_{technologie} [\text{€}] / DureeDeVie_{technologie} [an]$$

Pour les autres années :

$$Dotation [\text{€/an}] = Dotation_{anneePrecedente} [\text{€/an}]$$

- Ensuite, des intérêts d'emprunt (i.e. charges financières) sont pris sur le CAPEX restant une fois que la valeur de la dotation a été soustraite. Ces derniers se trouvent directement dans le code de l'analyse et se calculent comme suit

Pour toute année où le CAPEX est non nul :

$$CAPEX_{restant} [\text{€}] = CAPEX_{annee} [\text{€}] + Dotation_{annee} [\text{€}]$$

$$ChargesFinancieres [\text{€}] = CAPEX_{restant} * \text{taux actuariel}$$

Pour les autres années :

$$CAPEX_{restant} [\text{€}] = CAPEX_{restant-anneePrecedente} [\text{€}] + Dotation_{annee} [\text{€}]$$

$$ChargesFinancieres [\text{€}] = CAPEX_{restant} * \text{taux actuariel}$$

Revente d'électricité

Les installations de cogénération produisent également de l'électricité. Etant donnée que les besoins en électricité des scénarios ne sont pas compris dans le cadre de cette étude, toute l'électricité produite est ensuite revendue. Il est à noter qu'il serait bénéfique pour les scénarios cogénération de pratiquer l'autoconsommation puisque le prix de revente de l'électricité est inférieur à son prix d'achat. La formule pour calculer les gains dus à la revente d'électricité se trouve dans la fonction `revente_elec()` du fichier `Fonction.py` et s'exprime comme suit :

$$Vente_{elec} [\text{€}] = Energie_{finale} [kWh/an] * Rend_{El} * Tarif_{venteEl} [\text{€/kWh}] * (1 + inflation_{En})^{annee}$$

Subsides - Vente de certificats verts

Les installations produisant de l'électricité verte peuvent bénéficier d'un certain nombre de certificats verts pendant 10 ans ([SPW Energie, 2020](#)) en fonction de la quantité d'électricité produite et des émissions de CO₂ associées. La formule pour calculer les gains dus à la revente de CV se trouve dans la fonction `certificat_vert()` du fichier `Fonction.py` et s'exprime comme suit :

$$Vente_{CV} [\text{€}] = (Energie_{finale} [MWh/an] * Rend_{El} * Coeff_{CV}) [CV] * Tarif_{venteCV} [\text{€/CV}]$$

Subsides - Aides UDE & Etudes AMUREBA

Les aides UDE se traduisent en pourcentage de CAPEX. Elles s'appliquent au CAPEX de la chaufferie et à celui du sourcing. La formule pour calculer leur montant est directe puisqu'il s'agit de prendre un pourcentage du CAPEX les années où un investissement est fait.

Le calcul des subsides octroyés pour les études AMUREBA est également direct. Il s'agit d'ajouter le montant défini dans le Tableau 8 au montant disponible à l'année 0.

1.2. Valeur actualisée et annualisée des coûts nets

Une fois chaque composante calculée pour toute la durée de l'analyse, leur VAACN est calculée via la formule suivante qui se trouve dans la fonction `van()` du fichier `Fonction.py` :

$$VAACN [\text{€}/\text{an}] = \left[\sum_i \frac{\text{composante}_i [\text{€}]}{(1 + \text{taux actuariel})^{\text{année}}} \right] / \text{dureeAnalyse} [\text{an}]$$

1.3. Résultats analyse économique

Les résultats et graphiques de l'analyse économique sont générés dans le fichier `AnalyseCoutsBenef.py`.

2. Analyse de sensibilité

L'objectif de l'analyse de sensibilité est de faire varier un à un certains paramètres afin de quantifier leur impact et d'analyser les comportement des scénarios alternatifs par rapport au scénarios de base.

Les résultats et graphiques de l'analyse de sensibilité sont générés dans plusieurs fichiers en fonction du paramètre qui varie :

- La sensibilité sur les CAPEX et OPEX se trouve dans le fichier `SensibiliteCAPEXOPEX.py`
- La sensibilité sur les prix de l'énergie se trouve dans le fichier `SensibilitePrixEnergie.py`
- La sensibilité sur l'augmentation des prix de l'énergie se trouve dans le fichier `SensibiliteAugPrixEnergie.py`

3. Analyse environnementale

La première étape de l'analyse environnementale est de calculer les émissions de CO₂ de chaque scénario. Les émissions sont décomposées en 3 composantes : électricité, combustibles et cogénération. Les deux premières composantes couvrent tout ce qui est émis par les vecteurs énergétiques tandis que la troisième contient ce qui peut être évité via la production d'électricité des cogénérations. La formule pour les émissions se trouve dans la fonction `emission_co2()` du fichier `Fonction.py` et s'exprime comme suit :

$$Emissions_{CO_2} [\text{grCO}_2/\text{an}] = \text{Energie}_{finale} [\text{kWh}/\text{an}] * \text{facteur}_{emissions} [\text{grCO}_2/\text{kWh}]$$

Ensuite, une analyse de sensibilité est effectuée concernant l'ajout d'un coût CO₂ et de sa valeur. Les résultats et graphiques de cette analyse sont générés dans le fichier `SensibiliteCoutCO2.py`.

Bibliographie

- ADEME. (s. d.). *Facteur d'émission / Indicateur GES*. https://base-empreinte.ademe.fr/donnees/jeu-donnees?state=aU43S2pocVJ3TIZPV0QyZ0I3c0pVbHhQMvPndUI0LUpZZGIhVEZ0dkJoTWhV&session_state=3d550d2e-5799-465a-92fa-232656c539aa&iss=https:%2F%2Fmoncompte.ademe.fr%2Fauth%2Frealms%2Fmaster&code=8767f2c5-e2d2-477b-8ec9-4174b9043745.3d550d2e-5799-465a-92fa-232656c539aa.e8e7e1ec-ca0a-42ac-bf39-2abdf82b7fb2
- ADEME. (2016). *Coûts des énergies renouvelables en France (p. 40)*. https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/01/couts_energies_renouvelables_en_france_edition2016v1.pdf
- AwAC. (s. d.). *Les facteurs d'émissions*. https://awac.be/wp-content/uploads/2022/12/Fuel-Conversion-Factors_AwAC_2020.pdf
- Bruxelles-Environnement. (2024). *Evaluation complète en matière de chaleur et de froid pour la Région de Bruxelles-Capitale*. https://document.environnement.brussels/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=13573&seule=1
- Clade. (2024). *CO2 Heat pump for heating and hot water*. <https://clade-es.com/assets/2024/04/Clade-Maple-Range-Apr24v2.pdf>
- Energie Commune. (2024). *Prix de l'énergie*. <https://energiecommune.be/statistique/prix-energie/>
- eurostat. (2023). *Statistiques de l'énergie—Prix*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/envir?lang=fr&subtheme=nrg.nrg_price&display=list&sort=category
- Iweeps. (2022). *Part des ménages utilisant le réseau de gaz*. WalStat. https://walstat.iweeps.be/walstat-catalogue.php?indicateur_id=813000&ordre=2
- Mon énergie verte. (2024). *Tarif d'injection électricité : Wallonie, Bruxelles, Flandre*. <https://www.mon-energie-verte.be/panneaux-solaires/tarif-injection>
- SPW Energie. (2020). *Quelle est la durée d'octroi de mes certificats verts?* <https://energie.wallonie.be/fr/quelle-est-la-duree-d-octroi-de-mes-certificats-verts.html?IDC=9826&IDD=135547>

SPW Energie. (2024). *A qui vendre mes certificats verts*. <https://energie.wallonie.be/fr/a-qui-vendre-mes-certificats-verts.html?IDC=9785&IDD=135557#:~:text=Ces%20certificats%20verts%2C%20une%20fois,minimum%20garanti%20de%2065€>

UE. (2012). *Traité sur le fonctionnement de l'Union européenne (p. l'article 107, 3, a))*. *Journal officiel de l'Union européenne*. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:12012E/TXT:fr:PDF>

Veolia. (s. d.). *Bella vita : Un éco-quartier alimenté par la biomasse*. <https://www.veolia.be/fr/business-cases/bella-vita-eco-quartier-alimente-biomasse-:~:text=Au total, plus de 80,naturel ont également été installées.>

Zehnder. 2004. *Efficient air-water heat pumps for high temperature lift residential heating, including oil migration aspects*. <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-2998>