



**NOTE**  
DOSSIER 19066.001  
NUMÉRO 003

# ÉTUDE DE FAISABILITÉ ÉNERGIE ALTERNATIVE

## Projet

19066.001 Poste avancé DELTA

## Emplacement

1050 Elsene/Ixelles, Boulevard du Triomphe 155

## Maître d'ouvrage

Beliris

**Ingenium nv**  
Nieuwe Sint-Annadreef 23  
8200 Brugge  
+32(0)50 40 45 30 T  
info@ingenium.be E  
www.ingenium.be W

v1	2020-04-09	JME	Base
v2	2020-05-06	JME	Remarques du maître d'ouvrage
v3	2020-07-08	JME	Ajustement de la demande de refroidissement
v4	2020-08-12	extern	Traduction FR
	2020-07-08	Koen van Canneyt	Contrôle qualité

# SOMMAIRE

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>2</b>
<b>1 SYNTHÈSE DE DIRECTION</b> .....	<b>3</b>
1.1 CONCLUSION.....	4
<b>2 INTRODUCTION</b> .....	<b>5</b>
2.1 CADRE LÉGAL.....	5
2.2 DESCRIPTION DU PROJET .....	5
2.3 TECHNIQUES À EXAMINER .....	6
2.4 PRIX DE L'ÉNERGIE, FACTEURS D'ÉMISSION ET PRIMES .....	6
<b>3 TECHNIQUES À EXAMINER</b> .....	<b>8</b>
3.1 CHAUFFAGE OU REFROIDISSEMENT URBAINS .....	8
3.2 COGÉNÉRATION.....	8
3.3 POMPE À CHALEUR (PAS OBLIGATOIRE).....	8
3.4 PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES.....	9
<b>4 ÉTUDE DE FAISABILITÉ</b> .....	<b>10</b>
4.1 RÉSULTATS.....	10
4.1.1 COGÉNÉRATION .....	10
4.1.2 POMPE À CHALEUR AIR/EAU.....	12
4.1.3 POMPE À CHALEUR SOL/EAU (STOCKAGE GÉOTHERMIQUE ) .....	13
4.1.4 PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES .....	14
4.1.5 APERÇU DE LA RENTABILITÉ .....	17

# 1 SYNTHÈSE DE DIRECTION

Dans le cadre de l'Arrêté relatif à l'énergie du 19 novembre 2010, plusieurs techniques d'énergie renouvelable sont présentées dans cette note et examinées en termes de faisabilité. Le tableau ci-après donne un aperçu des résultats.

	Invst hors primes	Invst Primes incluses	Invsts (sppl) primes incl.	Frais d'entretien	Économie (Entretien compris)	Période d'amortissement	Réduction du CO <sub>2</sub>	Invst/Réduction du CO <sub>2</sub>
	€	€	€	€/an	€/an	an	kg/an	€ / kg CO <sub>2</sub>
Installation de la cogénération	80.100	80.100	77.000	1.900	10.300	9	6.400	12,0
Pompe à chaleur Air/eau	19.600	14.700	100	600	-2.500	>20	33.500	0,003
Pompe à chaleur sol/eau Stockage géothermique (chauffage et refroidissement)	211.000	158.250	143.650	1.650	-650	>20	37.100	3,9
Installation PV	25.200	25.200	25.200	400	5.800	5	9.200	2,7

**Tableau 1 Aperçu des résultats de l'étude de faisabilité**

L'aperçu révèle que des techniques comme une pompe à chaleur air/eau et une Pompe à chaleur sol/eau avec stockage géothermique ne sont pas rentables aux prix actuels du gaz et de l'électricité. Toutefois, l'aspect durabilité ne peut pas être oublié ; sur ce point, ces deux solutions obtiennent de très bons résultats. Ces techniques permettent de produire de la chaleur de manière neutre en CO<sub>2</sub>. La dernière colonne indique l'investissement par kilo de CO<sub>2</sub> évité, l'aune à laquelle la durabilité de l'investissement se mesure.

Sur la base des périodes d'amortissement, des frais d'investissement et de la durabilité susmentionnés, il est conseillé d'appliquer les techniques suivantes dans cet ordre de préférence :

1. Installation PV. Cette technique est la plus rentable. Cependant, la toiture doit être conçue de sorte à supporter le poids des panneaux solaires et de la structure portante. Pour parvenir à la rentabilité prévue, l'électricité produite doit être utilisée un maximum sur le site en lui-même.
2. Cogénération. L'installation de la cogénération est favorable d'un point de vue financier étant donné que cette technique permet de produire tant de la chaleur que de l'électricité. Comme pour les panneaux photovoltaïques, lors de la conception, il convient de veiller à ce qu'une quantité maximale de l'électricité produite soit consommée sur le site en lui-même. La cogénération est donc dans la balance avec une installation photovoltaïque étant donné que leur rendement est fortement lié à la possibilité de produire de l'électricité à charge de base. Cette technique est moins durable (combustion de gaz naturel fossile) par rapport aux autres techniques examinées dans cette étude, ce qui induit les frais d'investissement les plus élevés par kilo de CO<sub>2</sub> économisé. Pour cette raison, et compte tenu de la période d'amortissement plus courte, nous privilégions l'installation photovoltaïque à la cogénération.
3. Pompe à chaleur air/eau : Cette installation allie des frais d'investissement (supplémentaires) très limités à de bons résultats en matière de durabilité. Il convient de prévoir des systèmes d'émission à basses températures, comme un chauffage par le sol, en vue d'utiliser de manière efficace la chaleur. En outre, une chaudière à gaz est nécessaire en appoint. La pompe à chaleur doit cependant peut-être être maintenue en vue de satisfaire les exigences en matière de PEB. De plus, grâce à son cycle de fonctionnement réversible, elle peut également être utilisée pour le refroidissement lorsque le chauffage n'est pas nécessaire. La pompe à chaleur confère également au bâtiment un caractère « écologique ».
4. Pompe à chaleur sol/eau. Cette installation permet également de satisfaire (une partie) des besoins en chaleur et l'intégralité des besoins en refroidissement, mais avec un rendement supérieur à celui de la pompe à chaleur air/eau. Quoique le refroidissement passif soit très bon marché avec un échangeur thermique, la demande en refroidissement est cependant très basse. Néanmoins, en raison des frais d'investissement élevés et sans modèle d'amortissement, il n'est pas judicieux d'opter pour cette solution.

Les systèmes susmentionnés peuvent également être combinés (en partie), si tant est que leur dimensionnement ait été ajusté.

## 1.1 CONCLUSION

Le résultat le plus favorable qui tient compte des contraintes réelles, à savoir d'une part l'espace disponible, et d'autre part les paramètres évoqués dans cette étude (la rentabilité, les frais d'investissement, la compatibilité et la durabilité), est la combinaison suivante :

- Option 1 : Installation PV
- Option 3 : Pompe à chaleur air/eau.

## 2 INTRODUCTION

### 2.1 CADRE LÉGAL

Dans le Vade-mecum réglementation travaux PEB (juillet 2017) de Bruxelles Environnement, les dispositions pour la réalisation de l'étude de faisabilité des systèmes énergétiques alternatifs sont énumérées. À compter de 2015, une étude de faisabilité obligatoire est demandée pour les nouveaux bâtiments, peu importe leur surface au sol. Une étude de faisabilité intégrée devient une exigence lorsqu'une ou plusieurs nouvelles unités PEB ont ensemble une surface au sol de plus de 10.000 m<sup>2</sup>, ce qui n'est pas le cas ici.

L'Arrêté ministériel du 11 janvier 2008 précise les techniques qui doivent être examinées dans le cadre de l'étude de faisabilité, indépendamment de la fonction et de la taille du bâtiment. En outre, l'Arrêté ministériel prévoit également le formulaire en ligne dans lequel les résultats de l'étude de faisabilité doivent être rapportés. Les hypothèses et les paramètres économiques, les facteurs de conversion pour les émissions de CO<sub>2</sub> et les données climatologiques sont repris dans un arrêté ministériel du 24 juillet 2008.

Le but est principalement d'informer le maître d'ouvrage sur les techniques possibles, les subventions et la faisabilité des différents systèmes d'énergie alternative. Il est dans l'intérêt du maître d'ouvrage de procéder à l'étude pendant la phase de conception préalable pour que tous les résultats puissent être intégrés dans la conception définitive.

L'étude de faisabilité est d'application pour les bâtiments qui remplissent les caractéristiques suivantes :

- Le bâtiment concerne une ou plusieurs nouvelles unités PEB ;
- Le permis d'urbanisme a été demandé après le 31 janvier 2008 ;
- Le bâtiment ou les parties concernées sont chauffés afin d'assurer une température intérieure spécifique pour les personnes (pas les parkings par exemple).

### 2.2 DESCRIPTION DU PROJET

Le projet concerne une nouvelle caserne de pompiers à Ixelles. Le bâtiment principal (la caserne des pompiers) contient des bureaux et une salle de réunion, des chambres et des séjours, des salles de sport, des vestiaires, des locaux sanitaires, un garage pour quatre ambulances et une zone contaminée où les pompiers arrivent après leur mission. Le garage pour les véhicules d'incendie (garage SI) est rattaché et se trouve dans le volume protégé.

Bâtiment	type	fonction principale	surface au sol
			m <sup>2</sup>
A	Caserne des pompiers	Bureau	1811
B	Garage	Garage	333

Tableau 2 Aperçu construction site

Les besoins exacts en chaleur et en électricité ne sont pas connus dans la phase actuelle du projet. Dans la présente étude de faisabilité, nous effectuons une estimation sur la base du type de bâtiment.

Bâtiment A	Pic de demande	Consommation annuelle
	kW	MWh
<b>Demande en eau</b>	<b>156</b>	<b>350</b>
Chauffage des locaux	127	245
Eau chaude sanitaire	29	105
<b>Demande en refroidissement</b>	<b>6</b>	<b>4,4</b>
<b>Demande en électricité</b>	<b>124</b>	<b>145</b>

Tableau 3 Aperçu des données de consommation pour l'électricité et la chaleur

Les besoins en chaleur englobent tant le chauffage des locaux, le chauffage de l'eau chaude sanitaire que le chauffage de l'air de ventilation. Les grands consommateurs d'électricité sont la ventilation, les points de recharge, les machines à laver industrielles et les armoires de séchage

pour les combinaisons anti-feu.

## 2.3 TECHNIQUES À EXAMINER

Le tableau ci-après donne un aperçu des techniques à examiner en fonction de l'affectation du bâtiment et de la surface utile au sol, tel que décrit dans l'Arrêté ministériel.

Le bâtiment à l'examen correspond le mieux à un bureau pour son affectation principale.

Affectation principale	Surface utile au sol en m <sup>2</sup>	Chauffage ou refroidissement urbains	Cogénération	Pompe à chaleur pour le chauffage	Chaudière biomasse	Chauffe-eau solaire ou chauffe-eau thermodynamique	Panneaux solaires photovoltaïques
Habitation	<5000	x	x			x	x
	≥ 5000	x	x	x	x	x	x
Bureau	<5000	x	x				x
	≥ 5000	x	x	x	x		x
Enseignement	<5000	x	x				x
	≥ 5000	x	x	x	x		x
Industrie	<5000	x	x				x
	≥ 5000	x	x	x	x		x
Soins de santé	NA	x	x	x	x	x	x
Sport	NA	x	x	x	x	x	x
Commerce	< 3000	x	x				x
	≥ 3000	x	x	x	x		x
Bâtiment de réunion	< 3000	x	x				x
	≥ 3000	x	x	x	x		x
Horeca	Avec séjour	x	x	x	x	x	x
	Sans séjour et < 3000	x	x			x	x
	Sans séjour et ≥ 3000	x	x	x	x	x	x

Tableau 4 Aperçu des techniques à examiner

## 2.4 PRIX DE L'ÉNERGIE, FACTEURS D'ÉMISSION ET PRIMES

Les prix de l'énergie et les facteurs d'émission ci-après sont utilisés dans la présente étude de faisabilité. Les prix de l'énergie sont exprimés hors TVA et reposent sur la facture énergétique de bâtiments ayant une consommation énergétique similaire. Les facteurs d'émission sont conformes à l'Arrêté relatif à l'énergie.

Description	prix unitaire		facteur d'émission	
	EUR/MWh (HTVA)		kg/MWh	
Électricité	200		395	
Gaz naturel	40		217	

Tableau 5 Prix de l'énergie

L'exploitant de l'installation reçoit un certificat vert par 217 kg CO<sub>2</sub> économisés. Les quantités à économiser et la durée d'un certificat dépendent de la technique et de la taille de l'installation. Les coefficients de multiplication sont déterminés par Bruxelles Environnement (<http://www.leefmilieu.brussels/themas/energie/groene-energie/groenestroom-certificaten>).

La valeur du certificat est fonction des prix en cours sur le marché. Pour notre calcul, nous nous sommes basés sur 94 € par certificat vert, le prix moyen d'un certificat vert au cours des deux

années précédentes (2018 - 2019). Le prix minimum garanti s'élève à 65 €/MWh.

- Pour les panneaux solaires photovoltaïques (PV) : 1 000 kWh d'électricité produite fournissent  $X * 1,8$  certificat vert, pendant une période de 10 ans. Soit, 2,1 CV/MWh d'énergie générée.
- Pour la cogénération, 1 000 kWh d'économie d'énergie primaire par rapport à une production classique d'énergie fournissent également  $Y * 1$  certificat d'énergie thermique pendant une période de 10 ans.

Le facteur « X » est le « facteur de correction ». Vous trouverez un aperçu sur le site Internet de Brugel. Le facteur « Y » est la quantité économisée de CO<sub>2</sub> par rapport aux 217kg CO<sub>2</sub> et est fonction du rendement de la cogénération.

Description	prix unitaire
	EUR/u (HTVA)
certificats verts	94

**Tableau 6 Prix des certificats**

Hormis les certificats verts pour la cogénération et l'installation photovoltaïque, l'installation d'une pompe à chaleur permet également de bénéficier d'une prime via Bruxelles Environnement. Pour les pompes à chaleur dans les immeubles de services, 25 % des frais facturés éligibles pour la pompe à chaleur peuvent être obtenus comme prime. Il est possible de trouver les conditions à remplir sur :

[https://environnement.brussels/sites/default/files/primes-premies/GIDS\\_C4\\_NL\\_2020.pdf](https://environnement.brussels/sites/default/files/primes-premies/GIDS_C4_NL_2020.pdf)

Les principales exigences à prendre en considération sont le label énergétique A+ et l'installation d'un compteur énergétique au départ de la pompe à chaleur.

## 3 TECHNIQUES À EXAMINER

### 3.1 CHAUFFAGE OU REFROIDISSEMENT URBAINS

Le chauffage ou le refroidissement urbain doit uniquement être examiné si le site se trouve dans une zone où ce système est disponible. Aucune carte des zones n'est disponible à Bruxelles. Après avoir demandé à Bruxelles environnement, il apparaît qu'il n'y a aucun réseau connu à proximité du lieu de construction du bâtiment. Le chauffage ou le refroidissement urbain n'est pas disponible à proximité du site, par conséquent cette technique n'a pas fait l'objet d'un examen plus approfondi.

### 3.2 COGÉNÉRATION

La cogénération est une installation qui produit tant de la chaleur que de l'électricité. L'électricité est produite au moyen d'un moteur à combustion qui entraîne un générateur électrique.

Il existe des centrales à cogénération équipées pour la combustion du gaz, du mazout, du biogaz ou de l'huile de colza. Dans le cadre de cette étude, nous avons examiné une centrale de cogénération munie d'un moteur à gaz. La durée de vie d'une telle installation de cogénération est d'environ 15 ans. Souvent, l'installation est munie d'un ballon tampon pour éviter qu'elle ne s'arrête et ne redémarre en permanence.

L'installation de cogénération assure les besoins de base en chaleur, tandis qu'une chaudière à gaz satisfait le pic de demande de chaleur. L'installation de cogénération satisfait également la demande de base en électricité. Le pic de demande est couvert par le réseau. Si, à un certain moment, l'électricité produite dépasse des besoins, l'excédent est injecté dans le réseau. Le prix payé pour l'électricité vendue de la sorte est inférieur au prix payé pour l'électricité achetée.

### 3.3 POMPE À CHALEUR (PAS OBLIGATOIRE)

Une pompe à chaleur puise la chaleur qui se trouve dans l'environnement et la restitue à une installation de chauffage. Avec une pompe à chaleur, l'émission de chaleur passe de préférence par un système à basses températures, comme le chauffage par le sol.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes d'abord penchés sur une pompe à chaleur air/eau qui utilise l'air extérieur comme source de chaleur. Lorsque les températures extérieures sont basses, les pompes à chaleur air/eau présentent un faible rendement. Voilà pourquoi, dans le cadre de cette étude, lorsque les températures descendent en dessous de 4°, nous laissons uniquement les chaudières tourner. Par conséquent, la puissance de la chaudière installée ne peut pas baisser et aucuns frais d'investissement évité ne peuvent être inclus. La durée de vie d'une telle pompe à chaleur est d'environ 15 ans.

Par ailleurs, une pompe à chaleur sol/eau avec un échangeur thermique vertical dans le sol (Stockage géothermique par puits de forage) peut être utilisée comme solution de recharge. Un tel système de géothermie se compose d'un circuit d'eau fermé contenu dans des buses verticales s'enfonçant dans le sol. Dans le circuit, la chaleur est échangée avec le sol. L'hiver, la chaleur est puisée dans le sol, tandis que l'été la chaleur est stockée dans le sol. L'installation est dimensionnée de sorte qu'il soit possible de stocker autant de chaleur dans le sol l'été que l'on en reprend l'hiver. Le refroidissement l'été ne repose pas sur la pompe à chaleur en tant que telle, mais sur un refroidissement passif grâce à un échangeur thermique. La fraîcheur peut être libérée grâce au système de chauffage par le sol ou via l'air de ventilation en cas de disponibilité d'un système de type D.

Grâce à Databank Ondergrond Vlaanderen, la profondeur peut être déterminée. Jusqu'à cette profondeur, seule une notification est nécessaire pour le forage. Pour forer plus profondément, une autorisation doit être demandée. Si l'on opte pour un tel système de géothermie, il est vivement recommandé de procéder au préalable à un forage d'essai à cet endroit. Et ce, en vue d'estimer correctement d'une part les capacités de retrait et d'autre part la résistance lors du forage. En effet, ces deux facteurs ont une grande influence sur la rentabilité du système et peuvent fortement varier en fonction de l'endroit.

### 3.4 PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

Dans un système d'énergie solaire photovoltaïque (PV), des cellules solaires convertissent la lumière récoltée en énergie électrique sous la forme de courant continu. Un convertisseur transforme le courant continu en courant alternatif. Il existe divers types de cellules solaires, dont les deux suivantes sont les plus fréquentes :

- Des cellules solaires au silicium cristallin ;
- Des cellules solaires en silicium amorphe intégrées dans des membranes de toitures en EPDM (couche étanche).

Le marché est de plus en plus dominé par des panneaux mono et polycristallins. La part de marché des panneaux à film fin (amorphe) a fortement diminué. Pour plusieurs raisons :

- Investissement plus élevé ;
- Rendement plus faible ;
- Utilisation moins efficace de la place ;
- Offre limitée.

En raison du rendement plus faible, il convient de placer davantage de panneaux pour générer la même puissance. Par conséquent, la surface nécessaire et le coût de montage sont plus élevés. La durée de vie des panneaux est d'environ 25 à 30 ans, 15 à 20 ans plus ou moins pour le convertisseur.

En théorie, le rayonnement solaire est maximal pour un panneau solaire orienté au sud à une inclinaison de 35°. En pratique cependant, l'on opte le plus souvent pour une inclinaison plus petite. Pour deux raisons.

- Une occupation plus efficace de la place. Il est possible de placer plus de panneaux et donc de générer plus de puissance sur une même surface. En inclinant les panneaux, ils créent de l'ombre. Par conséquent, les panneaux doivent être suffisamment séparés les uns des autres.
- Moins de prise au vent.

Les structures porteuses doivent être munies de ballasts ou doivent être arrimées les unes aux autres. La résistance du toit doit être prévue en conséquence. Pour que les panneaux ne se fassent pas d'ombre les uns aux autres, il convient de les séparer suffisamment.

Si, à un certain moment, l'électricité produite dépasse les besoins, l'excédent est injecté dans le réseau. Le prix payé pour l'électricité vendue de la sorte est inférieur au prix payé pour l'électricité achetée.

Le propriétaire du bâtiment peut être l'exploitant de l'installation, mais peut également conclure une formule de location longue durée avec un tiers investisseur (bailleur). Dans ce dernier cas, le bailleur se charge de l'achat, de la conception et de l'entretien de l'intégralité de l'installation, tandis que les certificats verts et l'électricité produite reviennent au propriétaire du bâtiment (le preneur du bail). En échange, le preneur du bail verse au bailleur de manière périodique un montant égal au rendement énergétique de l'installation. Cette formule est principalement attrayante lorsque le propriétaire du bâtiment ne dispose pas d'un budget suffisant pour procéder à l'investissement initial.

## 4 ÉTUDE DE FAISABILITÉ

### 4.1 RÉSULTATS

#### 4.1.1 COGÉNÉRATION

##### Généralités

La cogénération est une installation qui produit tant de la chaleur que de l'électricité. L'électricité est produite au moyen d'un moteur à combustion et d'un générateur. Cette installation peut fonctionner avec du pétrole, du gaz ou des énergies renouvelables (biogaz, huile de colza).

La durée de vie d'une installation de cogénération est d'environ 15 ans.

##### Concept

Nous proposons une centrale de cogénération munie d'un moteur à gaz.

Le Tableau 7 Aperçu de la cogénération nous donne la meilleure estimation d'une cogénération optimale. Lors de la conception, ce choix doit être approfondi.

L'installation est munie d'un ballon tampon pour éviter qu'elle ne s'arrête et ne redémarre en permanence. L'installation de cogénération assure les besoins de base en chaleur. Des chaudières à condensation se chargent du pic de demande de chaleur, pour fournir la puissance supplémentaire.

L'installation de cogénération satisfait également la demande de base en électricité. Le pic de demande en électricité est couvert par le réseau électrique. Pour l'installation proposée, selon une première estimation d'après le profil énergétique, 75 % de l'électricité produite par la cogénération peut être consommée dans le bâtiment au moment de sa production. Dans une étude plus détaillée, il convient d'examiner en profondeur l'intégration de la cogénération. L'excédent d'électricité doit être vendu. L'électricité vendue est souvent payée à un prix inférieur à celui payé pour l'électricité achetée sur le réseau électrique, ce qui rend l'installation moins rentable. Pour le moment, nous avons appuyé nos calculs sur un prix de vente de 30 €/MWh (contre 200 €/MWh). Cette installation est dimensionnée pour couvrir la charge de base, la quantité d'électricité à vendre et dès lors minime.

##### Rentabilité

Dans la région Bruxelles-Capitale, la production d'électricité verte en provenance de sources énergétiques renouvelables ou de la cogénération est soutenue par l'octroi de certificats verts (CV). Ils sont octroyés sur la base de l'économie en CO<sub>2</sub> réalisée par l'installation ; dans le cas de la cogénération, 0,57 CV est octroyé par MWh.

Pour le moment, aucune prime/subvention n'est disponible à Bruxelles pour l'installation d'une cogénération.

L'investissement initial englobe :

- La cogénération
- L'intégration électrique
- L'intégration hydraulique

Dans le Tableau 7 Aperçu de la cogénération ci-après, les principaux paramètres et la rentabilité de l'installation de cogénération en question sont repris.

**Tableau 7 Aperçu de la cogénération**

<b>Cogénération</b>	
Puissance électrique	21 kW <sub>el</sub>
Puissance thermique	41 kW <sub>th</sub>
Rendement électrique	30 %
Rendement thermique	59 %
Production annuelle d'électricité	76 MWh
Production annuelle de chaleur	151 MWh
Investissement (hors prime)	80.100 €
Primes	0 €
Investissement (primes comprises)	80.100 €
Investissement supplémentaire	77.000 €
Frais d'entretien (moyenne par année)	1.900 €/an
Rendement moyen des certificats (10 premières années)	4.800 €/an
Économies sur les frais d'exploitation (y compris certificats et entretien)	10.300 €/an
<b>Période d'amortissement</b>	<b>9 Ans</b>
Émissions de CO2 évitées	6.400 kg/an

## 4.1.2 POMPE À CHALEUR AIR/EAU

### Généralités

Grâce à une pompe à chaleur, la chaleur extraite de l'environnement est diffusée dans l'installation de chauffage. L'émission de chaleur par la pompe à chaleur se fait à un régime basses températures ce qui est favorable pour le rendement. Le cycle de la pompe à chaleur peut également être inversé ce qui permet d'expulser la chaleur dans l'environnement pour produire de l'eau glacée côté bâtiment.

Durée de vie d'une pompe à chaleur : environ 20 ans

### Concept

Les besoins en refroidissement sont relativement faibles ; par conséquent, une pompe à chaleur sol/eau ou eau/eau est moins appropriée dans ce cas-ci. Pour ce projet, une pompe à chaleur air/eau est proposée. La pompe à chaleur est utilisée pour le chauffage des pièces et pour le chauffage des groupes d'air. Lors des mois d'été, lorsque la demande en chaleur est inexistante, le cycle de la pompe à chaleur sera inversé pour fonctionner comme une machine de refroidissement pour répondre aux besoins en refroidissement du bâtiment. L'intégralité des besoins en refroidissement est couverte par la pompe à chaleur, à savoir :

- Refroidissement principal groupes de traitement de l'air, 11.000m<sup>3</sup>/h de 32°C 50 % HR à 27°C
  - Batteries de sous-refroidissement 2.375m<sup>3</sup>/h de 27°C à 19°C
  - Refroidissement du niveau +2 (bureaux, pièces de vie, chambres) avec refroidissement par le sol (50 W/m<sup>2</sup>)
- TOTAL : 63 kW crête – 14 MWh

La charge de base de la demande en chaleur sera couverte par une pompe à chaleur air/eau, à placer sur le toit. Ce genre de pompe à chaleur utilise l'air extérieur comme source de chaleur.

Pour utiliser la pompe à chaleur de la manière la plus efficace possible, celle-ci est dimensionnée à 30-40% de la charge de base (kW) pour le chauffage pour que la pompe à chaleur puisse couvrir le nombre le plus élevé d'heures à charge pleine possible. Dans le cas qui nous occupe, le facteur déterminant est le refroidissement. Le pic de demande en refroidissement (kW) est supérieur à la taille optimale de la pompe à chaleur telle que dimensionnée sur la base de la demande en chaleur. La demande globale en refroidissement (MWh) est en revanche bien inférieure à la demande en chaleur. Pour le refroidissement, la pompe à chaleur connaîtra dès lors un nombre d'heures à charge pleine équivalent très limité, mais les investissements liés à un dispositif de refroidissement supplémentaire sont évités. La pompe à chaleur se charge dès lors de l'intégralité de la demande annuelle totale en refroidissement du bâtiment. Vu que la pompe à chaleur présente une plage minimale, un tampon est nécessaire pour éviter qu'elle ne s'arrête et ne redémarre constamment.

La puissance de la pompe à chaleur s'élève à 60 % du pic de demande pour le chauffage des locaux (ventilation comprise). Grâce à cette puissance, > 90 % de la demande totale annuelle en chauffage pour les locaux est assurée par la pompe à chaleur. La demande en chaleur n'approchera que très rarement le pic de demande. La pompe à chaleur est réglable à partir de la plage minimale (+/-20%) ce qui implique uniquement l'utilisation d'un réservoir tampon limité. En cas de faible demande en chaleur (sous la puissance nominale) à la pompe à chaleur, cette dernière peut quand même être utilisée pour l'exploiter de manière optimale.

Les pics de demande en dehors de la charge de base seront assurés par une chaudière à gaz à condensation ayant un rendement élevé qui fournira les 10 % restants de la demande en chauffage pour les locaux. Cette chaudière est également utilisée pour l'eau chaude sanitaire. La chaudière sera dimensionnée à une puissance considérable, mais fonctionnera souvent à une faible charge.

- Pompe à chaleur Air/eau – 68,5kW
  - 225 MWh (90 % de la demande totale annuelle de chauffage des locaux)
  - COP : 3,9 – SCOP : 3,2 (Puissance électrique : 21,3 kW)
  - Régime 45/35 °C
- Chaudière à gaz à condensation – 80 kW
  - 20 MWh (10 % de la demande totale annuelle de chauffage des locaux)
  - Rendement minimum de la chaudière PCI : 90 %
  - Également utilisée pour l'ECS : 110 MWh

Les pièces sont chauffées à l'aide de radiateurs et de chauffages par le sol à basses températures 45/35°C avec en complément une ventilation conditionnée. Le refroidissement passe par l'air de ventilation (régime de refroidissement de base 10/15°C) avec en complément un refroidissement par le sol à un régime de 16/20°C, à la demande.

### Rentabilité

Dans la région Bruxelles Capitale, une prime est disponible pour les pompes à chaleur air/eau. Celle-ci s'élève à 25 % des frais facturés éligibles.

**Tableau 8 Aperçu de la pompe à chaleur A/E**

<b>Pompe à chaleur air/eau</b>	
Puissance électrique	21 kW <sub>el</sub>
Puissance thermique chauffage	68,5 kW <sub>th</sub>
Puissance thermique refroidissement	63 kW <sub>th</sub>
Production annuelle de chaleur	225 MWh
Production annuelle refroidissement	14 MWh
Investissement (hors prime)	19.600 €
Primes	4.900 €
Investissement (primes comprises)	14.700 €
Investissement évité	14.600 €
Investissement supplémentaire en comparaison à une chaudière à gaz plus dispositif de refroidissement	100 €
Coût de l'énergie (en comparaison à une chaudière à gaz plus dispositif de refroidissement)	2.500 €/an
Frais d'entretien (en comparaison à une chaudière à gaz plus dispositif de refroidissement)	0 €/an
Économie	- €/an
<b>Période d'amortissement</b>	<b>&gt;20 Ans</b>
Émissions de CO <sub>2</sub> évitées	33.500 kg/an

L'intégration d'une pompe à chaleur air/eau dans le cadre de ce projet a une période d'amortissement **de plus de 20 ans**. L'investissement est cependant assez similaire à celui pour la combinaison d'une chaudière à gaz à condensation et d'un dispositif de refroidissement. En raison du prix élevé de l'électricité par rapport au gaz, la pompe à chaleur présente une période d'amortissement négative. Elle sera donc bien plus durable, mais coûtera plus tant à l'installation qu'à l'exploitation. Bien entendu, il y a également l'impact social en raison de la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> évitée.

### 4.1.3 POMPE À CHALEUR SOL/EAU (STOCKAGE GÉOTHERMIQUE)

#### Généralités

En cas d'utilisation d'une pompe à chaleur sol/eau, la chaleur du sol est puisée via stockage géothermique par puits de forage et restituée à l'installation de chauffage. L'émission de chaleur par la pompe à chaleur se fait un régime basses températures ce qui est favorable pour le rendement. Il est également possible de refroidir (actif/passif, selon le régime).

Durée de vie d'une pompe à chaleur : environ 20 ans

#### Concept

Les besoins en refroidissement sont faibles ; par conséquent, une pompe à chaleur sol/eau ou eau/eau est moins appropriée pour ce projet. Sur l'année, le sol n'est par conséquent pas en équilibre ce dont il faut tenir compte lors de la conception.

Les calculs sont fondés sur les mêmes puissances pour la pompe à chaleur qu'au point §4.1.2 Pompe à chaleur air/eau.

## Rentabilité

Dans la région Bruxelles Capitale, une prime est disponible pour les pompes à chaleur sol/eau. Celle-ci s'élève à 25 % des frais facturés éligibles.

Tableau 9 Aperçu géothermie + pompe à chaleur S/E

Pompe à chaleur sol/eau	
Puissance électrique	17 kW <sub>el</sub>
Puissance thermique chauffage	68,5 kW <sub>th</sub>
Puissance thermique refroidissement	63 kW <sub>th</sub>
Nombre de mètres pour le forage	1850 m
Production annuelle de chaleur	225 MWh <sub>chaleur</sub>
Production annuelle refroidissement	14 MWh <sub>refroidissement</sub>
Investissement (hors prime)	211.000 €
Primes	52.750 €
Investissement (primes comprises)	158.250 €
Investissement évité	14.600 €
Investissement supplémentaire en comparaison à une chaudière à gaz/dispositif de refroidissement	143.650 €
Coût de l'énergie (en comparaison à une chaudière à gaz plus dispositif de refroidissement)	-350 €/an
Frais d'entretien (en comparaison à une chaudière à gaz plus dispositif de refroidissement)	1.000 €/an
Économie	- €/an
<b>Période d'amortissement</b>	<b>&gt;20 Ans</b>
Émissions de CO <sub>2</sub> évitées	37.100 kg/an

L'intégration d'une pompe à chaleur sol/eau avec le stockage géothermique par puits de forage nécessaire dans le cadre de ce projet a une période d'amortissement **de plus de 20 ans**. En raison du prix élevé de l'électricité par rapport au gaz, la pompe à chaleur permet une économie sur le coût en énergie, mais celle-ci est annihilée par les frais d'entretien plus élevés des puits de forage, ce qui entraîne une période d'amortissement « négative ». Elle sera donc bien plus durable, mais coutera plus tant à l'installation qu'à l'exploitation. Bien entendu, il y a également l'impact social en raison de la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> évitée.

## 4.1.4 PANNEAUX SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

### Généralités

Dans un système d'énergie solaire photovoltaïque (PV), des cellules solaires convertissent directement la lumière récoltée en électricité (courant continu). Cette électricité est convertie grâce à un transformateur en électricité utilisable (courant alternatif).

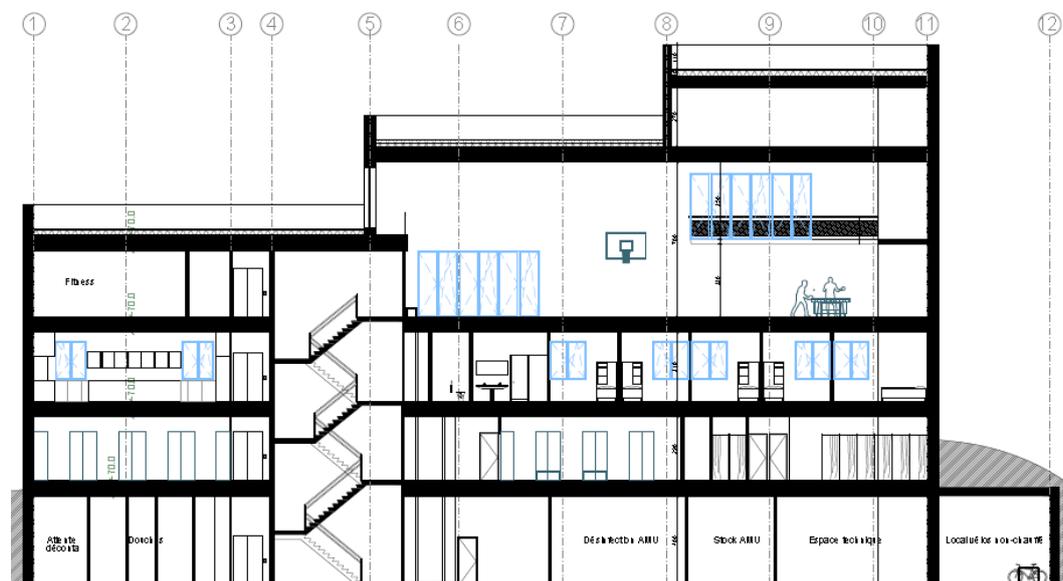
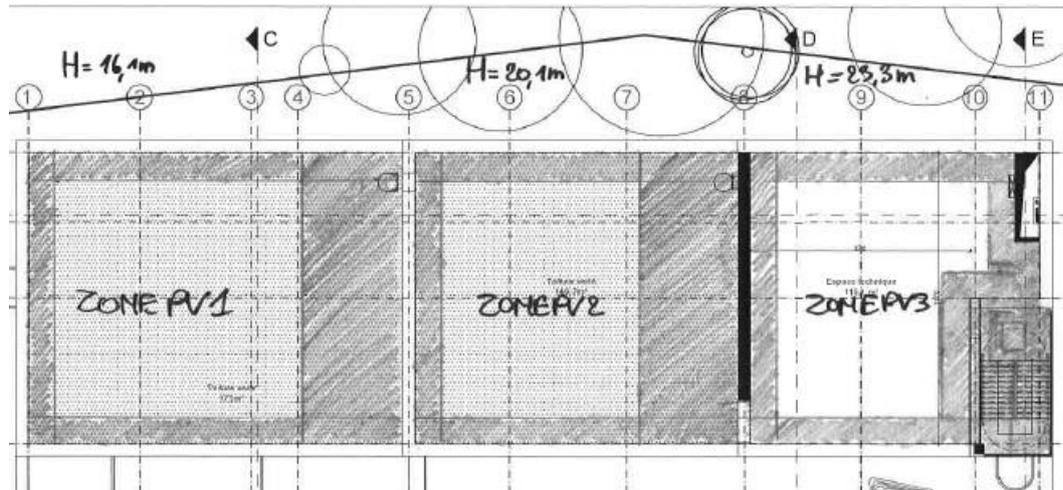
Durée de vie des panneaux : 25 à 30 ans  
Durée de vie du transformateur : 15 à 20 ans

Lorsque les cellules solaires sont à l'ombre, il va sans dire qu'elles ne produisent pas d'énergie. Il est par conséquent essentiel de limiter l'ombrage sur les cellules solaires. Pour l'ombre des toitures plus hautes, une simulation a été effectuée dans le programme PV-sol. Une perte de 10 % au niveau du panneau à cause de l'ombrage est une valeur limite utilisée comme équilibre entre le rendement, l'efficacité et les frais d'investissement.

Trois scénarios d'installations photovoltaïques (en abrégé PHOTO) ont été comparés, à savoir :

- Scénario PHOTO 1 : Toit rempli de PV (pas de panneaux PV uniquement dans les zones périphériques 1 m et au niveau des obstacles)
- Scénario PHOTO 2 : Toit rempli de PV – max. 10 % ombrage (zone PV1+PV2+PV3 – pas zones grises)

- Scénario PHOTO 3 : Onduleur PV <10kVA (zone PV3+PV2 – pas zones grises)



### Zones pour PV

La toiture plate du bâtiment principal peut être utilisée pour l'installation de panneaux photovoltaïques. La toiture se compose de trois étages : zone PV1 (brut 173m<sup>2</sup>), zone PV2 (brut 150m<sup>2</sup>) et zone PV3 (brut 115m<sup>2</sup>), elles conviennent toutes à l'installation de panneaux photovoltaïques. Une zone périphérique de 1 m n'est pas exploitée jusque chaque bordure de la toiture pour permettre le passage de personnes et éviter l'ombre du bord du toit.

Pour ce projet, nous proposons de munir la surface de toiture disponible de cellules solaires cristallines. Les panneaux sont orientés pratiquement vers le sud : Orientation vers le sud 12° (O=90° - S=0° - E=-90°). Ils sont placés à une inclinaison de 15°. Les structures doivent être munies de ballasts ou doivent pouvoir être arrimées les unes aux autres. La résistance du toit doit être prévue en conséquence. Pour que les panneaux ne se fassent pas d'ombre les uns aux autres, il convient de les séparer suffisamment.

Il est réaliste de penser que dans tous les scénarios, près de 100 % de l'électricité produite est autoconsommée. Dans l'idéal, aucun excédent d'électricité n'est vendu. L'électricité vendue est souvent payée à un prix inférieur à celui payé pour l'électricité achetée sur le réseau électrique, ce qui rend l'installation moins rentable.

### Ombre

Lorsque les cellules solaires sont à l'ombre, il va sans dire qu'elles ne produisent pas d'énergie. Il est par conséquent essentiel de limiter l'ombrage sur les cellules solaires. Pour l'ombrage, une simulation a été effectuée dans le programme PV-sol. Aucune incidence négative des bâtiments voisins n'est à déplorer, seulement celle des toitures du bâtiment placé plus haut. Une perte de 10 % au niveau du panneau à cause de l'ombrage est une sorte de valeur limite utilisée comme équilibre entre le rendement, l'efficacité et les frais d'investissement.

	zone PV 1 [%]	# panneaux	Zone PV 2 [%]	# panneau x	Zone PV 3 [%]	# panneaux
Ombrage moyen – Scénario PHOTO 1 :	8,0	30	5,9	25	/	17
Ombrage moyen – Scénario PHOTO 2	4,0	20	3,7	20	/	17
Ombrage moyen – Scénario PHOTO 3	/	0	3,7	20	/	17

Le tableau ci-dessus indique les facteurs d'ombrage moyen pour les divers scénarios. Pour les calculs de puissance, le panneau suivant a été utilisé comme référence :

- o Canadian Solar CS6U-335P ( $\mu=17,3\%$ ) 1960mm x 992mm – 335Wp

### Rentabilité

Aucune prime n'est disponible pour l'installation de panneaux solaires photovoltaïques. Dans la région Bruxelles-Capitale, aucun tarif prosumer/d'injection ne doit être payé par le propriétaire d'une installation photovoltaïque. La compensation des frais de réseau pour les petites installations disparaît fin 2020. Un compteur bidirectionnel est installé pour distinguer la consommation propre, l'absorption et l'injection.

Dans la région Bruxelles-Capitale, la production d'électricité verte en provenance de sources énergétiques renouvelables est soutenue par l'octroi de certificats verts (CV). Ils sont octroyés sur la base de l'économie en CO<sub>2</sub> réalisée par l'installation. Le propriétaire de l'installation reçoit un certificat vert par 217 kg CO<sub>2</sub> économisés. Toutefois, selon la taille de l'installation, un coefficient de multiplication est appliqué. À partir de mai 2020 (quatre mois après la date de publication de la décision au moniteur), ce coefficient s'appuiera sur les valeurs reprises dans le tableau ci-après.

	Unité	Valeur					
Categorie de puissance	kWp	≤6	]6-12]	]12-50]	]50-100]	]100-250]	>250
Coefficients multiplicateurs							
Coefficients multiplicateurs	-	1,375	1,155	1,155	0,935	0,88	0,77
Taux d'octroi	CV/MWh	2,5	2,1	2,1	1,7	1,6	1,4

Coefficients multiplicateurs et taux d'octroi à partir de mai 2020 (Source : Brugel)

Ainsi, pour une installation entre 12 et 50 kWc, ce coefficient sera égal à 1,155. Soit, 2,1 CV/MWh d'énergie générée.

Dans l'aperçu ci-après, les principaux paramètres et la rentabilité de l'installation des trois scénarios sont repris. Comme escompté, tous les scénarios sont rentables avec une période d'amortissement d'environ cinq ans pour toutes les situations. Le scénario PHOTO 2 présente le rendement couplé le plus élevé (IRR). Toutefois, compte tenu de l'ampleur de l'installation, le scénario Photo 1 a rapporté le plus après une période de 20 ans.

Nous optons néanmoins pour l'option PHOTO 2 en raison de l'équilibre entre l'investissement actuel et le rendement à long terme.

Tableau 10 Aperçu des scénarios installation PV

Scénarios installation PV	PHOTO 1	PHOTO 2	PHOTO 3	
Puissance Installation PV	24,1	19	12,3	kWc
Production d'électricité totale annuelle	18.900	15.600	10.200	kWh/an
Surface de toiture nette nécessaire	235	186	121	m²
Investissement (hors prime)	31.900	25.200	17.200	€
Primes	0	0	0	€
Compteur bidirectionnel	500	500	500	€
Frais d'entretien	450	400	300	€/an
Économies sur les frais d'énergie	3.800	3.100	2.000	€/an
Certificats verts	3.800	2.100	2.000	€/an
Rendement financier annuel	7.200	5.800	3.800	€/an
<b>Période d'amortissement</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>ans</b>
TCO après 20 ans	104.100	84.700	53.400	€
IRR après 20 ans	23	24	22	%
Émissions de CO <sub>2</sub> évitées	11.800	9.200	6.300	kg/an

#### 4.1.5 APERÇU DE LA RENTABILITÉ

Le tableau ci-après s'appuie sur les informations actuelles disponibles pour donner la meilleure estimation de la faisabilité économique des pistes explorées. Lors de la conception, la sélection doit être approfondie.

	Investissements hors primes	Investissements Primes incluses	Invsts (suppl.) primes incl.	Frais d'entretien	Économie (Entretien compris)	Période d'amortissement	Réduction du CO <sub>2</sub>	Investissement/Réduction du CO <sub>2</sub>
	€	€	€	€/an	€/an	an	kg/an	€ / kg CO <sub>2</sub>
Installation de cogénération	80.100	80.100	77.000	1.900	10.300	9	6.400	12,0
Pompe à chaleur Air/eau	19.600	14.700	100	600	-2.500	>20	33.500	0,003
Pompe à chaleur sol/eau Stockage géothermique (chauffage et refroidissement)	211.000	158.250	143.650	1.650	-650	>20	37.100	3,9
Installation PV	25.200	25.200	25.200	400	5.800	5	9.200	2,7