

FORMATION BATIMENT DURABLE

POMPE À CHALEUR : CHOIX ET CONCEPTION

AUTOMNE 2022



La géothermie très basse énergie sur sondes ou sur nappe en région bruxelloise

Bertrand FRANCOIS
Mathieu AGNIEL



bruxelles
environnement
leefmilieu
brussel
.brussels





- ▶ Appréhender les techniques de géothermie très basse énergie sur sondes et sur nappe ainsi que les grandes étapes de conception
- ▶ Comprendre les méthodes visant à évaluer la faisabilité d'un projet de géothermie très basse énergie et procéder au prédimensionnement de l'installation
- ▶ Appréhender les facettes d'un projet de géothermie très basse énergie dans le contexte de la région bruxelloise
- ▶ Découvrir l'outil BrugeoTool pour la préfaisabilité et le prédimensionnement d'une installation



INTRODUCTION

DIFFÉRENTS TYPES D'INSTALLATION GÉOTHERMIQUE

QUEL SYSTÈME CHOISIR ?

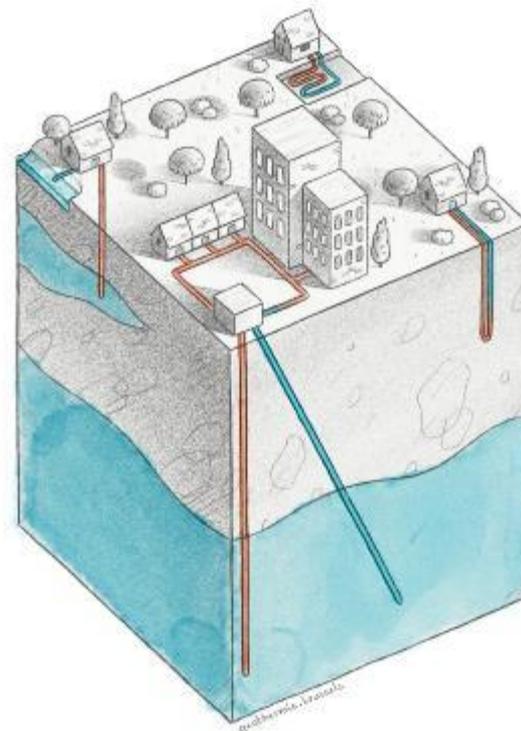
CONCEPTION

BRUGEOTOOL



Qu'est-ce qu'un système géothermique?

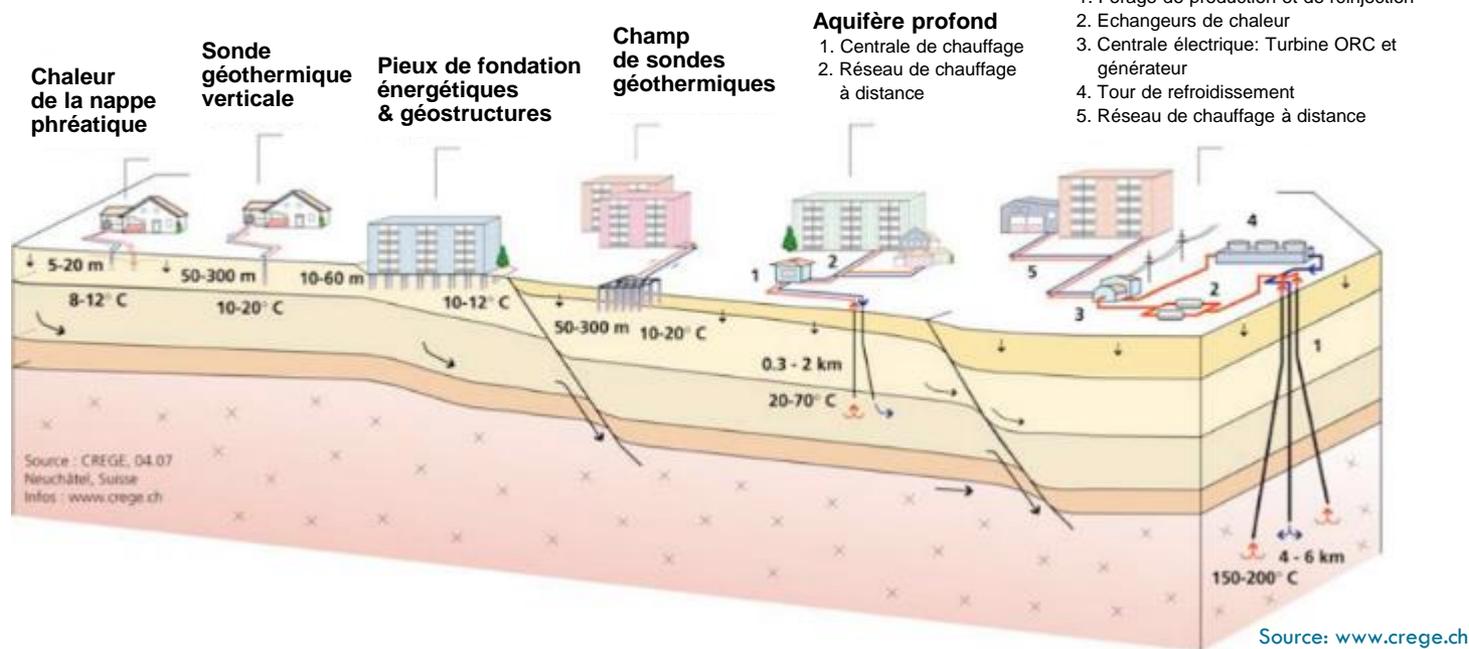
- ▶ Le terme « géothermie » réfère à une série de techniques visant à extraire la chaleur du sous-sol à des fins de chauffage ou de production d'électricité.
- ▶ Par extension, il englobe également les systèmes ayant pour but de dissiper la chaleur dans le sous-sol pour le refroidissement.



SYSTÈMES GÉOTHERMIQUES - DÉFINITION

Différents systèmes pour différentes applications

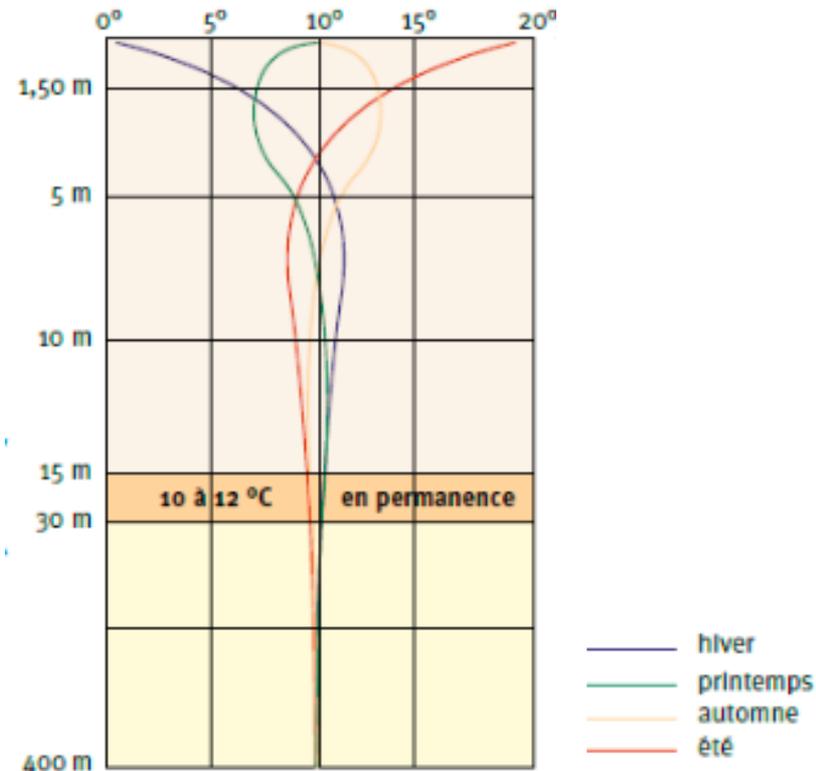
- ▶ Les installations géothermiques varient en termes de:
 - Profondeur
 - Puissance extractible
 - Types de fonctionnement (systèmes ouverts ou fermés)
 - Applications (chauffage, refroidissement, stockage, production d'électricité)
 - Cout d'investissement



6 POMPE À CHALEUR GÉOTHERMIQUE

Quels sont les avantages d'une pompe à chaleur géothermique?

- Lorsque le système est bien dimensionné, le sol fournit une température de l'eau relativement constante tout au long de l'année



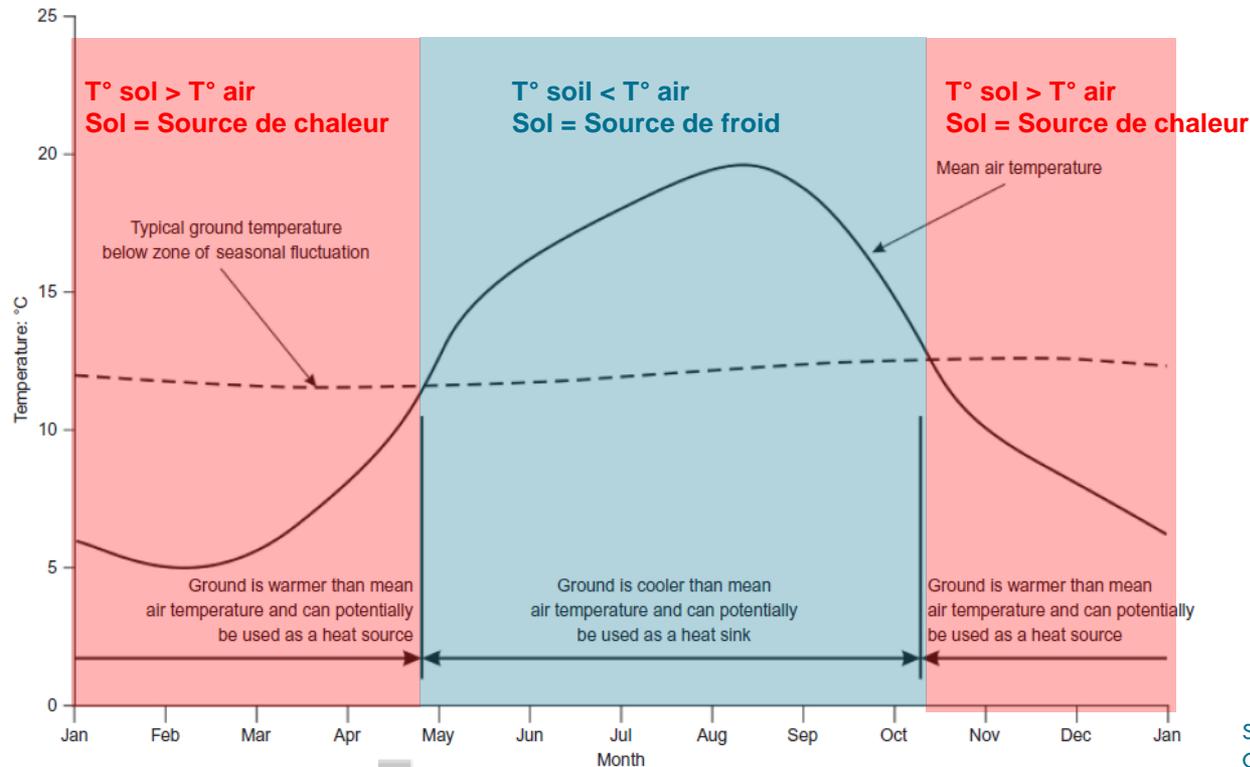
Source: CSTC-NIT 259



7 POMPE À CHALEUR GÉOTHERMIQUE

Quels sont les avantages d'une pompe à chaleur géothermique?

- ▶ Lorsque le système est bien dimensionné, le sol fournit une température de l'eau relativement constante tout au long de l'année
- ▶ Le sol peut fonctionner comme source froide (en hiver, pour le chauffage) ou comme source chaude (en été, pour le refroidissement).



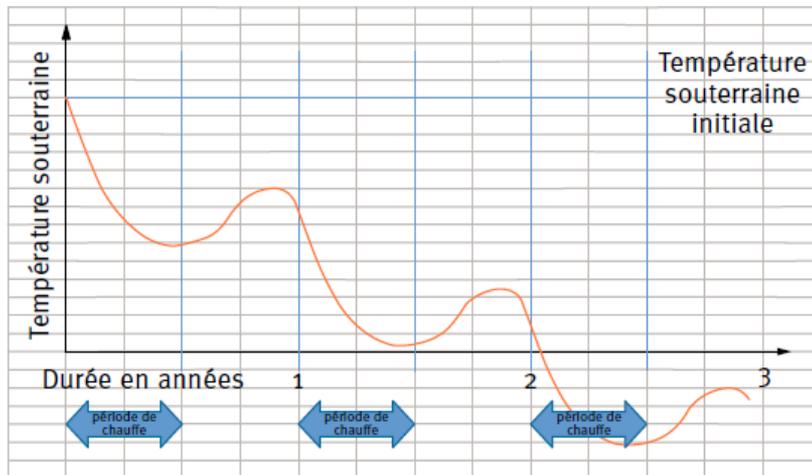
Source: Preene and Powrie, Geotechnique 2009



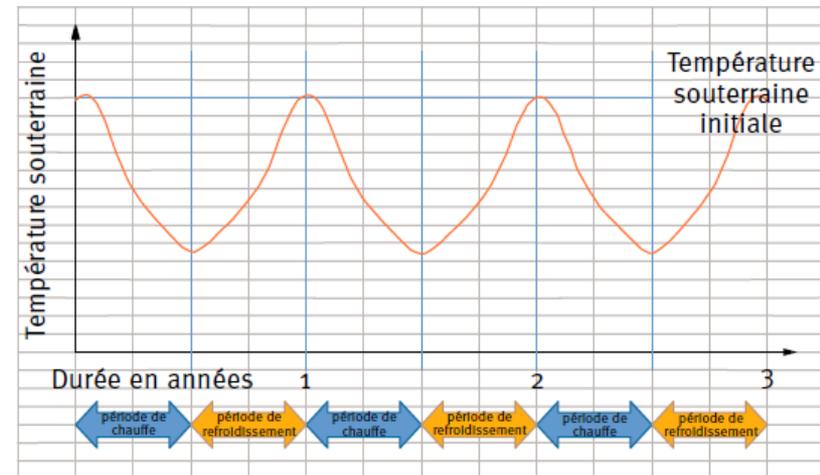
8 POMPE À CHALEUR GÉOTHERMIQUE

Quels sont les avantages d'une pompe à chaleur géothermique?

- ▶ Lorsque le système est bien dimensionné, le sol fournit une température de l'eau relativement constante tout au long de l'année
- ▶ Le sol peut fonctionner comme source froide (en hiver, pour le chauffage) ou comme source chaude (en été, pour le refroidissement).
- ▶ Le sol fonctionne donc comme un stockage de chaleur au fil des saisons.

**Système mal dimensionné**

Epuisement du réservoir de chaleur suite à une demande en chaud trop importante

**Système bien dimensionné**

La recharge thermique en été compense la demande de chaud en hiver

Source : CSTC-WTCB - NIT 259



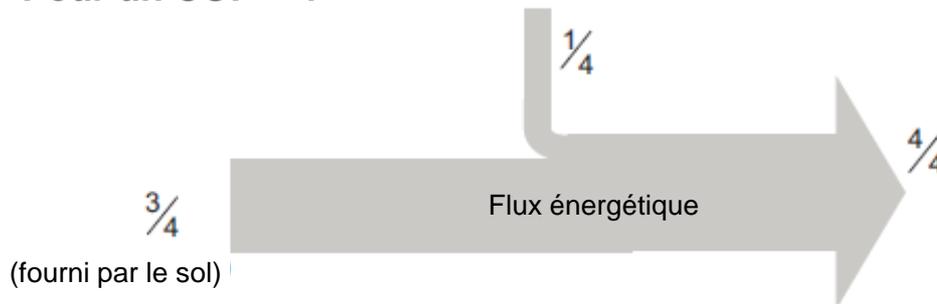
9 COEFFICIENT DE PERFORMANCE

Pourquoi une pompe à chaleur géothermique est-elle efficace?

- Le coefficient de performance (COP) est le quotient de la chaleur produite par le travail fourni. Il définit l'efficacité d'une pompe à chaleur.

$$\text{COP} = \frac{\text{énergie fournie par la pompe à chaleur [kW]}}{\text{énergie consommée pour fonctionner [kW]}}$$

Pour un COP = 4 Source extérieure de puissance (électricité)



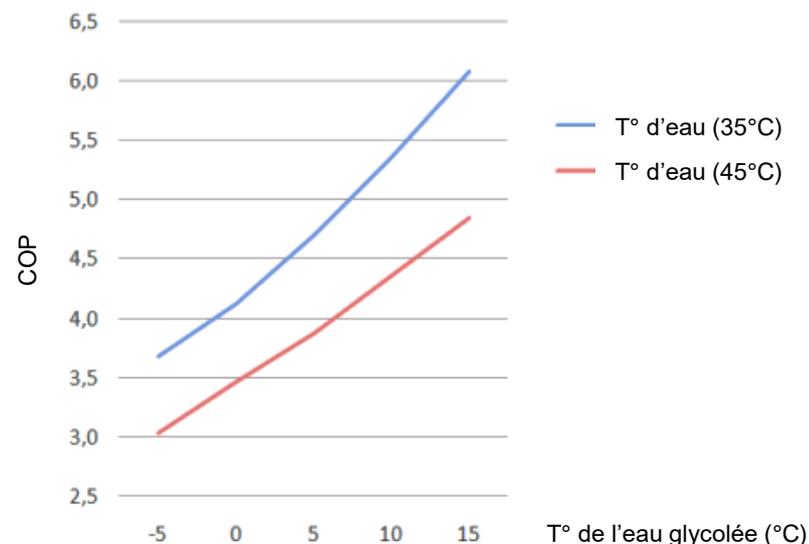
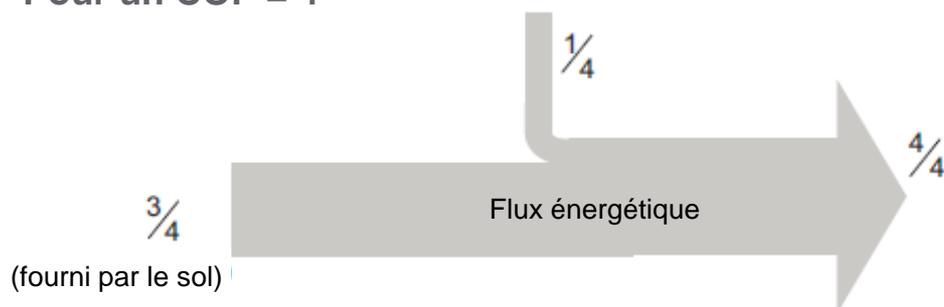
Pourquoi une pompe à chaleur géothermique est-elle efficace?

- ▶ Le coefficient de performance (COP) est le quotient de la chaleur produite par le travail fourni. Il définit l'efficacité d'une pompe à chaleur.
- ▶ Grâce à une température relativement constante au fil des saisons (froid en été et chaud en hiver), les pompes à chaleur géothermiques permettent d'atteindre des coefficients de performance élevés (COP>5)

$$\text{COP} = \frac{\text{énergie fournie par la pompe à chaleur [kW]}}{\text{énergie consommée pour fonctionner [kW]}}$$

Pour un COP = 4

Source extérieure de puissance (électricité)



Source: www.ef4.be



INTRODUCTION

DIFFÉRENTS TYPES D'INSTALLATION GÉOTHERMIQUE

QUEL SYSTÈME CHOISIR ?

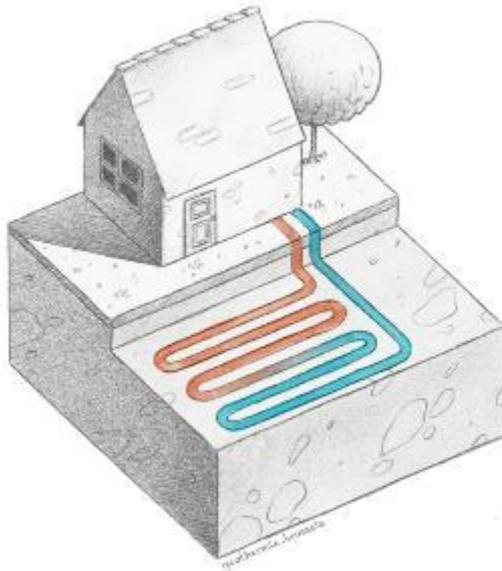
CONCEPTION

BRUGEOTOOL

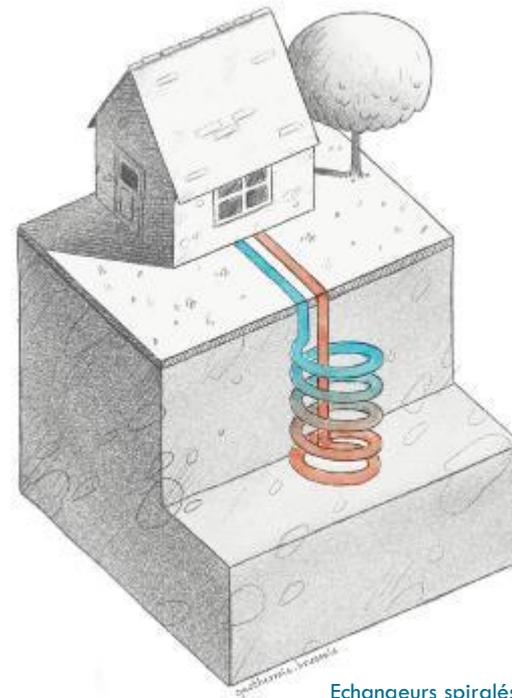


Principe

- La géothermie de très faible profondeur puise la chaleur du sous-sol dans les premiers mètres sous la surface du terrain via un système de capteurs horizontaux ou éventuellement de corbeilles géothermiques (appelé aussi échangeurs spiralés).



Capteurs horizontaux



Echangeurs spiralés



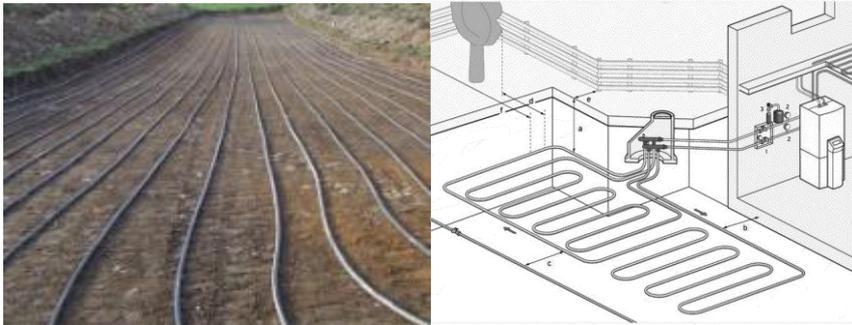
GÉOTHERMIE TRÈS PEU PROFONDE

Avantages

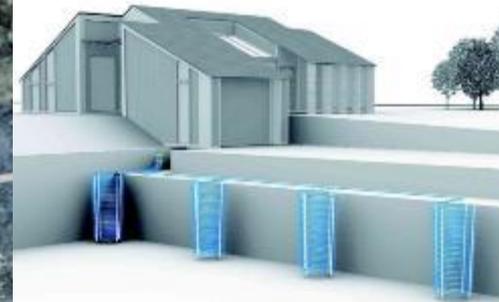
- ▶ Nécessite peu de travaux de terrassement

Inconvénients

- ▶ Requier une surface de terrain très importante (28 à 100 m² par kW de puissance de chauffage)
- ▶ Température variable au fil des saisons. Perte de rendement en hiver



Source / Bron : <http://www.af-sa.ch/>

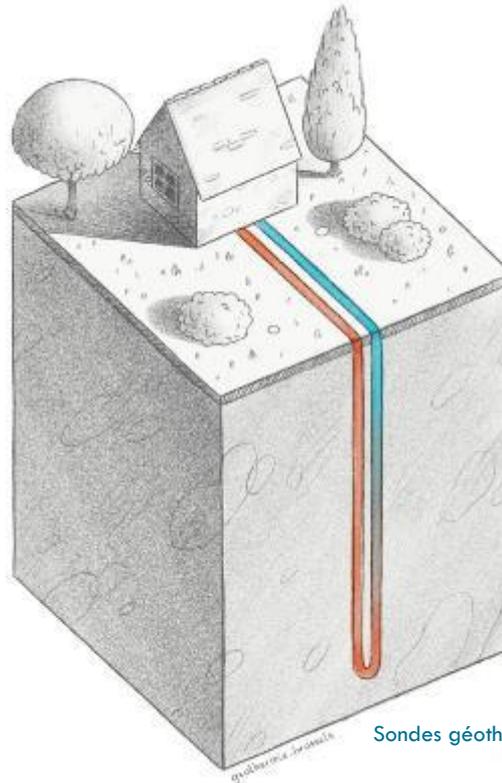


Source / Bron : Vaillant



Systèmes fermés – Sondes géothermiques

- ▶ Un système géothermique est dit « fermé » si un fluide caloporteur circule dans un circuit fermé installé dans le sous-sol. Ce circuit est installé dans des forages géothermiques et peut se présenter sous différentes géométries (simple U, double U, coaxial, ...).
- ▶ L'ensemble « forage – tubes – coulis » est appelé **sondes géothermiques**.

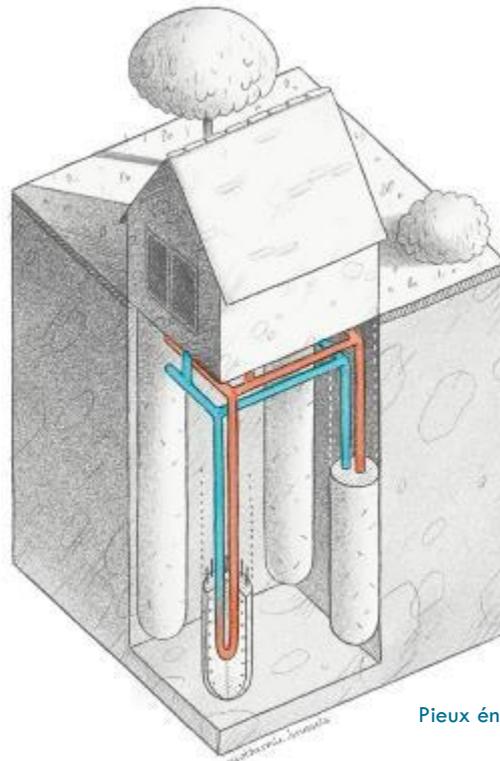


Sondes géothermiques



Systèmes fermés – Pieux énergétiques

- ▶ Les échangeurs sont directement introduits dans les pieux de fondations.
- ▶ Avantage: Ne nécessite pas de forages additionnels
- ▶ Inconvénient: Profondeur atteinte assez limitée
- ▶ Remarque: Le dimensionnement structural des pieux de fondations doit tenir compte des contraintes thermiques

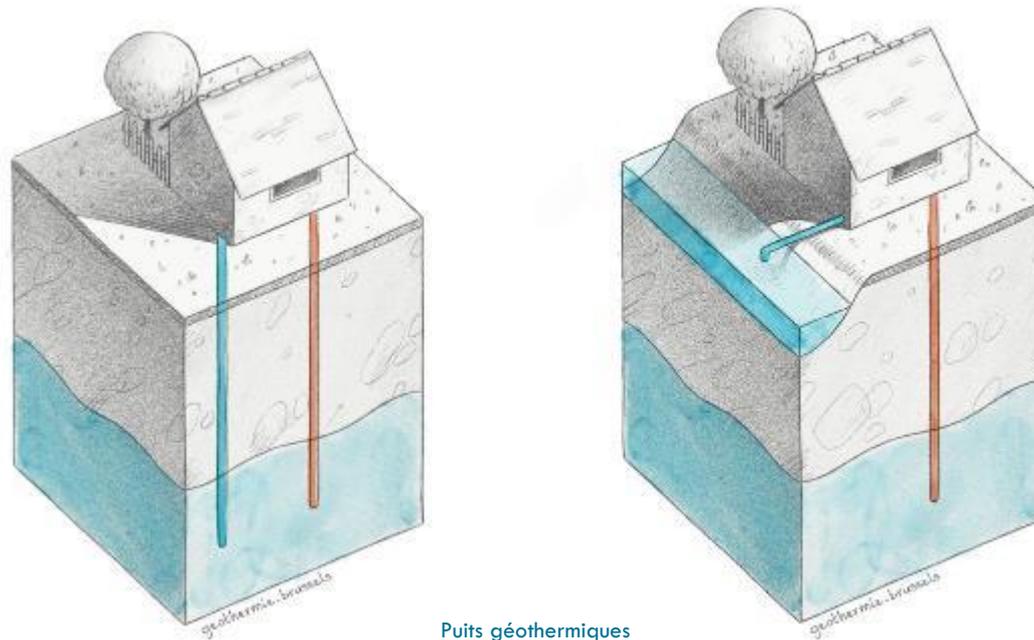


Pieux énergétiques



Systèmes ouverts – Puits géothermiques

- ▶ Un système géothermique « ouvert » utilise la chaleur naturelle de l'eau des aquifères ou nappes phréatiques.
- ▶ Les systèmes géothermiques ouverts sont généralement constitués de paires de forages (appelés aussi **puits géothermiques**) : l'un pour le pompage et l'autre pour la réinjection.

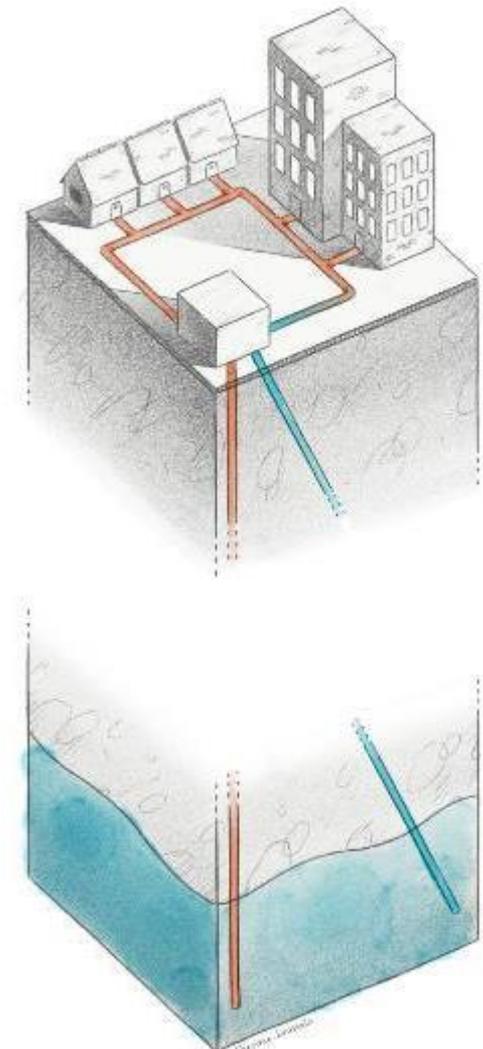


Puits géothermiques



Système à haute température

- ▶ L'eau du sous-sol est **directement captée à une température élevée** et est ensuite réinjectée à basse température après en avoir extrait sa chaleur. Ces systèmes permettent d'alimenter des chauffages urbains ou de produire de l'électricité.
- ▶ Les profondeurs atteintes (supérieures à 1000 m) nécessitent des **techniques de forage non-conventionnelles** et une **stimulation de la roche** est parfois nécessaire afin d'augmenter artificiellement la conductivité hydraulique du terrain

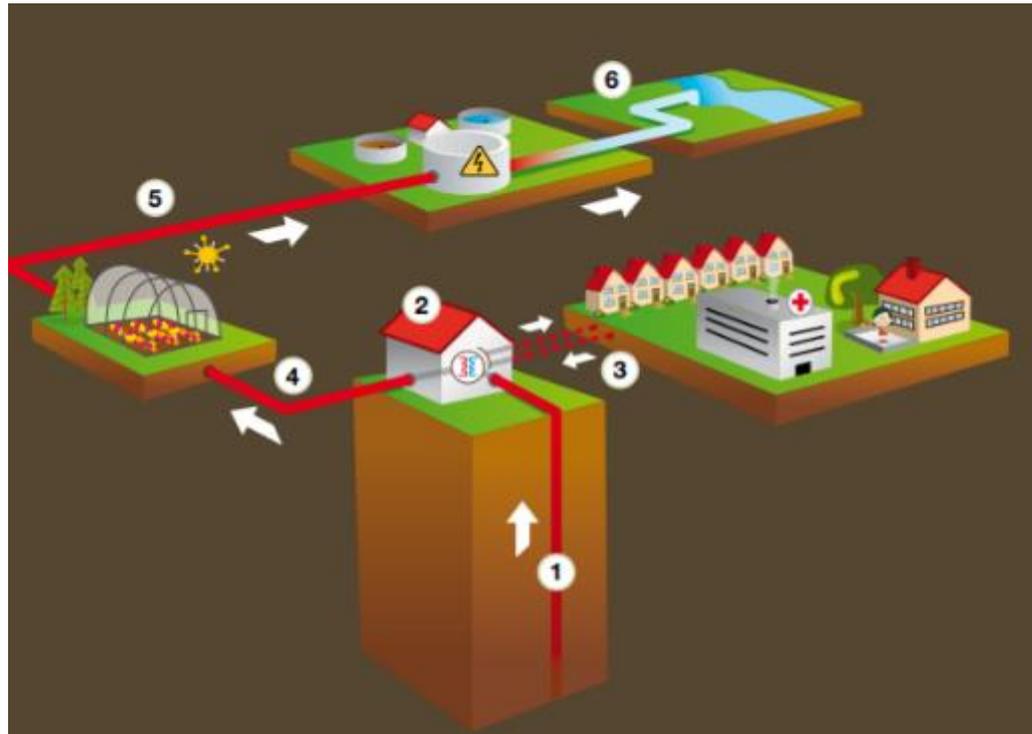


Chauffage urbain par géothermie profonde



Exemple de Saint-Ghislain

- ▶ Forage à 2400m, débit de 100m³/h, température 72°C
- ▶ Puissance de la centrale 15 MW
- ▶ Energie annuelle: 16700 MWh



www.saint-ghislain.be/documents/Idea_Geothermie.pdf - Source: Intercommunal IDEA



Balmatt Energy Plant (VITO, Mol)

- ▶ 2 forages à 3610 m et 4340m, température 125°C
- ▶ Puissance actuelle: 10 MWth ou 1 MWe
- ▶ Extensible via 4 forages supplémentaires à 5 MWe (+/- 5000 ménages)



<https://vito.be/en/deep-geothermal/balmatt-energy-plant>



INTRODUCTION

DIFFÉRENTS TYPES D'INSTALLATION GÉOTHERMIQUE

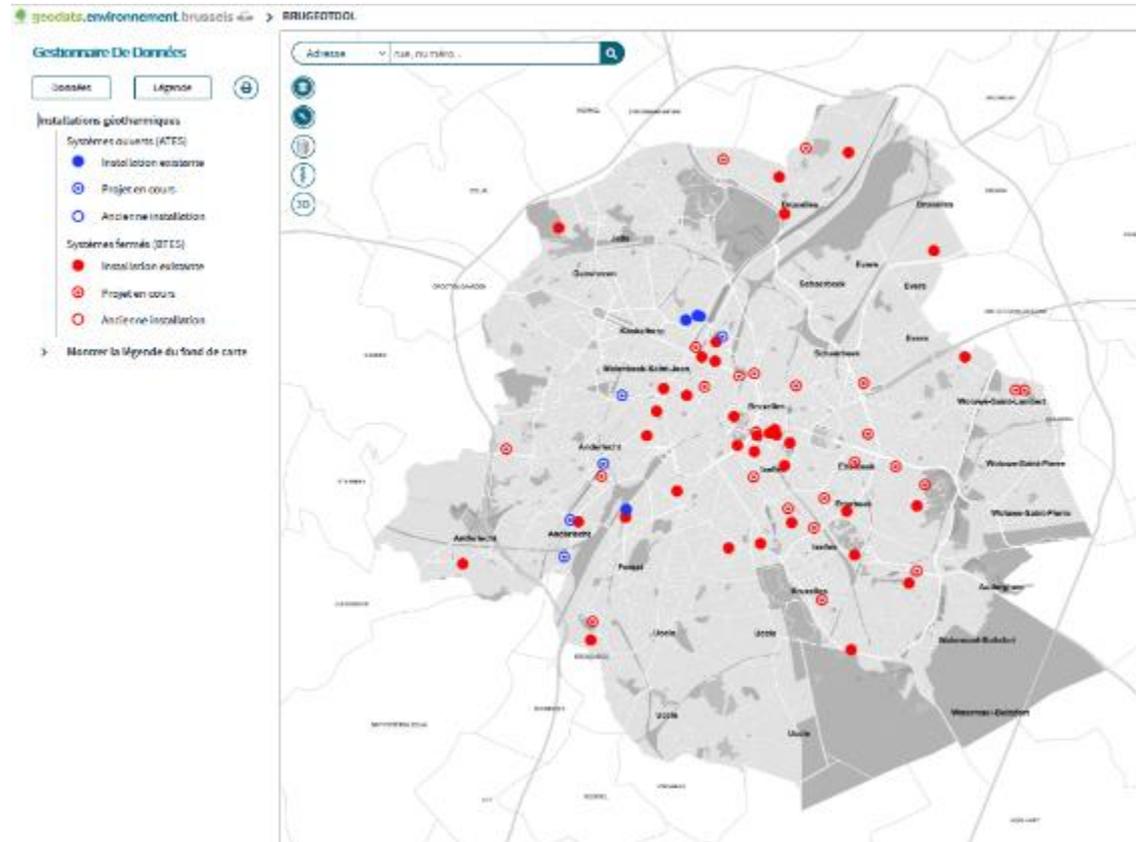
QUEL SYSTÈME CHOISIR ?

CONCEPTION

BRUGEOTOOL



Parc d'installations géothermiques bruxellois au 29/08/2022



Source :
BrugeoTool

► Parc géothermique bruxellois actuel :

- 9 systèmes ouverts : 4 en fonctionnement + 5 en projets (+ 6 *en avant projet*)
- 59 systèmes fermés : 35 en fonctionnement + 24 en projets (+ 32 *avant projet*)



AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES SOLUTIONS



Hôpital Chirec Delta
Closed-loop
176 GHE – Depth 90 m



Engie Tower Gare du Nord
Closed-loop
180 GHE – Depth 85 m



Bât Wilfried Martens Rue Belliard
Closed-loop
33 GHE – Depth 240 m



Bruxelles Environnement T&T
Open-loop
4 pair of wells – Depth 80 m



Herman Terlinck T&T
Open-loop
4 pair of wells – Depth 80 m

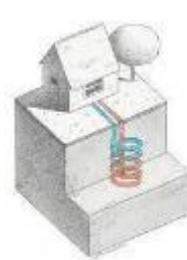


Gare maritime T&T
Open-loop
5 pair of wells – Depth 150 m

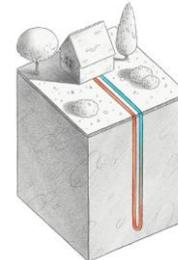


AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES SOLUTIONS

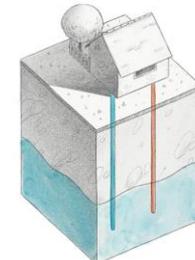
A chaque projet, son système !



Système compact



Système fermé



Système ouvert

	Système compact	Système fermé	Système ouvert
Faisabilité technique	😊	😊	😊 Fonction résultats Forages tests
Adapté pour maison unifamiliale	😊	😊	😞
Efficacité énergétique et puissance	😞 1 kW / corbeille	😊 4-8 kW / sonde	😊 70 -700 kW / doublets
Contraintes réglementaires	🖋️	🖋️ PE classe 1C	🖋️🖋️ PE classe 1B
Investissement	€€	€€	€
Coûts exploitation	€€€	€€	€

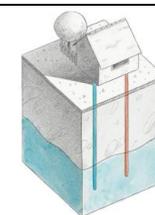
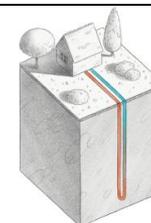


Bilan environnemental et économique

Ex : Bâtiment tertiaire neuf 15000 m² / PAC 120 kW

a. Chauffage	b. Refroid.	unit
225.000	225.000	[kWh/an]

Scénarii ->	S0 ref : Gaz + groupe froid	S1 : aérothermie	S2 : géothermie corbeilles	S3 : géothermie sondes	S4 : géothermie nappe
Chaud	GAZ Chaudière	PAC air/eau	PAC air/eau	PAC sol/eau	PAC eau/eau
Froid	Groupe de froid	PAC air/eau	PAC air/eau	PAC sol/eau + geocooling 20%	PAC eau/eau + geocooling 30%



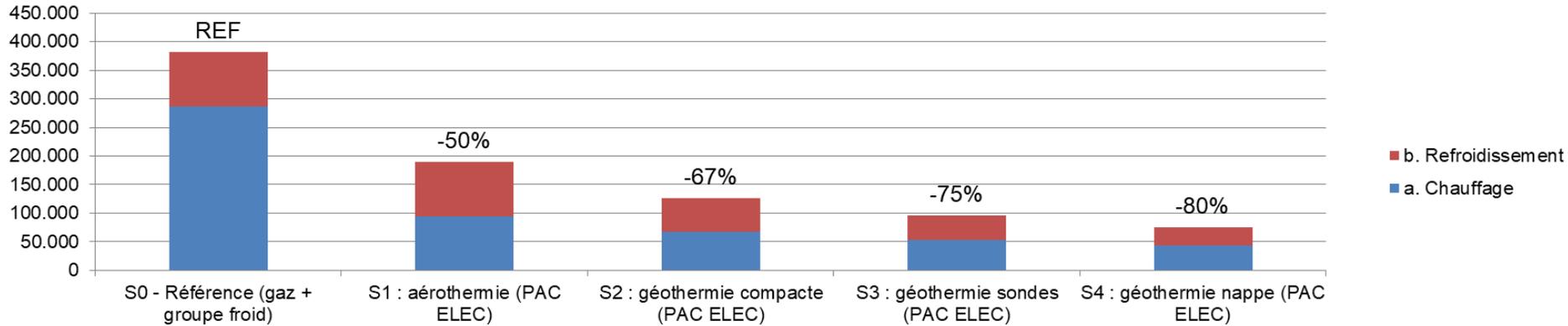
CET EXERCICE A POUR BUT DE DEGAGER DES ORDRES DE GRANDEUR !

- **Valeurs dépendantes de** : balance chaud/froid, puissance, profondeur captages géothermiques, coût énergie (ref. juillet 2022),...
- **Source des hypothèses** : CREG, Bruxelles Environnement, Deplace/Cenergie (facilitateurs), ADEME (FR), AFPG (FR), ...

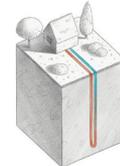
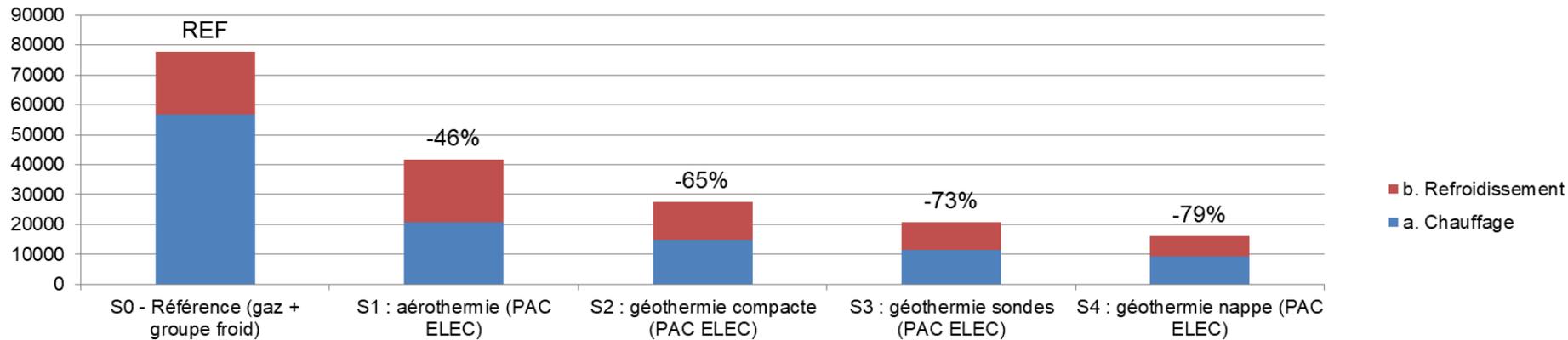


Bilan environnemental et économique

Consommation Energie Finale [kWh/an]



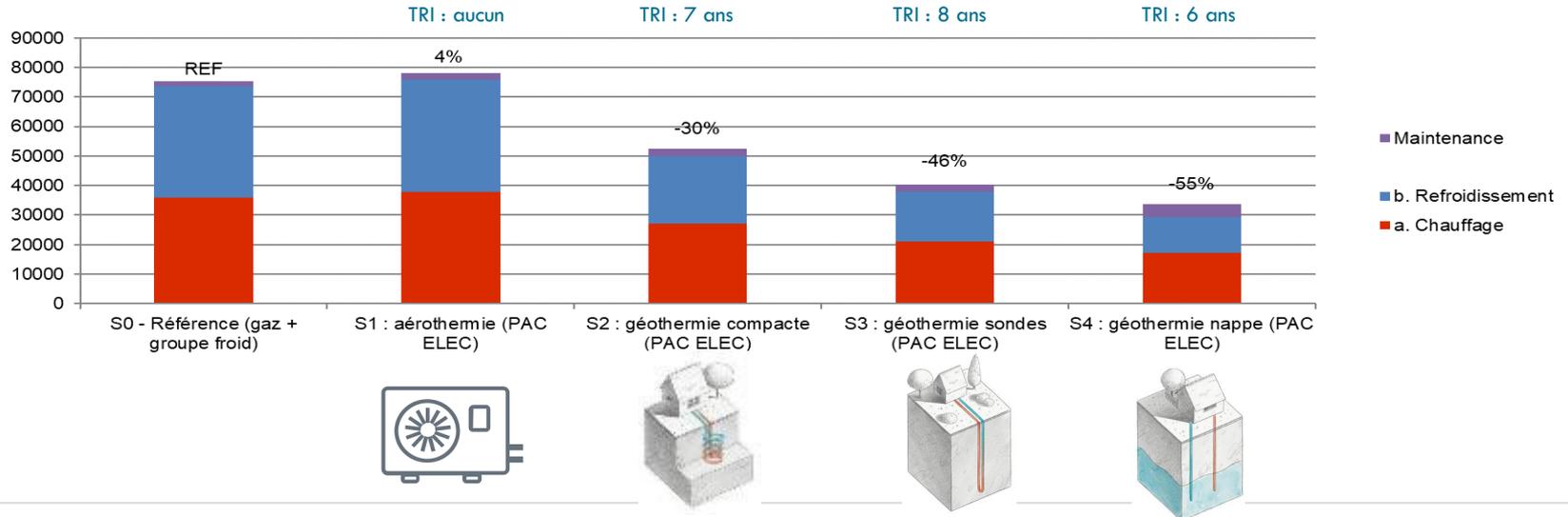
Emissions CO2 [kg/an]



AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES SOLUTIONS

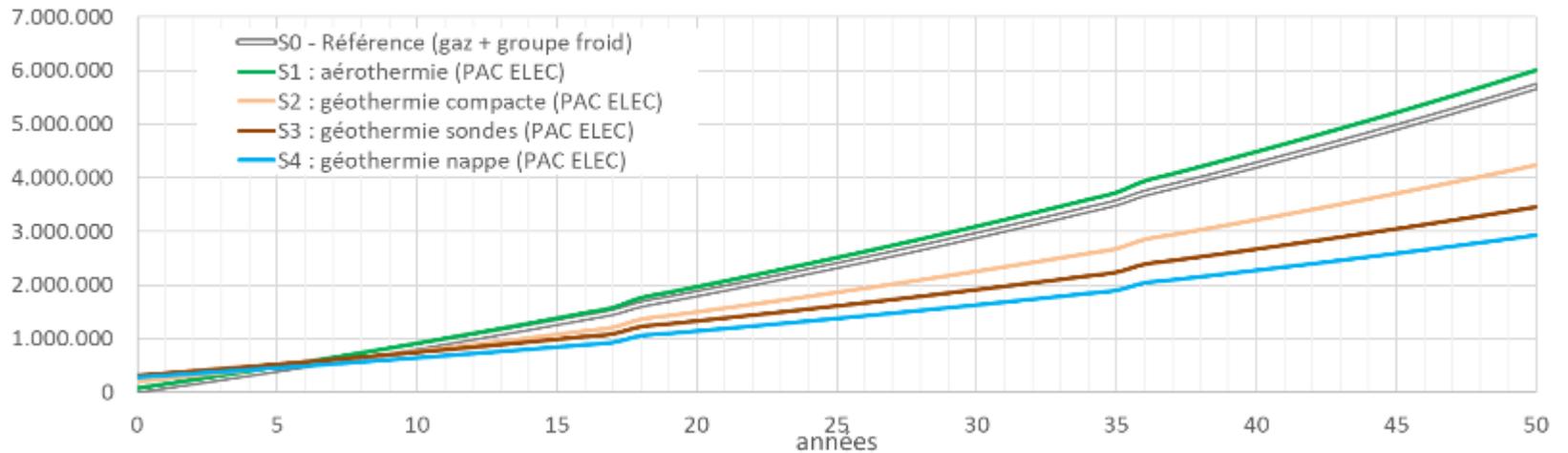
Bilan environnemental et économique

Coûts annuels [€/an]



Coût cumulé (€)

Période de référence : juillet 2022



INTRODUCTION

DIFFÉRENTS TYPES D'INSTALLATION GÉOTHERMIQUE

QUEL SYSTÈME CHOISIR ?

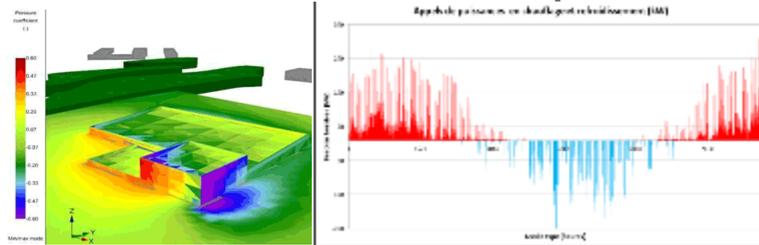
CONCEPTION

BRUGEOTOOL



PHASAGE SYSTÈME FERMÉ EN RBC

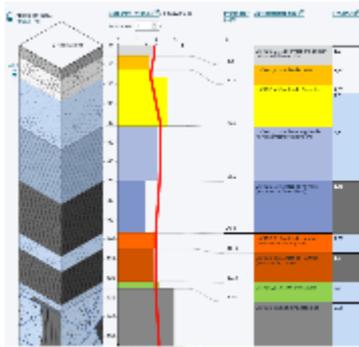
1. Etude des besoins thermiques



2. Préfaisabilité géothermique

Analyse technico écon. & règlem. -> GO/NO GO

Pré-dimensionnement (théorique/ données via BrugeoTool)



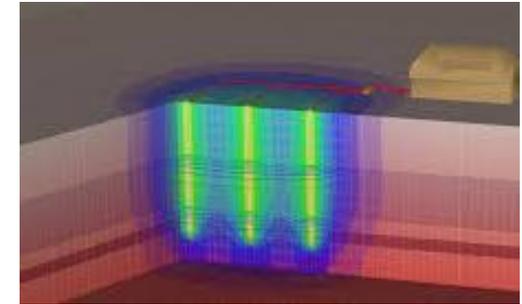
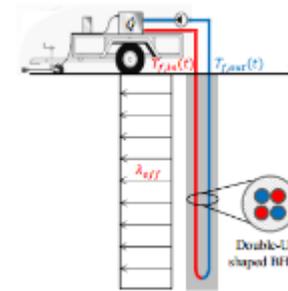
3. Demande de permis environnement

(+ urbanisme + primes)



4. Faisabilité géothermique

Sonde test (TRT) et Dimensionnement



5. PE délivré !

6. Mise en œuvre

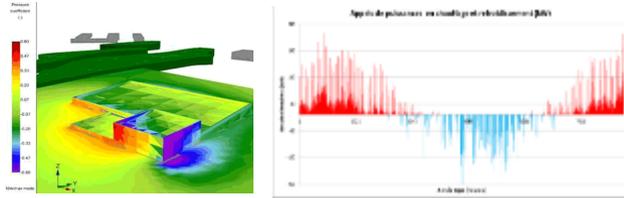


7. Communication des informations as-built



PHASAGE SYSTÈME OUVERT EN RBC

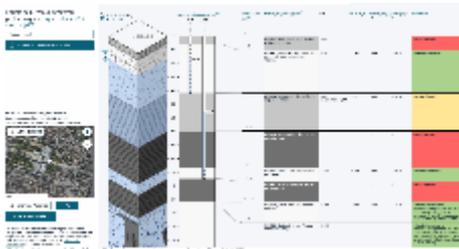
1. Etude des besoins thermiques



2. Préfaisabilité géothermique

Analyse technico écon. & règlement. -> GO/NO GO

Pré-dimensionnement (théorique/ données via BrugeoTool)



3. Faisabilité géothermique

Puits test (essais) et Dimensionnement



(PE)

**Autorisation
de captage !**



4. Demande de permis environnement

(+ urbanisme + primes)

5. PE délivré !

6. Mise en œuvre

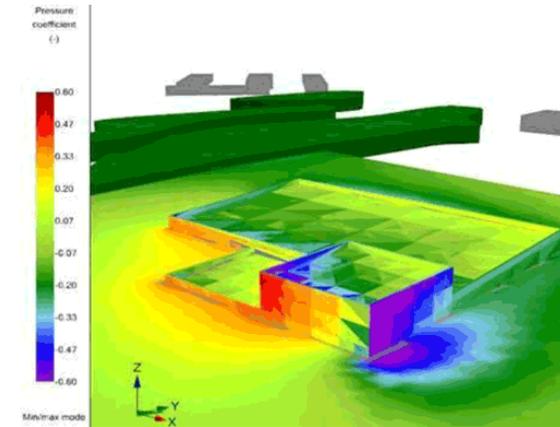
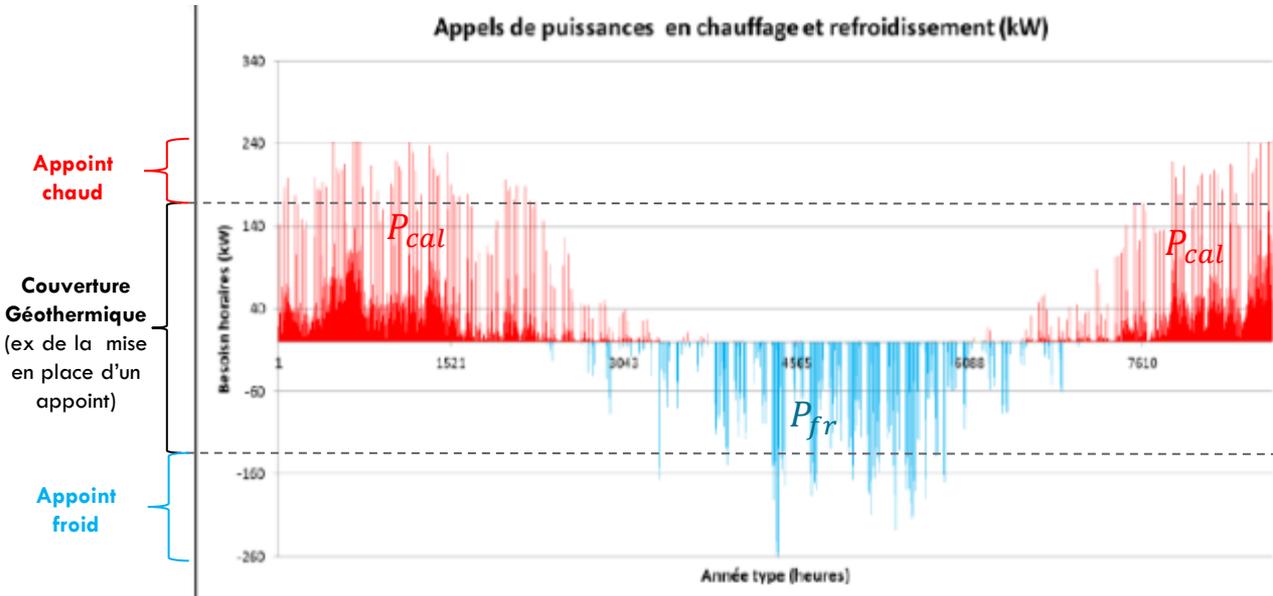


7. Communication des informations as-built



Besoins thermiques du bâtiment

- Simulation Thermique Dynamique (STD)



Source :
Xpair

Besoins à soutirés à la ressource géothermique

PRODUCTION DE CHALEUR

$$P_{ground}(kW) = P_{cal} \times \left(1 - \frac{1}{COP}\right)$$

$$\text{coefficient de performance } COP = \frac{P_{cal}}{P_{electrique}}$$

PRODUCTION DE FROID

$$P_{ground}(kW) = P_{fr} \times \left(1 + \frac{1}{EER}\right)$$

$$\text{coefficient d'efficacité frigorifique } EER = \frac{P_{fr}}{P_{electrique}}$$



Valeurs caractéristiques de conductivité thermique

- ▶ Puissance extraite (25 à 75 W/m) dépend de la conductivité thermique du sol/roche
- ▶ La conductivité thermique (λ) dépend de la géologie
- ▶ A Bruxelles, grand potentiel de la roche (100-150 m profondeur), mais:
 - Géologie très hétérogène et mal connue
 - Nécessite d'autres outils de forage

	Conductivité thermique, λ (W/mK)
Argile saturée	1,9
Sable sec	0,5
Sable saturé	2,3
Schiste	1,9
Calcaire	2,8
Quartzite	5,0



Valeurs caractéristiques de conductivité thermique

	Roche		Conductivité thermique (λ) [W/(m·K)]		Capacité thermique volumique (ρc_p) [MJ]/(m ³ ·K)]	Masse volumique (ρ) [x 10 ³ kg/m ³]	
			Valeur effective	Valeur conseillée			
Non consolidée	Argile/limon, sec		0,40 - 1,00	0,50	1,50 - 1,60	1,80 - 2,00	
	Argile/limon, saturé d'eau		1,10 - 3,10	1,80	2,00 - 280	2,00 - 2,20	
	Sable, sec		0,30 - 0,90	0,40	1,30 - 1,60	1,80 - 2,20	
	Sable, humide		1,00 - 1,90	1,40	1,60 - 2,20	1,90 - 2,20	
	Sable, saturé d'eau		2,00 - 3,00	2,40	2,20 - 2,80	1,90 - 2,30	
	Silice/pierre, sec		0,40 - 0,90	0,40	1,30 - 1,60	1,80 - 2,20	
	Silice/pierre, saturé d'eau		1,60 - 2,50	1,80	2,20 - 2,60	1,90 - 2,30	
	Glaise argileuse/argile		1,10 - 2,90	2,40	1,50 - 2,50	1,80 - 2,30	
	Tourbe, lignite douce		0,20 - 0,70	0,40	0,50 - 3,80	0,50 - 1,10	
Roches sédimentaires	Argile/roche limoneuse		1,10 - 3,40	2,20	2,10 - 2,40	2,40 - 2,60	
	Grès		1,90 - 4,60	2,80	1,80 - 2,60	2,20 - 2,70	
	Conglomérat/brèche		1,30 - 5,10	2,30	1,80 - 2,60	3,30 - 2,70	
	Tuffeau		1,80 - 2,90	2,30	2,20 - 2,30	2,30 - 2,60	
	Calcaire		2,00 - 3,90	2,70	2,10 - 2,40	2,40 - 2,70	
	Dolomite		3,00 - 5,00	3,50	2,10 - 2,40	2,40 - 2,70	
	Roche sulfatée (anhydrite)		1,50 - 7,70	4,10	2,00	2,80 - 3,00	
	Roche sulfatée (plâtre)		1,30 - 2,80	1,60	2,00	2,20 - 2,40	
	Roche évaporite (rocher, sel, carbonate de potassium)		3,60 - 6,10	5,40	1,20	2,10 - 2,20	
	Anthracite		0,30 - 0,60	0,40	1,30 - 1,80	1,30 - 1,60	
Roches magmatiques	Tuf		1,10	1,10	/	/	
	Ebonite, totalement à moyennement acide	Rhyolite, trachyte, p. ex.	3,10 - 3,40	3,30	2,10	2,60	
		Latite, dacite, p. ex.	2,00 - 2,90	2,60	2,90	2,90 - 3,00	
	Ebonite, alcalin à ultra-alcalin	Andésite, basalte, p. ex.	1,30 - 2,30	1,70	2,30 - 2,60	2,60 - 3,20	
	Plutonite, totalement à moyennement acide	Granite	2,10 - 4,10	3,20	2,10 - 3,00	2,40 - 3,00	
		Syénite	1,70 - 3,50	2,60	2,40	2,50 - 3,00	
	Plutonite, alcalin à ultra-alcalin	Diorite	2,00 - 2,90	2,50	2,90	2,90 - 3,00	
Gabbro		1,70 - 2,90	2,00	2,60	2,80 - 3,10		
Roches métamorphiques	Métamorphique légère		Schiste argileux	1,50 - 2,60	2,10	2,20 - 2,50	2,40 - 2,70
			Chert	4,50 - 5,00	4,50	2,20	2,50 - 2,70
	Moyennement à très métamorphique		Marbre	2,10 - 3,10	2,50	2,00	2,50 - 2,80
			Quartzite	5,00 - 6,00	5,50	2,10	2,50 - 2,70
			Schiste	1,50 - 3,10	2,20	2,20 - 2,40	2,40 - 2,70
			Gneiss	1,90 - 4,00	2,90	1,80 - 2,40	2,40 - 2,70
			Amphibolite	2,10 - 3,60	2,90	2,00 - 2,30	2,60 - 2,90

Extrait de la NIT-259 : CSTC -WTBC



Valeurs caractéristiques de conductivité thermique

Type de sol	Puissance spécifique d'extraction	
	Pour 1800 h	Pour 2400 h
Valeurs moyennes :		
Sous-sol pauvre (sédiment sec) ($< 1,50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	25 W/m	20 W/m
Sous-sol normal de roche consolidée et saturée d'eau ($< 1,50 - 3,00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	60 W/m	50 W/m
Roche consolidée avec une conductibilité thermique élevée ($> 3,00 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	84 W/m	70 W/m
Différentes roches :		
Gravier, sable sec	$< 25 \text{ W}/\text{m}$	$< 20 \text{ W}/\text{m}$
Gravier, sable perméable	65 - 80 W/m	55 - 65 W/m
Gravier ou sable et fort écoulement d'eau souterrain – pour systèmes individuels	80 - 100 W/m	80 - 100 W/m
Argile, limon, humide	35 - 50 W/m	30 - 40 W/m
Calcaire	55 - 70 W/m	45 - 60 W/m
Grès	65 - 80 W/m	55 - 65 W/m
Magmatite siliceuse (granite, p. ex.)	65 - 85 W/m	55 - 70 W/m
Magmatite basique (basalte, p. ex.)	40 - 65 W/m	35 - 55 W/m
Diorite	70 - 85 W/m	60 - 70 W/m
Conditions :		
<ul style="list-style-type: none"> • extraction de chaleur uniquement (à des fins de chauffage, y compris la production d'eau chaude) • la longueur des échangeurs géothermiques individuels doit osciller entre 40 et 100 m • le plus petit intervalle entre deux échangeurs géothermiques doit : <ul style="list-style-type: none"> – être de 5 m au moins pour les échangeurs géothermiques entre 40 et 50 m de long – être de 6 m au moins pour les échangeurs géothermiques entre 50 et 100 m de long • les échangeurs géothermiques sont composés soit de conduites doubles en forme de U avec un diamètre de tuyaux DN 10, DN 25 ou DN 32, soit de sondes coaxiales avec un diamètre minimum de 60 mm • pas d'application pour plusieurs petits systèmes dans une zone limitée. 		
Les valeurs peuvent varier sensiblement en raison de la structure des roches (faïençage, foliation, altération, ...).		

Extrait de la NIT-259 : CSTC -WTCB

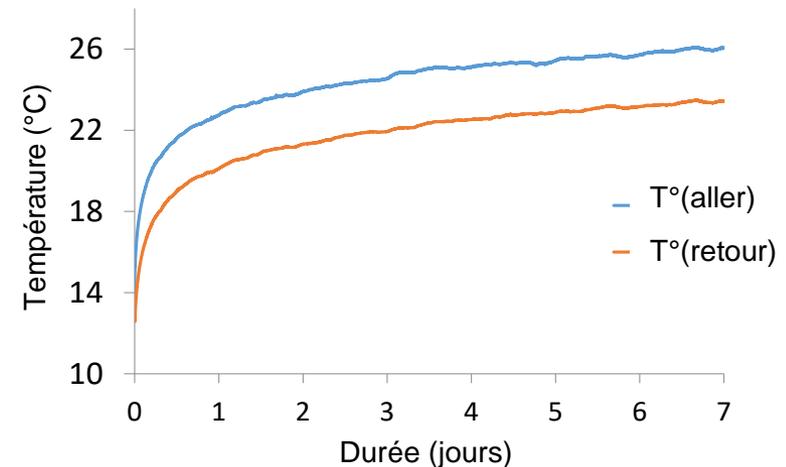


Test de réponse thermique (TRT)

- ▶ Ce test se pratique dans un forage géothermique réalisé au préalable.
- ▶ Le principe est d'**injecter une certaine puissance thermique dans le fluide caloporteur** contenu dans la sonde et d'évaluer la dissipation de cette chaleur dans le sous-sol.
- ▶ Il est possible de déduire de ce test une conductivité moyenne du sous-sol qui peut être utilisée pour le dimensionnement du système géothermique définitif.
- ▶ En faisant circuler le fluide au repos (sans activer le module de chauffage, on obtient également **la température naturelle du sol (T0)**).



Source : Geolys



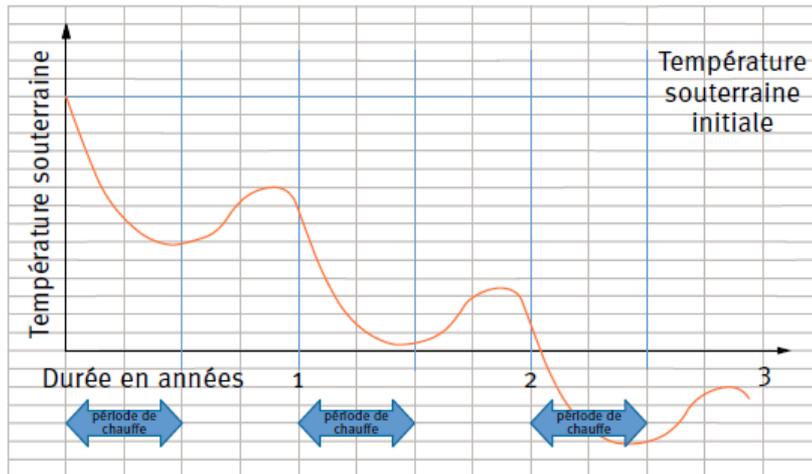
$$T_f(t) - T_0 = k \cdot \ln(t) + m$$

$$\lambda = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot H \cdot k}$$



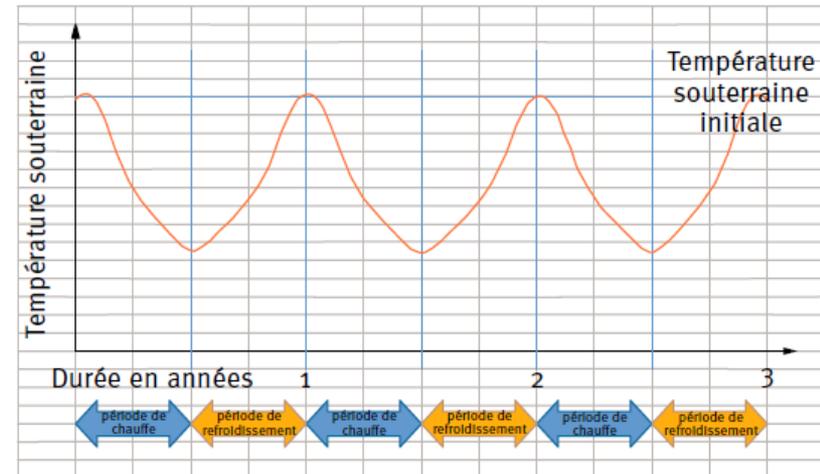
Règles de dimensionnement : objectifs

- Concevoir un système géothermique bien dimensionné, permettant de fournir l'énergie thermique demandée, de manière rentable et durable dans le temps.
 - Un réservoir de chaleur qui s'épuise au fil des années est évidemment à éviter
 - Un système surdimensionné n'est pas non plus conseillé sous peine de mauvaise rentabilité financière



Système mal dimensionné

Épuisement du réservoir de chaleur suite à une demande en chaud trop importante



Système bien dimensionné

La recharge thermique en été compense la demande de chaud en hiver

Source : CSTC-WTCB - NIT 259



Règles de dimensionnement : systèmes simples / systèmes complexes

- ▶ **Pour les petits systèmes ou les systèmes simples**, les éventuels bénéfices d'une étude approfondie ne compensent pas les frais supplémentaires.
- ▶ Par contre, **pour un système grand et complexe**, une telle étude est toujours recommandée afin d'optimiser le système.
- ▶ Nous n'aborderons ici que les règles de dimensionnement de base pour des systèmes simples. Quant aux systèmes complexes, il nécessite des calculs numériques dynamiques ou semi-dynamiques s'appuyant sur des modèles de simulation (EED, TRNSYS).
- ▶ **Un système simple** est caractérisé par (voir la norme NBN EN 15450) :
 - une puissance maximale < 30 kW
 - un mode de fonctionnement monovalent avec un maximum de 2400 heures de fonctionnement à charge pleine/an
 - une distance minimale entre les forages de 5 m (jusqu'à 50 m de profondeur) ou de 6 m (à partir de 50 m).



Méthode basée sur une puissance spécifique d'extraction

- ▶ La méthode vise à déterminer la longueur totale requise de l'échangeur géothermique en fonction de la puissance maximale devant être extraite et de la puissance spécifique d'extraction.

$$P_{\text{ground}} = \frac{P_{\text{heating}}}{\text{SPF}} \cdot (\text{SPF} - 1)$$

Source extérieure de puissance (électricité)

1/SPF

(SPF-1)/SPF

Flux énergétique

1

(fourni par le sol)

- P_{ground} = la capacité d'évaporation de la pompe à chaleur [W]
- P_{heating} = la capacité de chauffage de la pompe à chaleur [W ou kW]
- SPF = le rendement saisonnier, déterminé conformément à la réglementation PEB

- ▶ **Exemple :** $P_{\text{heating}} = 13.3 \text{ kW}$; $\text{SPF} = 4 \rightarrow P_{\text{ground}} = 9.97 \text{ kW}$
 $\text{SPF} = 3.5 \rightarrow P_{\text{ground}} = 9.5 \text{ kW}$



Méthode basée sur une puissance spécifique d'extraction

Systèmes horizontaux (source: www.energieplus-lesite.be)



► Extraction par mètre courant:

- sol sablonneux sec : 10 W/m
- sol argileux humide : 25 W/m
- sol argileux saturé : 35 W/m
- roche dure : 50 W/m
- granit : 55-70 W/m

► Espacement des serpentins

- 1 m en cas de sol sec
- 0,7 m en cas de sol humide
- 0,5 m en cas de sol sablonneux ou caillouteux saturé

► Exemple

- Puissance PAC (P_{heating}): 13,3kW ; SPF: 3,5 $\rightarrow P_{\text{ground}} = 9,5 \text{ kW}$
- Serpentin dans sol argileux saturé = $9500 / 35 = 271 \text{ m} \rightarrow \times 0.7 \text{ m} = 190 \text{ m}^2$
- Serpentin dans sol sablonneux sec = $9500 / 10 = 950 \text{ m} \rightarrow \times 1 \text{ m} = 950 \text{ m}^2$



Méthode basée sur une puissance spécifique d'extraction

Systemes verticaux (source: NBN EN 15450)



► Exemple

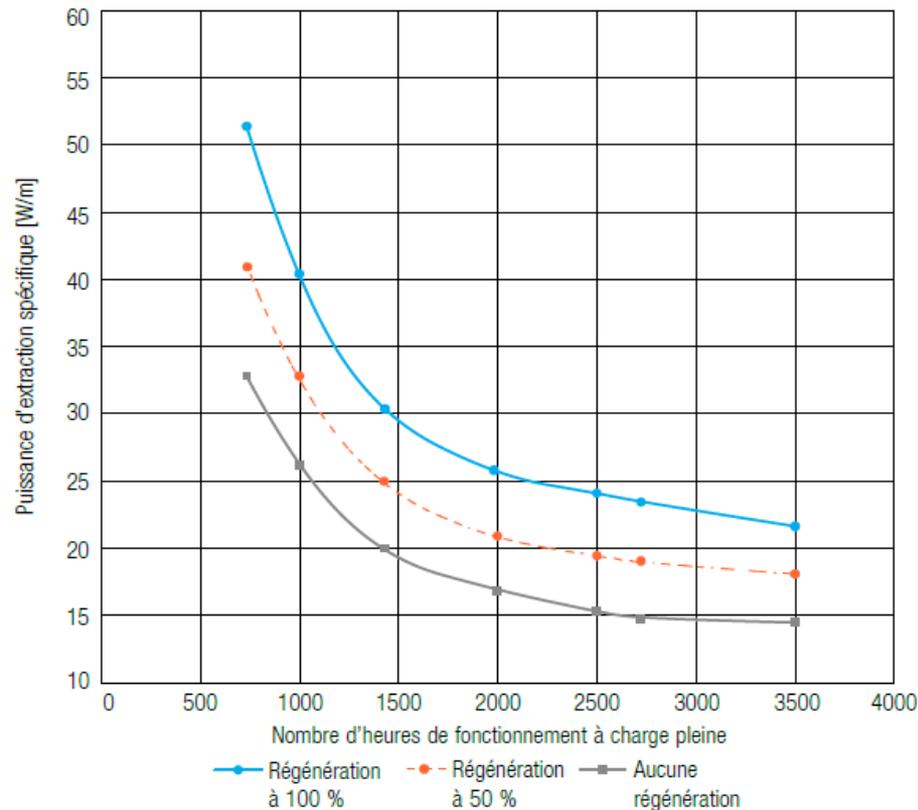
- Puissance PAC: 13,3kW ; SPF: 4 $\rightarrow P_{\text{ground}} = 9,97 \text{ kW}$
- Forage verticaux dans sol saturé pendant 1.800 h/an = $9.970 / 60 = 166 \text{ m}$
- Forage verticaux dans sol sec pendant 2.400 h/an = $9.970 / 20 = 498 \text{ m}$



Méthode basée sur des facteurs de correction (Source: ISSO 73)

- Estimation préliminaire de la longueur de sonde: $L_{\text{sonde}} = P_{\text{sol}} / P_{\text{spec}}$

$P_{\text{spec}} = f(\text{Régénération, heure fonctionnement})$



Méthode basée sur des facteurs de correction (Source: ISSO 73)

- ▶ **Facteurs correctifs:** $L_{\text{sonde,final}} = L_{\text{sonde}} \times C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_n$
 - Type de sol (conductivité thermique médiocre, moyenne, bonne)
 - Matériau de remplissage (sable, bentonite moyenne, bentonite faible)
 - Température minimum du fluide (de -5°C à +5°C)
 - Type de sonde (simple U, double U, coaxial)
 - Configuration du champs de sonde 
 - Inter-distance entre sondes (de 3 à 10 m)
- ▶ **Outil de dimensionnement en ligne** (BrugeoTool) basé sur cette méthode (Voir fin de cette présentation)
- ▶ **Document complet:** ISSO73 – ISSO-publicatie 73 - Ontwerp en uitvoering van verticale bodemwarmtewisselaars - ISBN: 978-90-5044-308-1



Autres normes

- **Suisse: SIA 386-6-2010** : Se base sur un cas de base (L=100m; $D_{\text{tuyau}}=32\text{mm}$; Double U; $\lambda_{\text{coulis}}=0,85 \text{ W/mK}$; $T_{\text{soil}}=10^\circ\text{C}$; 1850 h/year) et applique ensuite des coefficients de majoration

Figure 7 Puissance nominale pour 1 SG de 100 m, \varnothing 32 mm, duplex, à 10°C de température du sol moyenne et 1850 h de pleine charge, avec différentes conductivités thermiques et capacités thermiques du terrain

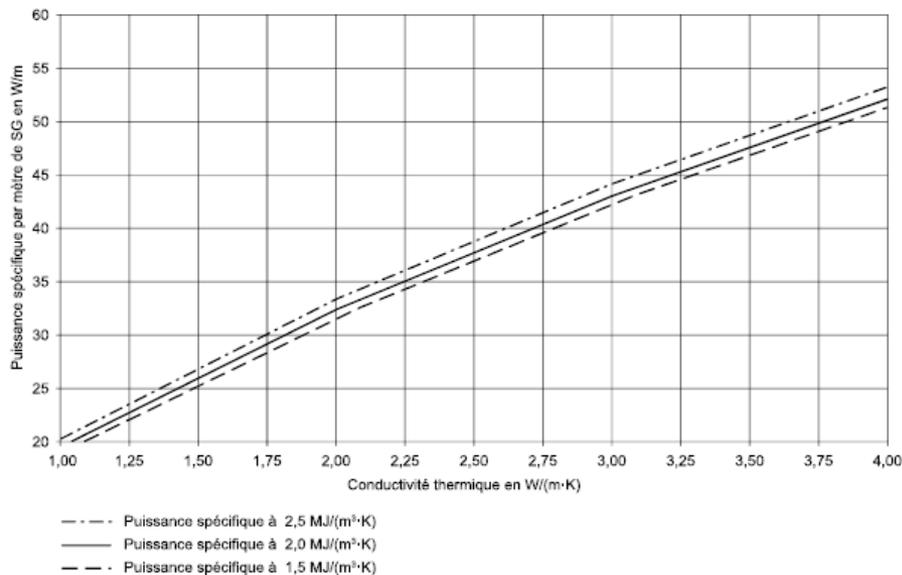
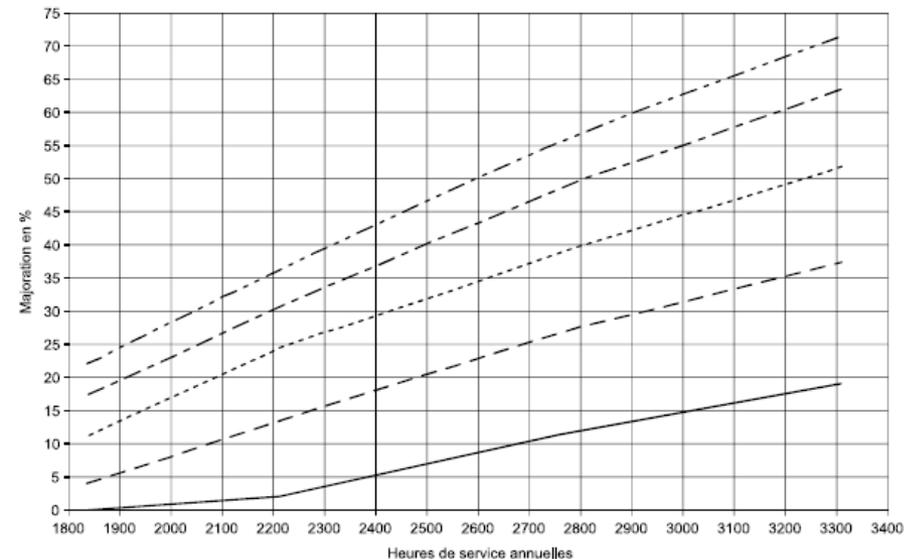


Figure 11 Majoration de longueur de sonde géothermique en fonction des heures de service et la disposition de SG avec une conductivité thermique de 2 W/(m·K) et 5 m de distance entre les sondes

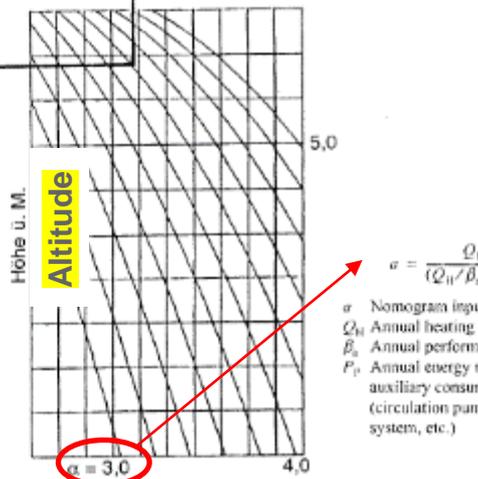
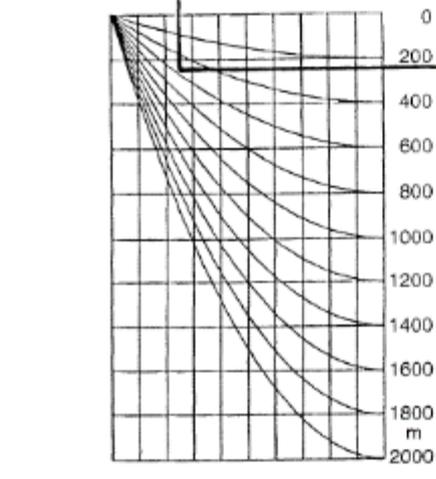
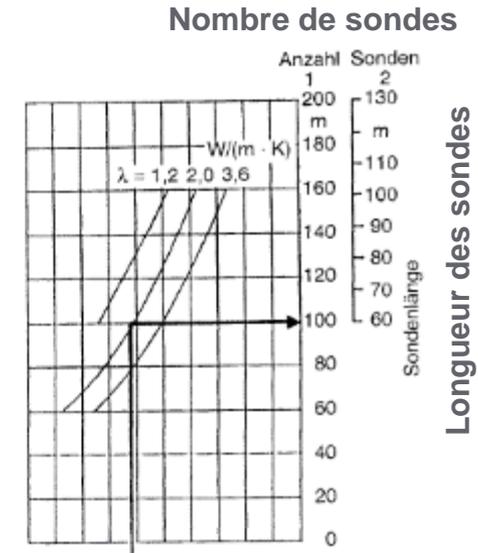
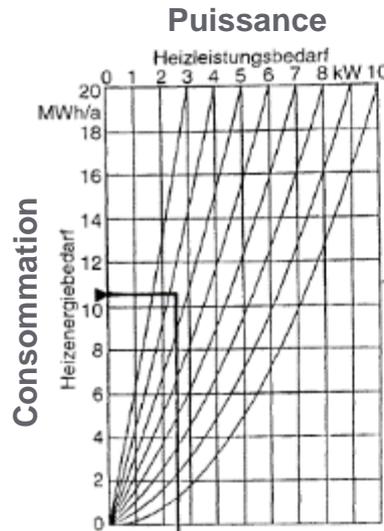


Une multitude d'abaques pour différentes combinaison de paramètres



Autres normes

- ▶ Allemagne: VDI 4640



$$\alpha = \frac{Q_H}{(Q_H/\beta_s) - P_p}$$

α Nomogram input value
 Q_H Annual heating energy requirement (kWh/a)
 β_s Annual performance factor
 P_p Annual energy requirement of the auxiliary consumers (circulation pumps, heat source system, etc.) (kWh/a)

Bild 5. Nomogramm zur Auslegung von Erdwärmesonden (Einsatzgrenzen siehe Abschnitt 5.1.1)

Fig. 5. Nomogram for designing borehole heat exchangers (deployment limits see Section 5.1.1).



Utilisation d'un logiciel numérique (solution analytique)

- EED (Earth Energy Designer)
 - Paramètres d'entrée (exemple)

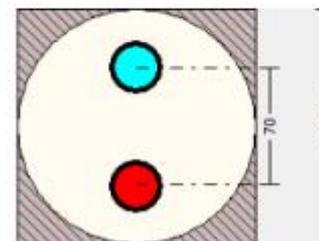
Values from database:	Thermal Conductivity	2.80 W/(m*K)
	Volumetric Heat Capacity	2.30 MJ/(m ³ *K)
	Ground Surface Temperature	16.20 °C
	Geothermal Heat Flux	0.08 W/m ²

As the site is outside of a city and no further information on the underground is known, the database values are taken without adaptation.

Borehole Data: As a start, 2 BHE 6 m apart and each 100 m deep are considered, with a search for optimum depth later. The following values reflect Mediterranean practice, with single-U-tube BHE made of PE with SDR11.

Borehole Data:	Type	Single-U
	Configuration	No. 1 (2 BHE)
	Depth	100 m
	Spacing	6 m
	Diameter	139.7 mm (5½")
	Contact resistance	0.1 (m*K)/W (value for not fully grouted borehole)
	Filling thermal conductivity	0.8 W/(m*K) (standard bentonite/cement grout)
	Vol. flow rate per BHE	2.0 l/s

U-Pipe Data:	Outer diameter	32 mm
	Wall thickness	3.0 mm
	Thermal conductivity	0.42 W/(m*K)
	Shank spacing	70 mm



Graph of BHE cross-section as prepared by EED

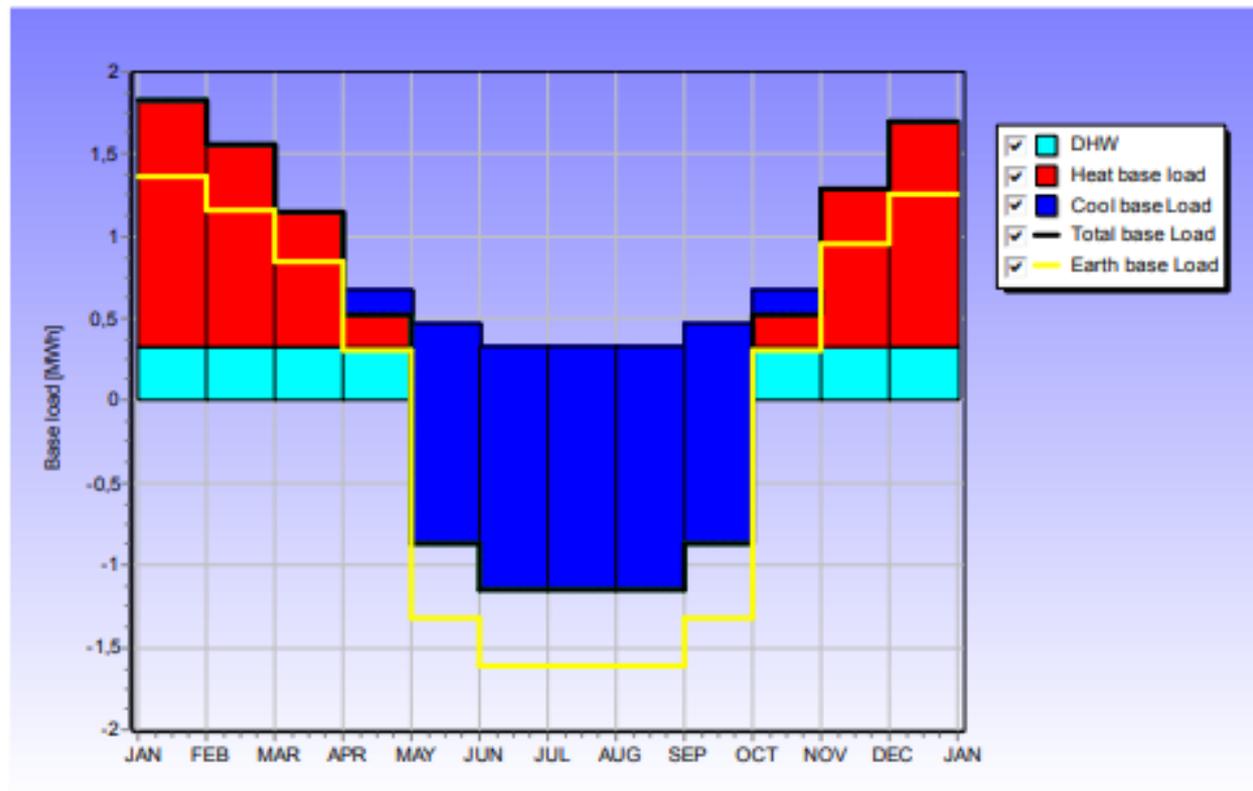
Heat Carrier Fluid: The values for pure water are selected, at 10 °C average temperature:

Thermal conductivity	0.58 W/(m*K)
Specific heat capacity	4192 J/(kg*K)
Density	999.8 kg/m ³
Viscosity	0.0013 kg/(m*s)
Freezing point	0 °C



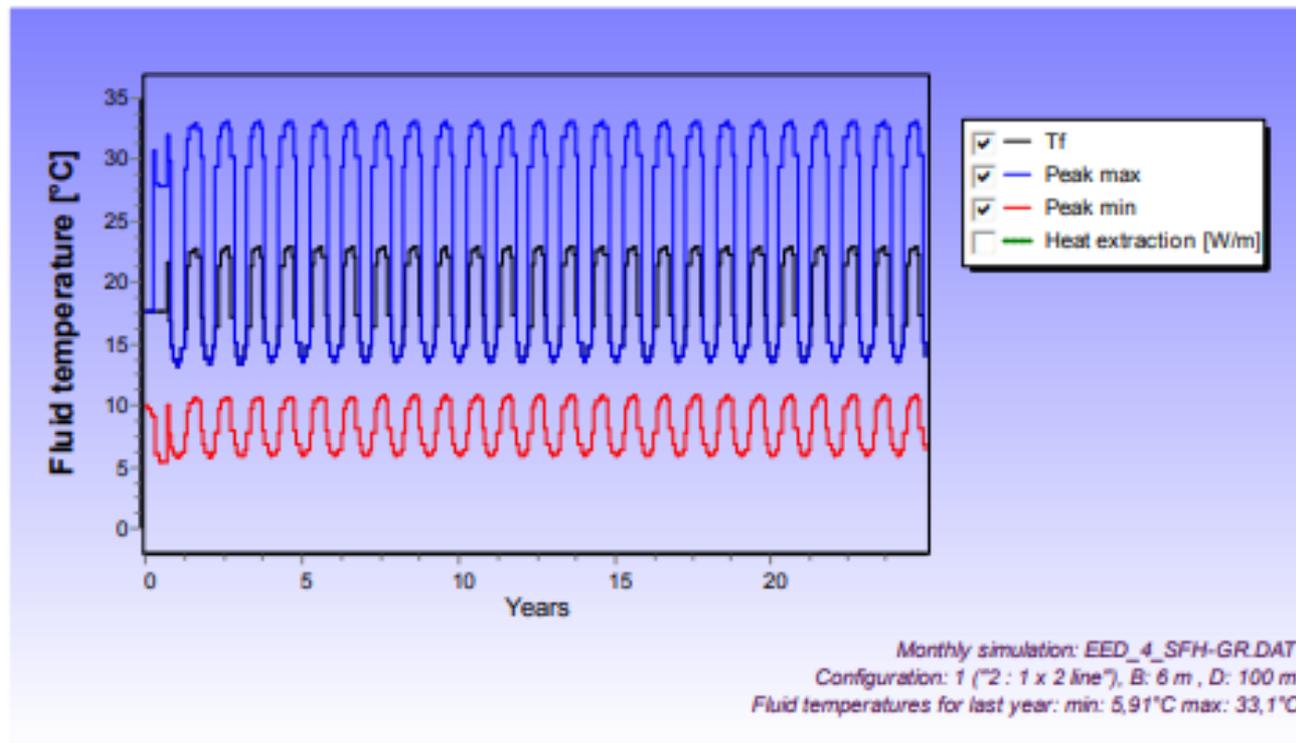
Utilisation d'un logiciel numérique (solution analytique)

- ▶ EED (Earth Energy Designer)
 - Charge thermique (exemple de données mensuelles)



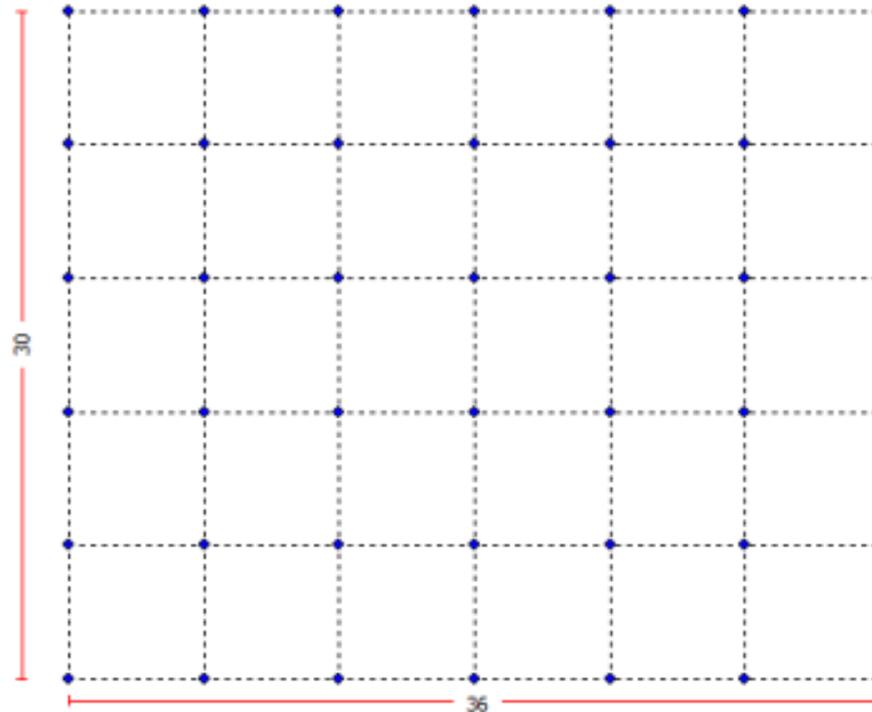
Utilisation d'un logiciel numérique (solution analytique)

- ▶ EED (Earth Energy Designer)
 - Résultats (Température du fluide et du sol (min, max))



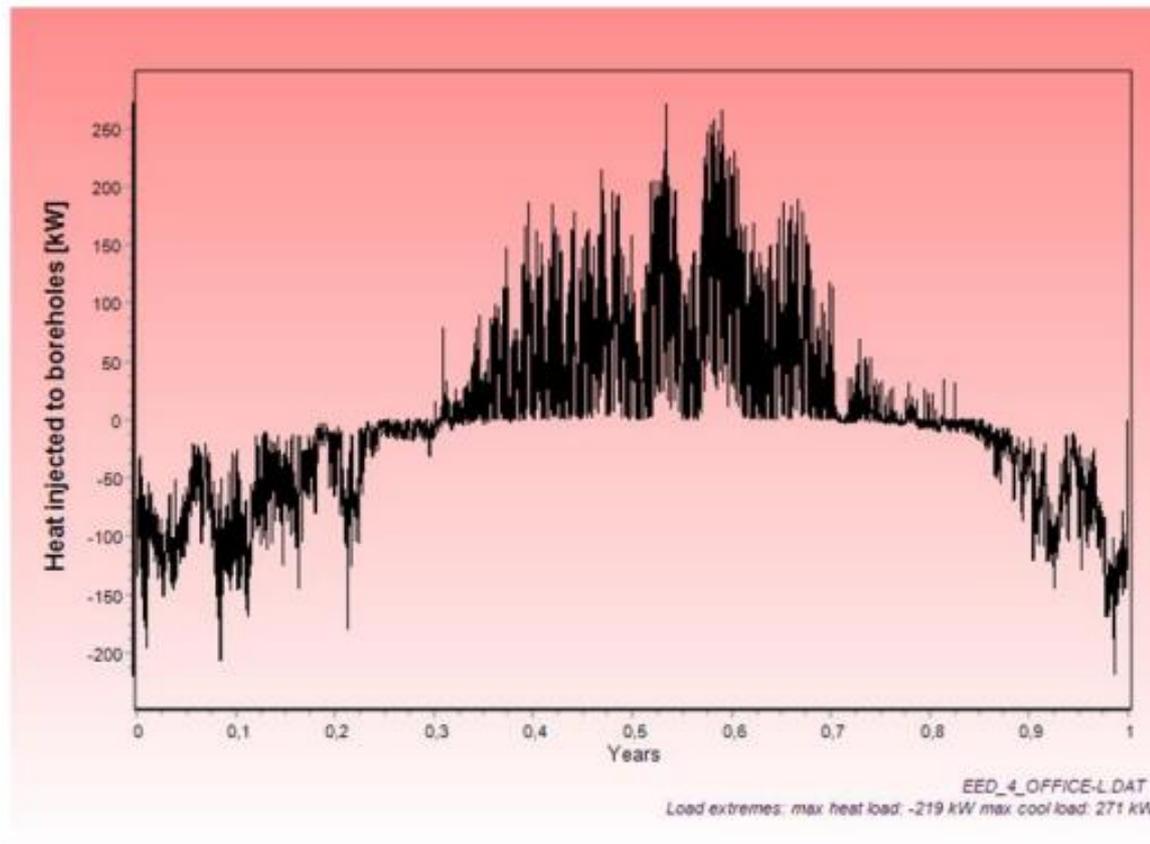
Utilisation d'un logiciel numérique (solution analytique)

- ▶ EED (Earth Energy Designer)
 - Configuration champs de sonde (Exemple: 6 x 7 – grille régulière)



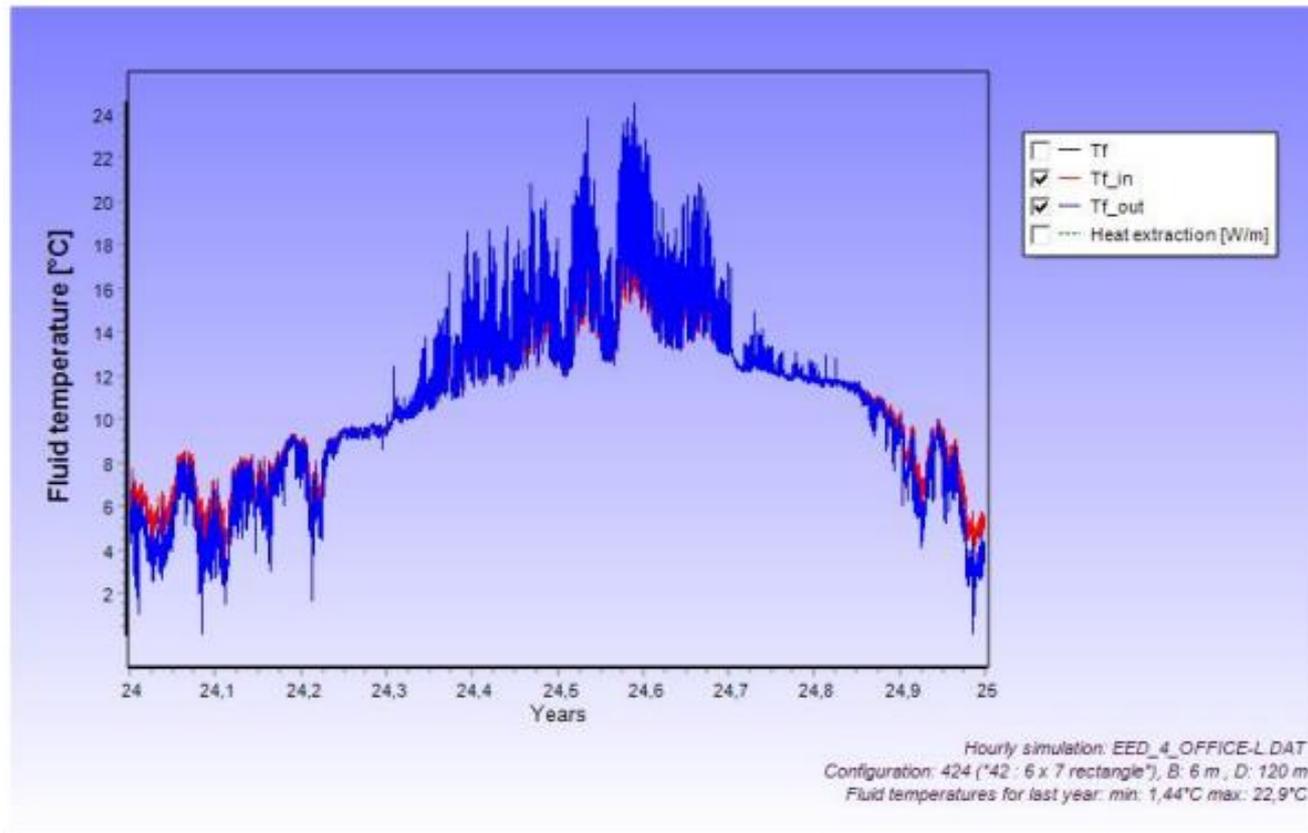
Utilisation d'un logiciel numérique (solution analytique)

- ▶ EED (Earth Energy Designer)
 - Charge thermique (exemple de données horaires)



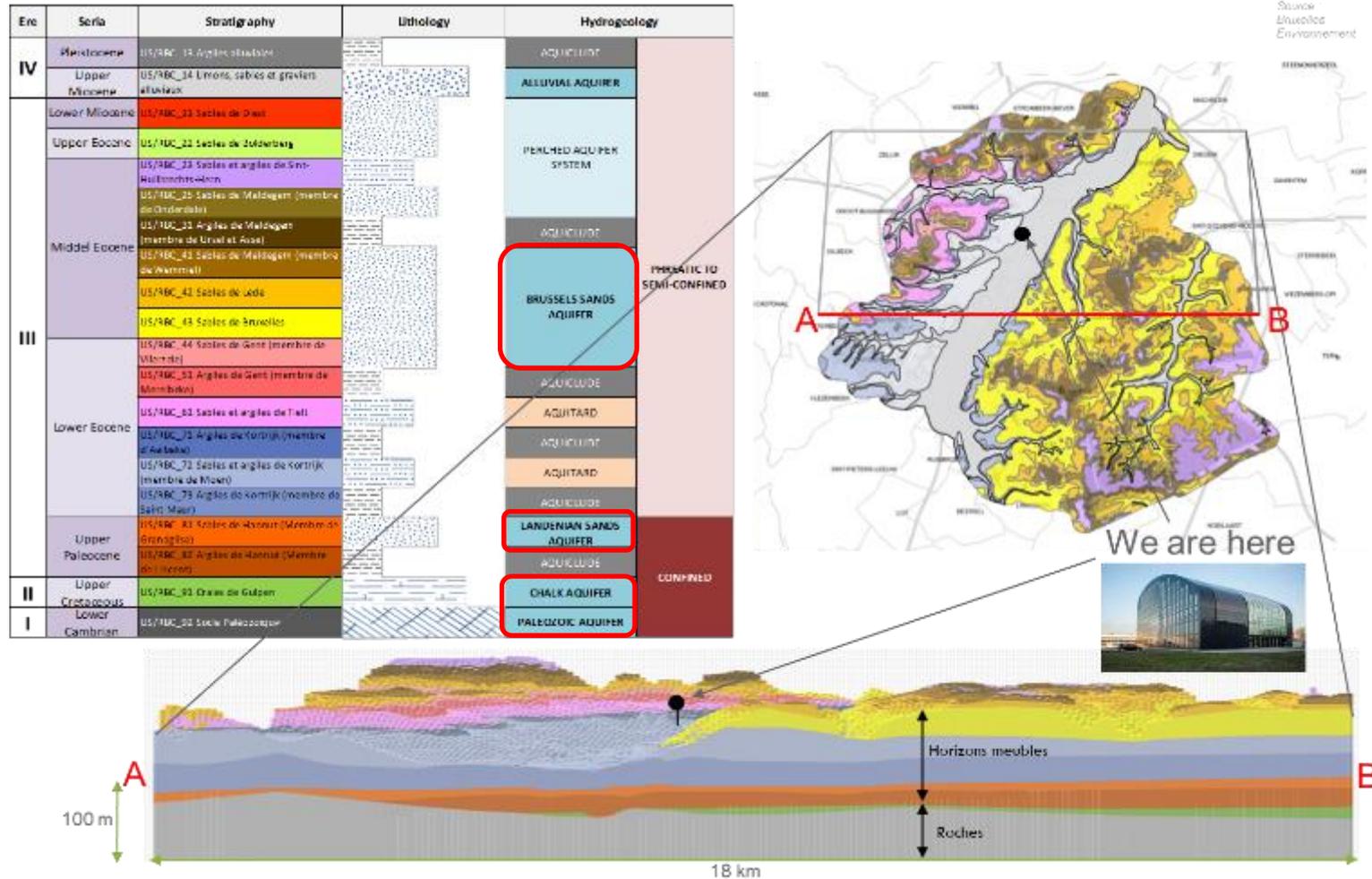
Utilisation d'un logiciel numérique (solution analytique)

- ▶ EED (Earth Energy Designer)
 - Résultats (Température du fluide et du sol (min, max))



Pré faisabilité -> GO/NO GO

- **Volet technique :** *Un aquifère productif et compatible avec un usage géothermique est-il présent ?*



Pré faisabilité -> GO/NO GO

- **Volet technique** : *Un aquifère productif et compatible avec un usage géothermique est-il présent ?*

Ere	Seria	Stratigraphy	Lithology	Hydrogeology	
IV	Pleistocene	US/RBC_13 Argiles alluviales		AQUICLUDE	
	Upper Miocene	US/RBC_14 Limons, sables et graviers alluviaux		ALLUVIAL AQUIFER	
III	Lower Miocene	US/RBC_21 Sables de Diest		PERCHED AQUIFER SYSTEM	
	Upper Eocene	US/RBC_22 Sables de Bolderberg			
	Middel Eocene		US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilbrechts-Hern		PHREATIC TO SEMI-CONFINED
			US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)		
			US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Urssel et Asse)		
			US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)		
			US/RBC_42 Sables de Lede		
	US/RBC_43 Sables de Bruxelles		BRUSSELS SANDS AQUIFER		
III	Lower Eocene	US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)		AQUICLUDE	
		US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)		AQUITARD	
		US/RBC_61 Sables et argiles de Tielit		AQUICLUDE	
		US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)		AQUITARD	
		US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen)		AQUICLUDE	
		US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)		AQUICLUDE	
II	Upper Paleocene	US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)		LANDENIAN SANDS AQUIFER	
		US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lincent)		AQUICLUDE	
I	Upper Cretaceous	US/RBC_91 Craies de Gulpen		CHALK AQUIFER	
I	Lower Cambrian	US/RBC_92 Socle Paléozoïque		PALEOZOIC AQUIFER	

Source :
Bruxelles
Environnement

AQUIFERE DES SABLES DU BRUXELLIEN

Potentiel : 70 – 350 kW / doublet

Limites potentiel :

- > disponibilité limitée à l'Est de la RBC, sur les plateaux
- > risques de colmatage élevés

Indice de qualité de la ressource : 0 à 2/3

AQUIFERE DES SABLES DU LANDENIEN

Potentiel : 70 – 100 kW / doublet

Limites potentiel :

- > débits limités

Indice de qualité de la ressource : 2/3 (valeur sure)

AQUIFERE DES CRAIES DU CRETACE ET DU SOCLE PALEOZOIQUE

Potentiel : 0 – 700 kW / doublet

Limites potentiel :

- > débits potentiellement très élevés mais incertains

Indice de qualité de la ressource : 0 à 3/3



Pré faisabilité -> GO/NO GO

► Volet réglementaire :

- > zone de protection captage = **NO GO**
- > Zone d'exclusion métro Nord = **NO GO**
- > Pollutions de sol = conditions
- > Natura 2000 = conditions
- > Prescriptions imposées

Ex : T° réinjection

0 – 25°C (système fermé)

4 – 25°C (système ouvert)

geodata.environnement.brussels > BRUGETOOL

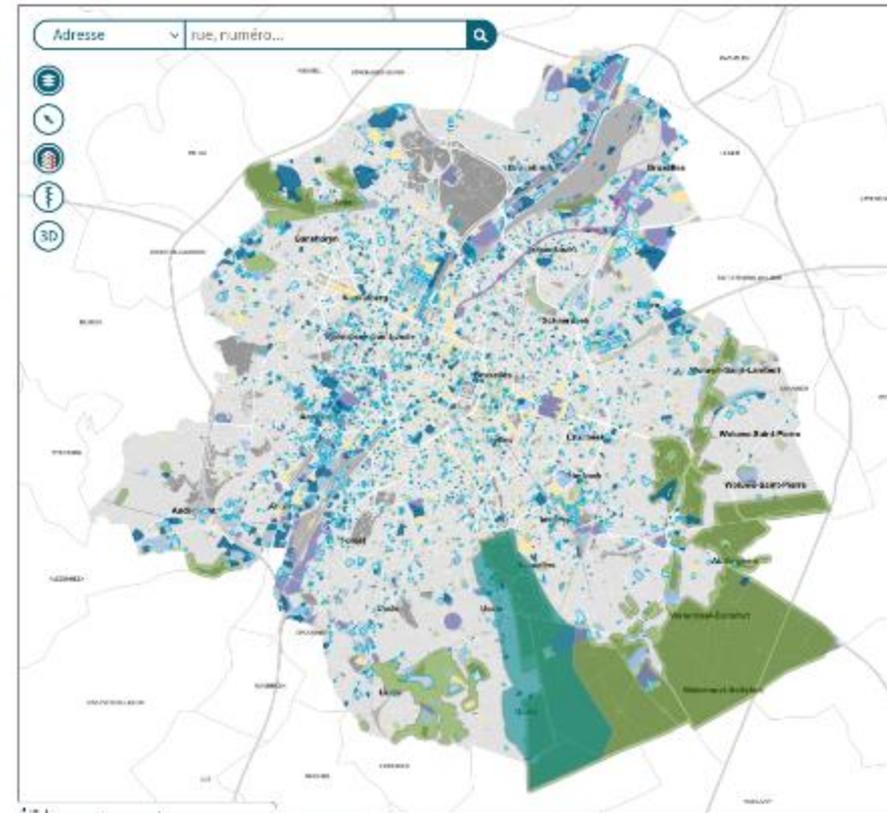
Gestionnaire De Données

Données Légendes

Données environnementales

- Zone de protection de captage d'eau souterraine pour l'eau potable
 - Zone de contrainte du tracé métro Nord
- Inventaire de l'état du sol - Version publique
- Parcelle potentiellement polluée (Catégorie 0)
 - Parcelle non polluée (Catégorie 1)
 - Parcelle légèrement polluée sans risque (Catégorie 2)
 - Parcelle polluée sans risque (Catégorie 3)
 - Parcelle polluée en cours d'étude ou de traitement (Catégorie 4)
 - Parcelle en catégorie 0+1
 - Parcelle en catégorie 0+2
 - Parcelle en catégorie 0+3
 - Parcelle en catégorie 0+4
 - Zone d'incidences sur Natura 2000 et réserves (50m)

Montrer la légende du fond de carte



Faisabilité : Forage test et essais

- ▶ Essais de pompage par paliers
- ▶ Essais de réinjection
- ▶ Essais de pompage longue durée
- ▶ Analyse physico-chimique
- ▶ Flowtest
- ▶ Autres (Caméra, logging, essais traçage,...)



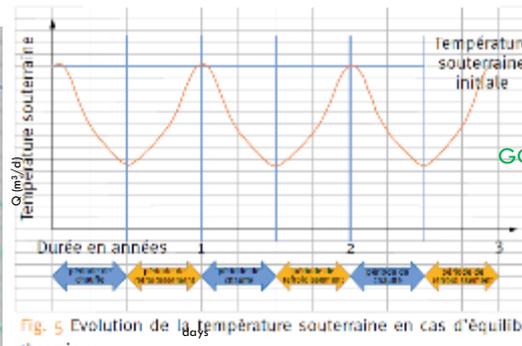
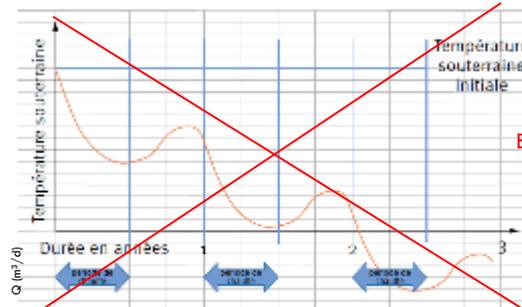
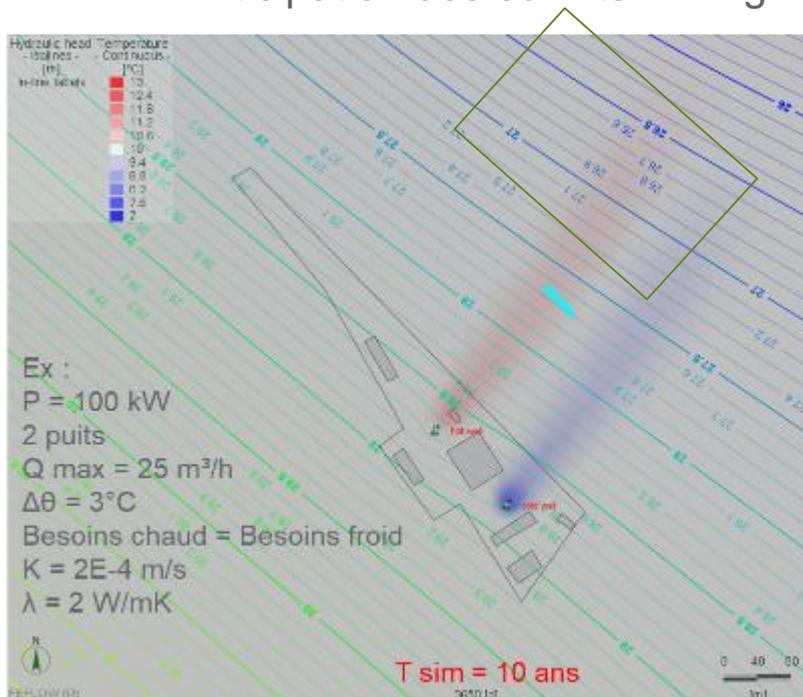
Source :
Bruxelles
Environnement



Faisabilité : Dimensionnement

► Modélisation numérique (FEFLOW, MODFLOW,...)

- Pérennisation du système (on cherche un équilibre thermique et respect des range de T° imposés)
- Impacts piézométrique (long terme)
- Impacts thermique (long terme)
- Anticipation des conflits d'usage sur les captages et systèmes géothermiques voisins



Source :
CSTC



INTRODUCTION

DIFFÉRENTS TYPES D'INSTALLATION GÉOTHERMIQUE

QUEL SYSTÈME CHOISIR ?

CONCEPTION

BRUGEOTOOL



Outils pour la pré-faisabilité et le pré-dimensionnement



environnement.brussels 

THÈMES ▾

GUICHET ▾

ACTION DE LA RÉGION ▾

AGIR AU QUOTIDIEN ▾

DOCUMENTATION ET CARTES

ACTUALITÉS

GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

- > Géologie

- > Eaux souterraines +

- > Géothermie +

- > Outils et Données -

- » **BrugeoTool : L'application "sous-sol et géothermie" de la région de Bruxelles-Capitale**
- » BruWater : L'application pour les données sur les eaux de surface et les eaux souterraines
- » Brustati3D : Modèle géologique bruxellois (raster)
- » Cartes géotechniques de Bruxelles digitalisées (vecteur, raster)
- » Catalogue des données géologiques et hydrogéologiques (vecteur)

Professionnels 

Ecoles 

Géologie et hydrogéologie > Outils et Données

> **BrugeoTool : L'application "sous-sol et géothermie" de la région de Bruxelles-Capitale**

BrugeoTool : L'application "sous-sol et géothermie" de la région de Bruxelles-Capitale



Outil géoscientifique professionnel « tout en un », **BrugeoTool** permet l'exploration détaillée de la **géologie**, de l'**hydrogéologie** et des **potentialités géothermiques** en région bruxelloise au travers d'outils de **visualisation 1D, 2D et 3D**.

Dans la perspective du développement de la **géothermie verticale faible**

profondeur en région bruxelloise (<300m), qui est une énergie renouvelable pour le **chauffage et le refroidissement** des bâtiments favorisant la décarbonation du mix énergétique, **BrugeoTool** se veut un outil utile à toute étape d'un projet de géothermie **pour le gestionnaire de projet comme pour l'expert**.

Application BrugeoTool



[LIEN INTERNET](#)





Normes

- ▶ **NBN EN 15450:2008** - Systèmes de chauffage dans les bâtiments. Conception des systèmes de chauffage par pompe à chaleur.
- ▶ **VDI 4640 – Part 2** - Thermal use of the underground – Ground source heat pump systems
- ▶ **SIA 386-6-2010** - Sondes géothermiques
- ▶ **ISSO 73** - Ontwerp and uitvoering van vertical bodemwaarmtewisselaars



BrugeoTool

- ▶ [Lien Internet](#)



Sites internet

<https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/geothermie>
www.geothermie.brussels
www.smartgeotherm.be
www.energieplus-lesite.be



Ouvrages

- ▶ CSTC – Note technique d’information (NIT) 259 - Géothermie peu profonde, Conception et mise en œuvre de systèmes avec échangeurs en forme de U



Mathieu AGNIEL

Hydrogéologue

BrugeoTool Manager

Bruxelles Environnement

☎ + 32 488 23 04 98

✉ magniel@environnement.brussels

**Bertrand FRANCOIS**

Professeur

Université de Liège

+ 32 4 366 92 32

bertrand.francois@uliege.be



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

