

# FORMATION BÂTIMENT DURABLE

## POMPE À CHALEUR : CHOIX ET CONCEPTION

PRINTEMPS 2025



**La géothermie très basse énergie sur nappe et sur sondes  
en région bruxelloise**

Mathieu AGNIEL



- ▶ Comprendre les principes de la géothermie très basse énergie
- ▶ Identifier les solutions techniques permettant de capter cette énergie
- ▶ Avoir un aperçu du parc d'installations existantes en RBC
- ▶ Appréhender la pertinence des solutions de géothermie en fonction de la typologie du projet
- ▶ Appréhender les facettes d'un projet de géothermie très basse énergie dans le contexte de la région bruxelloise
- ▶ Appréhender les méthodes de dimensionnement
- ▶ Découvrir l'outil BrugeoTool pour la préfaçabilité (et le prédimensionnement d'une installation via Smartgeotherm)



## **LA GEOTHERMIE**

LES SOLUTIONS

SYNTHESE COMPARATIVE / CHOIX

LE PROJET DE GEOTHERMIE EN RBC

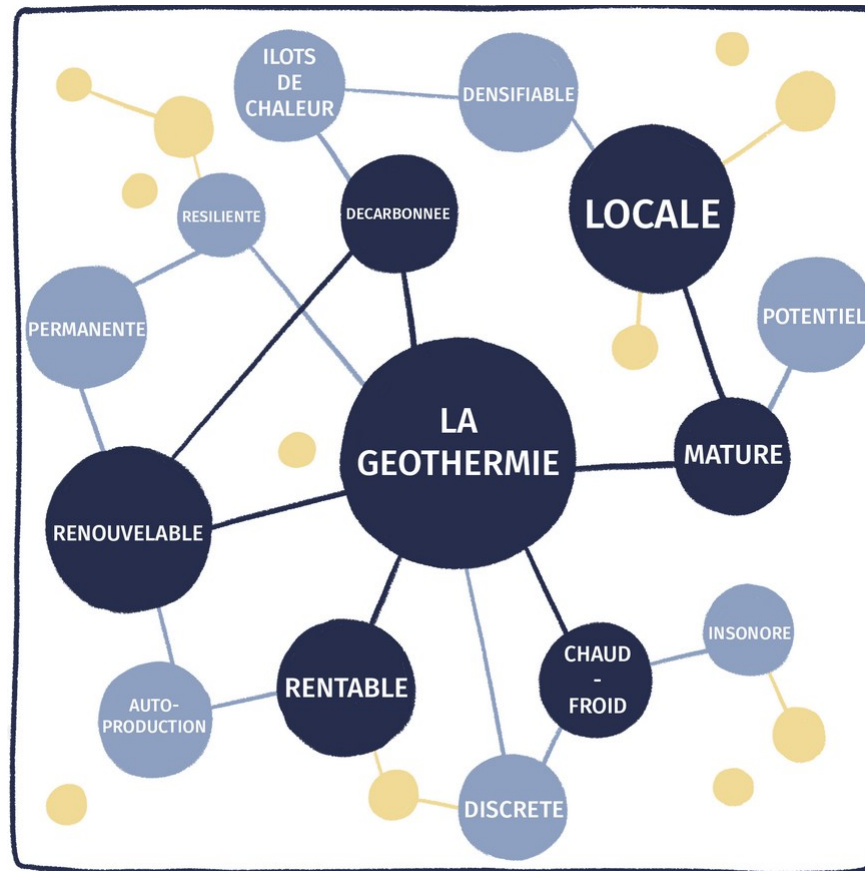
DIMENSIONNEMENT

BRUGEOTOOL/SMARTGEOTHERM



## Quels sont les avantages d'un système géothermique ?

- ▶ De nombreux avantages
- ▶ Mais aussi des impacts à maîtriser.



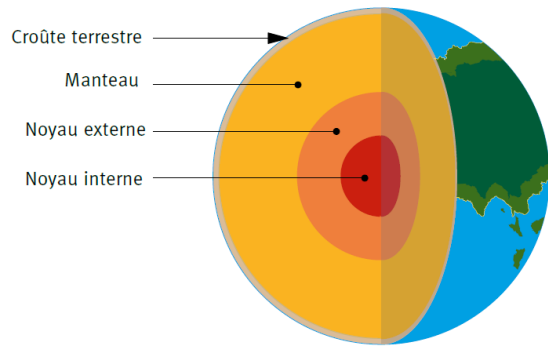
Source: Phreatis



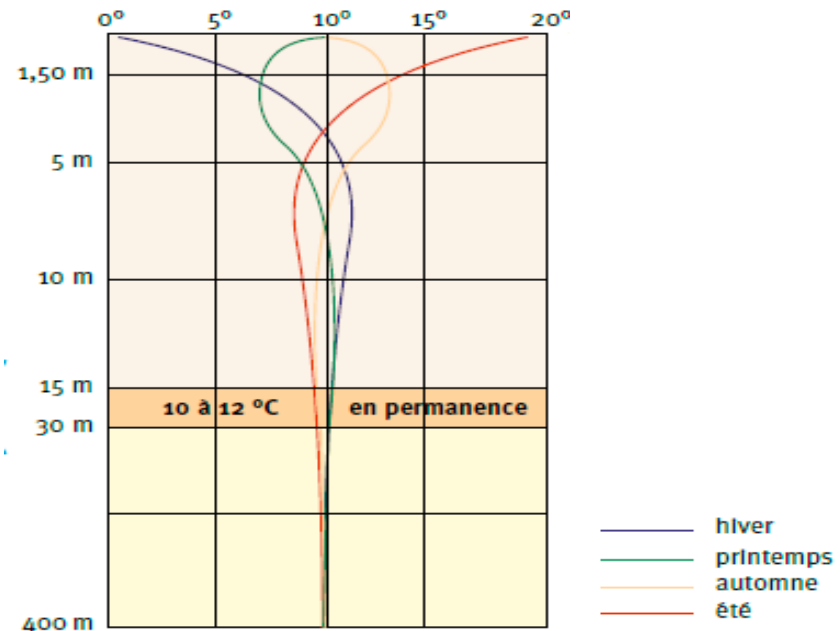
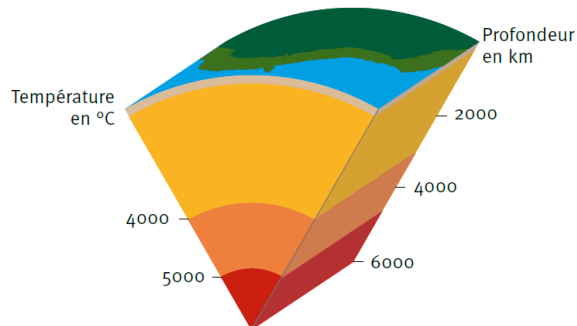
## La température du sous-sol

- Température du sous-sol stable à partir 15 m de profondeur
- Gradient géothermal de l'ordre de 3°C/100 m en RBC

A. LA TERRE



B. TEMPERATURE SOUS LA SURFACE DE LA TERRE

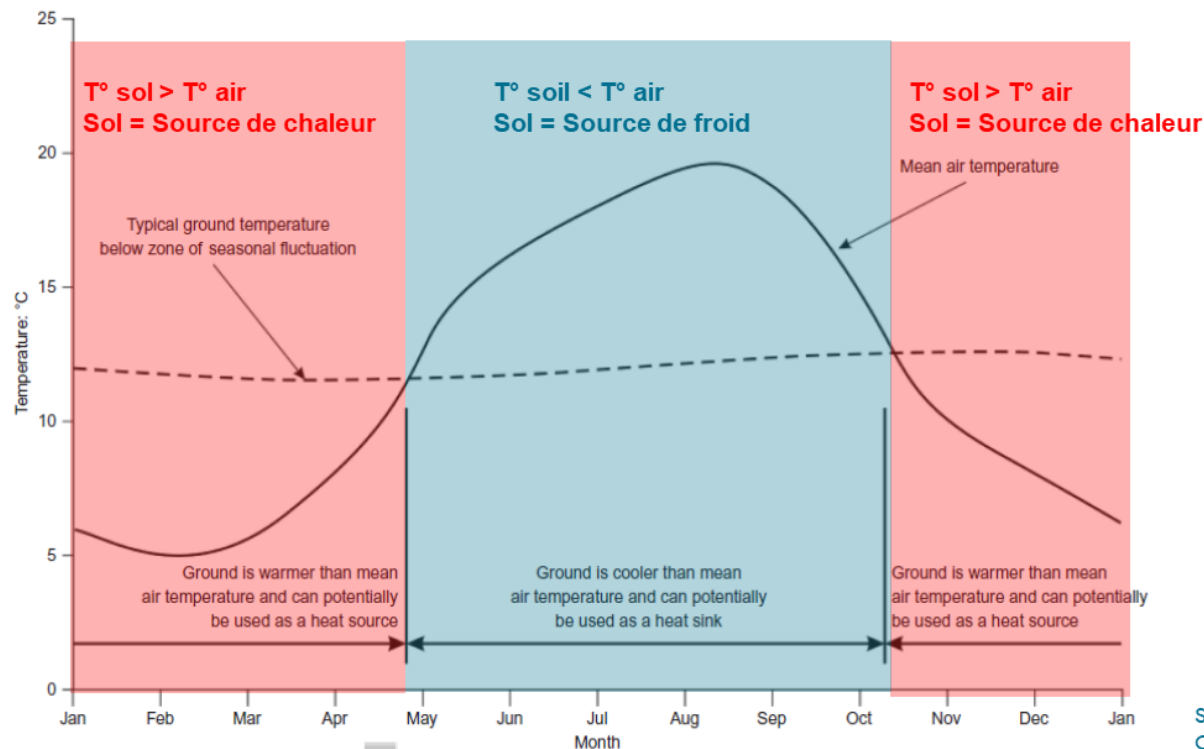


Source: CSTC-NIT 259



## La température du sous-sol

- ▶ En hiver :  $T^{\circ}$  du sous-sol  $>$   $T^{\circ}$  atmosphérique
- ▶ En été :  $T^{\circ}$  du sous-sol  $<$   $T^{\circ}$  atmosphérique
- ▶ Le proche sous-sol (50-200 m) constitue un réservoir thermique stable aux alentours de 10-15°C exploitable pour la production de chaud et de froid à des rendements maximisés et maîtrisés



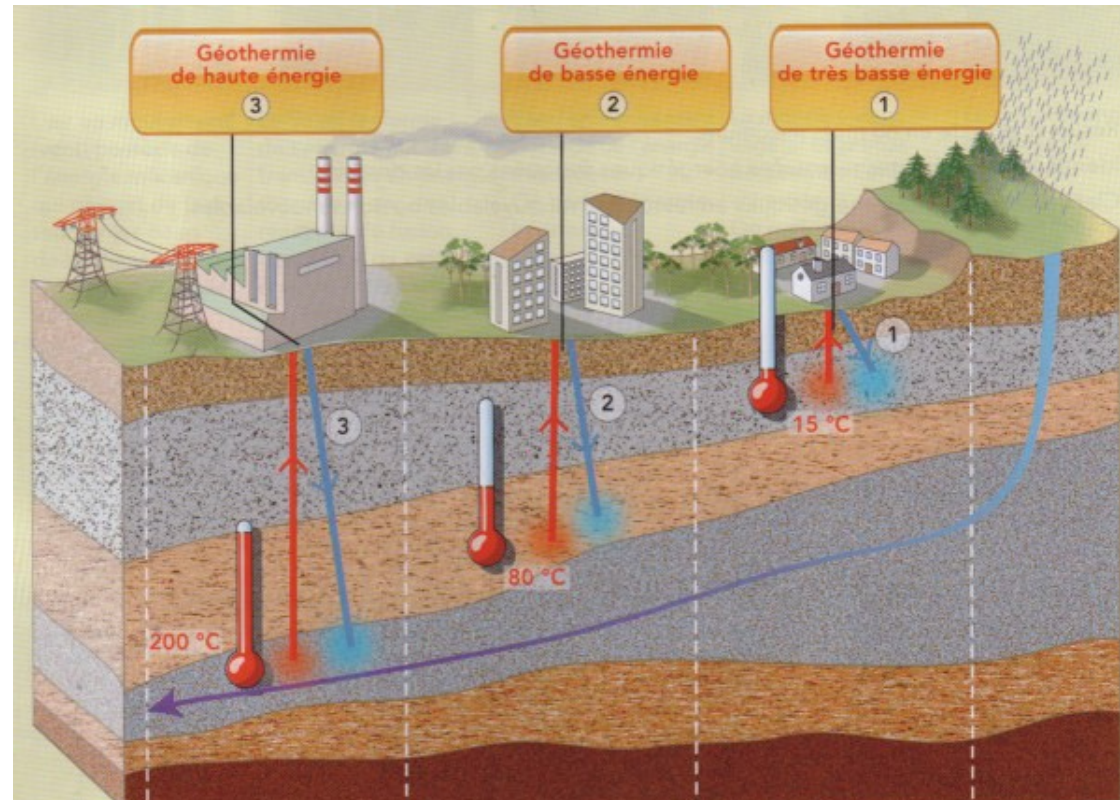
Source: Preene and Powrie, Geotechnique 2009



## Différents systèmes pour différentes applications

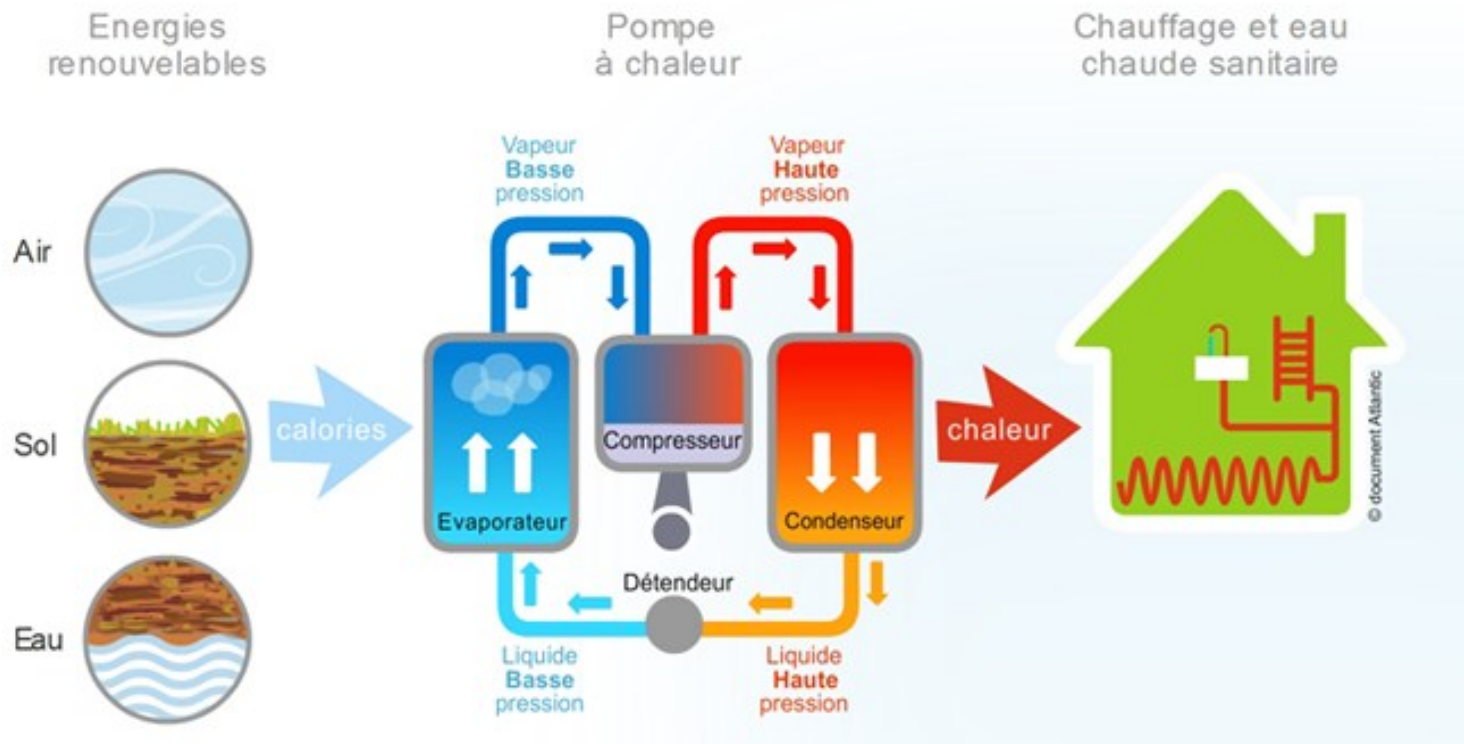
- ▶ Géothermie de surface / très basse énergie (10- 300 m)
  - $T^{\circ} < 20^{\circ}\text{C}$
  - chauffage & refroidissement
  - assistée par PAC
- ▶ Géothermie profonde / basse à haute énergie (> 300 m)
  - $T^{\circ} > 20^{\circ}\text{C}$
  - chauffage urbain
  - production électrique

Source: BRGM



## Le fonctionnement d'une pompe à chaleur

- Diverses « sources froides » : air, sol, eau
- 4 étapes : Evaporateur -> Compresseur -> Condenseur -> Détendeur



Source: [www.ef4.be](http://www.ef4.be)



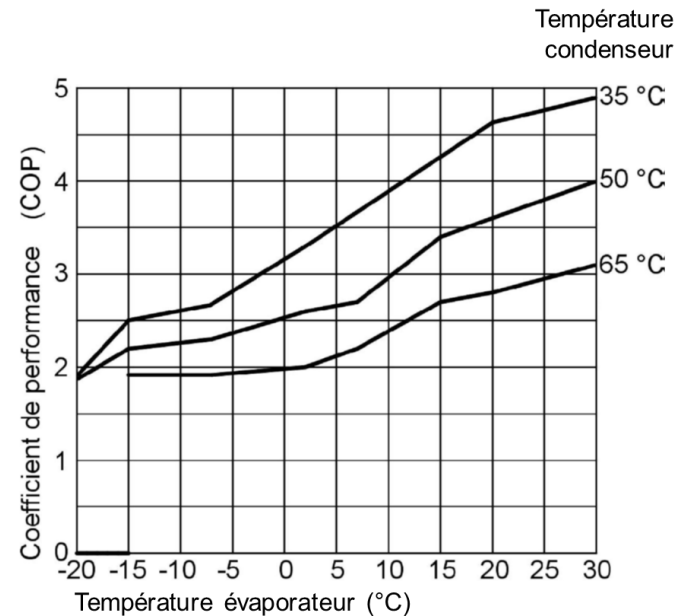
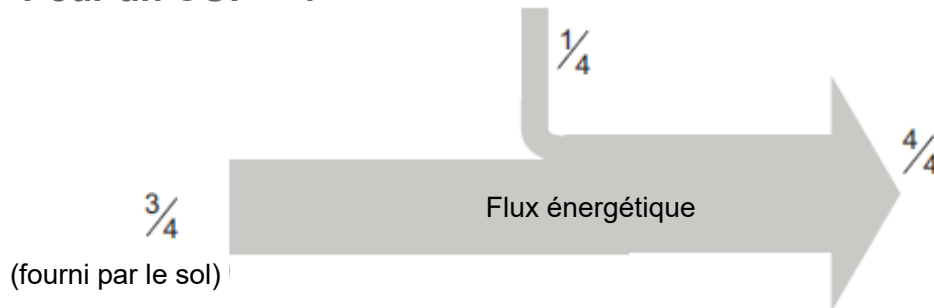
## Le coefficient de performance

- ▶ sCOP : coefficient de performance saisonnier en production de chaleur
- ▶ sEER : coefficient de performance saisonnier en production de froid
- ▶ Valeurs typiques de sCOP :
  - PAC air/eau (aérothermique) = +/- 2,5
  - PAC eau/eau (sonde) = +/- 4
  - PAC eau/eau (nappe) > 4

$$sCOP = \frac{P_{\text{calorifique restituée}}}{P_{\text{électrique}}} \quad sEER = \frac{P_{\text{frigorifique restituée}}}{P_{\text{électrique}}}$$

Pour un COP = 4

Source extérieure de puissance (électricité)



Source: [www.ef4.be](http://www.ef4.be)



LA GEOTHERMIE

## **LES SOLUTIONS**

SYNTHESE COMPARATIVE / CHOIX

LE PROJET DE GEOTHERMIE EN RBC

DIMENSIONNEMENT

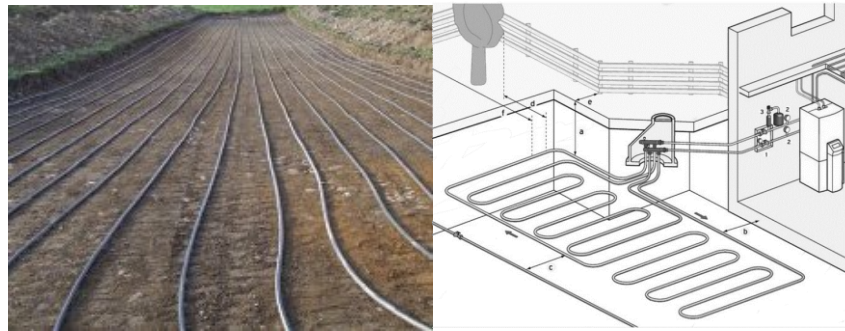
BRUGEOTOOL/SMARTGEOTHERM



## GÉOTHERMIE DE SURFACE (ÉCHANGEURS SUPERFICIELS)

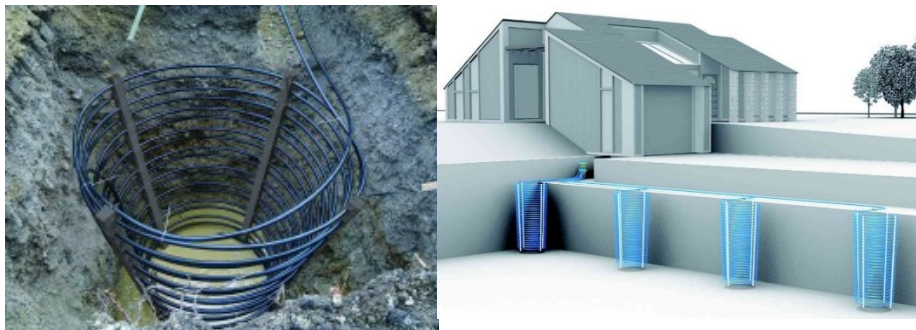
### Systèmes fermés – Géothermie superficielle ( $P = 1 - 50 \text{ kW}$ )

- ▶ Fluide caloporteur circule dans un circuit fermé et permet de capter la chaleur du sol
- ▶ Géothermie sur échangeurs horizontaux (prof. 1 m)
  - $P \approx 10\text{-}25 \text{ W/m}$



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

- ▶ Géothermie compacte (prof. 3-5 m)
  - Corbeilles géothermiques ( $P \approx 1 \text{ kW} / \text{corbeille}$ )
  - Murs géothermiques



Source : Vaillant

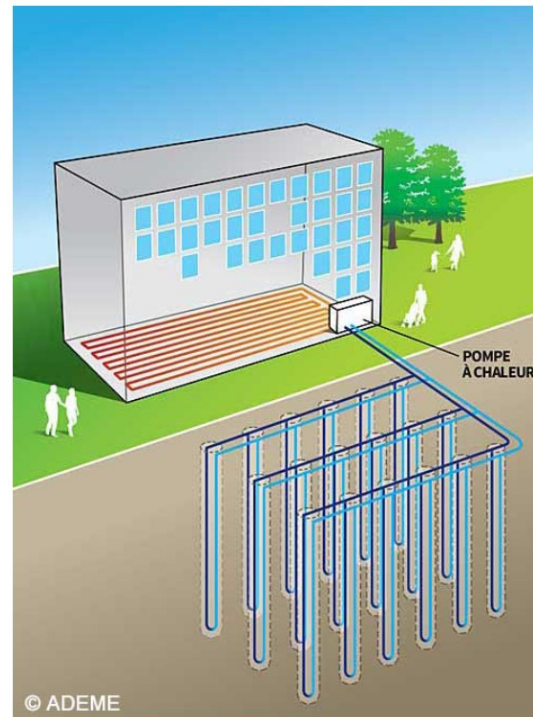


Source : Caleosol



### Systèmes fermés – Géothermie sur sondes (P = 5 - 500 kW)

- ▶ Fluide caloporteur circule dans un circuit fermé et permet de capter la chaleur du sous-sol
- ▶ Une ou plusieurs sondes de 50 à 250 m de prof
- ▶ Inter distance = 5 à 10 m
- ▶ P jusqu'à 50 W/ml (si besoins chaud/froid bien balancés)
- ▶ Stockage inter saisonnier possible = BTES



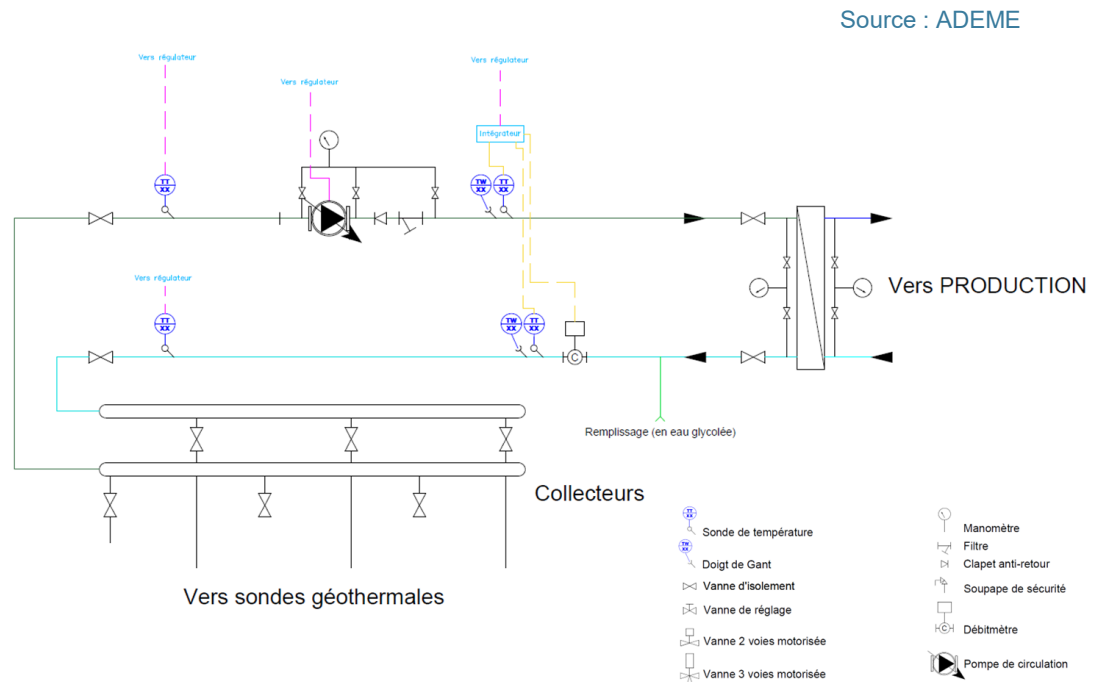
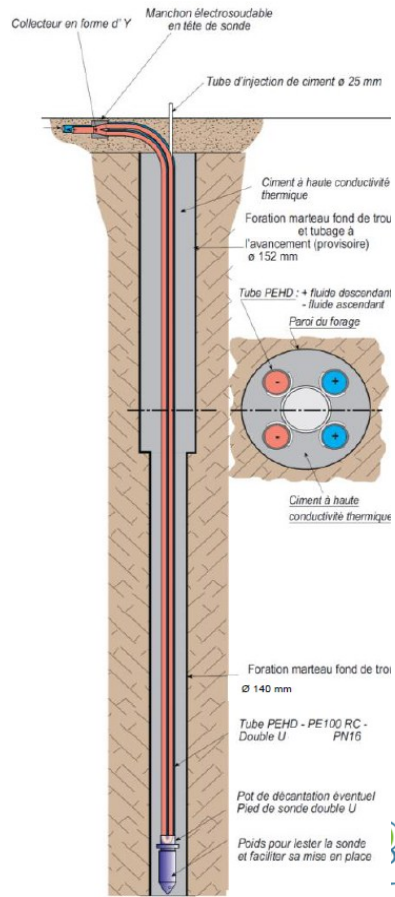
Source : ADEME

© ADEME



## Systèmes fermés – Géothermie sur sondes (P = 5 - 500 kW)

- ▶ Diamètre classique = 125-150 mm
- ▶ Différentes géométries de sonde (simple U, double U, coaxial, ...)
- ▶ Etanchéité et conduction thermique assurées par un colli géothermique (grout)
- ▶ Raccordement vers un collecteur principal qui alimente le circuit secondaire



Source : ADEME

## Systèmes fermés – Géothermie sur sondes (P = 5 - 500 kW)



Forage & installation sonde PEHD



Réseau hydraulique horizontal



Collecteur / 14 sondes parallèles



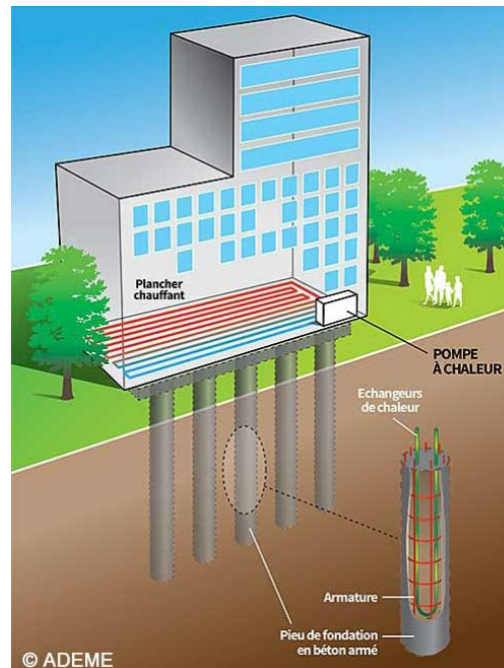
2 Pompes à chaleur sol/eau 75 kW

Source : ADEME



### Systèmes fermés – Pieux énergétiques (P = 5 – 150 kW)

- ▶ Fluide caloporteur circule dans un circuit fermé et permet de capter la chaleur du sous-sol
- ▶ Profondeur de 10 – 30 m de prof
- ▶ P jusqu'à 50 W/ml (si besoins chaud/froid bien balancés)
- ▶ Echangeurs directement introduits dans les pieux de fondations.
- ▶ Le dimensionnement structurel des pieux de fondations doit tenir compte des contraintes thermiques



Source : ADEME



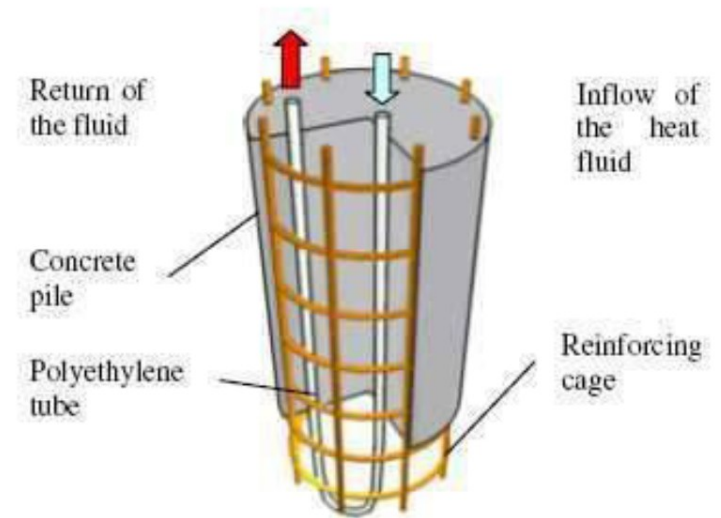
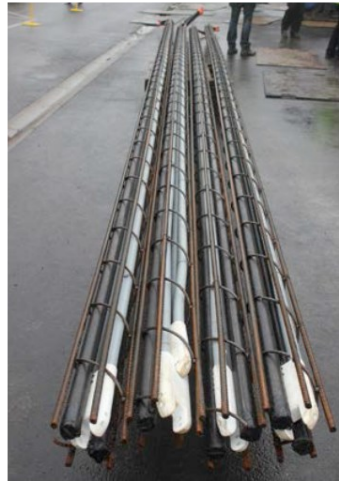
## Systèmes fermés – Pieux énergétiques (P = 5 – 150 kW)



Pieux 3 U



Pieux 6 U



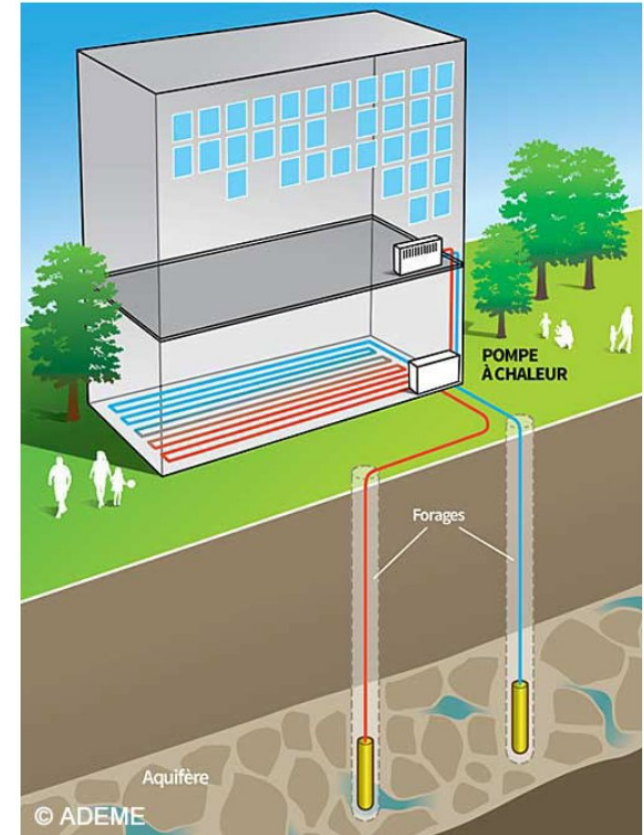
Source : ADEME



## Systèmes ouverts – Géothermie sur nappe (P = 100 – 1000+ kW)

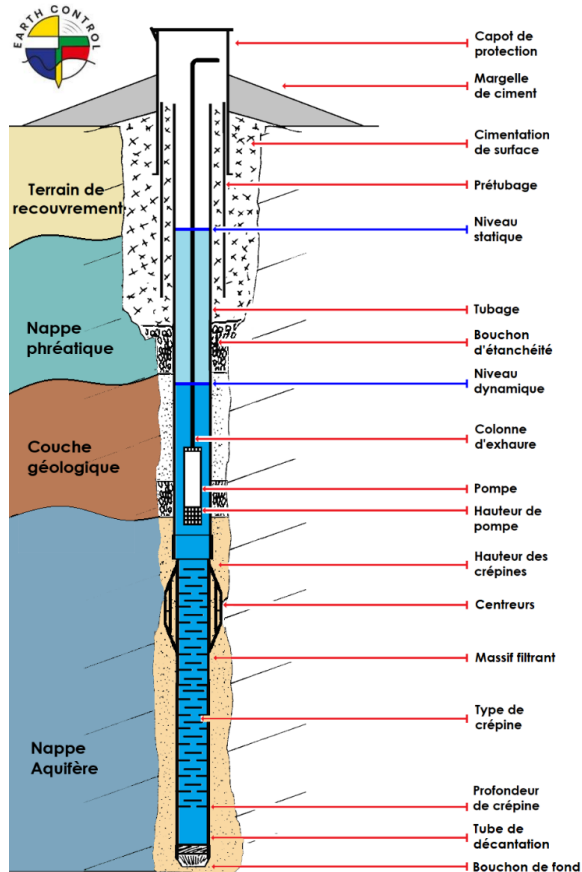
- ▶ Utilisent la chaleur naturelle de l'eau des nappes aquifères (12 - 15°C)
- ▶ Généralement constitués de **doublets** : puits pour la production de chaud et puits pour production de froid (fonctionnement ATES = stockage intersaisonnier)
- ▶ Profondeur de forage jusqu'à 200 m en RBC
- ▶ En RBC, Interdistance entre :
  - puits du même cluster  $\geq 10$  m
  - cluster de puits chaud et cluster froid  $\geq 50$  m
- ▶ Environ 7 kW pour 1 m<sup>3</sup>/h d'eau pompée/réinjectée

Source : ADEME

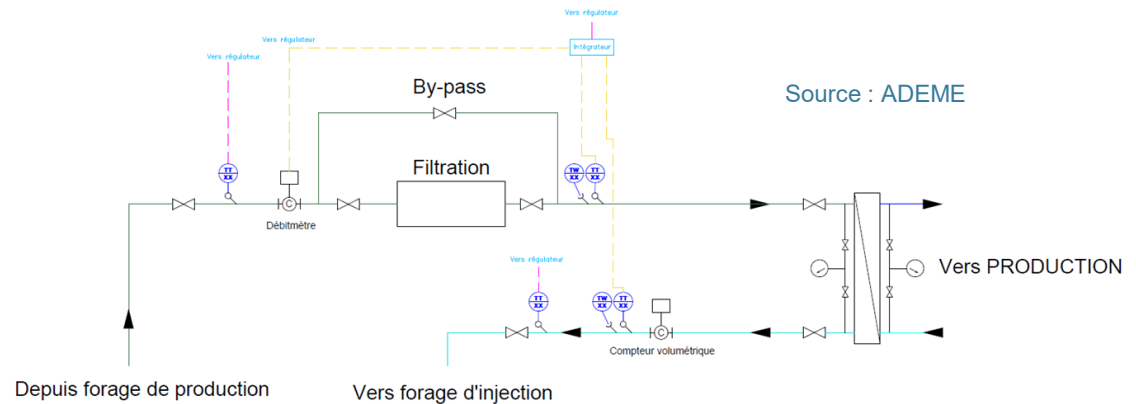


## Systèmes ouverts – Géothermie sur nappe (P = 100 – 1000+ kW)

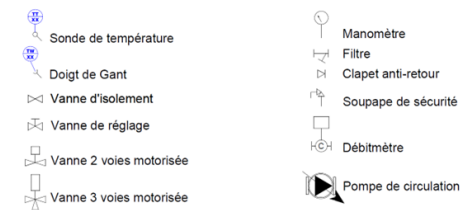
- ▶ Diamètre classique = 160-220 mm
- ▶ Placement d'un tubage « crépiné » au droit de la zone aquifère productive et d'une colonne de pompage et réinjection
- ▶ Filtration en amont de l'échangeur principal



### Coupe d'un forage et désignations



Source : ADEME



## Systèmes ouverts – Géothermie sur nappe (P = 100 – 1000+ kW)



Forage du puits de production



Puits de production /  
Tampon carrossable ou surélevé



Puits de production /  
Bride étanche d'une tête de forage

Source : ADEME et BRUXELLES ENVIRONNEMENT



## Systèmes ouverts – Géothermie sur nappe (P = 100 – 1000+ kW)



Filtre cyclonique et tamis (50 m<sup>3</sup>/h)



Echangeur à plaques géothermique



Pompe à chaleur eau/eau de 250 kW

Source : ADEME et BRUXELLES ENVIRONNEMENT



## La géothermie profonde n'est pas une option en RBC

- ▶ Technologie uniquement exploitable via un système ouvert
- ▶ Roches profondes du socle Paléozoïque trop peu perméables en l'état des connaissances actuelles pour y déployer un système ouvert

## Installations existantes en BE

- ▶ Saint Ghislain (WAL)
  - 1 Forage à 2400m,
  - Débit de 100m<sup>3</sup>/h,
  - Température 72°C
  - Puissance de la centrale 15 MW
  - Energie annuelle: 16700 MWh
- ▶ Balmatt (VL)
  - 2 forages à 3610 m et 4340 m
  - Température 125°C
  - Puissance actuelle: 10 MWth ou 1 Mwe
- ▶ Janssen Pharmaceutica (VL)

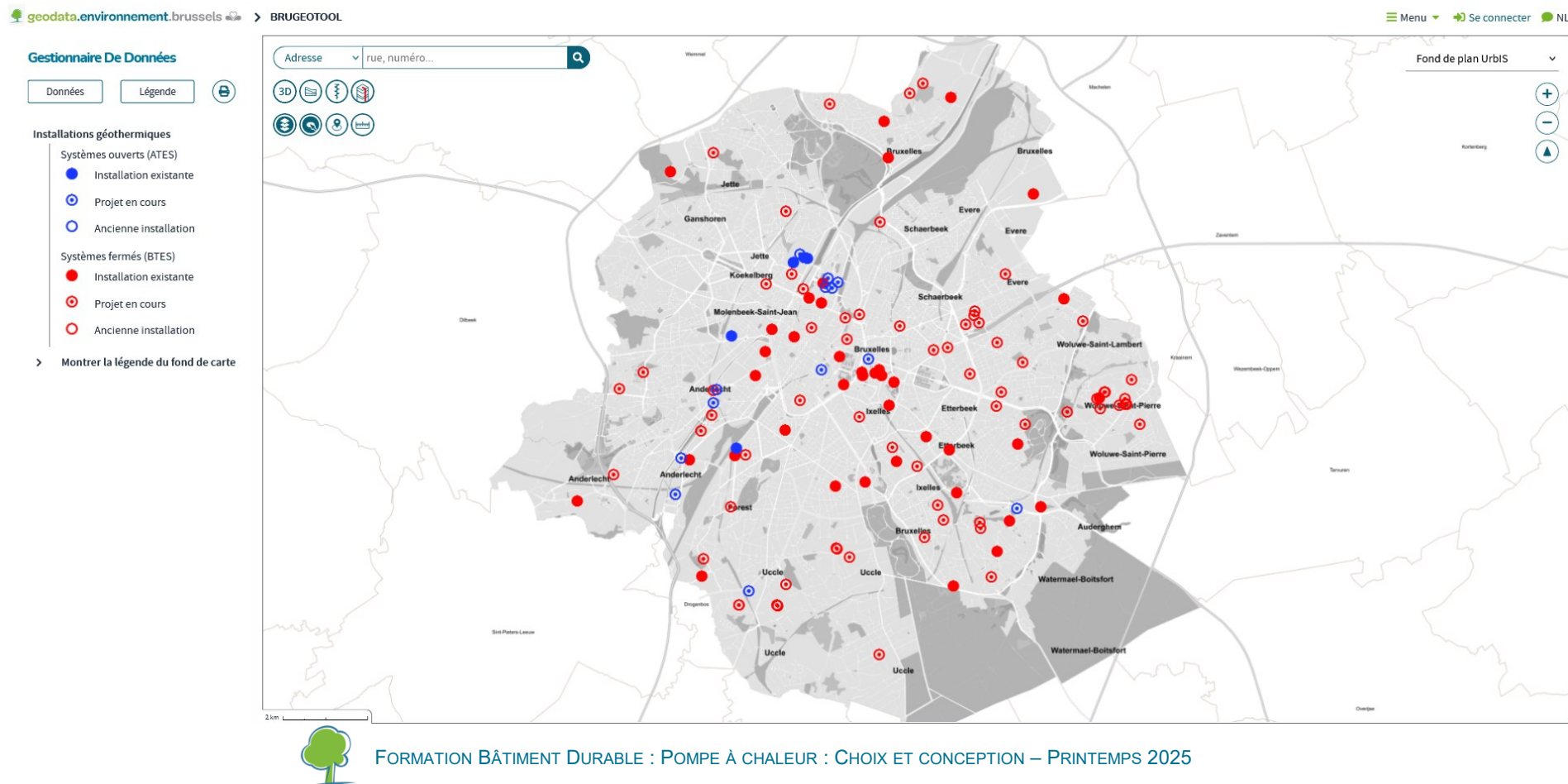


Source : Vito



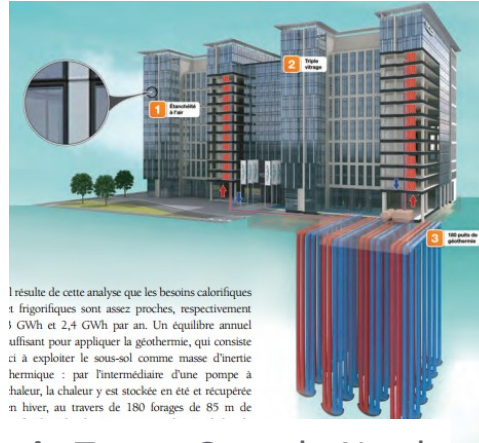
## Parc d'installations géothermiques bruxelloises au 09/02/2024

- ▶ **18** systèmes ouverts : 4 autorisés + 14 en instruction PE (+ d'autres en avant-projet)
- ▶ **108** systèmes fermés : 40 autorisés + 68 en instruction PE (+ d'autres en avant-projet)





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



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



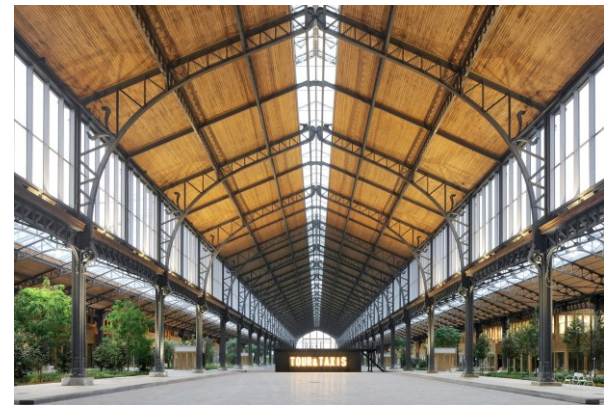
**Bât Wilfried Martens Rue Belliard**  
Closed-loop  
33 GHE – Depth 240 m



**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



LA GEOTHERMIE

LES SOLUTIONS

**SYNTHESE COMPARATIVE / CHOIX**

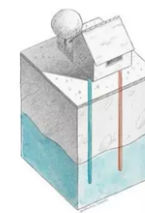
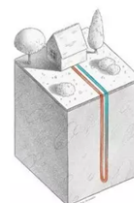
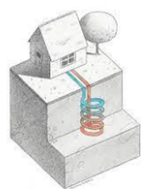
LE PROJET DE GEOTHERMIE EN RBC

DIMENSIONNEMENT

BRUGEOTOOL/SMARTGEOTHERM



## Avantages et inconvénient des solutions



### Puissance

Range 1 – 50 kW  
1 kW / corbeille

Range 5 – 500 kW  
5 à 8 kW / sonde 150 m

Range 100 – 1000+ kW  
50 à 1000 kW / doublet

### Efficacité énergétique / coût exploitation

☹️ sCOP ≈ 3,25

😊 sCOP ≈ 4

😊 sCOP > 4

### Investissement

1,5 – 3,5 k€/kW\*

1,5 – 3,5 k€/kW\*

1,5 – 3,5 k€/kW\*

### Faisabilité technique & facilité de maintenance

😊 Étude sol  
« Simple »

😊 Étude hydrogéol.  
« sommaire »

☹️ Étude hydrogéol.  
« détaillée »

### Facilité maintenance

😊 Maintenance  
simple

😊 Maintenance  
simple

☹️ Facility management  
nécessaire / monitoring puits

### Foncier nécessaire

20 m² / corbeille

100 m² / sonde  
(ajustable jusqu'à 25 m²)

Dépend contexte  
hydrogéologique

### En bref

**Puissances limitées à petits  
projets < 50 kW.  
Performance > aérothermie  
Faisabilité aisée.  
Facile à maintenir.**

**Puissances limitées à  
projets < 500 kW.  
Performances élevées.  
Faisabilité aisée.  
Facile à maintenir.**

**Puissance élevée  
Des performances maximisées,  
State of the art.  
Nécessite étude de faisabilité  
détaillée et maintenance ad-hoc.  
Adaptée à gros consommateurs.**

\* Les chiffres repris sont des ordres de grandeurs utiles en 1ere  
approche. Ils doivent être vérifiés en fonction des contraintes  
du projet au travers d'une étude de (pré)faisabilité ad-hoc



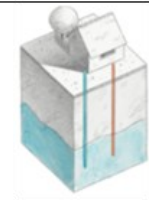
## Bilan environnemental et économique

*Ex1 : Maison unifamiliale rénovée 200 m<sup>2</sup> / PAC = 10 kW*

| a. Chauffage | b. Refroid. | unit                     |
|--------------|-------------|--------------------------|
| 9.000        | 0           | [kWh/an]                 |
| 45,00        | 45,00       | [kWh/m <sup>2</sup> /an] |



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



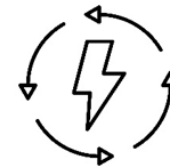
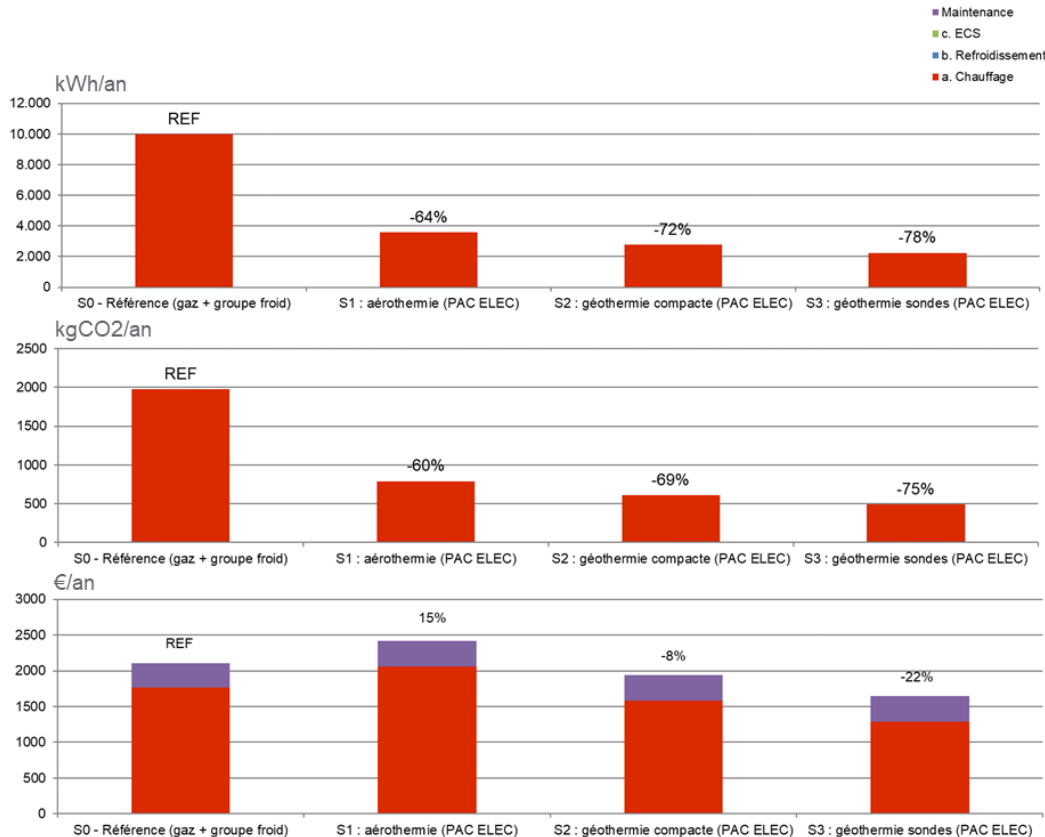
### CET EXERCICE A POUR BUT DE DEGAGER DES ORDRES DE GRANDEUR !

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

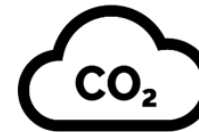


## Bilan environnemental et économique

**Ex1 : Maison unifamiliale rénovée 200 m<sup>2</sup> / PAC = 10 kW**



**Conso  
Energie finale**



**CO2**



**Coûts de  
fonctionnement**

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

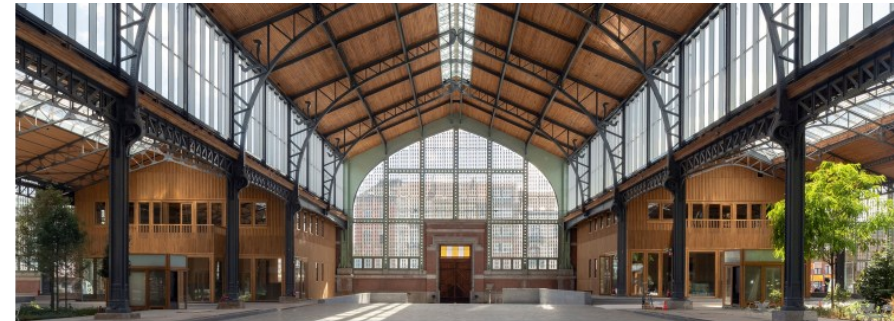
- **Valeurs dépendantes de** : balance chaud/froid, puissance, profondeur captages géothermiques, coût énergie (ref. nov 2022),...
- **Source des hypothèses** : CREG, Bruxelles Environnement, Deplace/Cenergie (facilitateurs), ADEME (FR), AFPG (FR), ...



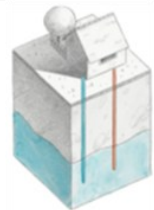
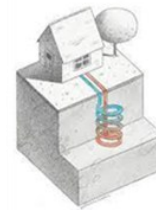
## Bilan environnemental et économique

*Ex2 : Bâtiment tertiaire neuf 50000 m<sup>2</sup> / PAC 400 kW*

| a. Chauffage | b. Refroid. | unit                     |
|--------------|-------------|--------------------------|
| 750.000      | 750.000     | [kWh/an]                 |
| 15,00        | 15,00       | [kWh/m <sup>2</sup> /an] |



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



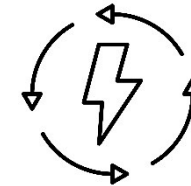
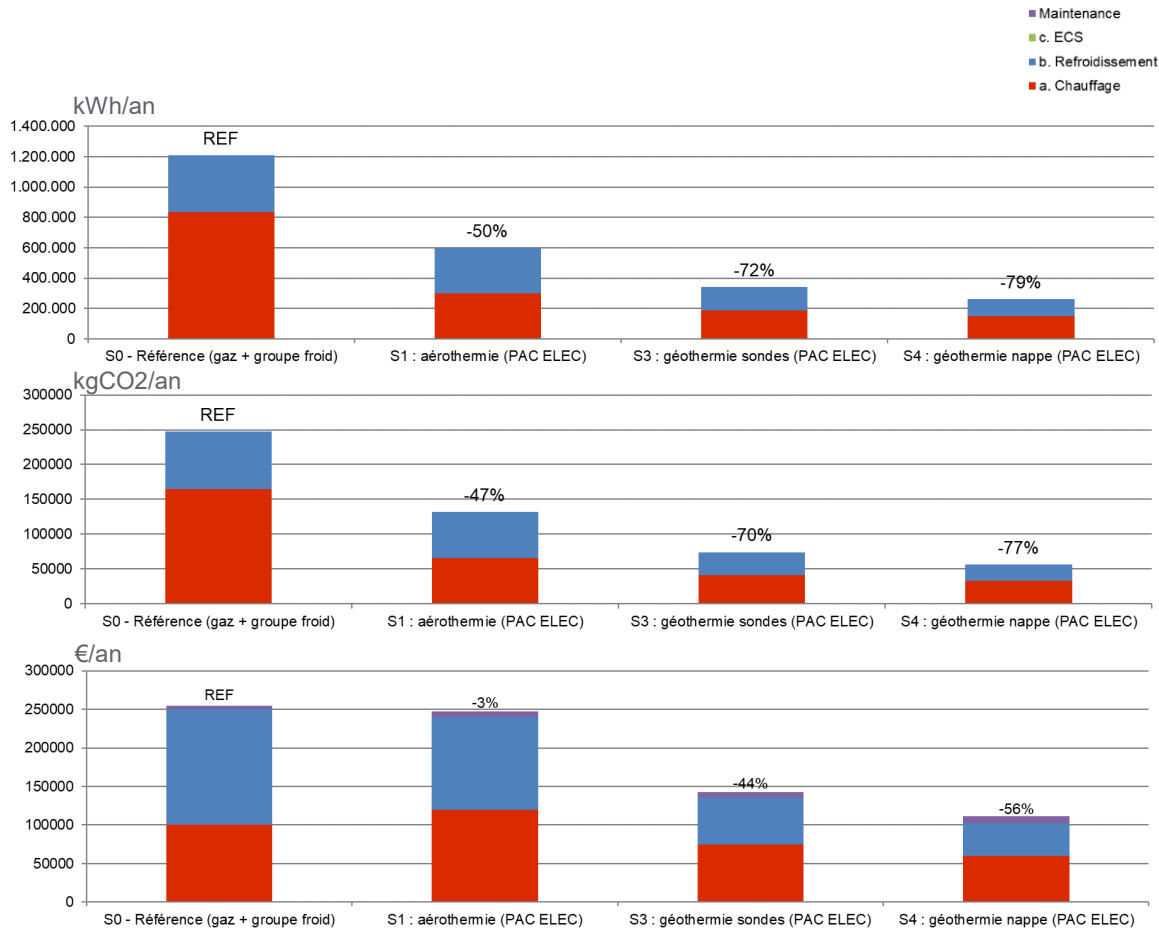
### CET EXERCICE A POUR BUT DE DEGAGER DES ORDRES DE GRANDEUR !

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

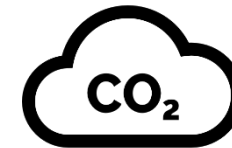


## Bilan environnemental et économique

**Ex2 : Bâtiment tertiaire neuf 50000 m<sup>2</sup> / PAC 400 kW**



Conso  
Energie finale



CO<sub>2</sub>



Coûts de  
fonctionnement



LA GEOTHERMIE

LES SOLUTIONS

SYNTHESE COMPARATIVE / CHOIX

**LE PROJET DE GEOTHERMIE EN RBC**

DIMENSIONNEMENT

BRUGEOTOOL/SMARTGEOTHERM



## Phasage géothermie sur sondes

### Pré faisabilité

Etude  
opportunité

2 semaines

Règlementaire  
Potentiel  
Budget, planning

Etude de Pré faisabilité

4 semaines

Pré dimension.

20 jours

Permis  
Environnement  
Classe 1C (TRT +  
Installation)

GO ? NO GO ?

### Faisabilité

Etude de faisabilité

2 semaines

Exploration  
Sonde test +  
TRT

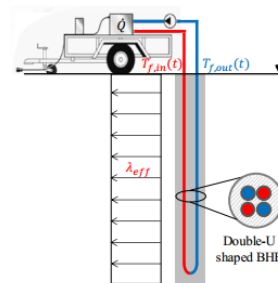
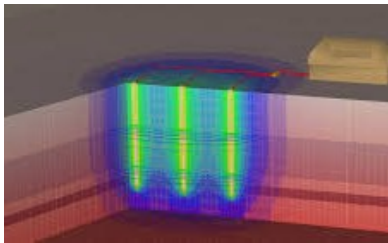
4 semaines

Dimensionn.

Octroi PE

### Exécution

- + forage (1 sonde = +/-1 jour)
- + tranchées
- + raccordement
- + remise en état
- + mise en service



## Phasage géothermie sur nappe

### Pré faisabilité

### Faisabilité

### Exécution

Etude  
opportunité

Etude de Pré faisabilité

Etude de faisabilité

2 semaines

4 semaines

20 jours

1 – 2 mois

4 semaines

45 + 160 jrs

Règlementaire  
Potentiel  
Budget, planning

Pré dimension.

Permis  
Environnement  
Classe 1C  
(Puits tests)

Exploration  
(Puits tests &  
pompages essai  
& tests  
réinjection)

Dimensionn.

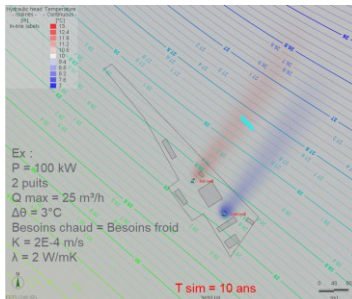
Permis  
Environnement  
Classe 1B  
(Installation)

GO ? NO GO ?

Octroi PE

Octroi PE

- + forage
- + équipement puits
- + tranchées
- + raccordement
- + remise en état
- + mise en service

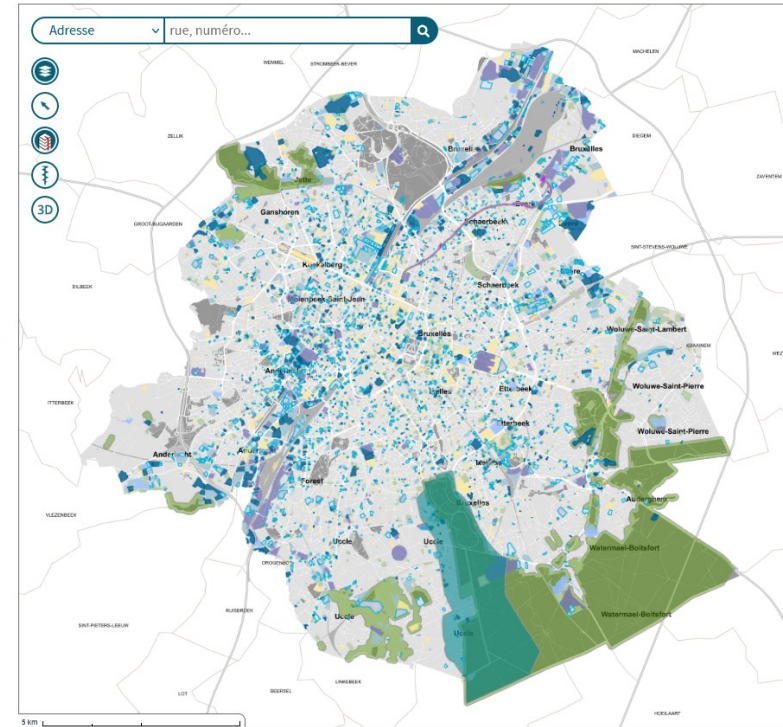
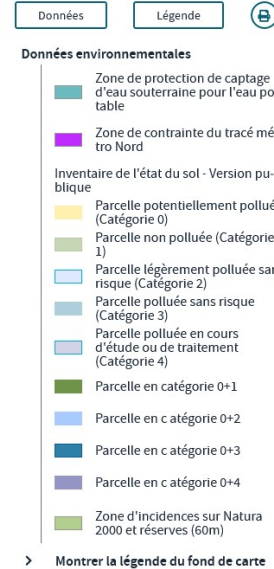


## Contraintes réglementaires

- ▶ Zones d'exclusion
  - **X** Zone de protection captage
  - **X** Zone d'exclusion métro Nord
- ▶ Contraintes non bloquantes
  - **!** Pollutions de sol = conditions PE
  - **!** Natura 2000 = conditions PE
- ▶ Prescriptions types
  - Ex : T° réinjection
    - 0 – 25°C (système fermé)
    - 4 – 25°C (système ouvert)
- ▶ Prescriptions particulières
  - Ex : limitation de profondeur de forage

geodata.environnement.brussels > BRUGEOTOOL

### Gestionnaire De Données



déclaration d'accessibilité contactez-nous Fond de plan & géocodage © Urbis. Données du sous-sol fournies par Bruxelles Environnement. Conception et réalisation : A.-C., C.-L. & APERE



## Subsides RENOLUTION

- ▶ Pour bâtiments résidentiels
  - 5800 à 6500 € / logement individuel (CAT I à III)
- ▶ Pour bâtiments non résidentiels
  - 35% de la facture

Sur la (ou les) facture(s), les postes éligibles pour déterminer le montant maximum de la prime sont (liste exhaustive) :

- la fourniture, la main-d'œuvre et l'installation exclusive de la pompe à chaleur, en ce compris le démontage et l'évacuation de l'ancienne installation, les forages et excavations, les canalisations nécessaires pour capter la chaleur dans le sol ou dans l'eau, les adaptations du réseau hydraulique ou du puisage permettant de garantir le bon fonctionnement de la PAC ;
- la fourniture et la main-d'œuvre relative à la pose des organes de régulation,
- la fourniture et le placement de compteur électrique de passage et de compteur de chaleur ;
- l'aménagement de locaux permettant d'abriter l'installation ;
- si vous demandez le Bonus sortie du mazout : dans le cas d'un poêle au mazout ou charbon existant, les coûts relatifs à l'installation d'un circuit de chauffage pour la nouvelle installation ; dans le cas d'une chaudière au mazout existante, les coûts relatifs à la vidange, au nettoyage de la citerne ; à l'enlèvement ou à l'inertage (à la mousse ou au sable) de la citerne.



<https://renolution.brussels/fr/aidesfinancieres/j4-chauffage-et-chauffe-eau-chauffage-pompe-chaleur>



LA GEOTHERMIE

LES SOLUTIONS

SYNTHESE COMPARATIVE / CHOIX

LE PROJET DE GEOTHERMIE EN RBC

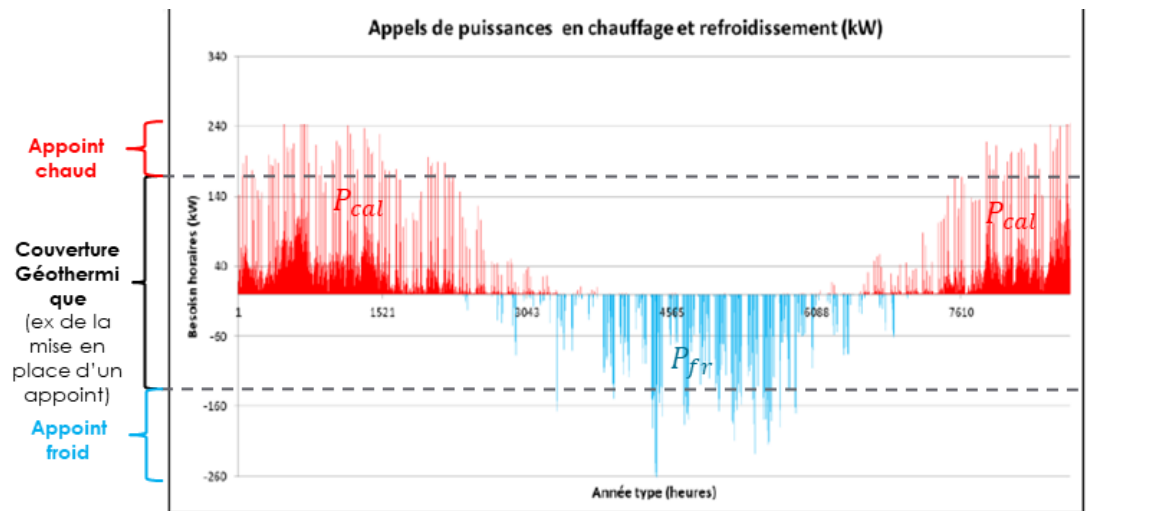
**DIMENSIONNEMENT**

BRUGEOTOOL/SMARTGEOTHERM



## Définition des besoins thermiques et de la couverture géothermique

- ▶ Petits Projets < 50 kW : Evaluation du bilan annuel chaud/froid/ECS (kWh/an)
- ▶ Gros Projets > 50 kW :
  - Définition des profils thermiques horaires (kW) par, le cas échéant, une simulation Thermique Dynamique (STD)



Source :  
Xpair

- ▶ Besoins à soutirés à la ressource géothermique

### PRODUCTION DE CHALEUR

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

coefficient de performance  $COP =$

$$\frac{P_{cal}}{P_{electrique}}$$

### PRODUCTION DE FROID

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

coefficient d'efficacité frigorifique  $EER =$

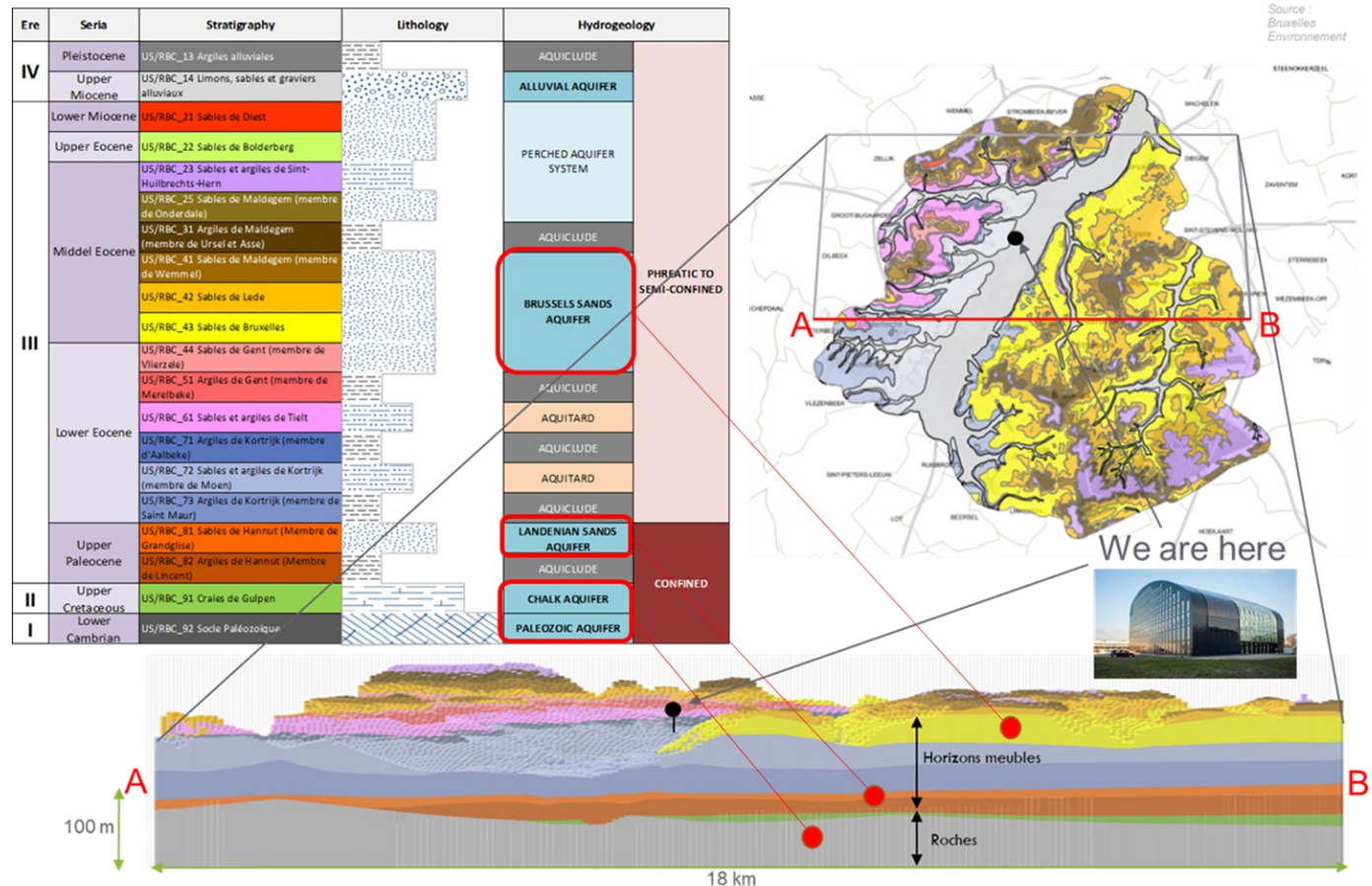
$$\frac{P_{fr}}{P_{electrique}}$$



## 37 DIMENSIONNEMENT / TOUT TYPE DE PROJET

### Définition du contexte (hydro)géologique

- Bruxelles se divise en une partie superficielle de terrains meubles et une partie profonde rocheuse
- On identifie 3 principaux aquifères exploitables pour la géothermie en syst. ouvert



|                       | Roche                                                 |                            | Conductibilité thermique (λ)<br>[W/(m·K)] |                   | Capacité thermique volumique (ρcp)<br>[MJ/(m³·K)] | Masse volumique (ρ)<br>[x 10³ kg/m³] |
|-----------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                       |                                                       |                            | 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                          |
|                       | Glaize argileuse/argile                               |                            | 1,10 - 2,90                               | 2,40              | 1,50 - 2,50                                       | 1,80 - 2,30                          |
| Roches sédimentaires  | Tourbe, lignite douce                                 |                            | 0,20 - 0,70                               | 0,40              | 0,50 - 3,80                                       | 0,50 - 1,10                          |
|                       | 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                          |
| Roches magmatiques    | Anthracite                                            |                            | 0,30 - 0,60                               | 0,40              | 1,30 - 1,80                                       | 1,30 - 1,60                          |
|                       | 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                          |
|                       |                                                       | Marbre                     | 2,10 - 3,10                               | 2,50              | 2,00                                              | 2,50 - 2,80                          |
|                       | Moyennement à très métamorphique                      | 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 -WTCB



## Etude (hydro)géologique sommaire

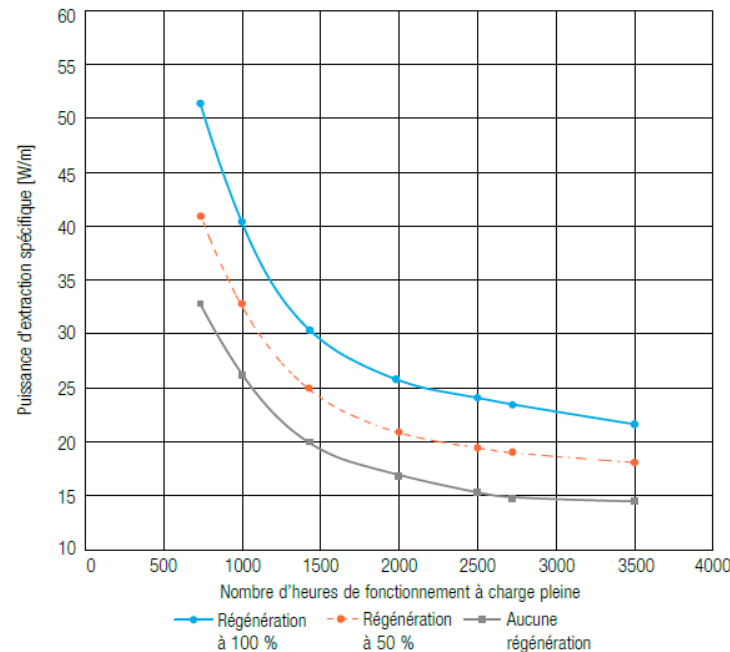
- Définition des propriétés du sous-sol (coupe géologique, conductivités thermiques, capacités calorifiques,...)
- Définition des contraintes de forage (risques environnementaux / sols pollués, artésianisme, connexion nappes,...)



Artesianisme  
rue Théo Lambert, Anderlecht (2015)

## Petits projets ( $P < 50$ kW) : Norme Hollandaise ISSO73

- Méthode basée sur des facteurs de correction (Source: ISSO 73)
- Estimation préliminaire de la longueur de sonde:
  - $L_{\text{sonde}} = P_{\text{ground}} / P_{\text{spécifique}}$
  - $P_{\text{spécifique}} = f(\text{Régénération, heure fonctionnement})$



## Petits projets ( $P < 50$ kW) : Norme Hollandaise ISSO73

- ▶ Facteurs correctifs:  $L_{\text{sonde,final}} = L_{\text{sonde}} \times C1 \times C2 \times C3 \times Cn$ 
  - Type de sol (conductivité thermique médiocre, moyenne, bonne)
  - Matériau de remplissage (sable, bentonite moyenne, bentonite faible)
  - Température minimum du fluide (de  $-5^{\circ}\text{C}$  à  $+5^{\circ}\text{C}$ )
  - Type de sonde (simple U, double U, coaxial)
  - Configuration du champ de sonde
  - Inter-distance entre sondes (de 3 à 10 m)
- ▶ Outil de dimensionnement en ligne (Smartgeotherm) 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*

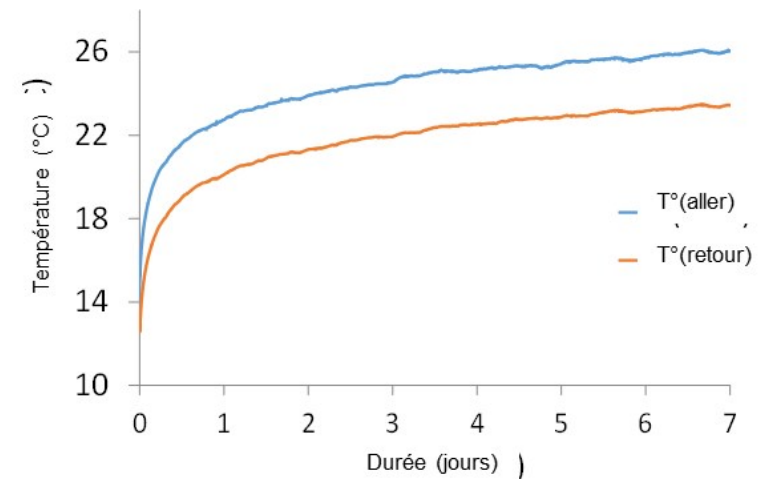


## Gros projets ( $P > 50$ kW) : Test de réponse thermique

- Pour des projets d'une puissance  $> 50$  kW, un Test de réponse thermique (TRT) est conseillé
  - Forage d'une sonde test et réalisation d'un TRT de 48 à 72 h
  - Mesures :  $T^\circ$  naturelle du sous-sol / conductivités thermiques / capacités calorifiques in situ / résistance de la sonde

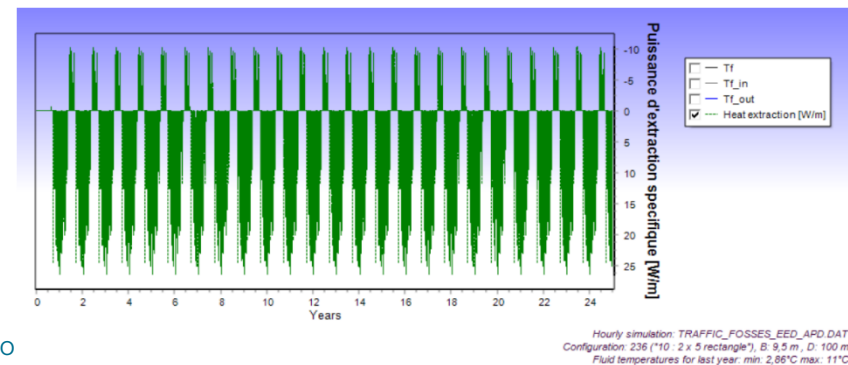
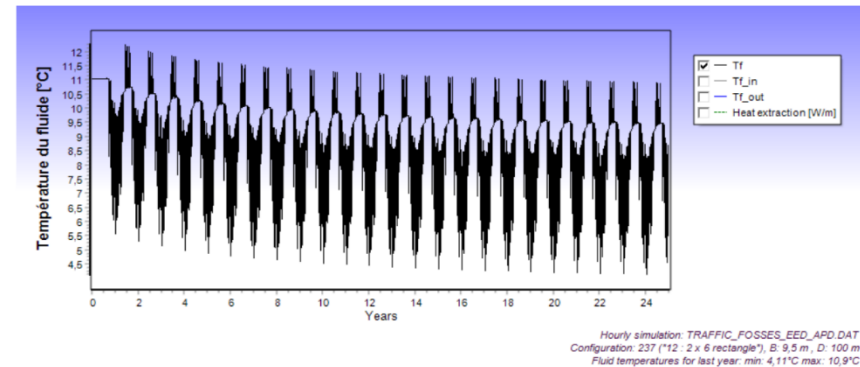
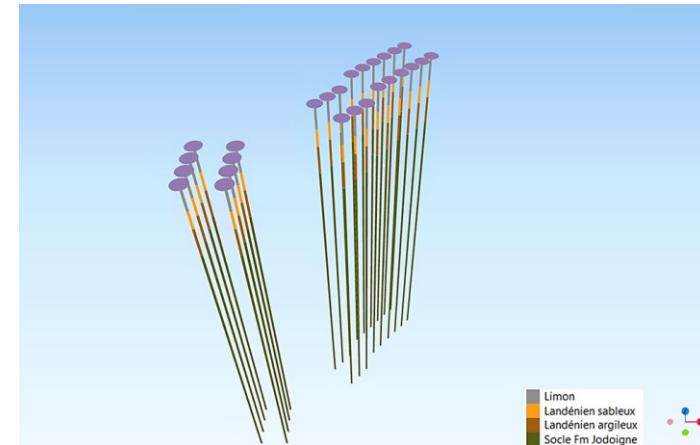


Source Geoazimuth



## Gros projets ( $P > 50$ kW) : Modélisation du champ de sonde (thermique)

- Objectif :
  - Pérennisation du système (maîtrise de la dérive thermique et du recyclage thermique)
  - Respect des range de  $T^\circ$  imposés
- Données d'entrée :
  - Appels de puissances horaires
  - Design du champ de sonde
  - Propriétés géothermiques du sous-sol
- Données de sortie :
  - $T^\circ$  d'entrée et sortie des sondes
  - Puissance linéique



## Etude (hydro)géologique détaillée

- Définition des propriétés hydrogéologiques du sous-sol : 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       |
|     | Lower Mioocene   | US/RBC_21 Sables de Diest                                |           |                        |
|     | Upper Eocene     | US/RBC_22 Sables de Bolderberg                           |           | PERCHED AQUIFER SYSTEM |
| III | Middel Eocene    | US/RBC_23 Sables et argiles de Sint-Huilebrechts-Hern    |           |                        |
|     |                  | US/RBC_25 Sables de Maldegem (membre de Onderdale)       |           |                        |
|     |                  | US/RBC_31 Argiles de Maldegem (membre de Uirsel et Asse) |           |                        |
|     |                  | US/RBC_41 Sables de Maldegem (membre de Wemmel)          |           |                        |
|     |                  | US/RBC_42 Sables de Ledde                                |           |                        |
|     | Lower Eocene     | US/RBC_43 Sables de Bruxelles                            |           |                        |
|     |                  | US/RBC_44 Sables de Gent (membre de Vlierzele)           |           |                        |
|     |                  | US/RBC_51 Argiles de Gent (membre de Merelbeke)          |           |                        |
|     |                  | US/RBC_61 Sables et argiles de Tielt                     |           |                        |
|     |                  | US/RBC_71 Argiles de Kortrijk (membre d'Aalbeke)         |           |                        |
| II  | Upper Paleocene  | US/RBC_72 Sables et argiles de Kortrijk (membre de Moen) |           |                        |
|     |                  | US/RBC_73 Argiles de Kortrijk (membre de Saint Maur)     |           |                        |
|     | Lower Paleocene  | US/RBC_81 Sables de Hannut (Membre de Grandglise)        |           |                        |
| I   | Upper Cretaceous | US/RBC_82 Argiles de Hannut (Membre de Lihcent)          |           |                        |
|     | Lower Cambrian   | US/RBC_91 Craies de Gulpen                               |           |                        |
|     |                  | US/RBC_92 Socle Paléozoïque                              |           |                        |

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 sûre)

### 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

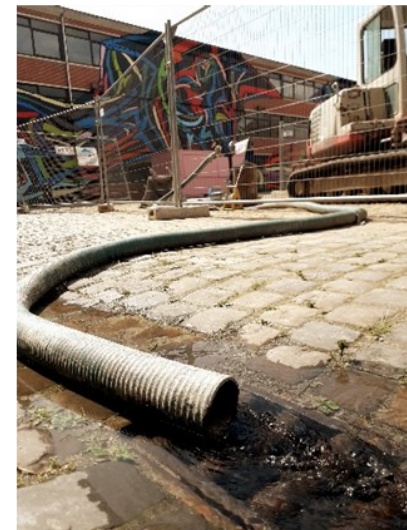
- Définition des modalités exploratoires (puits tests et essais dans le cadre de l'étude de faisabilité)



## Puits tests et essais

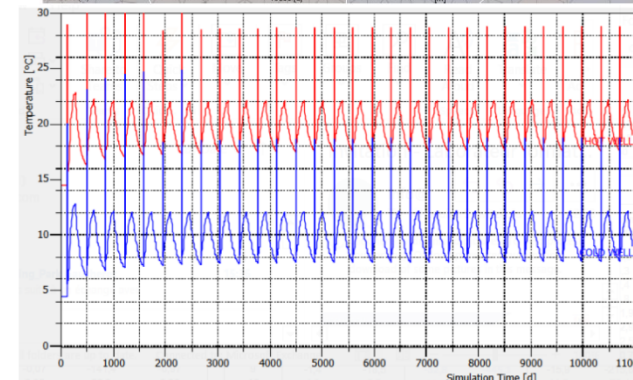
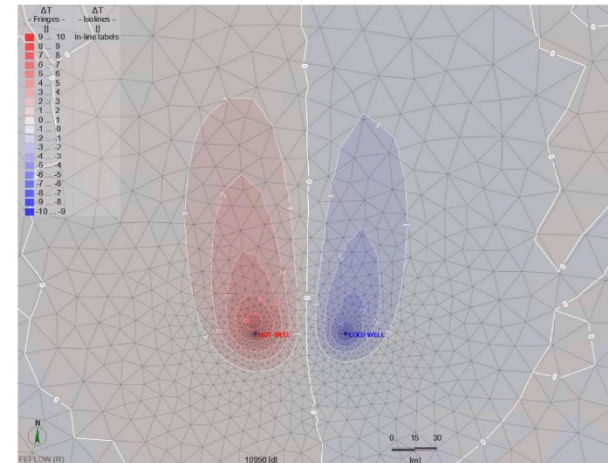
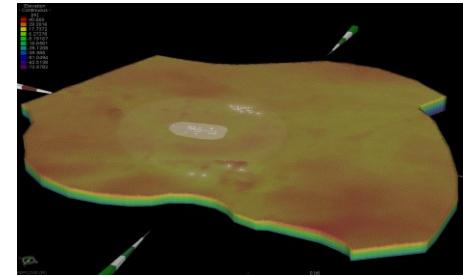
### ► Quantification des propriétés hydrodynamiques et hydrochimiques

- Essais de pompage par paliers
- Essais de pompage longue durée
- Essais de réinjection
- Analyse physico-chimique
- Diagraphie micromoulinet
- ...



## Modélisation numérique (thermique et hydraulique)

- Objectif :
  - Pérennisation du système (maîtrise de la dérive thermique et du recyclage thermique)
  - Respect des range de  $T^\circ$  imposés
  - Impacts piézométriques et thermiques
  - Conflits d'usage sur les captages et systèmes géothermiques voisins
- Données d'entrée :
  - Appels de puissances horaires
  - Design des puits
  - Propriétés hydrogéologiques et thermiques du sous-sol
- Données de sortie :
  - $T^\circ$  et Pression au droit des puits d'exploitation chaud et froid
  - $T^\circ$  et Pression spatialisées (3D)



LA GEOTHERMIE

LES SOLUTIONS

SYNTHESE COMPARATIVE / CHOIX

LE PROJET DE GEOTHERMIE EN RBC

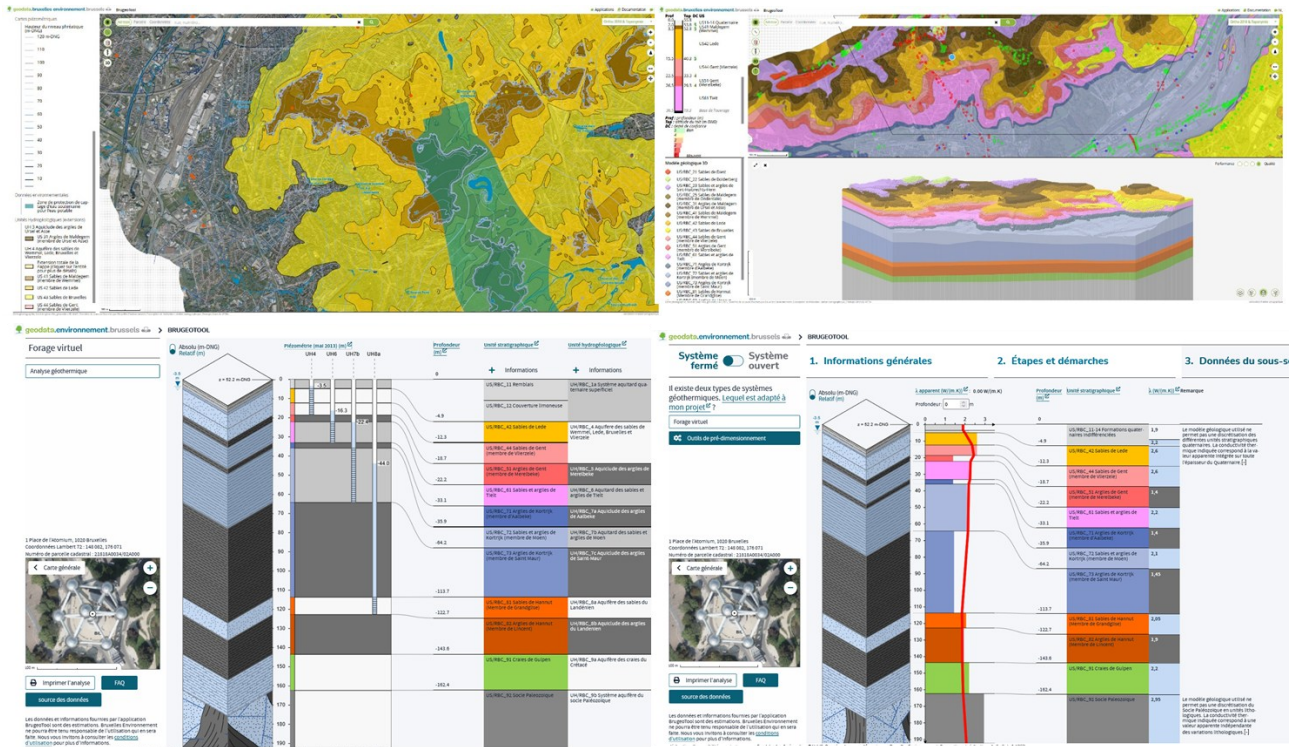
DIMENSIONNEMENT

**BRUGEOTOOL/SMARTGEOTHERM**



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

- Accès aux données du sous-sol sous diverses formes (1D, 2D, 3D)
- Aide à la préfaisabilité géothermique (réglementaire, analyse potentiel)
- Prédimensionnement via SmartGeotherm ( $P < 100$  kW, selon norme Hollandaise)



**LIEN INTERNET**





## Normes

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



## BrugeoTool

- ▶ [Lien Internet](#)



## Sites internet

<https://environnement.brussels/thematiques/geologie-et-hydrogeologie/geothermie>  
[www.geothermie.brussels](http://www.geothermie.brussels)  
[www.smartgeotherm.be](http://www.smartgeotherm.be)  
[www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)



## Ouvrages

- ▶ Buildwise – 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](mailto:magniel@environnement.brussels)



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

