



**UN OUTIL DE  
DIMENSIONNEMENT EN  
LIGNE DE CHAMPS DE  
SONDES GÉOTHERMIQUES  
VERTICALES :  
PRISE EN MAIN ET CAS  
PRATIQUES**

Charles MARAGNA, Antoine VOIRAND

**ADEME**



AGENCE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE



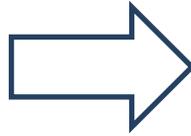
Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# INTRODUCTION

Une plateforme digitale de dimensionnement d'échangeurs géothermiques :

Qu'est ce que c'est ?



Un outil :

- > Lancé par le BRGM en 2015
- > Accessible en ligne
- > Destiné aux professionnels
- > Initialement pour la maison individuelle *μ-Geo*
- > Maintenant aussi pour les champs de sondes



# PROGRAMME DE LA DEMI-JOURNÉE

- Ce que vous allez apprendre aujourd'hui :
  - Calculer la profondeur et le nombre de forages nécessaire à la couverture des besoins thermiques d'un bâtiment
- Ce que vous ne saurez pas à la fin de la formation :
  - Identifier les contraintes réglementaires propres au projet, les démarches qualité
  - Mettre en œuvre et interpréter un test de réponse thermique
  - Dimensionner le réseau hydraulique

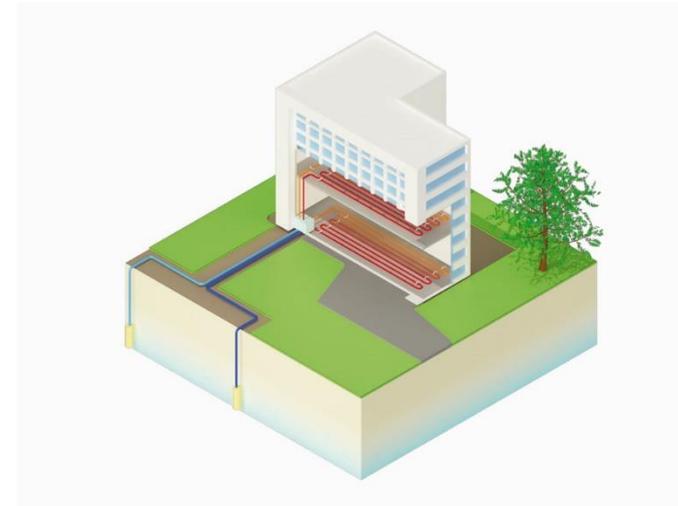
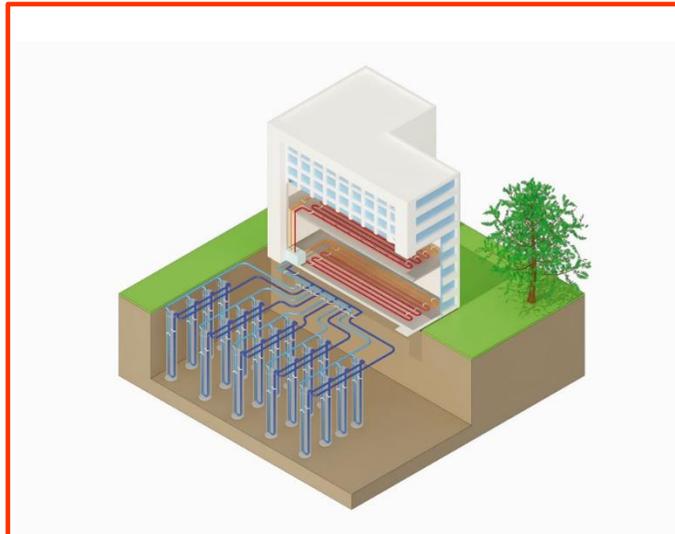
# SOMMAIRE

- Rappel sur la géothermie de surface, les sondes géothermiques verticales, les pompes à chaleur
- Fonctionnement du moteur de calcul
- Données d'entrée du moteur de calcul
- Etude de cas

# SOMMAIRE

- Rappel sur la géothermie de surface, les sondes géothermiques verticales, les pompes à chaleur
- Fonctionnement du moteur de calcul
- Données d'entrée du moteur de calcul
- Etude de cas

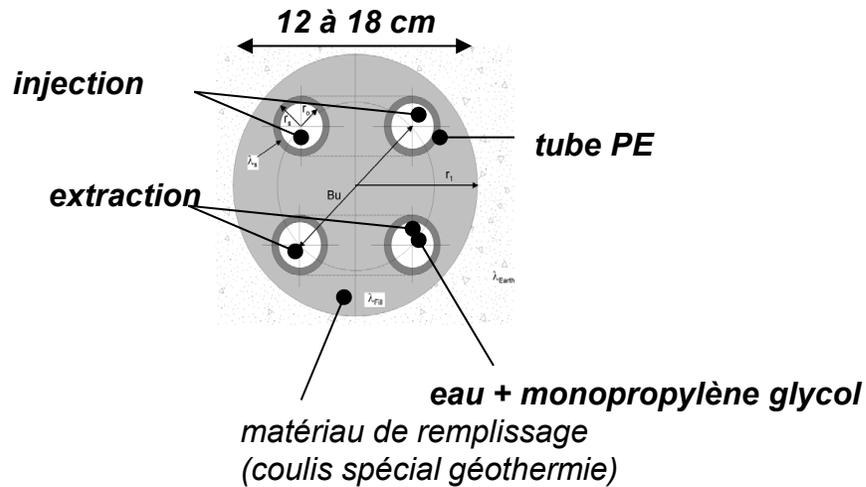
# LES DIFFÉRENTES FORMES DE GÉOTHERMIE ASSISTÉE PAR POMPE À CHALEUR



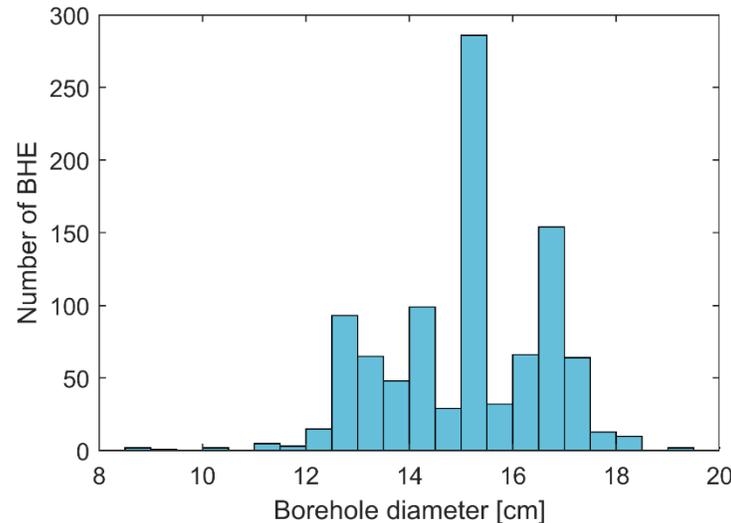
	<b><i>Echangeur vertical</i></b> (sondes géothermiques)	<b><i>PAC sur aquifère superficiel</i></b> (doublet de production et d'injection)
<b>Echange</b>	échange d'énergie sans matière = <b><u>boucle fermée</u></b>	échange d'énergie et de matière = <b><u>boucle ouverte</u></b>

# LES SONDES (DOUBLE-U)

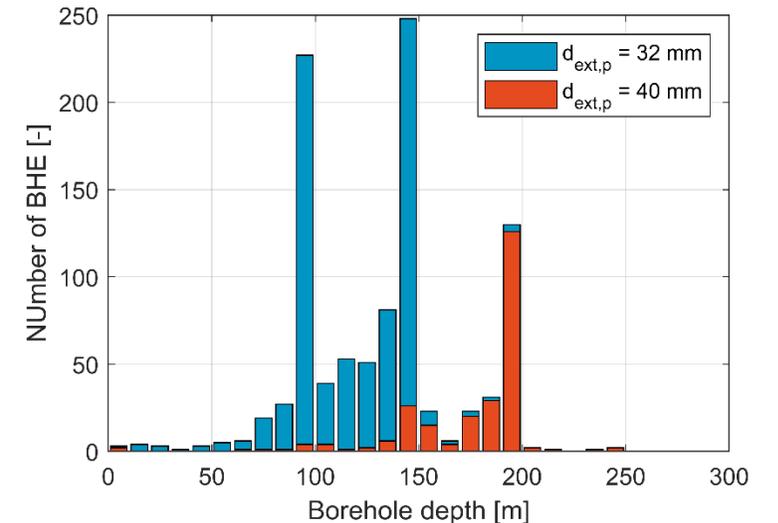
- Le « coulis » géothermique vise à :
    - Eviter de mettre en communication des aquifères à différentes profondeurs
    - Améliorer le transfert thermique entre le fluide et le terrain (la Norme NF X 10-970 impose  $\lambda \geq 2,0 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ )
- **Obligation d'utiliser un coulis adapté aux sondes géothermiques**



Distribution du diamètre de forage (1010 sondes)



Distribution du diamètre externes des tubes (1010 sondes)



# LES SONDES (DOUBLE-U)



Machine de forage



Pieds de sonde



Mise en place de la sonde

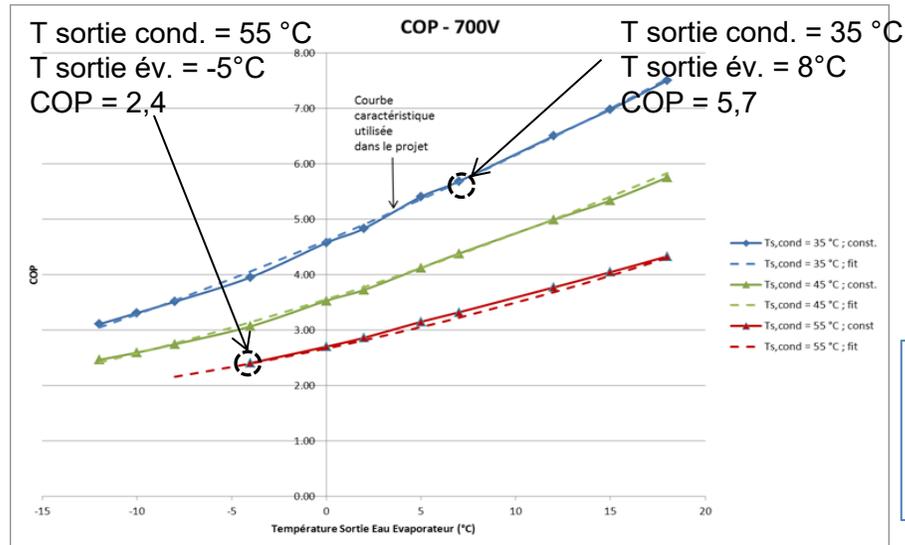
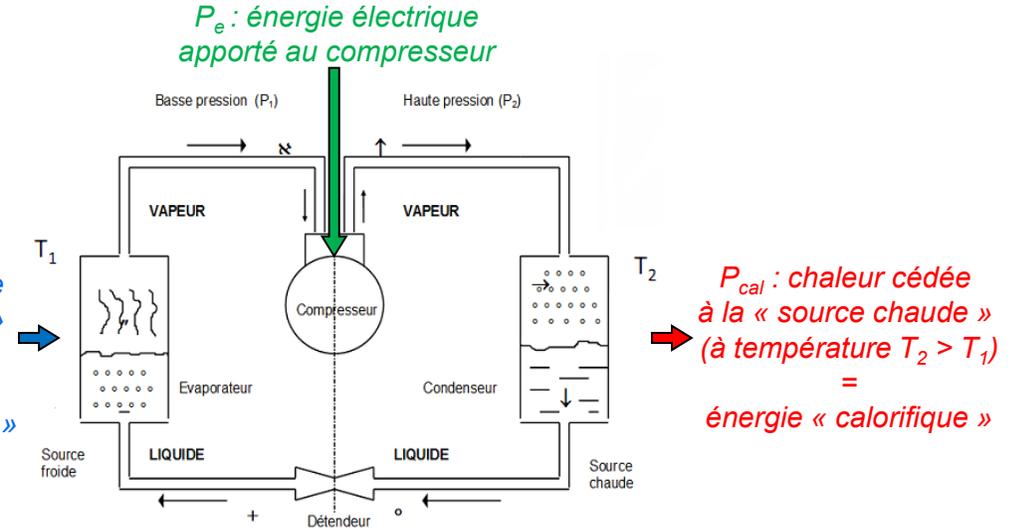


Mise en place de la sonde

# PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE POMPE À CHALEUR (PAC)

- Conservation de la puissance :  $P_{cal} = P_{fr} + P_e$
- Performance de la PAC :  $COP = \text{Energie gagné} / \text{Energie payée}$
- Performance de la PAC en mode chauffage :
  - $COP = P_{cal} / P_e$
  - COP maximal (théorique) =  $T_2 / (T_2 - T_1)$
- Performance de la PAC en mode climatisation :
  - $EER = P_{fr} / P_e$
  - EER maximal (théorique) =  $T_1 / (T_2 - T_1)$

$P_{fr}$  : chaleur prélevée à la « source froide » (à température  $T_1$ ) = énergie « frigorifique »



Différents émetteurs de chaleur :

- planchers chauffants (ex. : 35 / 30 °C)
- ventilo-convecteurs (ex. : 45 / 40 °C)
- radiateurs basse température (ex. : 55 / 50 °C)
- radiateurs haute température (ex. : 65 / 60 °C)

# SOMMAIRE

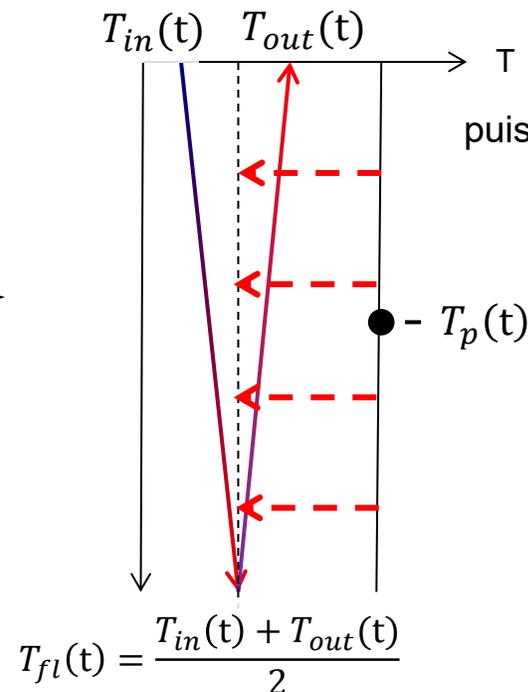
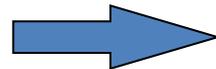
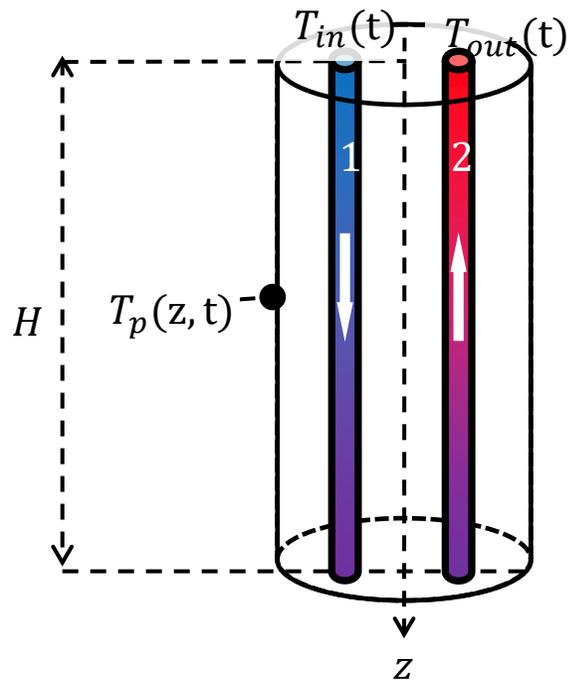
- Rappel sur la géothermie de surface, les sondes géothermiques verticales, les pompes à chaleur
- **Fonctionnement du moteur de calcul**
- Données d'entrée du moteur de calcul
- Etude de cas

# ORGANISATION DE L'OUTIL

- Données d'entrée :
  - Besoin thermique horaire du bâtiment
  - Système de surface
  - Champs de sondes
- Principe :
  - Simulation thermique dynamique au pas temps horaire sur 25 ans :  
Calcul de la température de liquide caloporteur
- → Résultats :
  - Bilan énergétique
  - Evolution de la température du liquide caloporteur dans l'échangeur

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Utilisation de solutions analytiques. Hypothèses :
  - H1 : Terrain homogène, sans écoulement souterrain (conduction pure, pas de convection)
  - H2 : Inertie du coulis de remplissage du forage négligée, forage assimilé à un fil de longueur finie (« Ligne Source Finie »)
  - H3 : Température de paroi du forage  $T_p$  constante sur toute la hauteur  $H$  du forage
  - H4 : Profil de température du fluide « en V » dans le forage



puissance échangée par mètre de forage  $p$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ] :

$$p = \frac{P}{H} = \frac{T_p - T_{fl}}{R_f}$$

$P = \dot{m} C_{p,fl} (T_{out} - T_{in})$  : puissance échangée [W]

$\dot{m}$  : débit-masse dans l'échangeur géothermique [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$R_f$  : résistance linéique du forage [ $\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$ ]

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Utilisation de solutions analytiques :

- Pour un échangeur en boucle fermée, la température du fluide dans le forage est de la forme :

$$T_{fl}(t) = \frac{T_{in}(t) + T_{out}(t)}{2} = T_0 + \frac{p}{\lambda_m} G(t)$$

- $T_0$  : température initiale du terrain (°C)
- $p$  : puissance linéaire échangée par mètre de forage (W.m<sup>-1</sup>)
- $\lambda_m$  : conductivité thermique du terrain (W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>)
- La fonction  $G$  traduit l'évolution de la température moyenne du fluide suite à un échelon de puissance. Pour un champ de sondes, la fonction  $G$  est :

$$G(t) = \underbrace{\lambda_m R_f}_{\substack{\text{transfert} \\ \text{dans un forage}}} + \underbrace{G_0(t)}_{\substack{\text{transfert à} \\ \text{proximité} \\ \text{d'un forage}}} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N G_{j \rightarrow i}(t)}_{\text{interactions entre les } N \text{ forages}}$$

- La fonction  $G$  est propre à chaque champ de sondes
- $R_f$  est la résistance du forage [K.m.W<sup>-1</sup>]
- Remarque : Fonction  $G$  utilisée ici est la « Ligne Source Finie ». Convient uniquement aux sondes et pas aux pieux et corbeilles dont le diamètre est très grand devant celui d'une sonde

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Solution analytique de la « Ligne Source Finie » pour calculer  $g = G_0$  ou  $g = G_{i \rightarrow j}$  :

$$g(\beta, t^*) = \frac{1}{2\pi} \left[ \left( -D_A + \int_{\beta}^{\sqrt{\beta^2+1}} \frac{\operatorname{erfc}(\omega z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz \right) - \left( D_B + \int_{\sqrt{\beta^2+1}}^{\sqrt{\beta^2+4}} \frac{\operatorname{erfc}(\omega z)}{\sqrt{z^2 - \beta^2}} dz \right) \right]$$

$t^* = \frac{\alpha_m t}{r_f^2}$  : nombre de Fourier (temps sans dimension)

$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{(\rho c_p)_m}$  : diffusivité du sous-sol [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\omega = \frac{H}{2\sqrt{\alpha_m t}}$  (avec  $H$  la profondeur d'un forage)

$\beta = \frac{r_f}{H}$  pour le calcul de  $G_0$  (transfert à proximité d'un forage) avec  $r_f$  le rayon de forage

$\beta = \frac{d_{ij}}{H}$  pour le calcul de  $G_{i \rightarrow j}$  (action du forage  $i$  sur le forage  $j$ ) avec  $d_{ij}$  la distance entre les deux forages

$$D_A = \sqrt{\beta^2 + 1} \operatorname{erfc}(\omega \sqrt{\beta^2 + 1}) - \beta \operatorname{erfc}(\omega \beta) - \frac{(\exp(-\omega^2(\beta^2+1)) - \exp(-\omega^2\beta^2))}{\omega\sqrt{\pi}}$$

$$D_B = \sqrt{\beta^2 + 1} \operatorname{erfc}(\omega \sqrt{\beta^2 + 1}) - \frac{1}{2} \left( \beta \operatorname{erfc}(\omega \beta) + \sqrt{\beta^2 + 4} \operatorname{erfc}(\omega \sqrt{\beta^2 + 4}) \right) - \frac{(\exp(-\omega^2(\beta^2+1)) - \frac{1}{2}(\exp(-\omega^2\beta^2) + \exp(-\omega^2(\beta^2+4))))}{\omega\sqrt{\pi}}$$

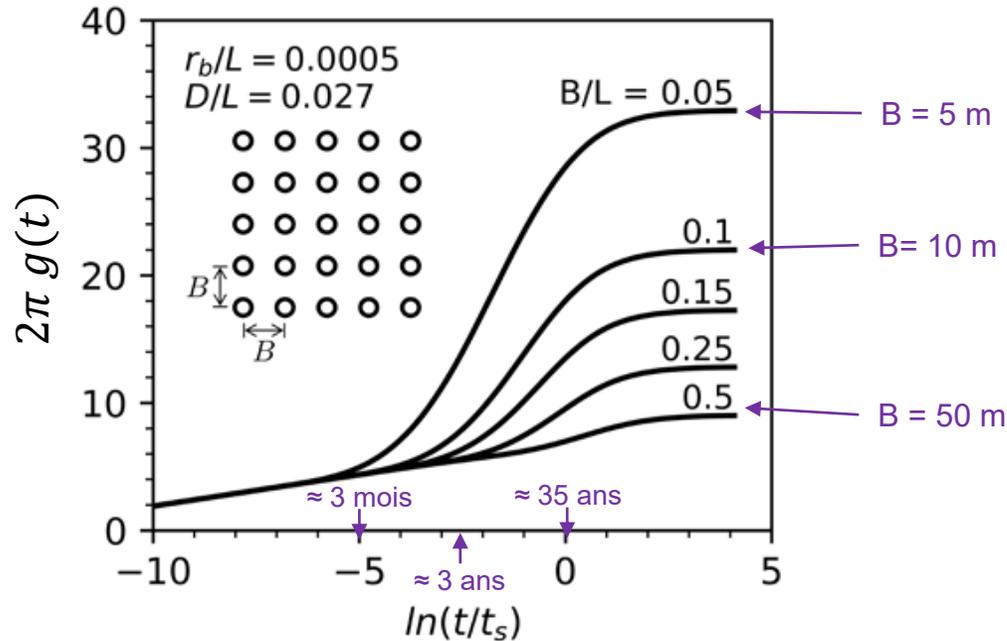
**Source** : Lamarche, L., Beauchamp, B., 2007. A new contribution to the finite line-source model for geothermal boreholes. Energy and Buildings 39, 188–198.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.06.003>

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Utilisation de solutions analytiques :
  - La fonction  $G$  traduit l'évolution de la température moyenne du fluide suite à un échelon de puissance. La fonction  $G$  est propre à un champ de sondes :

## Fonction $G$ pour un champ en grille pleine de 5x5 sondes

(Valeurs numériques pour une profondeur  $L = 100$  m)

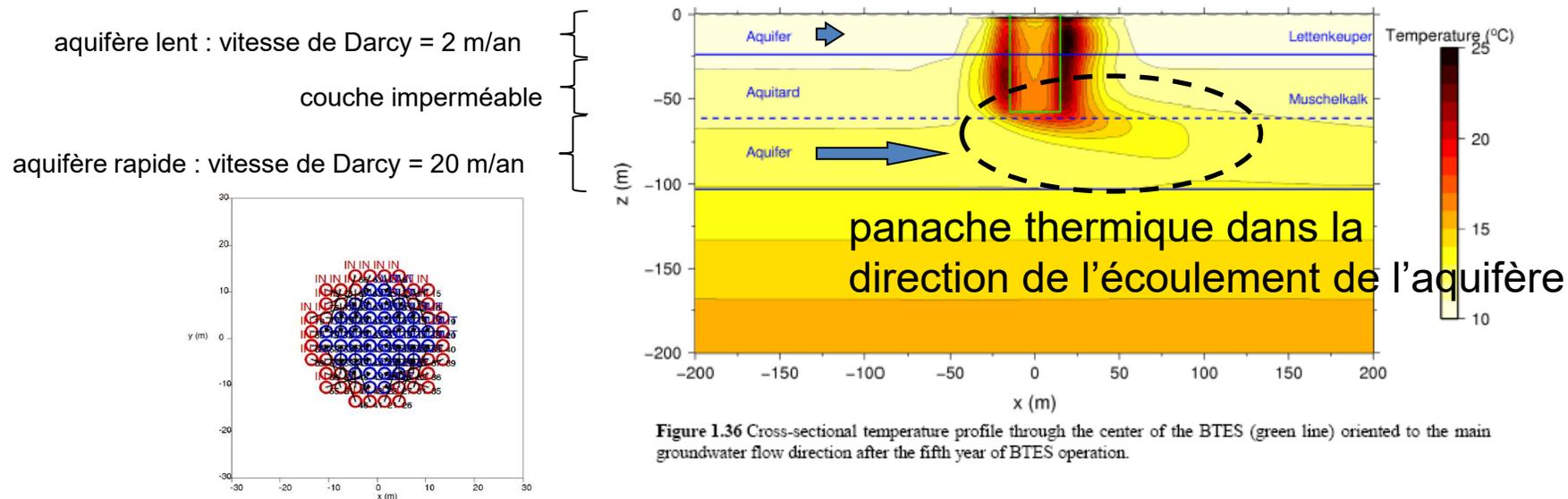


NB :  $t_s$  est un temps caractéristique défini par  $t_s = H^2 / (9\alpha_m)$   
 Pour  $\alpha_m = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  et  $H = 100 \text{ m} \Rightarrow t_s \approx 35 \text{ an}$

Source: Cimmino, M., 2018. Fast calculation of the g-functions of geothermal borehole fields using similarities in the evaluation of the finite line source solution. Journal of Building Performance Simulation 11, 655–668. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1423390>

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Discussion de l'hypothèse n°1 : Écoulement pas pris en compte
  - Si milieu hétérogène, avec écoulement : Résolution nécessite le recours à des méthodes numériques (éléments finis, etc.), lourdes à mettre en place
  - Exemple : Profil de température autour d'un champ de SGV traversant 2 aquifères distincts après 5 années de fonctionnement (d'après Riegger et al., avec logiciel FEFLOW)



# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Utilisation de solutions analytiques :

- Pour une SGV, la température du fluide dans le forage est de la forme :

$$T_{fl}(t) = T_0 + \frac{p}{\lambda_m} G(t)$$

- $T_0$  : température initiale du terrain (°C)
- $p$  : puissance linéaire échangée par mètre de forage ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$ ) = constante
- $\lambda_m$  : conductivité thermique du terrain ( $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ )
- Dans la réalité, la puissance échangée varie au cours du temps. Par application du principe de superposition, la température du fluide au pas de temps  $n$  est :

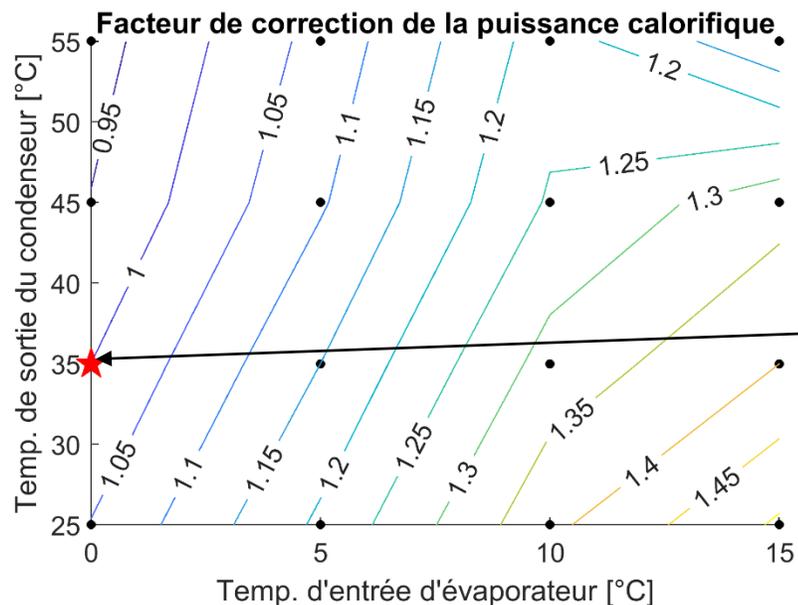
$$T_{fl}^n = T_0 + \frac{1}{\lambda_m} \left( p^1 G^n + \sum_{l=1}^{n-1} (p^{l+1} - p^l) G^{n-l} \right)$$

- La température à un instant  $t$  dépend donc de la chronique de puissance échangée depuis le début de l'exploitation, et pas seulement de la puissance échangée à l'instant  $t$ .

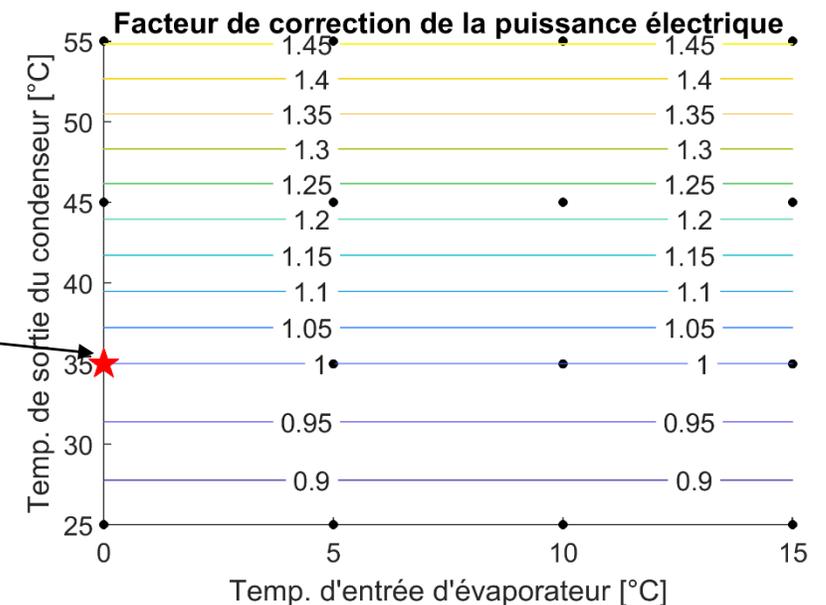
Avec  $t = n \Delta t$ , où  $\Delta t$  est le pas de temps

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DE LA POMPE À CHALEUR

- La Pompe A Chaleur est définie par :
  - Une puissance calorifique nominale à températures d'évaporation et de condensation de 0°C et 35 °C respectivement.
  - Un coefficient de performance nominal dans ces conditions
- Des corrections sont apportées en-dehors de ces températures :



Conditions nominales



# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉMETTEURS

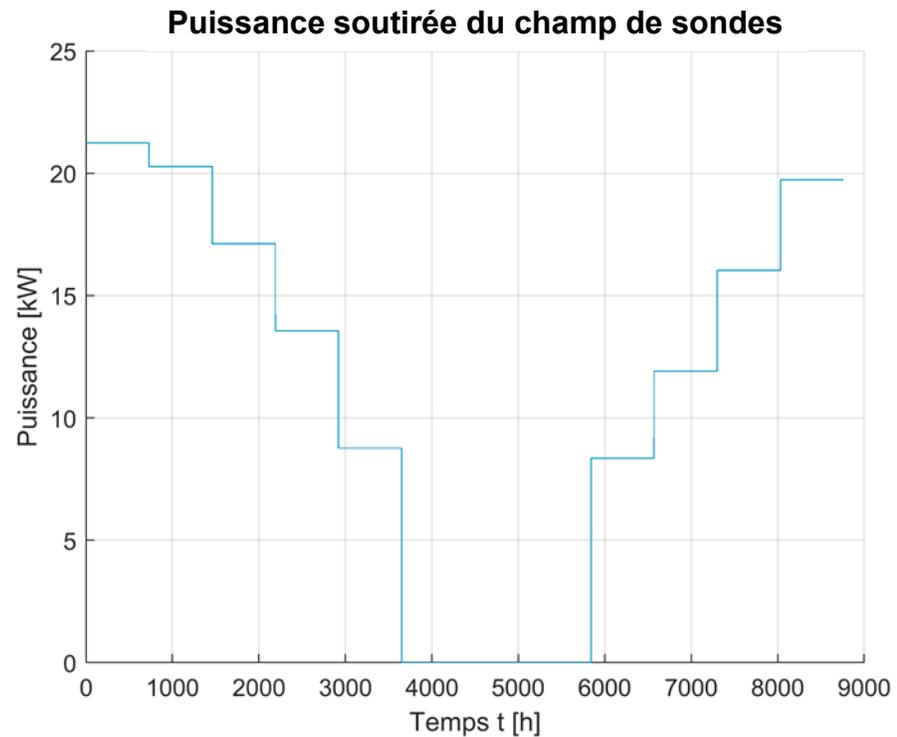
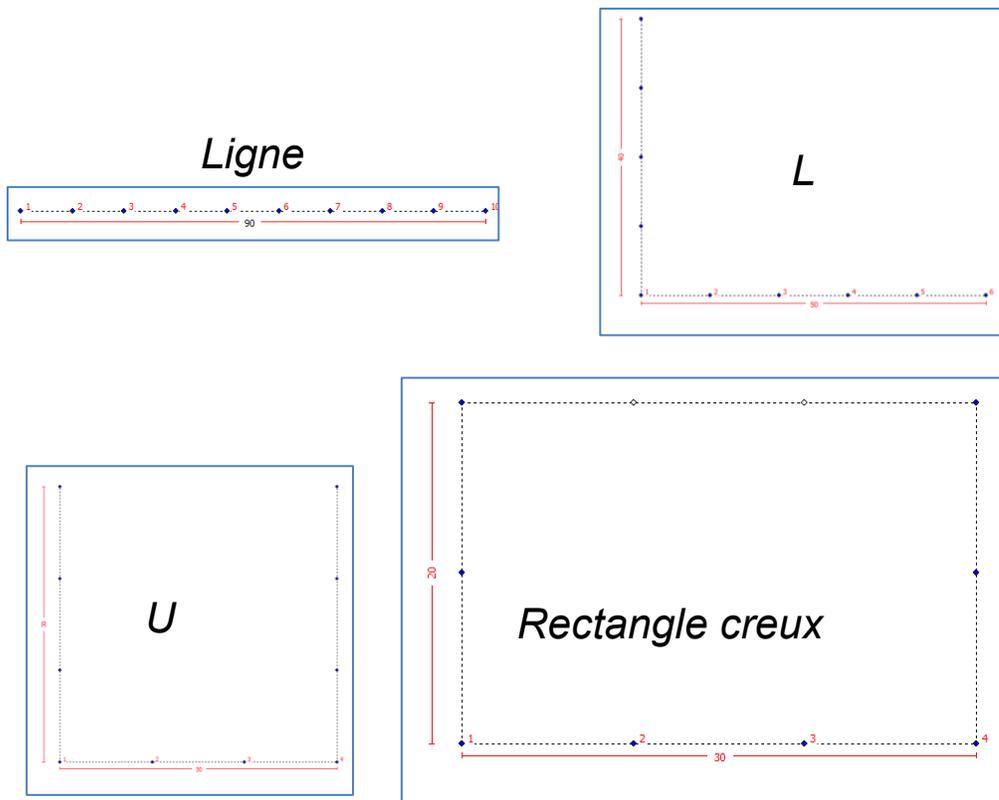
- Mode chauffage :
  - Une loi d'eau (variation de la température d'émission en fonction de la température de l'air extérieur) est prise en compte
- Mode climatisation :
  - Température d'émission (= température de sortie d'évaporateur) fixée par l'utilisateur
  - Hypothèse de fonctionnement : écart de température entrée/sortie de l'évaporateur = 5 °C
  - Remarque : actuellement le géo-cooling n'est pas pris en compte dans le moteur, uniquement le froid actif.

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : SIMULATION DYNAMIQUE

- A chaque pas de temps sont calculés :
  - La température à la paroi du forage,
  - La température du liquide caloporteur,
  - La puissance calorifique ou frigorifique que peut fournir la PAC,
  - Si la PAC ne peut pas couvrir l'intégralité du besoin, l'appoint fournit le complément. Les puissances en chaud et froid retournée dans les résultats correspondent au maxima des puissances d'appoint.

# VÉRIFICATION DE L'OUTIL : VS EED

- Vérification du calcul de l'évolution de la température de liquide caloporteur sur 25 ans
  - Sollicitation à puissances constantes mensuelles
  - 8 configurations : 4 implantations & 2 espacements (5 ou 10 m)



# VÉRIFICATION DE L'OUTIL : VS EED

## ● Hypothèses :

### ○ Sous-sol :

- Conductivité thermique =  $3,5 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Capacité calorifique =  $2,16 \text{ MJ.K}^{-1}.\text{m}^3$
- Température de surface =  $8 \text{ °C}$
- Flux géothermique =  $60 \text{ mW/m}^2$

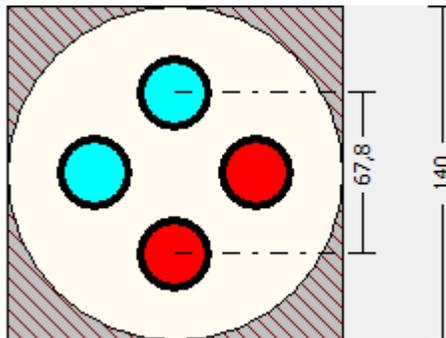
### ○ Sondes géothermiques :

- Profondeur  $H = 100 \text{ m}$
- Conductivité thermique du coulis =  $2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Conductivité thermique des tubes =  $0,42 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

### ○ Fluide caloporteur : Eau & mono-éthylène glycol

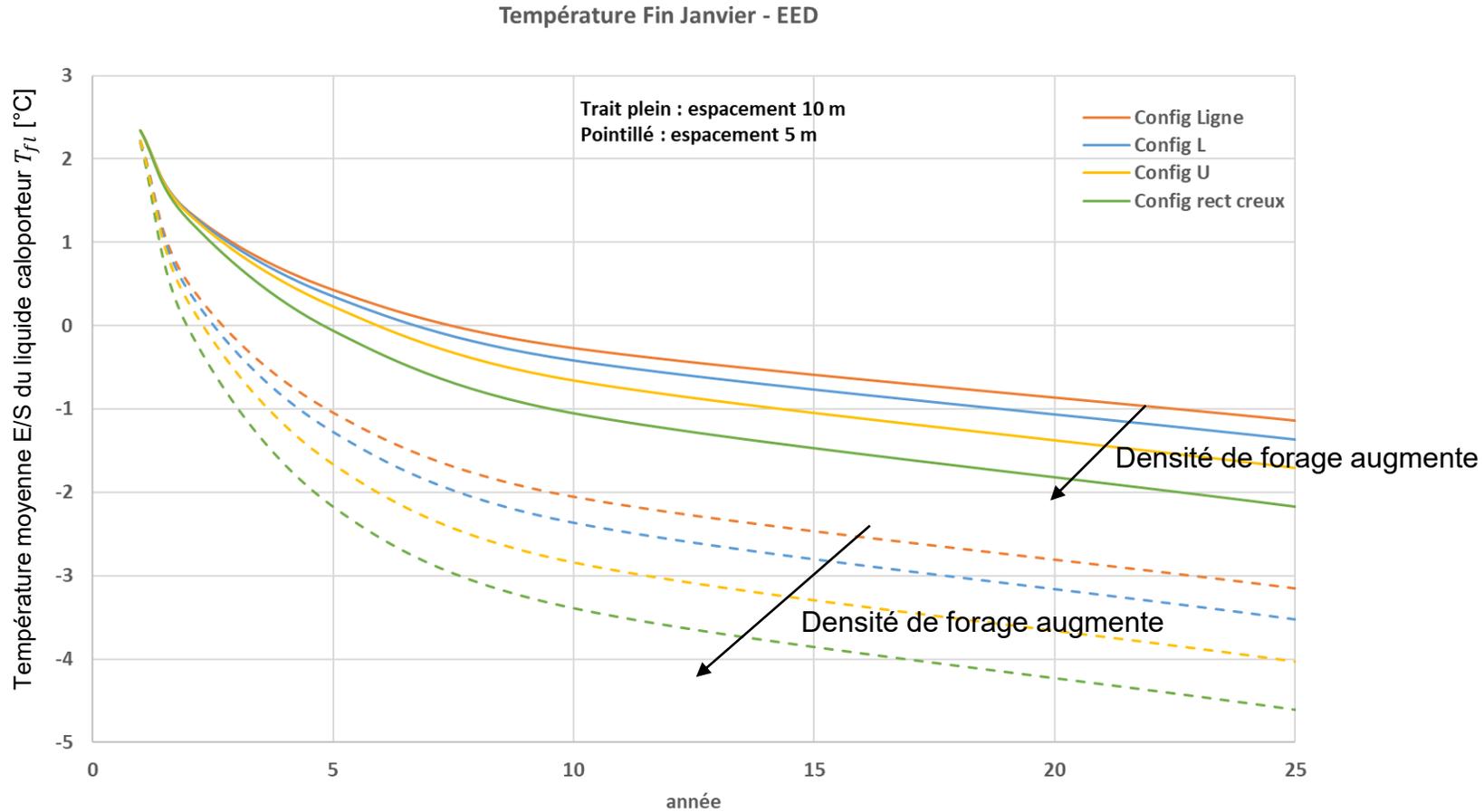
- Conductivité thermique =  $0,48 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Capacité calorifique =  $3795 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-3}$
- Masse volumique =  $1052 \text{ kg.m}^{-3}$
- Viscosité =  $0,0052 \text{ kg/(m.s)}$
- Point de congélation =  $-14 \text{ °C}$
- Débit par forage =  $0,15 \text{ l.s}^{-1}$

→ Résistance du forage =  $0,1345 \text{ K.m/W}$



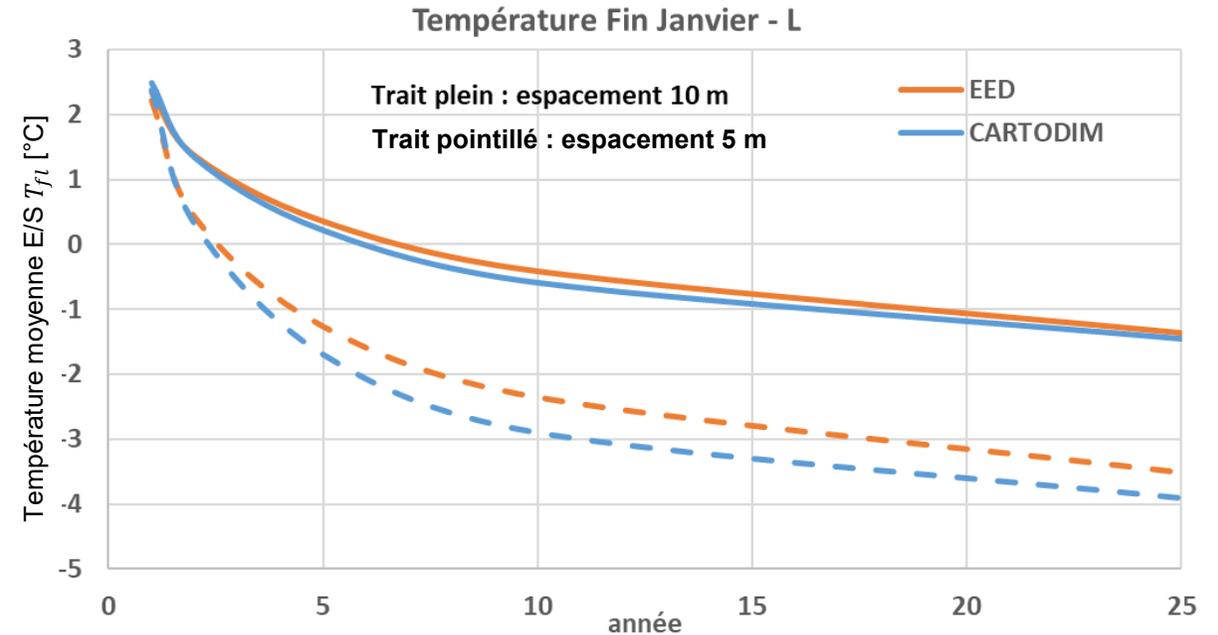
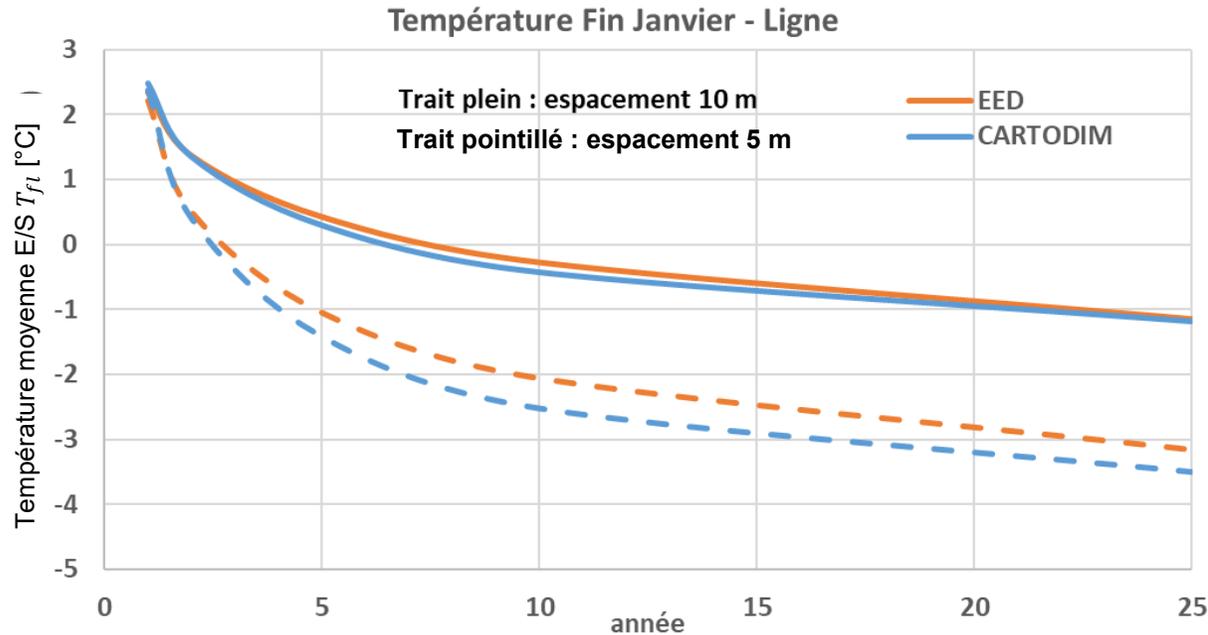
# VÉRIFICATION DE L'OUTIL : VS EED

- Résultats de EED :



# VÉRIFICATION DE L'OUTIL : VS EED

- Résultats du benchmark :



- Validation aussi avec module DST (Type 557) du logiciel TRNSYS et un modèle aux éléments finis en 3D implémenté dans Comsol-Multiphysics, cf. rapport BRGM/RP-70833-FR (<http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-70833-FR>)

# SOMMAIRE

- Rappel sur la géothermie de surface, les sondes géothermiques verticales, les pompes à chaleur
- Fonctionnement du moteur de calcul
- Données d'entrée du moteur de calcul
- Etude de cas

# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Utilisation de solutions analytiques :

- Pour un échangeur en boucle fermée, la température du fluide dans le forage est de la forme :

$$T_{fl}(t) = T_0 + \frac{p}{\lambda_m} G(t)$$

- $T_0$  : température initiale du terrain (°C)
- $p$  : puissance linéaire échangée par mètre de forage (W.m<sup>-1</sup>)
- $\lambda_m$  : conductivité thermique du terrain (W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>)
- La fonction  $G$  traduit l'évolution de la température moyenne du fluide suite à un échelon de puissance. Pour un champ de sondes, la fonction  $G$  est :

$$G(t) = \underbrace{\lambda_m R_f}_{\substack{\text{transfert} \\ \text{dans un forage}}} + \underbrace{G_0(t)}_{\substack{\text{transfert à} \\ \text{proximité} \\ \text{d'un forage}}} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N G_{i \rightarrow j}(t)}_{\text{interactions entre les } N \text{ forages}}$$

- La fonction  $G$  est propre à chaque champ de sondes
- Remarque : Fonction  $G$  utilisée ici est la « Ligne Source Finie ». Convient uniquement aux sondes et pas aux pieux et corbeilles (car diamètre >> diamètre d'une sonde)

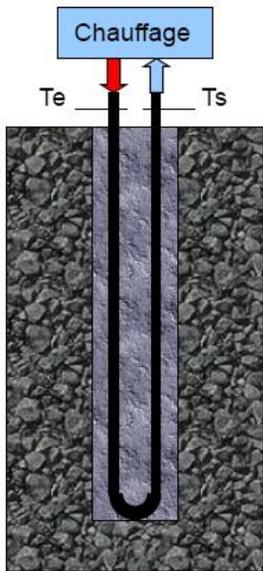
# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Estimation de  $T_0$ ,  $\lambda_m$  et  $R_f$  possible par un Test de Réponse Thermique (TRT) :

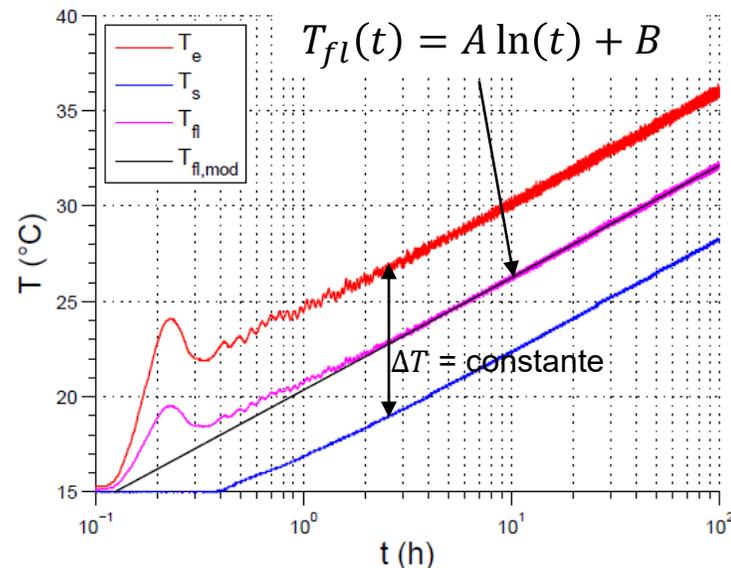
- Déroulement du test en deux phases :

- Circulation à débit constant → Fluide à la température moyenne  $T_0$  du terrain
- Circulation à débit et puissance  $P$  constants → Mesure de l'évolution de  $T_e$  et  $T_s$   
→ Ajustement de  $\lambda_m$  et  $R_f$  via une fonction  $G$  de la Ligne Source Infinie :

$$T_{fl}(t) \approx T_0 + p \left[ R_f + \frac{1}{4\pi\lambda_m} \left( \ln \left( \frac{4\lambda_m}{(\rho C_p)_m r_f^2} t \right) - \gamma \right) \right] = \underbrace{\frac{p}{4\pi\lambda_m} \ln(t)}_{=A} + T_0 + p \underbrace{\left[ R_f + \frac{1}{4\pi\lambda_m} \left( \ln \left( \frac{4\lambda_m}{(\rho C_p)_m r_f^2} \right) - \gamma \right) \right]}_{=B}$$



Le mini-module de TRT développé par l'EPFL

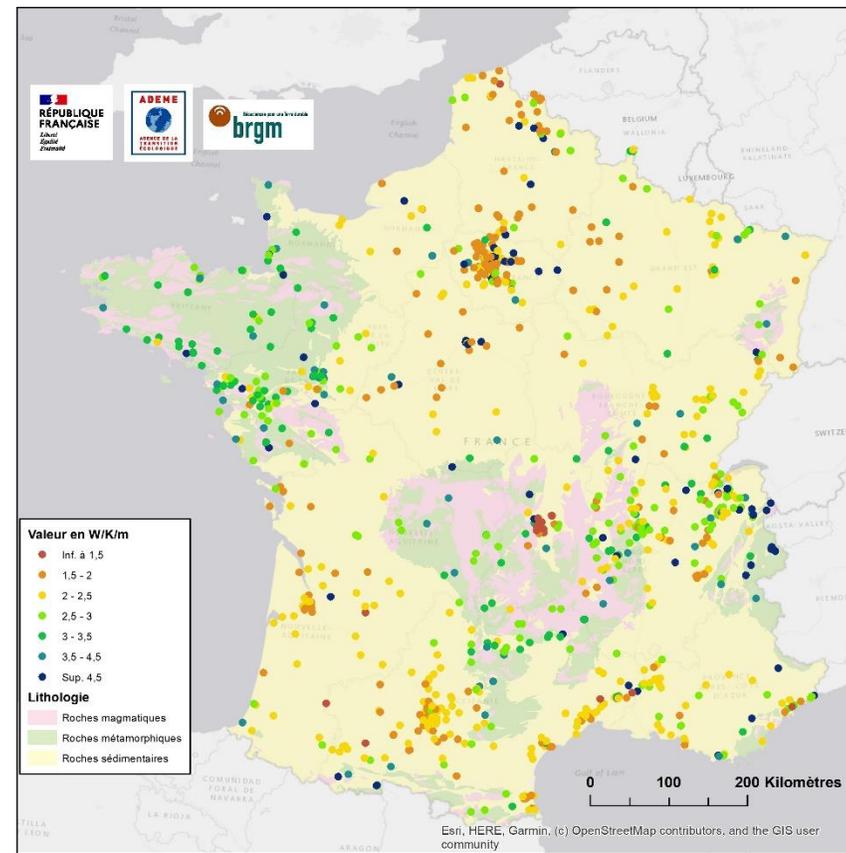
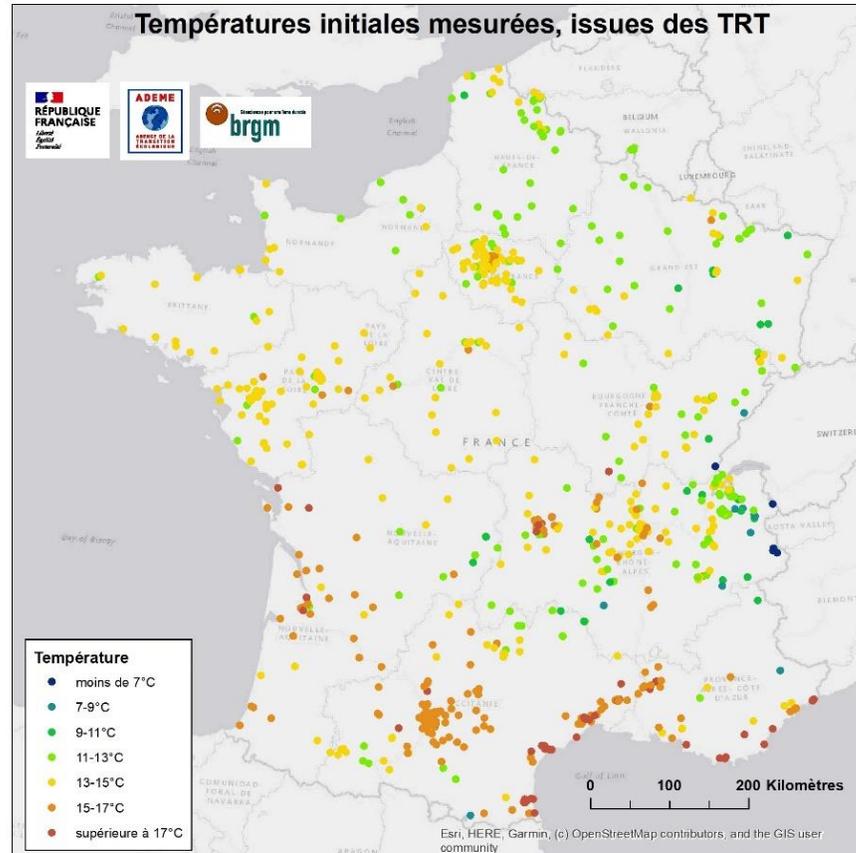


Evolution de la température. TRT réalisé sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans

- $(\rho C_p)_m$  : capacité calorifique du terrain [ $\text{MJ.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$ ], lue dans une table
- $r_f$  : rayon du forage [m]
- $\gamma \approx 0,5773$  : constante d'Euler
- NB: Les données mesurées avant  $t = 5r_f^2(\rho C_p)_m / \lambda_m$  ne sont pas prises en compte du fait des phénomènes transitoires dans le forage

# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- BRGM : Bancarisation et diffusion de TRT :

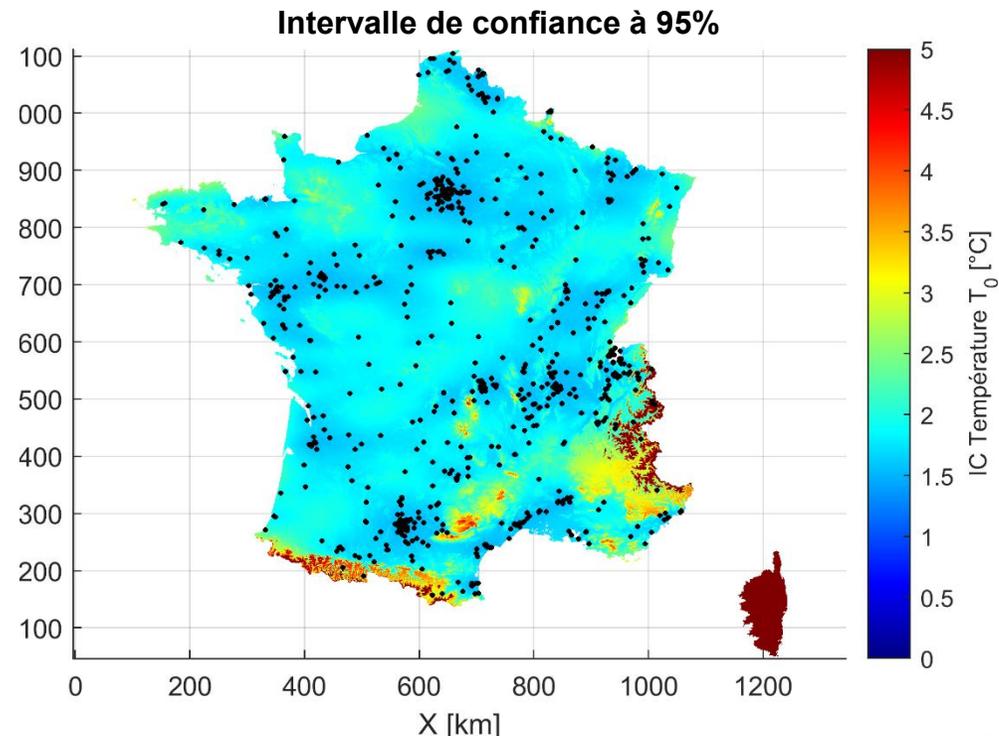
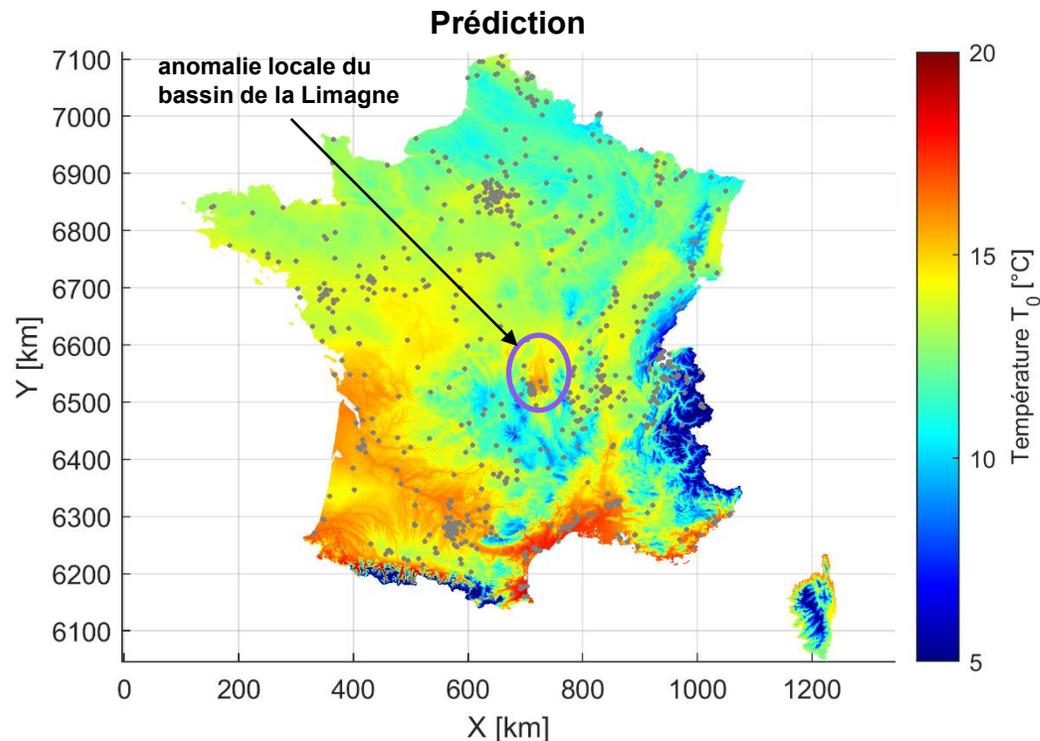


Température initiale du terrain  $T_0$  (gauche) et conductivité thermique mesurée  $\lambda_m$  sur 1000 TRT (droite). Etat à avril 2025. <https://www.geothermies.fr/viewer/>

# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

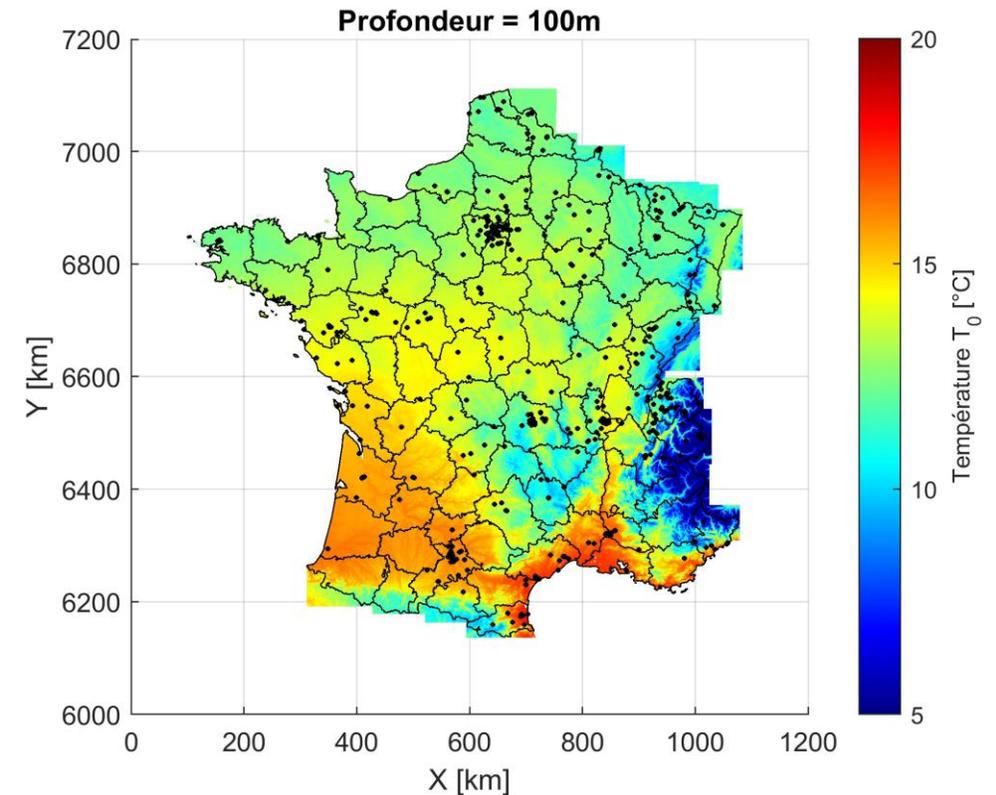
- Température initiale du terrain  $T_0$  : Régression par krigeage (= processus gaussiens) sur 737 points.
  - Régression  $T_0 = \text{fonction}(\text{latitude}, \text{longitude}, \text{altitude}, \text{profondeur})$
  - Root Mean Square Error (RMSE)  $\approx 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
  - Ce modèle simplifié peut donc permettre d'estimer rapidement  $T_0$  en phase de pré-projet, avant le TRT.

Température moyenne estimée  $T_0$  pour une sonde profonde de 100 m



# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

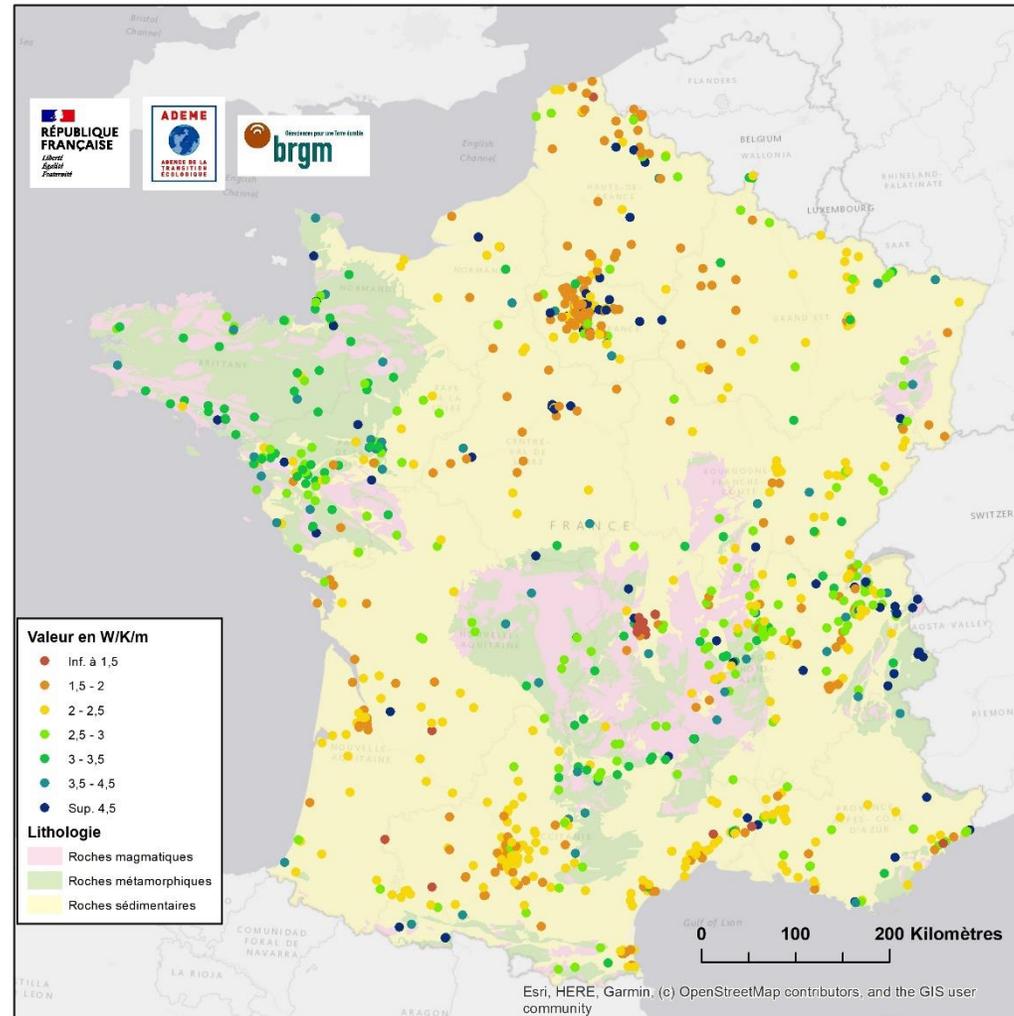
- **/!\ Actuellement implémenté dans l'outil:**
  - Construction d'une régression polynomiale  $T_0 = \text{fonction}(\text{latitude}, \text{longitude}, \text{altitude}, \text{profondeur})$  sur  $\approx 360$  TRT répartis sur toute la France métropolitaine
  - Root Mean Square Error (RMSE)  $\approx 1,2$  °C
  - Ce modèle simplifié peut donc permettre d'estimer rapidement  $T_0$  en phase de pré-projet, avant qu'un TRT ne soit réalisé.



Température moyenne estimée  $T_0$  pour une sonde profonde de 100 m – régression polynomiale (implémentée dans l'outil)

# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

Carte lithologique (extrêmement) simplifiée de la France



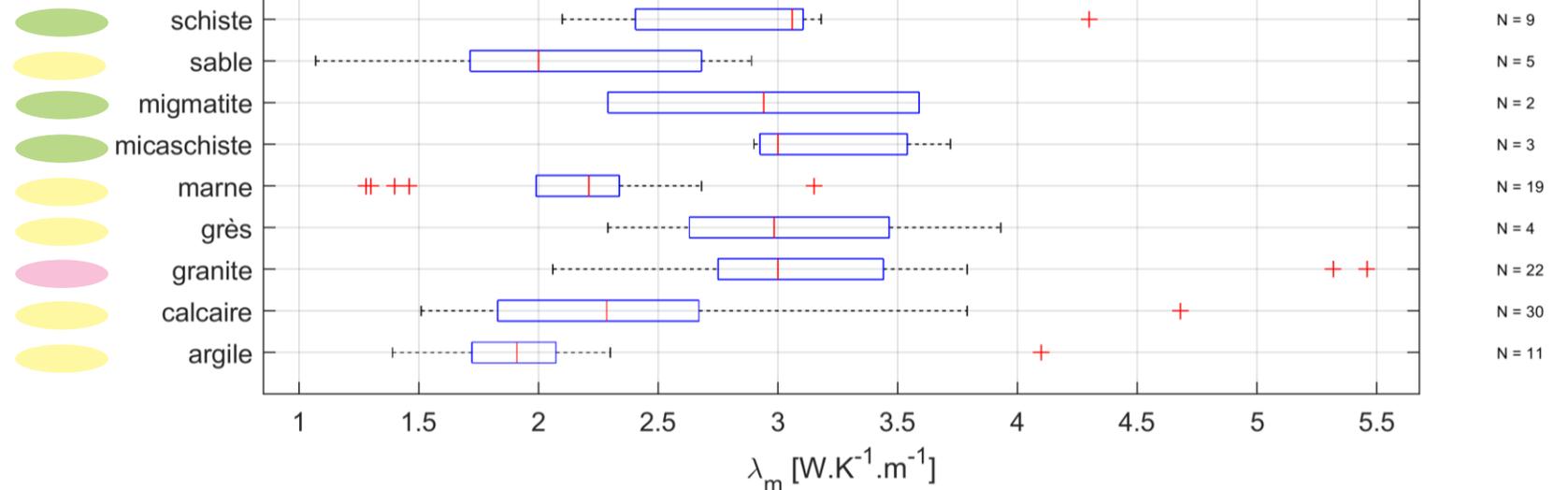
# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Conductivité thermique du terrain  $\lambda_m$  :
  - NB :  $\lambda_m$  augmente avec la teneur en quartz et la densité de la roche

Conductivité mesurée sur 105 forages dont plus de 80% de la hauteur traverse une seule lithologie (rapport BRGM/RP70833-FR)

## Lithologie

- Roches magmatiques
- Roches métamorphiques
- Roches sédimentaires



NB : La boîte bleue s'étend du premier au dernier quartile, et couvre donc 50 % des valeurs ; la barre rouge centrale représente la valeur médiane ; les croix rouges représentent les points s'écartant considérablement de la médiane ; les barres noires pointillés s'étendent du minimum au maximum de l'échantillon à l'exclusion de ces points

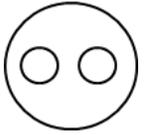
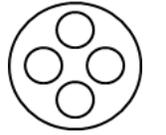
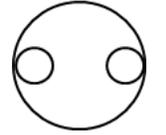
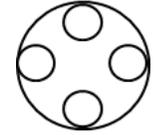
# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Propriétés thermiques d'après norme suisse SIA-384/6 :

	Type de roche	Conductivité thermique $\lambda$ W/(m·K)		Capacité thermique spéc. $\rho c$ MJ/(m <sup>3</sup> ·K)		Densité $\rho$ 10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>
		Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée	Plage des valeurs	Valeur de calcul recommandée	
Terrains meubles	Argile sèche	0,4 – 1,0	0,6	1,5 – 1,6	1,5	1,8 – 2,0
	Argile saturée d'eau	0,9 – 2,3	1,4	2,0 – 2,8	2,3	2,0 – 2,2
	Sable sec	0,3 – 0,8	0,5	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Sable saturé d'eau	1,5 – 4,0	2,3	2,2 – 2,8	2,4	1,9 – 2,3
	Gravier/pierres, sec	0,4 – 0,5	0,4	1,3 – 1,6	1,4	1,8 – 2,2
	Gravier/pierres, saturé d'eau	1,6 – 2,0	1,7	2,2 – 2,6	2,3	1,9 – 2,3
	Moraine compacte	1,7 – 2,4	1,8	1,5 – 2,5	2,0	1,9 – 2,5
	Tourbe	0,2 – 0,7	0,4	0,5 – 3,8	1,6	0,5 – 0,8
Roches sédimentaires	Roche molassique suisse	voir tableau 7		1,8 – 2,6	2,1	2,4 – 2,7
	Argilite	1,1 – 3,5	1,9	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,6
	Grès		2,3	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Conglomérat/brèche	1,3 – 5,1	2,6	1,8 – 2,6	2,1	2,2 – 2,7
	Roche marneuse	1,5 – 3,5	2,1	2,2 – 2,3	2,2	2,3 – 2,6
	Roche calcaire	2,5 – 4,0	2,8	2,1 – 2,4	2,2	2,4 – 2,7
	Roche sulfatée (anhydrite, gypse)	1,3 – 2,8	1,6		2,0	
Roches de fond magmatiques	Granite	2,1 – 4,1	2,8	2,1 – 3,0	2,4	2,4 – 3,0
	Diorite	2,0 – 2,9	2,3		2,7	2,9 – 3,0
	Gabbro	1,7 – 2,5	2,0		2,6	2,8 – 3,1
Roches de fond métamorphes	Schistes argileux	1,5 – 2,6	1,9	2,2 – 2,5	2,3	2,4 – 2,7
	Marbre	1,3 – 3,1	1,9		2,0	2,5 – 2,8
	Quartzite	5,0 – 6,0	5,3		2,1	2,5 – 2,8
	Micaschistes	1,5 – 3,1	2,0	2,2 – 2,4	2,3	2,4 – 2,7
	Gneiss	1,9 – 4,0	2,6	1,8 – 2,4	2,0	2,4 – 2,7
	Amphibolite	2,1 – 3,6	2,6	2,0 – 2,3	2,1	2,6 – 2,9

# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

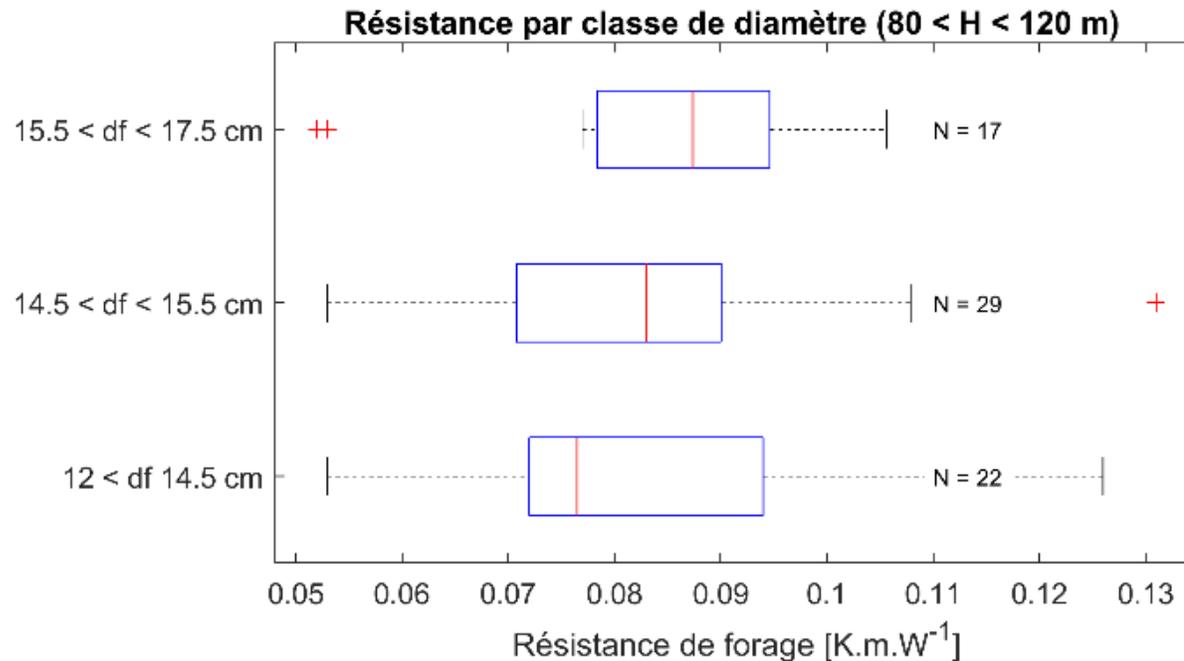
- Résistance du forage  $R_f$  : somme de 3 termes:
  - Convection forcée dans le tube : Négligeable si le régime d'écoulement est turbulent
  - Conduction à travers le tube en PE
  - Conduction à travers le coulis

Arrangement des tuyaux dans le forage				
Distance centre à centre des tuyaux [cm]	8.3	8.3	11.7	11.7
<u>Matériau de remplissage</u>	<u>Résistance thermique de forage <math>R_f</math> [m.K/W]</u>			
Coulis de bentonite standard ( $\lambda_c = 0,6 \text{ K.m}^{-1}.\text{W}^{-1}$ )	0.199	0.132	0.146	0.071
Coulis amélioré ( $\lambda_c = 1,8 \text{ K.m}^{-1}.\text{W}^{-1}$ )	0.098	0.061	0.088	0.042

D'après M. Philippe, M. Bernier, D. Marchio, O. Cauret, *Dimensionnement de sondes géothermiques verticales pour des applications de chauffage / rafraîchissement par pompes à chaleur*. n° 874 de mai/juin 2012 de la revue CVC.

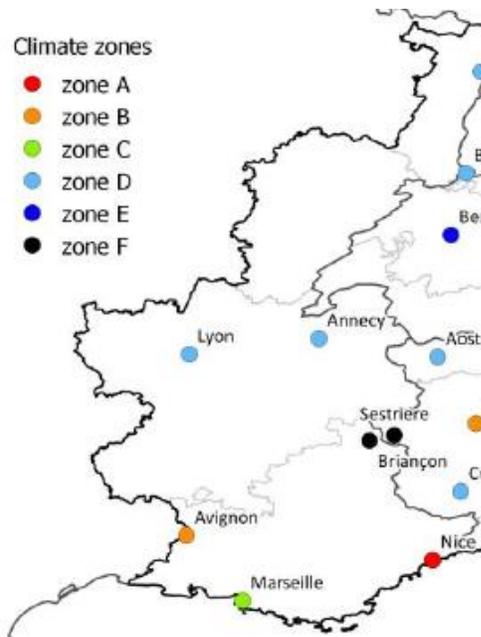
# DONNÉES D'ENTRÉE : ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Retour d'expérience sur la résistance thermique  $R_f$  (rapport BRGM/RP70833-FR) :
  - $R_f$  mesurées lors de Tests de Réponse Thermique
  - Typiquement :  $R_f \approx 0,07$  à  $0,09$  K.m/W avec de l'eau claire (et régime turbulent)
  - Mais eau glycolée pendant le fonctionnement (régime laminaire)  
→  $R_f \approx 0,10$  à  $0,12$  K.m/W pour la même sonde

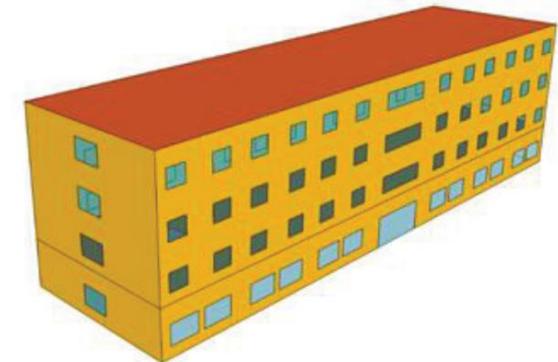
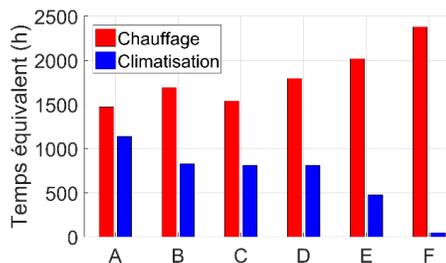
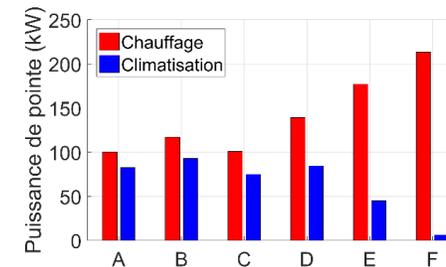
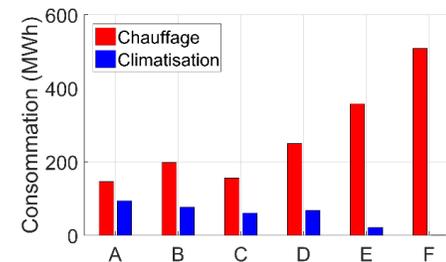


# DONNÉES D'ENTRÉE : BESOINS THERMIQUES DU BÂTIMENT

- Option A : L'utilisateur fournit au pas de temps horaire : chauffage, climatisation
- Option B : L'utilisateur sélectionne un climat-type (parmi 6) et un type de bâtiment (parmi 6)
  - Données produite dans le cadre du projet Européen Espace Alpin GRETA (2016-2018) par Polytechnique Turin



Exemple de l'hôtel bien isolé

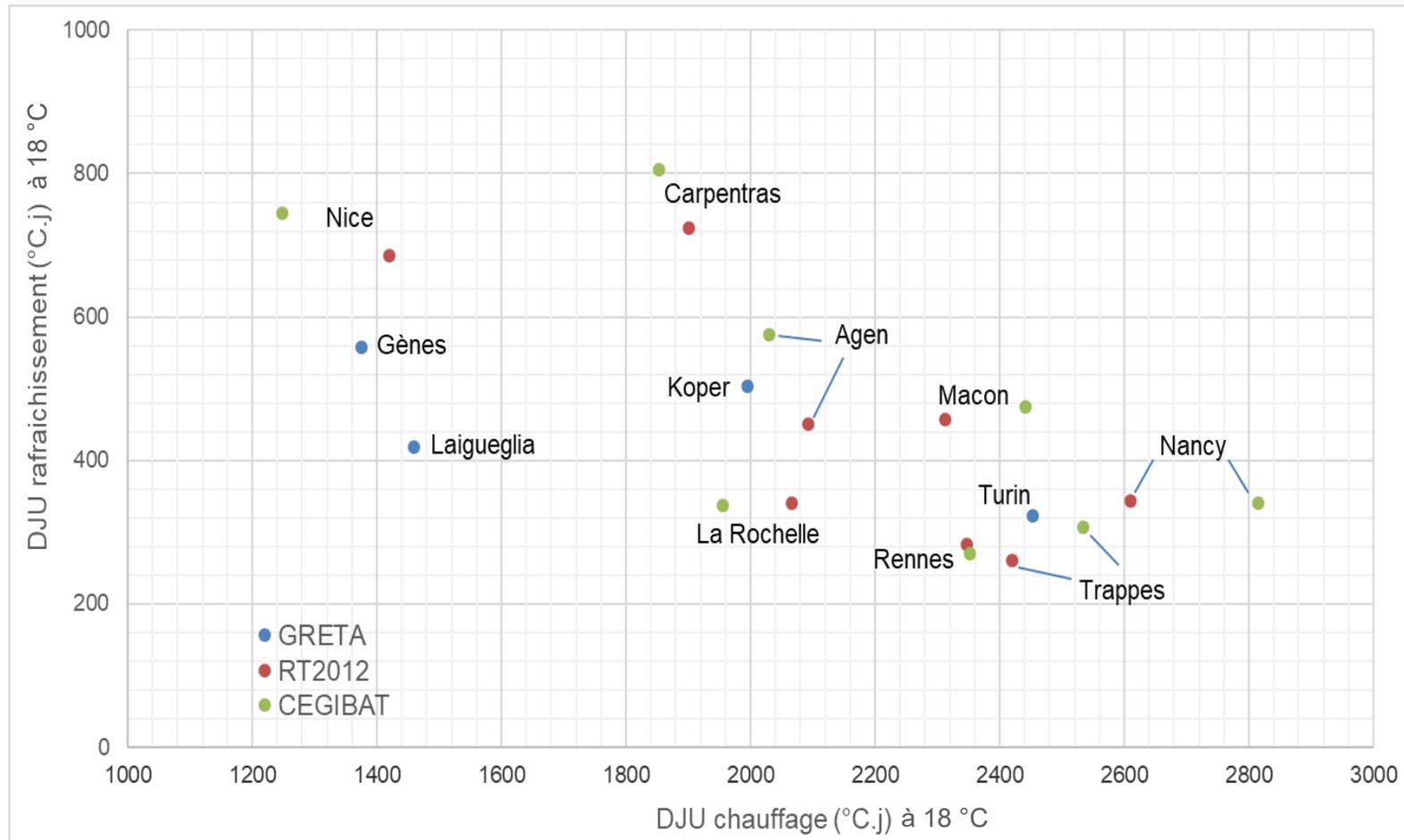


Interreg  
Alpine Space  
Greta  
EUROPEAN REGIONAL DEVELOPMENT FUND



# DONNÉES D'ENTRÉE : BESOINS THERMIQUES DU BÂTIMENT

- ... Option B : Possibilité de « mettre à l'échelle » les courbe-types pour les appliquer à vos projets



# DONNÉES D'ENTRÉE : SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Système de surface

PAC

Puissance calorifique de la PAC à 0/35 °C  $P_{cal,nom}$

[kW]

COP chaud de la PAC à 0/35 °C  $COP_{ref}$

Réinitialiser aux valeurs par défaut Tracer le graphique

Appoint

Appoint en chauffage :

Appoint en climatisation : PAC air/eau

COP chaud de la PAC air/eau

Réinitialiser aux valeurs par défaut

Système de chauffage et rafraîchissement

Emetteurs de chaud

Emetteurs de froid

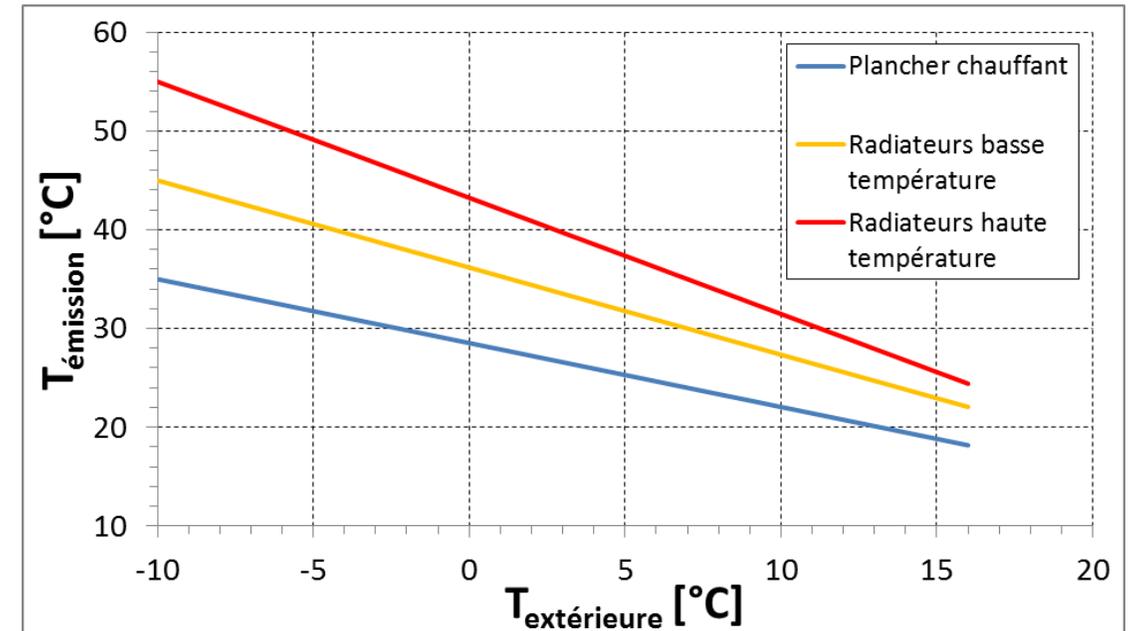
Température de départ  °C

Réinitialiser aux valeurs par défaut

L'utilisateur indique la puissance calorifique et le COP de la PAC pour des températures d'évaporation et condensation de 0°C et 35 °C respectivement.

# DONNÉES D'ENTRÉE : SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

- Modélisation des émetteurs (mode chauffage) :
  - Plancher chauffant
  - Radiateurs basse température
  - Radiateurs haute température
- Trois lois d'eau associées pour le chauffage
- Ou possibilité de saisir sa propre loi d'eau



# EVOLUTIONS PRÉVUES DE L'OUTIL

- A court terme (juillet 2025) :
  - Choix du fluide caloporteur et Moteur de calcul de la résistance du forage
- A moyen terme (fin 2025) :
  - Eau chaude sanitaire
  - Thermofrigopompe
- A long terme : Module d'optimisation pour placer automatiquement les forages, géocooling
  
- NB : cf. rapports BRGM/RP-69797-FR (<http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-69797-FR>) et surtout BRGM/RP-70833-FR pour une description détaillée de l'outil (<http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-70833-FR>)

# ACCÈS AU CODE-SOURCE DE L'OUTIL

- Le développement de l'outil de dimensionnement repose sur deux piliers :
  - Le coeur de calcul physique
  - L'interface web
- Le coeur physique est un module Python disponible en *open-source* sur la page Gitlab du BRGM (site similaire à Github) : <https://gitlab.com/brgm/geothermal/geodim>
- **geodim** doit être téléchargé directement (version alpha, pas d'install *via* pip ou conda)
- Le module vient avec des fichiers test pour les parties maison individuelle et bâtiment.

BRGM / Geothermal Energy / Geodim

main geodim / tests / runs Historique Rechercher un fichier Code

First version of code  
Guillon Theophile rédigé il y a un mois bb427f9d

Nom	Dernière validation	Dernière mise à jour
..		
📁 bhe_field_files	First version of code	il y a un mois
📁 custom_files	First version of code	il y a un mois
📄 run.py	First version of code	il y a un mois
📄 run_MAPAC.py	First version of code	il y a un mois
📄 run_custom_files.py	First version of code	il y a un mois
📄 test_bhe_formation.py	First version of code	il y a un mois
📄 tests_bhe.py	First version of code	il y a un mois

# SOMMAIRE

- Rappel sur la géothermie de surface, les sondes géothermiques verticales, les pompes à chaleur
- Fonctionnement du moteur de calcul
- Données d'entrée du moteur de calcul
- Etude de cas

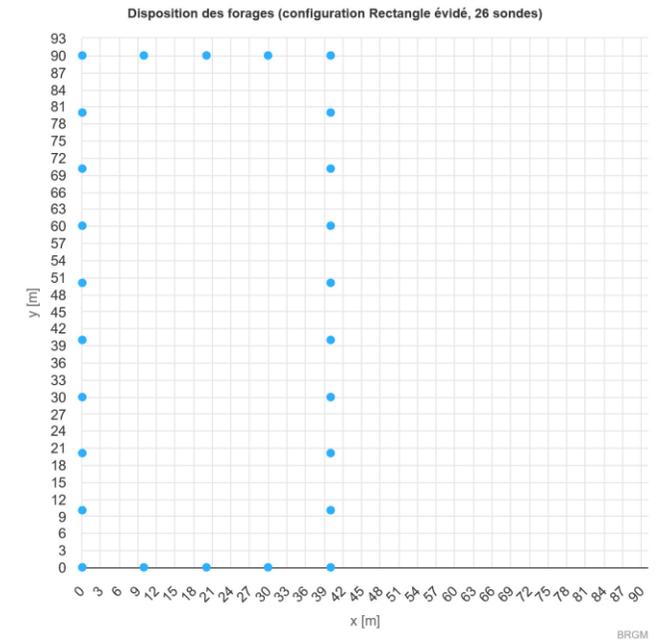
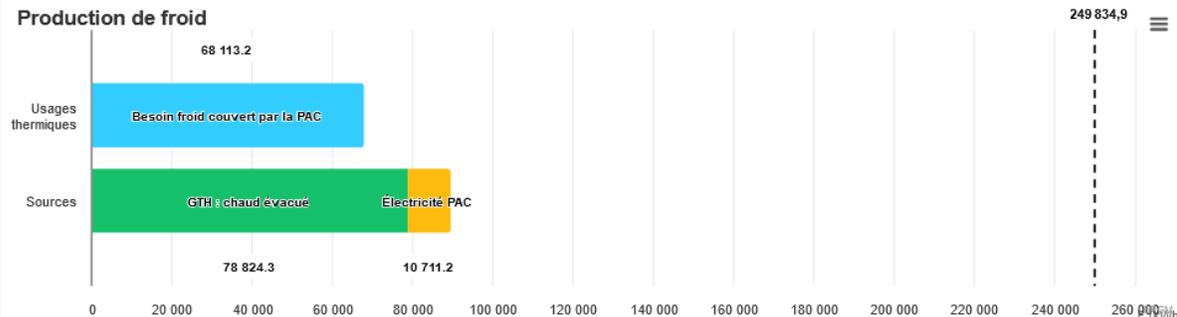
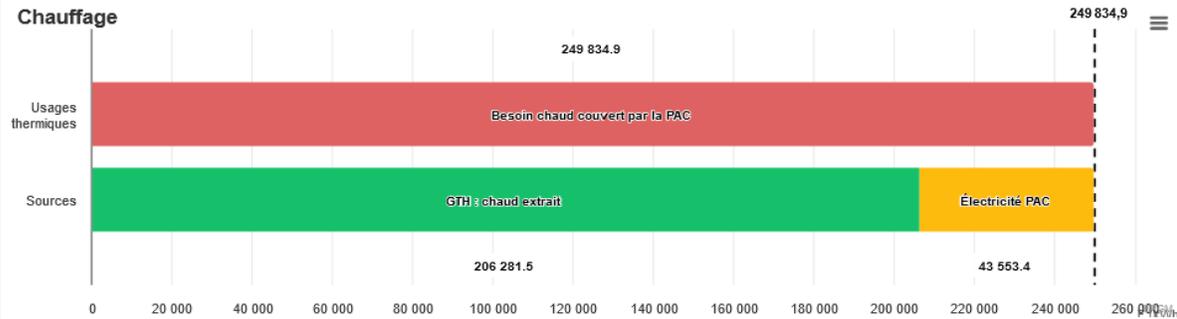
# ETUDE DE CAS

- Critère : Dimensionnement d'un champ de sondes en appliquant le seuil réglementaire fixé par l'Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance : La température d'entrée d'échangeur géothermique doit être comprise entre **-3°C** (chauffage) et **+40 °C** (climatisation)
- Données (fixées) :
  - Bâtiment avec des besoins de froid et de chaud : Climat type « Turin », « Hôtel récent bien isolé »
  - Système énergétique :
    - COP chaud de la PAC à 0/35 °C  $COP_{ref} = 4,5$
    - Appoint : chaud → résistance électrique ; Appoint en climatisation = PAC air/eau avec COP = 3
    - Système de chauffage et rafraîchissement : Emetteurs de chaud : Planchers chauffants ; Emetteurs de froid avec température de départ = 7 °C
  - Sondes et Champ de sondes :
    - $R_f = 0,11 \text{ K.m/W}$
    - Parcelle disponible pour l'implantation : rectangle de 100 x 50 m
  - Terrain :
    - Température initiale du terrain = 15 °C
    - Conductivité thermique = 2 W/(K.m)
- Dimensionner le champ de sondes :
  - Dans un « cas de référence » : PAC dimensionnée pour couvrir 100 % de la puissance de chauffage
  - Etudier l'influence de :
    - La configuration du champ de sondes (en respectant les contraintes foncières)
    - La conductivité thermique du terrain : 1,5 à 3,5 W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>
    - La température initiale du terrain : 13 à 17 °C
    - Le besoin de froid (recharge thermique)
    - La puissance calorifique nominale de la PAC, couvrant de 30% à 100% de la puissance de chauffage

# ETUDE DE CAS

- Dimensionnement dans le cas de référence (PAC de 140 kW permettant de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage) :
- **Dimensionnement n°1** : 26 sondes profondes de 103 m espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire creuse → **Longueur forée = 2678 m**

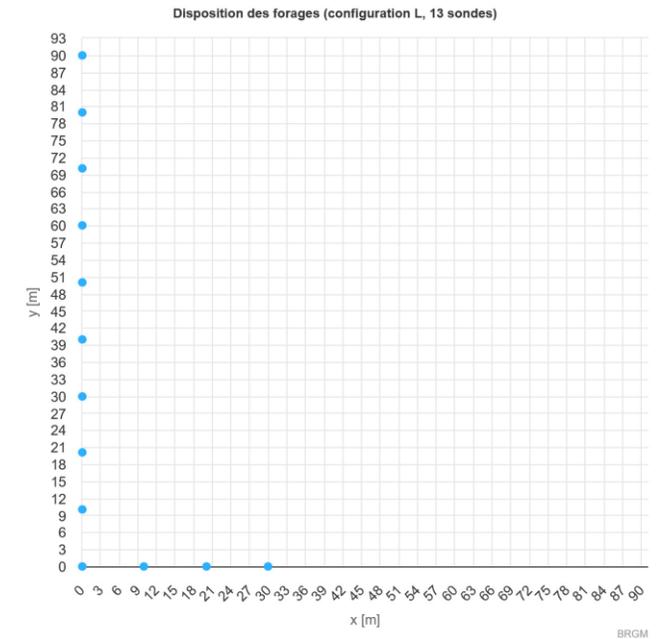
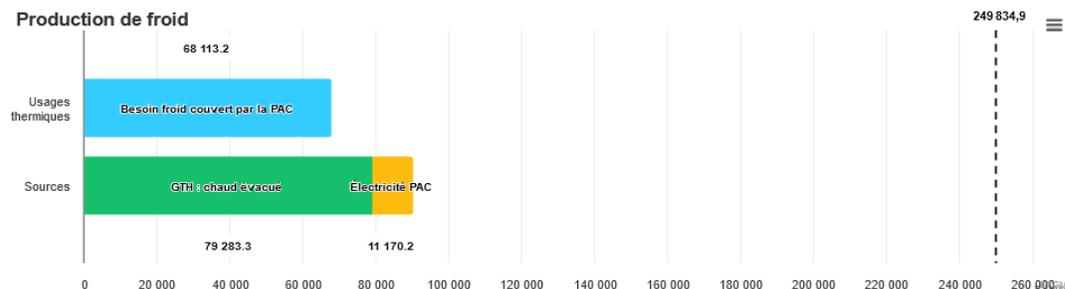
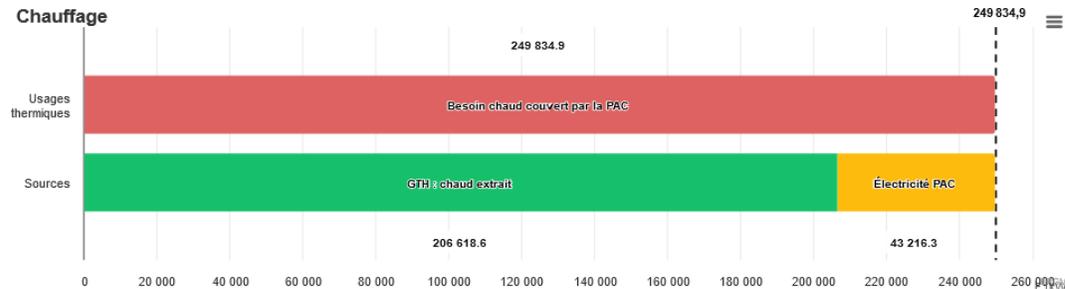
Sur la dernière année de fonctionnement, le SCOP chaud de la PAC hors appoint est de **5,74**.  
 Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est de **1 784,54** heures.  
 Puissance d'appoint à installer en chaud : **0,00** kW  
 Puissance d'appoint à installer en froid : **0,00** kW  
 Température minimale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique : **-3,07** °C  
 Température maximale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique : **26,09** °C



# ETUDE DE CAS

- Dimensionnement dans le cas de référence (PAC de 140 kW permettant de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage) :
  - **NB:** La sonde étant plus profonde,  $T_0$  devrait être corrigé pour prendre en compte l'augmentation de température avec la profondeur, typiquement de 0,03 °C/m
  - **Dimensionnement n°2 :** 13 sondes profondes de 177 m espacées de 10 m, réparties sur un « L » → **Longueur forcée = 2301 m**

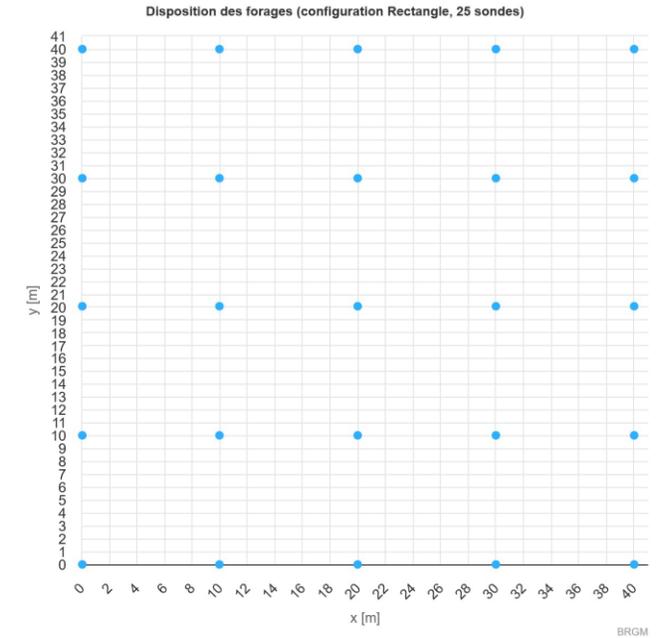
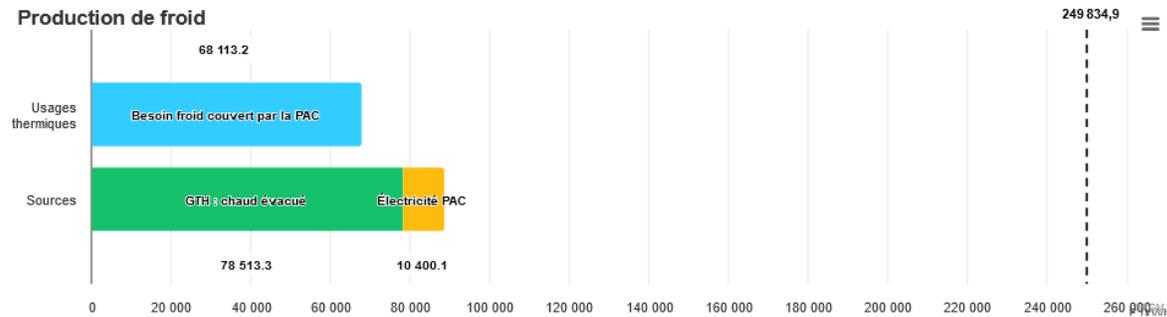
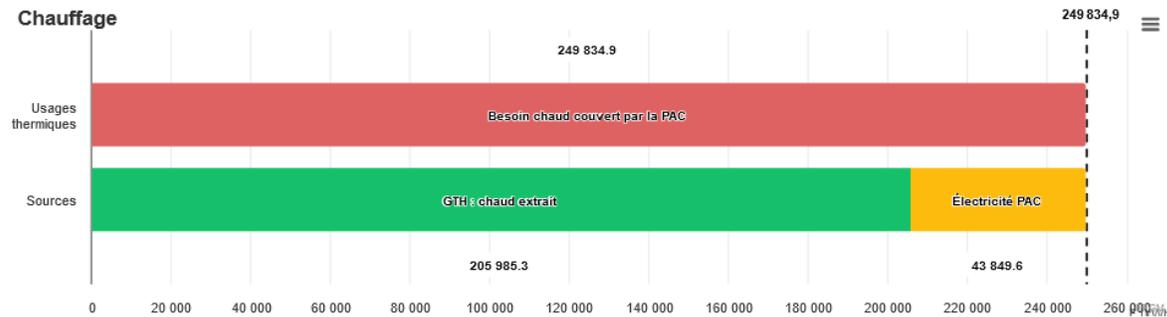
Sur la dernière année de fonctionnement, le SCOP chaud de la PAC hors appoint est de **5,78**.  
 Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est de **1 784,54** heures.  
 Puissance d'appoint à installer en chaud : **0,00** kW  
 Puissance d'appoint à installer en froid : **0,00** kW  
 Température minimale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique : **-2,96** °C  
 Température maximale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique : **28,16** °C



# ETUDE DE CAS

- Dimensionnement dans le cas de référence (PAC de 140 kW permettant de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage) :
- **Dimensionnement n°3** : 25 sondes profondes de 128 m espacées de 10 m, réparties sur un grille en rectangle plein → **Longueur forcée = 3200 m**

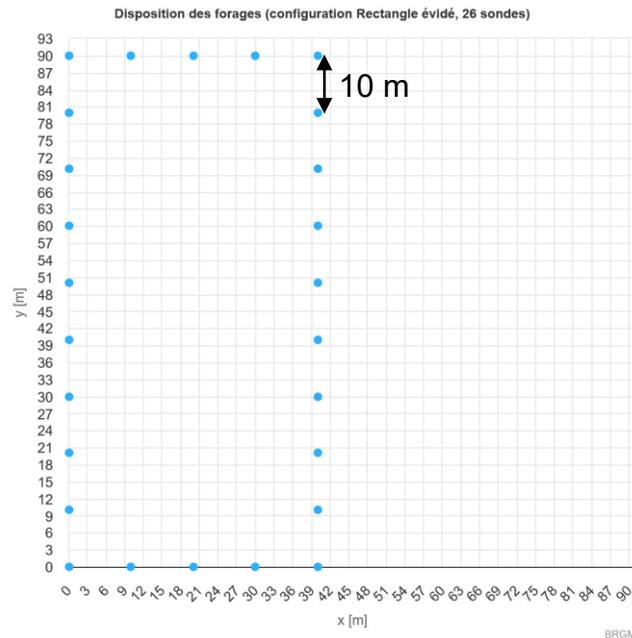
Sur la dernière année de fonctionnement, le SCOP chaud de la PAC hors appoint est de **5,70**.  
 Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est de **1 784,54** heures.  
 Puissance d'appoint à installer en chaud : **0,00** kW  
 Puissance d'appoint à installer en froid : **0,00** kW  
 Température minimale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique : **-2,99** °C  
 Température maximale de fluide à l'entrée de l'échangeur géothermique : **24,88** °C



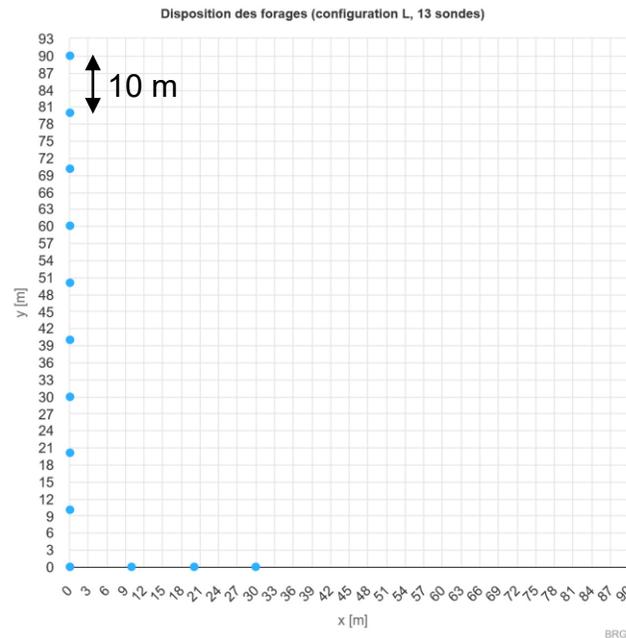
# ETUDE DE CAS

- Dimensionnement dans le cas de référence (PAC de 140 kW permettant de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage) : Résumé sur l'influence de la densité de forages :

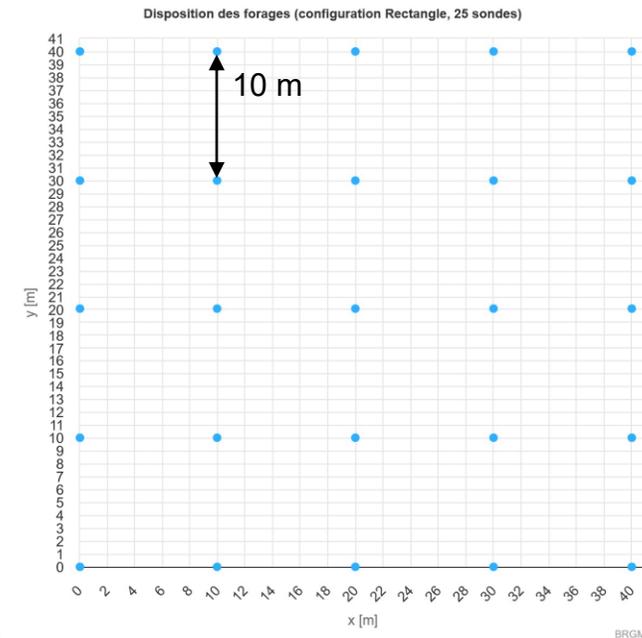
**Dimensionnement n°1 :**  
**Longueur forée = 2678 m**



**Dimensionnement n°2 :**  
**Longueur forée = 2301 m**

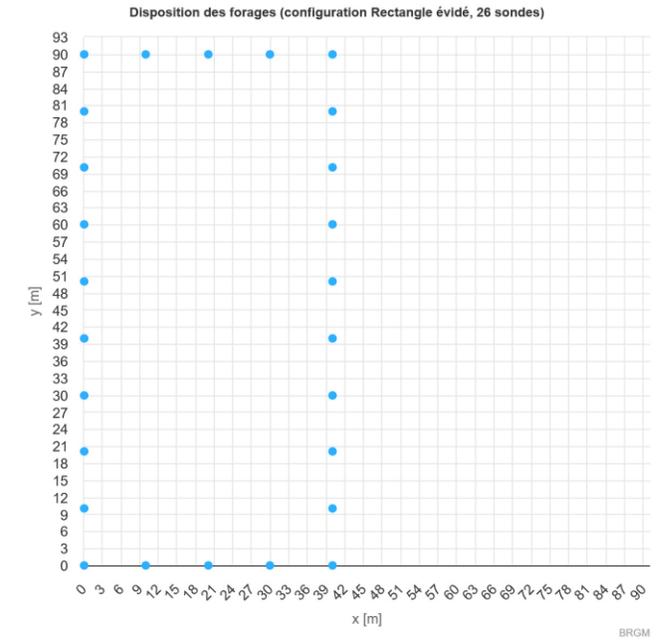
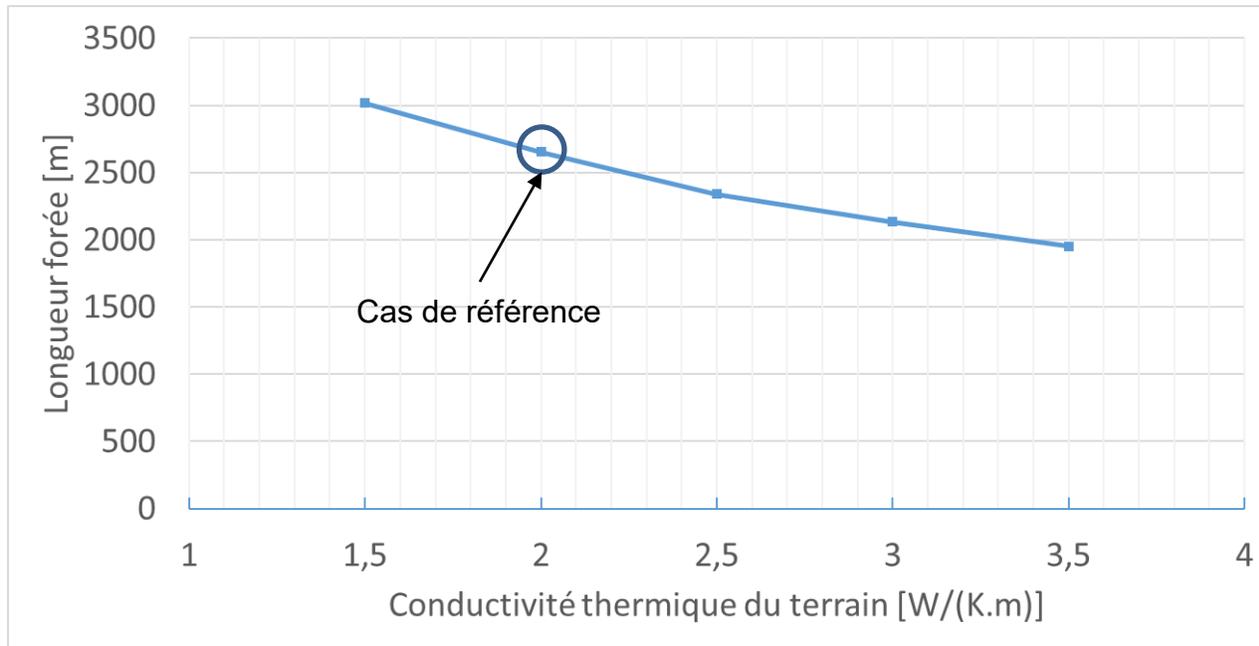


**Dimensionnement n°3 :**  
**Longueur forée = 3200 m**



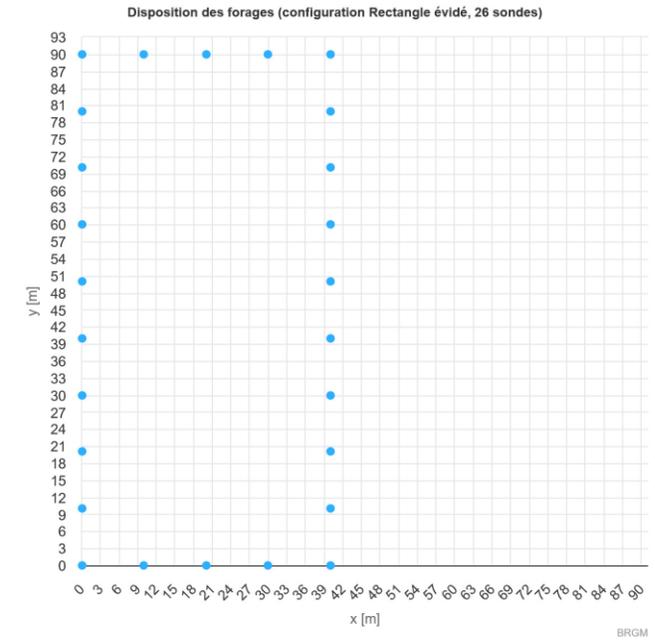
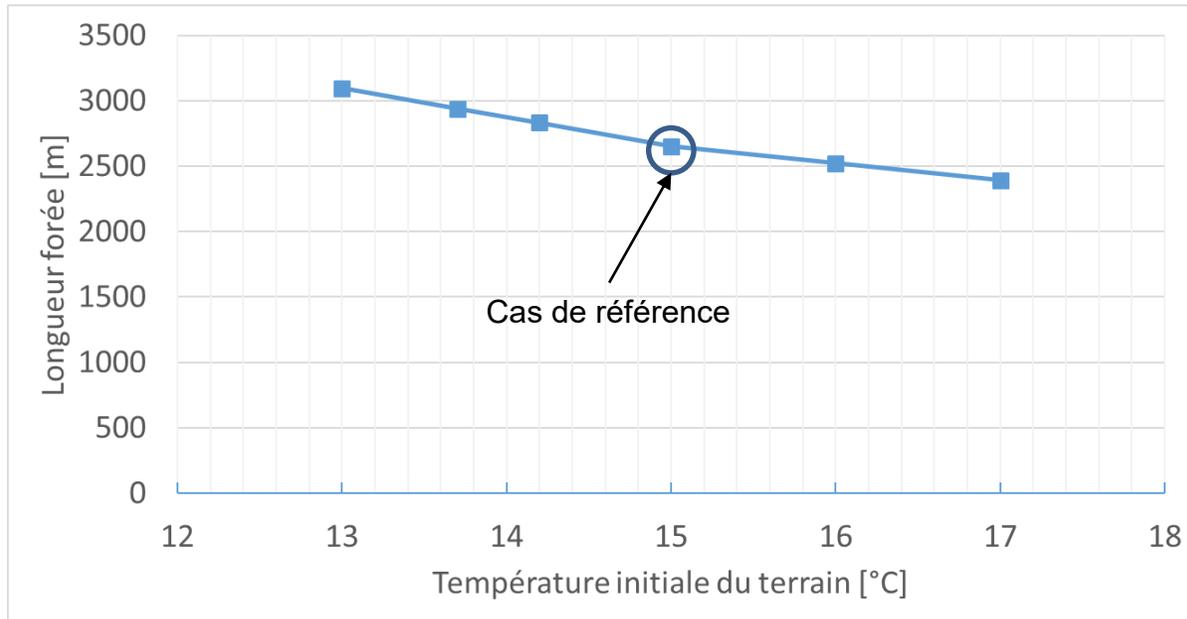
# ETUDE DE CAS

- Influence de la **conductivité thermique du terrain  $\lambda$**  :
  - Température initiale  $T_0 = 15 \text{ °C}$
  - La PAC de 140 kW permet de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage
  - Champ de 26 sondes espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire creuse



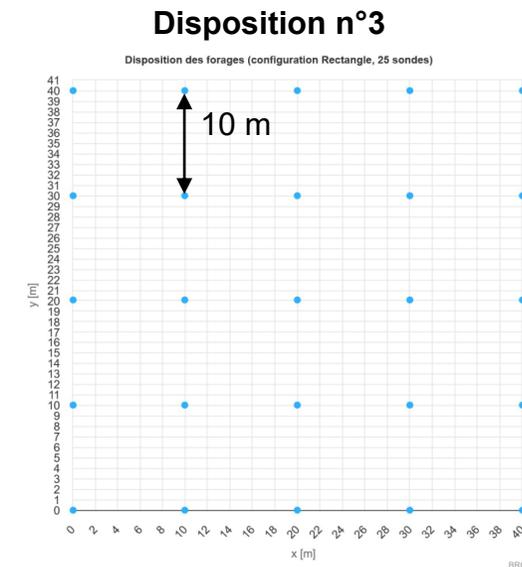
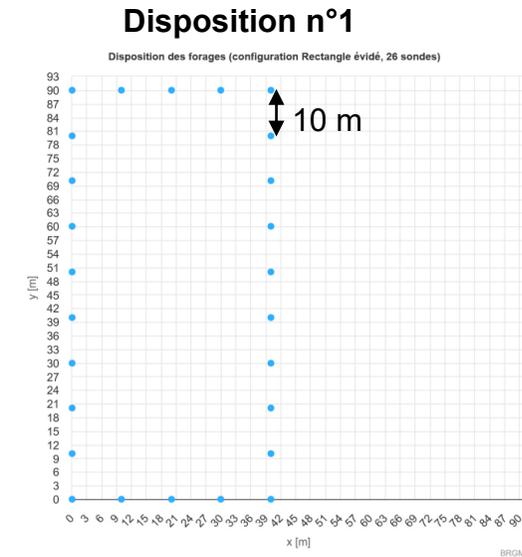
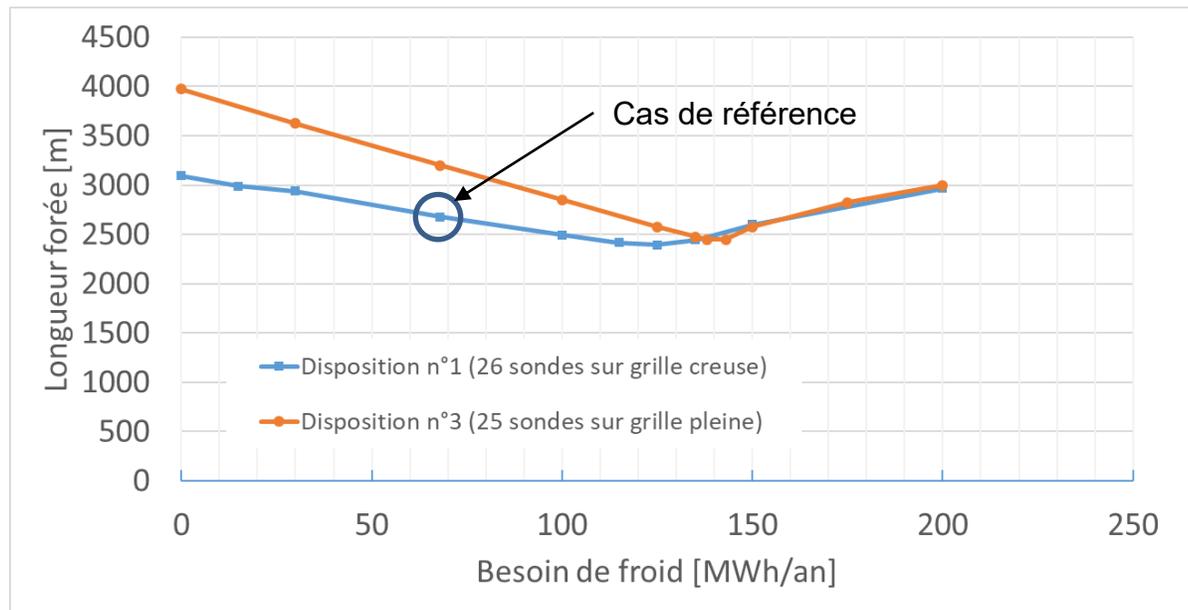
# ETUDE DE CAS

- Influence de la **température initiale du terrain  $T_0$**  :
  - Conductivité thermique du terrain  $\lambda = 2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
  - La PAC de 140 kW permet de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage
  - Champ de 26 sondes espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire creuse



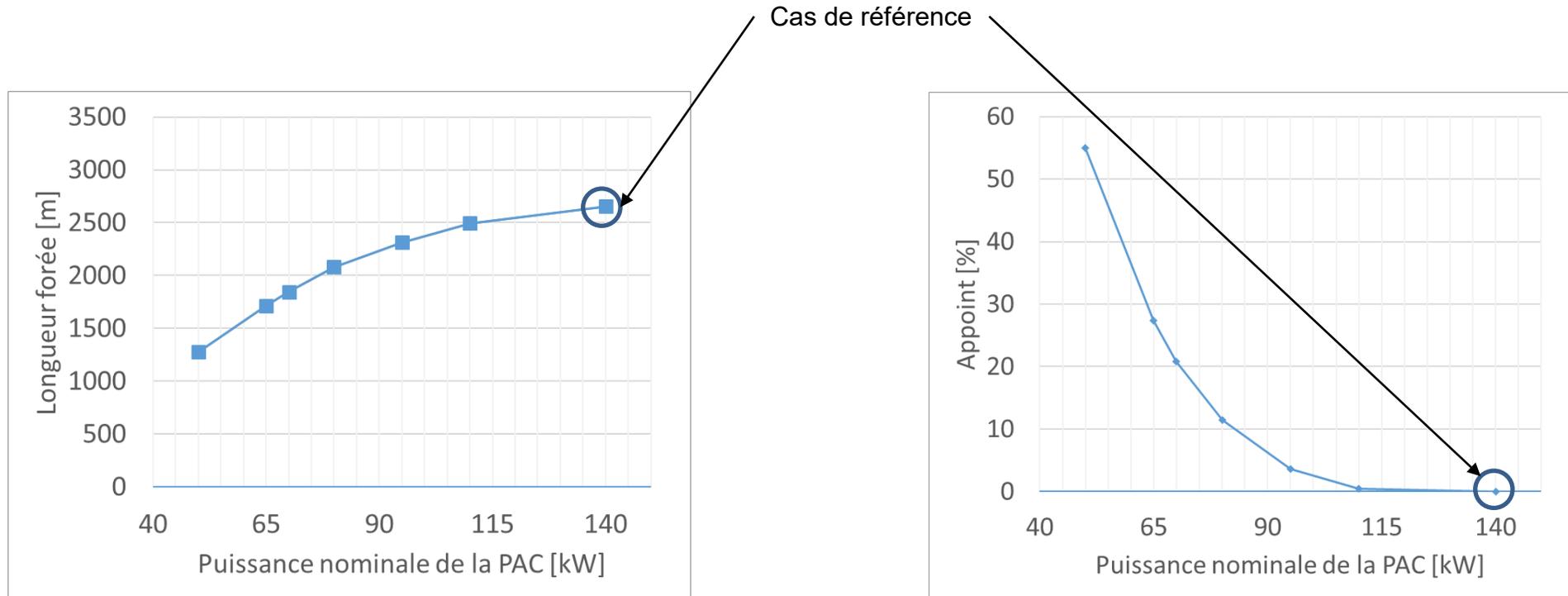
# ETUDE DE CAS

- Influence du **besoin de froid** (« recharge » du champ de sondes)
  - Besoin de chaud = 249,83 MWh/a
  - La PAC de 140 kW permet de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage, mais un appoint froid est nécessaire dès que le besoin de froid est supérieur à 140 MWh/a
  - Comparaison de deux dispositions :
    - Disposition n°1 : 26 sondes espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire creuse
    - Disposition n°3 : 25 sondes espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire pleine



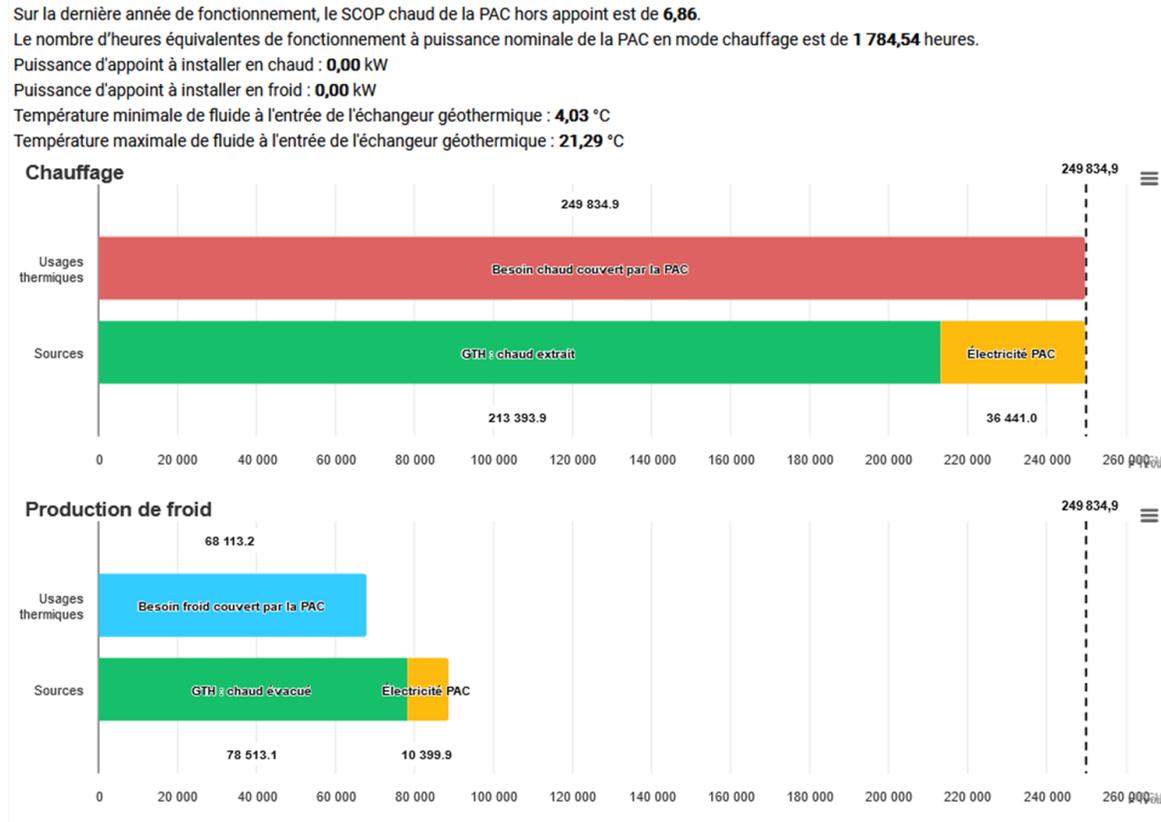
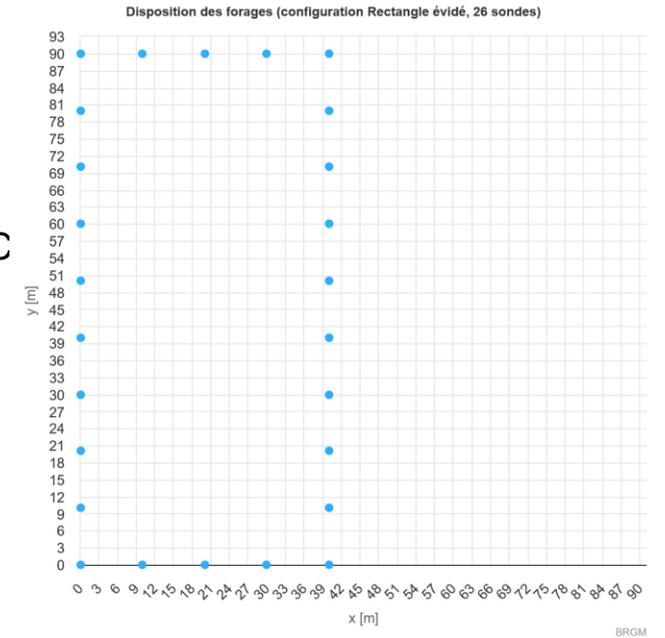
# ETUDE DE CAS

- Influence de la **puissance nominale de la PAC** :
  - Température initiale du terrain  $T_0 = 15 \text{ °C}$
  - Conductivité thermique du terrain =  $2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
  - Champ de 26 sondes espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire creuse



# ETUDE DE CAS

- Variante du cas de référence : **Dimensionnement à l'eau claire** :
  - Modification du critère de dimensionnement : Température min. acceptable = +4°C au lieu de -3°C
  - Ecoulement turbulent dans la sonde →  $R_f = 0,08 \text{ K.m.W}^{-1}$  au lieu  $0,11 \text{ K.m.W}^{-1}$
  - **Dimensionnement** : 26 sondes profondes de 200 m espacées de 10 m, réparties sur un rectangle évidé → **Longueur forée = 5200 m**

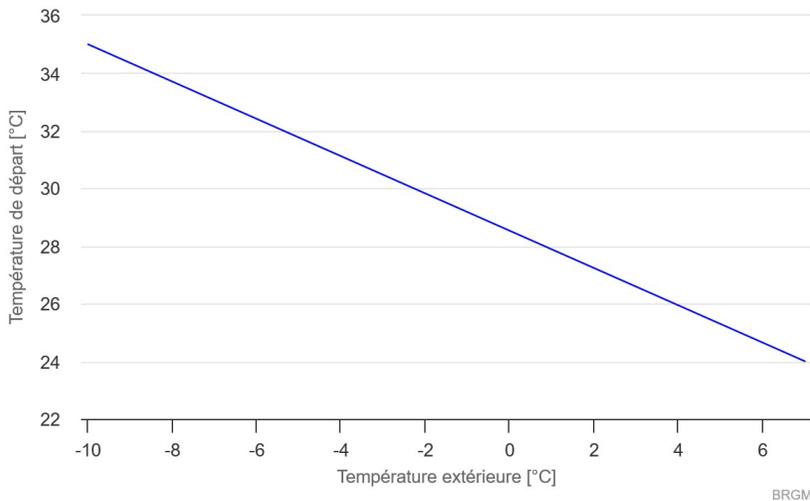


# ETUDE DE CAS

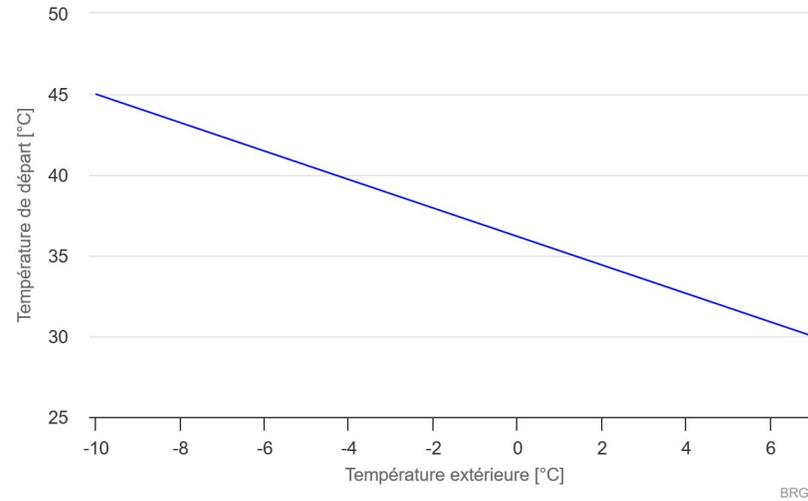
- Variante du cas de référence : Influence du **type d'émetteur de chaleur**
  - Un émetteur de chaleur fonctionnant à plus haute température dégrade les performances de la PAC → La consommation électrique de la PAC augmente → La PAC soutire moins d'énergie frigorifique du terrain pour couvrir le même besoin calorifique → la longueur de forage peut être diminuée.

Emetteur	Profondeur [m]	sCOP [-]
Plancher chauffant	103	5,74
Radiateur Basse Température	94	4,94
Radiateur "Haute" Température	86	4,21

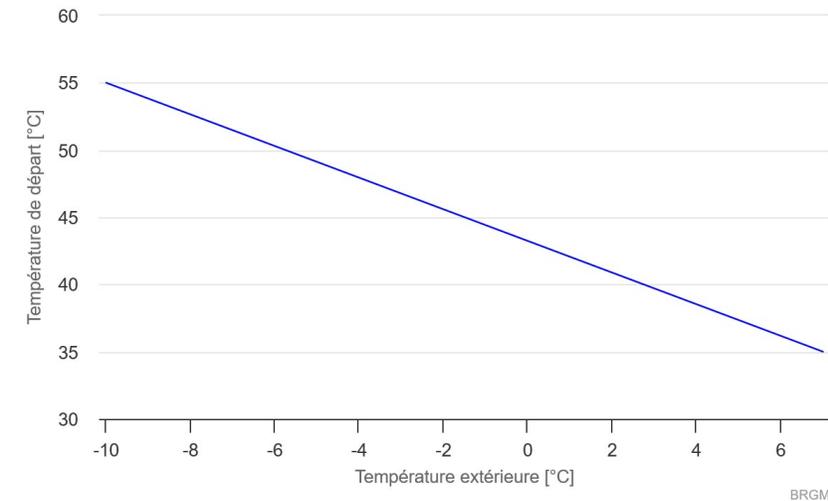
Loi d'eau du plancher chauffant



Loi d'eau du radiateur BT



Loi d'eau du radiateur HT



- [www.geothermies.fr](http://www.geothermies.fr) : le site de référence sur les géothermies
- [Abonnez-vous à notre newsletter !](#)

**GEO THERMIES** Les géothermies ▾ Actualités ▾ Espace régional ▾ Outils ▾ Géoscan ▾

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
Liberté  
Égalité  
Fraternité

ADEME  
AGENCE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE

Géosciences pour une Terre durable  
**brgm**

Découvrez les différentes  
Géothermies [ICI >](#)

Suivez les actualités et les revues de  
presse [ICI >](#)

Consultez l'espace cartographique [ICI >](#)

**Les géothermies**  
Vous ne savez pas ce qu'est la géothermie ?  
Vous voulez en savoir plus sur les géothermies ?

**Espace régional**  
Vous recherchez des informations locales sur les  
ressources géothermiques, les acteurs, les

**Outils pour le professionnel**  
Professionnels de la géothermie, retrouvez ici  
les guides, logiciels, cartes et formations pour



MERCI POUR VOTRE  
ATTENTION

Charles MARAGNA ([c.maragna@brgm.fr](mailto:c.maragna@brgm.fr)), Antoine VOIRAND  
([a.voirand@brgm.fr](mailto:a.voirand@brgm.fr))  
[plateforme-geothermie@brgm.fr](mailto:plateforme-geothermie@brgm.fr)

ADEME



AGENCE DE LA  
TRANSITION  
ÉCOLOGIQUE



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

# DONNÉES D'ENTRÉE : CARACTÉRISTIQUES DU BÂTIMENT

- ... Option B : Possibilité de « mettre à l'échelle » les courbe-types pour les appliquer à vos projets

Choix de la zone climatique

Choix du type de bâtiment

Caractéristiques énergétiques du bâtiment modélisé par Polytechnique Turin

Caractéristiques du projet soumis par l'utilisateur

Cliquez ici pour mettre à jour le projet et la courbe monotone !

Caractéristiques du bâtiment

Comportement thermique du bâtiment  
Bibliothèque de besoins horaires

Localisation  
Cliquez pour sélectionner une localisation type.

DJU froid à 18 °C

DJU chauffage à 18 °C

Usage  
Hôtel récent, bien isolé

Soumettre

Donnée-clés

Chauffage  
Besoin 249.83 [MWh/an] Puissance 139.17 [kW]

ECS  
Besoin 7.04 [MWh/an] Puissance 5.02 [kW]

Climatisation  
Besoin 68.11 [MWh/an] Puissance 84.37 [kW]

Mise à l'échelle spécifique au projet

Chauffage  
Besoin [ ] [MWh/an] Puissance [ ] [kW]

ECS  
Besoin [ ] [MWh/an] Puissance [ ] [kW]

Climatisation  
Besoin [ ] [MWh/an] Puissance [ ] [kW]

Mettre à l'échelle

Source : projet Interreg Espace Alpin GRETA

interreg  
Alpine Space  
Greco

chauffage: 249834.90 kWh.a<sup>-1</sup>, t<sub>eq</sub>=5242 h.a<sup>-1</sup>

ECS: 7035.83 kWh.a<sup>-1</sup>, t<sub>eq</sub>=6570 h.a<sup>-1</sup>

Rafratchissement: 68113.17 kWh.a<sup>-1</sup>, t<sub>eq</sub>=2687 h.a<sup>-1</sup>

Revenir aux besoins thermiques

# DONNÉES D'ENTRÉE : LE CHAMP DE SONDÉS

Sonde géothermique verticale

Résistance thermique du forage  K.m.W<sup>-1</sup>

Profondeur  m

Fuide caloporteur

Fluide caloport

Implantation des sondes

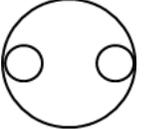
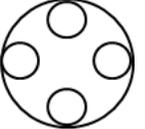
Type d'implantation

Terrain

Température initiale

Propriétés thermiques

Exemple de valeurs de résistance thermique du forage  $R_f$  (valeurs calculées pour un régime d'écoulement turbulent) :

Arrangement des tuyaux dans le forage				
Distance centre à centre des tuyaux [cm]	8.3	8.3	11.7	11.7
<i>Matériau de remplissage</i>	<i>Résistance thermique de forage <math>R_f</math> [m.K/W]</i>			
Coulis de bentonite standard ( $\lambda_c = 0,6 \text{ K.m}^{-1}.\text{W}^{-1}$ )	0.199	0.132	0.146	0.071
Coulis amélioré ( $\lambda_c = 1,8 \text{ K.m}^{-1}.\text{W}^{-1}$ )	0.098	0.061	0.088	0.042

# DONNÉES D'ENTRÉE : SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Système de surface

PAC

Puissance calorifique de la PAC à 0/35 °C  $P_{cal,nom}$

[kW]

COP chaud de la PAC à 0/35 °C  $COP_{ref}$

Appoint

Appoint en chauffage :

Appoint en climatisation : PAC air/eau

COP chaud de la PAC air/eau

Système de chauffage et rafraîchissement

Emetteurs de chaud

Emetteurs de froid

Température de départ  °C

L'utilisateur indique la puissance calorifique et le COP de la PAC pour des températures d'évaporation et condensation de 0°C et 35 °C respectivement.

```
nom: G-NEO 18H
# température émission minimum
# °C
T_emission_minimum: 22
# débit nominal échangeur géothermique
# m3/heure
debit_nominal: 1.15
# puissance réduite
# W
# Consommation PAC+auxiliaires lors des phases de veille
puissance_reduit: 12

## TABLES ##
# température entrée évaporation
# °C
T_in_evap: [0, 5, 10, 15]
# température sortie condensation
# °C
T_out_condens: [25, 35, 45, 55]

# puissance calorifique
# W
Pc_unit: 1000 # kw -> w
Pc: [
[5.47, 6.29, 7.22, 7.84],
[5.20, 5.98, 6.86, 7.28],
[4.95, 5.69, 6.53, 6.93],
[4.83, 5.55, 6.37, 6.76],
]

# puissance absorbée compresseur
# W
Pa_unit: 1000 # kw -> w
Pa: [
[1.12, 1.12, 1.12, 1.12],
[1.30, 1.30, 1.30, 1.30],
[1.59, 1.59, 1.59, 1.59],
[1.89, 1.89, 1.89, 1.89],
]
```