



**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

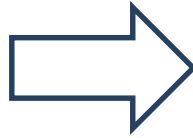
**brgm**



# INTRODUCTION

Une plateforme digitale de dimensionnement d'échangeurs géothermiques :

Qu'est ce que c'est ?



Un outil :

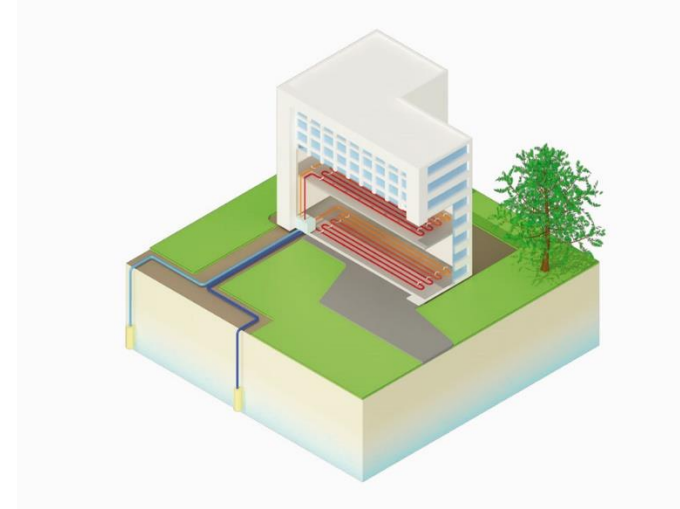
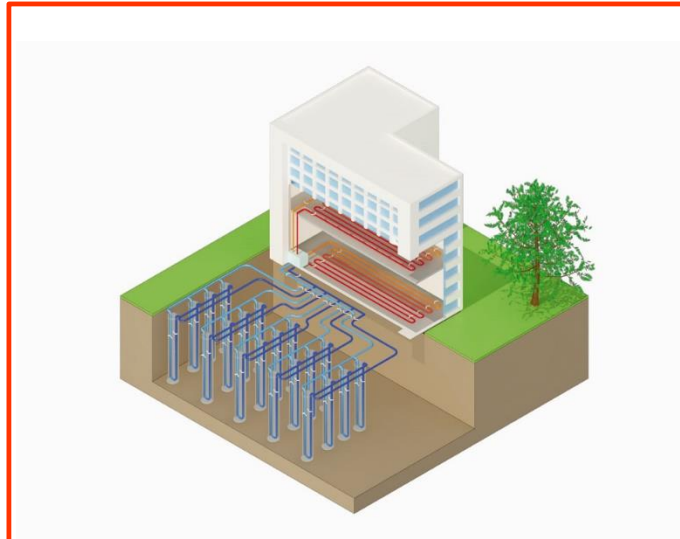
- > Lancé par le BRGM en 2015
- > Accessible en ligne
- > Destiné aux professionnels
- > Initialement pour la maison individuelle *μ-Geo*
- > Maintenant aussi pour les champs de sondes



# 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

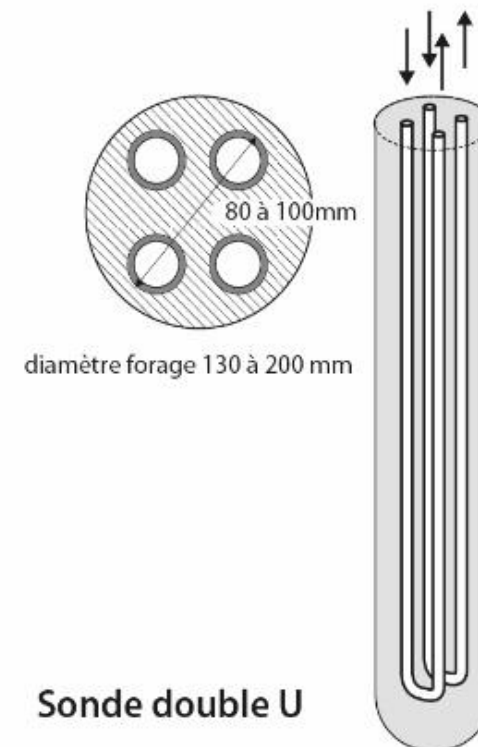
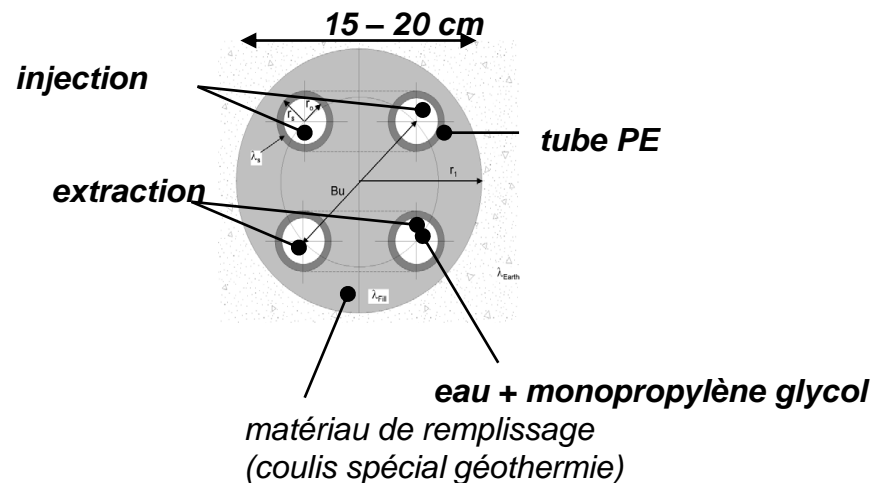
# LES DIFFÉRENTES FORMES DE GÉOTHERMIE ASSISTÉE PAR POMPE À CHALEUR



	<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  $\lambda \geq 2,0 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ )
  - → **Importance d'utiliser un coulis adapté aux sondes géothermiques**





# LES SONDES (DOUBLE-U)



**Machine de forage**



**Pieds de sonde**



**Mise en place de la sonde**

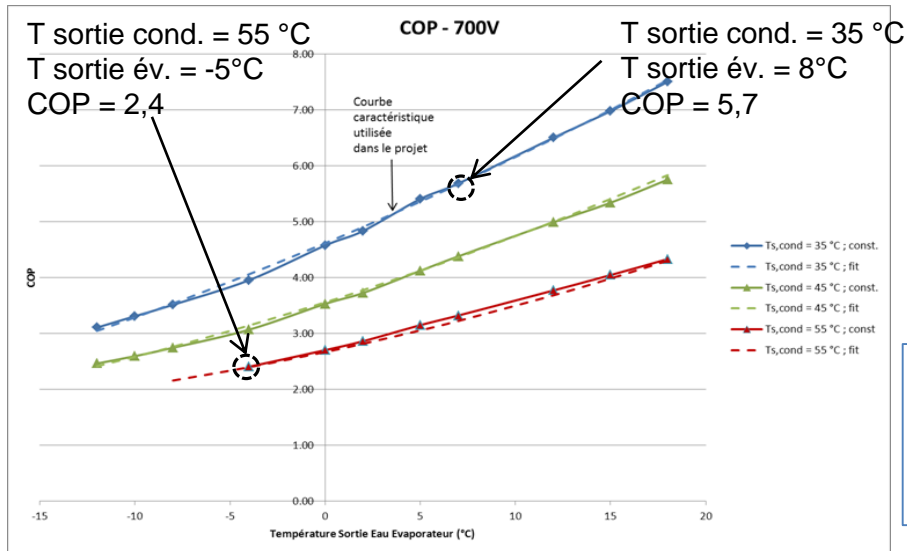
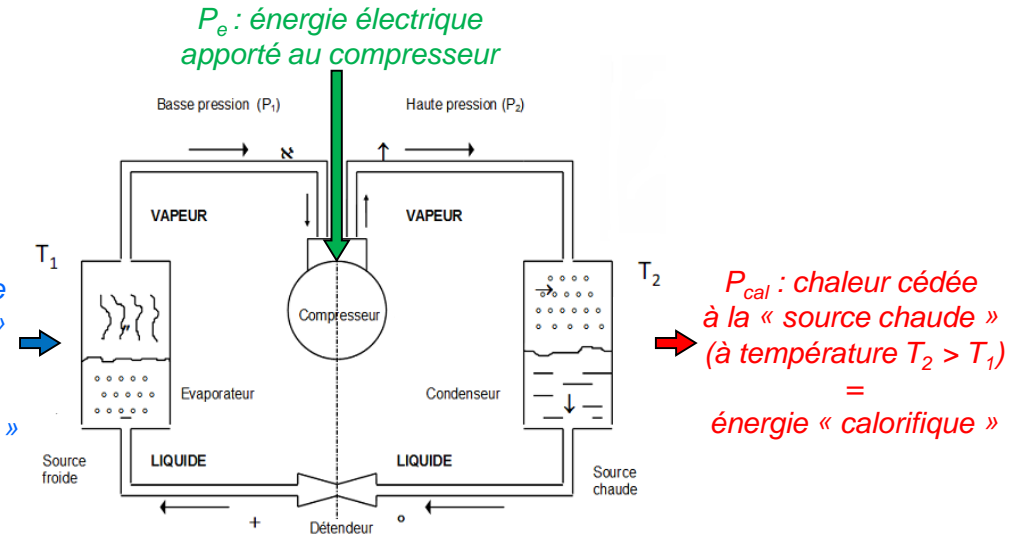


**Mise en place de la sonde**

# 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)

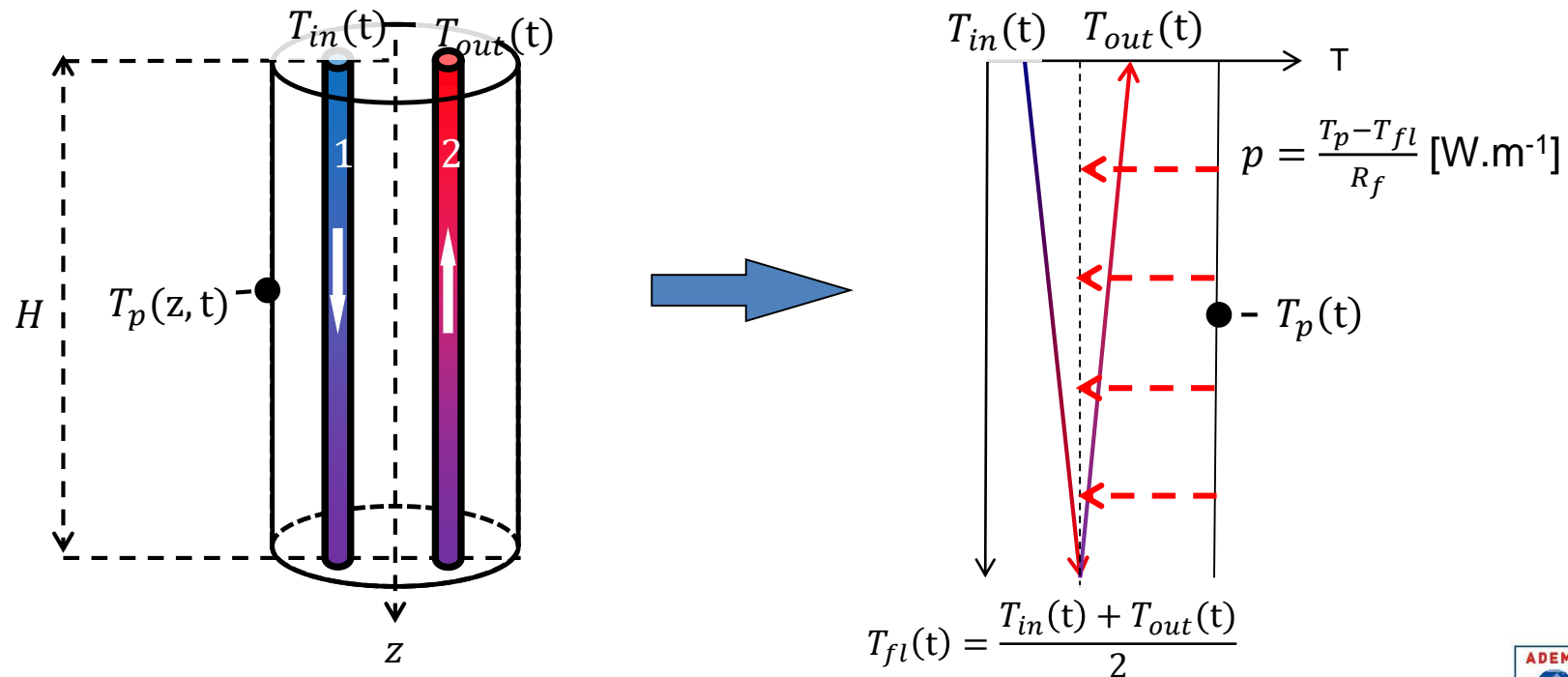
# ORGANISATION DE L'OUTIL

- 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 de la SGV
  - H4 : Profil de température du fluide « en V » dans le forage



# 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 :

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

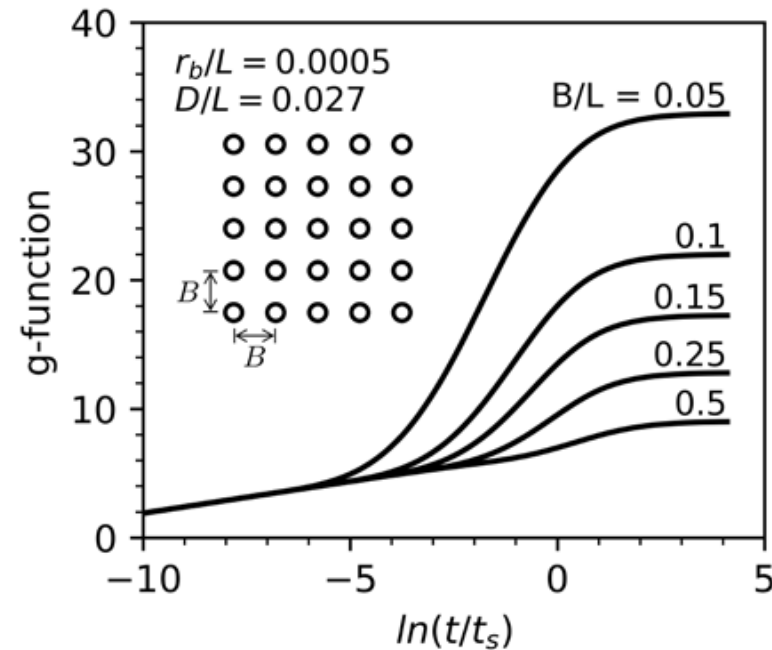
- $T_0$  : température initiale du terrain (°C)
- $p$  : puissance linéaire échangée par mètre de forage (W.m<sup>-1</sup>)
- $\lambda_m$  : conductivité thermique du terrain (W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>)
- La fonction  $G$  traduit l'évolution de la température moyenne du fluide suite à un échelon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

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

- 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

- 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 :



Source: Cimmino et al. 2018



# 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 :

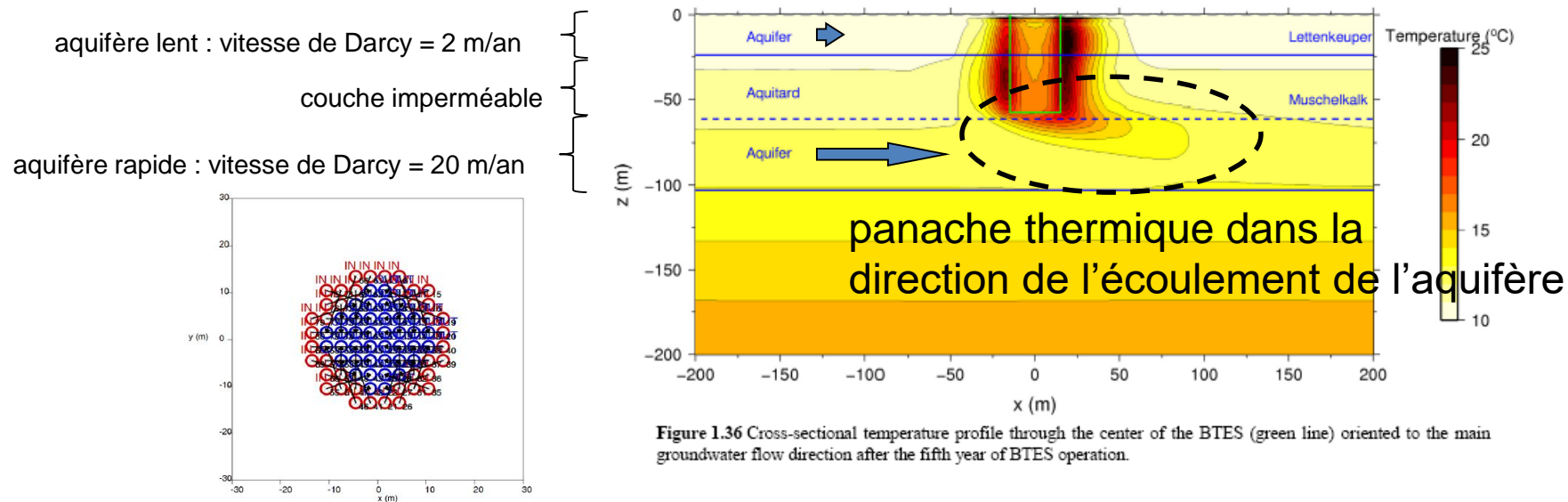
$$T_{fl}^n = T_0 + \frac{1}{\lambda_m} \left( p^1 G^n + \sum_{l=1}^{n-1} (p^{l+1} - p^l) G^{n-l} \right)$$

- 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

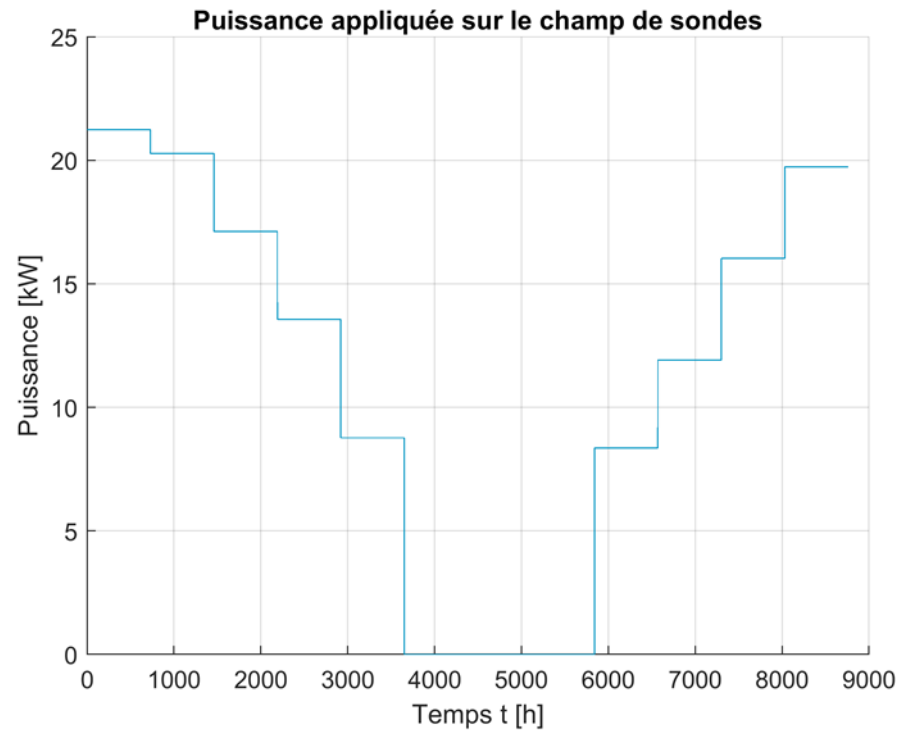
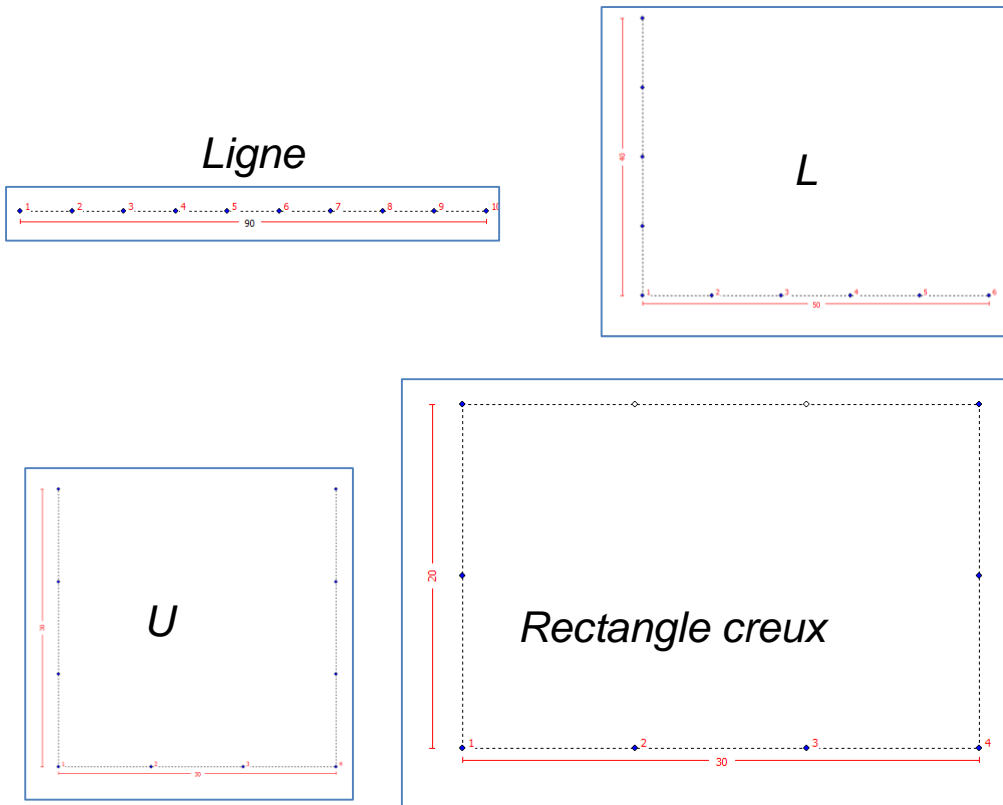
# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- 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)



# 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 =  $60 \text{ mW/m}^2$

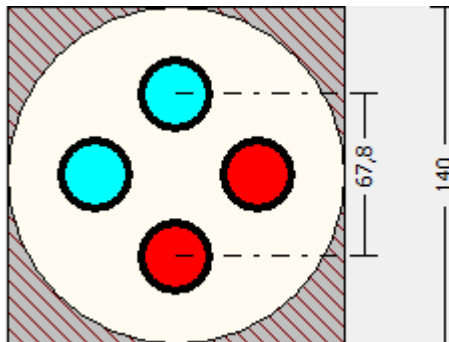
### ○ Sondes géothermiques :

- 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

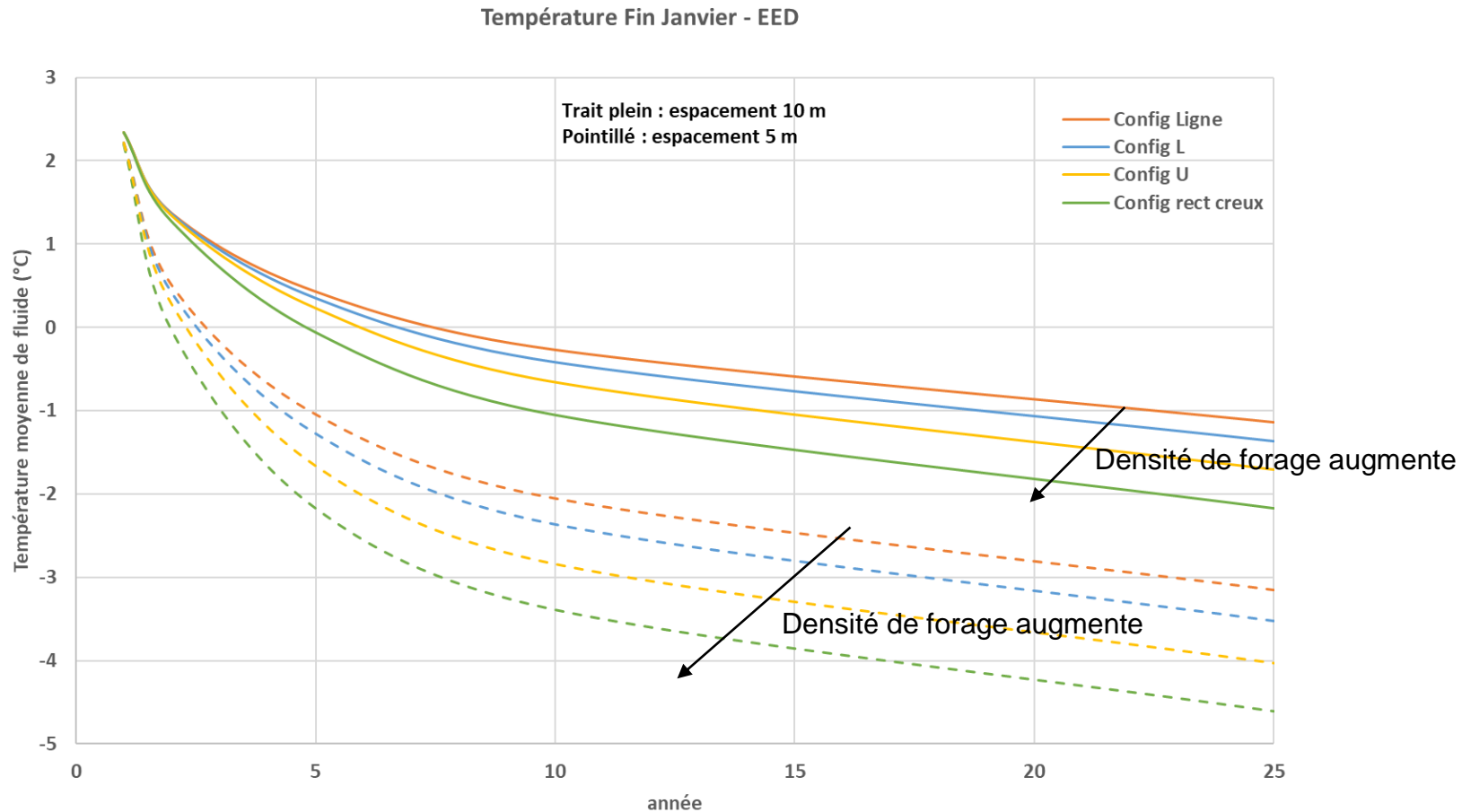
- Conductivité thermique =  $0,48 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
- Capacité calorifique =  $3795 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-3}$
- Masse volumique =  $1052 \text{ kg.m}^{-3}$
- Viscosité =  $0,0052 \text{ kg/(m.s)}$
- Point de congélation =  $-14 \text{ °C}$
- Débit par forage =  $0,15 \text{ l.s}^{-1}$

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



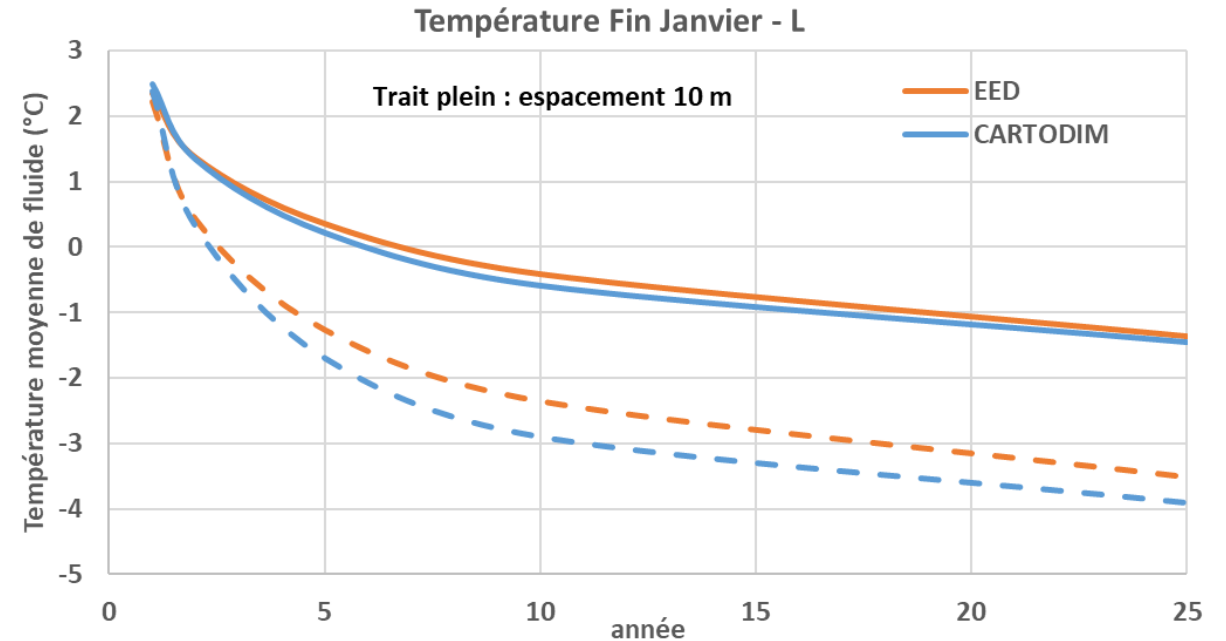
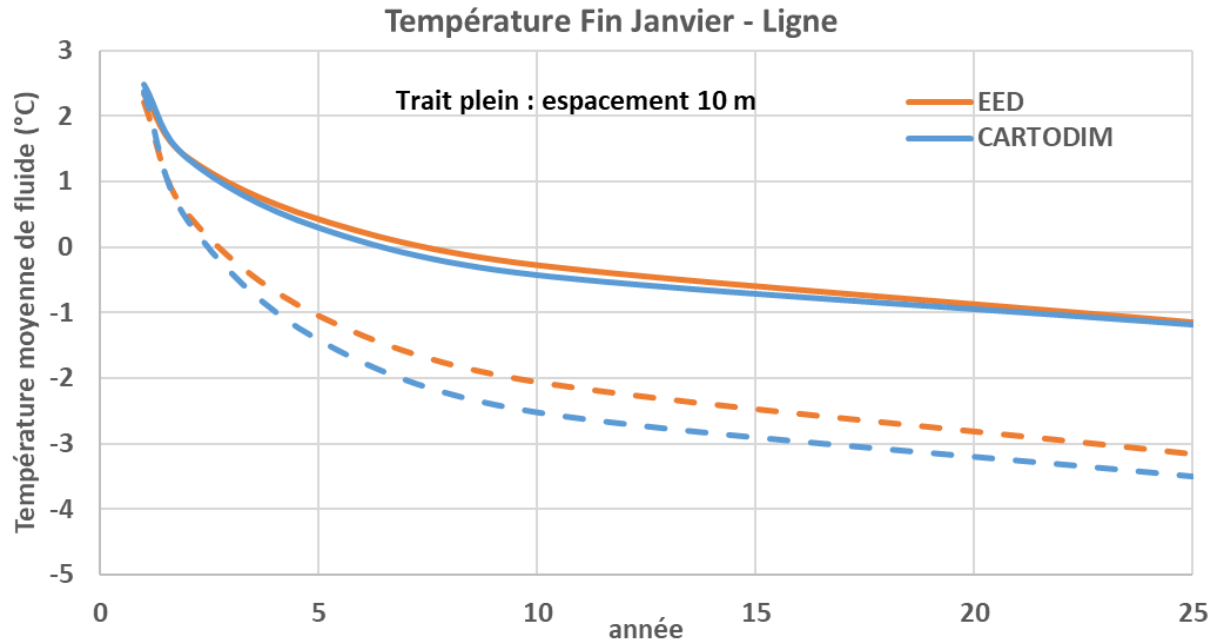
# VÉRIFICATION DE L'OUTIL : VS EED

- 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>)



# 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 :

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

- $T_0$  : 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 :

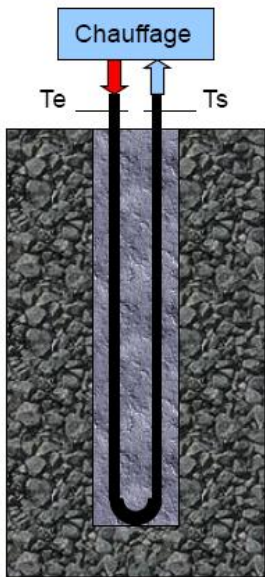
$$G(t) = \underbrace{\lambda_m R_f}_{\substack{\text{transfert} \\ \text{dans un forage}}} + \underbrace{G_0(t)}_{\substack{\text{transfert à} \\ \text{proximité} \\ \text{d'un forage}}} + \underbrace{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N G_{i \rightarrow j}(t)}_{\text{interactions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

- 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)

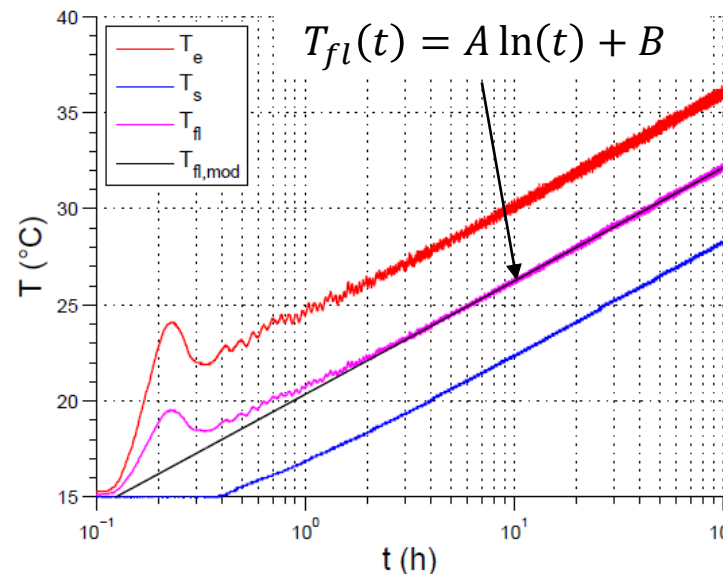
# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- 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

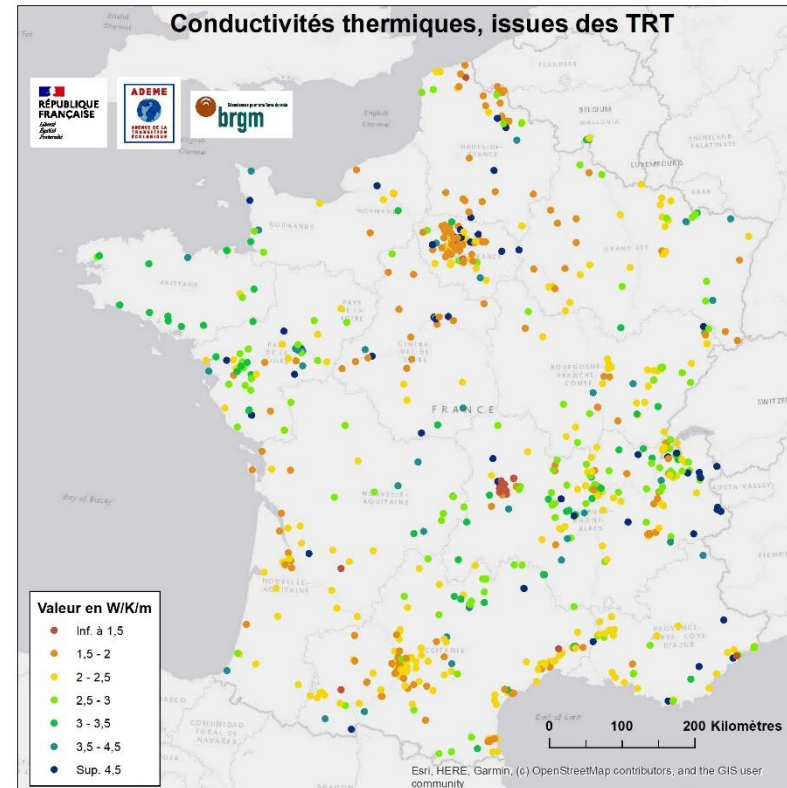
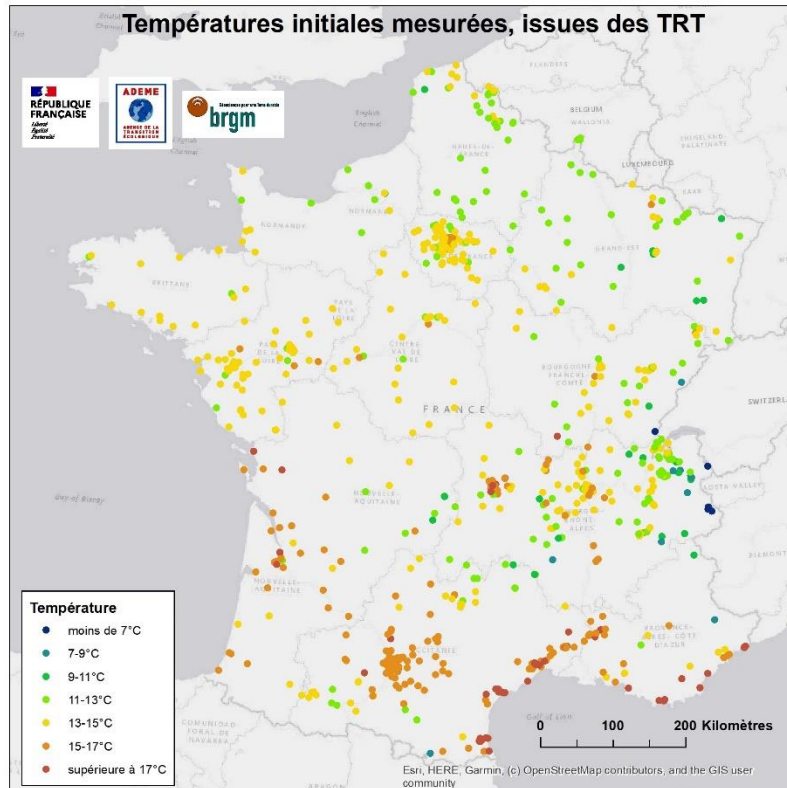


Evolution de la température. TRT réalisé sur la plateforme expérimentale du BRGM à Orléans

- $(\rho C_p)_m$  : capacité calorifique du terrain [ $\text{MJ.K}^{-1}.\text{m}^{-3}$ ]
- $r_f$  : rayon du forage [m]
- $\gamma \approx 0,5773$ : constante d'Euler

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Température initiale du terrain  $T_0$  :

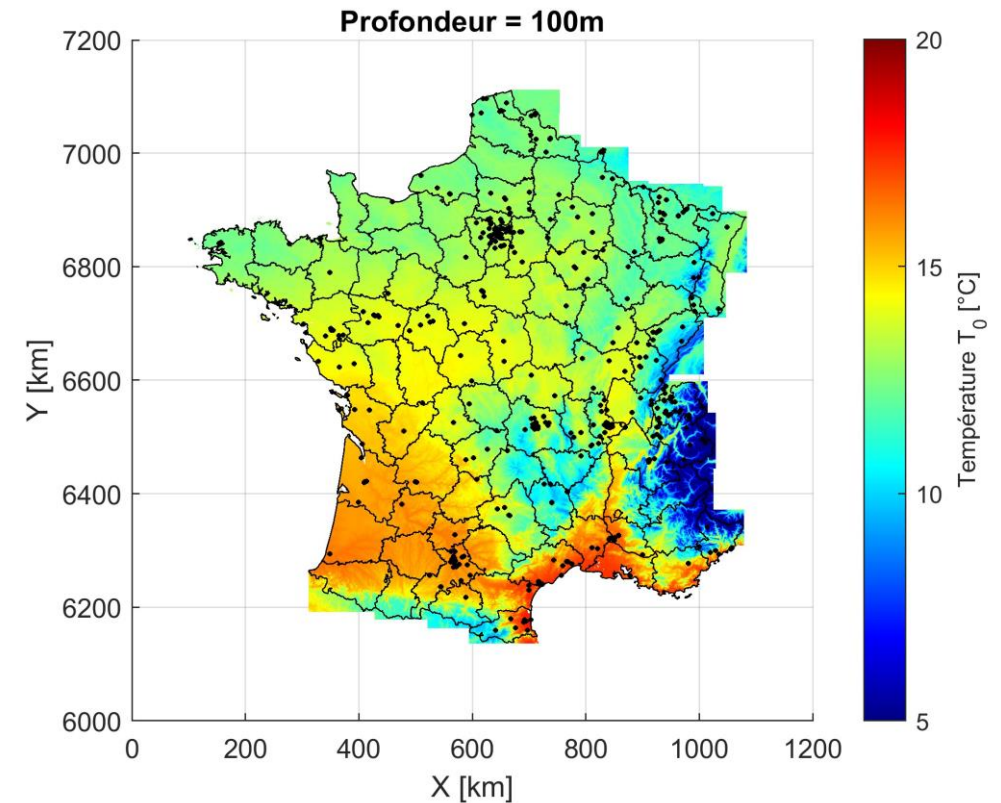


Température initiale du terrain  $T_0$  (gauche) et conductivité thermique mesurée  $\lambda$  sur 798 TRT (droite). [www.geothermies.fr](http://www.geothermies.fr)



# FUNCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Température initiale du terrain  $T_0$  :
  - 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
  - Erreur (écart-type)  $\approx 1,2$  °C
  - Ce modèle simplifié peut donc permettre d'estimer rapidement  $T_0$  en phase de pré-projet, avant qu'un TRT ne soit réalisé.

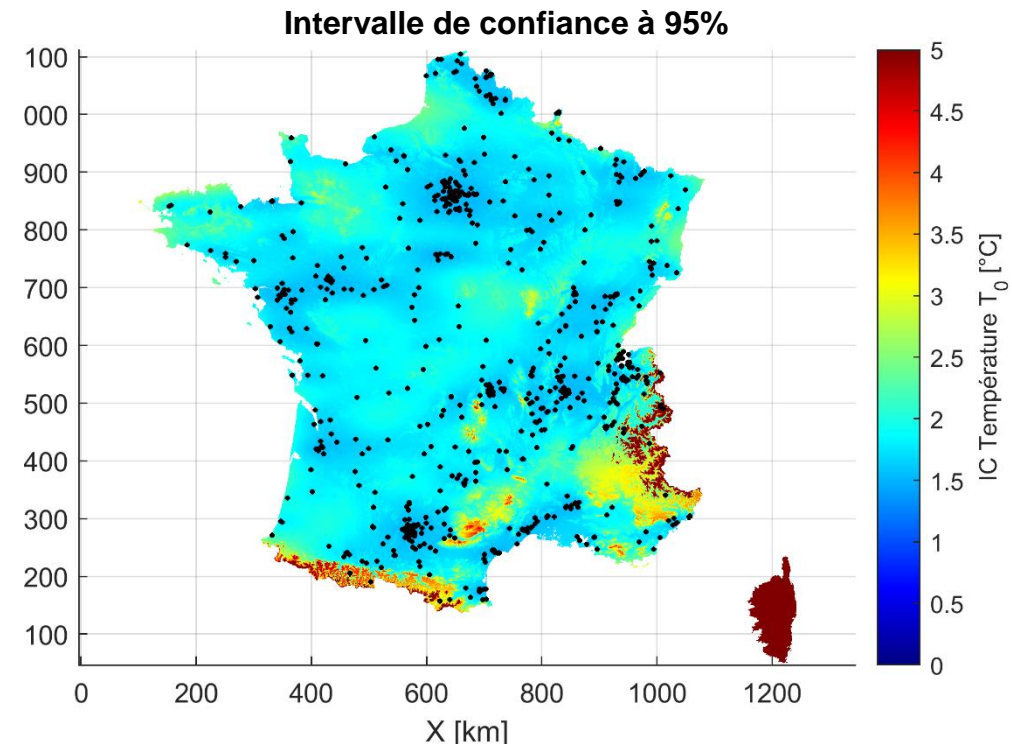
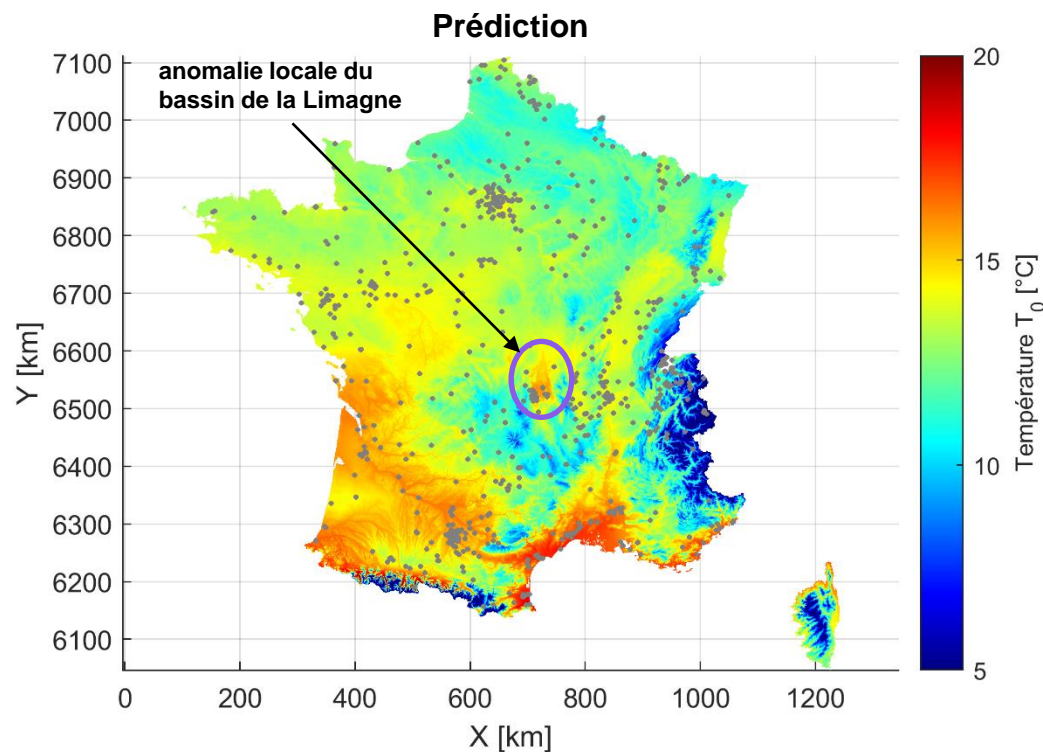


Température moyenne estimée  $T_0$  pour une sonde  
profonde de 100 m – régression polynomiale  
(implémentée dans l'outil)

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Température initiale du terrain  $T_0$  :
  - Attention : Une régression par krigeage sur 737 points donne de meilleurs résultats, mais n'est pas implémentée dans l'outil.

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



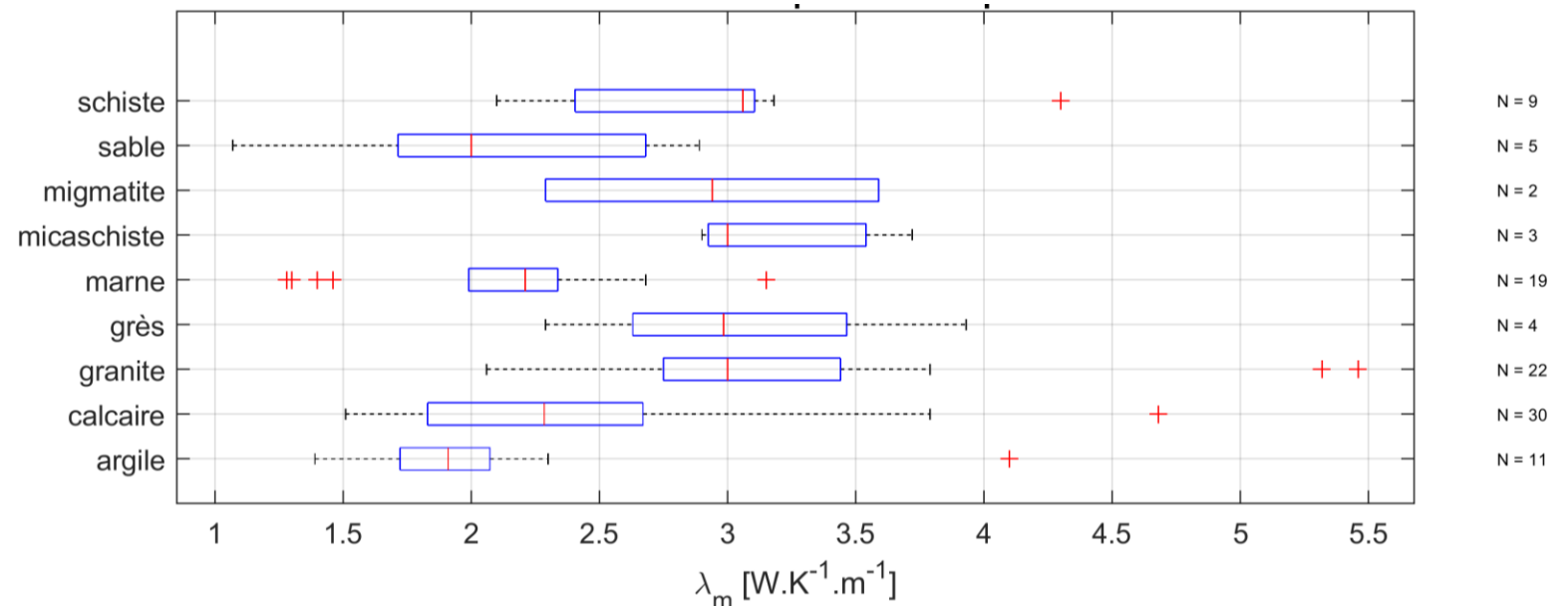
# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- Conductivité thermique du terrain  $\lambda$  :

## Conductivité thermique d'après norme suisse SIA-384/6

	Type de roche	Conductivité thermique $\lambda$ W/(m.K)		Capacité thermique spéc. $\rho c_p$ 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
Roches de fond magmatiques	Roche sulfatée (anhydrite, gypse)	1,3 – 2,8	1,6		2,0	
	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
Roches de fond métamorphes	Gabbro	1,7 – 2,5	2,0		2,6	2,8 – 3,1
	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


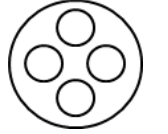
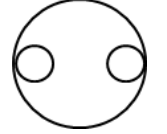
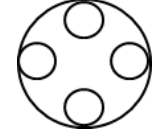
Conductivité mesurée sur 105 forages dont plus de 80% de la hauteur traverse une seule lithologie (rapport BRGM/RP70833-FR)



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 pointillées s'étendent du minimum au maximum de l'échantillon à l'exclusion de ces points

# FONCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES 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

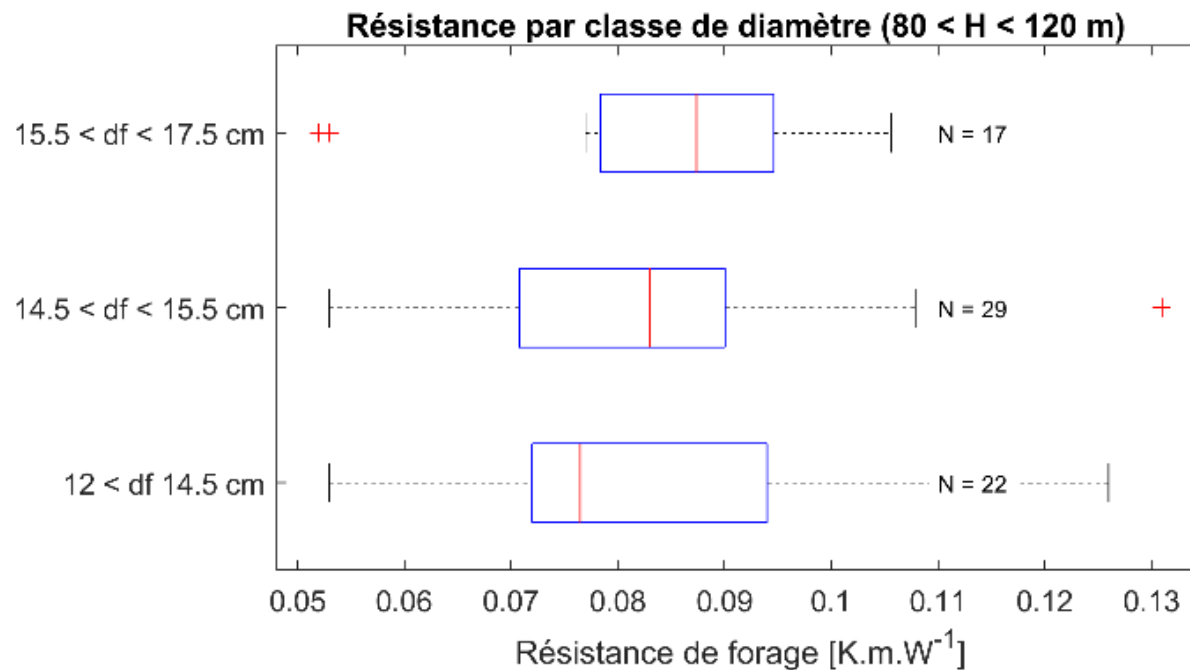
Arrangement des tuyaux dans le forage				
Distance centre à centre des tuyaux [cm]	8.3	8.3	11.7	11.7
<i>Matériau de remplissage</i>	<i>Résistance thermique de forage <math>R_f</math> [m.K/W]</i>			
Coulis de bentonite standard ( $\lambda_c = 0,6 \text{ K.m}^{-1}.\text{W}^{-1}$ )	0.199	0.132	0.146	0.071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

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.



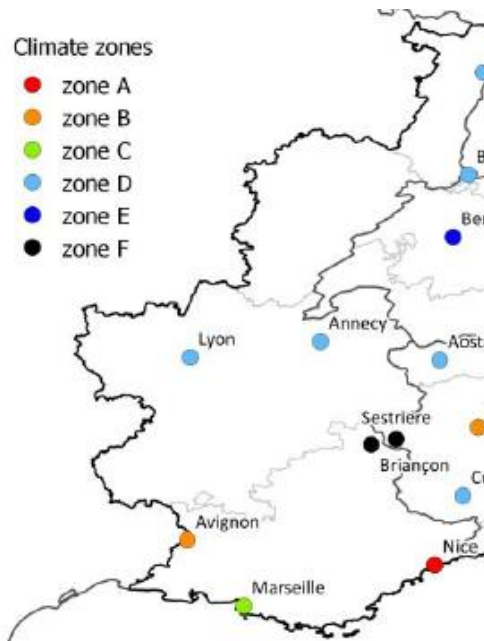
# FUNCTIONNEMENT DU MOTEUR DE CALCUL : MODÉLISATION DES ÉCHANGEURS GÉOTHERMIQUES

- 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

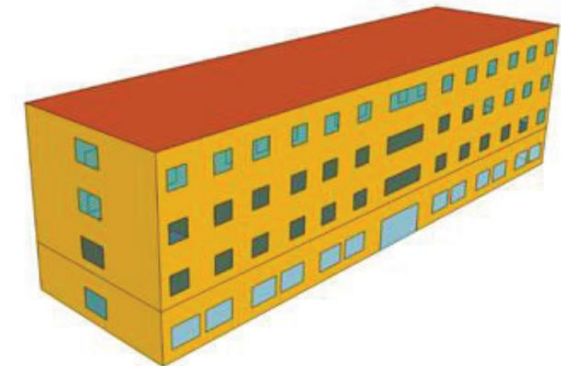
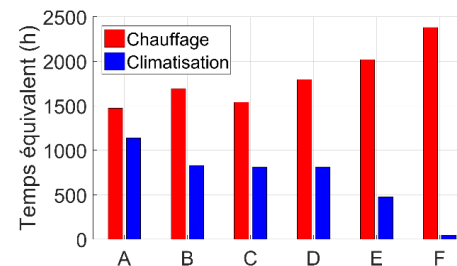
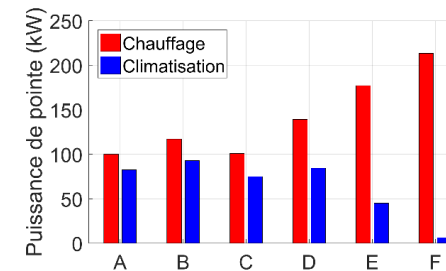
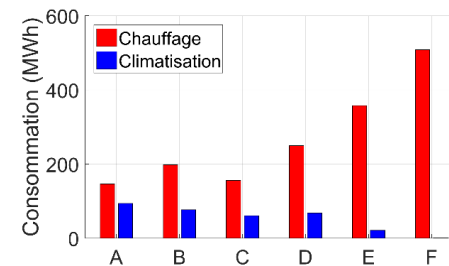


# DONNÉES D'ENTRÉE : CARACTÉRISTIQUES DU BÂTIMENT

- 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 : 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  
Cliquer 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

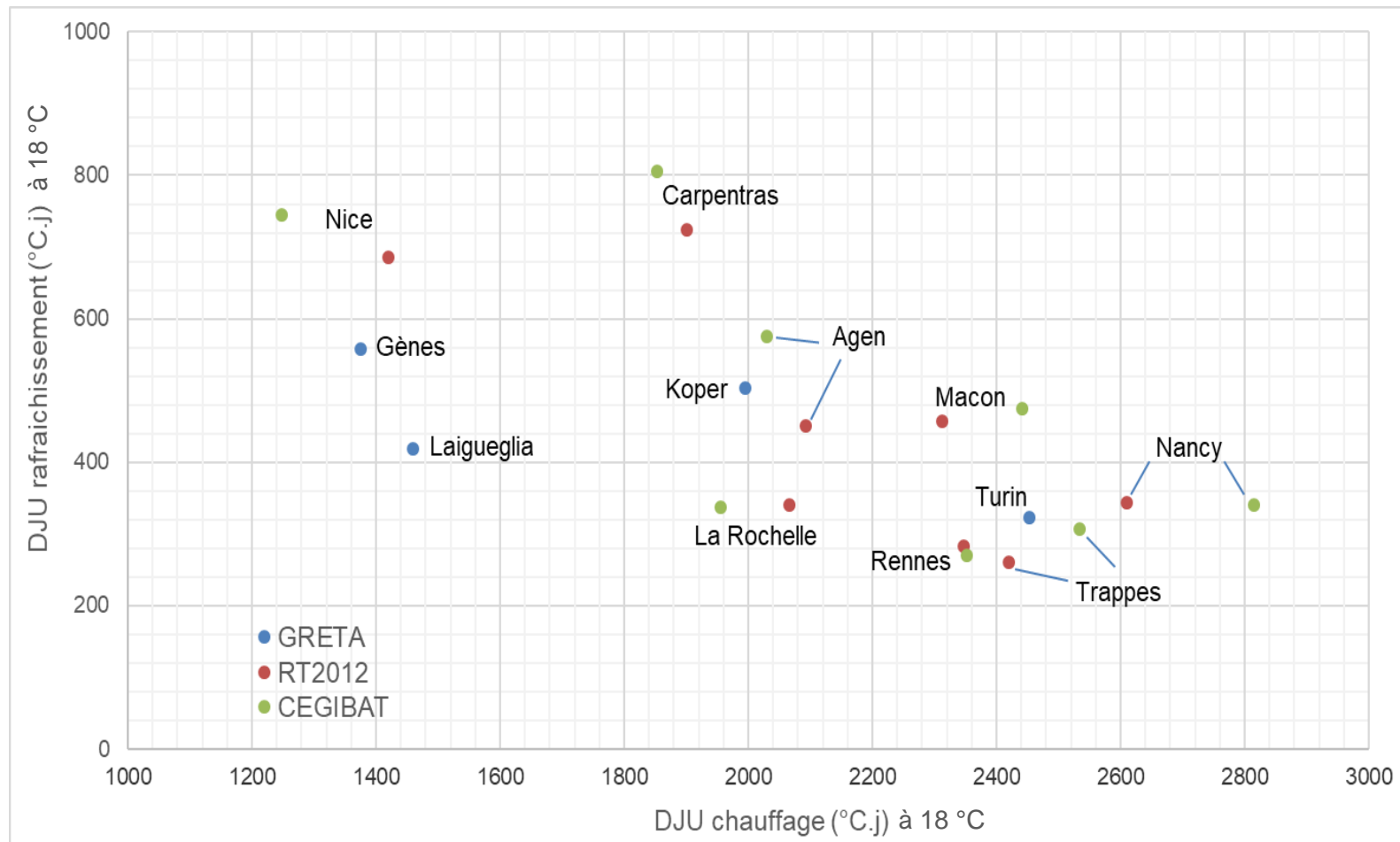
interreg  
Alpine Space  
Greco

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 : CARACTÉRISTIQUES DU BÂTIMENT

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



# 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



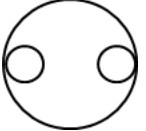
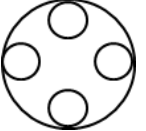
Type d'implantation

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  $COP_{ref}$

Réinitialiser aux valeurs par défaut Tracer le graphique

Appoint

Appoint en chauffage : Résistance électrique

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

Plancher chauffant

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.

```
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]

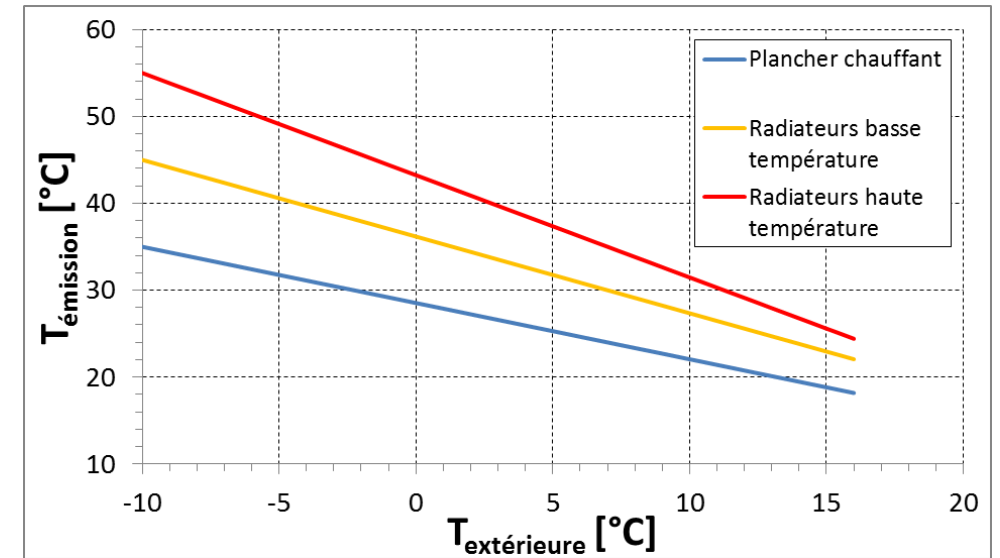
# puissance calorifique
# W
Pc_unit: 1000 # kw -> w
Pc: [
[5.47, 6.29, 7.22, 7.84],
[5.20, 5.98, 6.86, 7.28],
[4.95, 5.69, 6.53, 6.93],
[4.83, 5.55, 6.37, 6.76],
]

# 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],
]
```

# 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



- Modélisation des émetteurs (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

- 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.

## EVOLUTIONS PRÉVUES DE L'OUTIL

- Fluide caloporteur à 30% MPG → Choix du fluide caloporteur
  - Moteur de calcul de la résistance du forage
  - Thermofrigopompe
  - Module d'optimisation (automatisation de l'exploration des configurations)
- 
- 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>)

# ETUDE DE CAS

- Dimensionnement d'un champ de sondes en appliquant le seuil réglementaire fixé par la géothermie de minime importance :

*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 :

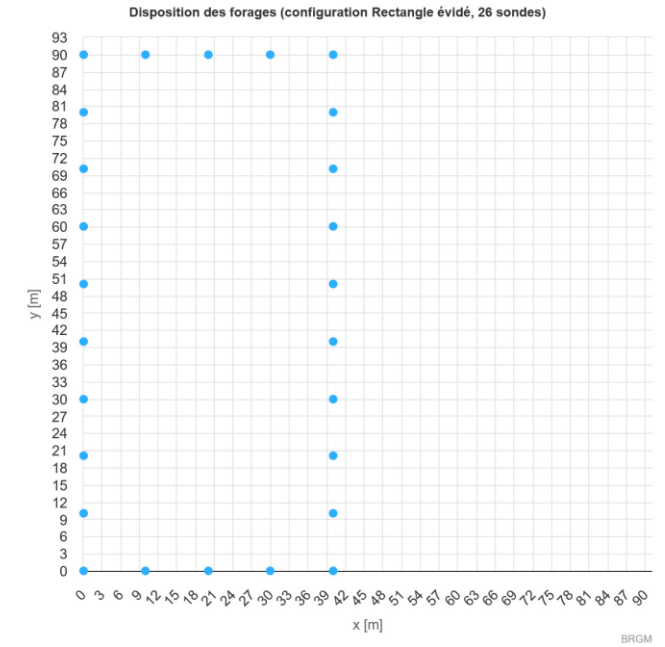
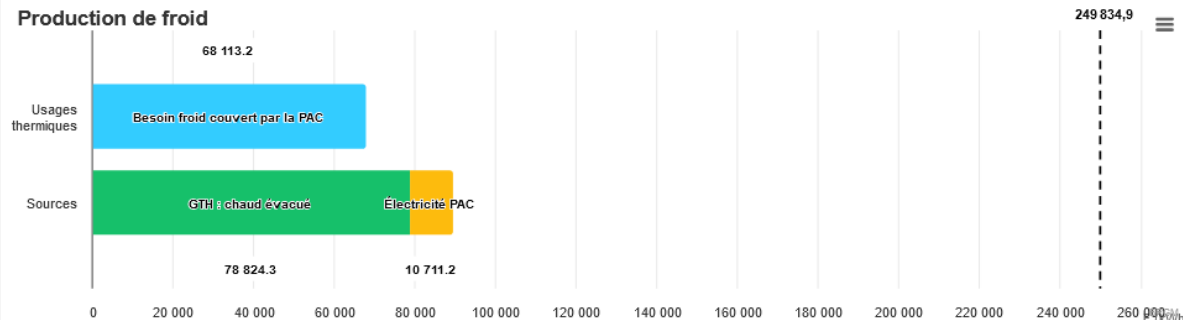
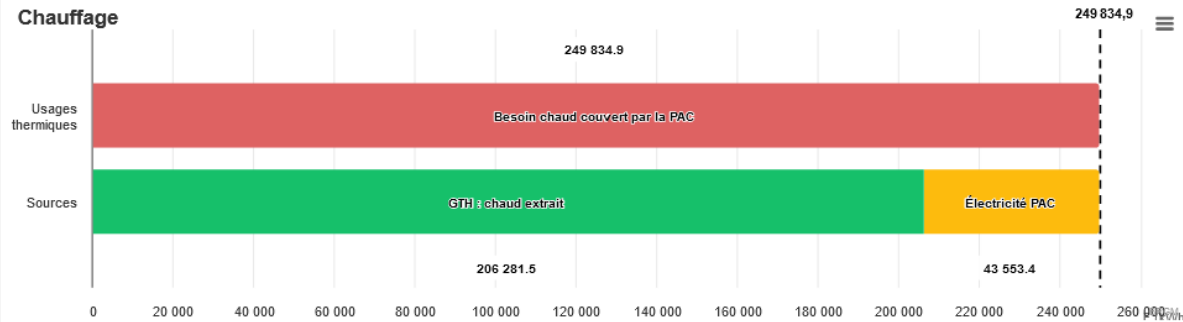
- Dans un « cas de référence » : PAC dimensionnée pour couvrir 100 % de la puissance de chauffage
- Etudier l'influence de :
  - La conductivité thermique du terrain : 2,0 à 3,5 W.K<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>
  - La température initiale du terrain : 13 à 17 °C
  - La puissance calorifique nominale de 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**

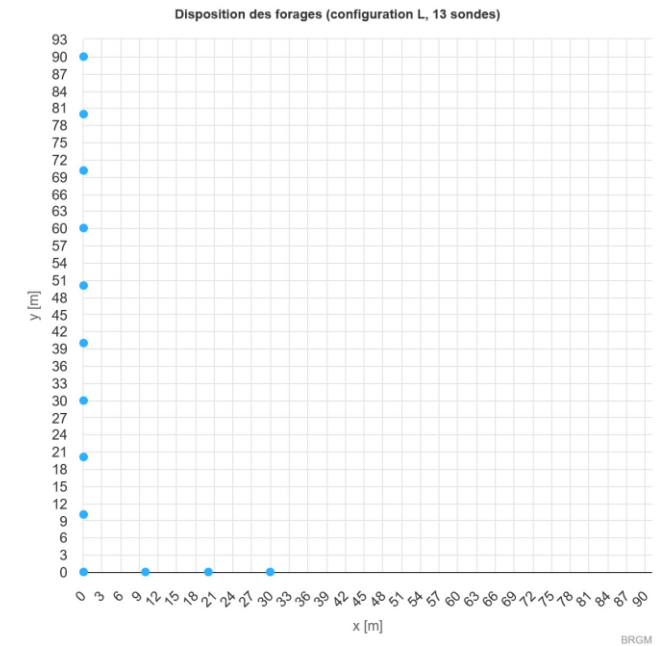
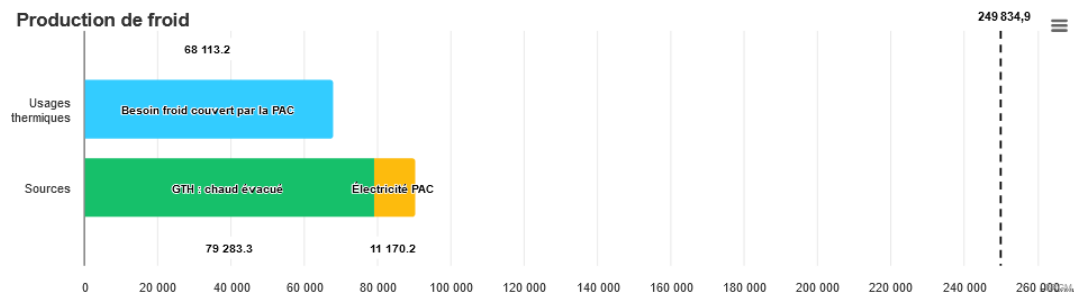
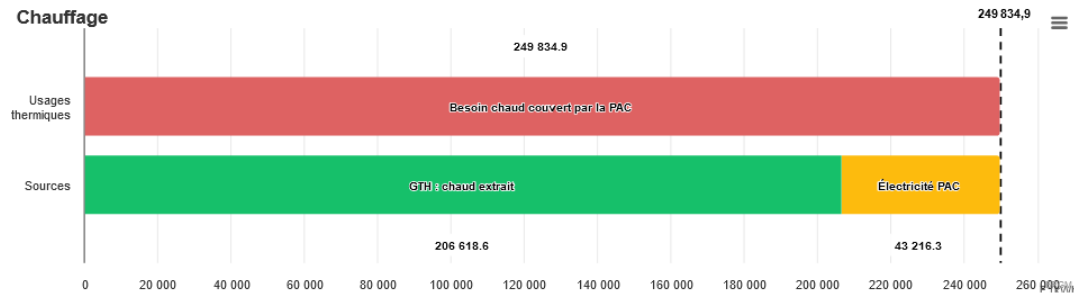
Sur la dernière année de fonctionnement, le SCOP chaud de la PAC hors appoint est de **5,74**.  
 Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est de **1 784,54** heures.  
 Puissance d'appoint à installer en chaud : **0,00** kW  
 Puissance d'appoint 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**

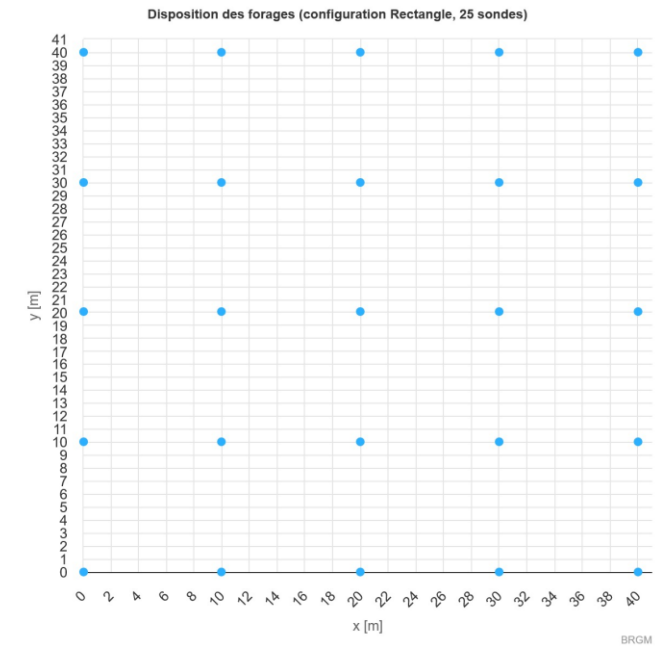
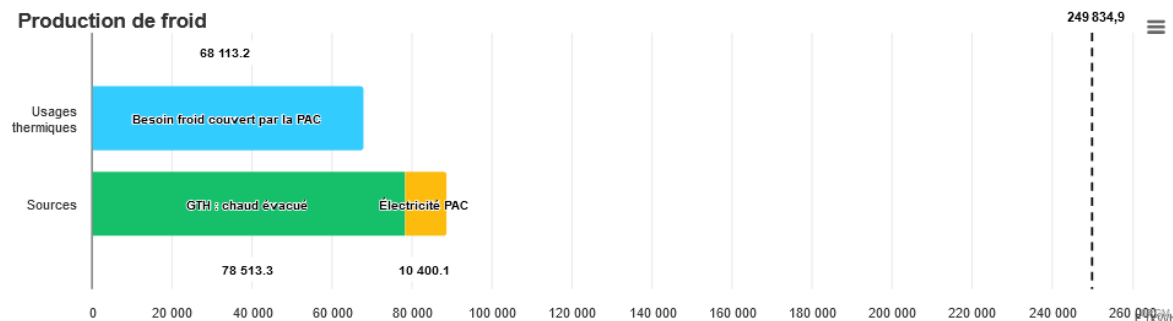
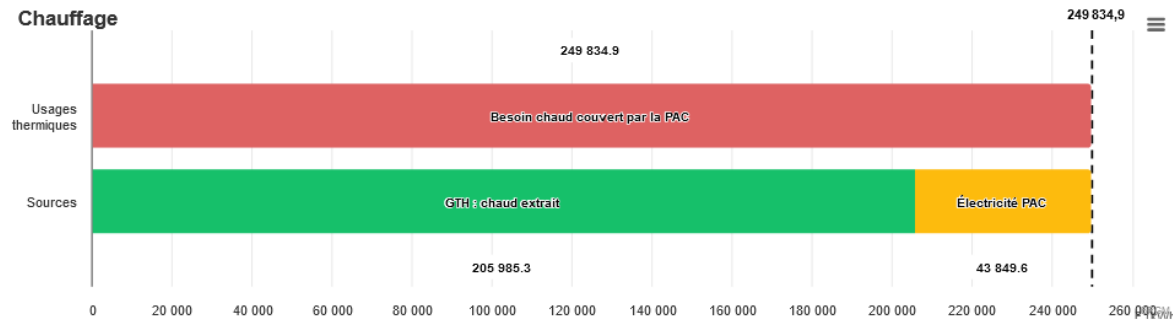
Sur la dernière année de fonctionnement, le SCOP chaud de la PAC hors appoint est de **5,78**.  
 Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est de **1 784,54** heures.  
 Puissance d'appoint à installer en chaud : **0,00** kW  
 Puissance d'appoint 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**

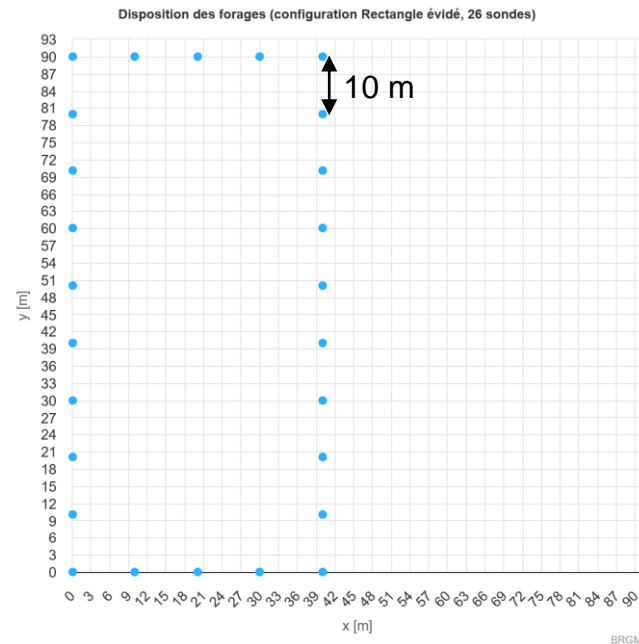
Sur la dernière année de fonctionnement, le SCOP chaud de la PAC hors appoint est de **5,70**.  
 Le nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale de la PAC en mode chauffage est de **1 784,54** heures.  
 Puissance d'appoint à installer en chaud : **0,00** kW  
 Puissance d'appoint 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



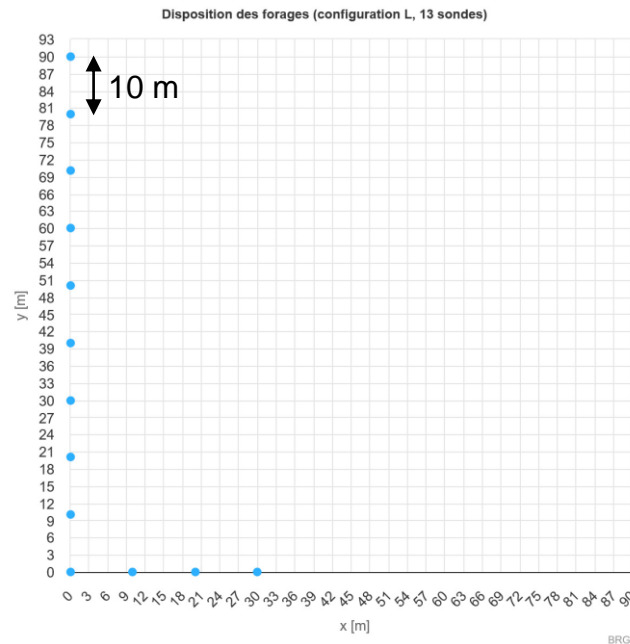
# ETUDE DE CAS

- 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 :

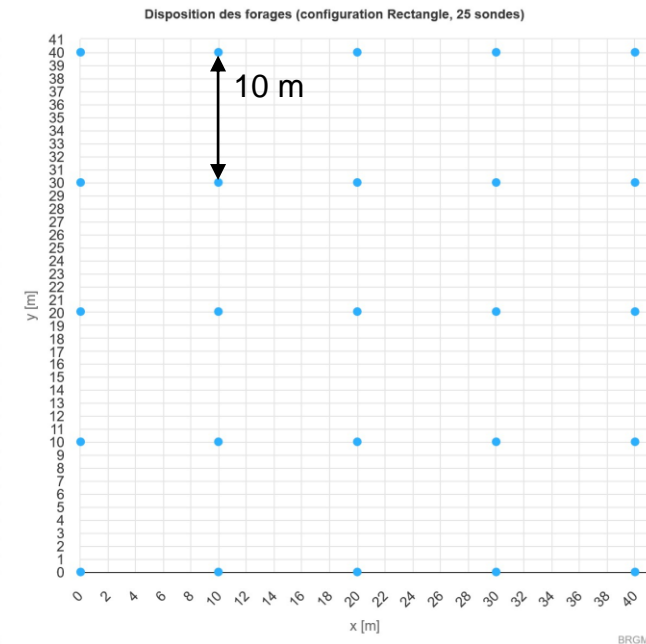
**Dimensionnement n°1 :**  
**Longueur forée = 2678 m**



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

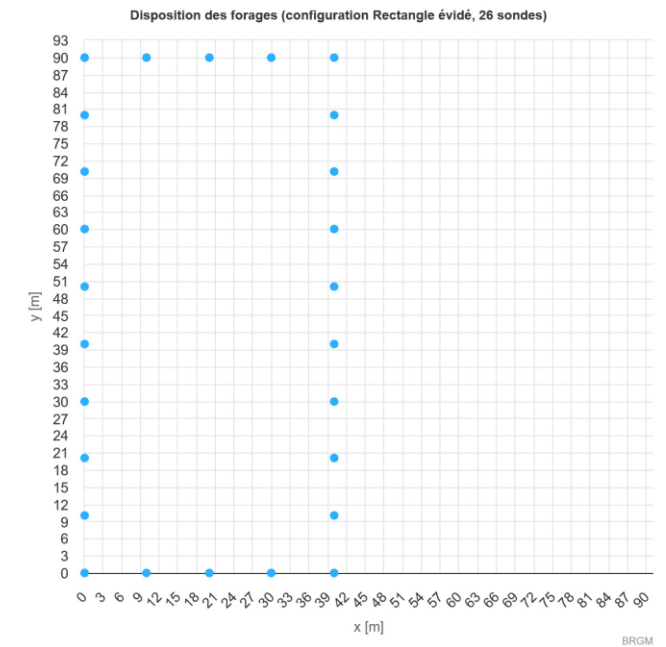
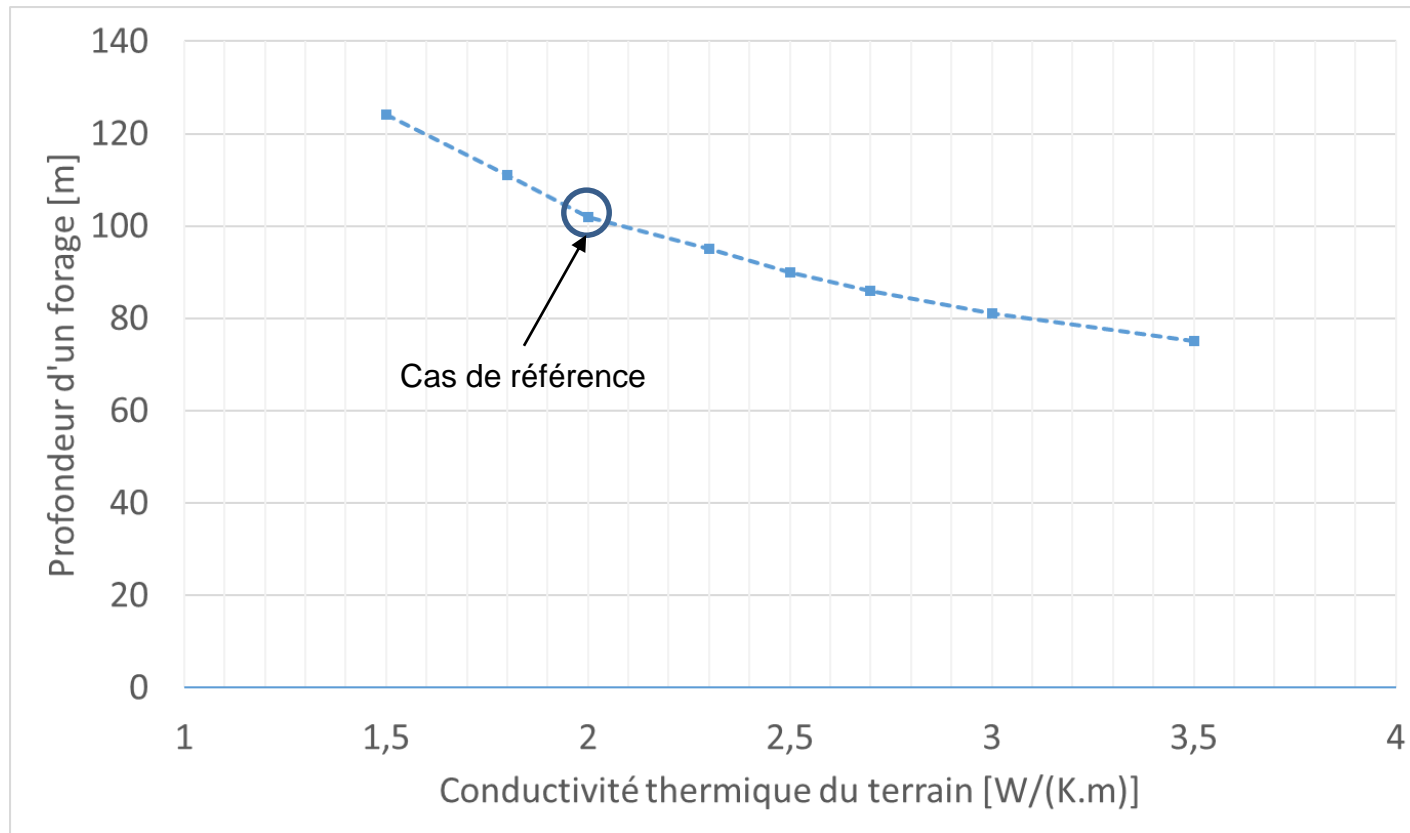


**Dimensionnement n°3 :**  
**Longueur forée = 3200 m**



# ETUDE DE CAS

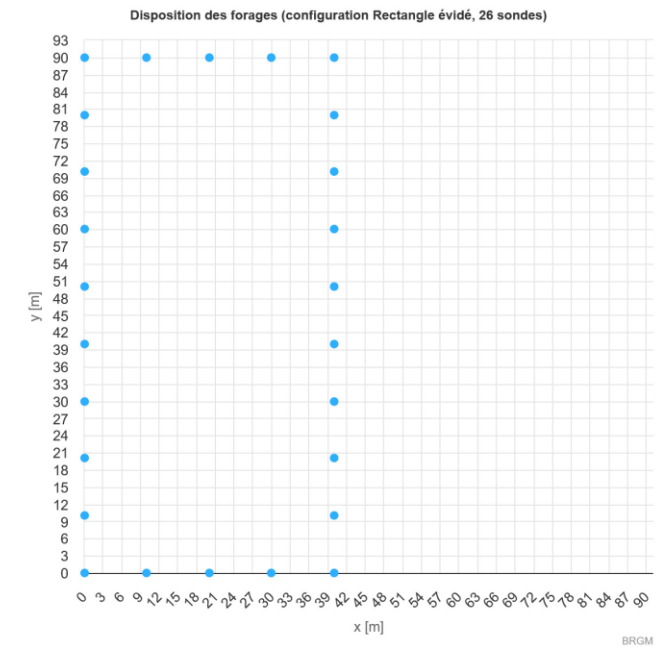
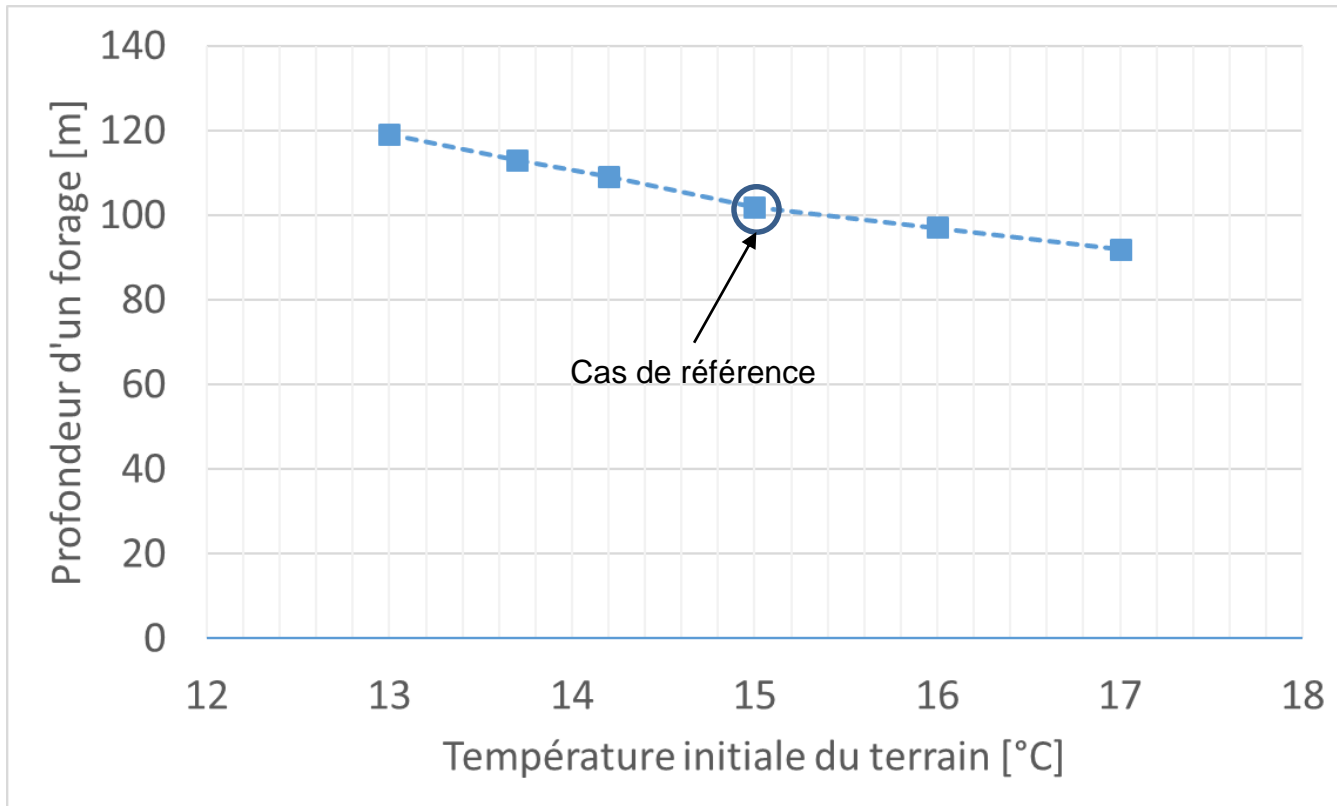
- Influence de la **conductivité thermique du terrain  $\lambda$**  :
  - Température initiale  $T_0 = 15\text{ °C}$
  - La PAC de 140 kW permet de couvrir l'intégralité de la puissance de chauffage
  - Champ de 26 sondes espacées de 10 m, réparties sur une grille rectangulaire creuse





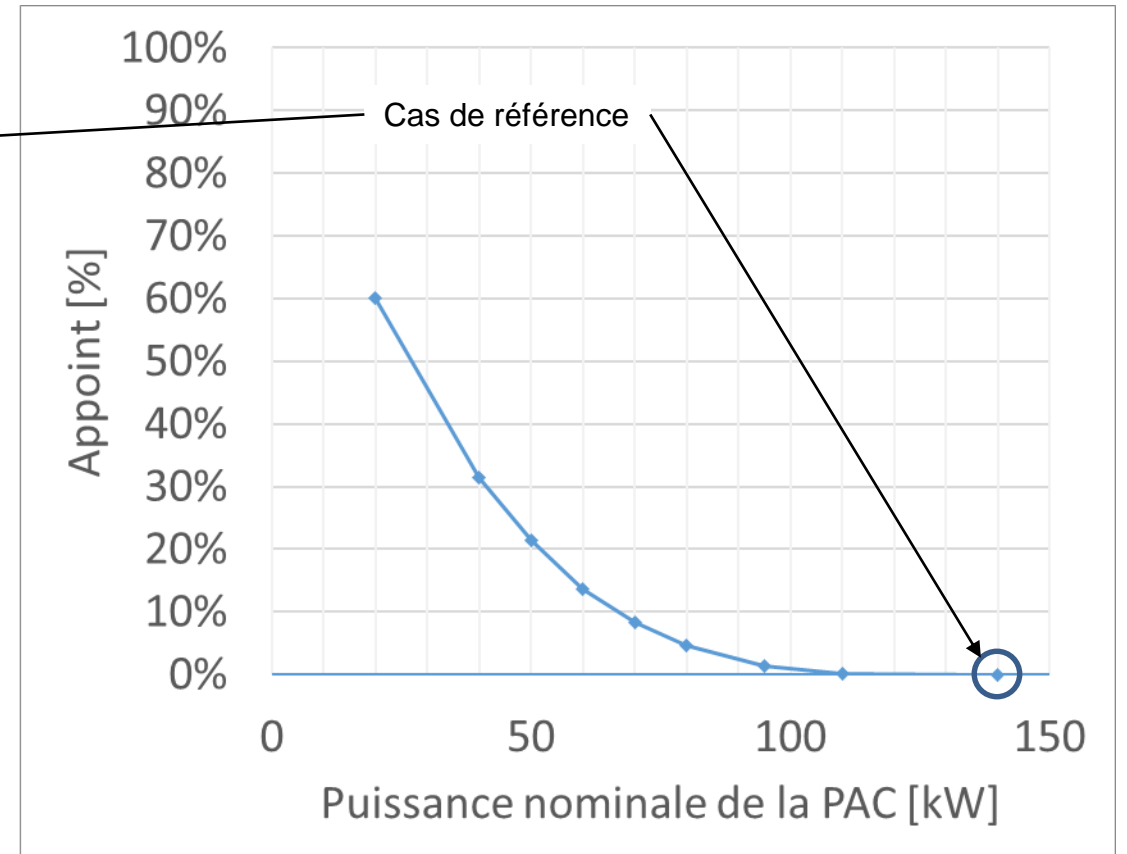
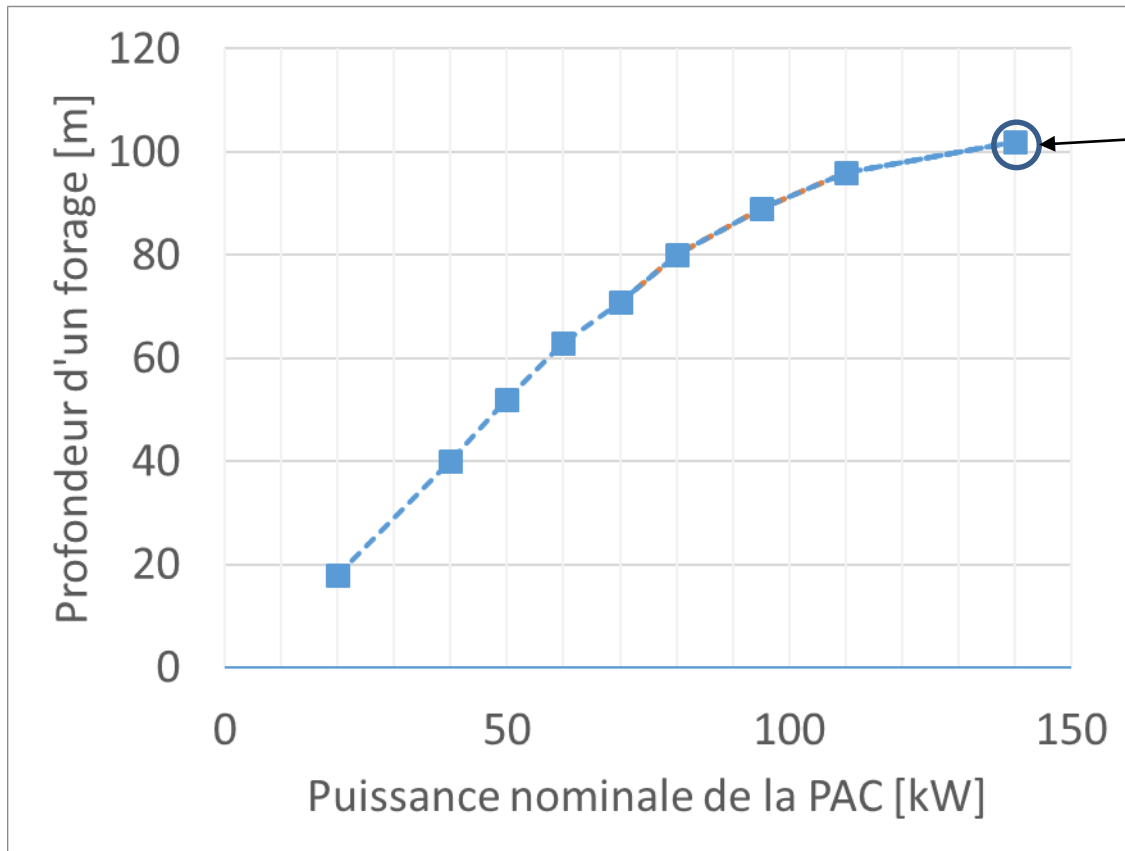
# ETUDE DE CAS

- 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



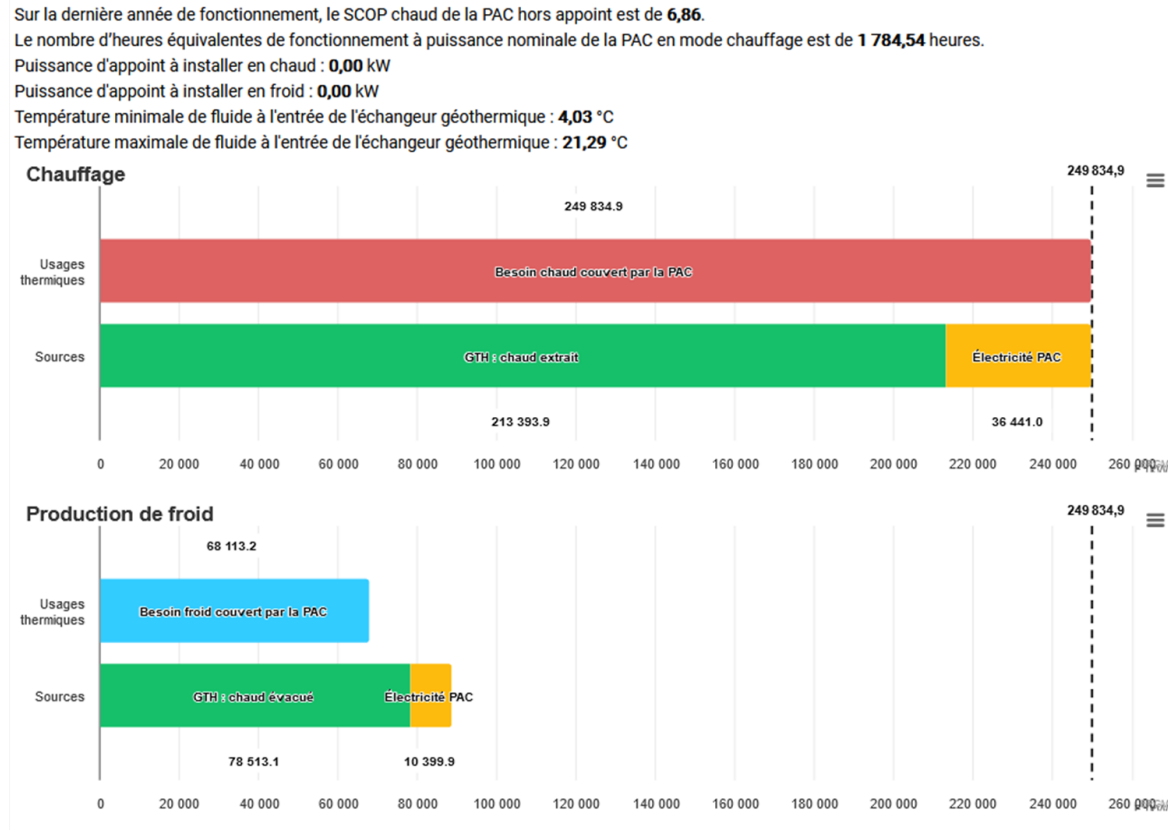
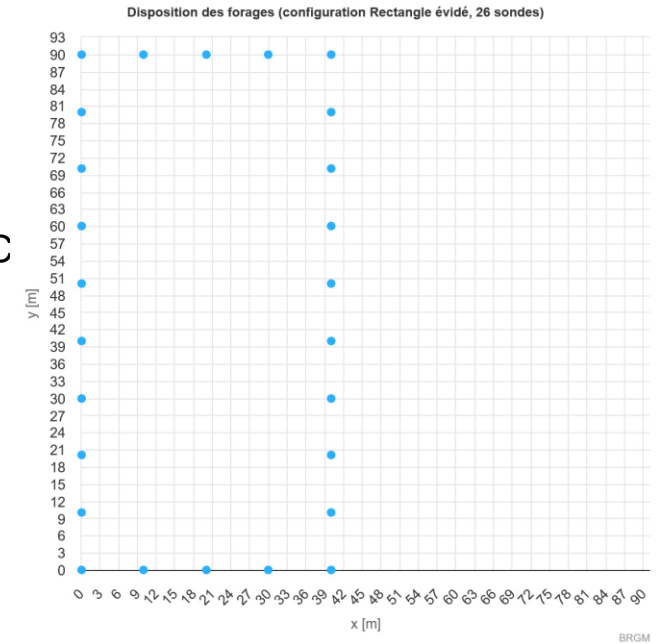
# ETUDE DE CAS

- Influence 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 « L »  
→ **Longueur forée = 5200 m**

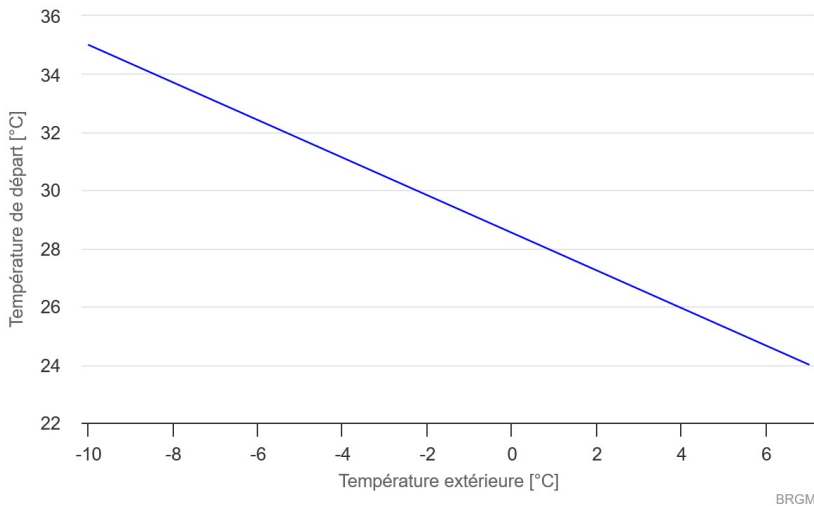


# ETUDE DE CAS

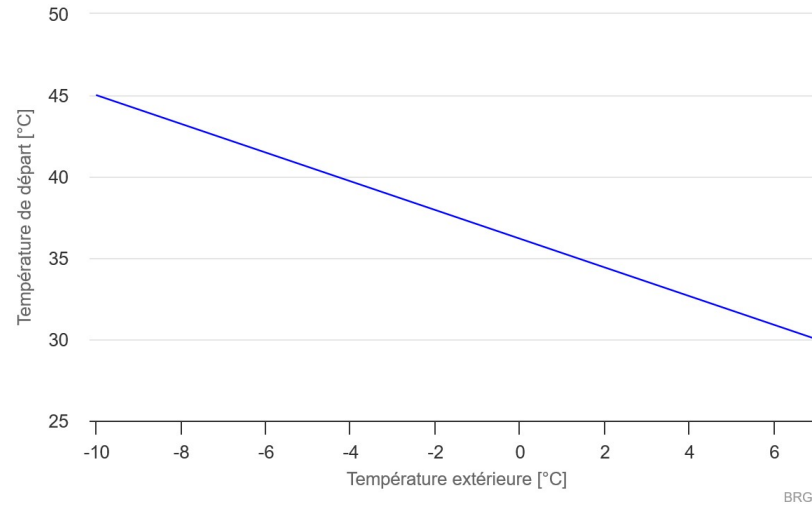
- Variante du cas de référence : Influence du **type d'émetteur de chaleur**
  - Un émetteur de chaleur fonctionnant à plus haute température dégrade les performances de la PAC → La consommation électrique de la PAC augmente → La PAC soutire moins d'énergie frigorifique du terrain pour couvrir le même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

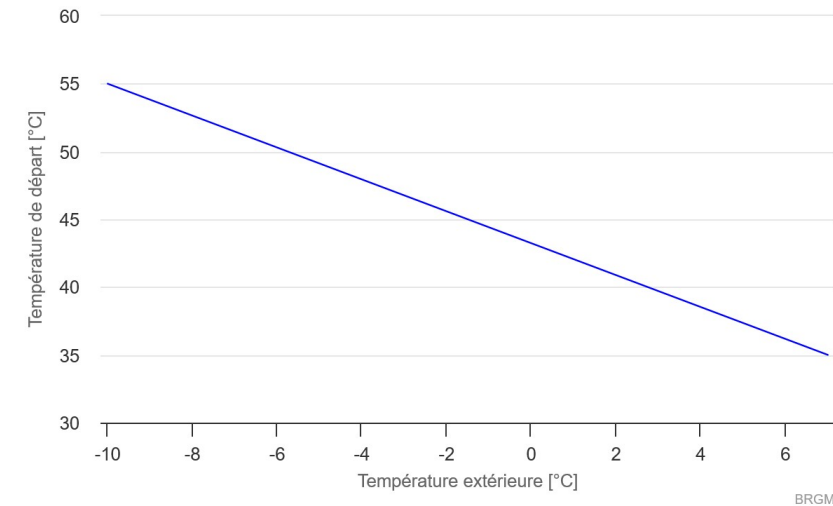
Loi d'eau du plancher chauffant



Loi d'eau du radiateur BT



Loi d'eau du radiateur HT



# ACCÈS À L'OUTIL

Rendez-vous sur le site <http://plateforme-geothermie.brgm.fr/>  
puis en bas de page

The screenshot shows the footer of the BRGM website. It is divided into four columns: 'PLATE-FORME 360', 'RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT', 'OUTILS', and 'SUIVI DE SITES'. The 'OUTILS' column contains the text 'Plateforme digitale de dimensionnement'. Below the columns is a horizontal line with navigation links: 'Se connecter', 'Nous contacter', 'Informations légales / Crédits', and 'Conditions générales d'utilisation'. The 'Se connecter' link is circled in red. To the right of these links is an RSS icon and the text 'Flux RSS'. At the bottom of the page are logos for 'Centre-Val de Loire', the European Union, 'Association INSTITUTS CARNOT', and 'brgm' with the tagline 'Géosciences pour une Terre durable'.



# ACCÈS À L'OUTIL

## Plateforme digitale de dimensionnement

Dans le cadre du [projet FUI MICRO-GEO](#), le BRGM a lancé une plateforme digitale d'aide aux professionnels. Cet outil de dimensionnement d'échangeurs géothermiques pour la maison individuelle permet de proposer une solution optimale en réponse aux contraintes liées à l'habitation (niveau d'isolation, surface à chauffer, hauteur sous plafond...) et au terrain (accessibilité, type de sol, surface disponible...).

Paramètre	Unité	Min	Max
Surface de chauffage	m <sup>2</sup>	10	100
Hauteur sous plafond	m	2.5	3.0
Isolation de la toiture	W/m <sup>2</sup> .K	0.15	0.25
Isolation des murs	W/m <sup>2</sup> .K	0.10	0.20
Isolation du plancher	W/m <sup>2</sup> .K	0.10	0.20

Le BRGM vous accompagne dans la prise en main de cet outil et vous propose des formations tout au long de l'année en France métropolitaine. Les paramètres de calculs et choix de configuration sont expliqués lors de ces rencontres. Les participants reçoivent leurs identifiants et codes d'accès à l'outil en amont des sessions.

### Prochaine session :

- Mardi 25 septembre 2018, de 14 à 17h, à Aubière

Pour toute demande de renseignement complémentaire, contactez-nous à : [plateforme-geothermie@brgm.fr](mailto:plateforme-geothermie@brgm.fr)

Cliquer [ici](#) pour accéder à l'outil de dimensionnement

Rendez-vous sur l'onglet « Outils »

# ACCÈS AU MODULE « CHAMP DE SONDÉS »

## Outil de dimensionnement

Que voulez-vous dimensionner ?

Choir

Choir

Une maison individuelle

Un bâtiment

### PLATE-FORME 360

Au centre du dispositif  
Machinerie & Instrumentation  
Échangeurs horizontaux  
Échangeurs verticaux  
Échangeurs compacts

### RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT

### OUTILS

Plateforme digitale de dimensionnement

### SUIVI DE SITES

## Newsletter

### RECEVOIR NOTRE ACTUALITÉ

Abonnez-vous et recevez notre newsletter bimensuelle !

J'accepte de recevoir cette newsletter et je comprends que je peux me désabonner facilement à tout moment en cliquant sur le lien "se désinscrire" au bas de la newsletter.

INSCRIPTION





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**