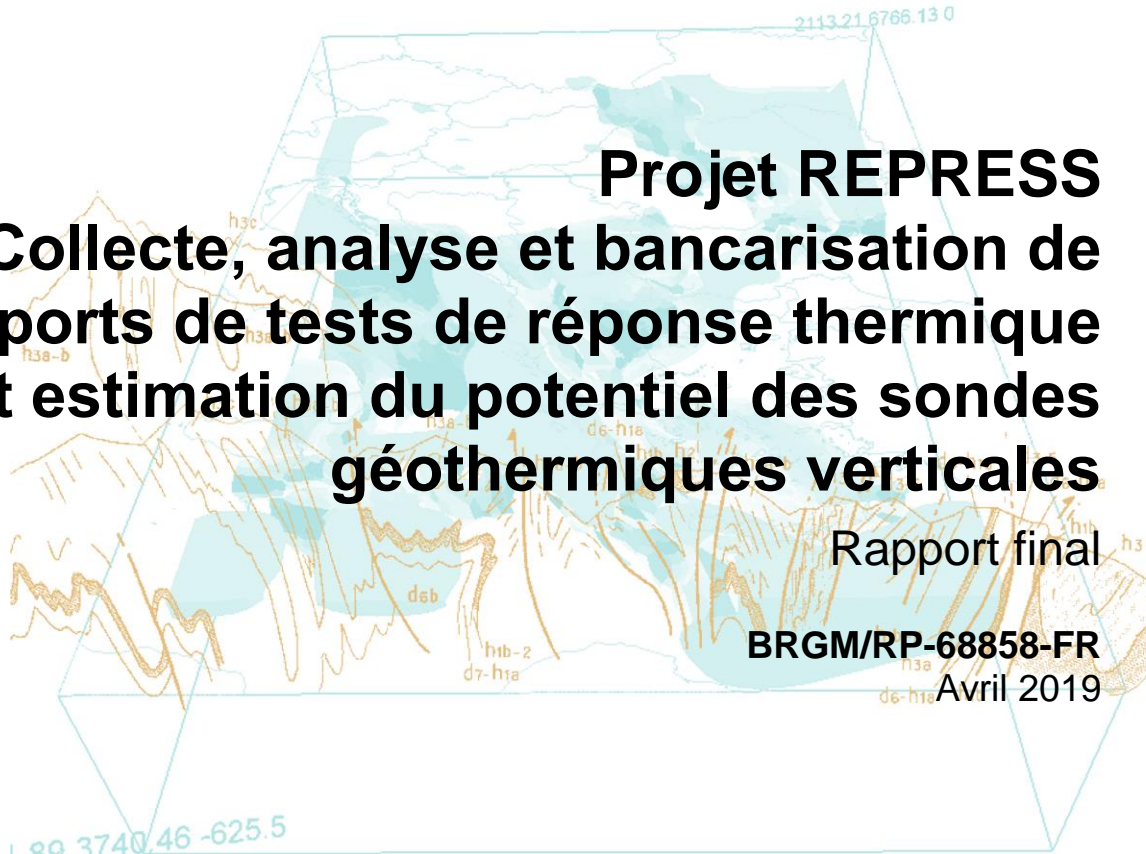


Document public



Projet REPRESS
Collecte, analyse et bancarisation de
rapports de tests de réponse thermique
et estimation du potentiel des sondes
géothermiques verticales

Rapport final

BRGM/RP-68858-FR

Avril 2019

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public

Projet REPRESS

Collecte, analyse et bancarisation de rapports de tests de réponse thermique et estimation du potentiel des sondes géothermiques verticales

Rapport final

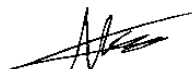
BRGM/RP-68858-FR
Avril 2019

Étude réalisée dans le cadre de la convention ADEME/BRGM n° 1805C0008

C. Maragna, V. Baudouin, S. Hameau
Avec la collaboration de
E. Baynal

Vérificateur :

Nom : Mikaël Philippe
Fonction : Responsable Unité DES
Date : 11/06/2019
Signature :



Approbateur :

Nom : Philippe Rocher
Fonction : Directeur adjoint DGR
Date : 27/06/2019
Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Énergie



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : Géothermie.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Maragna C., Baudouin V., Hameau S. (2019) - Projet REPRESS. Collecte, analyse et bancarisation de apports de tests de réponse thermique et méthode d'estimation du potentiel sur sondes géothermiques verticales. Rapport final. BRGM/RP-68858-FR, 50 p., 33 fig., 4 tabl., 2 ann.

Synthèse

Le projet REPRESS est un projet d'appui aux politiques publiques, signé en 2018 entre le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) dans le cadre de la convention n° 1805C0008. Il vise à collecter, bancariser, analyser et diffuser des rapports de tests de réponses thermiques (TRT), ainsi qu'à développer une méthode pour estimer le potentiel énergétique des sondes géothermiques verticales au niveau régional.

Au total, 192 rapports de TRT ont été dépouillés. Au niveau national, une régression a pu être établie pour le calcul de la température initiale du terrain en fonction des coordonnées, de l'altitude de la tête de sonde et de la profondeur de la sonde. Cette régression permet une prédiction plus fiable de la température initiale qu'une estimation à partir des températures réglementaires de la RT2012, en particulier aux altitudes élevées correspondant aux températures les plus faibles.

Une coupe lithologique a été établie pour 64 forages. Des valeurs de conductivité par lithologie définie par le standard suisse SIA-384/6 ont pu être établies. Il ressort que pour les cinq lithologies les plus représentées, à savoir, par longueur forée décroissante, le calcaire, la marne, l'argile saturée d'eau, le sable saturé d'eau et le granite, la conductivité estimée est dans les plages de valeurs suggérées par la SIA-384/6. En particulier, ces valeurs apparaissent fiables pour les deux principales lithologies : la conductivité thermique du calcaire est légèrement inférieure ($2,4 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) à la valeur recommandée par la SIA-384/6 ($2,8 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$), tandis que l'écart pour la marne est inférieur à $0,2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$.

Une base de données a été développée pour stocker et diffuser les résultats des tests. Les principaux résultats des tests bancarisés, en particulier la conductivité thermique et la température initiale, sont consultables dans une couche dédiée sur l'espace cartographique du site internet géothermie-perspectives.

Une méthode d'estimation du potentiel énergétique des sondes géothermiques a été développée et appliquée aux régions Centre-Val de Loire et Poitou-Charentes pour lesquelles on dispose de modèles de conductivité thermique par tranches de 0 à 50 m, 0 à 100 m et 0 à 200 m de profondeur. La température initiale a été estimée par la régression établie précédemment. Cette méthode permet d'estimer la quantité de chaleur que l'on peut extraire d'une sonde en respectant un critère de température minimale de sortie d'évaporateur fixé, en l'occurrence - 3,0 °C, limite réglementaire pour les forages réalisés dans le cadre de la réglementation sur la Géothermie de Minime Importance (GMI). La dynamique de la sollicitation est déterminée par zone climatique réglementaire. Ramenée au linéaire foré, l'énergie extractible se répartit entre 70 et 150 kWh.ml⁻¹.an⁻¹. Enfin, la comparaison avec dix TRT disponibles montre que l'écart entre la température minimale de liquide caloporteur estimée par les données cartographiques et celle estimée par le TRT peut atteindre une valeur non négligeable de 4 °C. Ainsi, les cartes énergétiques et les cartes de température et conductivité sous-jacentes ne remplacent pas l'exécution d'un TRT pour les projets de grande envergure.

Sommaire

1. Collecte, analyse et bancarisation des rapports de tests de réponses thermiques (TRT)	9
1.1. COLLECTE ET ANALYSE	9
1.1.1. Tendances générales	9
1.1.2. Méta-modèle pour la température initiale du terrain	13
1.1.3. Conductivité thermique : comparaison aux standards internationaux.....	16
1.2. BANCARISATION ET MISE À DISPOSITION.....	18
1.2.1. Base de données.....	18
1.2.2. Liste et définition des colonnes des tables de données.....	19
1.2.3. Applications de gestion des données de TRT	22
1.2.4. Portail de diffusion des données de TRT	24
2. Méthode d'estimation du potentiel sur sondes géothermiques verticales	27
2.1. DONNÉES DISPONIBLES.....	27
2.2. ÉTAT DE L'ART : LA MÉTHODE G.POT	30
2.3. DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE.....	32
2.4. APPLICATION AUX RÉGIONS CENTRE-VAL-DE-LOIRE ET POITOU-CHARENTES.....	35
3. Conclusion.....	41
4. Bibliographie	43

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des TRT bancariés, conductivité thermique et nature géologique estimées.9	9
Figure 2 : Températures initiales des terrains estimées pour les TRT bancariés.10	10
Figure 3 : Distribution des TRT par type d'usage des bâtiments.10	10
Figure 4 : Distribution de l'altitude et de la profondeur des sondes.11	11
Figure 5 : Distribution de la température initiale mesurée.11	11
Figure 6 : Distribution de la conductivité thermique : toutes les valeurs (à gauche), valeurs inférieures à $6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (à droite).11	11
Figure 7 : Évolution de la température du liquide caloporteur pour différentes valeurs de vitesses d'écoulement souterrain (vitesse de Darcy). L'écoulement est pris homogène sur toute la hauteur du forage. Modèle « de la ligne source en translation »12	12
Figure 8 : Résistance du forage en fonction de la profondeur (sondes double-U avec coulis géothermique).12	12
Figure 9 : Évolution de la résistance du forage pour des sondes double-U profondes de 90 à 100 m. À droite, on représente uniquement les forages remplis d'un coulis spécial géothermie (84 TRT à gauche, 54 TRT à droite).12	12
Figure 10 : Température initiale T_0 , comparaison entre observations et métamodèle.13	13
Figure 11 : Zones climatiques réglementaires (à gauche, d'après www.rt-batiment.fr) et nombre de TRT par zone climatique (à droite).15	15
Figure 12 : Température initiale T_0 , comparaison entre observations et méta-modèles par zone climatique.15	15
Figure 13 : Température initiale T_0 , comparaison de l'erreur sur la température entre RT2012 et méta-modèles par zone climatique pour les 173 forages.16	16
Figure 14 : Longueur forée par catégorie de roche (nomenclature SIA-384/6).16	16
Figure 15 : Distribution de la conductivité pour les classes lithologiques définies par la norme SIA-384/6.18	18
Figure 16 : Représentation du modèle physique de données pour la gestion des données TRT.19	19
Figure 17 : Interface de saisie des tests de réponse thermique.22	22
Figure 18 : Localisation des TRT restitués.24	24
Figure 19 : Interrogation d'un point : données-clés du test.25	25
Figure 20 : Conductivité thermique par profondeur en régions CVL et POC.28	28
Figure 21 : Conductivité thermique : TRT vs. modèle ($H = 100 \text{ m}$) pour les régions CVL et POC.28	28
Figure 22 : Température moyenne du sous-sol dans les régions CVL et POC.29	29
Figure 23 : Température moyenne du sous-sol : TRT vs. modèle ($H = 100 \text{ m}$) dans les régions CVL et POC.29	29
Figure 24 : Méthode G.POT : estimation du paramètre t_c par saison de chauffe par zone climatique réglementaire. $t = 0$ correspond au 1 ^{er} juillet. La puissance est estimée pour une température de non-chauffage de $16 \text{ }^\circ\text{C}$31	31
Figure 25 : Application de la méthode G.POT à la région Centre-Val de Loire.32	32
Figure 26 : Facteur $f [\text{K.W}^{-1}]$ par zone climatique : régression (fit) vs modèle.34	34
Figure 27 : Zones climatiques sur la zone d'étude.35	35
Figure 28 : Carte de l'énergie extractible d'une sonde profonde de 50 m.36	36

Figure 29 : Carte de l'énergie extractible d'une sonde profonde de 100 m.	36
Figure 30 : Carte de l'énergie extractible d'une sonde profonde de 200 m.	37
Figure 31 : Comparaison des méthodes G.POT et REPRESS en région Centre-Val de Loire.	37
Figure 32 : Distribution de l'énergie extractible.	38
Figure 33 : Température minimale de fluide calculée avec les données TRT sur la base d'un dimensionnement avec les données cartographiques.....	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs des coefficients et exposants pour le modèle national.	14
Tableau 2 : Écart quadratique moyen et coefficient de corrélation pour les modèles régionaux.	15
Tableau 3 : Durée équivalente par zone climatique.....	33
Tableau 4 : Bornes des paramètres pour l'échantillonnage.....	34

Liste des annexes

Annexe 1. : Modèles de température par zone climatique.....	45
Annexe 2. : Méta-modèle du facteur f par zone climatique.....	47

1. Collecte, analyse et bancarisation des rapports de tests de réponses thermiques (TRT)

1.1. COLLECTE ET ANALYSE

1.1.1. Tendances générales

En 2017-2018, plus de 150 rapports avaient été collectés auprès de bureaux d'études, de l'ADEME dans le cadre de la convention ADEME-BRGM (Martin et Petit, 2017), mais seulement une quarantaine avait été dépouillés. Au total, en 2018-2019, 192 TRT ont été dépouillés et bancarisés (cf. Figure 1 et Figure 2). Les TRT sont réalisés principalement pour des bâtiments de bureau, de transport, de commerce, d'enseignement et des bâtiments communaux (cf. Figure 3).

Par ailleurs, une convention-type et un courrier à destination des bureaux d'études (BE) réalisant des TRT ont été préparés. Ce courrier demande aux BE de communiquer au BRGM leurs rapports de TRT réalisés après 2015, pour bancarisation, en application du Code Minier (prescriptions techniques et réglementaires de la Géothermie de Minime Importance) via le service de télé-déclaration GMI.

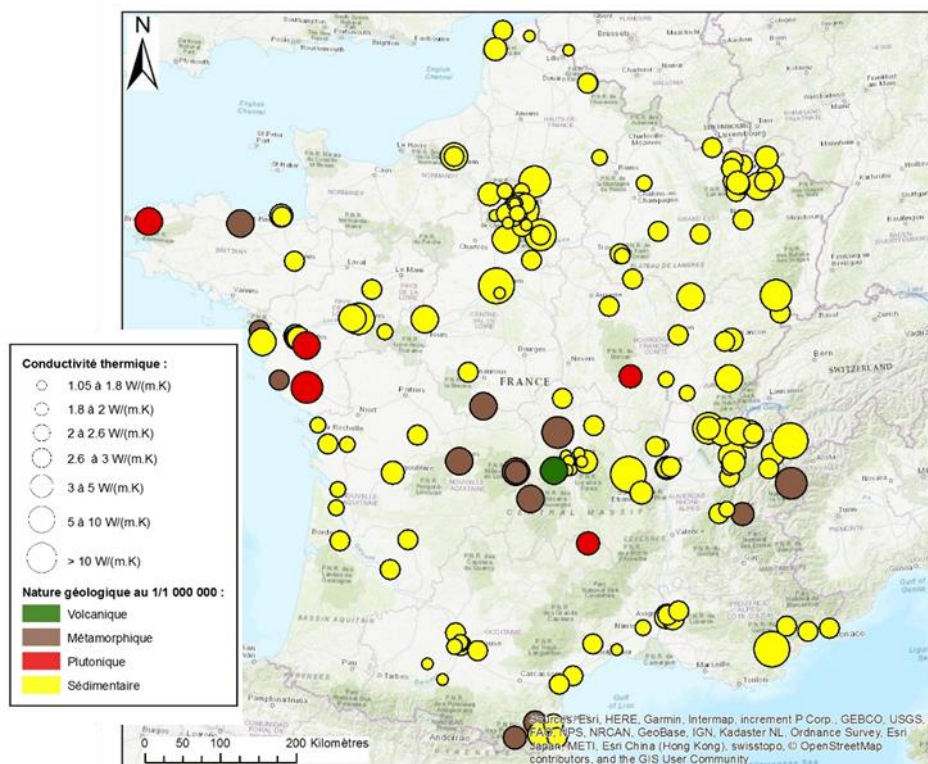


Figure 1 : Localisation des TRT bancariés, conductivité thermique et nature géologique estimées.

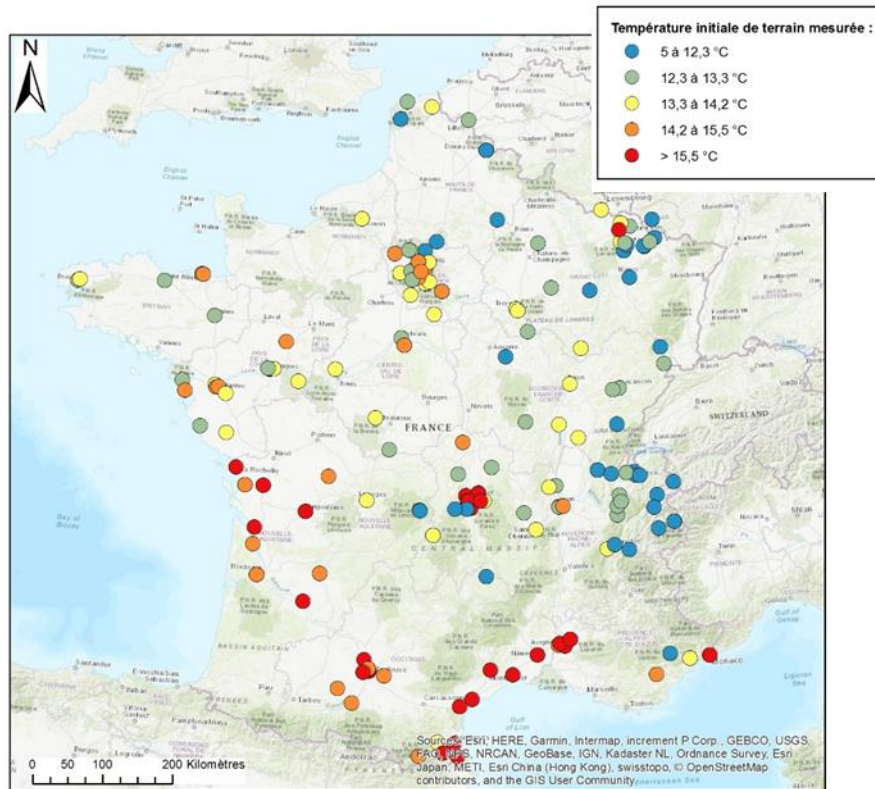


Figure 2 : Températures initiales des terrains estimées pour les TRT bancarisés.

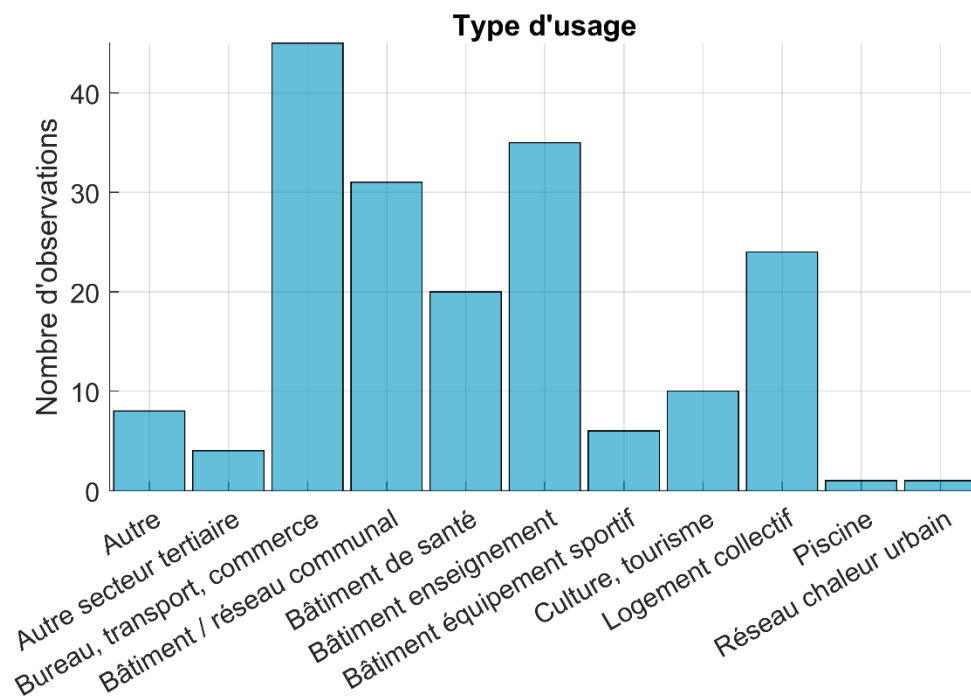


Figure 3 : Distribution des TRT par type d'usage des bâtiments.

L'altitude de chaque forage a été déterminée grâce à un modèle numérique de terrain (MNT, cf. Figure 4). La profondeur de 49 % des forages est comprise entre 90 et 100 m, un héritage du Code Minier. La température initiale mesurée varie entre 5,2 °C et 21,5 °C (cf. Figure 5).

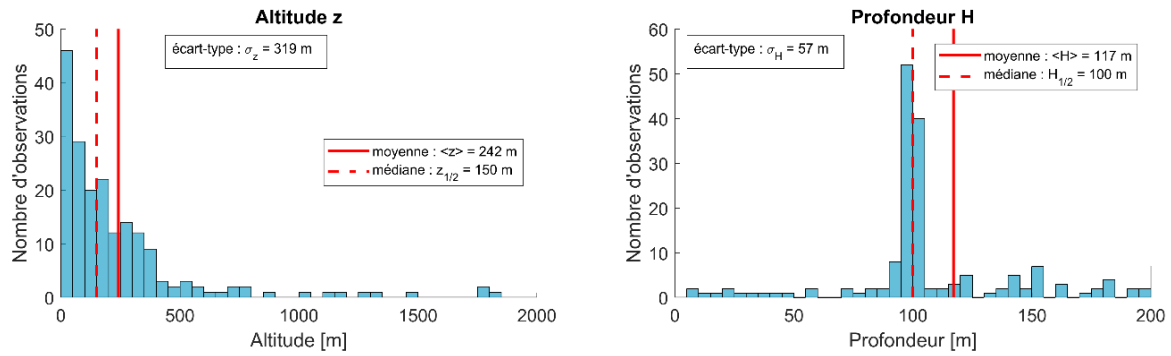


Figure 4 : Distribution de l'altitude et de la profondeur des sondes.

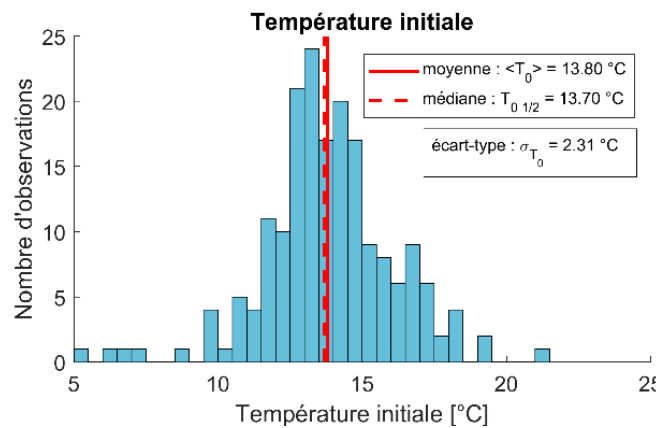


Figure 5 : Distribution de la température initiale mesurée.

D'après la SIA-384/6, les roches les plus conductrices sont les quartzites ($\lambda_m = 5,3 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$). Or, sur les 192 TRT analysés, 8 présentent une conductivité thermique apparente supérieure à $6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (cf. Figure 6). Une valeur élevée du λ_m « apparent » peut indiquer un écoulement souterrain significatif. Pour fixer les idées, cela correspond à une vitesse de Darcy supérieure, en ordre de grandeur, à 50 m/an (Sutton *et al.*, 2003) (cf. Figure 7). Dans l'interprétation classique du TRT, le λ_m apparent est déterminé par un modèle de conduction pure (ligne source infinie) qui néglige l'advection (le transport de chaleur par écoulement souterrain). Une valeur de λ_m « apparent » supérieure à $6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ ne peut alors pas être utilisée pour le dimensionnement avec un logiciel prenant en compte uniquement la conduction. Il est ainsi plus prudent dans ce cas d'utiliser une valeur de λ_m issue de la bibliographie.

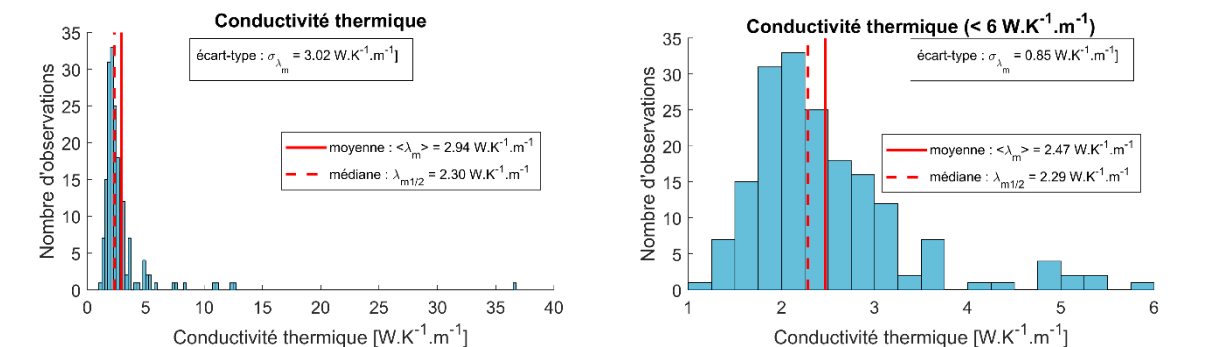


Figure 6 : Distribution de la conductivité thermique : toutes les valeurs (à gauche), valeurs inférieures à $6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (à droite).

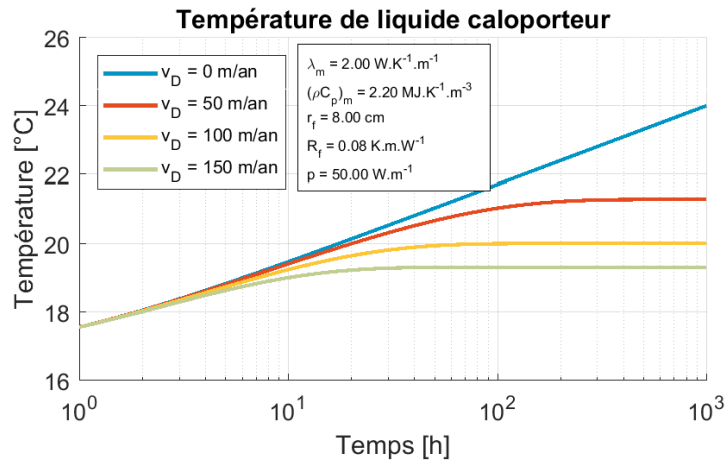


Figure 7 : Évolution de la température du liquide caloporteur pour différentes valeurs de vitesses d'écoulement souterrain (vitesse de Darcy). L'écoulement est pris homogène sur toute la hauteur du forage. Modèle « de la ligne source en translation ».

La valeur moyenne de résistance de forage s'établit aux alentours de 0.082 K.m.W⁻¹ (cf. Figure 8). Après une diminution et une stabilisation de R_f entre 2010 et 2013, on observe une légère augmentation de la résistance en 2014-2015 (cf. Figure 9). Comme on s'y attend, les sondes équipées de coulis géothermique présentent globalement un R_f plus faible. Les sondes sélectionnées pour l'analyse susmentionnées sont profondes de 90 à 100 m, et équipées en double-U.

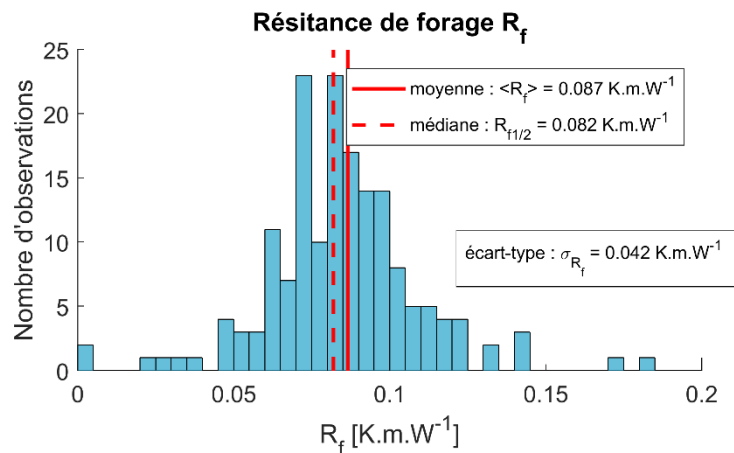


Figure 8 : Résistance du forage en fonction de la profondeur (sondes double-U avec coulis géothermique).

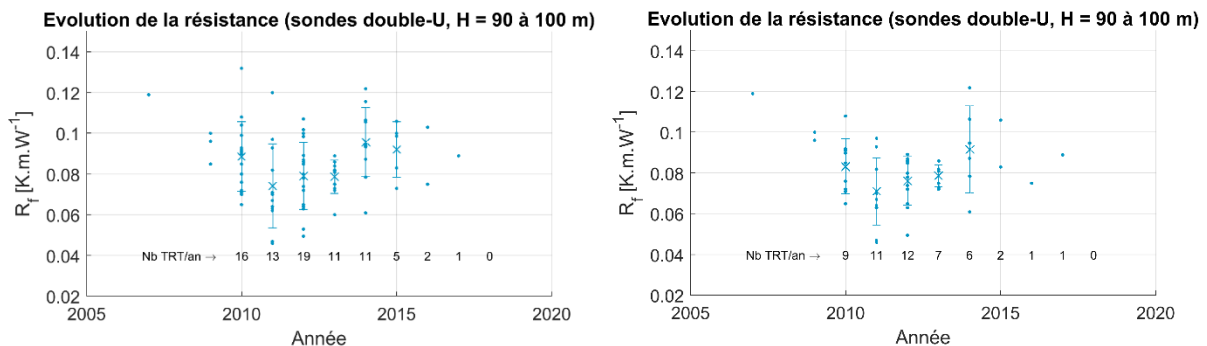


Figure 9 : Évolution de la résistance du forage pour des sondes double-U profondes de 90 à 100 m. À droite, on représente uniquement les forages remplis d'un coulis spécial géothermie (84 TRT à gauche, 54 TRT à droite).

1.1.2. Méta-modèle pour la température initiale du terrain

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur (PAC) diminue de l'ordre de 3 % par °C perdu à la source froide (le terrain en mode chauffage du bâtiment). Il apparaît donc nécessaire de disposer d'une méthode d'estimation fiable de la température initiale du terrain T_0 . Des « méta-modèles » (modèles approchés, ou *surrogate models* en anglais) de T_0 ont été établis : un méta-modèle à l'échelle nationale est complété par de méta-modèles par zones climatiques réglementaires lorsque le nombre d'observations est suffisant. À noter qu'une partie des observations (9 %) a été exclue car la position, l'altitude ou la profondeur ne semblait pas assez fiable. Chaque méta-modèle est un polynôme qui s'écrit :

$$T_0(Z, H, X, Y) = \sum_{k=1}^K a_k (Z^{M_{k,1}} \times H^{M_{k,2}} \times (X - X_{L0})^{M_{k,3}} \times (Y - Y_{L0})^{M_{k,4}}) \quad (1)$$

Dans l'éq. (1) :

- Z est l'altitude de la tête de la sonde [m] ;
- H est la profondeur du forage équipée d'un échangeur géothermique [m] ;
- X et Y sont les coordonnées du forage [km] dans le système de projection RGF93 / Lambert-93 (EPSG2154), avec $X_{L0} = 700$ km et $Y_{L0} = 6\,600$ km.

La matrice M porte les exposants : par exemple une ligne [1 0 0 0] correspond au terme linéaire avec l'altitude Z . Pour le modèle « national », les coefficients a_k sont déterminés par une procédure itérative sur les 173 forages : on ajuste d'abord les a_k jusqu'à l'ordre 3 (termes purs et termes de couplage), puis sont conservés uniquement les termes représentatifs. Le modèle comprend alors 20 termes (cf. Tableau 1), explique 81 % de la variance observée (coefficient de régression $R = 0,811$), avec un écart quadratique moyen (*root mean square error* ou *RMSE*) de 1,07 °C (cf. Figure 10). Dans 6 % des cas seulement (11 observations), l'erreur est supérieure à 2 °C. La méthode semble donc acceptable pour une estimation de T_0 en phase de pré-projet, lorsque l'on ne dispose pas encore d'un TRT.

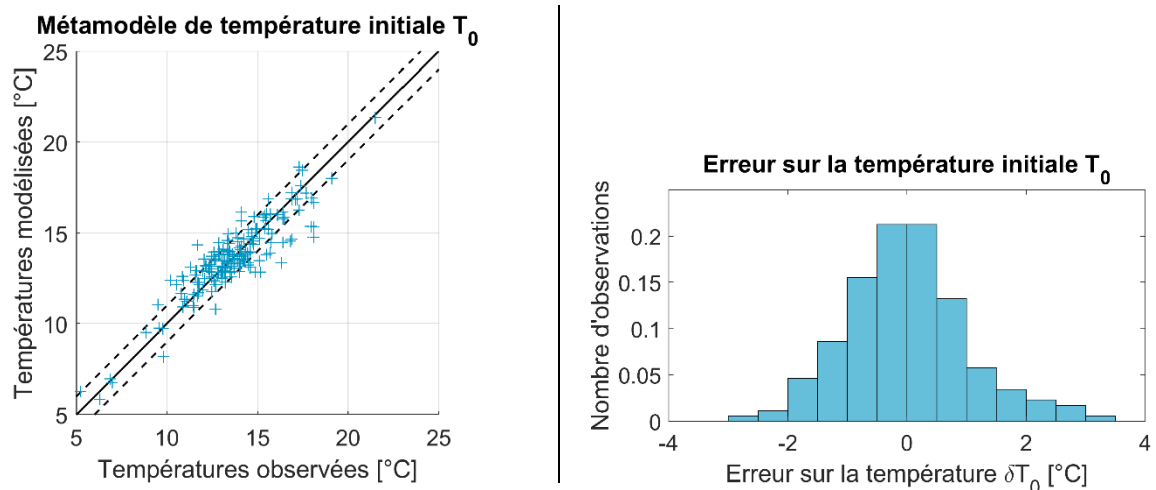


Figure 10 : Température initiale T_0 , comparaison entre observations et métamodèle.

k	Exposants M				Coefficient
	$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	a_k
1	0	0	0	0	15.127
2	1	0	0	0	-0.0035078
3	0	1	0	0	-0.021761
4	0	0	0	2	1.3084e-05
5	2	0	1	0	2.0233e-08
6	0	0	0	1	-0.0073923
7	3	0	0	0	-1.5885e-09
8	0	1	0	1	2.0922e-05
9	1	0	2	0	-8.3957e-08
10	0	3	0	0	-2.6575e-07
11	0	2	0	0	0.00020545
12	0	0	3	0	1.1732e-08
13	0	1	1	1	3.8827e-08
14	0	1	0	2	-1.0632e-07
15	0	0	2	0	7.1215e-06
16	0	0	1	0	-5.4798e-05
17	0	0	0	3	2.0637e-09
18	0	2	0	1	-5.7335e-09
19	1	0	0	1	-9.841e-07
20	1	1	1	0	-1.5892e-08

Tableau 1 : Valeurs des coefficients et exposants pour le modèle national.

Un méta-modèle a aussi été estimé pour chaque zone climatique réglementaire contenant un nombre suffisant d'observations, ici fixé à 20, soit les zones H1a, H1b, H1c, H2b (cf. Figure 11). Les coefficients de corrélation sont compris entre 67 % et 94 % (cf. Tableau 2). Les coefficients à utiliser sont donnés en Annexe 1.

Néanmoins, il faut être prudent dans l'utilisation de ces méta-modèles régionaux. En effet, la densité de points n'est pas homogène sur chaque zone climatique (cf. par ex. la zone H1b avec un nombre important de points en Moselle). Utiliser ces méta-modèles régionaux loin des points d'échantillonnage peut entraîner une estimation imprécise de la température initiale.

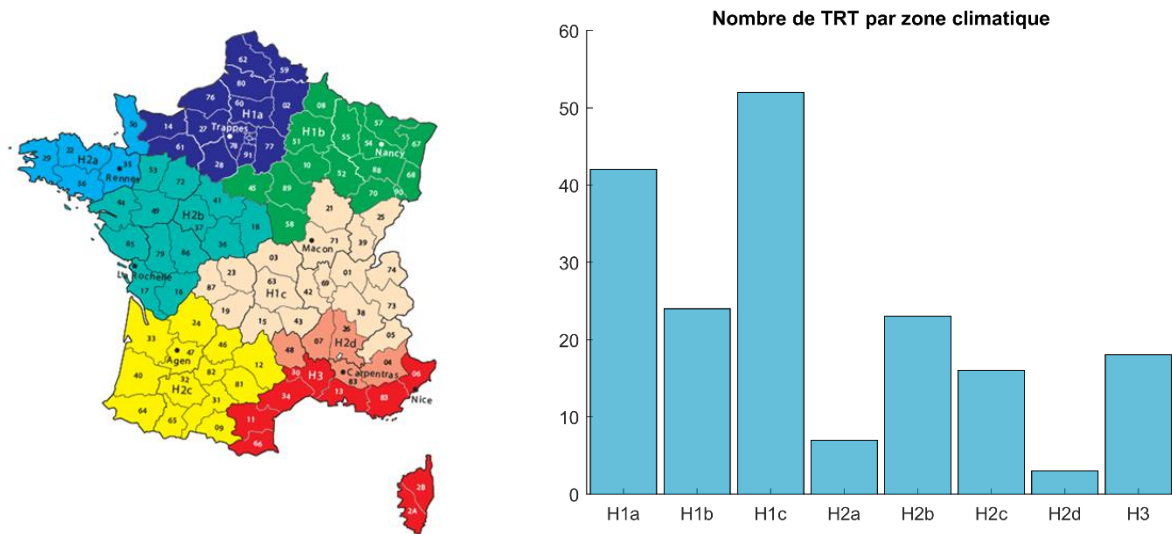


Figure 11 : Zones climatiques réglementaires (à gauche, d'après www.rt-batiment.fr) et nombre de TRT par zone climatique (à droite).

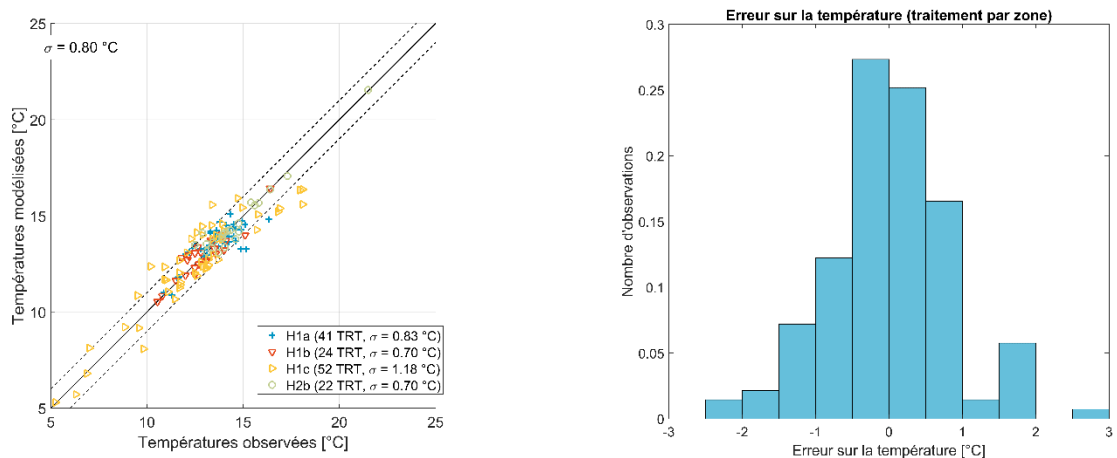


Figure 12 : Température initiale T_0 , comparaison entre observations et méta-modèles par zone climatique.

Zone climatique	Écart quadratique moyen [°C]	Coefficient de corrélation R [%]
H1a	0,83	67
H1b	0,70	83
H1c	1,18	85
H2b	0,70	94

Tableau 2 : Écart quadratique moyen et coefficient de corrélation pour les modèles régionaux.

La méthode RT2012 permet d'estimer la température du sol. En effet, des fichiers de température de l'air au pas de temps horaire sont disponibles. Ces températures doivent être corrigées comme suit : en soustrayant 2 °C si l'altitude est comprise entre 400 m et 800 m, et en soustrayant 4 °C si l'altitude est supérieure à 800 m. Ensuite, une hypothèse classique (mais non spécifiée dans la RT2012) consiste à considérer que la température de surface est égale à la température moyenne annuelle de l'air, et que le gradient géothermique est de 3 °C/100 m.

Les nouveaux méta-modèles permettent de réduire l'erreur quadratique moyenne $\delta_{\sigma T}$ sur la température d'environ 1,4 °C (en comparaison avec le modèle RT2012) à environ 0,8 °C. Surtout, ils permettent de s'affranchir des *outliners* : l'erreur n'excède pas 2,2 °C, là où elle pouvait atteindre 5 °C avec la méthode RT2012 (en particulier pour les installations en altitude).

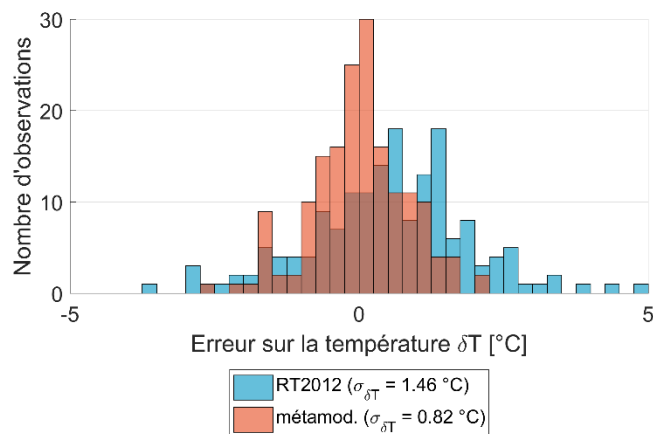


Figure 13 : Température initiale T_0 , comparaison de l'erreur sur la température entre RT2012 et méta-modèles par zone climatique pour les 173 forages.

1.1.3. Conductivité thermique : comparaison aux standards internationaux

Les coupes lithologiques de 65 forages ont été établies, et retranscrites dans la nomenclature de la norme suisse SIA-384/6 (cf. Figure 14). La lithologie dominante du forage a aussi été qualifiée : roches métamorphiques, mixtes, plutoniques, sédimentaires et terrains meubles. Les roches sédimentaires et terrains meubles représentent 80 % des formations rencontrées dans ces forages, et les roches calcaires et marneuses sont les deux lithologies les plus représentées (cf. Figure 14).

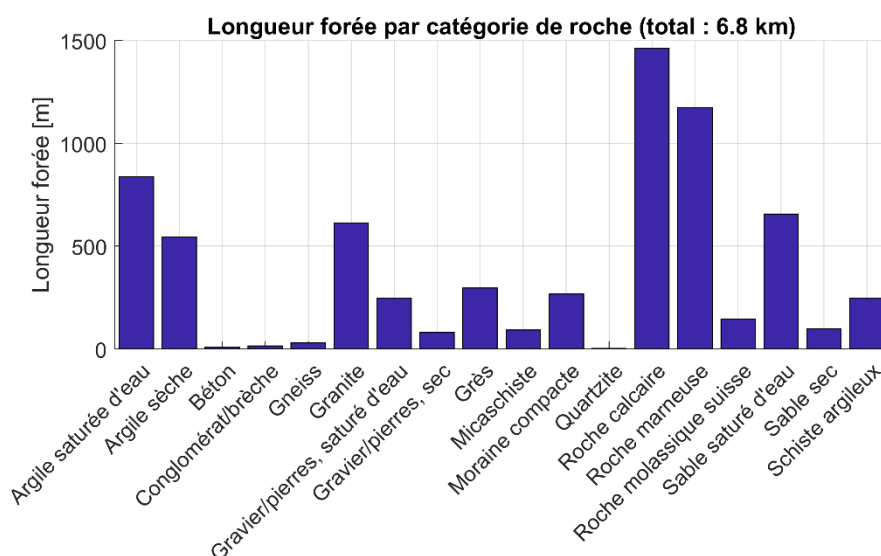


Figure 14 : Longueur forée par catégorie de roche (nomenclature SIA-384/6).

Les valeurs de conductivité proposées par la SIA-384/6 ont été comparées aux résultats des TRT. On pose que la conductivité λ_n mesurée in-situ sur la sonde n de profondeur H_n est la somme de la conductivité $\lambda_{i,n}$ de chaque couche traversée ($i = 1, \dots, I_n$) pondérée par l'épaisseur de la dite couche $H_{i,n}$:

$$\lambda_n = \frac{1}{H_n} \sum_{i=1}^{I_n} \lambda_{i,n} H_{i,n} \quad (2)$$

De manière similaire, l'estimation de la conductivité λ_n' dans la nomenclature SIA est :

$$\lambda_n' = \frac{1}{H_n} \sum_{i=1}^{I_n} \lambda_{i,n}' H_{i,n} \quad (3)$$

Avec $\lambda_{i,n}'$ la valeur de conductivité estimée pour la lithologie associée à la couche i , on a cherché à déterminer une estimation de conductivité thermique par lithologie en minimisant un écart quadratique moyen ε entre conductivités obtenues du TRT λ_n et estimées λ_n' :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\lambda_n - \lambda_n')^2}{N}} \quad (4)$$

Un TRT présentant un écoulement souterrain significatif ($\lambda > 6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) a été exclu de l'analyse, l'analyse a donc été menée sur $N = 64$ TRT.

Pour 6 des 8 lithologies représentées en Figure 15, les valeurs de conductivité thermique sont dans les plages de valeurs indiquées par la SIA-384/6. La valeur de conductivité thermique estimée pour le calcaire est légèrement inférieure ($2,4 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) à la valeur recommandée par la SIA-384/6 ($2,8 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$). À noter que les lithologies présentant une longueur forée cumulée inférieure à $L = 250$ m ne sont pas représentées.

La valeur particulièrement élevée pour le grès ($4,2 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) s'écarte significativement de la valeur recommandée ($2,3 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$). Cela peut s'expliquer par le fait qu'un test sur une sonde traversant 83 m de grès indique une conductivité de $5,83 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, signe probable d'un écoulement souterrain significatif, ce qui tire vers le haut la valeur obtenue. Les trois autres tests traversant des grès (pour une longueur cumulée $L = 214$ m) indiquent des conductivités comprises entre $2,08$ et $2,86 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, ce qui est plus proche du standard suisse.

La valeur significativement différente obtenue pour l'argile sèche, à savoir $2,1 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ contre $0,6 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, peut s'expliquer par la difficulté à différencier l'argile sèche de l'argile humide dans l'analyse de cuttings (déblais) et l'établissement d'une coupe lithologique.

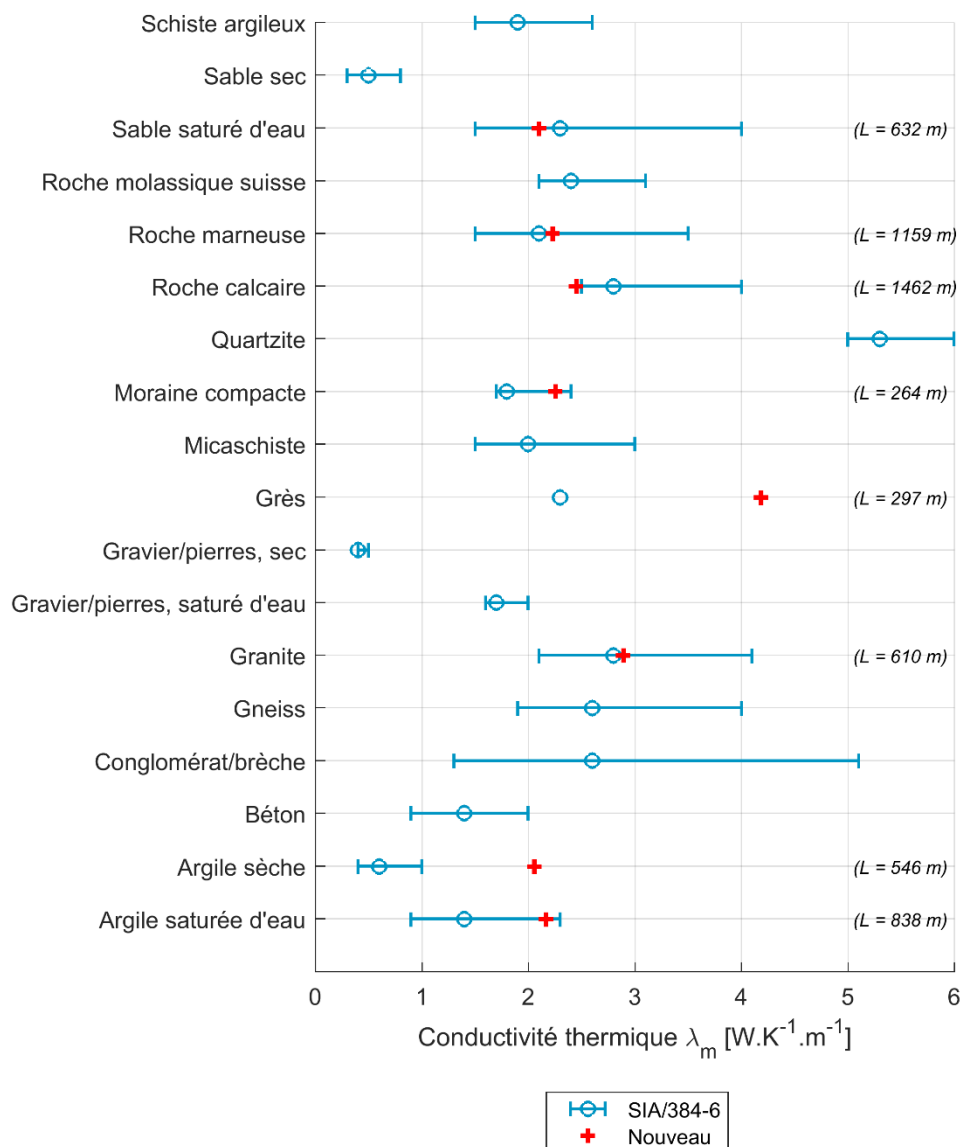


Figure 15 : Distribution de la conductivité pour les classes lithologiques définies par la norme SIA-384/6.

1.2. BANCARISATION ET MISE À DISPOSITION

1.2.1. Base de données

Le modèle des tables mises en place dans la base de données est basé sur le standard Observations & Measurements (<https://www.opengeospatial.org/standards/om>).

Un lien a été créé entre les données spécifiques au TRT et la base de données de la Banque du Sous-Sol (BSS) afin de s'assurer que les ouvrages concernés par le TRT sont connus. Ce lien permet également d'associer au TRT l'ensemble des informations déjà connues sur l'ouvrage.

Les nouvelles tables mises en place pour gérer les données de TRT sont représentées ci-après.

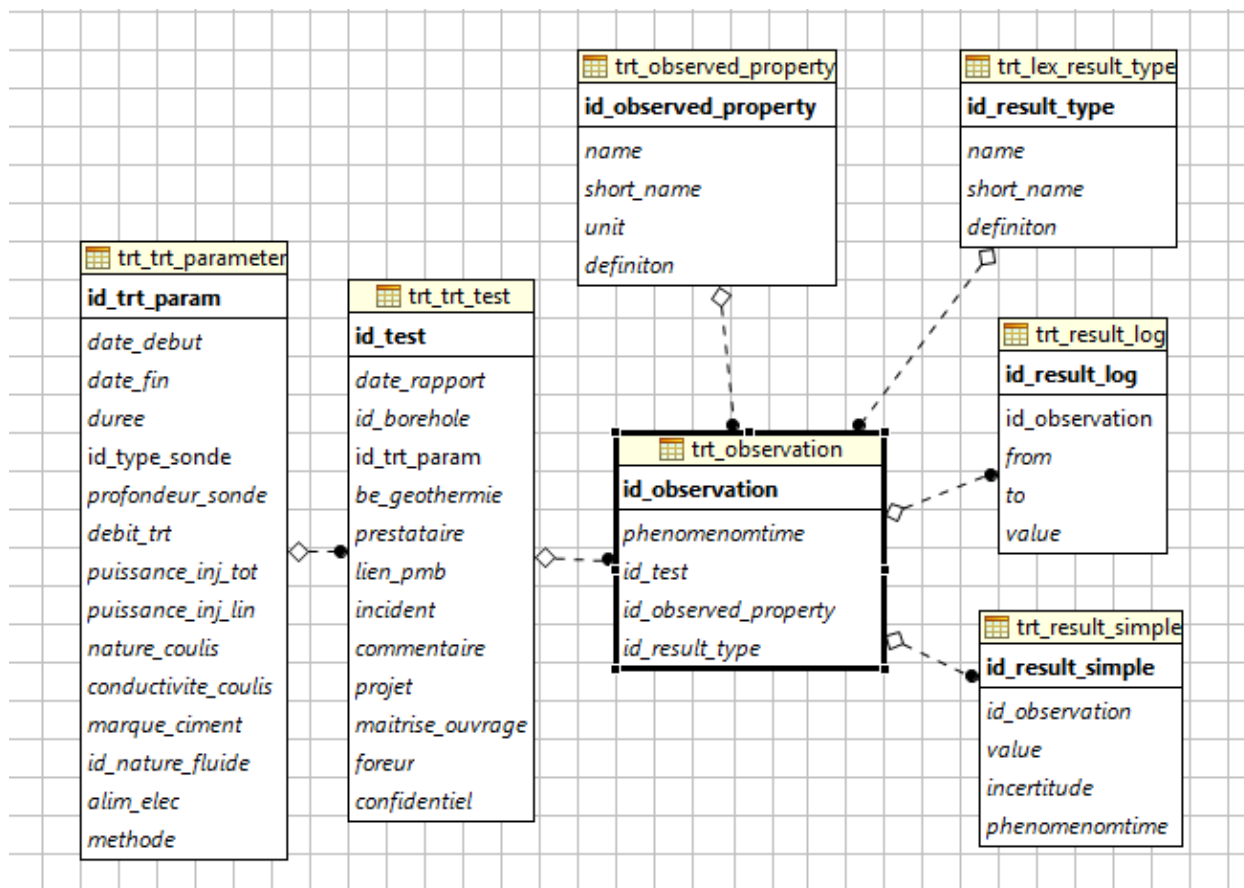


Figure 16 : Représentation du modèle physique de données pour la gestion des données TRT.

La base de données est une base PostgreSQL dans sa version : PostgreSQL 9.6.2 on x86_64-pc-linux-gnu, compiled by gcc (GCC) 4.8.5 20150623 (Red Hat 4.8.5-11), 64-bit.

1.2.2. Liste et définition des colonnes des tables de données

On trouvera ci-dessous la liste des tables. Pour chaque table, est indiqué son nom suivi de sa définition succincte. Puis sont listées chacune des colonnes de la table représentée par son nom, son caractère obligatoire ou non, son type et sa définition. Les colonnes en *italique* sont les clés primaires des tables.

a) Table *trt_trt_test*

Table contenant les méta-données d'un TRT. Cette table fait également le lien avec la table « ouvrage » de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), assurant ainsi que chaque TRT est bien lié à un ouvrage souterrain déclaré.

Nom colonne	Obligatoire (O/N)	Type	Définition
id_test	O	Serial(10)	<i>identifiant technique</i>
date_rapport	N	timestamp	Date du rapport décrivant le TRT
id_borehole	N	varchar	Identifiant unique d'un ouvrage en BSS
id_trt_param	O	int4	Clé vers la table trt_trt_parameter
be_geothermie	N	varchar	Nom du bureau d'étude
prestataire	N	varchar	Nom du prestataire ayant réalisé le TRT
lien_pmb	N	varchar	Lien vers la documentation associée
incident	N	text	Description des incidents
commentaire	N	text	Commentaires variés
projet	N	text	Nom du projet
maitrise_ouvrage	N	varchar	Nom de la maîtrise d'ouvrage
foreur	N	Varchar	Nom de l'entreprise de forage
confidentiel	N	bool	Flag permettant de dire si les données sont confidentielles

b) Table trt_trt_parameter

Table contenant les valeurs des paramètres spécifiques à un TRT et qui sont liés au résultat observé.

Nom colonne	Obligatoire (O/N)	Type	Définition
id_trt_param	O	Serial(10)	<i>identifiant technique</i>
date_debut	N	timestamp	Date de début du TRT
date_fin	N	timestamp	Date de fin du TRT
duree	N	int4	Durée du TRT
id_type_sonde	O	int4	Clé vers le type de sonde
profondeur_sonde	N	numeric	Profondeur de la sonde
debit_trt	N	numeric	Debit lors du TRT
puissance_inj_tot	N	numeric	Puissance injectée totale
puissance_inj_lin	N	numeric	Puissance injectée linéaire
nature_coulis	N	varchar	Nature du coulis
conductivite_coulis	N	numeric	Conductivite du coulis
marque_ciment	N	Varchar(150)	Marque du ciment
id_nature_fluide	N	int4	Clé vers la nature du fluide
alim_elec	N	Varchar(150)	Commentaire sur l'alimentation électrique
methode	N	Varchar(150)	Méthode du TRT

c) Table trt_observation

Table où est enregistré l'ensemble des observations collectées lors de la réalisation d'un TRT. Un TRT peut avoir n observations.

nom colonne,	Obligatoire (O/N)	type	définition
<i>id_observation</i>	O	int4	<i>identifiant technique</i>
phenomenotime	N	timestamp	Date de observation
id_test	N	int4	Clé vers le test TRT
id_observed_property	N	int4	Clé vers la propriété observée
id_result_type	N	int4	Clé vers le type de résultat observé

d) Table trt_observed_property

Table décrivant la propriété qui est observée et qui est associée à une observation enregistrée lors de la réalisation d'un TRT.

Nom colonne	Obligatoire (O/N)	Type	Définition
<i>id_observed_property</i>	O	Serial(10)	<i>identifiant technique</i>
name	N	Varchar(200)	Nom de la propriété observée
short_name	N	Varchar(200)	Nom court de la propriété observée
unit	N	Varchar(50)	Unité internationale de la propriété observée
definiton	N	Varchar(200)	Définition standardisée de la propriété observée

e) Table trt_lex_result_type

Table décrivant le type de résultat associé à une observation enregistrée lors de la réalisation d'un TRT. Les résultats sont de type « simple » ou de type « log ».

Nom colonne	Obligatoire (O/N)	Type	Définition
<i>id_result_type</i>	O	Serial(10)	<i>identifiant technique</i>
name	N	Varchar(200)	Nom du type de résultat
short_name	N	Varchar(200)	Nom court du type de résultat
definiton	N	Varchar(200)	Définition standardisée du type de résultat

f) Table *trt_result_log*

Table contenant les valeurs des résultats de type log. Ce type de résultats à la particularité d'être associé à un intervalle de profondeur et non pas à un point de l'espace.

Nom colonne	Obligatoire (O/N)	Type	Définition
<i>id_result_log</i>	O	Serial(10)	identifiant technique
<i>id_observation</i>	N	int4	Clé vers l'observation
<i>from</i>	N	numeric	Profondeur début
<i>to</i>	N	numeric	Profondeur fin
<i>value</i>		Varchar(1000)	Valeur du résultat

g) Table *trt_result_simple*

Table contenant les valeurs des résultats de type simple. Ce type de résultats correspondant à un enregistrement de type date/valeur. Il permet par exemple d'enregistrer les timeseries.

nom colonne,	Obligatoire (O/N)	type	définition
<i>id_result_simple</i>	O	int4	identifiant technique
<i>id_observation</i>	N	int4	Clé vers l'observation
<i>value</i>	N	Varchar(200)	Valeur du résultat
<i>incertitude</i>	N	Varchar(200)	Incertitude sur la valeur
<i>phenomenotime</i>	N	timestamp	Date de la mesure

1.2.3. Applications de gestion des données de TRT

Un formulaire Web a été créé pour permettre la saisie de nouvelles données de TRT collectées auprès de bureaux d'études. Ce formulaire a été intégré à l'application DIALOG qui est l'application BRGM de saisie et de représentation des données techniques (coupe technique, coupe géologique, venues d'eau, TRT...).

Figure 17 : Interface de saisie des tests de réponse thermique.

Pour simplifier la mise en place de cette interface utilisateur, l'outil JHipster a été utilisé pour la génération des classes Java de la couche de services.

La partie Front reprend les composants Web et la charte graphique de l'outil DIALOG développé en ANGULAR.

Les champs de saisie disponibles pour l'utilisateur sont les suivants :

Contexte :

Libellé	Type/format
Prestataire	Input text
BE géothermique	Input text
Date du rapport	Input text / (JJ/MM/AAA)
Lien P.M.B	Href
Données du TRT diffusées	Booléen

Paramètres du terrain :

Libellé	Type/format
Valeur moyenne de la capacité calorifique volumique (MJ / (m3.K))	Input text
Incertitude calorifique volumique moyenne (MJ / (m3.K))	double
Estimation de la capacité calorifique volumique	Input text
Détail lithologique	Input text
Profondeur de (m)	Input text
Profondeur à (m)	Input text

Paramètres du test :

Libellé	Type/format
Identifiant TRT	auto
Méthode	Input text
Type de sonde	Input text
date et heure de début	Input text/calendar
date et heure de fin	Input text/calendar
durée	Input text
Température initiale moyenne du terrain	Input text
Incertitude	Input text
Débit – test	Input text
Puissance th. injectée totale (W)	Input text
Puissance th. linéaire (W/min)	Input text
Alimentation électrique	Input text
Fluide caloporteur	Input text
Remarques / incidents	Input text

Résultats du test :

Libellé	Type/format
Conductivité thermique (W/m.K)	Input text
Incertitude	Input text
Résistance de la sonde (W/m.K)	Input text
Incertitude	Input text

1.2.4. Portail de diffusion des données de TRT

Les données sont visualisables sur <http://www.geothermie-perspectives.fr/cartographie> (cf. Figure 18 et Figure 19). L'utilisateur peut interroger chaque point et accéder aux informations suivantes :

- numéro du TRT ;
- équipement de la sonde ;
- profondeur de la sonde (m) ;
- durée du test (h) ;
- température initiale moyenne du terrain traversé (°C) ;
- estimation de la conductivité thermique moyenne du terrain traversé (W/(K.m)) ;
- estimation de la résistance thermique moyenne de la sonde ((K.m)/W) ;
- estimation de la capacité calorifique volumique (MJ/(K.m³)) ;
- géologie dominante.

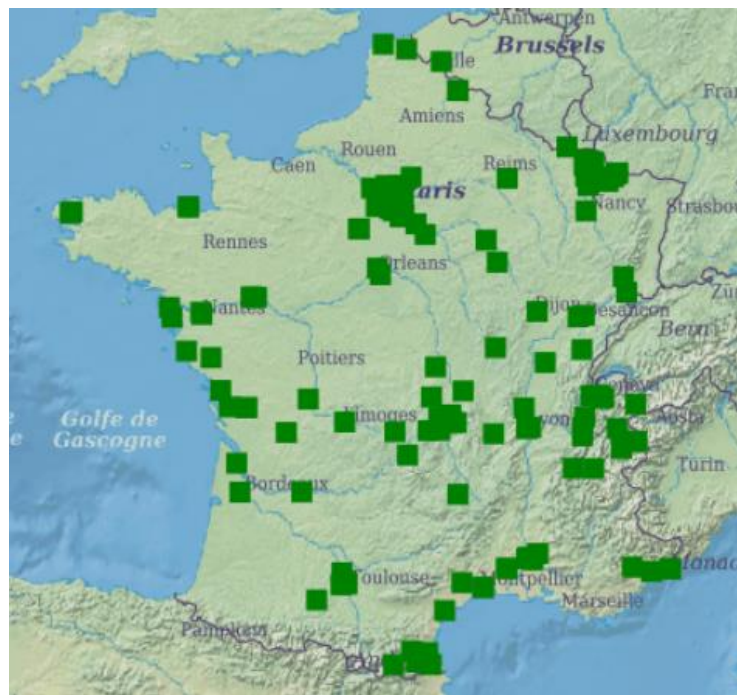


Figure 18 : Localisation des TRT restitués.

Résultats de l'interrogation

▼ Tests de Réponse Thermique

Tests de Réponse Thermique Flux GML

Numéro du TRT	Equipement de la sonde	Profondeur de la sonde (m)	Durée du test (h)	Température initiale moyenne du terrain traversé (°C)	Estimation de la conductivité thermique moyenne du terrain traversé (W/(K.m))	Estimation de la résistance thermique moyenne de la sonde ((K.m)/W)	Estimation de la capacité calorifique volumique (MJ/(K.m ³))
169	Double U	150	72	14.6	1.8	0.1	2.44

Figure 19 : Interrogation d'un point : données-clés du test.

2. Méthode d'estimation du potentiel sur sondes géothermiques verticales

Un précédent rapport a montré la grande hétérogénéité des méthodes employées pour l'estimation du potentiel des sondes géothermiques verticales (Martin *et al.*, 2017). La température initiale du terrain T_0 n'est pas prise en compte, bien que ce paramètre ait un rôle prépondérant sur l'évolution de la température du fluide caloporteur dans la sonde. Ainsi, il est apparu nécessaire de développer une méthode de cartographie du potentiel énergétique prenant en compte la température des terrains, la typologie du besoin thermique ainsi que les contraintes réglementaires s'appliquant à la température de fluide caloporteur.

2.1. DONNÉES DISPONIBLES

Des cartes de conductivité thermique ont été réalisées par le BRGM dans les régions Centre-Val de Loire (CVL) (Martin et Petit, 2017), Poitou-Charentes (POC) (Thinon-Larminach *et al.*, 2018) et Limousin (Compère *et al.*, 2018). La méthode développée est appliquée aux régions CVL et POC pour lesquelles on dispose des modèles de conductivité thermique pour les tranches de profondeur 0 à 50 m, 0 à 100 m, 0 à 200 m (cf. Figure 21). Les mailles des cartes en POC et CVL sont respectivement de 50 m et 500 m. Pour chaque tranche, la température initiale du milieu est estimée à l'aide du méta-modèle (éq. (1)) (cf. Figure 22).

Les cartes de température et conductivité du 0-100 m ont été comparées à 10 TRT bancarisés dans la base de données REPRESS (6 en CVL, 4 en POC) dont la profondeur est comprise entre 85 m et 115 m. L'écart sur T_0 est au maximum de 1,35 °C, avec un écart-type de 0,88 °C (cf. Figure 23). L'écart-type sur λ_m de 0,97 W.K⁻¹.m⁻¹ (cf. Figure 21), avec un écart sur λ_m maximum de 2,11 W.K⁻¹.m⁻¹. En moyenne, les conductivités estimées sont inférieures de 0,20 W.K⁻¹.m⁻¹ aux valeurs mesurées. À noter qu'un TRT à Orléans affichait une conductivité apparente de 36 W.K⁻¹.m⁻¹, ce qui au vu de la courbe d'évolution de la température de fluide peut s'expliquer par un écoulement souterrain significatif. Ce point a été exclu de l'analyse.

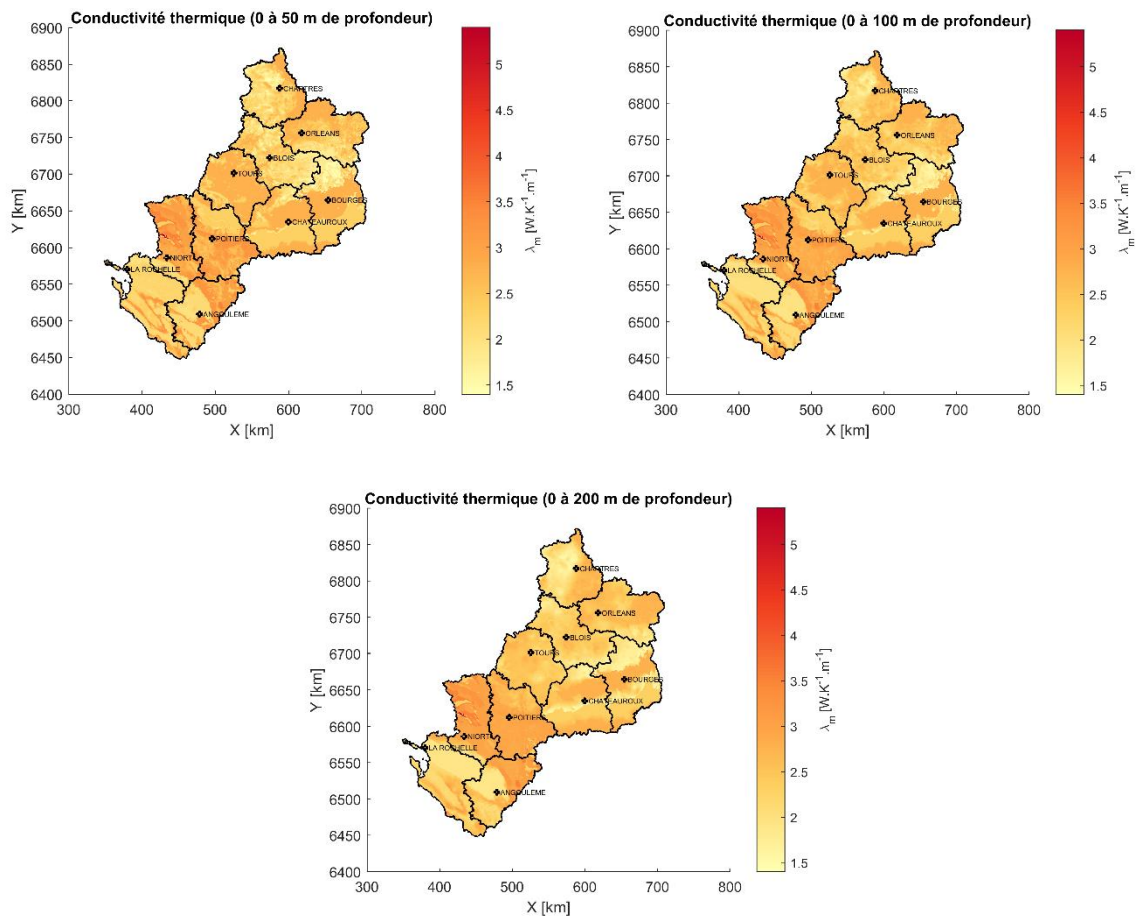


Figure 20 : Conductivité thermique par profondeur en régions CVL et POC.

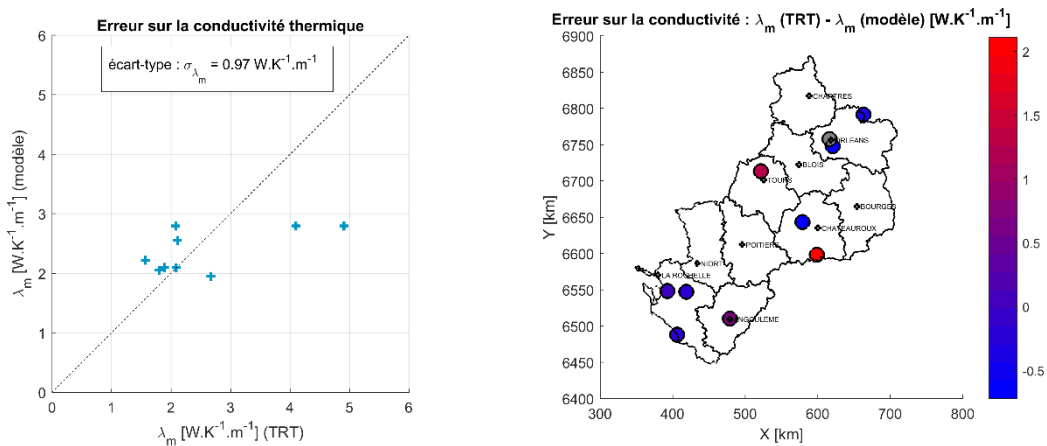


Figure 21 : Conductivité thermique : TRT vs. modèle ($H = 100$ m) pour les régions CVL et POC.

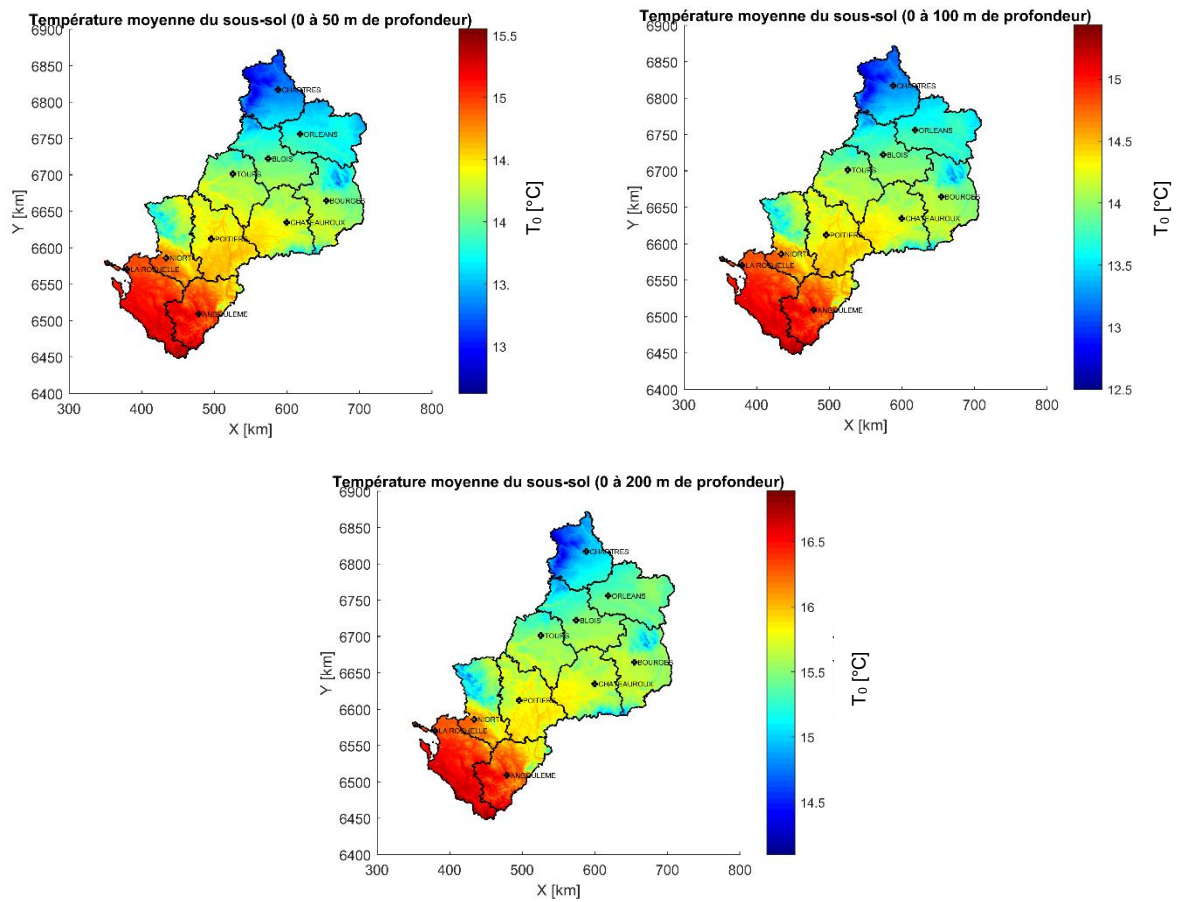


Figure 22 : Température moyenne du sous-sol dans les régions CVL et POC.

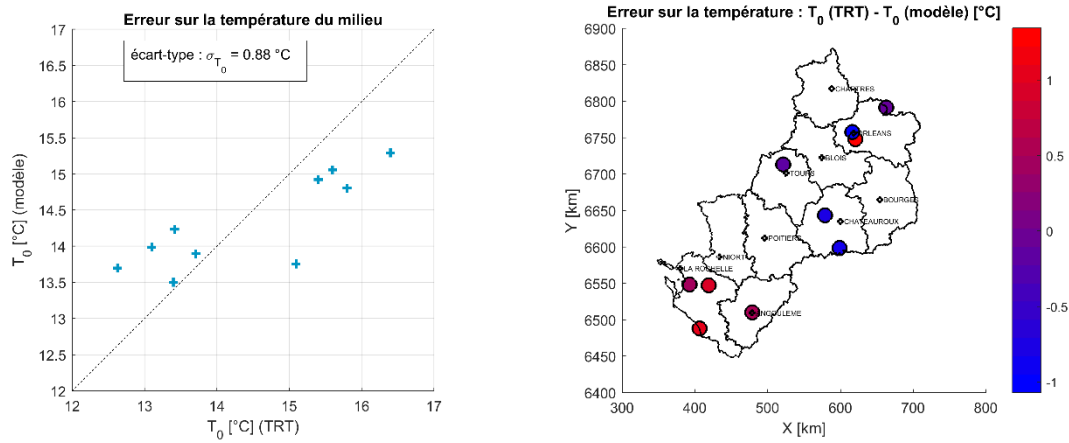


Figure 23 : Température moyenne du sous-sol : TRT vs. modèle ($H = 100$ m) dans les régions CVL et POC.

2.2. ÉTAT DE L'ART : LA MÉTHODE G.POT

La méthode G.POT a été développée par Casasso et Sethi de l'École Polytechnique de Turin (POLITO) pour estimer le potentiel géothermique des sondes en chauffage (Casasso and Sethi, 2016). La méthode G.POT considère que le forage est une ligne de longueur infinie, sur laquelle est appliquée une puissance cyclique. Cette puissance induit un changement de température du forage et du fluide, qui varie dans le temps. Lorsque la puissance prélevée est maximale, une différence de température du fluide maximale est atteinte (négative en cas de chauffage du bâtiment, positive en cas de rafraîchissement). La différence entre la température initiale du sol T_0 et une limite de température du fluide T_{lim} détermine la charge thermique (potentiel géothermique) qui peut être échangée de manière durable par une sonde d'une longueur donnée L .

La quantité de chaud E_{SGV} [MWh/an] extractible d'une sonde géothermique est estimée comme suit :

$$E_{SGV} [MWh/an] = \frac{a \cdot (T_0 - T_{lim}) \cdot \lambda_m \cdot H \cdot t'_c}{-0.619 t'_c \cdot \log(u'_s) + (0.532 t'_c - 0.962) \cdot \log(u'_c) - 0.455 t'_c - 1.619 + 4\pi\lambda \cdot R_f} \quad (5)$$

Avec :

$$\begin{aligned} u'_c &= \frac{r^2}{4\alpha t_c} \\ u'_s &= \frac{r^2}{4\alpha t_s} \\ t'_c &= \frac{t_c}{t_y} \end{aligned} \quad (6)$$

- $a = 7.01 \times 10^{-2}$;
- T_0 : la température initiale du terrain moyennée sur la hauteur de la sonde [°C] ;
- T_{lim} : la température minimale acceptable du fluide, moyennée entre entrée et sortie de la sonde [°C], ici prise égale à $-1,5 \text{ °C}^1$;
- H : la longueur du forage [m] (50 m, 100 m, 200 m) ;
- λ_m : la conductivité thermique du terrain traversée [$\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$], estimée par un modèle géologique ;
- R_f : la résistance thermique de la sonde [K.m.W^{-1}], ici prise égale à $0,08 \text{ K.m.W}^{-1}$;
- r : rayon du forage [m], pris égal à 7,0 cm ;
- t_c : durée de la saison de chauffe [an] ;
- t_s : durée de fonctionnement de l'installation [an], ici 50 ans.

La méthode G.POT suppose que le besoin thermique est une fonction harmonique (cosinus) pendant la durée de la saison de chauffe t_c . L'estimation de ce paramètre peut être faussée dans le cas fréquent où la dynamique de sollicitation de la sonde est plus complexe.

¹ En considérant un écart de température de 3 °C à l'évaporateur de la pompe à chaleur, $T_{lim} = -1,5 \text{ °C}$ correspond à une température d'entrée de sonde de 0 °C et une sortie de - 3 °C. Ce critère s'inscrit dans le régime déclaratif de la géothermie de minime importance (GMI) qui fixe une température d'entrée de sonde minimale de - 3 °C.

En se basant sur les fichiers normatifs RT2012 de température de l'air, on peut estimer une courbe de besoin thermique par zone réglementaire (cf. Figure 24). La région CVL chevauche les zones H1a, H1b et H2b et t_c est de l'ordre de 6 600 h.

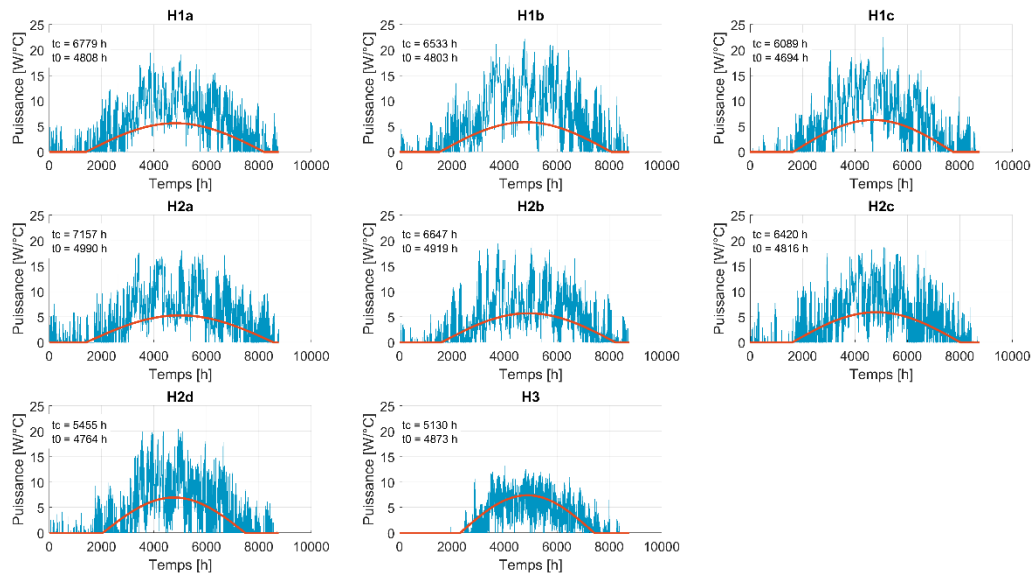


Figure 24 : Méthode G.POT : estimation du paramètre t_c par saison de chauffe par zone climatique réglementaire. $t = 0$ correspond au 1^{er} juillet. La puissance est estimée pour une température de non-chauffage de 16 °C.

Pour une sonde profonde de 100 m, la quantité de chaleur estimée par la méthode G.POT est comprise entre 9,8 et 17,5 MWh.an⁻¹ (cf. Figure 25).

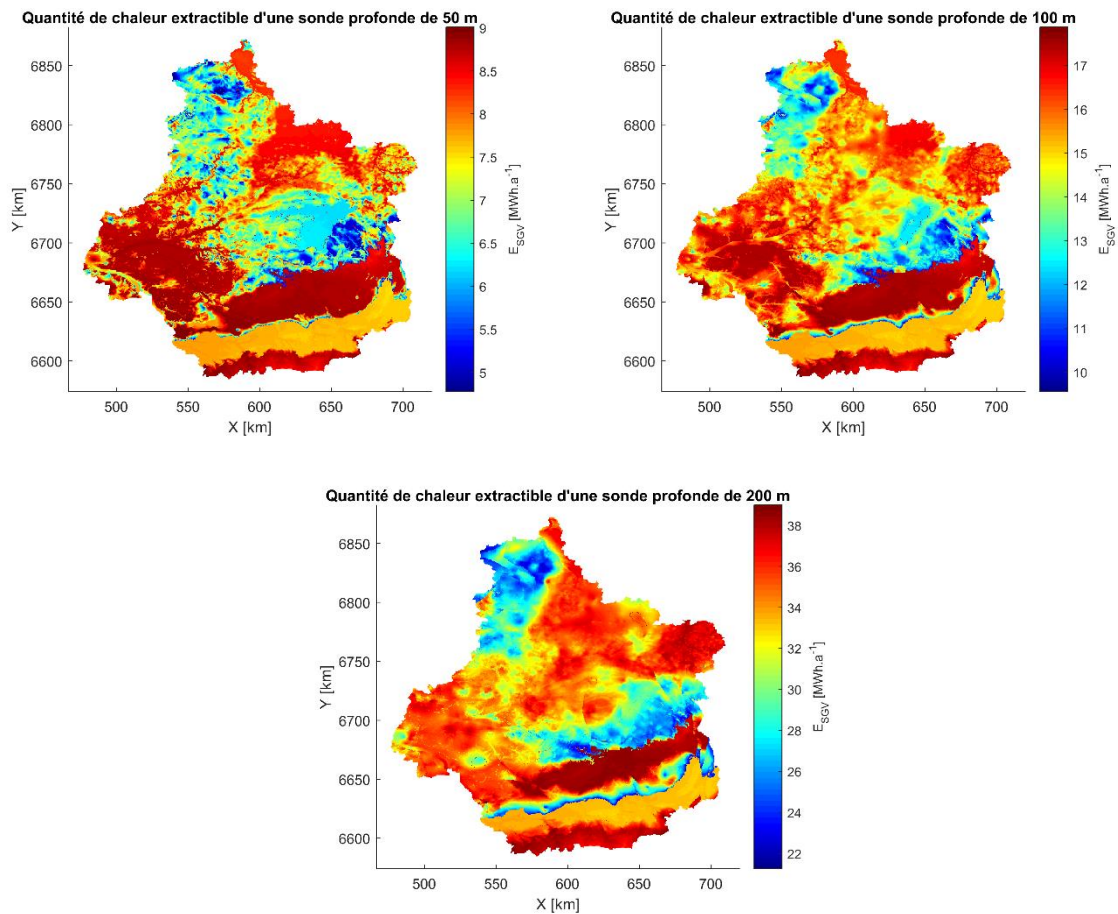


Figure 25 : Application de la méthode G.POT à la région Centre-Val de Loire.

2.3. DEVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE

Une nouvelle méthode est développée pour estimer la quantité de chaleur que l'on peut extraire d'une sonde raccordée à une pompe à chaleur pour la fourniture de chauffage en prenant en compte la dynamique de sollicitation de cette sonde. Cette méthode vise à calculer l'énergie de manière à ce que la température moyenne du liquide reste supérieure à une limite de $T_{fl,min}$.

Lors du fonctionnement de la pompe à chaleur, l'évolution de la température moyenne entrée/sortie du liquide caloporteur peut être calculée par :

$$T_{fl}(t) = T_0 + p_{fr}(t) * \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{g_{SLF}(t)}{\lambda_m} + R_f \right) \quad (7)$$

Avec :

- $p_{fr}(t)$: puissance frigorifique prélevée sur le terrain par la pompe à chaleur divisée par la profondeur du forage [$W.m^{-1}$] ($p_{fr} < 0$) ;
- T_0 : température initiale du terrain [$^{\circ}C$] ;
- λ_m : conductivité thermique du terrain traversée [$W.K^{-1}.m^{-1}$] ;
- R_f : résistance thermique de la sonde [$K.m.W^{-1}$] ;
- * : produit de convolution ;
- $g_{SLF}(t)$: fonction caractéristique qui assimile le forage à une ligne de longueur finie émettant de la chaleur dans un milieu homogène (Eskilson, 1987).

On peut calculer numériquement puis tabuler un facteur caractéristique f [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$] tel que :

$$T_{fl}(t) = T_0 + \overline{p_{fr}} \times \underbrace{p_{fr}^*(t) * \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{g_{SLI}(t)}{\lambda_m} + R_f \right)}_{= f} \quad (8)$$

Où $\overline{p_{fr}}$ est la puissance moyenne annuelle extraite par mètre de forage [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$] et $p_{fr}^*(t)$ une normalisation de $p_{fr}(t)$ telle que $\int^{1\text{an}} p_{fr}^*(t) dt = 1$.

Pour chaque zone réglementaire, le facteur f est calculé à partir des courbes de puissance appelée représentées en Figure 24. Ces puissances sont calculées au pas de temps horaire pour une température de non-chauffage de 16 °C. Les durées équivalentes, i.e. le rapport entre l'énergie prélevée sur une année et la puissance maximale prélevée, sont données en Tableau 3.

Zone climatique	Durée équivalente de fonctionnement à plein charge t_{eq} (h)
H1a	2292
H1b	2234
H1c	1913
H2a	2347
H2b	1880
H2c	2040
H2d	1708
H3	1813

Tableau 3 : Durée équivalente par zone climatique.

Un plan d'expérience pour l'évaluation de f est généré à l'aide de la fonction `coordexch` de Matlab® pour des valeurs de profondeur, conductivité, capacité calorifique du terrain, rayon du forage et résistance de sonde données en Tableau 4. Puis pour chaque point généré l'évolution de la température est calculée sur 10 ans (éq. (7)). On déduit alors le facteur f à l'aide de l'équation (8). Pour chaque zone climatique, on établit une régression (ou « méta-modèle ») sur le facteur f de la forme :

$$f = \sum_{k=1}^K a_k \prod_{i=1}^8 (X_i^{*M_{k,i}}) \quad (9)$$

Où les paramètres sont classés dans un vecteur $\{X\}$. X_i^* représente la valeur normalisée du paramètre X_i :

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{i,min}}{X_{i,max} - X_{i,min}} \quad (10)$$

La matrice M porte les exposants : par exemple une ligne $[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ correspond au terme linéaire en H . Les coefficients M_k et a_k à utiliser pour chaque zone climatique sont donnés en annexe. Les coefficients a_k sont ajustés à l'aide de la fonction `fitlm` de Matlab®. Les méta-modèles permettent alors de reproduire fidèlement les résultats du modèle direct avec des coefficients R de l'ordre de 99 % (cf. Figure 26).

	Numéro de la variable	X_{min}	X_{max}
Profondeur H	1	50 m	200 m
Conductivité thermique λ_m	2	1,0 W.K ⁻¹ .m ⁻¹	6,0 W.K ⁻¹ .m ⁻¹
Capacité calorifique du terrain	3	1,5 MJ.K ⁻¹ .m ⁻³	3,0 MJ.K ⁻¹ .m ⁻³
Rayon du forage	4	6 cm	10 cm
Résistance thermique de la sonde	5	0,06 K.m ⁻¹ .W ⁻¹	0,12 K.m ⁻¹ .W ⁻¹

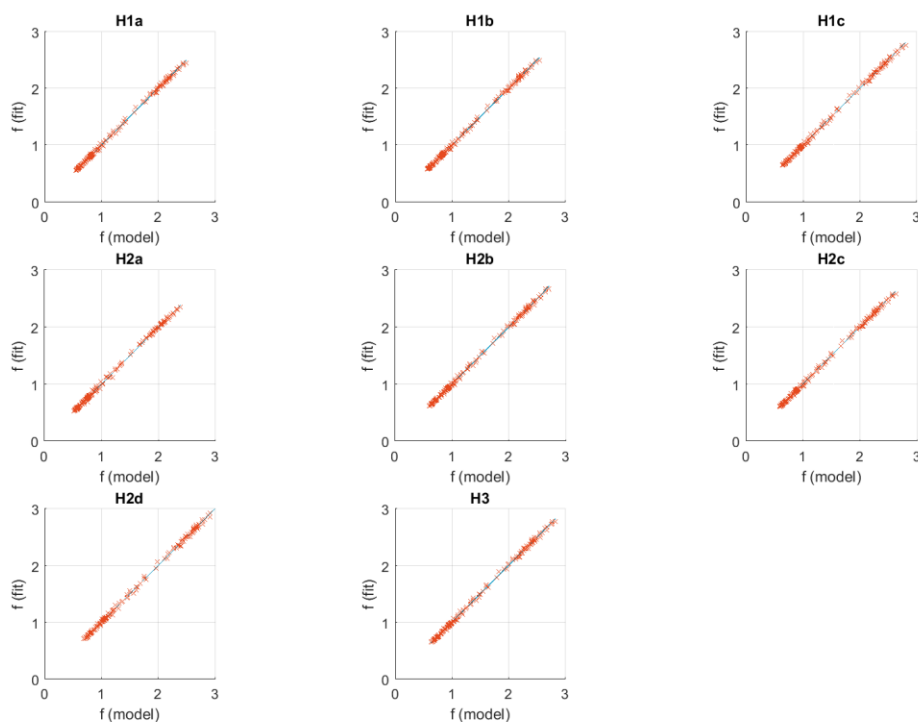
Tableau 4 : Bornes des paramètres pour l'échantillonnage.

Une fois le facteur f estimé, en appliquant l'équation (8) on a :

$$T_{fl}(t) = T_0 + \overline{p_{fr}} \times f \quad (11)$$

Soit la quantité de chaleur extractible de la sonde (avec $t_y = 1$ an) :

$$E = \overline{p_{fr}} H t_y = \frac{T_0 - T_{fl,lim}}{f} H t_y \quad (12)$$

Figure 26 : Facteur f [K.W⁻¹] par zone climatique : régression (fit) vs modèle.

2.4. APPLICATION AUX RÉGIONS CENTRE-VAL-DE-LOIRE ET POITOU-CHARENTES

La méthode REPRESS a été appliquée avec les valeurs communes à la méthode G.POT (cf. p 30). La classification par zone climatique est donnée en Figure 27. La quantité de chaleur extraite pour les trois tranches de profondeur sont visualisables en Figure 28 à Figure 30. En région CVL, l'énergie évaluée par la méthode G.POT est supérieure de l'ordre de 30 à 55 % à l'estimation par la méthode REPRESS (cf. Figure 31). Cela s'explique par le fait que G.POT simplifie la dynamique de la demande en omettant les pointes de consommations et ne prend donc pas en compte les baisses de température sur ces pointes. Ramenée au linéaire forcée, l'énergie extractible se répartit entre 70 et 150 kWh.ml⁻¹.an⁻¹, en fonction de la profondeur et plus encore de la localisation (cf. Figure 32).

On a estimé la fiabilité de la méthode en recalculant une température minimale de fluide aux localisation des TRT. La température minimale du fluide est alors calculée à l'aide de l'équation (11) en prenant l'énergie déterminée sur la base des évaluations cartographiques de conductivité et température, mais en utilisant les données in situ de conductivité et température pour l'évaluation de f . La température minimale de fluide peut alors être jusqu'à 4,3 °C inférieure ou 3,8 °C supérieure à la température de dimensionnement, à savoir - 1,5 °C (cf. Figure 33).

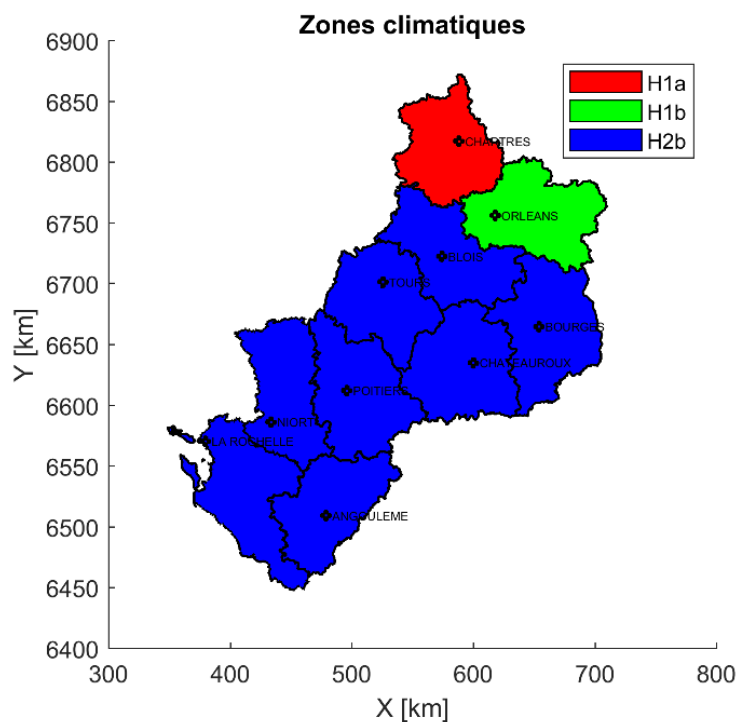


Figure 27 : Zones climatiques sur la zone d'étude.

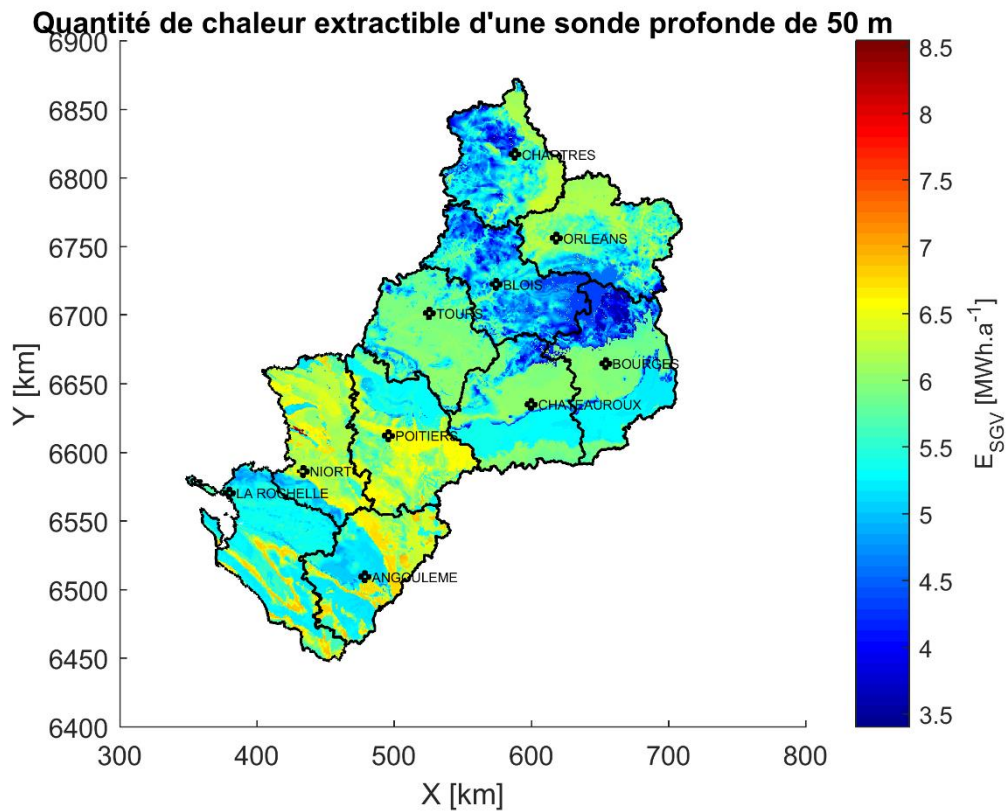


Figure 28 : Carte de l'énergie extractible d'une sonde profonde de 50 m.

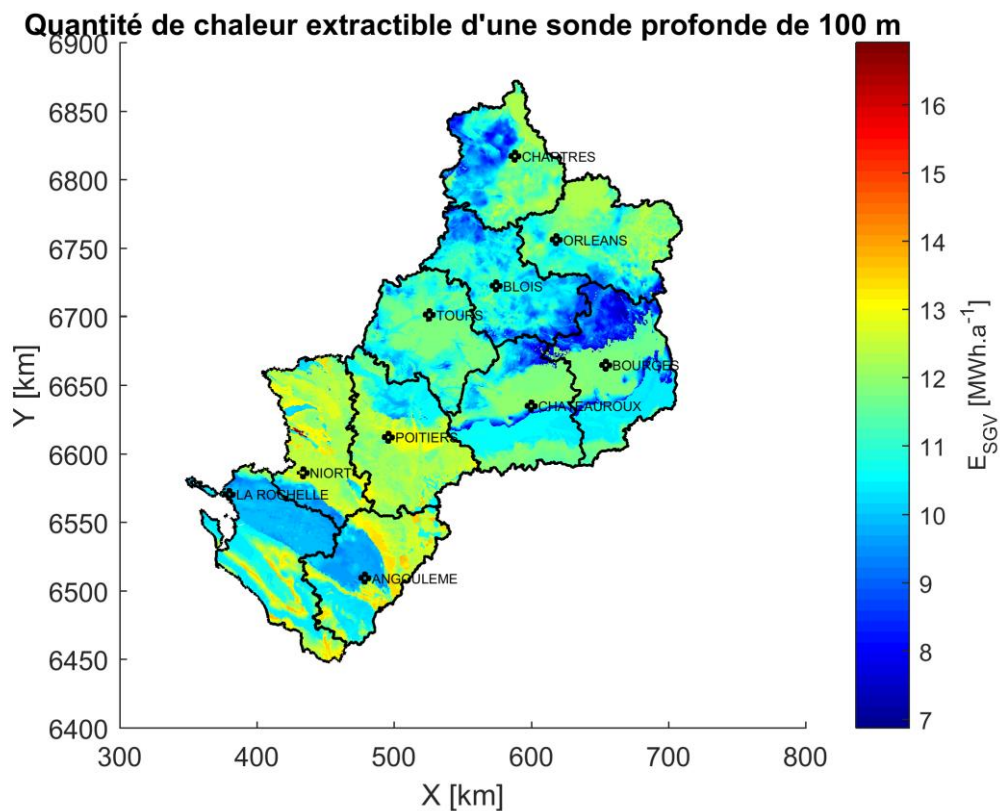


Figure 29 : Carte de l'énergie extractible d'une sonde profonde de 100 m.

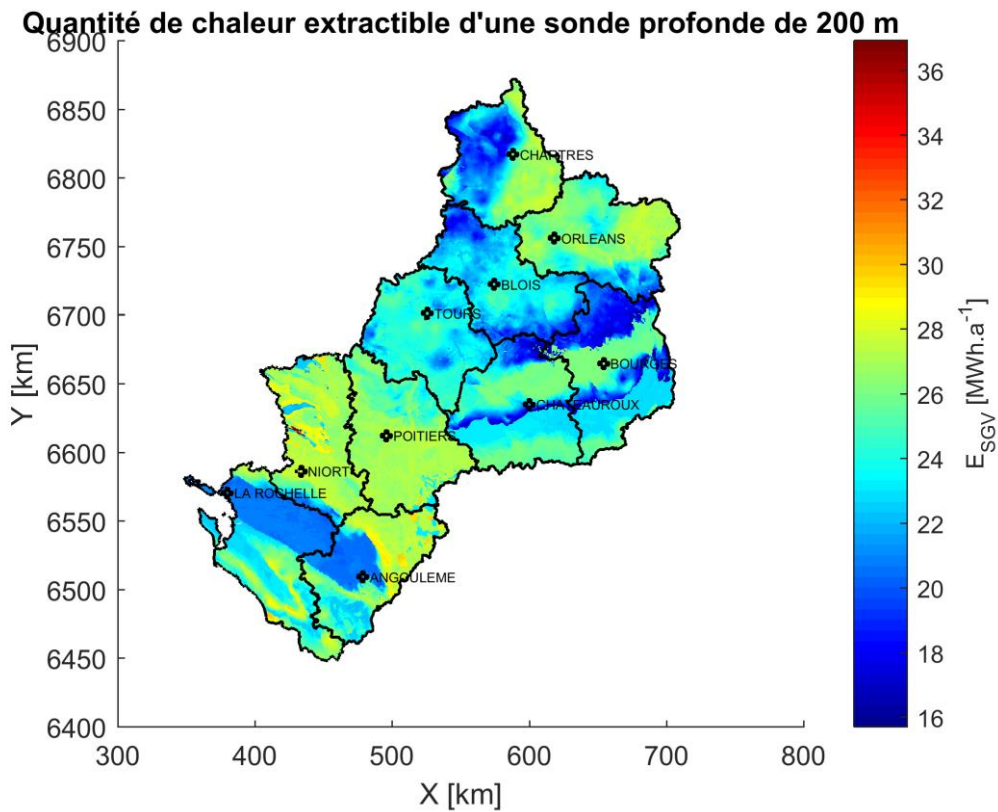


Figure 30 : Carte de l'énergie extractible d'une sonde profonde de 200 m.

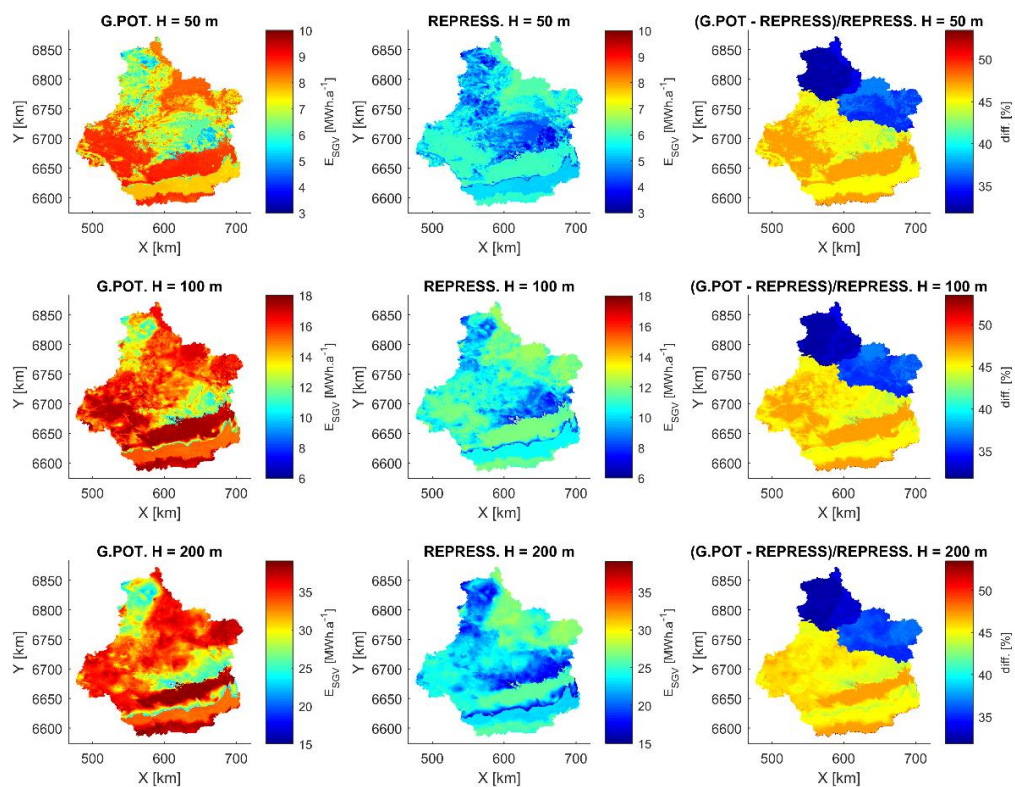


Figure 31 : Comparaison des méthodes G.POT et REPRESS en région Centre-Val de Loire.

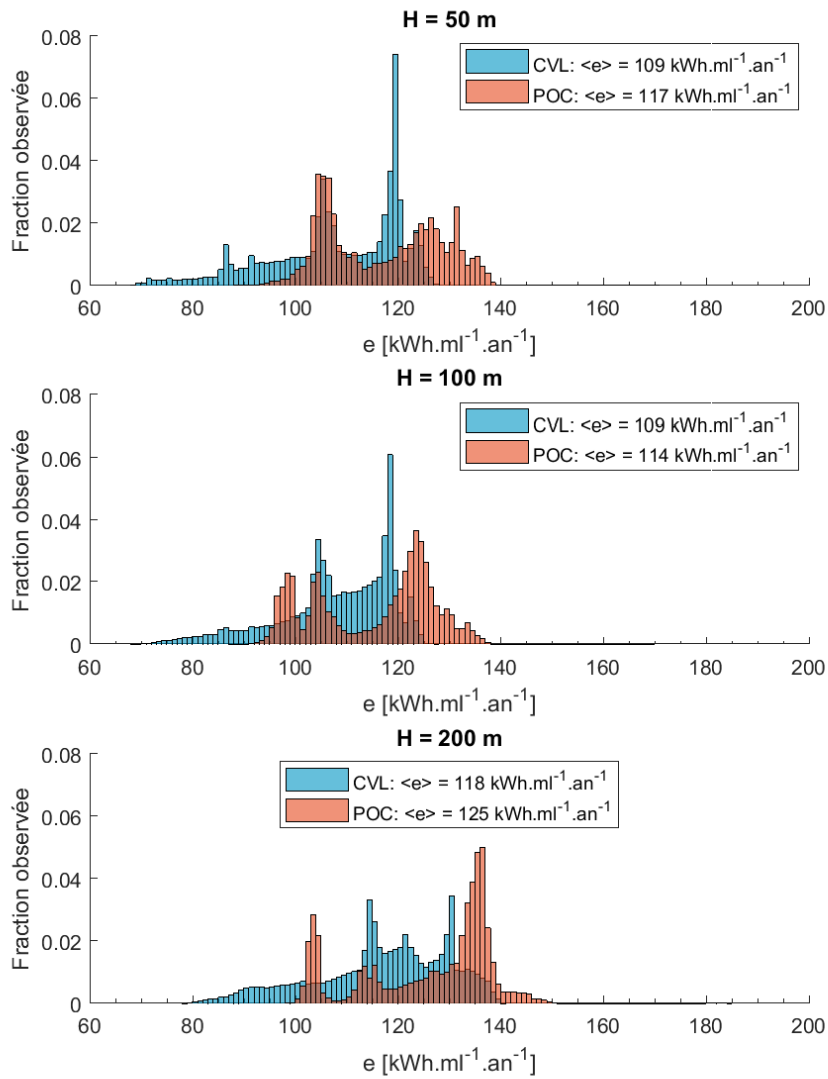


Figure 32 : Distribution de l'énergie extractible.

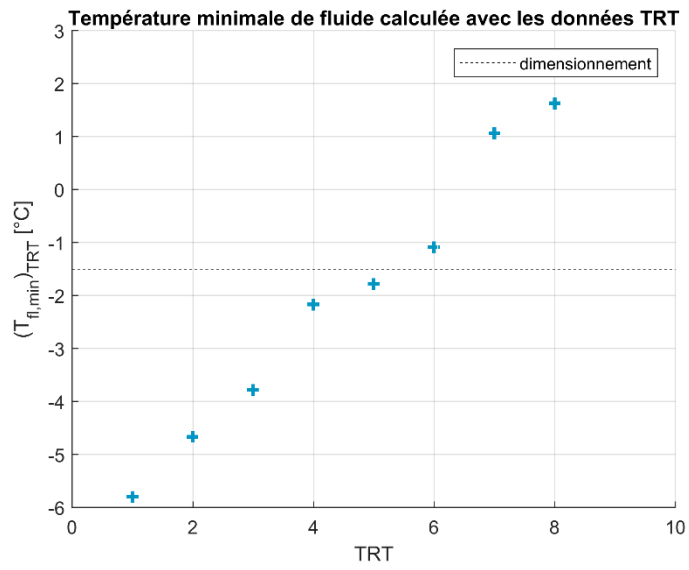


Figure 33 : Température minimale de fluide calculée avec les données TRT sur la base d'un dimensionnement avec les données cartographiques.

3. Conclusion

Au total, 192 rapports de TRT ont été dépouillés, bancarisés et diffusés. Une régression a pu être établie pour le calcul de la température initiale du terrain en fonction des coordonnées, de l'altitude de la tête de sonde et de la profondeur de la sonde. Les valeurs de conductivité thermique proposées par la norme suisse SIA-384/6 sont cohérentes avec les valeurs mesurées sur un échantillon de 64 TRT, en particulier pour le calcaire, la marne et le granite. À terme, une nomenclature de conductivité dans le référentiel lithologique national DIALOG pourra être établie.

L'estimation du potentiel énergétique des sondes en Centre-Val de Loire et Poitou-Charentes montre que l'énergie extractible peut varier d'un facteur 2 en fonction de la localisation. L'utilisation de ces données en lieu et place des résultats d'un TRT peut conduire à une erreur d'appréciation de la température minimale de liquide caloporteur de l'ordre 4 °C au maximum (échantillon de 10 TRT). Ainsi, les cartes énergétiques et les cartes de température et conductivité sous-jacentes ne remplacent pas l'exécution d'un TRT pour les projets de grande envergure. La méthode d'estimation pourra être appliquée à d'autres secteurs géographiques, en particulier le Haut-Rhin et le Bas-Rhin pour lesquels une cartographie du potentiel géothermique est en cours. Les cartes produites en Centre-Val de Loire et Poitou-Charentes seront à terme disponibles dans l'espace cartographique réorganisé du site internet géothermie-perspectives.

4. Bibliographie

Casasso A. and Sethi R. (2016) - G.POT: A quantitative method for the assessment and mapping of the shallow geothermal potential. *Energy* 106, 765–773. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.091>.

Compère F., Thinon-Larminach M., Leconte S. et al. (2018) - Évaluation du potentiel géothermique très basse énergie en région Limousin. <https://doi.org/BRGM/RP-68117-FR>.

Eskilson P. (1987) - Thermal analysis of heat extraction boreholes. University of Lund, Sweden.

Martin J.-C., Baudouin V., Maragna C. (2017) - Étude d'une méthode nationale d'évaluation du potentiel géothermique sur sonde géothermique verticale de la tranche 0-200 m de profondeur. <https://doi.org/BRGM/RP-67086-FR>.

Martin J.-C. et Petit V. (2017) - Mise à jour de l'Atlas des ressources géothermiques sur nappe et carte du potentiel géothermique sur sonde. Région Centre-Val de Loire. <https://doi.org/BRGM/RP-66591-FR>.

Sutton M.G., Nutter D.W., Couvillion R.J. (2003) - A Ground Resistance for Vertical Bore Heat Exchangers With Groundwater Flow. *J. Energy Resour. Technol.* 125, 183. <https://doi.org/10.1115/1.1591203>.

Thinon-Larminach M., Compère F., Abasq L. (2018) - Atlas régional des ressources géothermales très basse énergie de Poitou-Charentes. <https://doi.org/BRGM/RP-67694-FR>.

Annexe 1

Modèles de température par zone climatique

Zone climatique H1a

Exposants M				Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	a_k
0	0	0	0	22.973
0	0	0	1	-0.056914
1	0	0	0	-0.03731
1	1	0	0	9.4811e-05
1	0	1	0	0.00023861
0	0	1	1	0.00023723
0	0	2	0	-0.00027613
0	0	0	2	6.7814e-05
0	1	0	0	-0.032525
0	1	0	1	0.00011211
0	0	1	0	-0.12941
1	0	0	1	6.5449e-05
2	0	0	0	6.893e-05

Zone climatique H2a

Exposants M				Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	a_k
0	0	0	0	36.277
0	1	0	0	-0.20452
1	0	0	0	-0.024432
0	0	0	1	-0.070285
0	0	1	0	0.01843
0	2	0	0	0.00082413
0	0	0	2	0.00011712
1	0	0	1	4.2621e-05
2	0	0	0	-5.3312e-06
0	0	1	1	-6.0442e-05
0	0	2	0	3.1296e-05

Zone climatique H1c

Exposants M				Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	a_k
0	0	0	0	15.702
1	0	0	0	-0.004619
0	1	0	0	-0.0087442
0	0	2	0	-4.8851e-05
0	0	1	0	-0.0020013
1	0	1	0	1.4833e-05
0	2	0	0	0.00011692
0	1	0	1	-9.2187e-06
2	0	0	0	-1.6245e-06
0	0	1	1	7.4642e-06

Zone climatique H2b

Exposants M				Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	a_k
0	0	0	0	1.5516
0	1	0	0	0.009824
0	0	0	1	0.010195
1	0	0	0	0.091955
1	0	1	0	0.00032733
0	0	0	2	5.3923e-05
1	0	0	1	-0.00017147
0	0	1	0	-0.071486
2	0	0	0	-0.00018123
0	0	2	0	-9.898e-05
1	1	0	0	6.8881e-05
0	0	1	1	5.3846e-05

Annexe 2.

Méta-modèle du facteur f par zone climatique

Zone climatique H1a

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.2293
0	1	0	0	0	-6.4041
0	2	0	0	0	12.612
0	0	0	0	1	0.2247
0	0	0	1	0	-0.2992
0	3	0	0	0	-12.38
0	1	0	1	0	0.61502
0	0	1	0	0	-0.16947
0	1	1	0	0	0.15149
0	4	0	0	0	4.5786
0	2	0	1	0	-0.36915

Zone climatique H1b

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.2654
0	1	0	0	0	-6.4571
0	2	0	0	0	12.696
0	0	0	0	1	0.23391
0	0	0	1	0	-0.30932
0	3	0	0	0	-12.46
0	1	0	1	0	0.63427
0	0	1	0	0	-0.17599
0	1	1	0	0	0.15697
0	4	0	0	0	4.6086
0	2	0	1	0	-0.38043

Zone climatique H1c

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.4894
0	1	0	0	0	-6.9277
0	2	0	0	0	13.504
0	0	0	0	1	0.27413
0	0	0	1	0	-0.35713
0	3	0	0	0	-13.205
0	1	0	1	0	0.73032
0	0	1	0	0	-0.20515
0	1	1	0	0	0.18245
0	4	0	0	0	4.8774
0	2	0	1	0	-0.43782

Zone climatique H2a

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.1067
0	1	0	0	0	-6.0558
0	2	0	0	0	12.245
0	0	0	0	1	0.21164
0	0	0	1	0	-0.25518
0	3	0	0	0	-12.315
0	1	0	1	0	0.22468
0	0	1	0	0	-0.15643
0	1	1	0	0	0.139
0	4	0	0	0	4.5967
1	0	0	0	0	0.034237

Zone climatique H2b

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.3889
0	1	0	0	0	-6.5748
0	2	0	0	0	12.55
0	0	0	0	1	0.2691
0	0	0	1	0	-0.33352
0	3	0	0	0	-12.055
0	1	0	1	0	0.676
0	0	1	0	0	-0.19521
0	1	1	0	0	0.17327
0	4	0	0	0	4.4056
0	2	0	1	0	-0.40718

Zone climatique H2c

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.34
0	1	0	0	0	-6.6231
0	2	0	0	0	13.056
0	0	0	0	1	0.25098
0	0	0	1	0	-0.32548
0	3	0	0	0	-12.84
0	1	0	1	0	0.6599
0	0	1	0	0	-0.18583
0	1	1	0	0	0.16451
0	4	0	0	0	4.7566
0	2	0	1	0	-0.39433

Zone climatique H2d

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.7307
0	1	0	0	0	-7.6719
0	2	0	0	0	15.069
0	0	0	0	1	0.29655
0	0	0	1	0	-0.37995
0	3	0	0	0	-14.796
0	1	0	1	0	0.76856
0	0	1	0	0	-0.21899
0	1	1	0	0	0.19268
0	4	0	0	0	5.4799
0	2	0	1	0	-0.45992

Zone climatique H3

Exposants M					Coefficient
$M_{k,1}$	$M_{k,2}$	$M_{k,3}$	$M_{k,4}$	$M_{k,5}$	a_k
0	0	0	0	0	2.5046
0	1	0	0	0	-7.0168
0	2	0	0	0	13.722
0	0	0	0	1	0.27437
0	0	0	1	0	-0.35367
0	3	0	0	0	-13.448
0	1	0	1	0	0.72387
0	0	1	0	0	-0.20296
0	1	1	0	0	0.17931
0	4	0	0	0	4.9798
0	2	0	1	0	-0.43605



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources
3, avenue Claude Guillemin
BP 36009 - 45060 Orléans cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr