



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

Rapport final

**BRGM/RP-73607-FR**

14 janvier 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

**Bader, A.G., Maragna, C., Baptiste, J., Baudouin V., Gilardi, N., Mato, C.,  
Grataloup S., Coueffé R., Tran V.H.**

1.89 3740.46 -625.5

*Ce rapport a été vérifié le 18/07/2024 et approuvé le 21/07/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.*

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

## Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctg> ou par ce code :



**Mots clés :** Géothermie de surface ; sondes géothermiques verticales, conductivité thermique

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

**Bader, A.G., Maragna, C., Baptiste, J., Baudouin V., Gilardi, N., Mato, C., Grataloup S., Coueffé R., Tran V.H.**  
2025. Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale. Rapport final V2. BRGM/RP-73607-FR, 44 p.

© BRGM, 2025, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-08/04/2024

## Synthèse

Dans le cadre des missions qui lui sont dévolues par son statut de Service Géologique National et dans le prolongement du plan national géothermie publié en février 2023, le BRGM a mis en place un programme pour établir, sur l'ensemble du territoire métropolitain, une cartographie de favorabilité du sous-sol pour la mise en œuvre de sondes géothermiques verticales.

Pour ce faire, les équipes du BRGM ont mis en place une méthode d'évaluation de la conductivité thermique moyenne des terrains en se basant sur :

- Les données de Test de Réponse Thermique (TRT) disponibles à date, soit 752 TRT.
- Les informations de lithologie du sous-sol issues de la base de données des logs géologiques validés (LGV). Pour les besoins du projet, celle-ci a été complétée par la saisie des informations lithologiques de près de 600 forages.
- Les informations de la carte lithologique de la France métropolitaine au 1/50000.
- Les informations de la carte d'épaisseur de la zone non saturée.

Ces différentes données ont servi de données de base à la construction de modèles permettant de calculer par 2 méthodes différentes les valeurs de Conductivité Thermique (CT) sur le Massif armoricain, le Massif central et les Vosges d'une part et sur l'ensemble des bassins sédimentaires d'autre part.

Associées aux cartes de températures du sous-sol, ces cartes de CT ont permis d'établir des cartes de favorabilité du sous-sol pour le déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale pour un usage de chauffage uniquement.

Le résultat de ce travail est disponible à la consultation ainsi qu'en téléchargement (sous forme de web services) sur le site [www.geothermies.fr](http://www.geothermies.fr).

Le travail continu du BRGM de collecte et bancarisation de nouvelles données comme les TRT ou la validation de logs géologiques doit permettre une évolution régulière de ces cartes, à priori à pas de temps annuel, dont nous présentons ici une première version.



## Sommaire

1. Contexte.....	7
2. Méthodologie.....	8
2.1. Approche choisie.....	8
3. Mise à jour de la connaissance de la conductivité thermique.....	11
3.1. Création d'une table de valeurs guides.....	12
3.2. Estimation de la Conductivité Thermique des terrains pour les domaines de socle	13
3.2.1. Généralités sur les altérites de socle.....	13
3.2.2. Identification des horizons meubles.....	15
3.2.3. Calcul de la conductivité thermique des terrains.....	19
3.3. Estimation de la Conductivité Thermique des terrains pour les bassins sédimentaires .....	19
4. Résultats .....	24
5. Conclusions.....	31

## Liste des figures

Figure 1 : Estimation de la valeur moyenne de ESGV et de l'intervalle de confiance à 95% par propagation de l'incertitude sur les 5 variables d'entrée. ....	9
Figure 2 - Schéma des workflows suivis pour le projet (ici pour une sonde de profondeur 100m). 3 actions ont été menées en parallèle : la création d'une table de « valeurs guides » de CT (cadre jaune), l'évaluation de la CT moyenne dans les bassins sédimentaires (cadre bleu) ainsi que sur les massifs cristallins (cadre gris). Ces 3 actions sont le préalable à l'élaboration des cartes de température et de CT, elles-mêmes combinées afin d'établir une cartographie de la chaleur extractible à l'échelle nationale. ....	12
Figure 3 : Définition des différents horizons d'un profil d'altération type (modifié d'après Thierry et al., 2019) .....	14
Figure 4 : Exemple de carte issues d'un Modèle Numérique de Terrain à 25 m : A) carte des pentes (°), B) Carte de la courbure (m <sup>-1</sup> ), C) Carte de la rugosité (m) et D) Carte de la dénivelée (m).....	16
Figure 5 : Exemple de diagrammes de fréquence normalisée pour les trois paramètres (pente, rugosité et courbure) réalisés à partir des valeurs des roches granitiques et diagrammes de degré d'appartenance correspondant pour réaliser le test de logique floue. ....	17
Figure 6 : Extrait de la carte géologique harmonisée pour le département des Côtes d'Armor (22) : A) Carte harmonisée originale, aucune formation d'altération n'est cartographiée. B) Identification prédictive des horizons H5 et H4c .....	18
Figure 7 : Schéma explicatif de la méthode employée pour déterminer l'épaisseur des altérites meubles. Le trait en pointillé représente le plan d'un polygone d'altérite en coupe .....	19
Figure 8 – Carte résultant du calcul des conductivités thermiques pour les massifs cristallins .....	19

Figure 9 - Carte de répartition des 16 000 forages validés de plus de 100m de profondeur en 2023 (à gauche). En 2024, près de 550 forages ont été saisis et ajoutés au set de données du projet dans la région Occitanie et dans le Jura (en rose dans la figure de droite). Fond de carte : carte géologique de la France à l'échelle du millionième, 6e édition révisée, BRGM .20

Figure 10 – Grille d'épaisseur de la zone non saturée. Adapté de (Allier et al., 2018) .....21

Figure 11 – Illustration de la méthodologie de calcul de la CT moyenne à 100m pour un log validé (profondeur exprimée en m et CT en  $W.m^{-1}K^{-1}$ ). .....22

Figure 12 – Carte résultante des conductivités thermiques moyennées à 100 m dans les zones sédimentaires. Les données ponctuelles représentent les valeurs de CT issues des TRT à 100m +/- 10% (données prises en compte pour le calcul du modèle de variogramme de la carte). .....23

Figure 13 : Histogramme de la distribution de la quantité de chaleur extractible par mètre de forage pour chaque profondeur. La ligne verticale rouge indique la valeur médiane.....24

Figure 14 : Cartes de température initiale pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m. ....25

Figure 15 : Cartes d'intervalle de confiance à 95% sur la température initiale pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m.....26

Figure 16 : Cartes de conductivité thermique pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m. ....27

Figure 17 : Cartes d'intervalle de confiance à 95% sur la conductivité thermique pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m.....28

Figure 18 : Quantité de chaleur  $e_{SGV}$  [kWh/(m.an)] par mètre de forage pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m.....29

Figure 19 : Cartes d'intervalle de confiance à 95% sur la quantité de chaleur  $e_{SGV}$  [kWh/(m.an)] par mètre de forage pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m.....30

## Liste des annexes

Bibliographie .....33

ANNEXE 1 – Table des valeurs guides utilisées.....35

# 1. Contexte

La géothermie « de surface » exploite la stabilité de la température du proche sous-sol, les variations saisonnières de température étant négligeables au-delà de 10 m de profondeur, ce qui est négligeable devant la profondeur des échangeurs géothermiques (typiquement jusqu'à 200 m pour les Sondes Géothermiques Verticales – SGV). La géothermie de surface est aussi bien destinée à de l'habitat individuel, qu'à de petits immeubles à usage tertiaire ou d'habitation, voire des quartiers entiers si elle est intégrée dans une boucle d'eau tempérée. Utilisable sur plus de 95 % du territoire, elle est valorisée par une pompe à chaleur (dite géothermique) qui permet d'alimenter les émetteurs de chaud et de froid présents dans les bâtiments.

La production de chaleur par pompe à chaleur géothermique présente de nombreux atouts pour contribuer à la réussite de la transition énergétique : production de chauffage, de rafraîchissement et d'eau chaude sanitaire avec un seul système, absence de nuisances sonores et visuelles, très faibles émissions de CO<sub>2</sub>, absence d'émissions de particules fines, disponibilité continue de la ressource et excellente efficacité énergétique. En France, le marché reste cependant très peu développé dans le secteur du logement individuel. Plusieurs facteurs contribuent à expliquer ce constat : un coût d'investissement élevé, une mauvaise visibilité de la filière par des bureaux d'études et des installateurs qui privilégient presque systématiquement d'autres alternatives techniques, l'absence d'offre intégrée, un nombre insuffisant de foreurs...

A ces éléments, vient s'ajouter une connaissance insuffisante du potentiel intrinsèque sur l'ensemble du territoire. Ceci a un double effet pénalisant : ne pas porter à la connaissance de tous un système alternatif et ne pas permettre une optimisation du dimensionnement du système de sondes qui peut, dans les zones les plus favorables, permettre une réduction de la profondeur des forages et de fait une réduction de l'investissement.

Dans le cadre des missions qui lui sont dévolues par son statut de Service Géologique National et dans le prolongement du plan national géothermie publié en février 2023, le BRGM a mis en place un programme pour construire, sur l'ensemble du territoire métropolitain, une cartographie de favorabilité du sous-sol pour la mise en œuvre d'une sonde géothermique verticale sur 4 profondeurs de sondes : 50 m, 100 m, 150 m et 200 m.

Pour ce faire, il a été décidé d'établir des cartes nationales de conductivités thermiques du sous-sol pour ces 4 profondeurs. Ces valeurs de conductivités thermiques calculées sont complétées d'une incertitude dépendant notamment de la proximité de mesures de conductivités thermiques (mesures faites lors de Tests de Réponse Thermique, ou TRT) et de logs géologiques validés, du degré d'hétérogénéité des terrains traversés et de la présence d'aquifères de nature à influencer sur l'efficacité énergétique de la sonde géothermique. Ces cartes de conductivité thermique des terrains sont ensuite combinées avec les cartes de température pour aboutir à un paramètre caractéristique de favorabilité (chaleur extractible par mètre linéaire de sonde géothermique pour un usage de chauffage exclusivement).

Pour aboutir à cette cartographie systématique et prédictive, l'ensemble des données disponibles au BRGM a été valorisée. Dans les cas où des manques d'information se sont avérés critiques, le projet est venu en soutien aux actions de collecte et valorisations déjà en cours pour accélérer le processus.

## 2. Méthodologie

### 2.1. APPROCHE CHOISIE

Les sondes géothermiques verticales exploitent la chaleur diffusée par conduction thermique dans les roches. Casasso et Sethi proposent une équation permettant d'estimer la quantité de chaleur  $E_{SGV}$  [MWh/an] que peut fournir de manière pérenne une sonde géothermique verticale unique (Casasso et Sethi., 2016). Le modèle repose sur les hypothèses suivantes :

- Le sous-sol est homogène,
- Le flux thermique autour de l'axe de la sonde sont purement radiaux, les transferts thermiques dans le sous-sol dans la direction verticale ne sont pas pris en compte,
- La température minimale acceptable du fluide est exactement égale à  $T_{lim}$ ,
- Seules les applications de chauffage sont considérées.

une application de chauffage peut être estimée au moyen de l'expression suivante :

$$E_{SGV} = \frac{7.01 \cdot 10^{-2} \cdot (T_0 - T_{lim}) \cdot \lambda \cdot H \cdot t'_c}{-0.619t'_c \cdot \log(u'_s) + (0.532t'_c - 0.962) \cdot \log(u'_c) - 0.455 t'_c - 1.619 + 4\pi\lambda \cdot R_f} \quad (1)$$

Avec :

- $u'_c = \frac{r^2}{4\alpha t_c}$ ;  $u'_s = \frac{r^2}{4\alpha t_s}$ ;  $t'_c = \frac{t_c}{t_y}$
- $\lambda$  : la conductivité thermique moyenne du terrain traversé [ $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$ ],
- $H$  : la profondeur de la sonde [m],
- $T_0$  : la température initiale du terrain moyennée sur la hauteur de la sonde [ $^{\circ}C$ ],
- $R_f$  : la résistance thermique de la sonde [ $K \cdot m \cdot W^{-1}$ ],
- $r_f$  : le rayon du forage [m],
- $t_c$  : la durée de la saison de chauffe [heures],
- $T_{lim}$  : la température minimale acceptable du fluide, moyennée entre l'entrée et la sortie de la sonde. Elle est ici prise égale à  $-1,5^{\circ}C$ . L'écart de température entre entrée et sortie de l'évaporateur de la pompe à chaleur est considéré égal à  $3^{\circ}C$ . La température moyenne entrée/sortie est strictement égal à  $(-3+0)/2 = -1,5^{\circ}C$ . Cette limite est cohérente avec le cadre réglementaire : pour bénéficier du régime déclaratif simplifié de la Géothermie de Minime Importance (GMI), l'eau glycolée ne doit pas entrer dans la sonde à une température inférieure à  $-3^{\circ}C$  (Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, 2015).
- $t_s$  : durée de vie de l'installation, ici 50 ans.
- $t_y = 8760$  heures (soit une année).

La puissance thermique appliquée  $P(t)$  [W] est cyclique, de période annuelle, avec un profil de la forme suivante :

$$P(t) = \begin{cases} P_{max} \sin\left(\pi \frac{t}{t_c}\right) & \text{si } 0 \leq t \leq t_c \\ 0 & \text{si } t_c \leq t \leq t_y \end{cases} \quad (2)$$

L'énergie annuelle est  $E_{SGV}$  est reliée à  $P_{max}$  par :

$$P_{max} = \frac{\pi E_{SGV}}{2 t_c} \quad (3)$$

La quantité de chaleur  $E_{SGV}$  (éq. (1)) est retenue comme indicateur de favorabilité. L'ensemble du traitement est réalisé par un programme informatique écrit dans le logiciel MATLAB.

Pour effectuer ce traitement, la France a été discrétisée selon un maillage de 500 m x 500 m correspondant au maillage de la carte règlementaire GMI. Pour chaque maille de la grille, on estime  $E_{SGV}$ , mais également une « incertitude » associée à ce résultat. Pour cela, on associe une distribution statistique aux 5 variables d'entrée :  $\lambda$ ,  $T_0$ ,  $R_f$ ,  $r_f$ ,  $t_c$ . En l'occurrence, on choisit comme loi de probabilité la loi normale (ou gaussienne ou « courbe en cloche ») caractérisée par une moyenne  $\mu$  et un écart-type  $\sigma$ <sup>1</sup>. En chaque point  $(x,y)$ , on réalise un grand nombre (ici 1000) tirages aléatoires des 5 variables d'entrées et on estime à chaque fois la valeur de  $E_{SGV}$  correspondante. On voit ainsi apparaître la distribution de probabilité de  $E_{SGV}$ , dont on détermine la valeur moyenne et l'intervalle de confiance à 95% (cf. Figure 1).

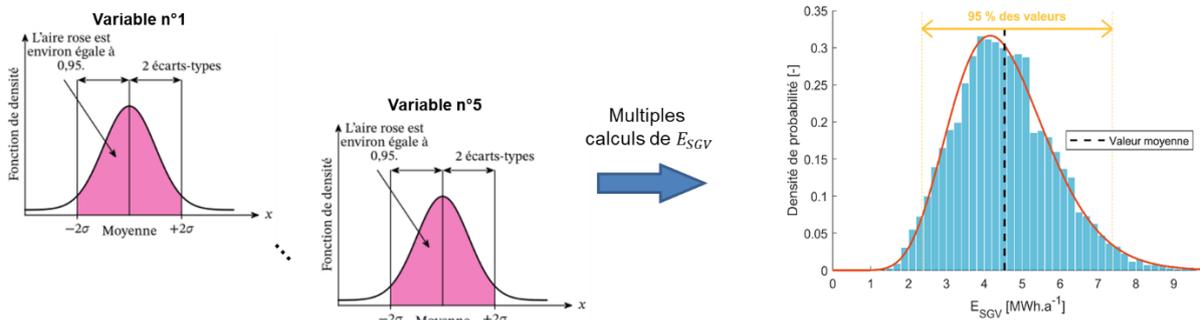


Figure 1 : Estimation de la valeur moyenne de  $E_{SGV}$  et de l'intervalle de confiance à 95% par propagation de l'incertitude sur les 5 variables d'entrée.

Depuis 2017 le BRGM collecte, analyse, diffuse et bancarise les rapports de Tests de Réponse Thermique (TRT) avec le soutien financier de l'ADEME dans le cadre du projet récurrent CARTODIM (Maragna *et al.*, 2023, 2022, 2021, 2020, 2019). Pour rappel, le TRT est une procédure standardisée permettant d'estimer *in situ* les paramètres  $\lambda$ ,  $T_0$  et  $R_f$  sur une sonde géothermique verticale (Cahier des charges pour la réalisation d'un Test de Réponse Thermique (TRT), 2020). L'ADEME exige sa réalisation dans le cadre du Fonds Chaleur dès que la longueur cumulée des sondes atteint 1000 m, mais ces TRT ne concernent pas les installations pour la maison individuelle (où la longueur forée est plutôt de l'ordre de 50 à 200 m). En avril 2024, 752 TRT étaient bancarisés.

Un traitement de ces 752 TRT conduit à retenir les valeurs de moyenne et d'écart type suivantes :  $\mu = 0,105 \text{ K.m.W}^{-1}$  et  $\sigma = 0,022 \text{ K.m.W}^{-1}$  pour la résistance de forage  $R_f$  et  $\mu = 8 \text{ cm}$

<sup>1</sup> Pour une variable aléatoire suivant une loi normale de moyenne  $\mu$  et d'écart-type  $\sigma$ , l'intervalle de confiance à 95% (c'est-à-dire contenant 95% des réalisations de la variable) est  $\approx 1,96 \sigma$ .

et  $\sigma = 1$  cm pour le rayon de forage  $r_f$ . L'estimation de la durée de la saison de chauffe  $t_c$  est plus complexe du fait de la multiplicité de facteurs intervenant dans  $t_c$  : rigueur du climat, mais aussi isolation et orientation du bâtiment, etc. En première approche, on retient  $\mu = 5000$  h et  $\sigma = 1500$  h, s'agissant bien de la durée de la saison de chauffe et non du nombre d'heures de fonctionnement à pleine puissance de la pompe à chaleur. La construction de  $\lambda$  (conductivité thermique) et de l'incertitude associée est exposée dans les §3.2 et 3.3.

Enfin, en ce qui concerne la température initiale  $T_0$ , on utilise une interpolation de  $T_0$  construite dans le cadre du projet récurrent ADEME-BRGM CARTODIM (Maragna *et al.*, 2023) (cf. aussi Figure 14 : Cartes de température initiale pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m. Figure 14 p25).  $T_0$  dépend de la profondeur de la sonde ainsi que des coordonnées et de l'altitude de la tête de forage. Le krigeage considère qu'en chaque point du territoire métropolitain,  $T_0$  suit une loi normale dont la moyenne  $\mu$  et l'écart-type  $\sigma$  ont été calés (ou « conditionnés ») sur les 752 observations.

### 3. Mise à jour de la connaissance de la conductivité thermique

L'estimation d'une valeur de Conductivité Thermique (CT)  $\lambda$  et la construction d'une carte nationale associée à un paramètre d'incertitude constituent les étapes les plus complexes du projet. Pour aboutir à cette cartographie prédictive, l'ensemble des données disponibles au BRGM a été valorisé :

- les 752 mesures de conductivité thermique ponctuelles issues des Tests de Réponse Thermique (TRT). Ces mesures ont été valorisées en y ajoutant une information de lithologie (validation des forages) ce qui a permis de déterminer des valeurs de conductivité thermique pour les lithologies les plus représentatives (dites « valeurs guides »). Ces TRT nous permettent également de calculer les cartes de température du sous-sol. Enfin, ils sont utilisés pour construire le modèle permettant l'interpolation de la conductivité thermique dans les bassins sédimentaires,
- les valeurs moyennes de conductivité thermique par lithologie (valeurs guides obtenues par inversion sur les résultats des TRT ou issues de la bibliographie),
- les données géologiques et lithologiques du territoire français (cartographie lithologique de la France métropolitaine au 1/50 000) ainsi que celles disponibles en forages, issues des « logs géologiques validés » produits par le projet LOGISO, notamment à partir des données de la Banque du sous-sol (Hanot et Janjou, 2001). Combinées avec les valeurs guides, ces informations lithologiques permettent l'établissement de cartes de conductivité thermique des terrains.

Afin d'obtenir une estimation de la conductivité thermique des terrains sur l'ensemble du territoire, nous avons adopté 2 approches différentes selon l'environnement géologique :

- Pour les domaines dits « de socle » (Massif armoricain, Massif central et Vosges), nous nous sommes appuyés sur la carte lithologique de la France métropolitaine au 1/50 000 associée à un modèle d'altération (calcul de la nature et de l'épaisseur de l'altération en fonction de la lithologie du substratum et d'un modèle numérique de terrain). L'ensemble de la méthodologie est détaillé dans le §3.2.
- Pour les domaines sédimentaires, nous avons exploité l'existence du codage lithologique des « logs validés », ce qui permet d'intégrer la variabilité verticale des lithologies sur une colonne de terrain correspondant à la profondeur des sondes considérées (50m, 100m, 150m et 200m). Cette méthodologie est détaillée dans le §3.3.

Schématiquement, les différentes données utilisées, et l'enchaînement des calculs pour obtenir les cartes de conductivité thermique, de température et de chaleur extractible sont présentés sur la Figure 2.

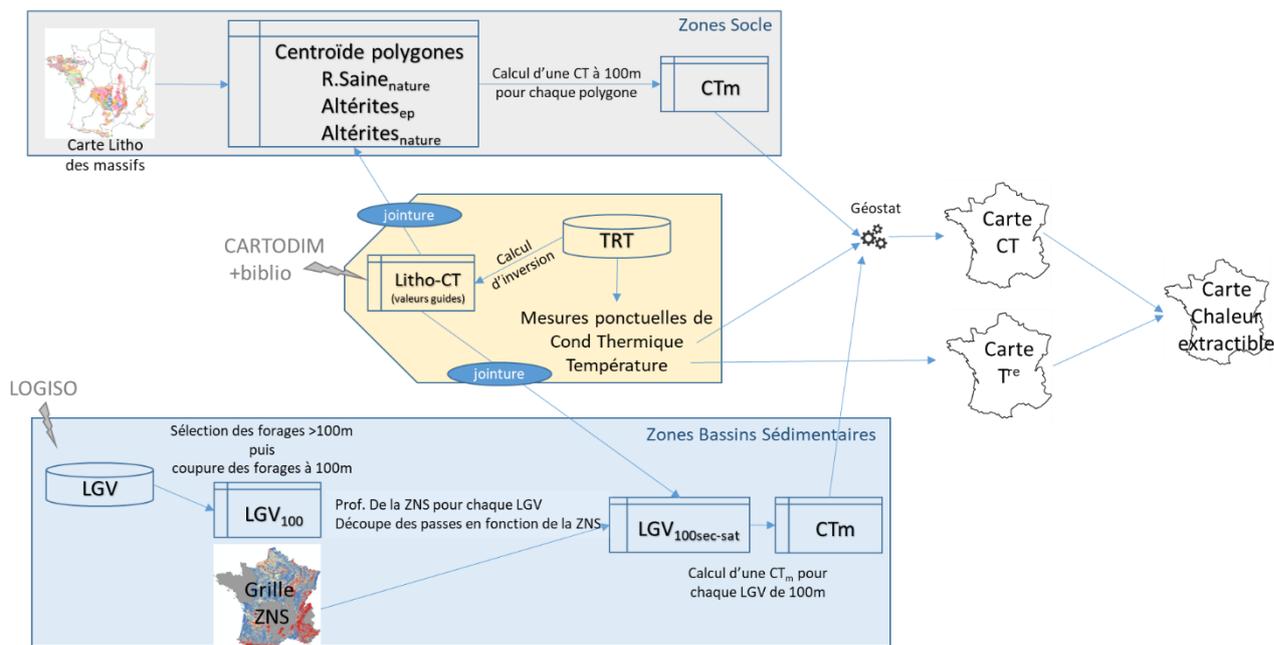


Figure 2 - Schéma des workflows suivis pour le projet (ici pour une sonde de profondeur 100m). 3 actions ont été menées en parallèle : la création d'une table de « valeurs guides » de CT (cadre jaune), l'évaluation de la CT moyenne dans les bassins sédimentaires (cadre bleu) ainsi que sur les massifs cristallins (cadre gris). Ces 3 actions sont le préalable à l'élaboration des cartes de température et de CT, elles-mêmes combinées afin d'établir une cartographie de la chaleur extractible à l'échelle nationale.

### 3.1. CREATION D'UNE TABLE DE VALEURS GUIDES

La première étape de la démarche consiste à se doter d'un « codage » de la conductivité thermique représentative (CT) pour les différentes lithologies rencontrées sur le territoire français (table « litho-CT » dans le cadre jaune sur la Figure 2).

Une étude bibliographique a permis de constituer une première base de données des CT attribuées, dans différents contextes pour différentes lithologies.

Le travail de codage lithologique des TRT bancarisés a également permis, au cours du projet, un calcul d'inversion permettant d'attribuer une valeur de CT pour les principales lithologies rencontrées dans les 752 forages de TRT bancarisés et valorisés. Seules les lithologies majeures (rencontrées sur plus de 100m cumulés dans l'ensemble des TRT analysés) ont fait l'objet de ce calcul d'inversion. La méthodologie utilisée est décrite dans le rapport CARTODIM (Maragna et al., 2022) et appliquée sur les principales lithologies rencontrées dans les 752 TRT bancarisés en avril 2024. Cette « inversion » consiste à trouver, pour chaque catégorie de lithologie, la valeur de CT permettant de reproduire au mieux les valeurs de conductivité thermique mesurées sur l'ensemble des TRT bancarisés.

Ce double travail (l'inversion des propriétés thermiques mesurées dans les TRT plus la recherche de valeurs guides en bibliographie) a permis d'attribuer une valeur de CT à 47 lithologies. Or, plus de 140 lithologies différentes ont été rencontrées lors de l'analyse

combinée des logs validés et de la carte lithologique au 1/50 000. Il a donc été nécessaire d'attribuer des valeurs de CT à une centaine de lithologies en se basant soit sur une proximité de la chimie de ces roches avec des roches ayant une valeur guide, soit sur une proximité des propriétés physiques.

L'Annexe 1 liste l'ensemble des lithologies rencontrées lors de cette étude ainsi que les valeurs de conductivité thermique (sur roche sèche et sur roche saturée lorsque les informations existent) issues des « valeurs guides » associées en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ , un indice de confiance de cette association (A, B ou C) et la référence de la valeur guide (bibliographie ou inversion des résultats des TRT). Cette table constitue la base des calculs de conductivité thermique en domaine de socle ainsi qu'en zone de bassin sédimentaire.

Il est néanmoins important de noter que cette étape d'attribution d'une valeur guide par lithologie est à la fois « simpliste » et interprétative et constitue une forte source d'incertitude. En effet, les lithologies elles-mêmes sont très simplifiées. Un exemple typique, la lithologie « calcaire » correspond à tous les types de calcaires possibles tant en texture (compact, fissuré, oolithique...) qu'en composition (plus ou moins argileux jusqu'à la définition d'une marne, plus ou moins sableux, cf. par exemple (Abdulagatova *et al.*, 2009)). Ceci est vrai pour l'ensemble des lithologies rencontrées en forage ou en carte.

Pour cette attribution, nous avons donc privilégié les valeurs guides issues des calculs d'inversion des TRT pour avoir la valeur représentative moyenne observée sur le territoire français. La poursuite du travail de valorisation des TRT forés sur le territoire permettra une évolution de la table litho-CT et une mise à jour des cartes de conductivités thermiques qui en découlent.

### **3.2. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES TERRAINS POUR LES DOMAINES DE SOCLE**

Sur les zones de socle, nous avons considéré que la variabilité lithologique verticale (tranche 0-200 m) des roches ignées était négligeable à l'exception de la zone altérée dont l'épaisseur peut atteindre localement plusieurs dizaines de mètres ce qui a potentiellement un impact non négligeable sur les propriétés thermiques des 100 à 200 premiers mètres de terrain.

En France métropolitaine, la cartographie des altérites en domaine de socle est encore sous-représentée. Lorsque ces altérites sont cartographiées, leur nature ainsi que leurs propriétés physico-chimiques ne sont pas ou peu décrites. L'actualisation de cette connaissance est apparue alors comme primordiale dans le cadre de cette étude.

Actualiser les connaissances par une méthode de cartographie systématique ou par l'analyse des forages est un exercice long et non réalisable dans le cadre de ce projet. Il a donc été choisi d'identifier les altérites par une méthode prédictive afin de déterminer :

- La localisation et l'étendue des zones altérées,
- La nature des altérites meubles en fonction du substratum (roche saine),
- L'épaisseur des altérites meubles.

#### **3.2.1. Généralités sur les altérites de socle**

L'altération d'une roche est « *une modification des propriétés physico-chimiques de la roche par des agents atmosphériques* » (Foucault & Raoult, 2001) et notamment par l'eau. Elle se

traduit par une modification minéralogique de la roche mère ainsi que par l'apparition de fracturation à intervalles plus ou moins réguliers selon le degré d'altération.

Des travaux récents menés par le BRGM (Thiery et al., 2019), ont permis de définir un profil d'altération type compatible avec les différentes problématiques des géosciences (hydrogéologie, chute de blocs, glissement de terrain...) mettant en avant les différents niveaux d'altération des roches allant de la roche saine (H1) à une roche désintégrée et totalement transformée par l'altération (H5) (Figure 3).

Les horizons d'altération H5 et H4c représentés au sommet d'un profil d'altération caractérisent les horizons de roches non consolidées et dont les propriétés mécaniques et thermiques s'éloignent de ceux de la roche-mère. C'est à partir de l'horizon H4b qu'il est considéré que les propriétés thermiques des roches sont proches de celles de la roche saine. Bien que ce profil d'altération type soit applicable à l'ensemble des lithologies, les produits issus de l'altération (horizons H5 et H4c notamment) diffèrent en fonction de la nature de la roche mère. Ainsi, par exemple, le produit d'altération d'un granite est représenté majoritairement par des arènes granitiques alors que le produit d'altération d'un basalte est caractérisé par des argiles.

	<b>H5</b>	roches argileuses/sablo-argileuses/sableuses <i>plus de trace de la roche d'origine</i> <i>Roche décomposée et désintégrée</i>	<b>Allotérite</b>
	<b>H4</b>	<b>c</b>	
		<b>b</b>	blocs rocheux altérés et roche pulvérulente, très nombreuses fissures associées à l'altération supergène <i>&gt; 50% de la roche est décomposée et désintégrée - Présence locale de blocs frais ou friables</i> <i>débris en blocs centimétriques à millimétriques pulvérulent - boules</i>
		<b>a</b>	roche saine et altérée, très nombreuses fissures associées à l'altération supergène <i>&lt; 50% de la roche est décomposée et désintégrée - Décoloration de la roche - Blocs frais et peu friables communs</i> <i>débris en blocs centimétriques</i>
	<b>H3</b>	roche saine et altérée, nombreuses fissures associées à l'altération supergène <i>Décoloration le long des fractures - Roches rarement friables</i> <i>débris en blocs métriques à décimétriques</i>	<b>Isaltérite</b>
	<b>H2</b>	roche saine, peu de fissures associées à l'altération supergène <i>légère décoloration le long des fractures majeures</i> <i>débris en blocs métriques à pulvimétriques</i>	
<b>H1</b>	roche saine <i>Pas de signe visible d'altération</i> <i>roche massive</i>	<b>Horizon sain</b>	

Figure 3 : Définition des différents horizons d'un profil d'altération type (modifié d'après Thiery et al., 2019)

### 3.2.2. Identification des horizons meubles

#### a) Définitions des produits de l'altération

La méthodologie de cartographie prédictive des horizons d'altération est basée sur les contours des formations lithologiques telles qu'elles sont cartographiées au sein des cartes géologiques. Ces lithologies étant nombreuses, un regroupement cohérent et compatible avec la méthodologie a été réalisé. Afin de répondre à la méthodologie employée dans le cadre de ce projet, les lithologies ont été regroupées par type de produit issu de leur altération. Ces regroupements sont indiqués dans le Tableau 1. Trois lithologies principales issues de l'altération ont été identifiées : les arènes / altérites par lessivage, les argiles et les limons.

NIVEAU1	NIVEAU2	NIVEAU3	Produit de l'altération
Roches d'origine hydrothermale	Roches d'origine hydrothermale	Greisen	Arène / altérite par lessivage
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Anorthosites	
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Dioritoïdes	
Roches magmatiques	Roches filoniennes	Filons acides	
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Granitoïdes	
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Syénitoïdes	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques de haute température	Granulite	
Roches métamorphiques	Migmatites	Migmatites	
Roches métamorphiques	Tectonites	Mylonite	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques orthodérivées	Orthogneiss acides	
Roches magmatiques	Roches volcanoclastiques	Brèches volcanoclastiques	Limon
Roches magmatiques	Roches volcanoclastiques	Conglomérat volcanoclastique	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques orthodérivées	Métavolcanite	
Roches magmatiques	Roches volcanoclastiques	Tufs	Argile
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques paradérivées	Gneiss	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques paradérivées	Marbre	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques paradérivées	Métasédiment	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques paradérivées	Micaschistes	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques paradérivées	Schistes	
Roches métamorphiques	Roches de métamorphisme de contact	Cornéenne	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques de haute pression	Eclogite	
Roches magmatiques	Roches filoniennes	Filons basiques	
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Filons basiques	
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Gabbroïdes	
Roches magmatiques	Roches filoniennes	Lamprophyres	
Roches magmatiques	Roches volcaniques	Laves	
Roches magmatiques	Roches volcaniques	Laves basiques	
Roches magmatiques	Roches volcaniques	Laves ultrabasiques	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques orthodérivées	Orthogneiss basiques	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques orthodérivées	Orthogneiss intermédiaires	
Roches métamorphiques	Roches métamorphiques orthodérivées	Orthogneiss ultrabasiques	
Roches d'origine hydrothermale	Roches d'origine hydrothermale	Roche ultrabasique	
Roches magmatiques	Roches plutoniques	Roches ultrabasiques	
Roches magmatiques	Roches volcaniques	Laves intermédiaires	
Roches magmatiques	Roches volcaniques	Laves acides	

Tableau 1 : Liste des produits issus de l'altération pour les différentes lithologies constituant le Massif armoricain, le Massif central et les Vosges. Les lithologies sont extraites des cartes départementales harmonisées à l'échelle 1/50000.

#### b) Méthodologie

L'objectif de la cartographie prédictive est de renseigner les polygones de la carte lithologique au 1/50000 en termes de nature de la roche mère, d'altération ainsi que d'épaisseur, au sein des massifs de socle (Massif armoricain, Massif central et Vosges).

Dans le cadre de ses opérations de recherche, le BRGM a développé une méthodologie de cartographie prédictive du niveau d'altération des roches sur la base d'une analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de ses dérivées (Baptiste et al., 2021 et Figure 4), soit les paramètres suivants :

- A. La pente qui correspond à la variation maximale entre la valeur d'une cellule du MNT et ces huit cellules voisines ;
- B. La courbure qui permet d'identifier la concavité et la convexité morphologique. Une forme concave correspondra plutôt à une vallée alors qu'une forme convexe signifierait plutôt la présence d'une ligne de crête ;
- C. La rugosité qui permet d'identifier les variations locales du relief. Ce paramètre apporte une information sur la texture du paysage ;
- D. La dénivelée qui est la différence entre un niveau de base défini (ici le niveau de base calculé à partir du fond des vallées) et le Modèle Numérique de Terrain (topographie). Ce paramètre permet de calculer le relief d'une zone. Il est utilisé dans le but de supprimer les replats des fonds de vallées ainsi que d'éventuelles terrasses alluviales. Les valeurs employées ne sont pas dépendantes de la roche étudiée mais de la topographie du secteur.

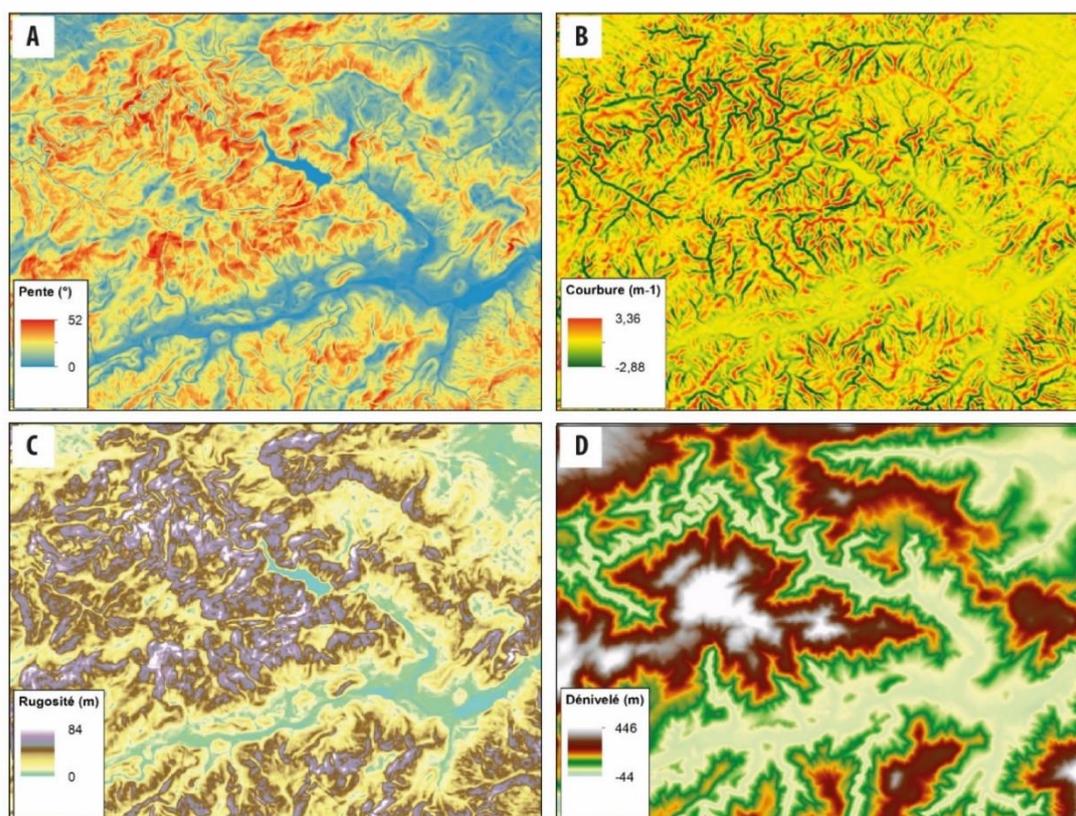


Figure 4 : Exemple de carte issues d'un Modèle Numérique de Terrain à 25 m : A) carte des pentes (°), B) Carte de la courbure ( $m^{-1}$ ), C) Carte de la rugosité (m) et D) Carte de la dénivelée (m).

La résolution du MNT est à adapter en fonction du contexte géomorphologique, de l'anthropisation et du cadre de l'étude. Dans le cadre de cette étude, un MNT au pas de 25 m a été utilisé. Cette résolution semble être le meilleur compromis pour avoir un modèle numérique de terrain homogène sur la zone d'étude et pallier à la résolution des contours de la carte géologique à 1/50 000.

La méthodologie de cartographie prédictive dans le cadre de cette étude se décline en plusieurs étapes :

1. Calcul des paramètres évoqués ci-dessus (Figure 4). Ces paramètres ont été calculés à l'aide d'un logiciel de SIG (Système d'Information Géographique) ;
2. Analyses statistiques des paramètres pour chaque type de roche considéré (Figure 5). Les valeurs de chacun des paramètres ont été agrémentées de valeurs définies dans le cadre de projets de recherche du BRGM (PEPS<sup>2</sup> et RGF<sup>3</sup>) au travers de l'analyse d'observations de terrain réalisées ;
3. Application d'un test de « logique floue ». Cette méthode statistique, utilisée dans le cadre de cartographies morphologiques (Haider et al., 2015) permet de combiner les différents paramètres tout en conservant une marge d'incertitude des valeurs seuils à utiliser pour chaque paramètre afin d'obtenir une classification raisonnable. Afin d'appliquer ce test, les histogrammes doivent être convertis en diagramme de degrés d'appartenance (Figure 5) ;
4. Cartographie prédictive des horizons d'altération sur les lithologies des différents massifs (Figure 6) ;

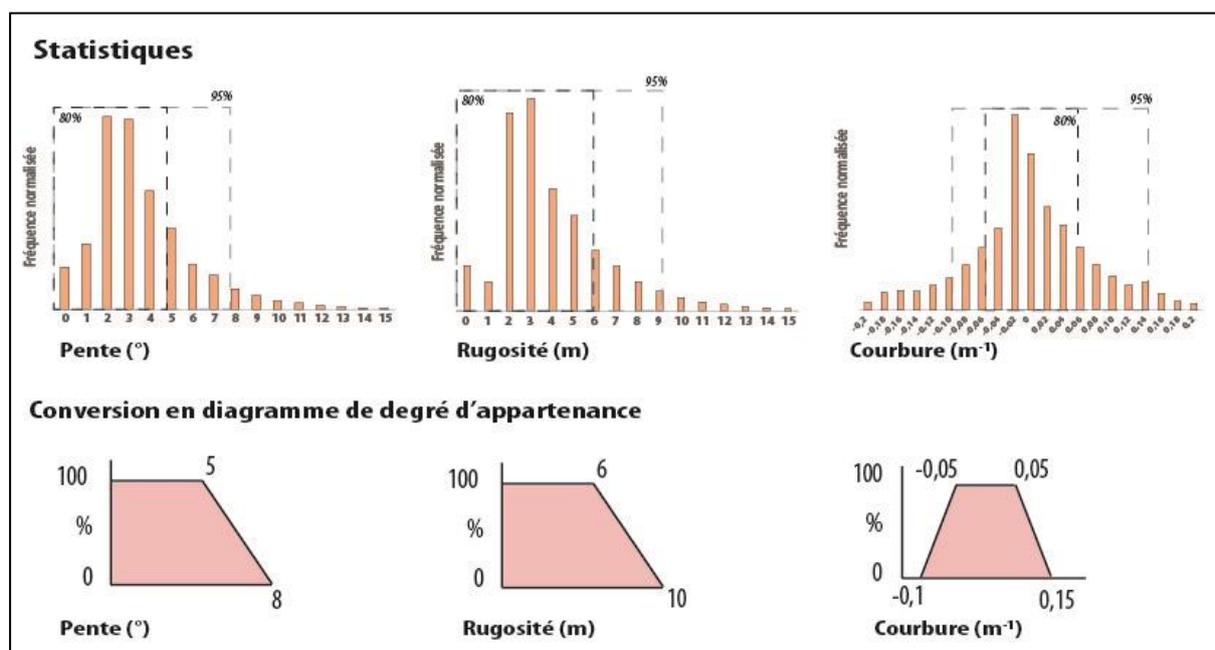


Figure 5 : Exemple de diagrammes de fréquence normalisée pour les trois paramètres (pente, rugosité et courbure) réalisés à partir des valeurs des roches granitiques et diagrammes de degré d'appartenance correspondant pour réaliser le test de logique floue.

Cette méthode de cartographie prédictive permet donc de spatialiser les différents horizons d'altération. Elle a été réalisée pour chaque groupe de lithologie ayant des comportements très proches lors de l'altération (Tableau 1). Pour chaque polygone géologique, la nature de la roche mère a été conservée.

<sup>2</sup> PEPS : Projet Exploratoire Processus de Surface

<sup>3</sup> RGF : Référentiel Géologique de la France

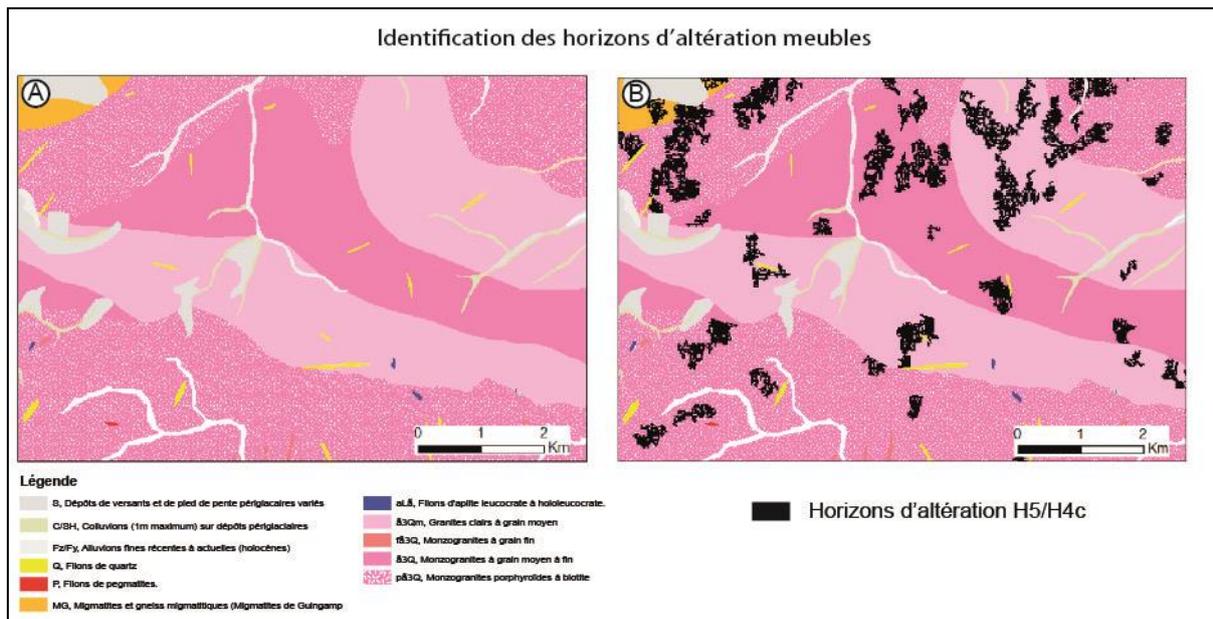


Figure 6 : Extrait de la carte géologique harmonisée pour le département des Côtes d'Armor (22) : A) Carte harmonisée originale, aucune formation d'altération n'est cartographiée. B) Identification prédictive des horizons H5 et H4c

### c) Calcul de l'épaisseur des altérites

La méthode de détermination des épaisseurs par l'analyse des données de forage n'est pas envisageable au cours de ce projet au vu du nombre de forages répertorié. Une méthode basée sur les altitudes minimum et maximum extraites au sein des polygones caractérisant les altérites a été réalisée. Il s'agit de faire la soustraction de l'altitude maximum avec l'altitude minimum au sein d'un polygone d'altérite (Figure 7). Cette méthode comporte toutefois quelques incertitudes :

- Les épaisseurs ne sont pas nécessairement homogènes au sein d'un même polygone ;
- Les altérations pouvant être morphologiques (altération suivant la topographie actuelle) ne sont pas prises en compte directement. Une analyse plus fine de la cartographie permettrait de différencier les types d'altération ;
- Pour les grandes surfaces d'altérite, les épaisseurs peuvent être localement surestimées lorsque le secteur est affecté par des failles.

Afin d'être cohérent avec la connaissance géologique, les épaisseurs maximales ont été limitées à 35 m au sein du Massif armoricain et du Massif central et à 30 m au sein des Vosges. Ces valeurs sont estimées sur la base des connaissances des altérites du BRGM sur ces différents massifs. De la même façon, les polygones géologiques présentant une épaisseur inférieure à 5 m n'ont pas été pris en compte car l'influence thermique des horizons altérés est considérée comme très faible en dessous de cette épaisseur.

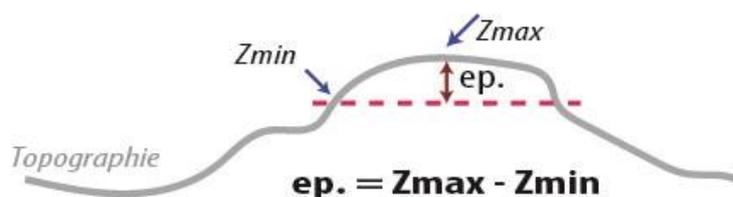


Figure 7 : Schéma explicatif de la méthode employée pour déterminer l'épaisseur des altérites meubles. Le trait en pointillé représente le plan d'un polygone d'altérite en coupe

### 3.2.3. Calcul de la conductivité thermique des terrains

Par la suite, une conductivité thermique moyenne  $\lambda_m$  a été calculée pour chaque polygone de la carte telle que :

$$\lambda_m = \frac{(\lambda_{alt} * e_{alt}) + ((e - e_{alt}) * \lambda_{subs})}{e} \quad (4)$$

Avec :

- $\lambda_{alt}$  : conductivité thermique de l'altérite meuble (valeur issue du tableau de correspondance litho-CT)
- $\lambda_{subs}$  : conductivité thermique du substratum (valeur issue du tableau de correspondance litho-CT)
- $e_{alt}$  : épaisseur calculée de l'altérite meuble
- $e$  : épaisseur de la tranche de terrain visée (50, 100, 150 ou 200m)
- Ici,  $e - e_{alt}$  correspond donc à l'épaisseur de roche saine sous altérite. Si pas d'altération, alors  $\lambda_m = \lambda_{subs}$

Figure 8 – Carte résultant du calcul des conductivités thermiques pour les massifs cristallins

### 3.3. ESTIMATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES TERRAINS POUR LES BASSINS SEDIMENTAIRES

Dans les bassins sédimentaires, la variabilité verticale de la lithologie peut être plus importante qu'en zone de socle. La disponibilité de logs numériques décrivant la succession des terrains et codés en lithologie principale (« logs géologiques validés ») permet d'avoir accès à cette variabilité.

Le calcul de la conductivité thermique moyenne a donc été principalement basé sur cette source de données.

Un peu plus de 16 000 logs validés de plus de 100 m de profondeur répartis sur le territoire métropolitain étaient disponibles au début de cette étude. Cette répartition n'étant pas homogène, ce set de données a été complété pour les besoins du projet sur les zones sédimentaires de la région Occitanie ainsi que sur le Jura (action partagée avec le projet d'appui aux politiques publiques LOGISO). Près de 550 forages ont ainsi été saisis numériquement et codés afin de compléter la couverture nationale (Figure 9).

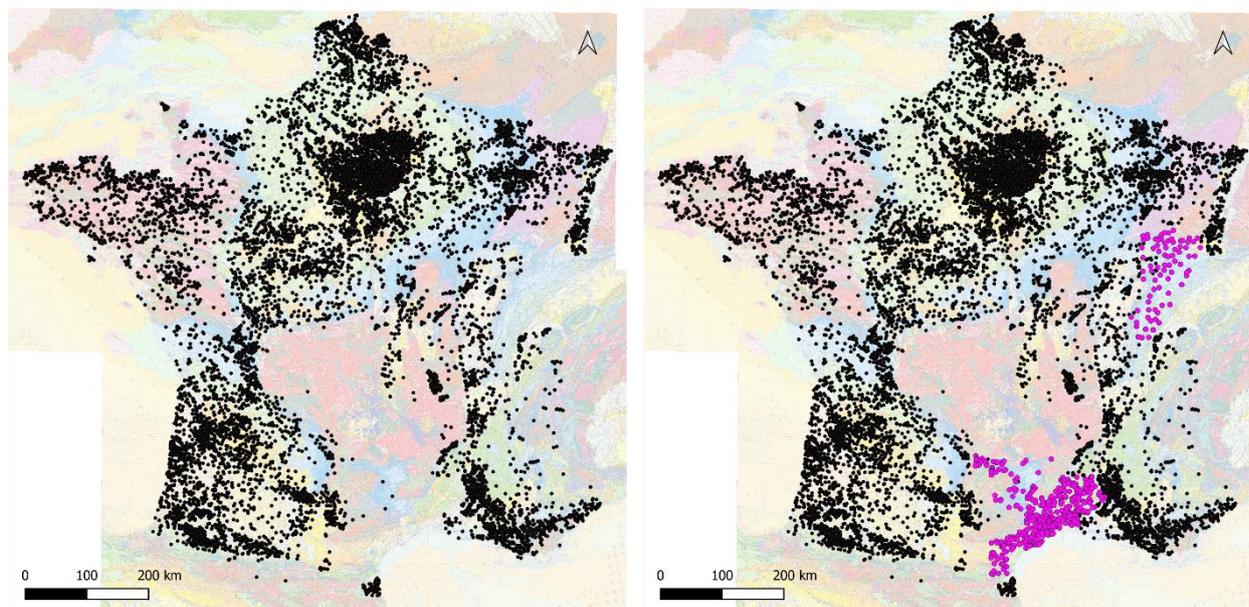


Figure 9 - Carte de répartition des 16 000 forages validés de plus de 100m de profondeur en 2023 (à gauche). En 2024, près de 550 forages ont été saisis et ajoutés au set de données du projet dans la région Occitanie et dans le Jura (en rose dans la figure de droite). Fond de carte : carte géologique de la France à l'échelle du millionième, 6e édition révisée, BRGM

Pour chacun de ces forages, on dispose des informations sur la nature lithologique de chaque passe décrite dans le forage ainsi que l'épaisseur de ces passes. Il est alors possible d'assigner une valeur de CT à ces intervalles et ainsi de calculer une conductivité thermique moyenne sur une tranche de terrain déterminée.

Afin améliorer la précision de ce calcul, la profondeur de la zone saturée (issue de la cartographie de l'épaisseur de la zone non saturée, Figure 10) a été renseignée pour chaque forage. On peut donc, lorsqu'on se situe au-dessus de cette profondeur affecter la valeur de la CT pour des roches « sèches » et lorsqu'on se situe en dessous ce niveau, affecter les valeurs de CT pour des roches saturées.

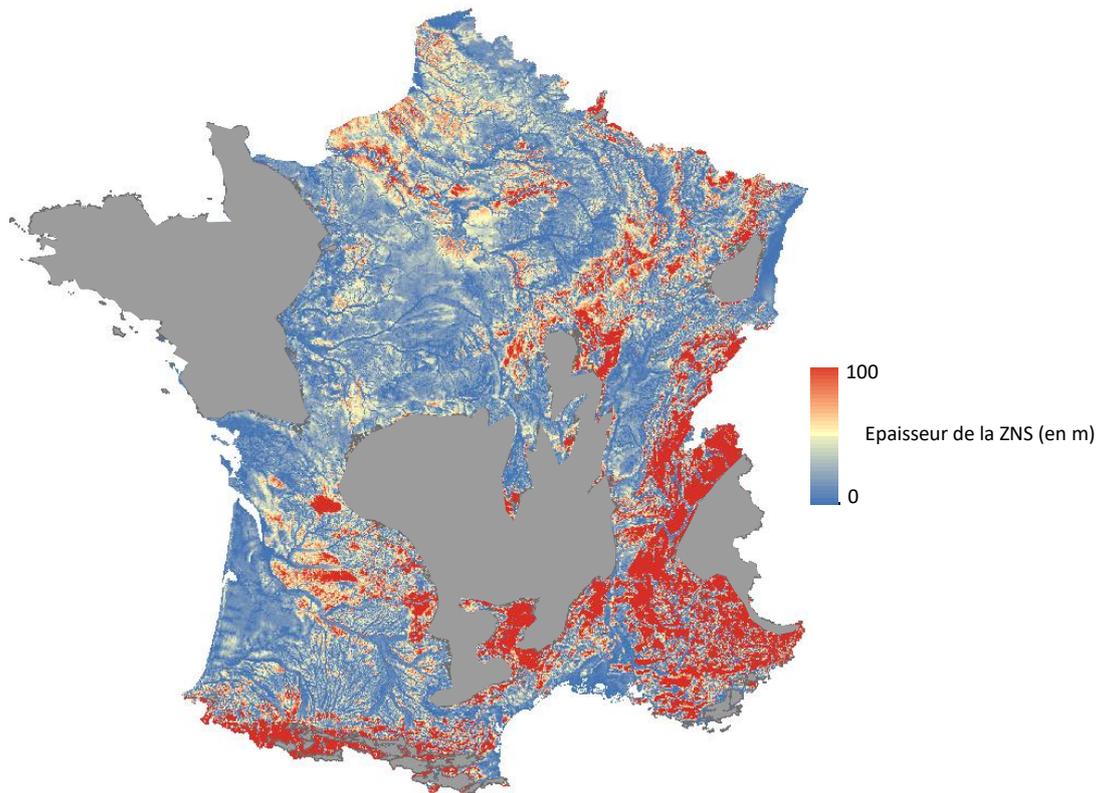


Figure 10 – Grille d'épaisseur de la zone non saturée. Adapté de (Allier et al., 2018)

Pour chaque log validé, on peut ainsi calculer une valeur de conductivité thermique moyenne sur une profondeur donnée (50 – 100 – 150 et 200m) telle que :

$$\lambda_m = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^n \lambda_i * e_i \quad (5)$$

Avec

- $e_i$  : épaisseur de la passe  $i$
- $\lambda_i$  : conductivité thermique de la lithologie décrite dans la passe  $i$
- $n$  : nombre de passes sur la profondeur considérée
- $H$  : profondeur considérée pour le calcul

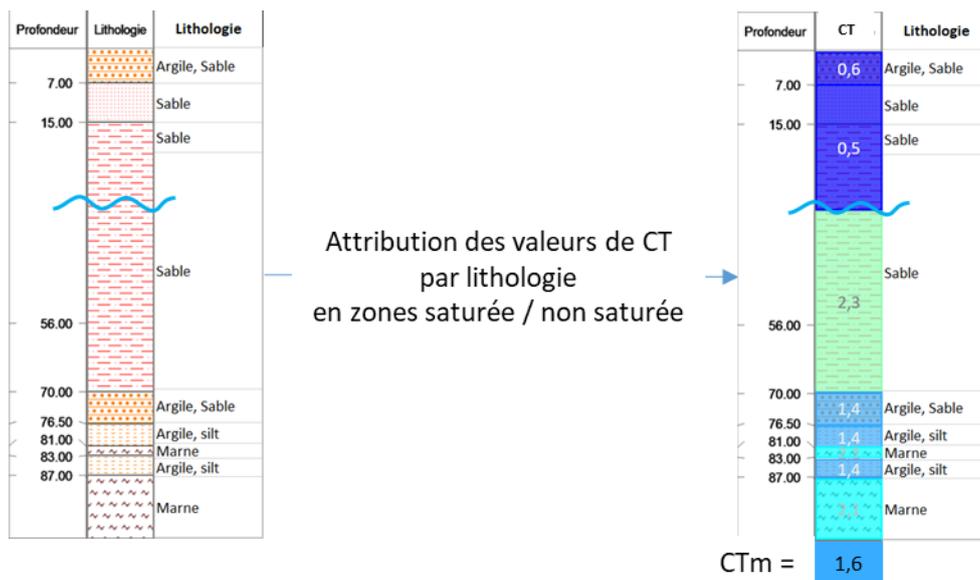


Figure 11 – Illustration de la méthodologie de calcul de la CT moyenne à 100m pour un log validé (profondeur exprimée en m et CT en W.m<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>).

La cartographie de conductivité thermique moyenne d'une sonde de profondeur H, en domaine sédimentaire, est réalisée par la méthode du Krigeage Ordinaire. La procédure suivie pour réaliser cette interpolation passe par les étapes suivantes :

1. Sélection des TRT :
  - a. La profondeur du TRT doit être égale à  $H \pm 10\%$  (soit compris entre 90 m et 110 m pour le calcul des cartes à 100 m).
  - b. La conductivité thermique doit être inférieure à  $3,5 \text{ W.K}^{-1}\text{m}^{-1}$ . Cette limite permet de réduire le nombre de TRT provenant des zones de socle. En effet, le mélange de TRT en zone de socle et en zone sédimentaire rend difficile la modélisation de la corrélation spatiale.
2. Construction d'un modèle unique de la corrélation spatiale de la CT à partir des TRT sélectionnés. Le modèle choisi est isotrope, sans dérive, avec un effet de pépité. Il s'applique à l'ensemble des domaines sédimentaires.
3. Pour améliorer les performances de calcul : réduction du nombre de points pour l'interpolation
  - a. Construction d'une grille d'une maille de 10 km de côté couvrant tout le territoire
  - b. Sélection d'un TRT par cellule :
    - i. si on a un seul TRT dans la cellule, on le conserve tel quel,
    - ii. si on a plusieurs TRT, on place un point au centre de la cellule et on lui associe la moyenne des CT des TRT de la cellule,
    - iii. s'il n'y a aucun TRT, on laisse la cellule vide.
  - c. Sélection d'un LGV par cellule vide, selon le même principe que pour les TRT.
4. Interpolation par krigeage des TRT et LGV sélectionnés.

La faible densité de TRT sur le territoire entraîne un effet de lissage, le modèle de corrélation ayant une grande portée (environ 100 km). Afin de prendre en compte les effets « courtes longueur d'ondes » de la lithologie, la CT calculée est une moyenne pondérée entre la CT de la lithologie de surface issue de la carte géologique au 1/50 000 à hauteur de 10% et de la CT interpolée par krigeage à hauteur de 90%. Ceci a pour effet de mieux prendre en compte les variations lithologiques observées sur la carte au 1/50 000 tout en conservant une erreur faible entre le modèle et les TRT et logs validés. En effet, la racine

de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre la CT du modèle à 100 m de profondeur et la CT observée sur les TRT est de  $0,38 \text{ W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ .

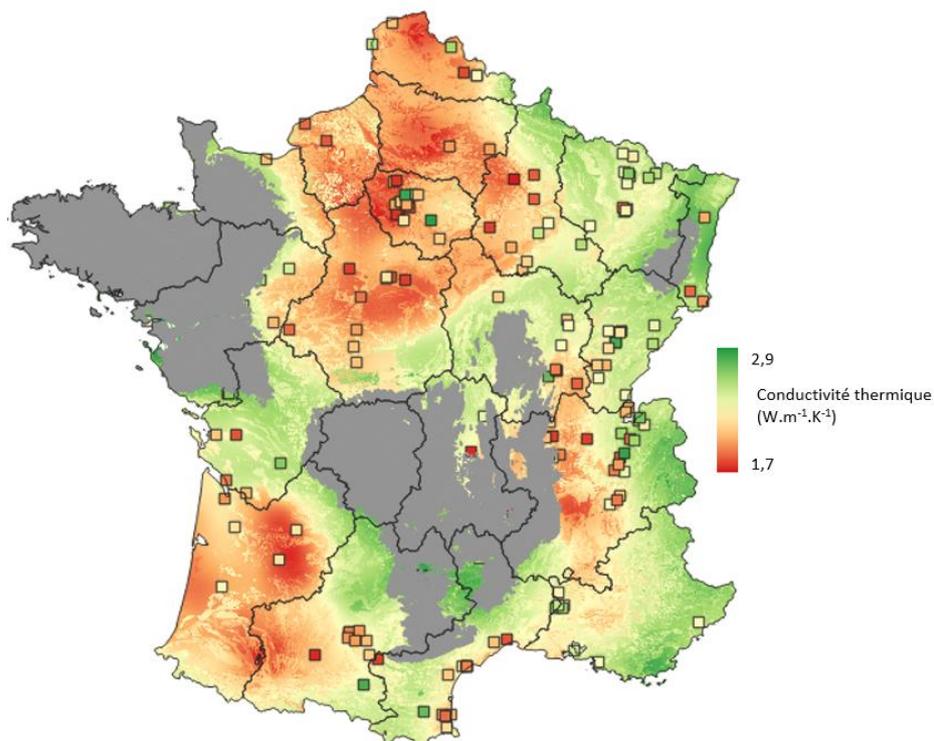


Figure 12 – Carte résultante des conductivités thermiques moyennées à 100 m dans les zones sédimentaires. Les données ponctuelles représentent les valeurs de CT issues des TRT à 100m +/- 10% (données prises en compte pour le calcul du modèle de variogramme de la carte).

## 4. Résultats

Pour chaque profondeur de sonde, on présente les grandeurs suivantes, ainsi que l'incertitude associée :

- La température initiale des terrains traversés moyennée sur la profondeur de la sonde (cf. Figure 14 et Figure 15),
- La conductivité thermique regroupant les estimations sur les massifs cristallins et sur les zones sédimentaires (cf. Figure 16 et Figure 17),
- La quantité de chaleur extractible rapportée à la longueur forée (cf. Figure 18 et Figure 19), construite elle-même selon une formule analytique explicitée au §2.1.

L'ensemble de ces cartes sera disponible sur le site [geothermies.fr](http://geothermies.fr) ainsi qu'en web service. Une analyse statistique montre que l'énergie extraite rapportée à la longueur forée augmente légèrement avec la profondeur du fait de l'augmentation de la température initiale avec la profondeur (cf. Figure 13). Les faibles valeurs d'énergie extractible (typiquement, inférieure à 75 kWh/(m.an)) correspondent aux zones d'altitude où la température est particulièrement basse. L'intervalle de confiance sur la quantité de chaleur extractible est globalement plus large dans les zones où la quantité de chaleur extractible est elle-même plus élevée, mais l'incertitude *relative* n'est pas forcément plus élevée.

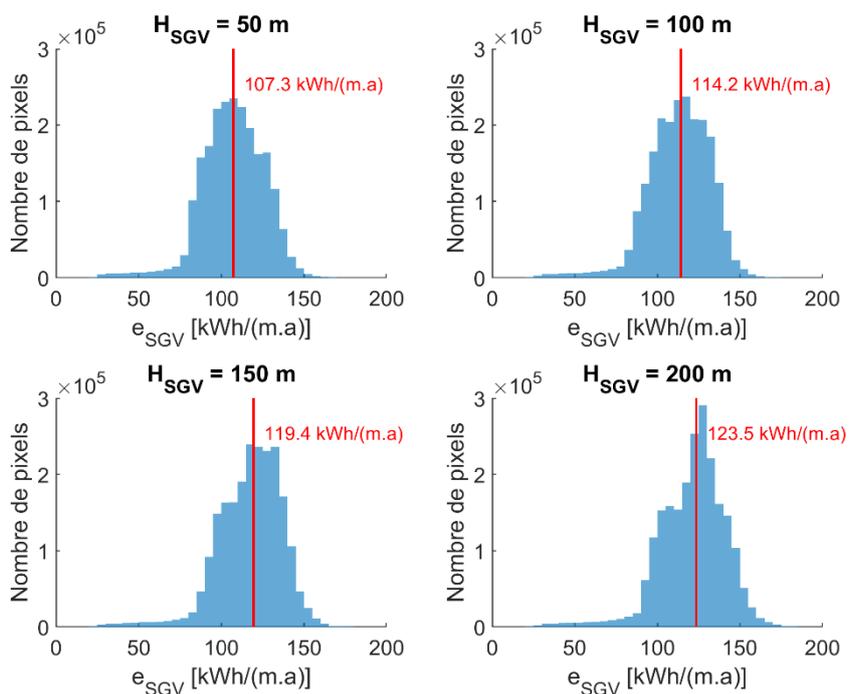


Figure 13 : Histogramme de la distribution de la quantité de chaleur extractible par mètre de forage pour chaque profondeur. La ligne verticale rouge indique la valeur médiane.

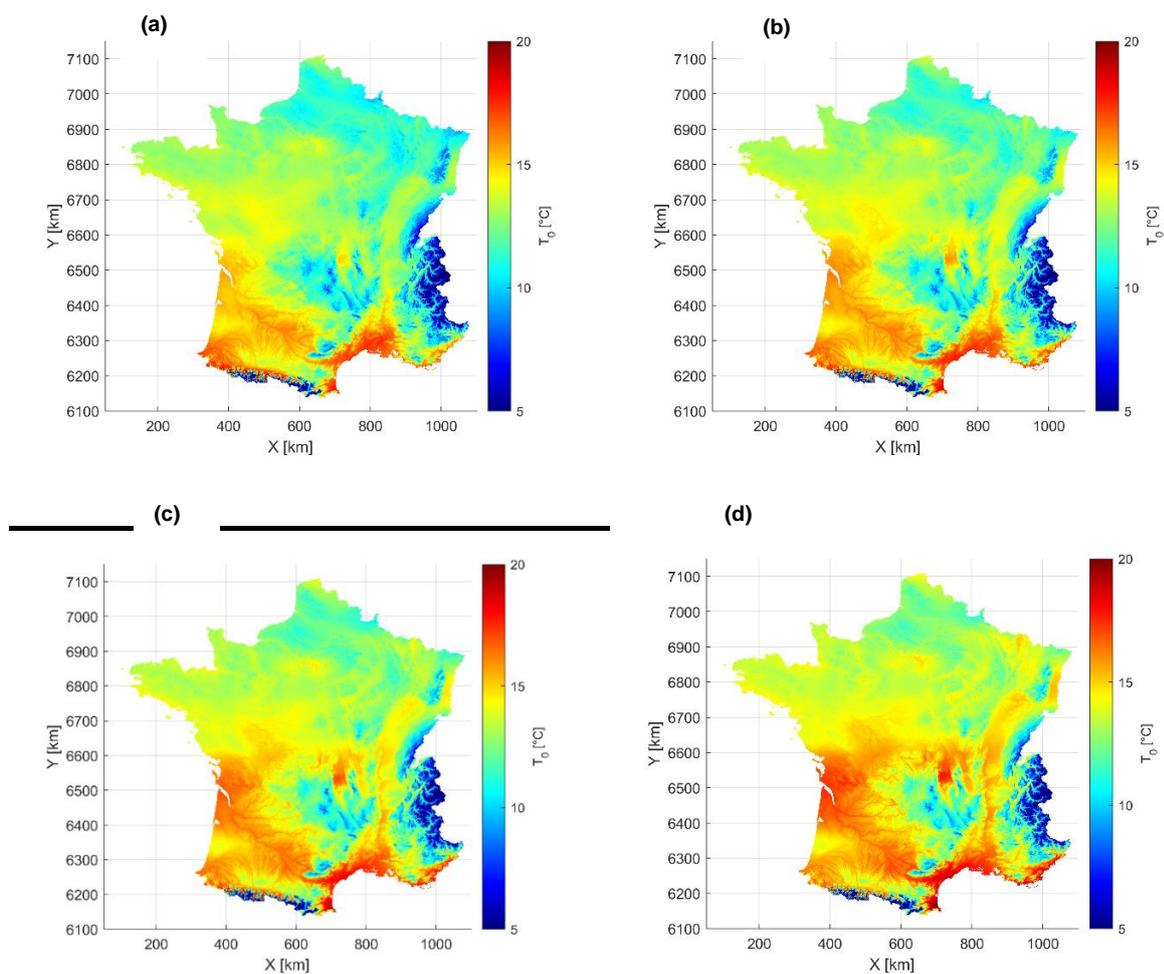


Figure 14 : Cartes de température initiale pour chaque profondeur  $H$  considérée : (a)  $H = 50$  m ; (b)  $H = 100$  m ; (c)  $H = 150$  m ; (d)  $H = 200$  m.

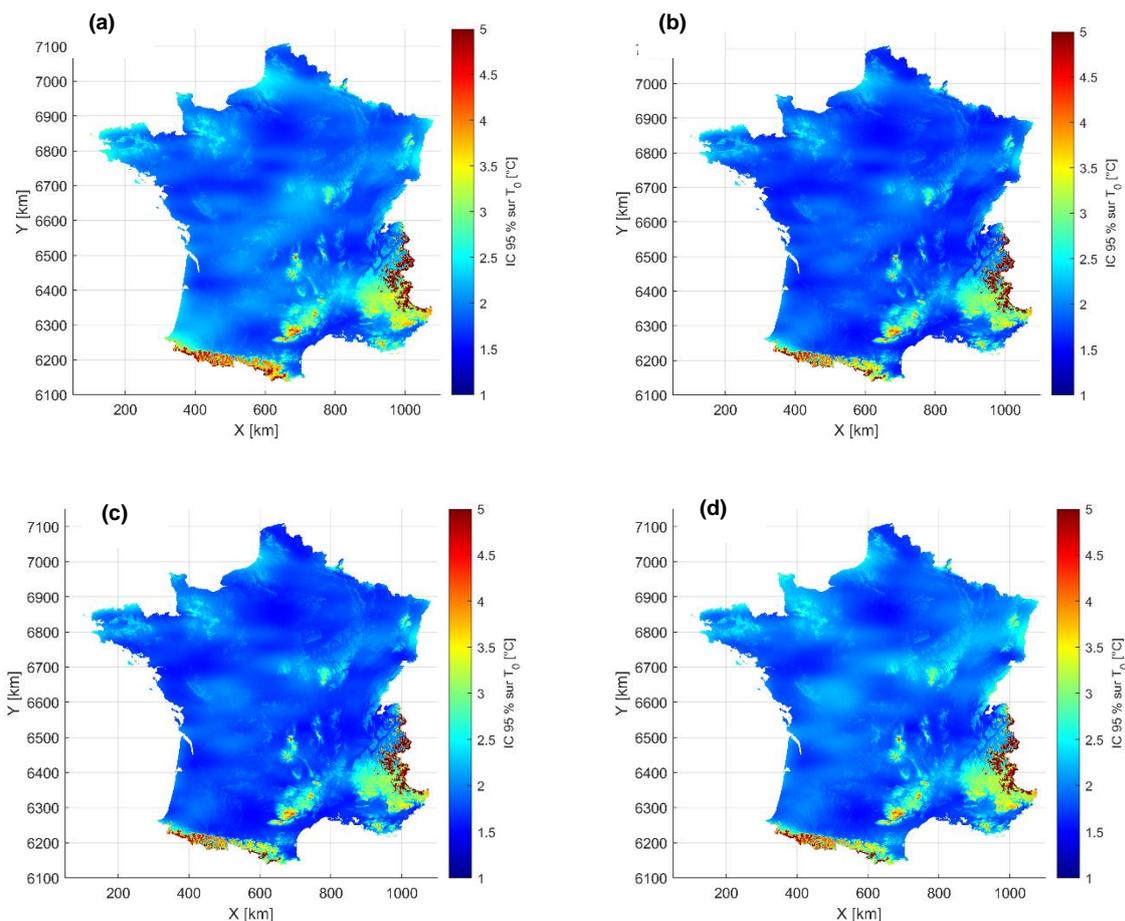


Figure 15 : Cartes d'intervalle de confiance à 95% sur la température initiale pour chaque profondeur  $H$  considérée : (a)  $H = 50$  m ; (b)  $H = 100$  m ; (c)  $H = 150$  m ; (d)  $H = 200$  m.

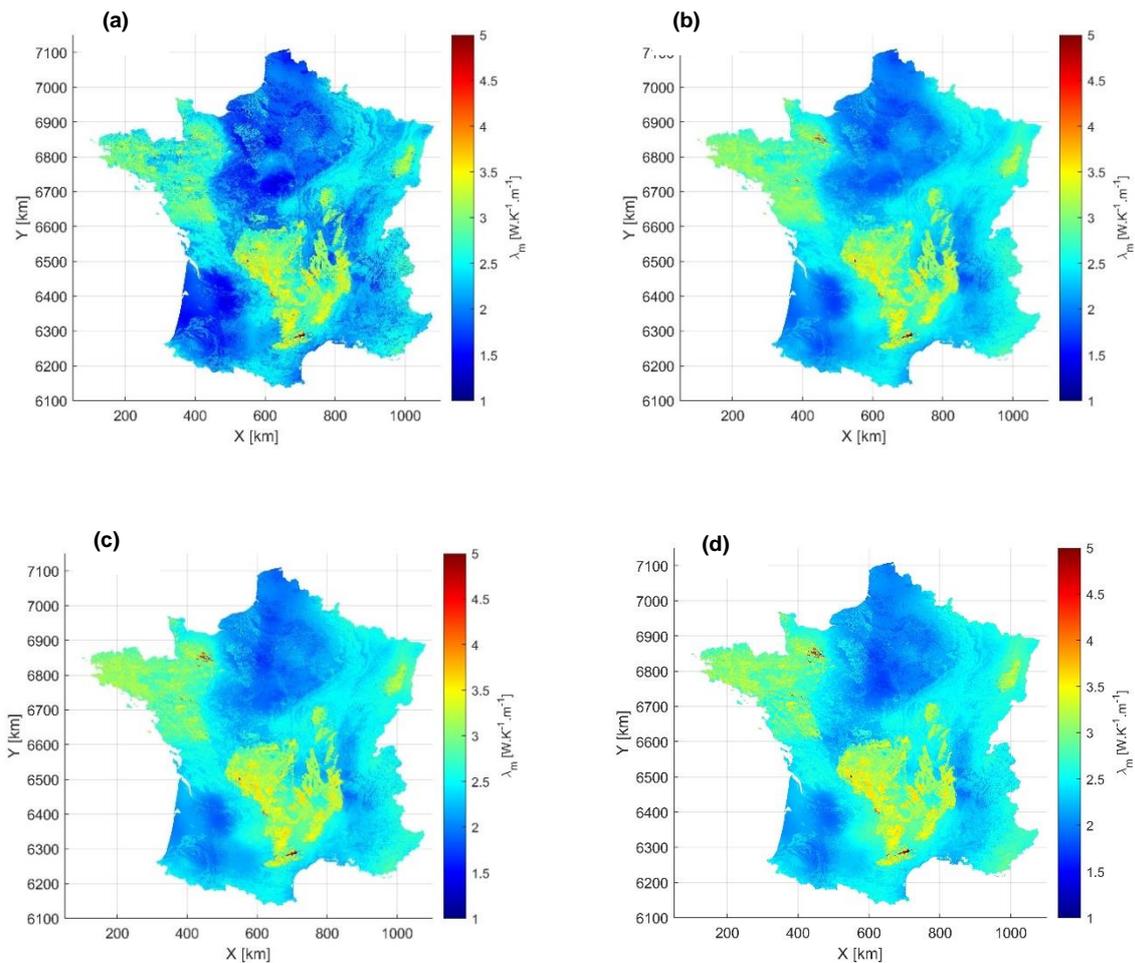


Figure 16 : Cartes de conductivité thermique pour chaque profondeur  $H$  considérée : (a)  $H = 50$  m ; (b)  $H = 100$  m ; (c)  $H = 150$  m ; (d)  $H = 200$  m.

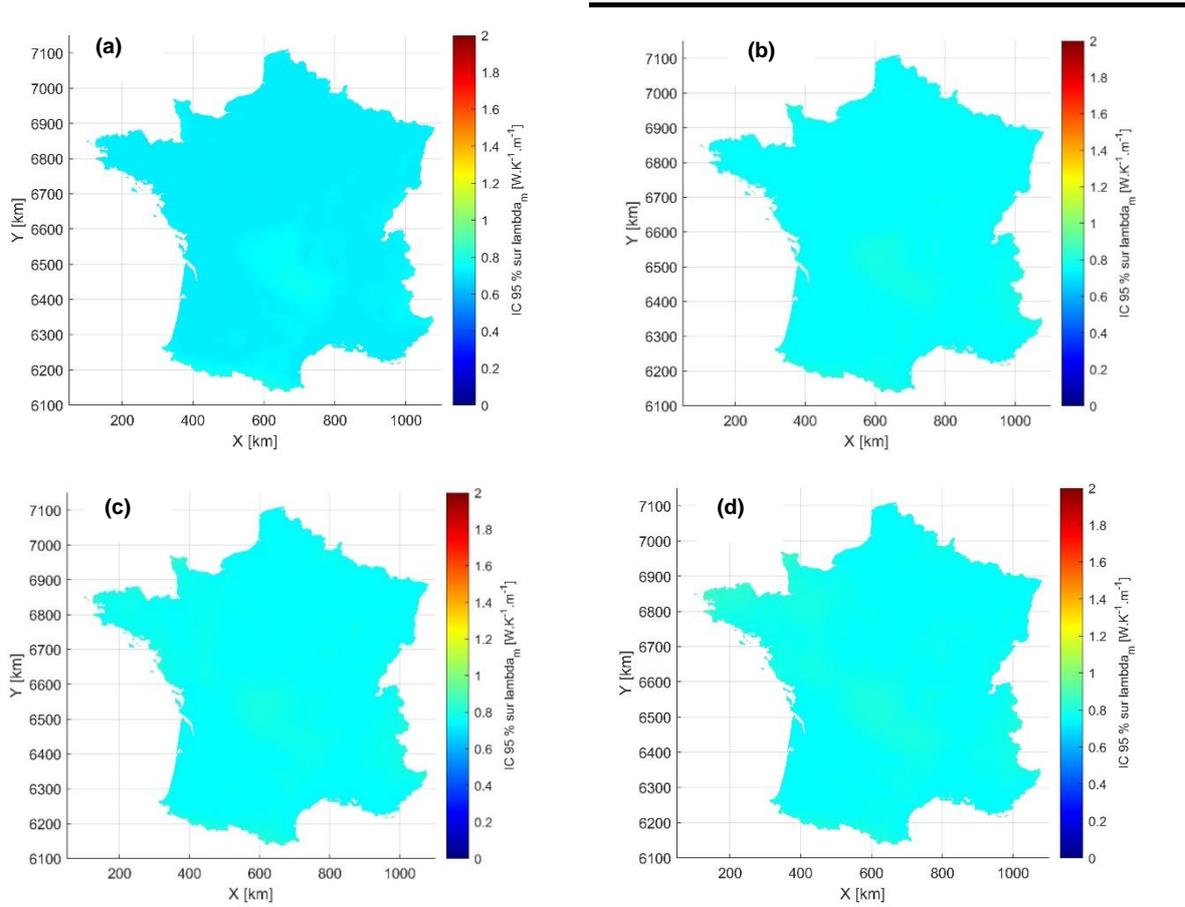


Figure 17 : Cartes d'intervalle de confiance à 95% sur la conductivité thermique pour chaque profondeur  $H$  considérée : (a)  $H = 50$  m ; (b)  $H = 100$  m ; (c)  $H = 150$  m ; (d)  $H = 200$  m.

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

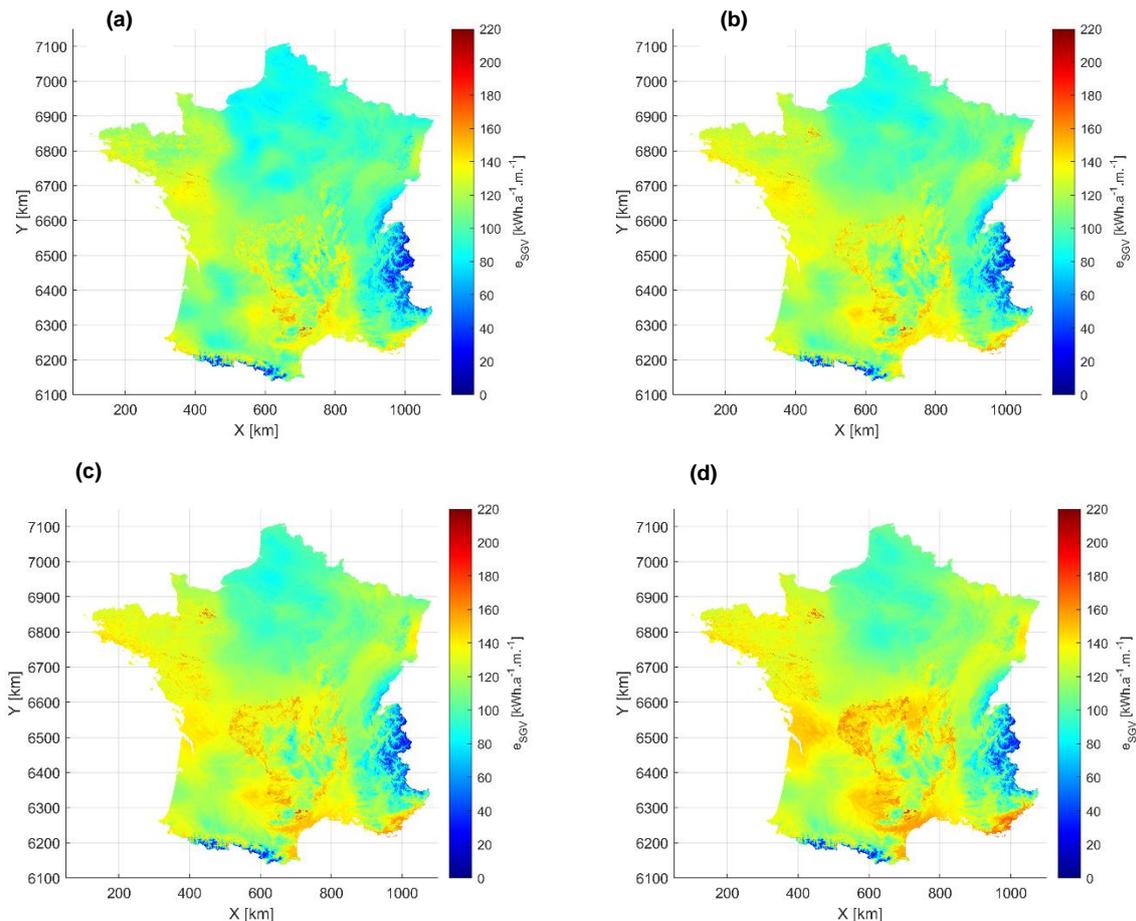


Figure 18 : Quantité de chaleur  $e_{SGV}$  [ $\text{kWh}/(\text{m}\cdot\text{an})$ ] par mètre de forage pour chaque profondeur H considérée : (a) H = 50 m ; (b) H = 100 m ; (c) H = 150 m ; (d) H = 200 m.

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

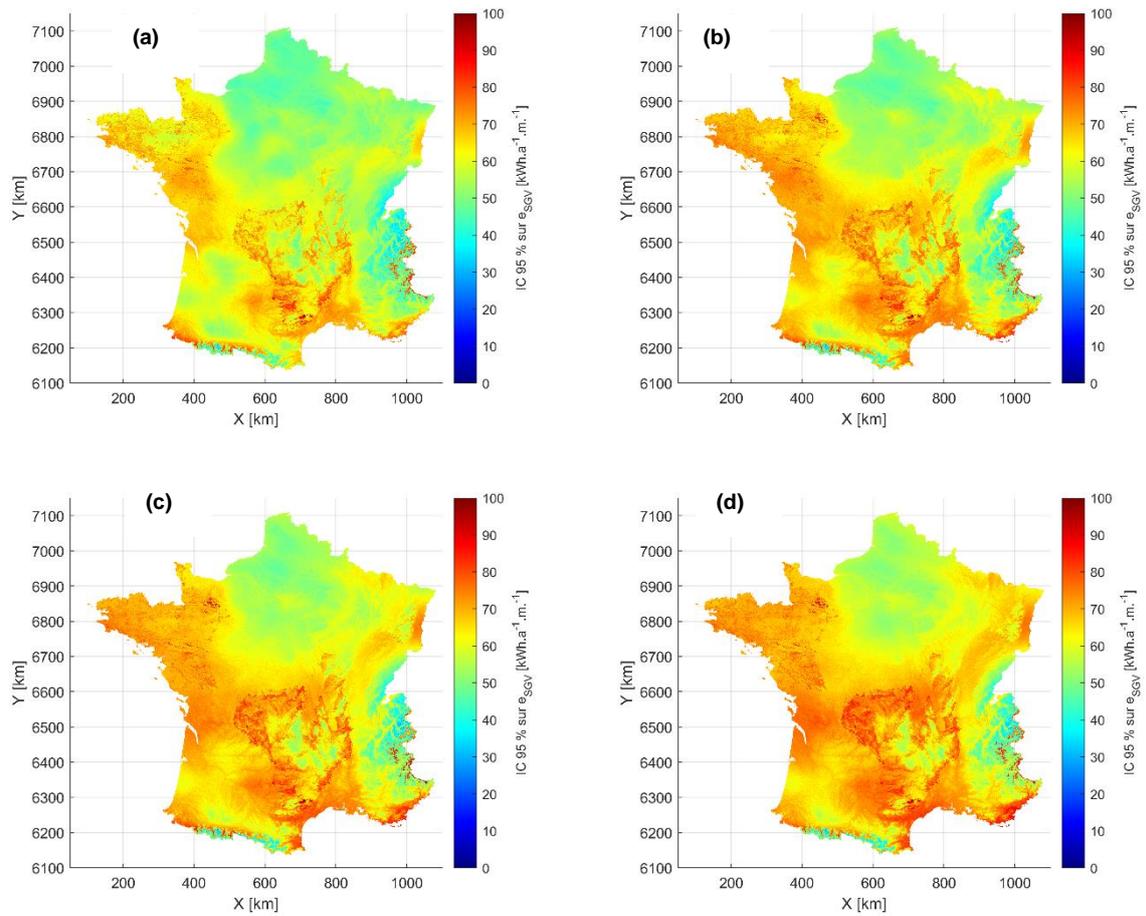


Figure 19 : Cartes d'intervalle de confiance à 95% sur la quantité de chaleur  $e_{SGV}$  [kWh/(m.an)] par mètre de forage pour chaque profondeur  $H$  considérée : (a)  $H = 50$  m ; (b)  $H = 100$  m ; (c)  $H = 150$  m ; (d)  $H = 200$  m.

## 5. Conclusions

Une méthodologie permettant d'évaluer les valeurs des paramètres clés du sous-sol pour le dimensionnement de sondes géothermiques (conductivité thermique et température des terrains) a été élaborée par le BRGM. Celle-ci s'appuie sur l'ensemble des données du sous-sol capitalisées au BRGM, certains sets de données ayant également été complétés dans le cadre de ce projet : tests de réponse thermiques, logs géologiques validés, cartes géologiques, ...

La synthèse de ce travail sera diffusée sous forme de cartes et de web services sur le site [www.geothermies.fr](http://www.geothermies.fr). Trois cartes ont été produites par profondeur (50 m, 100 m, 150 m, 200 m) : (i) cartes de conductivité thermique du sous-sol, (ii) carte de température du sous-sol et (iii) carte de l'énergie extractible rapportée à la longueur de la sonde, pour du chauffage seul.

Il est important de noter que ces cartes résultent d'une méthode d'élaboration complexe nécessitant un grand nombre d'informations. Lorsque celles-ci sont manquantes ou incomplètes, nous avons dû faire des choix (attribution de valeurs guides pour certaines lithologies) et des hypothèses. Ces résultats doivent être considérés avec précaution. Ils sont associés à des intervalles de confiance à 95%, dont la largeur varie fortement selon la localisation de la sonde. Ces cartes doivent être considérées comme un outil d'information destiné à aider et orienter les utilisateurs. A l'échelle locale du projet, ces informations ne peuvent ni ne doivent se substituer à une étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'études compétents.

Il convient de noter également que tous les territoires peuvent accueillir de la géothermie verticale sur sondes. Les cartographies produites dans le cadre de ce projet n'indiquent donc pas des secteurs favorables et d'autres défavorables. La production de ces cartes doit en revanche permettre d'identifier les secteurs dont les caractéristiques lithologiques sont susceptibles de permettre un dimensionnement réduit (et donc moins coûteux) de l'installation.



## Bibliographie

- Abdulagatova, Z., Abdulagatov, I.M., Emirov, V.N., 2009. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46, 1055–1071. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.04.011>
- Allier, D., Brugeron, A., Mardhel, V., 2018. Cartographie préliminaire de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée, à l'échelle du 1/100 000 ème sur la France Métropolitaine (Etude BRGM/RP-68354-FR). BRGM, Orléans, France.
- Arrêté du 25 juin 2015 relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance, 2015.
- Baptiste, J., Bessin, P., Lacquement, F., & Tissoux, H., 2021. Cartographie prédictive semi-automatique des horizons d'altération au sein des roches plutoniques. *RST-27e édition de la Réunion des Sciences de la Terre*. Baptiste, J., Bessin, P., Lacquement, F., & Tissoux, H. (2021). Cartographie prédictive semi-automatique des horizons d'altération au sein des roches plutoniques. *RST-27e édition de la Réunion des Sciences de la Terre*.
- Cahier des charges pour la réalisation d'un Test de Réponse Thermique (TRT), 2020. ADEME.
- Casasso, A., 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>
- Foucault, A., & Raoult, J., 2001. *Dictionnaire de géologie*. DUNOD.
- Haider, V., Kropacek, J., Dunkl, I., Wagner, B., & von Eynatten, H., 2015. Identification of peneplains by multi-parameter assessment of digital elevation models: IDENTIFICATION OF PENEPLAINS BY MULTI-PARAMETER ASSESSMENT. *Earth Surface Processes and Landforms* 40, 1477–1492. <https://doi.org/10.1002/esp.3729>
- Hanot, F. & Janjou, D., 2001. Mission de Service public. Rapport annuel d'activité pour l'année 2001. Référentiel géologique. BRGM/RP-51676-FR, 21 p.
- Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Cavril, M., 2020. Projet ADEME-CARTODIM 2019-2020 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique, développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques. Rapport BRGM/RP-69797-FR.
- Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Cazal, J., 2021. Projet ADEME-CARTODIM 2020-2021 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique, développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques. BRGM.
- Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Privat, P., Goncalves, J., 2022. Projet ADEME-CARTODIM 2021-2022. Rapport final (Etude BRGM/RP-71736-FR). BRGM, Orléans, France.
- Maragna, C., Baudouin, V., Guillon, T., Tran, V.H., Goncalves, J., 2023. Projet ADEME-CARTODIM 2022-2023 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique,

développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques. Rapport final (Etude BRGM/RP-72522-FR). BRGM, Orléans, France.

Maragna, C., Baudouin, V., Hameau, S., 2019. Projet REPRESS Collecte, analyse et bancarisation de rapports de tests de réponse thermique et estimation du potentiel des sondes géothermiques verticales. Rapport BRGM/RP-68858-FR. BRGM.

Thiery, Y., Lacquement, F., & Marçot, N., 2019. Landslides triggered in weathered crystalline rocks of moderate latitudes : A cas study in Mediterranean environment (The Maures Massif, France). *Engineering Geology* 248, pp. 164-184. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.12.002>.

## ANNEXE 1 – Table des valeurs guides utilisées

Lithologie		Valeurs_Guides	Notation	Ctsec	Ctsat	Reference
Eboulis	C	Conglomérat		2,8	2,8	Calcul sur 752 TRT 2024
Moraine	C	Conglomérat		2,8	2,8	Calcul sur 752 TRT 2024
RocheNaturelle	C	Calcaire		2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Matériauanthropiquemanufacturé	C	Remblais	-	0,4	1,7	CT des graviers
Rocheplutonique	C	Granite	PLUT	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024 - R. plutonique Leucocrate mais il existe aussi des Gabbros plutoniques
Granitoïdes	B	Granite		3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Granite	A	Granite	GRAN	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Leucogranite	B	Granite	LGRA	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Anatexite	C	Gneiss	ANAT	2,9	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024 (sec) et Fichier synthèse BRGM Compere F (sat)
Granodiorite	A	Granodiorite	GRDI	2,6	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Monzogranite	B	Monzonite	MZGR	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Trondhjémite	B	Granodiorite	TRDJ	2,6	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Tonalite	C	Granodiorite	TONA	2,6	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Diorite	A	Diorite	DIOR	2,3	2,3	Norme Suisse SIA 384/6 - Valeur conservative
Dioritequartzifère	B	Diorite	DIOQ	2,3	2,3	Norme Suisse SIA 384/6 - Valeur conservative
Monzodiorite	B	Monzonite	MZDI	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Monzonite	A	Monzonite	MONZ	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Anorthosites	A	Anorthosite		3,4	3,4	Dans lexisque ValGuide mais origine de la valeur inconnue
Gabbro	A	Gabbro	GABB	2	2	Norme Suisse SIA 384/6
Roches ultrabasiques	B	Péridotite		4	4	Norme Cp Allemagne 2000
Rochevolcanique	C	Basalte	RVOL	1,7	1,7	Norme Cp Allemagne 2000

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

Lave	C	Basalte	LAVE	1,7	1,7	Fichier synthèse BRGM Compere F - Basalte = Lave basique
Rhyolite	A	Rhyolithe	RHYO	3,3	3,3	Norme Cp Allemagne 2000
Trachyte	C	Trachyte		1,7	1,7	Meme valeur que Andésite et Basaltes
Dacite	B	Granodiorite		2,6	2,7	Identique Granodiorite - Calcul sur 752 TRT 2024
Andésite	A	Andésite	ANDE	1,7	1,7	Norme EN17522
Latite	B	Trachyte		1,7	1,7	Trachyandésite
Mugéarite	B	Trachyte		1,7	1,7	Trachyandésite basaltique
Basalte	A	Basalte		1,7	1,7	Norme Cp Allemagne 2000
Phonolite	C	Andésite		1,7	1,7	Car lave intermédiaire...
Roche pyroclastique consolidée	C	Tuf	PYRC	2,3	2,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Brèches volcanoclastiques	B	Brèche		2	3,3	Identique à Brèche
Tuf (volcanique)	A	Tuf	TFVO	2,3	2,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Ignimbrite	C	Rhyolite	IGNB	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Pegmatite	B	Granite	PEGM	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024 - Roche magmatique de composition granitique à grains très grossiers, fréquemment automorphes (centimétriques à décimétriques).
Aplite	B	Granite	APLI	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Microgranite	B	Granite	MGRA	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Microdiorite	B	Diorite	MDIO	2,3	2,3	Norme Suisse SIA 384/6 - Valeur conservative
Dolérite	B	Gabbro	DOLE	2	2	Norme Suisse SIA 384/6 - Roche filonienne, à texture doléritique et à composition proche de celle d'un microgabbro.
Lamprophyres	C	Basalte		1,7	1,7	Norme Cp Allemagne 2000
Carbonate	B	Calcaire		2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Roche métamorphique	C	Gneiss	META	2,9	3,6	Valeur des Gneiss
Roche métasédimentaire		Schiste	MSED	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

Ampélite	B	Argilite	AMPE	1,9	1,9	Guide technique BRGM - Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes, 2012 + Norme Suisse SIA 384/6
Quartzite	A	Quartzite	QTZI	5,12	5,12	Calcul sur 752 TRT 2024
Métagrauwacke	B	Grès	MGRW	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F
Marbre	A	Marbre		3,88	4,54	Rapport BRGM RP-60684-FR - mars 2012
Schiste	A	Schiste	SCHI	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Séricitoschiste	B	Schiste	SESC	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Chloritoschiste	B	Schiste Vert	CHSC	2,94	2,29	Fichier synthèse BRGM Compere F
Micaschiste	A	Micaschiste	MICA	3,5	3,5	Calcul sur 752 TRT 2024
Paragneiss	C	Gneiss	PGNE	3,3	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024 (sec) et Fichier synthèse BRGM Compere F (sat)
Métavolcanite	C	Basalte	MVOL	1,7	1,7	Métabasalte
Métarhyolite	C	Granite	MTRH	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Métatuf	B	Tuf	MTTV	2,3	2,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Métabasalte	B	Basalte	MTBA	1,7	1,7	Fichier synthèse BRGM Compere F
Métadolérite	B	Gabbro	MTDL	2	2	Norme Suisse SIA 384/6 - Roche filonienne, à texture doléritique et à composition proche de celle d'un microgabbro.
Orthogneiss	C	Gneiss	OGNE	2,9	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024 (sec) et Fichier synthèse BRGM Compere F (sat)
Métagranite	B	Granite	MTGR	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
Métagranodiorite	B	Granodiorite	MTGD	2,6	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Métatrondhjémite	C	Granodiorite	MTTD	2,6	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Métadiorite	B	Diorite	MTDO	2,3	2,3	Norme Suisse SIA 384/6 - Valeur conservative
Métaquartzdiorite	C	Granodiorite	MTQD	2,6	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Métagabbro	B	Gabbro	MTGA	2	2	Norme Suisse SIA 384/6
Eclogite		Gneiss		2,9	3,6	Valeur du Gneiss
Granulite	A	Granulite		2,7	2,7	CARTODIM RP70833-FR 2021

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

Gneiss	A	Gneiss	GNEI	2,9	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024 (sec) et Fichier synthèse BRGM Compere F (sat)
Migmatite	A	Migmatite	MIGM	3,2	3,2	Calcul sur 752 TRT 2024
??		Gneiss		2,9	3,6	Valeur du Gneiss
Leptynite	B	Gneiss	MTLE	2,9	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024 (sec) et Fichier synthèse BRGM Compere F (sat)
Amphibolite	A	Amphibolite	AMPH	2,5	2,8	Rapport BRGM RP-60684-FR - mars 2012
Schistetacheté	B	Schiste argileux	SCHT	1,9	1,9	Norme Suisse SIA 384/6
Cornéenne	C	Grès	CORN	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F
Cataclasite	B	Brèche	CATA	2	3,3	Fichier synthèse BRGM Compere F - Brèche tectonique
Mylonite	C	Schiste	MYLO	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024 - Roche de faille, cohésive et caractérisée par une schistosité très bien développée résultant d'une réduction de taille de grain d'origine tectonique dans une zone de cisaillement ductile
Ultramylonite	C	Schiste	UMYL	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024 - Ultramylonite souvent marqué par schistosité
Impactites		Gneiss		2,9	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024 (sec) et Fichier synthèse BRGM Compere F (sat)
Skarn	C	Calcaire		2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Greisen	B	Grès		2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F
Grèzes	B	Grès		2,5	3,5	Sable grossier - Caollouteux
Spilite	C	Basalte	SPIL	1,7	1,7	Fichier synthèse BRGM Compere F - roche volcanique basique apparentée au basalte
Roched'altération	C	Argile	RESI	0,6	1,9	Calcul sur 752 TRT 2024
Terrevégétale	A	Terre (Sol)	TERV	0,7	0,7	Schön (2011), Yang & Wei (2017)
Roched'altérationparlessivage	C	Argile	ALTE	0,6	1,9	Calcul sur 752 TRT 2024
Bauxite			BAUX	1	1	Roche d'altération par lessivage - Faible

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

						conductivité thermique... 1 ?
Calcrète	B	Calcaire	CCRT	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Silcrète	C	Quartzite	SILC	5,12	5,12	Calcul sur 752 TRT 2024
Arène	B	Sable	ARNI	0,5	2,2	Norme Suisse SIA 384/6 et valeur TRT 2024 pour CTsat
Rochesédimentaire	C	Calcaire	SEDI	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Agglomérat	B	Gravier/pierres, sec		3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Gravier	A	Gravier	GRVI	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Till	A	Till		3,6	3,6	Calcul sur 752 TRT 2024
Cailloutis	B	Gravier	CAIL	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Sable	A	Sable	SABL	0,5	2,2	Norme Suisse SIA 384/6 et valeur TRT 2024 pour CTsat
Sablon	B	Sable	SBLO	0,5	2,2	Norme Suisse SIA 384/6 et valeur TRT 2024 pour CTsat
Silt	A	Silt	SILT	1,84	1,84	Calcul sur 752 TRT 2024
Loess	B	Silt		1,84	1,84	Calcul sur 752 TRT 2024
Alluvion	B	Silt		1,84	1,84	Calcul sur 752 TRT 2024
Limon	B	Silt	LIMO	1,84	1,84	Calcul sur 752 TRT 2024
Vase	B	Silt	VASE	1,84	1,84	Calcul sur 752 TRT 2024
Argile	A	Argile	ARGI	0,6	1,9	Calcul sur 752 TRT 2024
Conglomérat	A	Conglomérat	CGLO	2,8	2,8	Calcul sur 752 TRT 2024
Poudingue	B	Conglomérat	PDNG	2,8	2,8	Calcul sur 752 TRT 2024
Brèche	A	Brèche	BREC	2	3,3	Fichier synthèse BRGM Compere F
Microbrèche	B	Brèche	MICB	2	3,3	Fichier synthèse BRGM Compere F
Microconglomérat	B	Grès	MICG	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F - Grès grossier ou Conglomérats fins
Grès	A	Grès	GRES	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F
Arkose	B	Grès	ARKO	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F - Correspond à des valeurs moyennes

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

						souvent citées pour Sandstones
Grauwacke	B	Grès	GRAU	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F
Wacke	B	Grès Argileux	WACK	1,6	3,3	Fichier synthèse BRGM Compere F
Siltite	C	Siltite	SLTT	2,9	2,9	Calcul sur 752 TRT 2024
Pélite	C	Siltite	PELI	2,9	2,9	Calcul sur 752 TRT 2024
Argilite	A	Argilite	ARGT	1,9	1,9	Norme Suisse SIA 384/6
Falun	B	Calcaire bioclastique	FALU	3,2	3,3	CARTODIM 2022 - Valeur plus conservative possible : Craie car calcaire tendre
Lumachelle	B	Calcaire	LUMA	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Gaize	B	Grès	GAIZ	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F - Roche siliceuse en partie d'origine biodétritique, sorte de grès fin à ciment d'opale et aux bioclastes siliceux (spicules surtout)
Calcarénite	B	Calcaire	CARE	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Marne	A	Marne	MARN	1,36	2,9	Fichier synthèse BRGM Compere F - Valeur moyenne sur 752TRT=2
Calcaire	A	Calcaire	CALC	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Craie	A	Craie	CRAI	2,1	2,1	Calcul sur 752 TRT 2024
Tuffeau	C	Craie	TUFF	2,1	2,1	Ou alors Calcaire tendre
Dolomie	A	Dolomie	DOLO	3,3	4	Directive SIA D025 et DO136 (VDI Richlinien 4640, part 2, 2001)
Phtanite	C	Grès	PHTA	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F - Roche siliceuse sombre incluant une fraction argileuse
Spongolite	C	Grès	SPON	2,5	3,5	Fichier synthèse BRGM Compere F - Roche siliceuse constituée par l'accumulation de débris d'éponge
Silexite	C	Quartzite	SILX	5,12	5,12	Calcul sur 752 TRT 2024
Tourbe	A	Tourbe	TOUR	0,4	0,4	Norme Suisse SIA 384/6 - Norme Cp Allemagne 2000 - Guide technique BRGM - Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes, 2012

Cartographie de la favorabilité du sous-sol au déploiement de la géothermie de surface sur une sonde verticale

Lignite	B	Antracite (Roche carbonnée)	LIGN	0,4	0,4	Norme EN17522
Charbon	A	Antracite (Roche carbonnée)	COAL	0,4	0,4	Norme EN17522
Houille	B	Antracite (Roche carbonnée)	HOUI	0,4	0,4	Norme EN17522
Evaporite	C	Sel		5,4		Attention ce peut être également du gypse avec une CT bien moindre : 1,3 à 1,6 en sec
gypse	A	Gypse, Anhydrite - Roche sulfatée	GYPS	1,34	1,81	Rapport BRGM RP-60684-FR - mars 2012
anhydrite	A	Roche sulfatée (anhydrite)	ANHY	1,34	1,81	Rapport BRGM RP-60684-FR - mars 2012 - ATTENTION valeur Norme EN17522 : 4,1
Travertin	B	Calcaire	TRAV	2,7	2,7	Calcul sur 752 TRT 2024
Gabbroïdes	B	Gabbro		2	2	Norme Suisse SIA 384/6
Schistebleu	B	Schiste	SCHB	3,3	3,3	Calcul sur 752 TRT 2024
Schistevert	A	Schiste vert	SCHV	2,29	2,94	Fichier synthèse BRGM Compere F
Dioritoïdes	B	Diorite		2,3	2,3	Norme Suisse SIA 384/6 - Valeur conservative
Syénoïdes		Syénite		2,6	2,6	Norme EN17522

*Table 2 - Table Litho-CT : concordance entre les lithologies rencontrées en forage ou en carte et les valeurs guides. Une note de confiance (A, B ou C) a été attribuée à chaque attribution. Dans certains cas, il existe des valeurs de CT sur roche sèche vs. roche saturée. Si cette discrimination n'a pas été trouvée, on utilise alors la même valeur de CT sur roches sèche et sur roche saturée.*



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

**Direction régionale ou UTAM**

Adresse

Tél. :

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**