

Document à accès immédiat

Projet ADEME-CARTODIM 2022-2023 : Collecte et bancarisation de tests de réponse thermique, développement d'une plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques



Rapport final

BRGM/RP-72522-FR

Version 0 du 20 mars 2023

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Maragna C., Baudouin V., Guillon T., Tran V.H., Goncalves J.

Vérificateur :		Approbateur :	
Nom :	Mikaël PHILIPPE	Nom :	Didier LAHONDERE
Fonction :	Responsable d'Unité GSE	Fonction :	Directeur-adjoint
Date :	05/05/2023	Date :	09/05/2023
Signature :		Signature :	

Avertissement

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

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers 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 : Test de réponse thermique, TRT, Géothermie de surface, Champs de sondes.

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

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 V0. BRGM/RP-72522-FR, 25 p., 11 fig.

Synthèse

Le projet CARTODIM, cofinancé par le BRGM et l'ADEME dans le cadre de la convention 2205D0022, vise à poursuivre la collecte, la bancarisation, l'analyse et la diffusion des rapports de tests de réponse thermique (TRT), ainsi que le développement de la plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques en boucle fermée à destination des professionnels (<https://plateforme-geothermie.brgm.fr/fr>).

À fin mars 2023, 96 rapports de TRT supplémentaires ont été bancarisés, portant à 511 le nombre de résultats de TRT diffusés en ligne sur www.geothermies.fr. L'interface de la plateforme de dimensionnement de champs de sondes a été améliorée. L'utilisateur peut maintenant charger sa propre loi d'eau et calculer la température initiale du terrain en fonction des coordonnées géographiques de son projet. Près de 90 professionnels ont été formés à cet outil lors de 10 sessions de formation.

Sommaire

1. Collecte, analyse et bancarisation des rapports de tests de réponse thermique.....	7
1.1. COLLECTE AUPRÈS DES PRODUCTEURS	7
1.2. ANALYSE DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DU TERRAIN TRAVERSÉ.....	16
2. Maintenance et amélioration de l'outil	19
2.1. MIGRATION DE DRUPAL V7 À DRUPAL V9	19
2.2. CHOIX DE LA LOI D'EAU	19
2.3. CALCUL DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DU TERRAIN	20
2.4. CALCUL DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE DU FORAGE.....	20
3. Formation à l'outil	21
4. Conclusion.....	23
5. Bibliographie	25

Liste des figures

Figure 1 : Bilan de la bancarisation des TRT diffusés par phase de projet.	9
Figure 2 : Typologie du projet appliqué à l'ensemble des opérations avec TRT inventoriés, selon la classification ADEME (code « LISA »).	10
Figure 3 : Identification des TRT associés aux dossiers Fonds Chaleur portés par l'ADEME.	11
Figure 4 : Principaux résultats issus des TRT : température initiale du terrain.	12
Figure 5 : Principaux résultats issus des TRT : conductivité thermique du terrain.	13
Figure 6 : Longueur des sondes équipant le forage.	14
Figure 7 : Longueur cumulée par type de roche, suivant les niveaux n° 2, n° 3 et n° 4 du lexique Dialog.	15
Figure 8 : Distribution de l'écart entre données de température initiale T_0 et prédiction pour le polynôme (à gauche) et le processus gaussien (à droite).	17
Figure 9 : Cartes de température initiale T_0 pour une sonde profonde de 50, 100 ou 200 m obtenus par le polynôme (colonne de gauche) ou le processus gaussien (colonne de droite). L'ellipse noire est centrée sur le bassin de la Limagne.	18
Figure 10 : Interface de saisie de la loi d'eau.	19
Figure 11 : Interface de calcul de la température initiale T_0 en fonction des coordonnées géographiques (latitude et longitude).	20

1. Collecte, analyse et bancarisation des rapports de tests de réponse thermique

1.1. COLLECTE AUPRÈS DES PRODUCTEURS

Au début de cet exercice (avril 2021), 415 résultats de TRT étaient diffusés en ligne via le portail www.geothermies.fr suite aux précédentes collectes (Maragna *et al.*, 2021, 2020, 2019). Le nombre de rapports bancarisés était légèrement supérieur, mais 7 résultats de tests jugés peu fiables n'étaient pas diffusés.

Pour la réactualisation de cette collecte, un nouveau courrier a été communiqué par mail le 23 novembre 2022 aux bureaux d'études thermiques (BET) identifiés comme prestataires de tests de réponses thermiques (TRT). À chacun de ces envois, pour cadrer les conditions d'usages des données et résultats des TRT, un modèle de convention est proposé. Aussi, pour faciliter le travail de complétude de la collecte, un fichier individualisé et actualisé récapitulant leurs rapports déjà réceptionnés est transmis. Au total, 9 BET ont été sollicités.

Le réseau des délégations régionales de l'ADEME a également été sollicité, pour transmettre les TRT réalisés et à leur disposition dans le cadre des dossiers Fonds Chaleur.

L'ADEME a également transmis un bilan 2019-2022 des dossiers de financement du volet « études » par le Fonds Chaleur, pour identifier spécifiquement les phases préalables de faisabilité à la mise en œuvre d'une solution PAC sur champ de sondes.

Sur ces 4 années figurent 373 dossiers d'aides parmi lesquels 46 TRT sont déjà collectés, soit un peu plus du quart de l'ensemble de ces dossiers, et 61 dossiers font mention de TRT dans l'intitulé de l'objet du dossier, encore à ce stade non collectés, ou plus largement 198 dossiers font la mention d'études sous-tendant la réalisation de TRT sur site. Ce travail de collecte ciblée à partir des dossiers identifiés sera conduit lors du prochain exercice CARTODIM 2023-2024.

Un mail a également été adressé le 14 février 2023 à 66 entreprises de forage labellisées « Qualiforage » afin de les sensibiliser à l'obligation de dépôt des rapports de TRT le cas échéant pour la constitution du dossier de rapport de fin de forage tel qu'exigé par le régime spécifique de la géothermie de minime importance (GMI).

Une recherche a été effectuée depuis la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et les données de déclaration TéléGMI en utilisant la plateforme d'accès réservé Métabase, service interne au BRGM et le Téléservice de la géothermie de minime importance. Elle a permis d'identifier 93 TRT, dont 28 avaient déjà été collectés, soit 65 nouveaux ou encore à ce stade, potentiels :

- 14 nouveaux TRT avec les rapports déposés et retrouvés dans le dossier GMI ;
- 14 nouveaux TRT avec les rapports absents du dossier GMI, mais collectés suite aux demandes ciblées auprès des entreprises de forage (déclarants) ;
- 11 nouveaux TRT absents du dossier GMI, toujours non réceptionnés après demandes ciblées ;
- 26 nouveaux TRT absents du dossier GMI, avec demande auprès du déclarant à effectuer.

Cette recherche a permis de collecter 28 nouveaux TRT et d'identifier 37 TRT encore à collecter.

À fin mars 2023, 96 rapports supplémentaires ont été bancarisés, portant à 518 le nombre de rapports de TRT collectés.

La bancarisation d'un TRT comprend systématiquement :

- l'identification du forage en BSS (Banque de données du Sous-Sol) et dans la base de données GMI ;
- la complétude du dossier BSS ;
- la recherche et l'identification du projet le cas échéant dans les dossiers Fonds Chaleur de l'ADEME ;
- la saisie des résultats du TRT dans Dialog (SI-BSS) ;
- la saisie détaillée du TRT dans la base de données projet (sous ACCESS, MS Office) ;
- la retranscription des passes lithologiques (consolidation des descriptions des terrains forés) dans la classification lithologique du BRGM (<https://data.geoscience.fr/ncl/litho>) ;
- l'estimation de l'épaisseur moyenne de la zone non saturée au droit de la sonde pilote au regard des relevés piézométriques des points d'eau avoisinants (BSS) et de la cartographie (Allier, D., 2018) ;
- la détermination de l'altitude au droit de la sonde à partir du MNT au pas de 1 mètre du référentiel à grande échelle RGE ALTI® de l'IGN ;
- la recherche de la mention d'éventuels incidents, la vérification qualitative des données et de leur interprétation, pour valider la diffusion et les analyses qui pourront être réalisées.

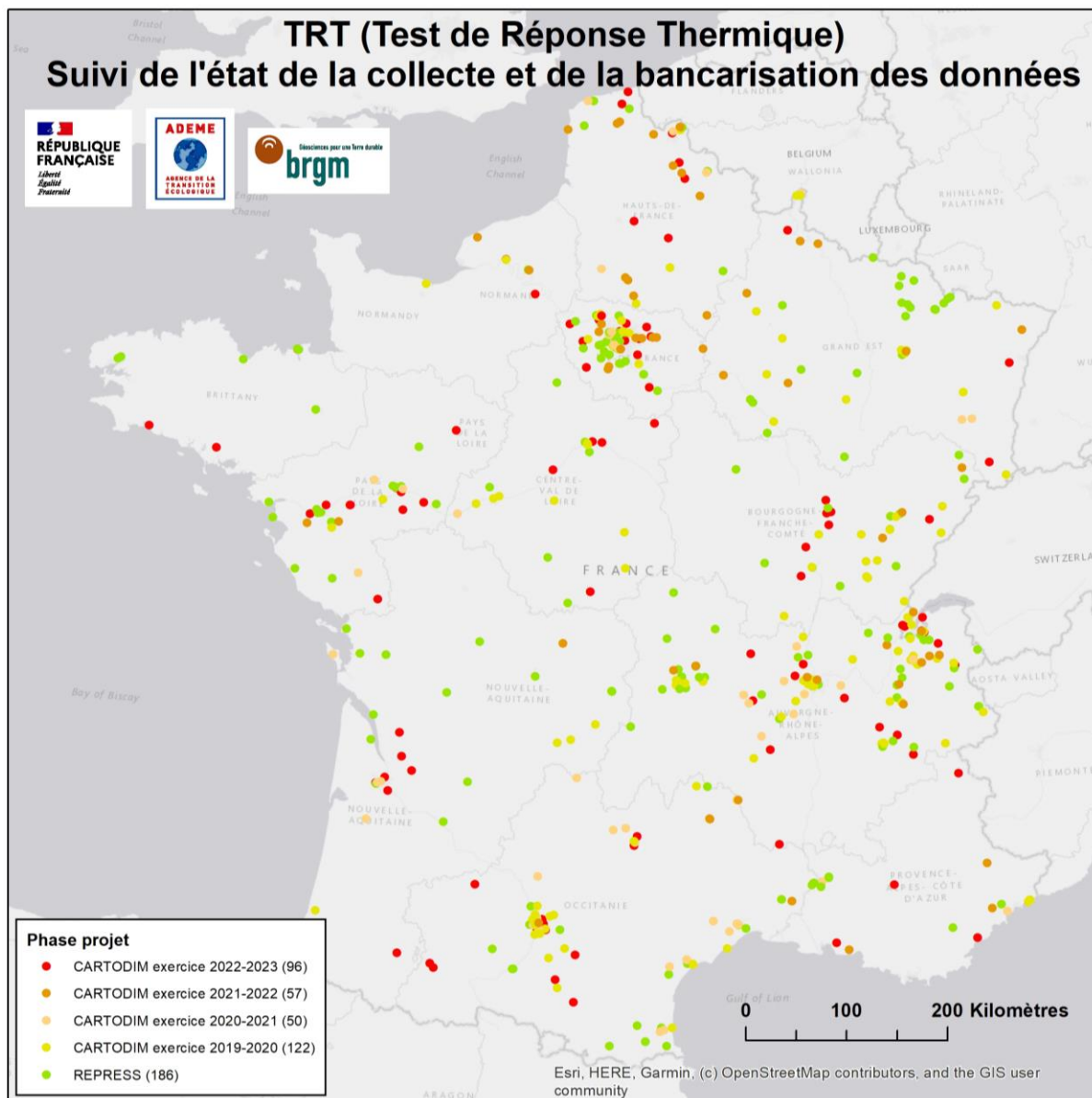


Figure 1 : Bilan de la bancarisation des TRT diffusés par phase de projet.

Cinq cent dix-huit (518) résultats de TRT sont à ce jour bancarisés. Néanmoins, 7 d'entre eux ne seront pas diffusés en raison d'échecs lors de leur réalisation, ce qui porte à 511 le nombre de résultats retenus pour une diffusion sur l'espace cartographique public (Figure 1).

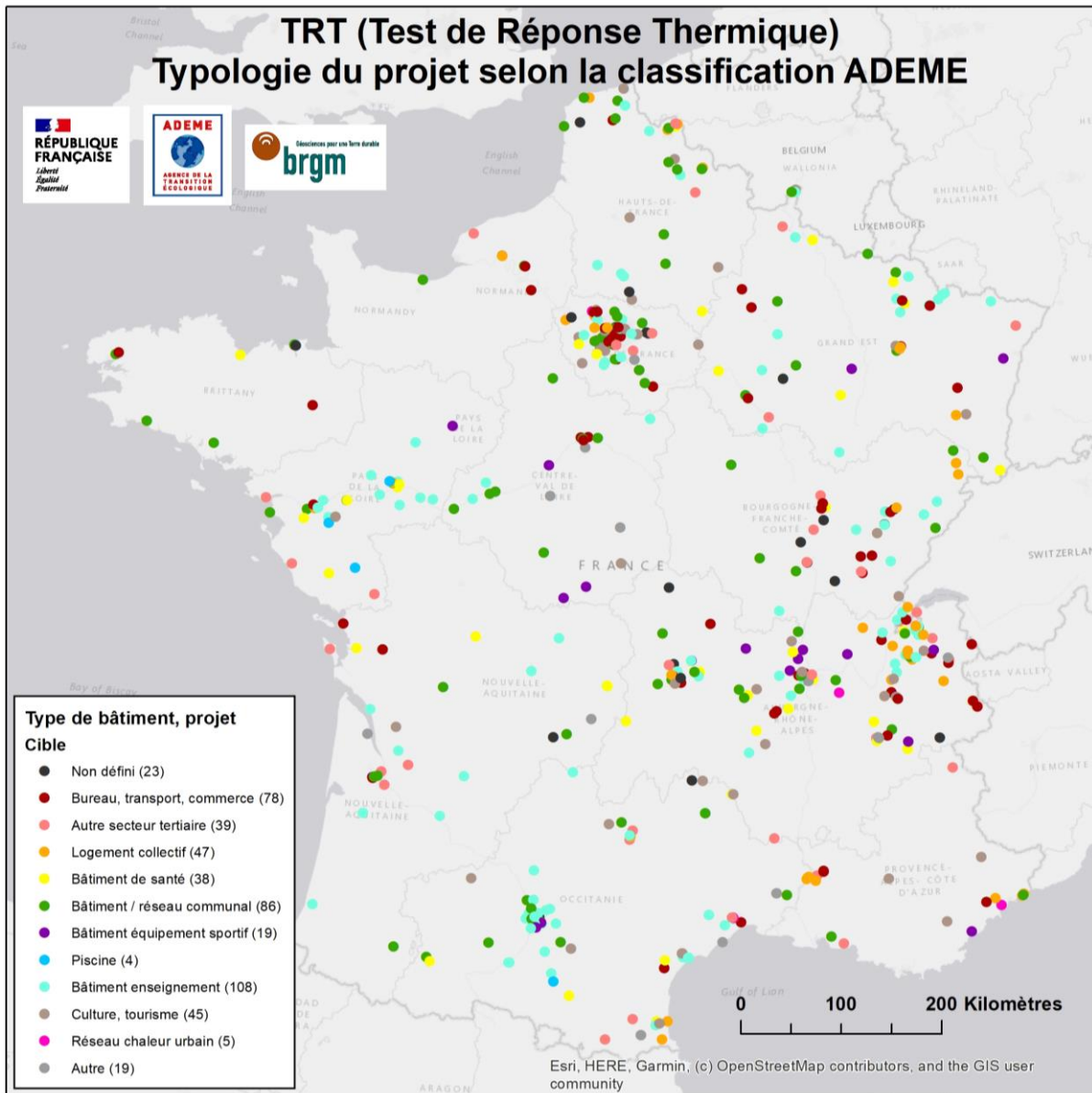


Figure 2 : Typologie du projet appliquée à l'ensemble des opérations avec TRT inventoriés, selon la classification ADEME (code « LISA »).

La classification par type de bâtiment/projet a été appliquée à l'ensemble des opérations reconnues dans cet inventaire, selon la classification (nomenclature « LISA ») de l'ADEME (Figure 2). Un nombre important de projets relève d'opérations publiques (plus de 200 sur les 415 identifiés), portées par les collectivités territoriales (réseau communal, enseignement, culture, équipements sportifs ...). La nature du projet reste inconnue pour 17 d'entre eux.

Le recouplement des projets en relation avec les dossiers Fonds Chaleur de l'ADEME, permet à ce stade de faire ressortir 116 dossiers. Quelques rapports de TRT très récents (fin 2021, début 2022) n'ont pas encore pu être recouplés avec l'inventaire transmis.

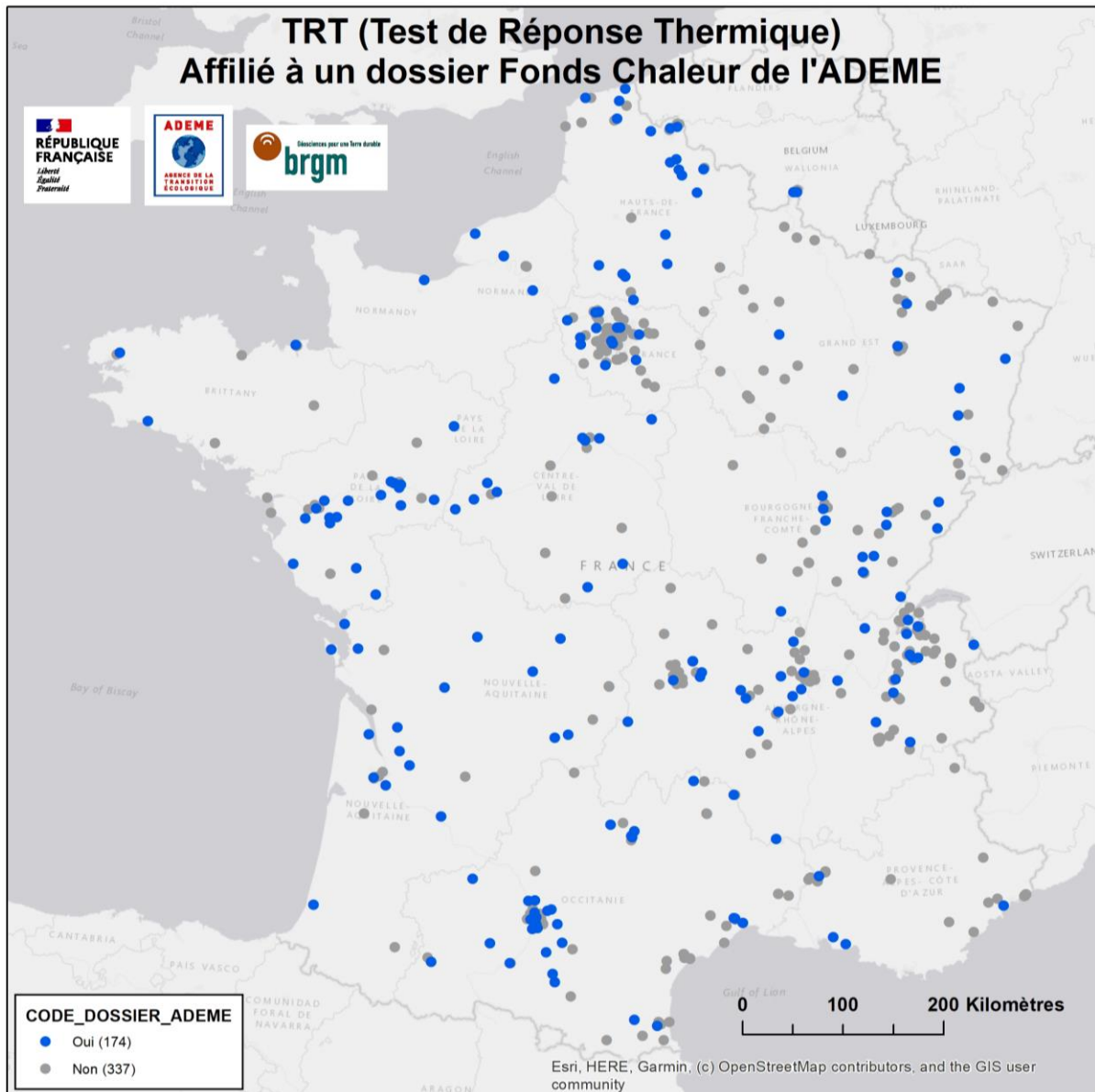


Figure 3 : Identification des TRT associés aux dossiers Fonds Chaleur portés par l'ADEME.

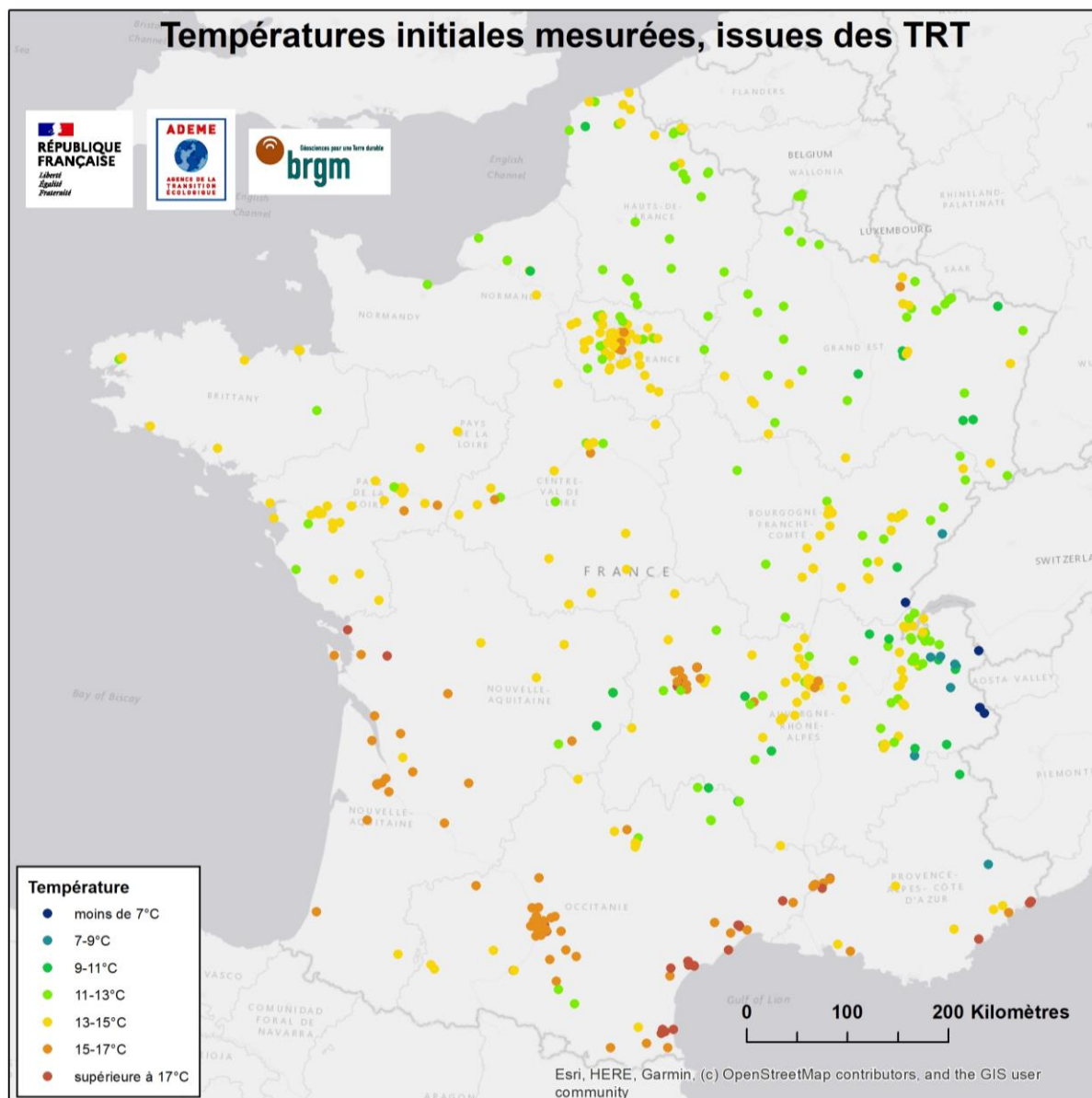


Figure 4 : Principaux résultats issus des TRT : température initiale du terrain.

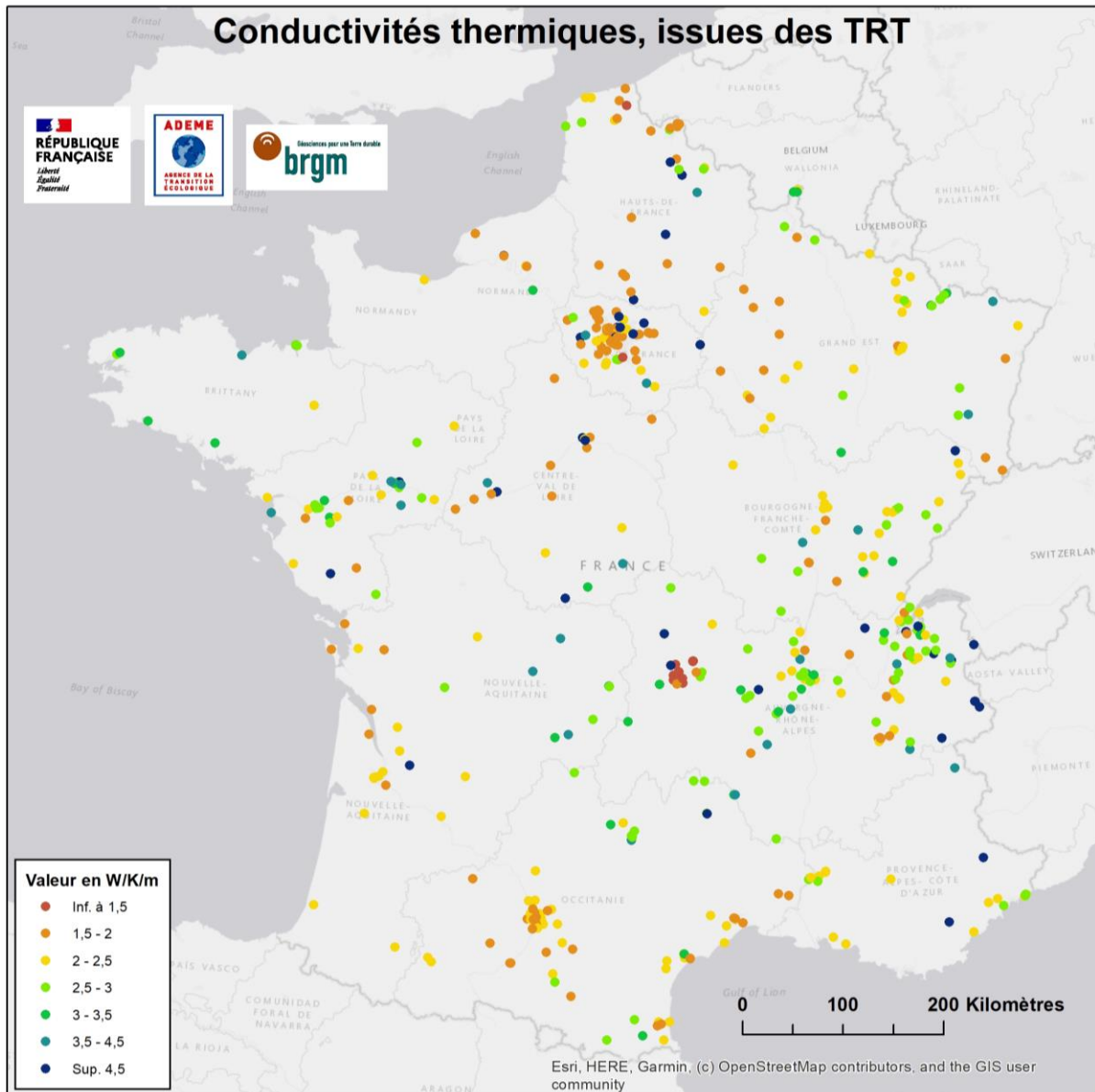


Figure 5 : Principaux résultats issus des TRT : conductivité thermique du terrain.

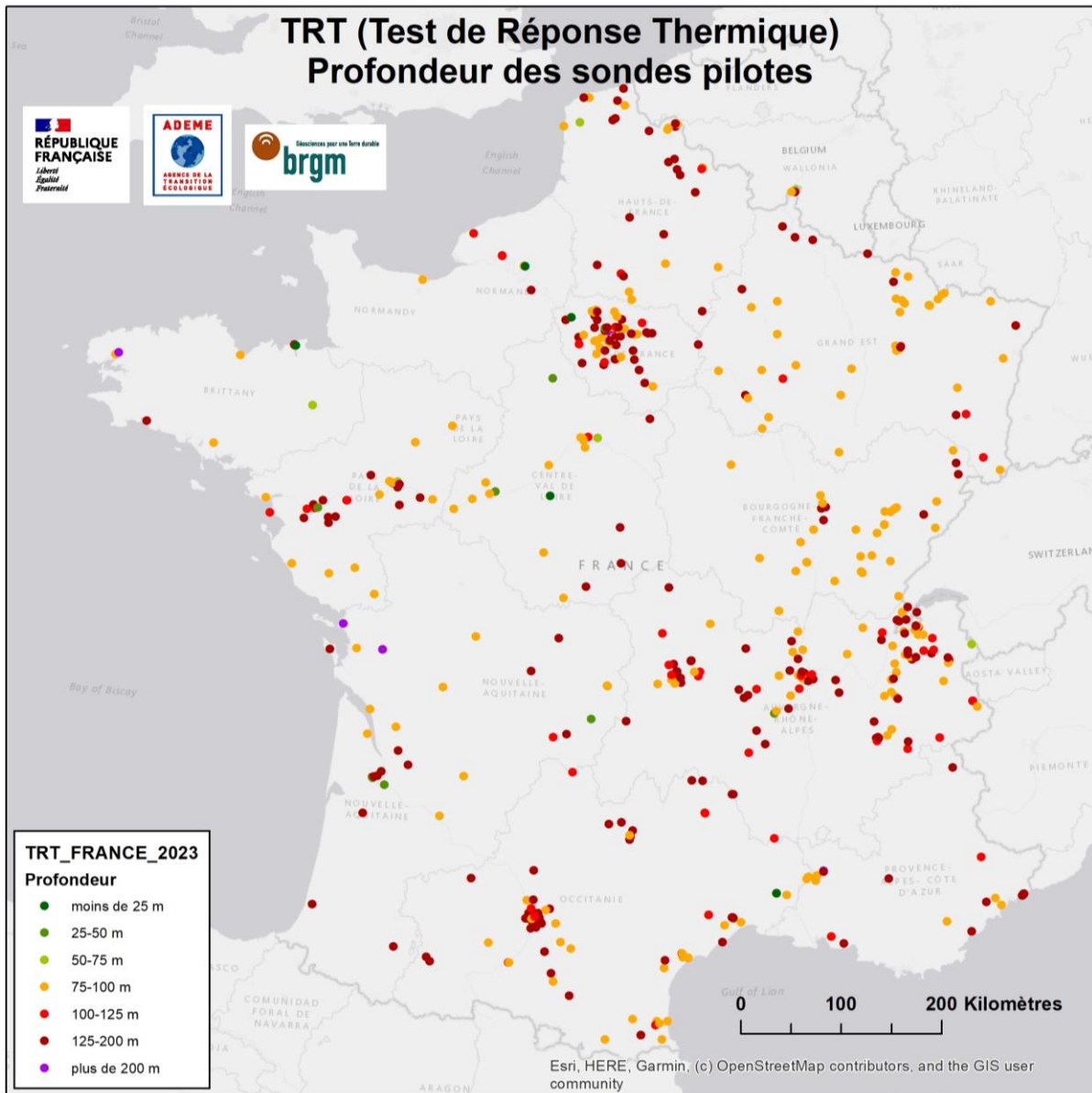


Figure 6 : Longueur des sondes équipant le forage.

À date, la longueur forée cumulée est de 64,1 km, ce qui représente 2 239 « passes » (c'est-à-dire couche lithologique traversée) et 507 forages. L'écart avec le nombre de TRT bancarisés (511) s'explique par le fait que quelques forages ont fait l'objet de plusieurs tests. En complément de l'exercice précédent, l'ensemble de la codification des passes a été revu et consolidé, dans la mesure où le registre lithologique a été mis à jour. La classification a été menée suivant les niveaux n° 2 à n° 4 des lexiques DIALOG (cf. Figure 7), le niveau n° 4 étant plus détaillé, et faisant apparaître des lithologies « usuelles » (calcaires, etc.).

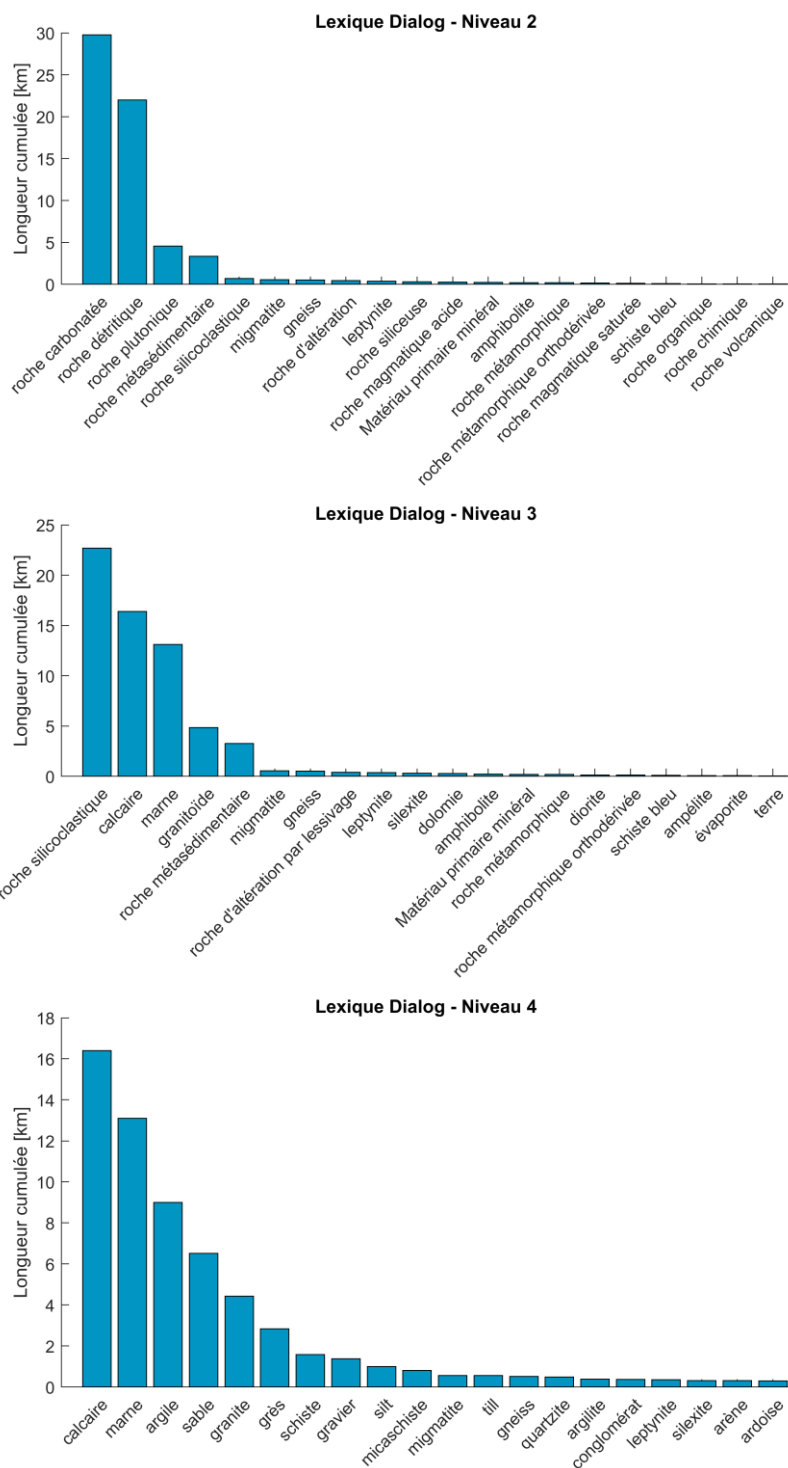


Figure 7 : Longueur cumulée par type de roche, suivant les niveaux n° 2, n° 3 et n° 4 du lexique Dialog.

1.2. ANALYSE DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DU TERRAIN TRAVERSÉ

Dans le cadre du projet 2018 REPRESS (Maragna *et al.*, 2019), un polynôme avait été établi afin d'estimer la température initiale T_0 en fonction de 4 variables :

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

Dans le cadre de cet exercice, une approche alternative a été mise en œuvre pour prédire T_0 en fonction de ces 4 variables. On a utilisé une approche non-paramétrique, c'est-à-dire ne nécessitant pas de supposer une relation *a priori* entre les données d'entrées et la sortie, comme une relation polynomiale. Plus spécifiquement, on a utilisé des Processus Gaussiens (PG ou krigeage) pour leur grande flexibilité (Roustant *et al.*, 2012). D'un point de vue plus technique, une fonction de base constante (c'est-à-dire du krigeage simple) associé au kernel Matérn3/2 avec une longueur de prédiction indépendante pour chaque variable a été utilisé. La qualité de la prédiction est estimée au moyen d'une validation croisée : cette procédure consiste à ajuster un méta-modèle sur un échantillon de taille $(1-1/n)$ (ici avec $n = 5$) et à tester la qualité de la prédiction sur l'échantillon-témoin complémentaire de taille $1/n$. La procédure est répétée n fois en permutant les échantillons témoin. La qualité du méta-modèle est estimée au moyen de l'écart-type $\sigma(T_0)$:

$$\sigma(T_0) = \left(\sum_{i=1}^N \frac{[(T_0)_{données} - (T_0)_{prédiction}]^2}{N} \right)^{1/2} \quad (1)$$

On a comparé le processus gaussien à un nouveau polynôme ajusté sur l'ensemble des données disponibles à date (soit $N = 507$ données). La prédiction par le PG est légèrement meilleure que celle par le polynôme, comme en témoigne l'écart-type $\sigma(T_0) = 0,90$ °C contre $\sigma(T_0) = 1,00$ °C. En revanche, la supériorité du PG sur le polynôme réside dans le nombre réduits d'*outliers*, c'est-à-dire les points où la prédiction s'éloigne significativement de la donnée (cf. Figure 8). À la différence du polynôme, le PG est capable de capturer des variations très localisées de T_0 , en particulier l'anomalie thermique positive bien documentée dans le bassin de la Limagne autour de Clermont-Ferrand (Genter *et al.*, 2003) (cf. Figure 9).

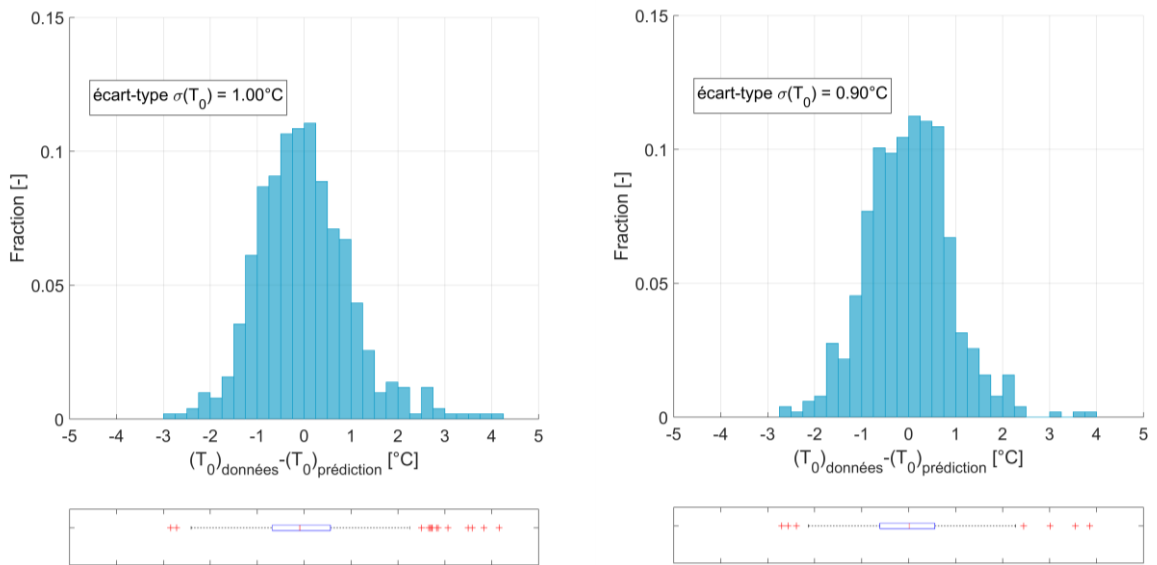


Figure 8 : Distribution de l'écart entre données de température initiale T_0 et prédiction pour le polynôme (à gauche) et le processus gaussien (à droite).

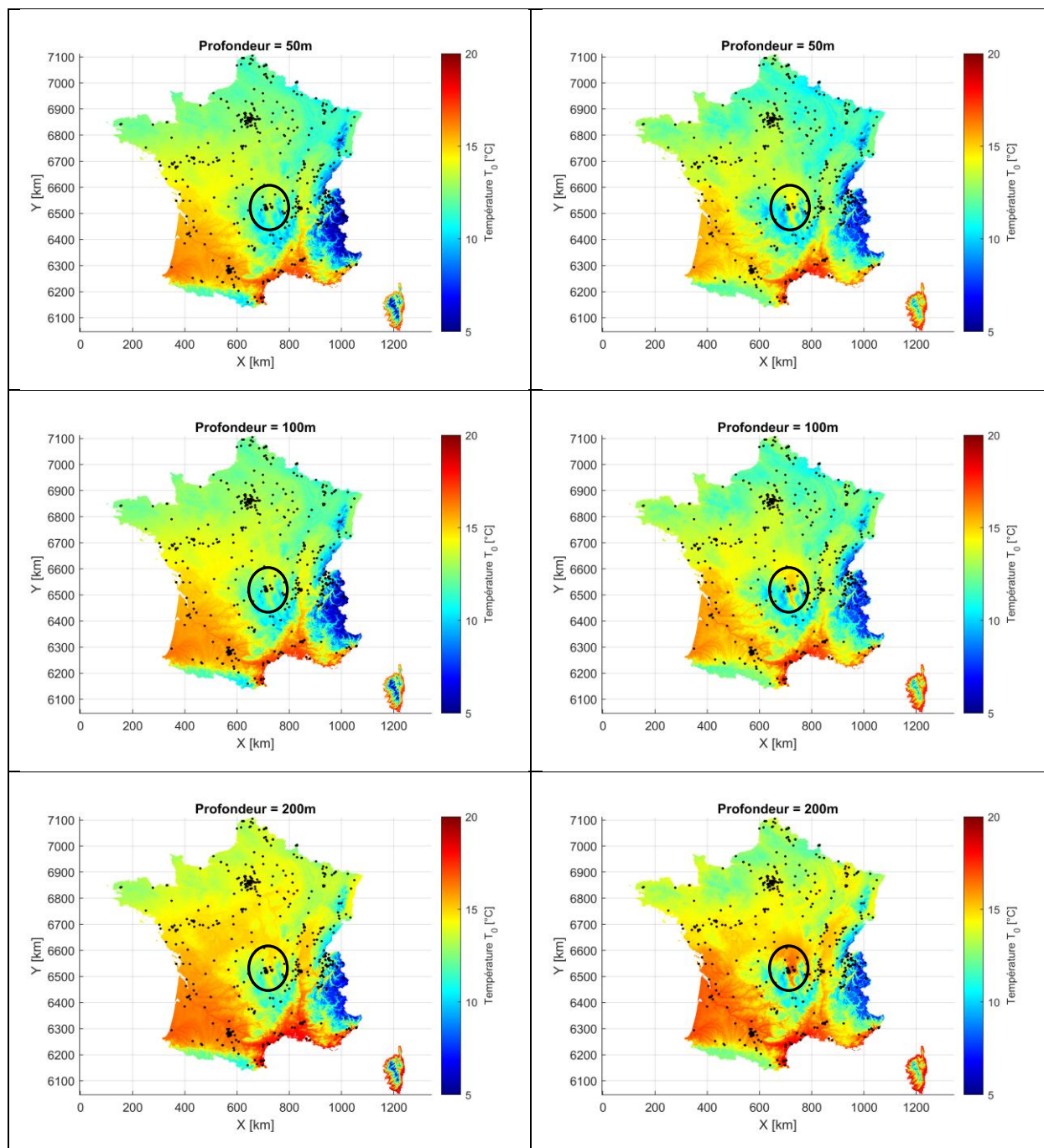


Figure 9 : Cartes de température initiale T_0 pour une sonde profonde de 50, 100 ou 200 m obtenus par le polynôme (colonne de gauche) ou le processus gaussien (colonne de droite). L'ellipse noire est centrée sur le bassin de la Limagne.

2. Maintenance et amélioration de l'outil

L'outil de dimensionnement en ligne a bénéficié d'améliorations qui concernent ses fonctionnalités et son fonctionnement. L'ensemble de ces améliorations portent sur le module « Champ de sondes ». À la date de rédaction de ce rapport, ces améliorations sont en développement dans « l'environnement de recettes » mais ne sont pas encore disponibles en production.

2.1. MIGRATION DE DRUPAL V7 À DRUPAL V9

L'outil de dimensionnement est intégré au site de la plateforme géothermie du BRGM <https://plateforme-geothermie.brgm.fr/fr>. Ce site était développé dans le logiciel Drupal 7, qui ne sera bientôt plus maintenu, sa fin de vie étant actuellement prévue au 1^{er} novembre 2023 ¹. Il a donc été nécessaire de transférer l'intégralité du code de l'interface graphique de Drupal 7 à Drupal 9, ce qui a représenté une part non négligeable des ressources allouées à la tâche n° 2.

2.2. CHOIX DE LA LOI D'EAU

L'utilisateur a maintenant la possibilité de soumettre une loi d'eau (fichier csv ou Excel), c'est-à-dire une relation entre la température de départ dans le circuit du chauffage du bâtiment et la température de l'air extérieur. Le fichier doit contenir deux colonnes : la première colonne donne les températures extérieures, et la seconde colonne donne les températures de départ émetteur correspondantes. L'utilisateur peut toujours choisir une des trois lois proposées par défaut. L'utilisateur peut visualiser la loi au moment de la soumission (cf. Figure 10).

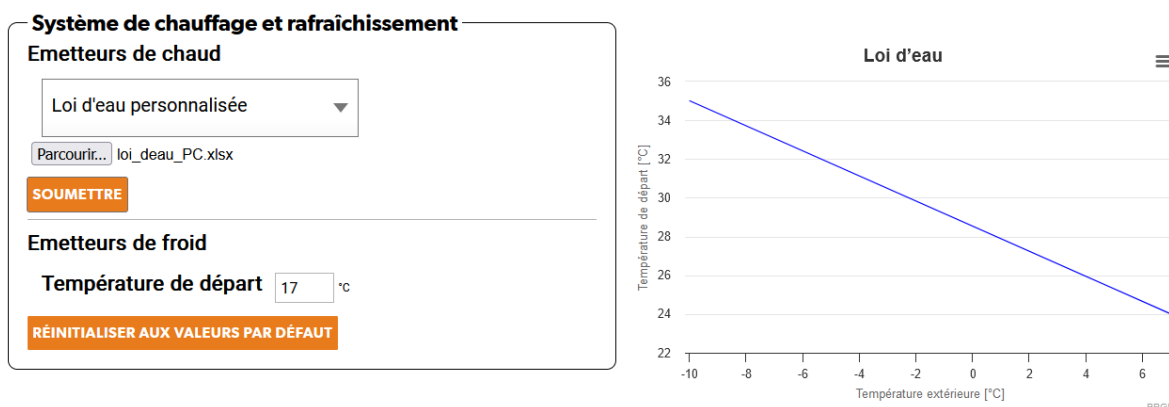


Figure 10 : Interface de saisie de la loi d'eau.

¹ <https://www.drupal.org/psa-2022-02-23>

2.3. CALCUL DE LA TEMPÉRATURE INITIALE DU TERRAIN

L'utilisateur a maintenant la possibilité d'estimer la température initiale T_0 en saisissant les coordonnées géographiques (latitude et longitude) de son installation (cf. Figure 11). L'altitude est calculée par le webservice de calcul altimétrique REST de l'IGN ². Le modèle de T_0 utilisé est le polynôme développé dans cadre du projet 2018 REPRESS ajusté sur 173 résultats de TRT répartis à travers toute la France (Maragna *et al.*, 2019). La qualité de ce modèle est légèrement inférieure à celle du Processus Gaussien présenté au §1.2 du présent rapport ($\sigma(T_0) = 1,08$ °C vs. 0,90 °C), en particulier dans la plaine de la Limagne. Cependant, l'implémentation du polynôme dans le cœur de calcul développé en Python s'est avérée bien plus aisée que l'intégration du Processus Gaussien.

The screenshot shows a web form titled "Terrain". Under the heading "Température initiale", there is a dropdown menu currently showing "Inconnue : estimation géographique". Below this are two input fields: "Latitude" with the value "48.87" and a small "* décimaux" label, and "Longitude" with the value "2.47" and a similar label. An orange button labeled "SOUMETTRE" is positioned below the inputs. Underneath the button, there are two output fields: "Altitude estimée" followed by a small "m" unit, and "Température initiale du sol estimée :" followed by a small "°C" unit. Red circles highlight the "m" and "°C" units in the original image.

Figure 11 : Interface de calcul de la température initiale T_0 en fonction des coordonnées géographiques (latitude et longitude).

2.4. CALCUL DE LA RÉSISTANCE THERMIQUE DU FORAGE

Claesson et Javed ont développé une équation donnant la résistance thermique R_b [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$] d'une sonde géothermique double-U en fonction de ses paramètres thermophysiques et géométriques (Claesson *et al.*, 2019). L'intérêt est que cette méthode découle d'une simplification de la méthode du multipôle implémentée dans le logiciel de référence EED, tout en en conservant sa robustesse. Cette équation a été implémentée en Python. Dans le futur, l'interface graphique intégrera une interface de calcul de R_b .

² <https://geoservices.ign.fr/documentation/services/api-et-services-ogc/calcul-altimetrique-rest>

3. Formation à l'outil

Dix sessions de formation à l'outil ont été dispensées (cf. Tableau 1), ce qui concerne près de 90 personnes. Il s'agit majoritairement de membres de bureaux d'étude énergie et fluide (pour environ deux tiers) ou sous-sol (pour un tiers environ). Les deux sessions organisées à Lyon l'ont été à la demande de Auvergne-Rhône-Alpes Énergie Environnement et s'adressaient aussi à des relais énergie locaux. Toutes les autres formations ont été organisées par le BRGM, et l'information diffusée sur le site hébergeant l'outil de dimensionnement.

Chaque session dure environ 3h30. Elle débute par un rappel des différentes catégories de géothermie de surface et par une mise en garde : la formation ne traite que du dimensionnement thermique du champ de sondes. La prise en compte des contraintes réglementaires, le nécessaire interfaçage entre maître d'ouvrage, BE sous-sol et surface, l'interprétation du test de réponse thermique ne sont pas pris en compte. Puis les principes physiques de l'outil (simulation dynamique du système au pas de temps horaire reposant sur des fonctions analytiques) sont simulés, avec les sources de données disponibles pour estimer les principaux paramètres (conductivité thermique et température initiale du terrain, etc.). Enfin, une étude de cas permet de procéder à un dimensionnement et d'étudier l'influence de paramètres : implantation des forages, propriétés thermiques du terrain, taux de couverture de la PAC, etc.

Mode	Région	Nombre de sessions	Date	Public ciblé	Nombre de participants	Objet
En ligne	France entière	1	05-juil	BE	10	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	07-juil	BE	10	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	11-juil	BE	9	Champ de sondes
Présentiel	Auvergne-Rhône-Alpes	2	5-6 octobre	BE et relais énergie	20	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	16-janv	BE	12	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	18-janv	BE	5	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	23-janv	BE	7	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	26-janv	BE	6	Champ de sondes
En ligne	France entière	1	02-févr	BE	9	Champ de sondes

Tableau 1 : Résumé des formations dispensées.

4. Conclusion

À fin mars 2023, 511 des résultats de TRT sont diffusés en ligne sur le site www.geothermies.fr. L'interface de la plateforme de dimensionnement de champs de sondes a été améliorée. L'utilisateur peut maintenant charger sa propre loi d'eau et calculer la température initiale du terrain en fonction des coordonnées géographiques de son projet. Près de 90 professionnels ont été formés à cet outil lors de 10 sessions de formation.

5. Bibliographie

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 sur la France Métropolitaine. Rapport BRGM/RP-68354-FR.

Claesson, J., Javed, S. (2019). Explicit multipole formulas and thermal network models for calculating thermal resistances of double U-pipe borehole heat exchangers. *Science and Technology for the Built Environment* 25, 980–992. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1620565>.

Genter, A., Giot, D., Lieutenant, N., Nehlig, P., Rocher, P., Roig, J.-Y., Chèvremont, P., Guillou-Frottier, L., Martelet, G., Bitri, A., Perrin, J., Serrano, O., Courtois, N., Vigouroux, P., Négrel, P., Serra, H., Petelet-Giraud, E. (2003). Méthodologie de l'inventaire géothermique des Limagnes : Projet COPGEN. Compilation des données. (BRGM/RP-52644-FR). BRGM.

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., 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.

Roustant, O., Ginsbourger, D., Deville, Y. (2012). DiceKriging, DiceOptim: Two R Packages for the Analysis of Computer Experiments by Kriging-Based Metamodeling and Optimization. *Journal of Statistical Software* 51, 1–55. <https://doi.org/10.18637/jss.v051.i01>.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

Direction Géoressources

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm