



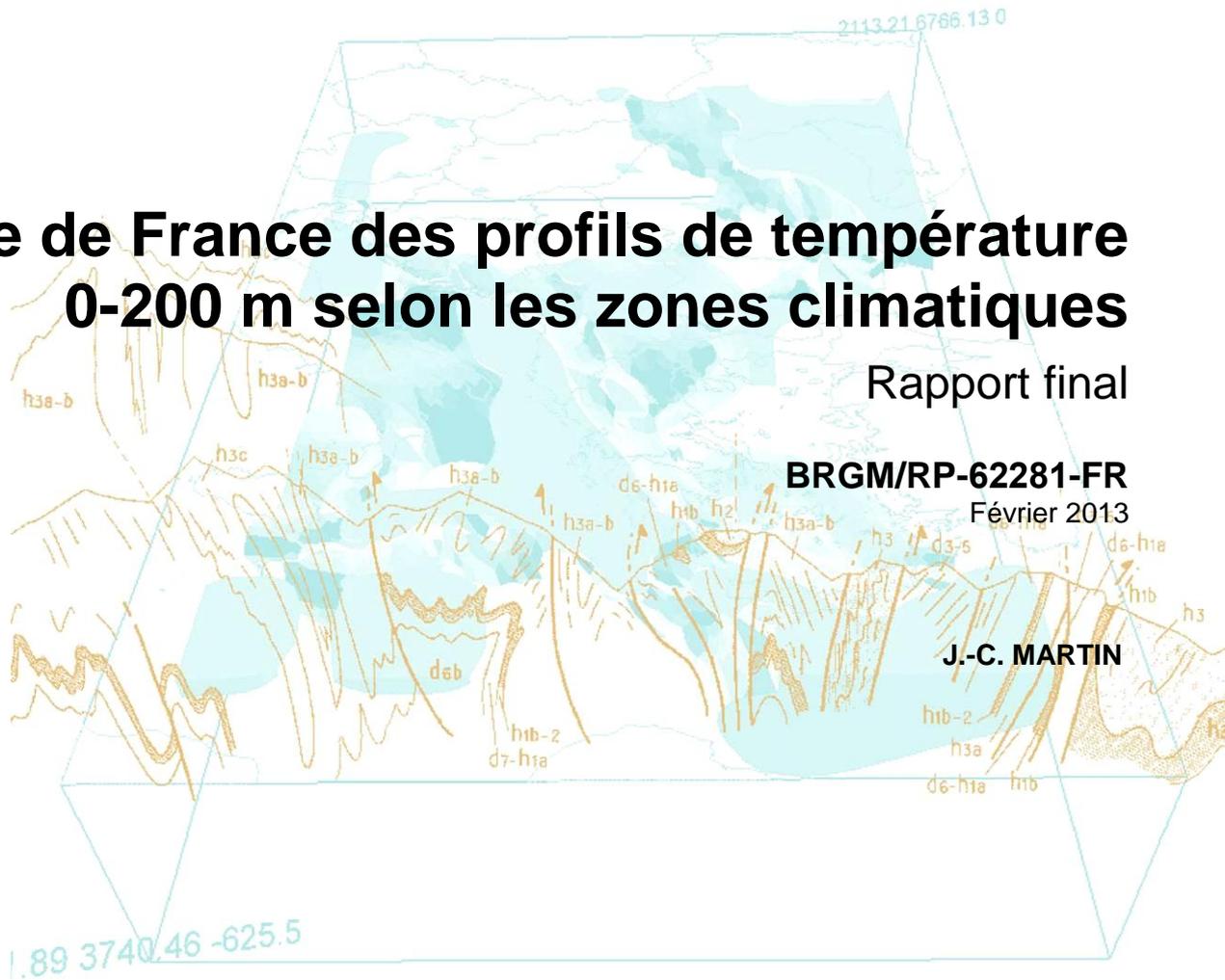
Carte de France des profils de température 0-200 m selon les zones climatiques

Rapport final

BRGM/RP-62281-FR

Février 2013

J.-C. MARTIN



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM.

Ce document a été vérifié par : Romain Vernier date : 26/05/2014

Approbateur :

Nom : Romain VERNIER

Date : 26/05/2014

Signature :



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

Mots-clés : Géothermie, Température, Gradient géothermique, Minime importance, Zone climatique, RT2012.

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

Martin J.-C. (2013) - Carte de France des profils de température 0-200 m selon les zones climatiques. Rapport final. BRGM/RP-62281-FR, 17 p., 11 fig., 3 tabl.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Dans le cadre des réflexions menées par la commission RT2012, le BRGM a été interrogé pour fournir des éléments sur la température moyenne des aquifères superficiels, qui servent à alimenter les PAC et dont la température a un impact sur le COP de la PAC. Le but est de prendre une température représentative dans les calculs de la réglementation thermique.

L'objet de ce rapport est de fournir une température moyenne par « zone climatique » de la RT2012 (huit zones en France). Les données initiales retenues pour cette approche sont les températures mesurées *in situ* lors des analyses chimiques des eaux des captages d'eau potable. Ces données sont disponibles dans la banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines).

Un échantillon de 3 851 couples température/profondeur a été sélectionné, sur lequel a porté l'étude des données de température qui a permis de dresser un bilan du gradient géothermique de la tranche 0 à 200 m, en différenciant chacune des huit zones climatiques de la RT 2012.

Le premier constat est, qu'à l'échelle de toute la France, les températures sont relativement constantes sur les 100 premiers mètres. Ce n'est qu'à partir d'une centaine de mètres que l'on voit une légère inflexion des gradients de température. Dans la tranche 0 à 200 m, les températures sont comprises pour l'essentiel entre 11 et 15 °C, sans qu'il soit possible d'affirmer que l'augmentation de température ne dépend que de la profondeur.

Le second constat, auquel l'étude aboutit, est de mettre en évidence des zones climatiques « froides », situées principalement sur la partie nord de la France, et des zones climatiques « chaudes » situées sur la partie la plus méridionales. L'écart de température entre ces zones « froides » et « chaudes » est important puisqu'il atteint près de 4 °C.

Cet écart reflète l'influence climatique sur la température du sous-sol. La température des 100 ou 200 premiers mètres du sous-sol reflète la température moyenne annuelle extérieure, le gradient géothermique n'apparaissant qu'au-delà de cette profondeur.

Sommaire

1. Introduction	6
2. Les données de température issue de la banque ADES	7
2.1. EXTRACTION DES TEMPÉRATURES DE LA BANQUE ADES	7
2.2. RECHERCHE DES PROFONDEURS DES FORAGES DANS LA BSS DU BRGM	7
3. Profil de température selon les zones climatiques.....	9
3.1. STATISTIQUES POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES.....	9
3.2. CLASSEMENT PAR ZONE CLIMATIQUE	11
3.3. PROFIL DE TEMPÉRATURE PAR ZONE.....	14
3.4. INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURE	14
4. Conclusion.....	17

Liste des tableaux

Tableau 1 - Nombre de forages par tranche de profondeur et corrélation température/ profondeur. Échantillon des 9 172 points croisés ADES/BSS.....	7
Tableau 2 - Corrélation température/profondeur par tranche de profondeur	9
Tableau 3 - Valeur moyenne des altitudes, des profondeurs et des températures selon la zone climatique (échantillon de 8 531 points).....	15

Liste des figures

Figure 1 - Localisation des 9 172 forages dont on possède la température et la profondeur (profondeur des forages comprise entre 0,3 et 900 m).....	8
Figure 2 - Diagramme température / profondeur (pour des profondeurs de 0 à 900 m).....	8
Figure 3 - Diagramme température / profondeur (pour des profondeurs de 0 à 200 m).....	9
Figure 4 - Diagramme température / profondeur.....	10
Figure 5 - Histogramme de profondeur des 8 531 forages.....	10
Figure 6 - Localisation des forages sur une carte de France des zones climatiques	11

Figure 7 - L'analyse statistiques, par la méthode des boîtes à moustache de Tukey, des couples température/profondeur groupés par zone géographique.....	12
Figure 8 - Diagramme température/profondeur de chacun des groupes des 8 zones climatiques.....	13
Figure 9 - Diagramme température/profondeur selon la zone climatique considérée.	14
Figure 10 - Diagramme température / altitude de la tête de forage	15
Figure 11 - Corrélation altitude/profondeur/température.....	16

1. Introduction

Le bureau de l'Association Française des Professionnels de la Géothermie (AFPG) a décidé la création de trois commissions d'orientation sur trois grands thèmes.

Ces commissions traiteront principalement de la production de chaleur et de froid, et s'organiseront de la manière suivante pour 2013 :

- RT2012 ;
- Fonds Chaleur, Crédit d'impôts, Fiscalité écologique ;
- Réforme Code Minier, projet décret « loi Warsmann ».

Ces commissions ont pour objet de préparer des feuilles de route précises, afin de pouvoir présenter aux publics et à l'administration des propositions consensuelles.

Le BRGM participe à ces commissions avec l'AFPAC, le SFEG, l'ADEME, le SER, et l'AFPG.

Dans le cadre des réflexions menées par la commission RT2012, le BRGM a été interrogé pour fournir des éléments sur la température moyenne des aquifères superficiels, qui servent à alimenter les PAC et dont la température a un impact sur le COP de la PAC. Le but est de prendre une température représentative dans les calculs de la réglementation thermique.

L'objet de ce rapport est de fournir une température moyenne par « zone climatique » de la RT2012 (huit zones en France). Les données initiales retenues pour cette approche sont les températures mesurées *in situ* lors des analyses chimiques des eaux des captages d'eau potable. Ces données sont disponibles dans la banque ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines).

2. Les données de température issue de la banque ADES

2.1. EXTRACTION DES TEMPÉRATURES DE LA BANQUE ADES

ADES est la banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines qui rassemble sur un site internet public www.ades.eaufrance.fr des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Parmi ces données, il est possible d'y trouver les données des analyses chimiques des eaux des forages d'eau potable. Ces analyses chimiques sont réalisées régulièrement. Chaque prélèvement est précédé d'une mesure *in situ* de la température de l'eau en sortie de forage. Ces températures ne représentent pas forcément la température de gisement, mais la température d'exploitation telle qu'elle sera utilisée en surface par un système de chauffage par pompe à chaleur.

L'interrogation de la banque ADES a permis d'obtenir 281 887 enregistrements d'analyses chimiques. Sur ce total, on dispose de 167 144 mesures de température *in situ*, comprises entre 6 et 50 °C, réalisées sur 21 361 forages. Les forages pouvant disposer chacun de plusieurs mesures de température, il a été retenu pour chaque forage la valeur moyenne des températures mesurées sur chacun d'eux.

2.2. RECHERCHE DES PROFONDEURS DES FORAGES DANS LA BSS DU BRGM

Chaque enregistrement ADES possède, comme identifiant, l'indice BSS du point de la mesure. Il a été ainsi possible d'associer à chaque mesure de température les coordonnées géographiques et la profondeur du forage dont les informations sont disponibles dans la BSS du BRGM.

Sur les 21 361 forages ayant une mesure de température, on connaît la profondeur de 9 172 d'entre eux dont la profondeur est comprise entre 0,3 et 900 m. La position de ces 9 172 points est indiquée sur l'illustration 1.

On a représenté sur l'illustration 2 le diagramme température/profondeur de ces données, rangées selon trois classes de profondeur.

Profondeur (m)	Nombre de points	Coefficient de corrélation
0 - 100	7 597	0,03
100 - 200	1 041	0,27
200 - 900	534	0,57

Tableau 1 - Nombre de forages par tranche de profondeur et corrélation température/profondeur. Échantillon des 9 172 points croisés ADES/BSS.

Pour l'essentiel, les forages (83 %) ont une profondeur inférieure à 100 m. Le coefficient de corrélation température/profondeur est très faible pour les forages de moins de 100 m de profondeur (0,03). Ce coefficient augmente légèrement pour les forages compris entre 100 et 200 m (0,27), et ne commence à être significatif qu'au-delà de 200 m, où on observe une inflexion du gradient de température. Ce résultat

s'explique principalement par les fortes perturbations qui sont proches de la surface (modifications des conditions climatiques, circulation des eaux superficielles, etc.).

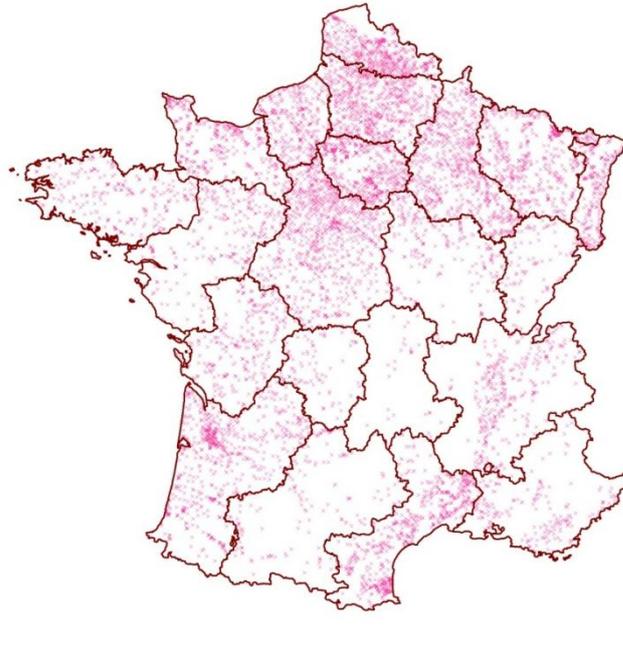


Figure 1 - Localisation des 9 172 forages dont on possède la température et la profondeur (profondeur des forages comprise entre 0,3 et 900 m).

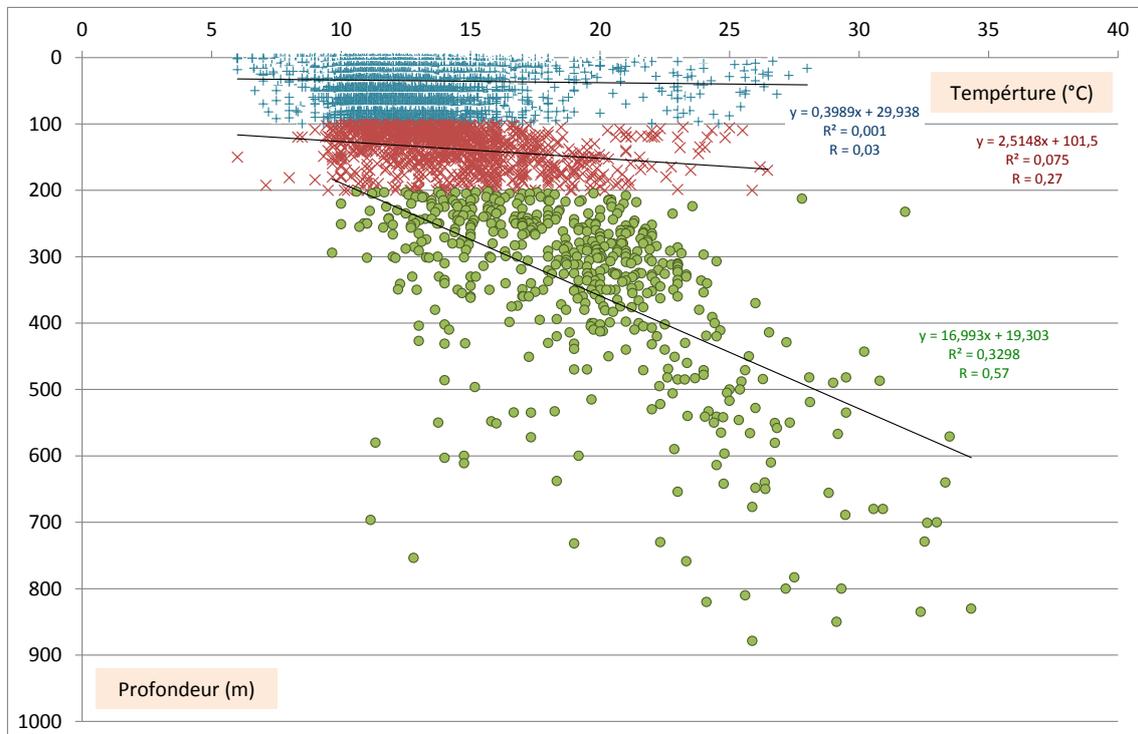


Figure 2 - Diagramme température / profondeur (pour des profondeurs de 0 à 900 m).

Pour la suite de l'étude on s'attachera à étudier les variations de température dans la tranche 0-200 m.

3. Profil de température selon les zones climatiques

3.1. STATISTIQUES POUR L'ENSEMBLE DES DONNÉES

De l'échantillon précédent, et dans la tranche 0 à 200 m, on dispose de 8 531 points pour lesquelles les coordonnées géographiques sont bien déterminées, et sur lesquels portera l'analyse statistique présentée ci-dessous. On a reporté sur les illustrations 3 et 4, les diagrammes température/profondeur de ces points.

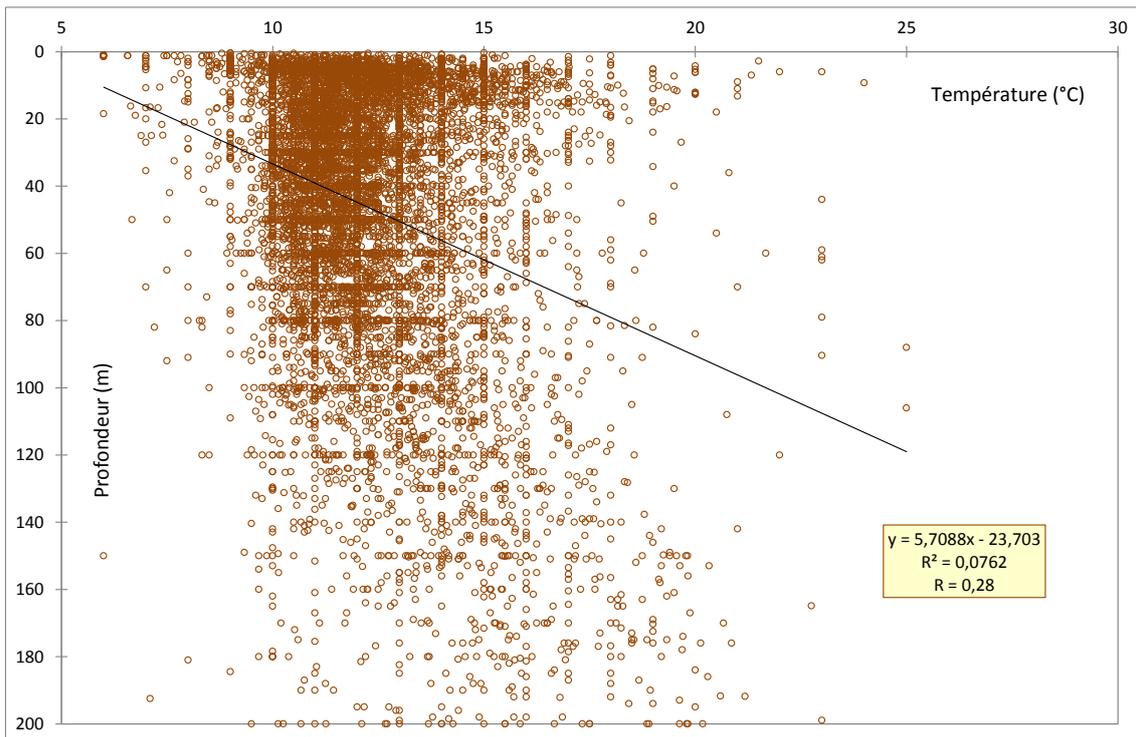


Figure 3 - Diagramme température / profondeur (pour des profondeurs de 0 à 200 m).

Pour l'ensemble de l'échantillon considéré, les valeurs moyennes sont les suivantes :

- profondeur moyenne = 46,8 m ;
- température moyenne = 12,3 °C.

Le coefficient de corrélation température/profondeur diffère selon la profondeur considérée comme le montre le tableau ci-dessous :

Profondeur (m)	Coefficient de corrélation
0 - 200	0,28
0 - 80	0,04
80 - 200	0,48

Tableau 2 - Corrélation température/profondeur par tranche de profondeur (échantillon de 8 51 points).

Carte des températures 0-200 m

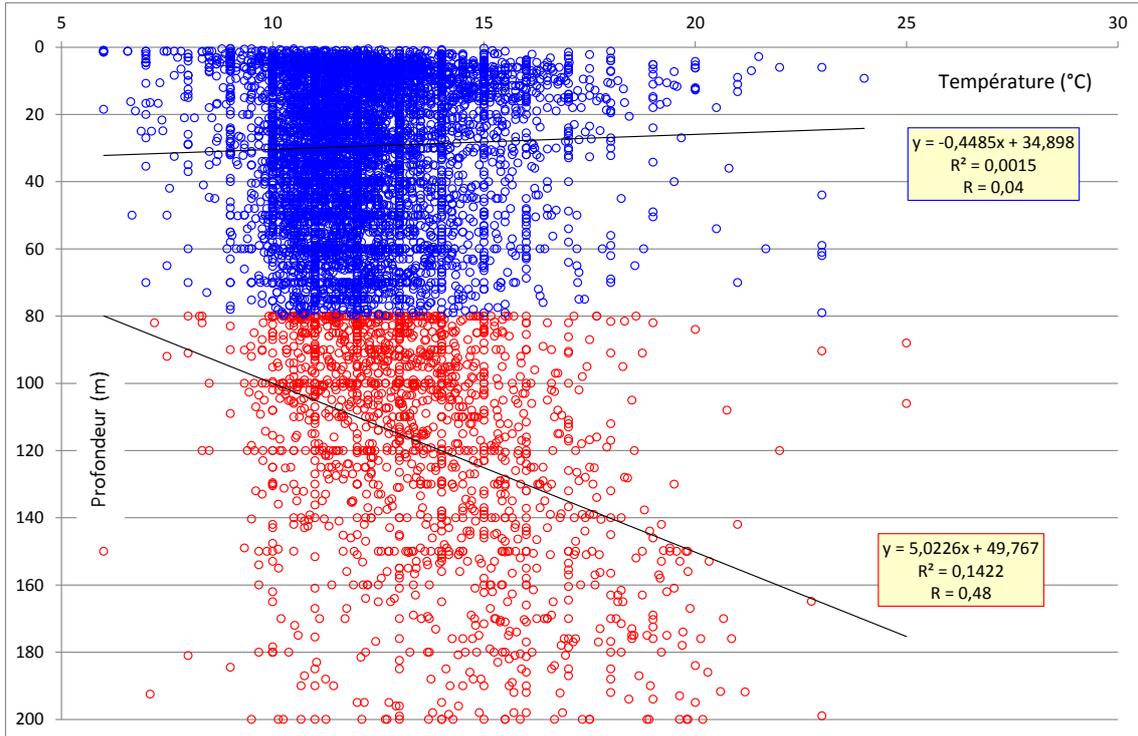


Figure 4 - Diagramme température / profondeur (pour des profondeurs de 0 à 80 m et de 80 à 200 m).

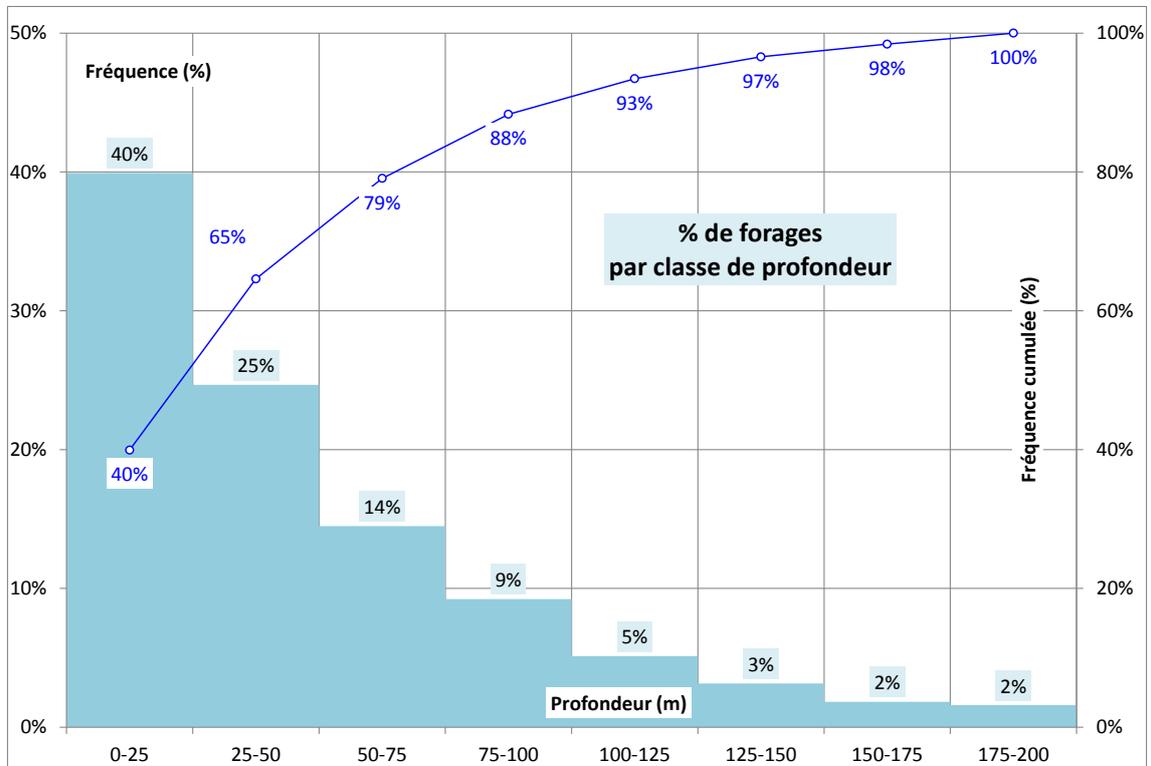


Figure 5 - Histogramme de profondeur des 8 531 forages.

Ces résultats montrent que proche de la surface (tranche 0 à 80 m de profondeur), il n'y a pas, ou très peu, de corrélation observée entre la température et la profondeur des forages, et qu'il est difficile de prévoir la température de l'eau souterraine uniquement à partir de la profondeur des ouvrages.

On présente sur la figure 5, l'histogramme des profondeurs des 8 531 forages étudiés. La répartition des points sur la profondeur est loin d'être régulière puisque 88 % des forages étudiés ont une profondeur inférieure à 100 m, et on ne dispose que de 7 % des forages avec une profondeur comprise entre 125 et 200 m. Ce schéma montre à quel point le sous-sol de la France est peu exploité et peu connu au-delà de 100 m de profondeur.

3.2. CLASSEMENT PAR ZONE CLIMATIQUE

Les points mesurés ont été reportés sur une carte de France avec les huit zones climatiques de la RT2012.

On présente sur l'illustration 6 les résultats de l'analyse statistique, par la méthode des boîtes à moustache de Tukey, des couples température/profondeur groupés par zone géographique.

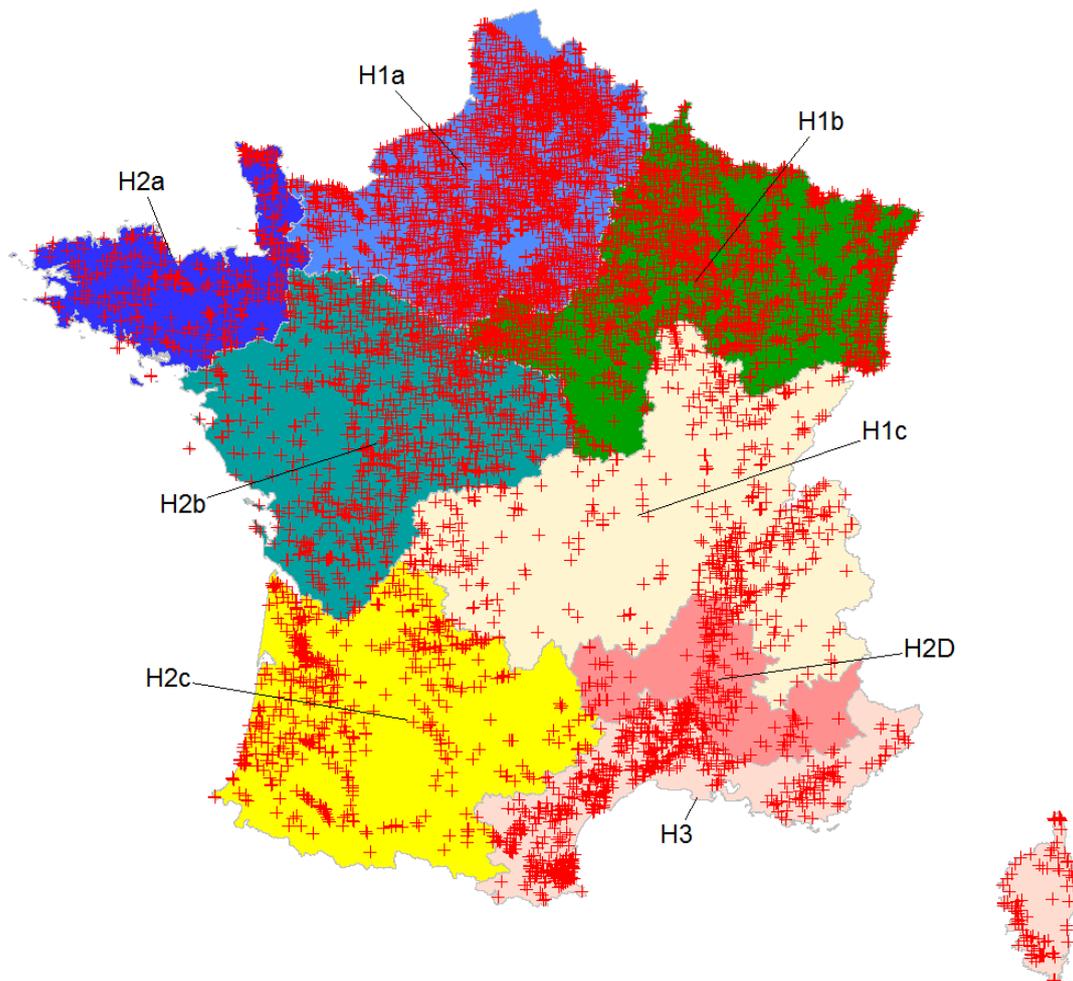
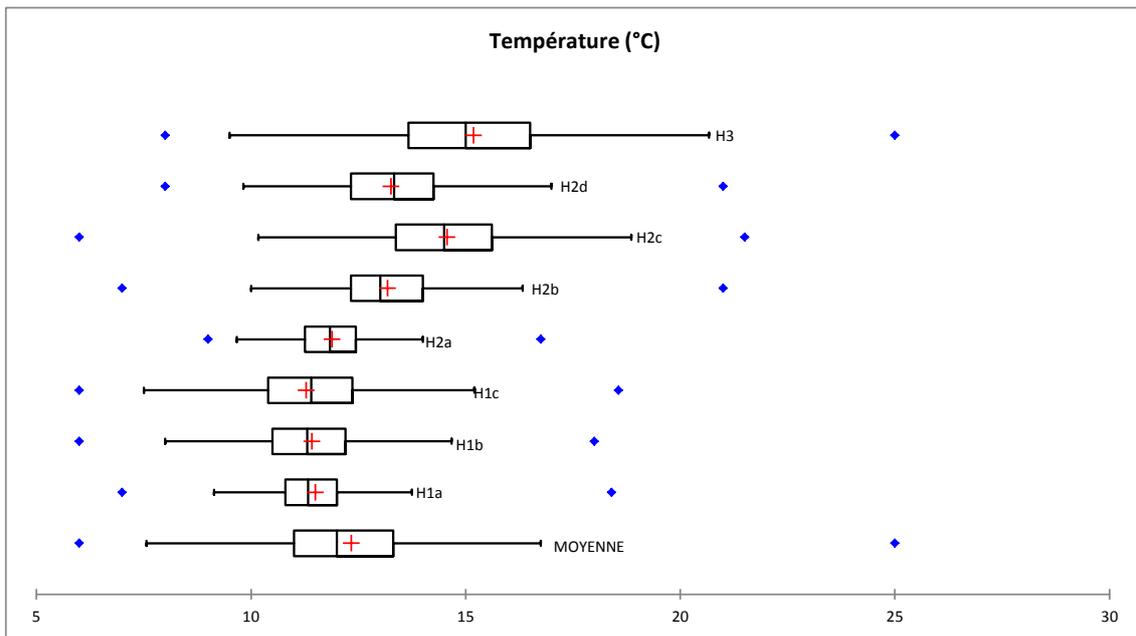


Figure 6 - Localisation des forages sur une carte de France des zones climatiques de la RT2012.

Carte des températures 0-200 m



Echantillon	Minimum	Maximum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Moyenne	Ecart-type (n-1)
MOYENNE	6,0	25,0	11,0	12,0	13,3	12,3	2,0
H1a	7,0	18,4	10,8	11,3	12,0	11,5	1,0
H1b	6,0	18,0	10,5	11,3	12,2	11,4	1,5
H1c	6,0	18,6	10,4	11,4	12,4	11,3	1,8
H2a	9,0	16,8	11,3	11,8	12,4	11,9	1,0
H2b	7,0	21,0	12,3	13,0	14,0	13,2	1,5
H2c	6,0	21,5	13,4	14,5	15,6	14,6	2,0
H2d	8,0	21,0	12,3	13,3	14,3	13,3	1,9
H3	8,0	25,0	13,7	15,0	16,5	15,2	2,5

	Nombre	TEMP MOY	PROF MOY
Ensemble	8531	12,3	46,8
H1a	2874	11,5	46,6
H1b	1939	11,4	41,8
H1c	525	11,3	28,2
H2a	438	11,9	43,2
H2b	1091	13,2	55,0
H2c	624	14,6	58,0
H2d	165	13,3	45,3
H3	875	15,2	53,2

Figure 7 - L'analyse statistiques, par la méthode des boîtes à moustache de Tukey, des couples température/profondeur groupés par zone géographique.

Cette analyse statistique met en évidence trois groupes de zone climatique :

- les zones H1a, H1b, H1c et H2a dont la moyenne des températures est légèrement inférieure à la moyenne de l'ensemble des températures (11,5 °C en moyenne pour ces quatre zones pour une moyenne de l'ensemble égale à 12,3 °C), soit un écart de - 0,8 °C ;

- les zones H2b et H2d (13,3 °C en moyenne) sont sensiblement supérieures à la moyenne de l'ensemble avec un écart de + 1°C ;
- les zones H2c et H3 (14,9 °C en moyenne) sont significativement supérieures à la température moyenne, avec un écart de 2,6 °C.

Cette approche ne permet toutefois pas d'affirmer que les différentes zones climatiques présentent des écarts de température aussi marqués. En effet, si les températures des zones H1a, H1b, H1c et H2a sont plus faibles et les températures des zones H2c et H3 sont plus élevées que la moyenne nationale, la profondeur des forages du premier groupe est aussi inférieure à la profondeur des forages du second groupe.

L'illustration 7 montre le diagramme température/profondeur de chacun des groupes des huit zones climatiques. Il se trouve que les zones les plus chaudes sont aussi les plus profondes. L'écart de profondeur est faible, moins de 20 m, et ne peut sans doute pas expliquer l'écart de température observé entre les différents groupes. Il faut retenir, à ce stade de l'analyse, que ces différences de profondeur introduisent un biais dans l'analyse.

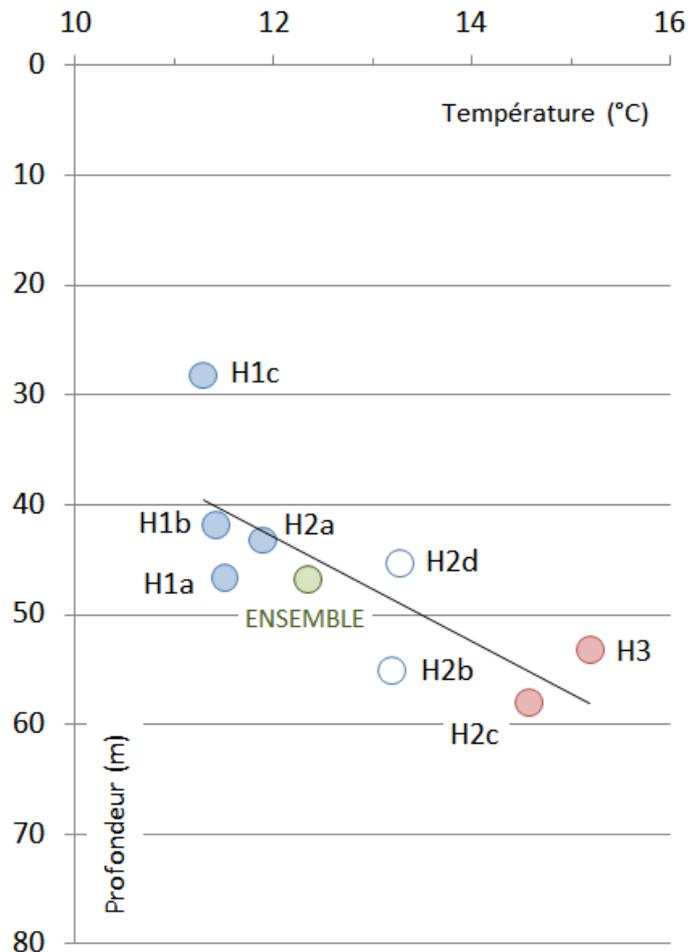


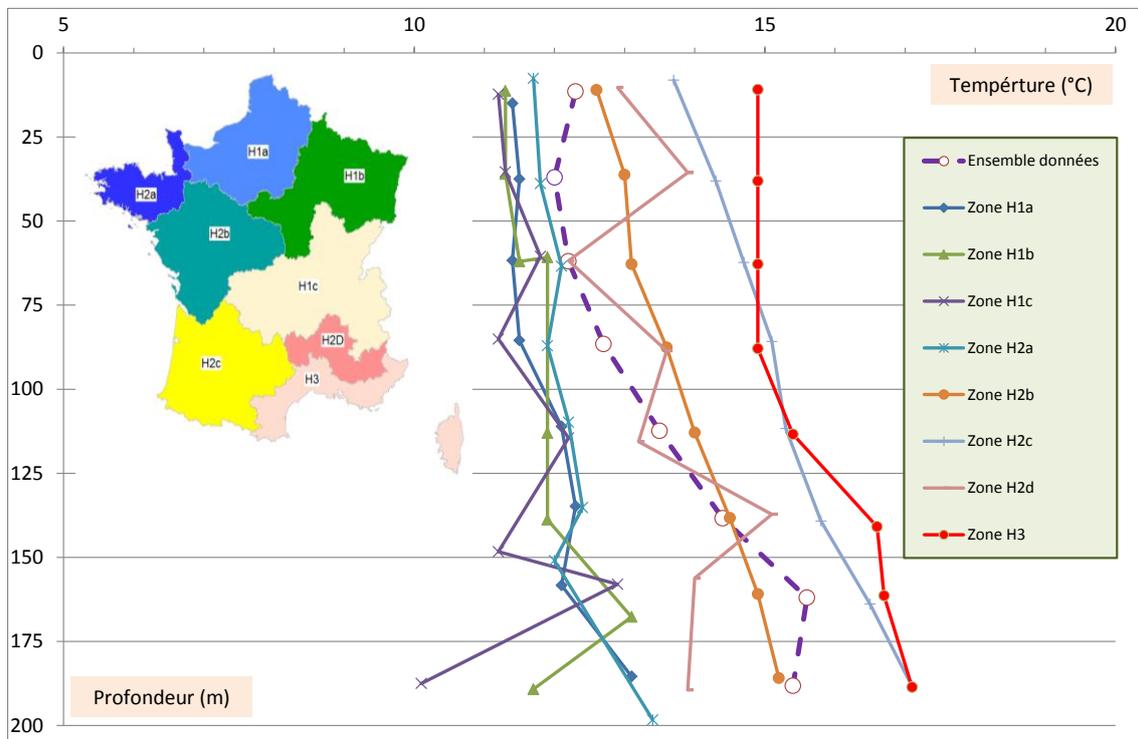
Figure 8 - Diagramme température/profondeur de chacun des groupes des huit zones climatiques.

3.3. PROFIL DE TEMPÉRATURE PAR ZONE

On a réalisé des profils de température en calculant une température moyenne par tranche de 25 m de profondeur, en différenciant chaque zone climatique. Le résultat obtenu est présenté sur l'illustration 8.

Dans tous les cas, les températures sont relativement constantes sur les 100 premiers mètres. Ce n'est qu'à partir d'une centaine de mètres que l'on voit une faible inflexion des gradients de température.

Ces profils de température sont conformes aux statistiques globales des températures par zone. Les profils des zones H2c et H3 sont significativement plus « chauds » que les profils des autres zones, en particulier les zones qualifiées de « froides » H1a, H1b, H1c et H2a. Les profils des zones H2b et H2d restent proches des valeurs moyennes.



On observe un écart de température de près de 4 °C entre les profils « froids » et les profils « chauds ».

Cet écart reflète l'influence climatique sur la température du sous-sol. La température des 100 ou 200 premiers mètres du sous-sol reflète la température moyenne annuelle extérieure, le gradient géothermique n'apparaissant qu'au-delà de cette profondeur.

3.4. INFLUENCE DE L'ALTITUDE SUR LES VALEURS DE TEMPÉRATURE

On présente ci-après une analyse des corrélations entre l'altitude de la tête de puits des forages, leur profondeur, les températures mesurées en tête de puits, en différenciant les huit zones climatiques. Le tableau 3 regroupe les données par zone climatique. La figure 10 présente le diagramme de dispersion température/altitude.

Carte des températures 0-200 m

ZONE	NB. points	Altitude (m)	Profondeur (m)	Température (°C)
Ensemble	8 531	149	47	12,3
H1a	2 874	87	47	11,5
H1b	1 939	202	42	11,4
H1c	525	413	28	11,3
H2a	438	105	43	11,9
H2b	1 091	96	55	13,2
H2c	624	112	58	14,6
H2d	165	341	45	13,3
H3	875	162	53	15,2

Tableau 3 - Valeur moyenne des altitudes, des profondeurs et des températures selon la zone climatique (échantillon de 8 531 points).

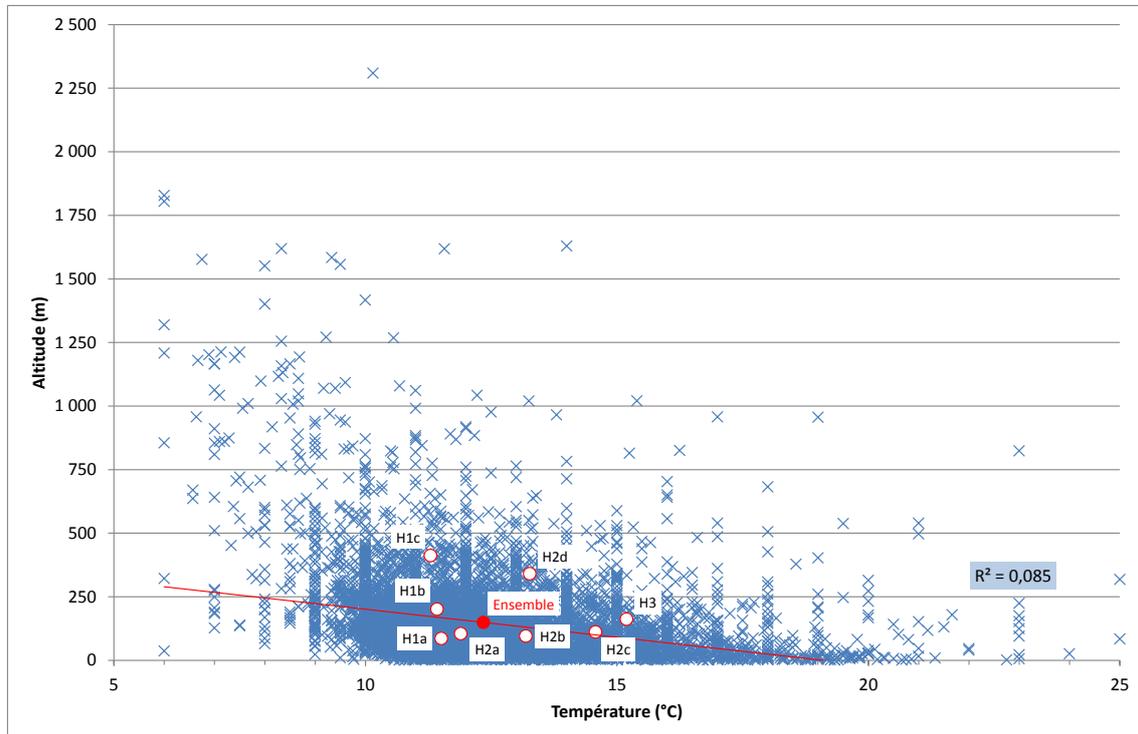


Figure 10 - Diagramme température / altitude de la tête de forage (échantillon de 8 531 forages).

Le diagramme de dispersion de la figure 10 montre une tendance dans laquelle la température en tête de puits des forages diminuerait en altitude. En particulier, la zone

H1c dont la température moyenne de la zone climatique est la plus basse (11,3 °C) présente une altitude moyenne la plus élevée (413 m) de l'ensemble des huit zones.

La figure 11 présente les diagrammes de dispersion altitude/profondeur, température/profondeur et altitude/température pour les points regroupés par zone climatique.

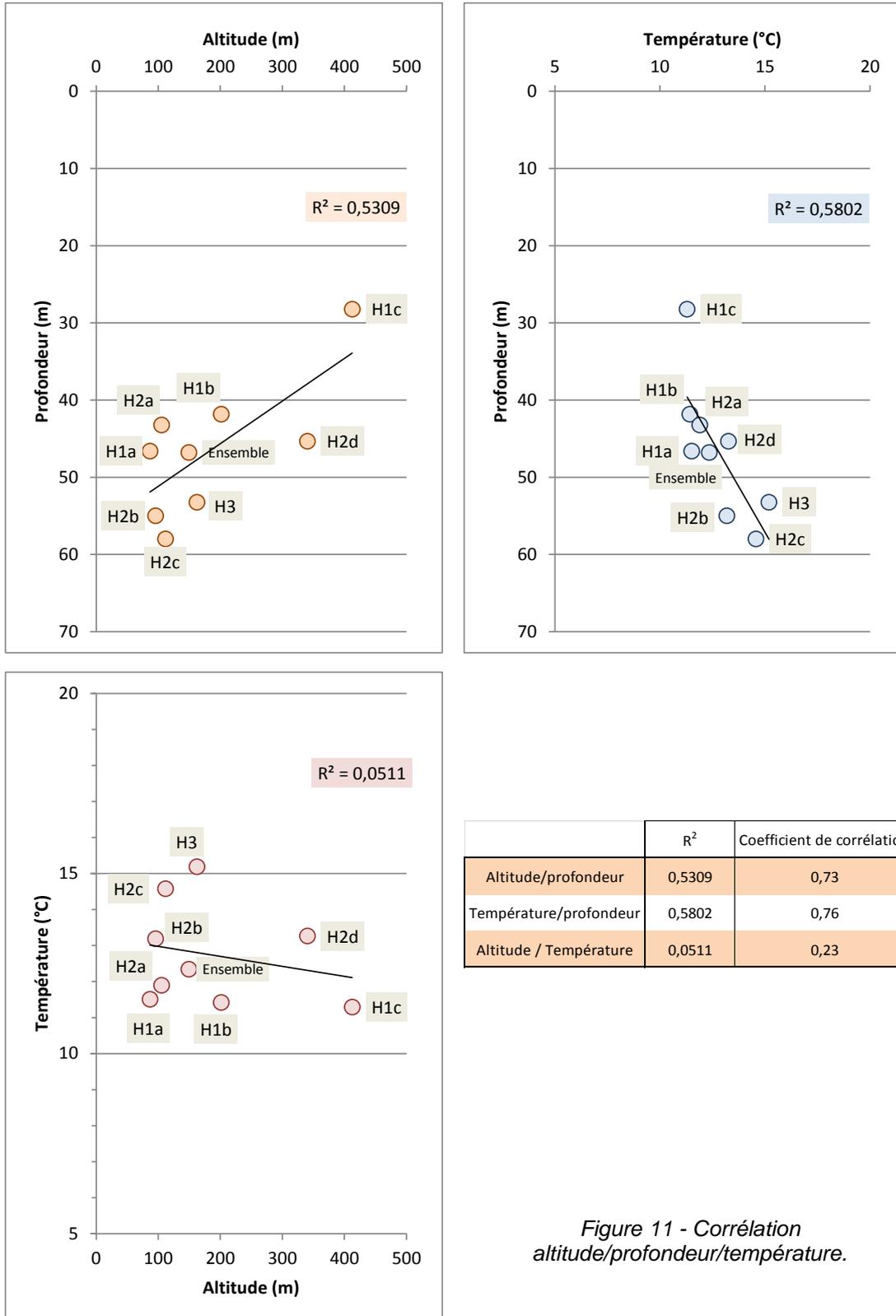


Figure 11 - Corrélation altitude/profondeur/température.

Sur ces schémas il est possible de voir que les forages en altitude (zone climatique H1c) sont moins profonds que les forages des autres zones, et que la relation altitude/profondeur est assez forte (coefficient de corrélation égale à 0,73). Par contre, il y a indépendance totale entre la température et l'altitude (coefficient de corrélation égale à 0,23). Par ailleurs, la température est assez fortement corrélée avec la profondeur (coefficient de corrélation égale à 0,73).

Ces résultats indiquent que la tendance observée sur la figure 10 serait due principalement au fait que les forages étant moins profonds en altitude donneraient des températures plus faibles.

4. Conclusion

L'étude des données de température, mesurée en tête de puits, à l'occasion des prélèvements d'eau souterraine pour les analyses régulières de la qualité chimique des eaux des captages d'eau potable, disponibles sur le site ADES, a permis, à partir d'un échantillon de 8 531 couples température/profondeur, de dresser un bilan du gradient géothermique de la tranche 0 à 200 m, en différenciant chacune des huit zones climatiques de la RT 2012.

Le premier constat est, qu'à l'échelle de toute la France, les températures sont relativement constantes sur les 100 premiers mètres. Ce n'est qu'à partir d'une centaine de mètres que l'on voit une légère inflexion des gradients de température. Dans la tranche 0 à 200 m, les températures sont comprises pour l'essentiel entre 11 et 15 °C, sans qu'il soit possible d'affirmer que l'augmentation de température ne dépend que de la profondeur.

Le second constat, auquel l'étude aboutit, est de mettre en évidence des zones climatiques « froides », situées principalement sur la partie nord de la France, et des zones climatiques « chaudes » situées sur la partie la plus méridionales. L'écart de température entre ces zones « froides » et « chaudes » est important puisqu'il atteint près de 4 °C.

Cet écart reflète l'influence climatique sur la température du sous-sol. La température des 100 ou 200 premiers mètres du sous-sol reflète la température moyenne annuelle extérieure, le gradient géothermique n'apparaissant qu'au-delà de cette profondeur.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

**Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 - 45060 Orléans Cedex 2 - France - Tél. : 02 38 64 34 34