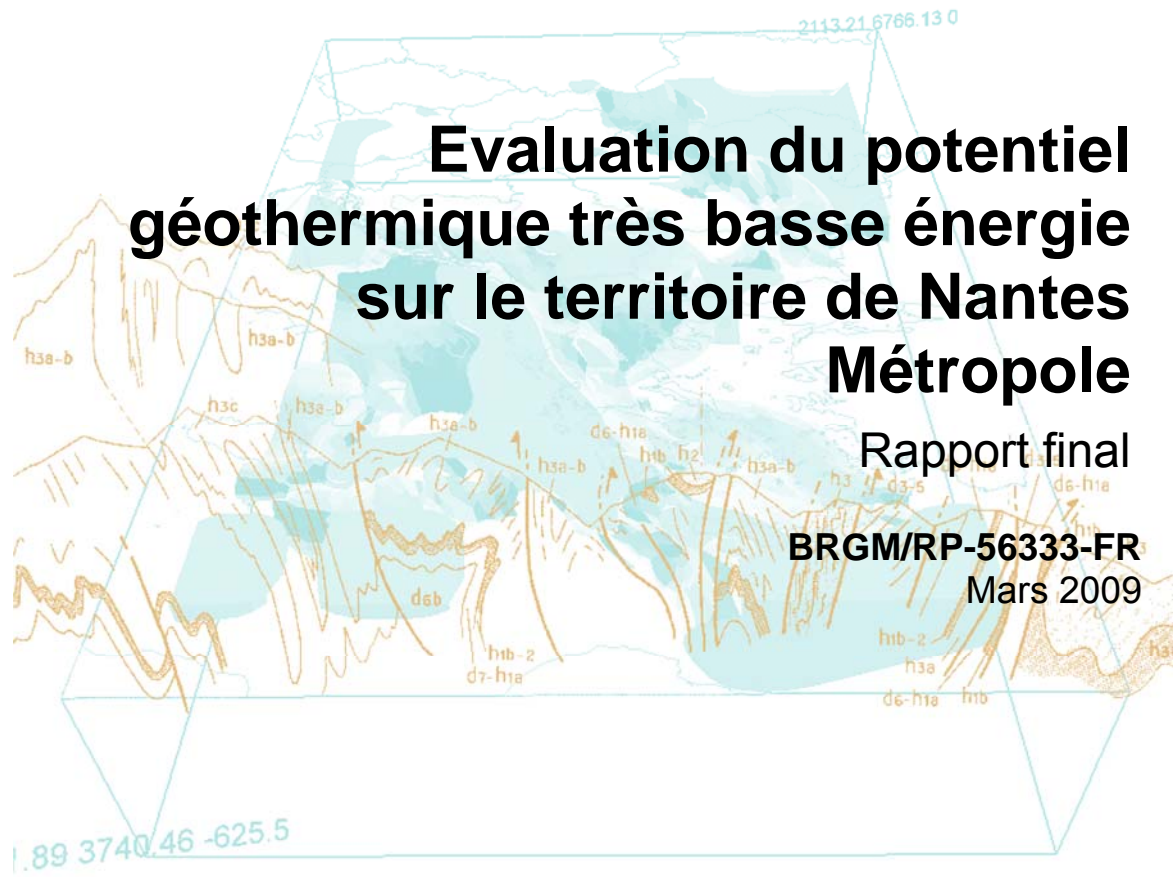


Document public



Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Rapport final

BRGM/RP-56333-FR
Mars 2009

Recherche-action portée par :



avec le soutien financier de :



réalisée par :



Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Rapport final

BRGM/RP-56333-FR
Mars 2009

Wuilleumier A., Monnot P., Conil P., Prognon F., Lacquement F., Bourguine B.,
Baudouin V.

Vérificateur :

Nom : P. Conil

Date : Vu et corrigé le février 2009

Signature :

Cf IM165

Approbateur :

Nom : A. Desplan

Date : Vu et corrigé le février 2009

Signature :

Cf IM165

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Recherche-action portée par :

avec le soutien financier de :

réalisée par :



Mots clés : Nantes métropole, géothermie, géologie, hydrogéologie, piézométrie, sonde géothermique verticale, pompe à chaleur

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

Wuilleumier A., Monnot P., Conil P., Prognon F., Lacquement F., Bourguine B., Baudouin V. (2009) – Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole. Rapport Final. BRGM/RP-56333-FR, 251 pages, 46 figures, 16 tableaux et 23 annexes.

© BRGM – Nantes Métropole, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM et de Nantes Métropole.

Synthèse

La communauté urbaine de Nantes Métropole exerce, pour les 24 communes qui la constituent, les compétences relatives à l'aménagement de l'espace communautaire et au soutien aux actions de maîtrise de la demande en énergie. A ce titre, Nantes Métropole a souhaité réaliser, en partenariat avec le BRGM et sur la base des données existantes, une évaluation du potentiel géothermique très basse énergie de son territoire.

Cette évaluation a été effectuée sur une base cartographique – à l'aide d'un Système d'Information Géographique – pour les potentiels liés aux sondes verticales et aux pompages en nappe. Dans les deux cas, une approche statistique par unité fonctionnelle a été adoptée. Les cartographies proposées et présentées dans le rapport fournissent donc une vision probabiliste de la potentialité géothermique des roches exploitable par des ouvrages. Dans l'utilisation de ces cartes, le décideur devra prendre en compte le caractère fortement discontinu des roches majoritairement en présence sur le territoire de Nantes Métropole.

Les potentiels géothermiques présentés pour d'autres techniques – les champs de sonde, les pieux énergétiques et les sondes horizontales – ont été décrits et comparés entre eux et avec les deux techniques précédentes dans le corps du rapport. Ces éléments permettront aux décideurs de s'orienter – à l'échelle du territoire – vers la technique la plus adaptée. Ces informations ne remplacent en aucun cas une étude de faisabilité, qui sera bien entendu à conduire avant la réalisation de travaux.

En sus de ces éléments, un descriptif du fonctionnement des différents process géothermiques a été rédigé. Il est complété par des fiches de synthèse présentant les différentes techniques de géothermie très basse énergie décrites dans le corps du rapport.

Résumé des principaux résultats sur la cartographie du potentiel très basse énergie pour les sondes géothermiques verticales :

Pour rappel, les éléments d'évaluation du potentiel ont été réunis à partir des données de 173 forages situés sur le territoire de Nantes métropole. Sur ces ouvrages, une conductivité thermique moyenne a été calculée, à partir de la nature des différentes lithologies. Cependant, il convient de prendre en compte que l'état de saturation en eau souterraine des terrains a un impact notable sur cette conductivité. Les calculs ont donc été réalisés successivement sous trois hypothèses : terrains secs (cas défavorable), terrains totalement saturés (cas favorable), moyenne terrains secs et saturés (cas intermédiaire).

En prenant comme référence l'hypothèse intermédiaire, (moyenne des terrains secs et saturés), **36 % des forages présentent une puissance linéaire comprise entre 40 et 55 W/m, et 42 % supérieure à 55 W/m, ce qui permet de mettre en évidence des zones favorables à la réalisation de sondes.**

L'impact de la saturation en eau a été mis en évidence, avec un gain de 15% de conductivité sur plus de 75% des forages. Le cas des alluvions est à distinguer particulièrement :

- dans ces terrains, l'impact de la saturation en eau peut induire plus d'un doublement de la puissance d'extraction ;
- en présence d'un écoulement souterrain significatif, on peut s'attendre à une augmentation de la puissance d'extraction de l'ordre de 50 % par rapport à la valeur maximale normale.

Les valeurs ci-dessous traduisent cette caractéristique :

- Puissance d'extraction dans les alluvions sèches : < 20 W/m
- Puissance d'extraction dans les alluvions saturées : 55 – 65 W/m
- Puissance d'extraction dans les alluvions en présence d'un écoulement significatif : 80 – 100 W/m.

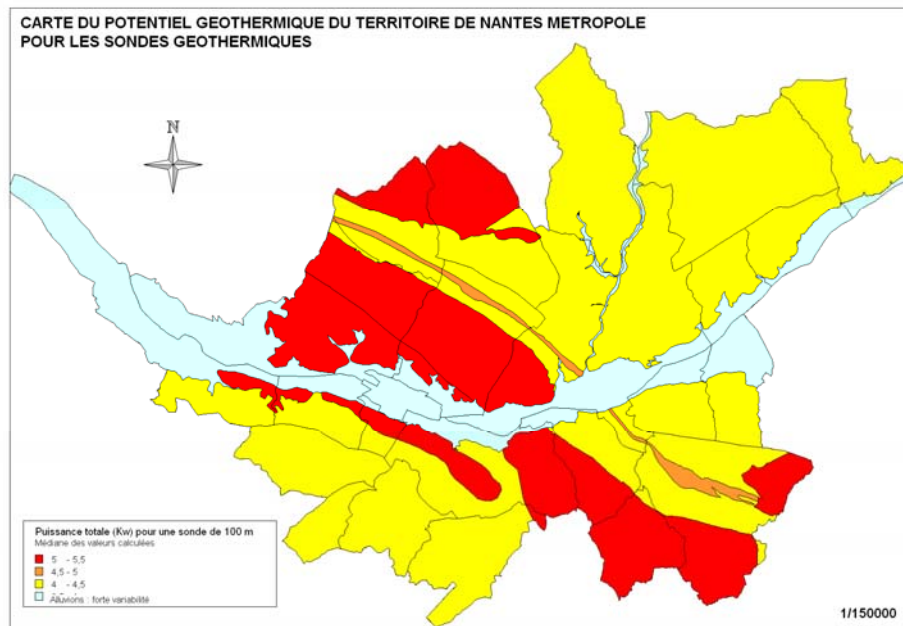


Figure 1 : Carte du potentiel géothermique sur le territoire de Nantes métropole. Puissance total (kW) pour une sonde géothermique de 100 m. Se référer au rapport pour les précautions d'usage

La traduction cartographique de ces éléments est la suivante :

1. Les zones les plus favorables pour la réalisation de sondes sont celles des granites et des gneiss qui forment sur le territoire de Nantes Métropole un ensemble orienté WNW-ESE : dans ces zones, la médiane de la puissance totale pour une sonde de 100 m se situe entre 5 et 5,5 kW, soit 20 % au-dessus du reste du territoire.
2. Sur le reste de l'agglomération de Nantes, (parties SW et NE du territoire de Nantes Métropole), on peut s'attendre à une conductivité moindre ; médiane de

la puissance totale pour une sonde de 100 m entre 4 et 4,5 kW, excepté dans l'étroit sillon d'amphibolite (en orange sur la carte) où elle doit être un peu meilleure.

3. Dans les alluvions, une grande variabilité des données est attendue, en fonction de la saturation en eau des terrains et de l'écoulement de la nappe. Dans ces zones, cet impact devra être pris en compte au cas par cas, dans le cadre d'une étude de faisabilité pour le dimensionnement des sondes. Par ailleurs, d'un point de vue économique, on peut s'attendre à ce que le coût du forage soit supérieur compte tenu de la moins bonne tenue des terrains.

Résumé des principaux résultats sur la cartographie du potentiel très basse énergie pour les pompages en nappe :

Le potentiel a été caractérisé de façon statistique à partir des données disponibles, notamment en Banque du Sous-Sol. Il s'est appuyé sur :

- la délimitation géographique des formations de socle et des alluvions présentant une extension importante et un intérêt d'un point de vue hydrogéologique (alluvions de la Loire) ;
- la capacité d'ouvrages souterrains (puits, forages) à capter l'eau souterraine. Ceci s'est traduit par l'utilisation d'un échantillon de 402 valeurs de débit répartis sur le territoire de Nantes Métropole.

On notera en particulier que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (hormis la température) n'ont pas pu être prises en compte dans l'évaluation du potentiel.

La cartographie proposée pour le potentiel (cf. Figure 2) présente un découpage de Nantes Métropole en 6 zones. Ces zones correspondent à des formations géologiques distinctes.

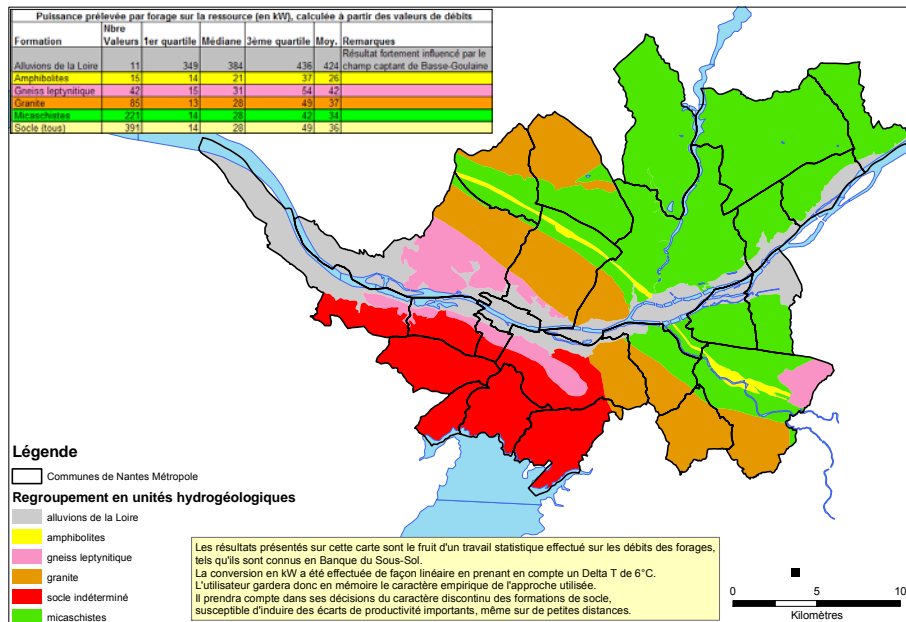


Figure 2 : Puissance potentiellement soutirable à la ressource par pompage en nappe (en kW – les valeurs à prendre en compte pour le socle indéterminé sont celles de la formation intitulée « Socle (tous) » dans le tableau). Se référer au rapport pour les précautions d'usage

Deux éléments ressortent principalement de cette cartographie :

- A l'exception des alluvions et de formations superficielles, le territoire de Nantes Métropole est constitué de formations de socle. Il est caractérisé par des puissances prélevables médianes de l'ordre de 20 à 30 kW, ce qui est relativement faible pour de la géothermie effectuée à partir d'un pompage en nappe. Les données présentent par ailleurs dans la zone de socle une relative homogénéité.
- Les données disponibles pour les alluvions de la Loire indiquent des puissances prélevables environ dix fois supérieures. Il est à noter cependant que la valeur statistique de ces données est fortement impactée par les valeurs des forages du champ captant de Basse-Goulaine (9 valeurs sur 11 disponibles pour les alluvions de la Loire). Les résultats obtenus sont donc biaisés par rapport à la situation réelle de l'aquifère. Il est vraisemblable, compte tenu de la nature hétérogène des alluvions, que la disparité en termes de potentiel soit élevée. Plus encore qu'en zone de socle, **il est impératif en zone alluviale de conduire une étude de faisabilité détaillée, portant notamment sur la productivité de l'aquifère et la salinité de la nappe qu'il contient.** C'est néanmoins dans la zone alluviale que le potentiel géothermique par pompage en nappe paraît le plus favorable.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Introduction à la géothermie	17
2.1. PRESENTATION DE LA GEOTHERMIE	17
2.1.1.Principes généraux de la géothermie	17
2.1.2.Différents types de géothermies et potentiels d'utilisation.....	17
2.1.3.Etat de la géothermie dans le monde et en France.....	18
2.1.4.Intérêt de la géothermie dans les domaines des économies d'énergie, de l'environnement et du développement durable.....	22
2.1.5.Exemples d'objectifs énergétiques européens, nationaux et locaux pour limiter l'émission de gaz à effet de serre	23
2.1.6.Principaux mécanismes d'accompagnement du développement de la géothermie.....	27
2.1.7.Description des usages géothermiques en fonction du type de ressource	33
2.1.8.Procédure technique pour la mise en œuvre des pompes à chaleur sur aquifères	39
2.2. OPERATIONS DE GEOTHERMIE CONNUES EN PAYS-DE-LOIRE ET SUR LE TERRITOIRE DE NANTES METROPOLE.....	40
3. Géologie	43
3.1. INTRODUCTION	43
3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE	43
3.2.1.Les formations de socle et du Pliocène	44
3.2.2.Les formations alluviales	45
3.3. GEOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES	48
3.3.1.Définitions et processus	48
3.3.2.L'horizon fissuré	50
3.3.3.Perturbation de la géométrie des horizons d'altération	52
3.3.4.Déformation des paléosurfaces	56
3.3.5.Géométrie des paléosurfaces.....	56
3.3.6.Périodes propices à l'altération du Massif armoricain	58
3.4. METHODOLOGIE DE LA CARACTERISATION DES ALTERITES DE SOCLE DE LA REGION NANTAISE	59

3.4.1. Observations de terrain.....	59
3.4.2. Datation des altérations	63
3.5. METHODOLOGIE DE LA MODELISATION DU MUR DES ALTERITES	63
3.5.1. Données utilisées :	63
3.5.2. Analyse des données de la base des altérites.....	67
3.5.3. Interpolation de la surface de base des altérites.....	68
3.6. CARACTERISATION DES ALTERITES DE SOCLES DE LA REGION NANTAISE	72
4. Hydrogéologie	73
4.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	73
4.1.1. Rappel concernant le cycle de l'eau	74
4.1.2. Rappel sur les aquifères de socle	75
4.1.3. Délimitation des entités hydrogéologiques.....	76
4.1.4. Battement des nappes	77
4.1.5. Température des nappes	78
4.2. PIEZOMETRIE	78
4.2.1. Données disponibles et description de la méthode utilisée	78
4.2.2. Mise en œuvre de la méthode et résultats obtenus	82
4.2.3. Perméabilité relative des formations	84
5. Cartographie du potentiel géothermique très basse énergie	89
5.1. SONDES VERTICALES.....	89
5.1.1. Paramètres cartographiés dans l'atlas pour le dimensionnement de la sonde géothermique verticale	89
5.1.2. Méthodologie pour cartographier les conductivités thermiques et les puissances par mètre linéaire de sonde	91
5.1.3. Interprétation des résultats obtenus.....	97
5.1.4. Analyse critique sur les résultats et limites de l'étude	100
5.1.5. Cartographie du potentiel géothermique.....	102
5.2. POMPAGE EN NAPPE	103
5.2.1. Méthodologie.....	103
5.2.2. Données disponibles et choix des critères pris en compte	103
5.2.3. Evaluation de la productivité de l'aquifère.....	108
5.2.4. Cartographie du potentiel.....	112
5.2.5. Pistes d'amélioration	112

6. Synthèse et comparaison des techniques de géothermie très basse énergie potentiellement applicables sur le territoire de Nantes Métropole	115
6.1. CHOIX ENTRE FORAGE D'EAU ET SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE	115
6.2. LES CAPTEURS HORIZONTAUX	119
6.3. LE CHAMP DE SONDES	122
6.4. LES PIEUX ENERGETIQUES.....	123
7. Conclusions	125
8. Bibliographie.....	131

Liste des Figures

Figure 1 : Carte du potentiel géothermique sur le territoire de Nantes métropole. Puissance total (kW) pour une sonde géothermique de 100 m. Se référer au rapport pour les précautions d'usage.....	4
Figure 2 : Puissance potentiellement soutirable à la ressource par pompage en nappe (en kW – les valeurs à prendre en compte pour le socle indéterminé sont celles de la formation intitulée « Socle (tous) » dans le tableau). Se référer au rapport pour les précautions d'usage.....	6
Figure 3 : Evolution de la consommation finale énergétique nationale par secteur (source : « Observatoire de l'énergie : l'énergie en France - repères Edition 2007 »).	22
Figure 4 : Consommation en énergie finale par usage des résidences principales en 2002 (d'après « Principaux chiffres ADEME secteur bâtiment »), IC = Immeubles collectifs, MI = Maison Individuelles	23
Figure 5 : Répartition de la chaleur renouvelable et supplément à acquérir d'ici 2012 et 2020	26
Figure 6 : Répartition de la chaleur renouvelable d'origine géothermique.....	27
Figure 7 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur à compression (Tirée du Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques sur aquifère –ADEME, ARENE, BRGM mars 2008)	34
Figure 8 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur nappe (rapport ALTO)	34
Figure 9 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques (© ADEME – BRGM)	35
Figure 10 : Evolution du nombre de déclarations de projets de géothermie reçues au BRGM entre 1999 et août 2007 pour la région Pays de Loire	40
Figure 11 : Localisation des ouvrages géothermiques connus en BSS et des sites ayant fait l'objet d'une déclaration d'intention de projet de géothermie	42
Figure 12 : Morphologie du lit rocheux de la Loire et nature des alluvions dans la zone de Cheviré (coupe localisée sur fond IGN©).....	46
Figure 13- Modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré (Wyns, 1999).....	50
Figure 14 - Développement de microfissures au voisinage des minéraux gonflants (biotite notamment).....	50
Figure 15 - Aspect caractéristique de l'horizon fissuré dans un granite (Livradois – Auvergne)	52
Figure 16 : Différence de pénétration de l'altération au sein des micaschistes (au Nord) et des faciès leptynitiques (au Sud) (Carrière des Chaudières, située dans la partie sud du territoire étudié).....	53
Figure 17 : Schéma illustrant les variations de la profondeur de la base de la saprolite (traits rouges) et de la base de l'horizon fissuré (traits violets) pour deux lithologies	

contrastées (granodiorite à gauche et schistes et quartzites à droite) (Extrait de Courtois et al., 2003).....	54
Figure 18 : Schéma illustrant l'approfondissement local du front d'altération au niveau de discontinuités (fractures et filons pré-existant à l'altération) (Extrait de Courtois et al., 2003).....	55
Figure 19 : Schéma représentant des paléosurfaces étagées et définissant la notion d'Inselberg.....	55
Figure 20 : Reconstitution schématique d'un relief résultant de 3 phases d'altération entrecoupées de périodes d'érosion et de déformation.....	57
Figure 21 : Couloir de failles orientées NE-SW dans la carrière des Chaudières.....	60
Figure 22 : Différence d'épaisseur de l'horizon fissuré au sein des micaschistes et des faciès leptynitiques (Carrière des Chaudières, située dans la partie sud du territoire étudié).....	62
Figure 23- Carte de situation des données utilisées pour la modélisation du substratum des altérites (coordonnées Lambert II zone centre).....	65
Figure 24 : Variogramme expérimental du mur des altérites, et son ajustement.....	67
Figure 25 : « Paléo-surface » de base des altérites, avant élimination des parties érodées par la topographie actuelle.....	69
Figure 26 : Principe de prise en compte des inégalités.....	71
Figure 27 : Schéma du cycle de l'eau.....	74
Figure 28 : Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998).....	75
Figure 29 : Cartographie simplifiée des formations de socle et des alluvions de la Loire.....	76
Figure 30 : Chronique piézométrique du forage de « La Blonière » sur la commune de St-Julien-de-Concelles (1994-2004).....	77
Figure 31 : Modèle Numérique de Terrain de Nantes Métropole (pas de 20 m).....	79
Figure 32 : Mesures de niveau de nappe disponibles sur le territoire de Nantes Métropole.....	80
Figure 33 : Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle.....	81
Figure 34 : Tableau de données pour la réalisation de la régression linéaire.....	83
Figure 35 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.....	84
Figure 36 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant pour les micaschistes l'altitude de la nappe à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.....	85
Figure 37 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant pour les granites l'altitude de la nappe à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.....	86
Figure 38 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant pour les amphibolites l'altitude de la nappe à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.....	86

Figure 39 : Localisation des données de perméabilité ou de transmissivité disponibles en BSS.....	105
Figure 40 : Localisation des données de débits de forage recensées sur le territoire de Nantes Métropole	106
Figure 41 : Localisation des captages d'eau souterraine pour lesquels des données physico-chimiques sont disponibles (source : ADES).....	107
Figure 42 : Extrait du fichier de données de débit.....	108
Figure 43 : Représentation des valeurs de débits sur l'ensemble des formations aquifères de Nantes Métropole : méthode des « boîtes à moustaches »	110
Figure 44 : Représentation des valeurs de débits sur les principales formations de socle de Nantes Métropole : méthode des « boîtes à moustaches »	111
Figure 45 : Carte du potentiel géothermique sur le territoire de Nantes métropole. Puissance total (kW) pour une sonde géothermique de 100 m.	127
Figure 46 : Puissance potentiellement soutirable à la ressource par pompage en nappe (en kW – les valeurs à prendre en compte pour le socle indéterminé sont celles de la formation intitulée « Socle (tous) » dans le tableau)	129

Liste des tableaux

Tableau 1 : Production d'électricité géothermique dans le Monde et en Europe.....	18
Tableau 2 : Production de chaleur géothermique dans le Monde, en Europe et en France.....	19
Tableau 3 : Production de chaleur géothermique en Europe et en France selon le baromètre Eur'Observer (édition 2007).....	20
Tableau 4 : Nombre de pompes à chaleur géothermiques individuelles vendues dans quelques pays européens. Source : EurObser'ER 2007 ¹⁾ Source : EDF 2002	20
Tableau 5 : Récapitulatif des résultats obtenus pour les paramètres a et b	87
Tableau 6 : Regroupement des lithologies	92
Tableau 7 : Attribution des conductivités thermiques aux lithologies simplifiées.....	93
Tableau 8 : Abaque établi par B. Sanner, D-35390 Giessen qui utilise le modèle de calcul EED de l'Université de Lund et qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain	96
Tableau 9 : Pourcentage du nombre de forages (logs validés) par rapport à 3 fourchettes de conductivité thermique et à la saturation en eau souterraine des terrains.....	98
Tableau 10 : Classification des formations géologiques en fonction des valeurs médiane de la conductivité thermique et de la puissance linéaire	100
Tableau 11 : Traitement statistique des débits de forages (les débits sont exprimés en m ³ /h).	109
Tableau 12 : Puissance prélevable par un forage sur la ressource par formations aquifères de Nantes Métropole (en kW).....	112

Tableau 13 : Puissance d'extraction des capteurs horizontaux par m ² de sol	119
Tableau 14 : Puissance d'extraction (W/m) par ml de tube (Source : documentation fournisseurs de capteurs).....	120
Tableau 15 : Calcul du coût d'investissement pour une surface à chauffer de 100 m ² , à partir du ratio qui tient compte de la réalisation du forage (marteau fond de trou), de la mise en œuvre et de l'équipement de l'échangeur thermique souterrain	121
Tableau 16 : Paramètres permettant de répondre aux critères d'identification et de sélection des zones potentielles pour l'implantation de pieux énergétiques	123

Liste des annexes

Annexe 1 Liste des ouvrages géothermiques connus en Banque du Sous-Sol.....	135
Annexe 2 Liste des déclarations de projet géothermiques reçues au BRGM (2001/Août 2007).....	139
Annexe 3 Carte géologique simplifiée sur le territoire de Nantes Métropole.....	145
Annexe 4 Modélisation de l'altitude de la base (ou « mur ») des altérites	149
Annexe 5 Modélisation de l'épaisseur des altérites.....	153
Annexe 6 Première approche de la profondeur moyenne de la nappe sur le territoire de Nantes Métropole.....	157
Annexe 7 Logs validés : lithologie détaillée (première couche géologique représentée).....	161
Annexe 8 Logs validés : lithologie simplifiée (première couche géologique représentée).....	165
Annexe 9 Analyse thématique sur les conductivités thermiques moyennes calculées pour chaque forage Cas traités : Terrains secs Terrains saturés Moyenne terrains secs et saturés.....	169
Annexe 10 Variabilité des conductivités thermiques entre les terrains secs et saturés (exprimée en % des terrains secs)	177
Annexe 11 Forages inclus dans chaque formation géologique.....	181
Annexe 12 Récapitulatif des valeurs de conductivités thermiques et puissances linéaires pour les forages inclus dans chaque formation géologique	185
Annexe 13 Récapitulatif des analyses statistiques pour chaque unité fonctionnelle	191
Annexe 14 Représentation des conductivités thermiques et puissances linéaires pour chaque formation géologique à l'aide de la méthode des « boîtes à moustaches de Tuckey ».....	195
Annexe 15 Conductivités thermiques et puissances linéaires pour chaque formation géologique (traitement statistique) et puissances totales calculées au droit de chaque forage	199
Annexe 16 Potentiel géothermique pour l'implantation des sondes géothermiques verticales	203

Annexe 17 Potentiel géothermique pour l'implantation des sondes géothermiques verticales.....	209
Annexe 18 Rappels de statistiques et présentation des boîtes à moustaches de Tukey.....	215
Annexe 19 Représentation cartographique du traitement statistique effectué sur les débits de forages connus en BSS	221
Annexe 20 Puissance potentiellement soutirable à la ressource par pompage en nappe (en kW)	225
Annexe 21 Garantie AQUAPAC®	229
Annexe 22 Fiches descriptives des différents types d'exploitation en géothermie très basse énergie	235
Annexe 23 Principes relatifs aux pompes à chaleur	245

1. Introduction

La production de chaleur d'origine géothermique peut provenir de différents types de ressources en fonction de la profondeur et de la température exploitée.

L'énergie contenue dans les couches superficielles du sous-sol, que ce soit dans les terrains eux-mêmes, les nappes alluviales ou les aquifères peu profonds, peut ainsi être exploitée dans des conditions très intéressantes grâce à la mise en œuvre des pompes à chaleur (PAC), systèmes thermodynamiques qui permettent d'obtenir une température compatible avec les besoins des locaux à chauffer.

L'objet du présent projet est d'évaluer les potentialités que représentent les ressources géothermiques superficielles, situées à une profondeur inférieure à 100 m (pour des raisons de réglementation – code minier) et comprenant une plage de température inférieure à 20 °C. On parle alors de géothermie très basse énergie.

Il s'agit ainsi de caractériser les possibilités en géothermie très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole. Cette caractérisation porte d'une part sur l'énergie contenue dans les nappes et d'autre part sur l'énergie contenue directement dans les terrains.

On différencie sur le territoire de Nantes Métropole des secteurs plus ou moins favorables à l'exploitation de la géothermie afin de proposer, par secteur, des solutions d'exploitation adaptées : exploitation des aquifères et/ou exploitations des terrains.

L'étude élabore des documents (cartes, schémas, tableaux) pouvant être utilisés, dans une première approche, comme outil d'aide à la décision par les responsables de Nantes Métropole afin d'orienter leur politique énergétique, et par les Maîtres d'ouvrages potentiels.

2. Introduction à la géothermie

2.1. PRESENTATION DE LA GEOTHERMIE

2.1.1. Principes généraux de la géothermie

Du grec gèo (terre) et thermos (chaud), la géothermie consiste à exploiter la chaleur stockée dans le sous-sol de notre planète. Cette énergie est potentiellement considérable : 1 km² de roche, sur une profondeur de 10 km, renferme en moyenne une quantité d'énergie équivalant à 15 millions de TEP (Tonne Equivalent Pétrole : 1 TEP \cong 11'630 kWh). Les domaines d'utilisation de l'énergie de la terre recouvrent le chauffage, le rafraîchissement, l'utilisation directe de la chaleur et la production d'électricité.

L'accroissement de la température en fonction de la profondeur est appelé "**gradient géothermique**". Il est en moyenne, sur la planète, de 30°C par kilomètre, le flux d'énergie thermique à l'origine de ce gradient étant de l'ordre de 60 mW/m². Ces valeurs peuvent être cependant nettement supérieures dans certaines zones instables du globe, et même varier de façon importante dans les zones continentales stables. Ainsi, **le gradient géothermal est en moyenne de 4 C tous les 100 m en France**, et varie de 10°C/100 m dans le nord de l'Alsace à seulement 2°C/100 m au pied des Pyrénées.

La chaleur dégagée par notre globe a pour origine le refroidissement de son noyau, mais également la désintégration des éléments radioactifs présents dans ses roches : uranium, thorium, potassium, etc. 90% de l'énergie dissipée provient en effet de ce mécanisme.

2.1.2. Différents types de géothermies et potentiels d'utilisation

On distingue plusieurs types de géothermie, en fonction des caractéristiques de la ressource et de l'usage final.

La production d'électricité

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150°C. Les réservoirs sont généralement localisés dans des contextes géodynamiques spécifiques (zones de volcanisme...), présentant des gradients géothermiques pouvant être sans commune mesure au

gradient moyen. Lorsqu'il existe un réservoir, le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité.

En périphérie de ces réservoirs, mais aussi plus généralement, à grandes profondeurs (de 2'000 à 4'000 mètres), on trouve des ressources sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150°C (dites de moyenne énergie). Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est alors nécessaire.

L'usage direct de la chaleur

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères et sa valorisation directe (via un échangeur de chaleur) pour le chauffage ou d'autres besoins (procès industriel...). Le cas le plus typique est celui de l'exploitation des aquifères profonds (1'500 – 2'000 m) des bassins sédimentaires, à des températures entre 30°C et 90°C (on parle de géothermie basse énergie). En France métropolitaine, plus de 30 réseaux de chaleur urbains sont alimentés par ce type de géothermie. Ils permettent d'économiser plus de 160'000 TEP/an de combustibles fossiles. En région parisienne, l'eau de l'aquifère profond du Dogger est captée entre 1'500 et 1'800 m de profondeur, à des températures comprises entre 55 et 85°C.

La valorisation de la géothermie superficielle par les pompes à chaleur

Elle concerne l'exploitation de l'énergie contenue dans les terrains ou les aquifères peu profonds (en général < 100 m) pour la production de chaleur et/ou de froid. La température exploitée est inférieure à 30°C (généralement comprise entre 9 et 15 °C). Pour exploiter cette gamme de températures, il est nécessaire de recourir à l'utilisation de pompes à chaleur (PAC). Les PAC peuvent fonctionner sur des dispositifs d'échange et d'extraction d'énergie avec le sous-sol (capteurs horizontaux de, profondeur inférieure à 2.0 m, capteurs verticaux, profondeur généralement inférieure à 100 m), l'eau souterraine des aquifères peu profonds (puits de pompage), les eaux superficielles ou l'air (intérieur ou extérieur de l'habitat).

2.1.3. Etat de la géothermie dans le monde et en France

Le Tableau 1 indique la production d'électricité géothermique dans le monde et en Europe selon Fridleifsson et alii (2008).

	2000 (MWe)	2007 (MWe)
Monde	7 975	9 700
Europe	996	1 130

Tableau 1 : Production d'électricité géothermique dans le Monde et en Europe

En 2007, on compte 24 pays producteurs d'électricité géothermique dans le Monde.

La France arrive au 19^e rang, avec l'installation de Bouillante en Guadeloupe (15 MWe à fin 2004), juste derrière le Portugal (23 MWe).

Pour l'Europe, on note deux « nouveaux entrants » : Allemagne (3 MWe) et Autriche (1,25 MWe), qui ont développé de nouvelles technologies.

L'Italie est le premier pays européen avec 811 MWe installés en 2007 (5 340 GWh) ; elle projette un parc de 910 MWe d'ici 2010.

- **Production de chaleur (Source : Fridleifsson et alii, 2008)**

	2000 (MWth)	2004 (MWth)
Monde	15 145	27 825
Europe	6 517	13 760
France	300	308 (hors PAC)

Tableau 2 : Production de chaleur géothermique dans le Monde, en Europe et en France

70 pays ont été recensés en 2005 comme produisant de la chaleur géothermique.

Ce sont les chiffres publiés durant Le Congrès Mondial de Géothermie en avril 2005 (WGC2005). Ils sont indicatifs car les modes de calcul et de présentation des chiffres ne sont pas toujours homogènes d'un pays à l'autre.

Certains intègrent le thermalisme (comme la Hongrie par exemple).

Certains pays n'avaient pas pris en compte le chauffage par pompes à chaleur géothermiques en 2000, mais l'ont intégré en 2004 (exemple : le Danemark).

Dans ce classement, la France arrive au 12^{ème} rang mondial, avec 308 MWth. Mais ce chiffre ne concerne que la géothermie basse énergie, hors PAC. Le doublement de puissance installée en Europe, pour la production de chaleur, est dû en partie au fait qu'à partir de 2004, les PAC ont été intégrées au calcul.

Le baromètre Eur'Observer (édition 2007) donne une idée précise de la situation en Europe en 2006 :

	Puissance installée(MWth)	production (ktep)
Usage direct de la chaleur :		
EU25	2236	685
France	307	130
PAC :		
EU25	7328	
France	922	
Total :		
EU25	9564	
France	1129	

Tableau 3 : Production de chaleur géothermique en Europe et en France selon le baromètre Eur'Observer (édition 2007)

La France apparaît ici avec une puissance installée de 1129MWth, ce qui la place au 3^{ème} rang européen.

Au niveau européen, cette tendance donne une puissance thermique géothermique installée de 17 500 MWth à l'horizon 2010, pour un objectif fixé par le livre blanc sur l'énergie de l'Union Européenne à seulement 5 000 MWth !

- **Pompes à chaleur géothermiques (PAC)**

	2004	2005	2006	% neuf ¹⁾	Population (en million d'habitants)
France	11 700	13 880	20 026	5 %	60
Allemagne	9 593	13 250	28 605		80
Suède	39 359	34 584	40 017	95 %	8.8

Tableau 4 : Nombre de pompes à chaleur géothermiques individuelles vendues dans quelques pays européens. Source : EurObser'ER 2007

¹⁾ Source : EDF 2002

La tendance pour 2007 en France s'établirait à 25 000 unités vendues, poursuivant donc une croissance soutenue.

Le nombre d'unités vendues en Suède, comparé à la population de ce pays, laisse imaginer qu'il reste encore un fort potentiel de développement en France, malgré la forte croissance des dernières années.

Les installations PAC concernent une large gamme d'habitats ; elles vont du pavillon individuel jusqu'au bâtiment de plusieurs milliers de m².

L'AFPAC évalue la part des pompes à chaleur sur eau souterraine installée dans le logement individuel à environ 10 %. Ce chiffre est certainement beaucoup plus élevé dans le petit collectif et tertiaire. Malheureusement, la France ne dispose actuellement pas de statistiques détaillées dans ce domaine.

2.1.4. Intérêt de la géothermie dans les domaines des économies d'énergie, de l'environnement et du développement durable

La France va être confrontée dans les années à venir à de grands enjeux énergétiques : maîtriser sa consommation énergétique globale, sécuriser ses approvisionnements et diviser par un facteur 4 d'ici 2050 ses émissions de CO₂ pour limiter le réchauffement climatique.

Cependant la consommation finale d'énergie dans le résidentiel - tertiaire continue à augmenter, du fait de l'augmentation du parc (en nombre et en surface) et de l'augmentation du confort (y compris le recours accru à la climatisation durant l'été).

Consommation d'énergie finale par secteur

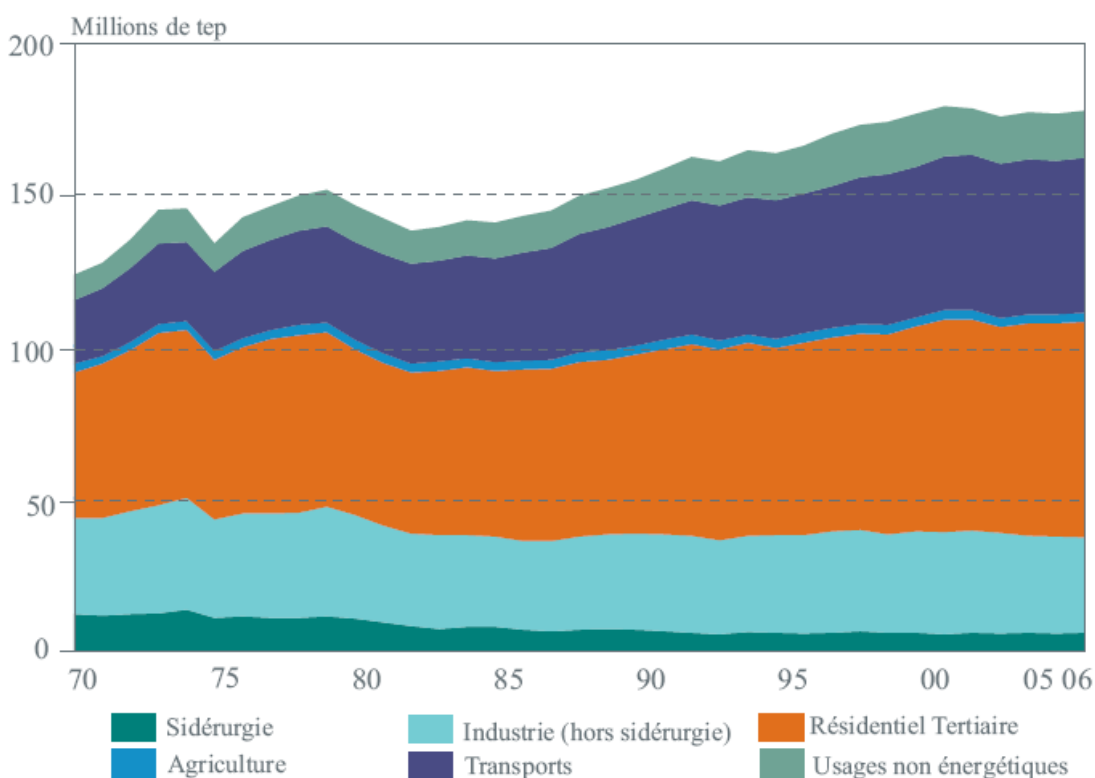


Figure 3 : Evolution de la consommation finale énergétique nationale par secteur (source : « Observatoire de l'énergie : l'énergie en France - repères Edition 2007 »).

Le secteur du bâtiment produit plus de 20 % des émissions de CO₂ totales en France. Près de 70 % de la consommation d'énergie du résidentiel est liée aux besoins du chauffage. Il y a donc dans ce domaine une source importante d'amélioration qui doit passer tout d'abord par la qualité des bâtiments et par les comportements individuels, mais également par la pénétration des énergies renouvelables dans le Marché et de l'efficacité énergétique des dispositifs de chauffage.

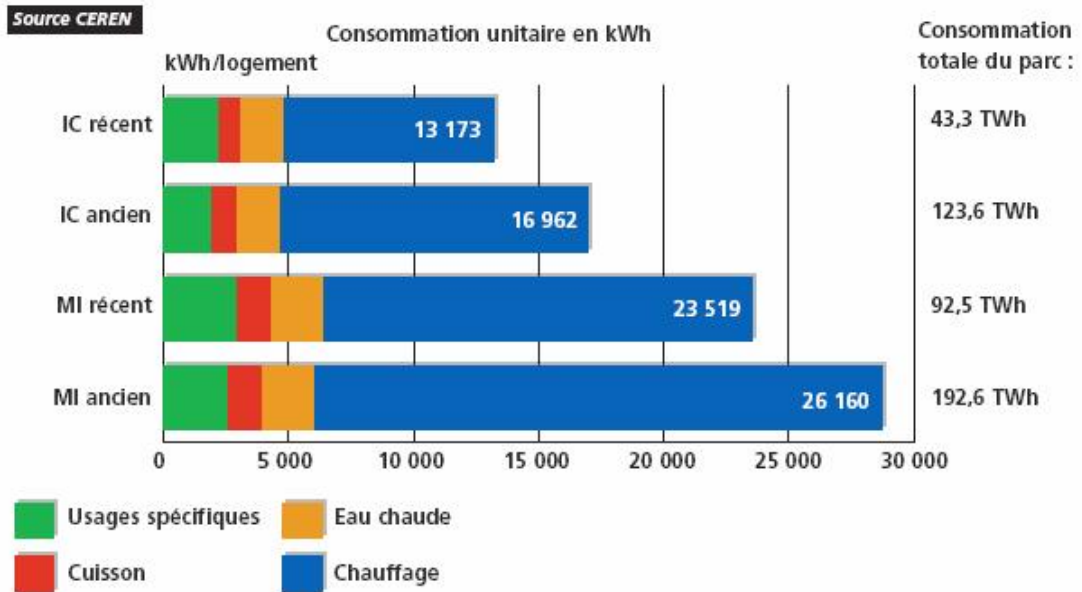


Figure 4 : Consommation en énergie finale par usage des résidences principales en 2002 (d'après « Principaux chiffres ADEME secteur bâtiment »),
IC = Immeubles collectifs, MI = Maison Individuelles

La prise de conscience des risques de pollution et de dégradation de la qualité de notre environnement par le biais des émissions de gaz à effet de serre (le protocole de Kyoto) et l'augmentation du prix des hydrocarbures conduisent progressivement à la mise en place de nouveaux objectifs énergétiques, tant au niveau européen, que national ou local.

2.1.5. Exemples d'objectifs énergétiques européens, nationaux et locaux pour limiter l'émission de gaz à effet de serre

- **Projet de directive européenne horizon 2020, reprenant la décision du Conseil européen du 9 mars 2007 :**

Ce projet prévoit les objectifs suivants :

- Moins 20% d'émissions de CO₂ ;
- Au moins 20% d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie ;
- 20% de gain en efficacité énergétique.

- **Plan National de Lutte contre le Changement Climatique 2000 (PNLCC) :**

Il définit une stratégie nationale, axée sur des actions domestiques, sans recourir aux mécanismes de flexibilité prévus par le protocole de Kyoto. Ce plan répartit l'engagement national de stabilisation en matière d'émission de gaz à effet de serre, en attribuant des objectifs différenciés par secteurs : transports, bâtiment, énergie, industrie, agriculture, déchets.

Ce plan devrait permettre à la France de respecter ses engagements internationaux pris dans le cadre du protocole. Mais de nombreuses mesures du PNLCC n'ont pas été mises en œuvre. Des dérives sectorielles ont par ailleurs été constatées dans les secteurs des transports et du bâtiment. C'est pourquoi, pour rendre le PNLCC plus efficace, un Plan Climat a été adopté en juillet 2004.

- **Plan Climat 2004**

L'application du PNLCC ayant été insuffisante pour assurer le maintien des émissions françaises de gaz à effet de serre et en particulier pour enrayer l'augmentation des émissions de certains secteurs, le Plan Climat 2004 est un plan d'action qui doit permettre à la France d'atteindre cet objectif. Il reprend certaines mesures du PNLCC et en introduit de nouvelles. Il engage aussi une réflexion sur la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux impacts du changement climatique.

Il retient huit orientations fortes (campagne nationale de sensibilisation et adaptation ; transports durables ; bâtiment et écohabitat ; industrie, *énergie* et déchets ; agriculture durable et forêts ; climatisation durable ; plans climats territoriaux et État exemplaire ; recherche, international et prospective après 2010).

- **Loi de programmation fixant les orientations de la politique énergétique Française (Loi 2005-781 du 13 Juillet 2005 dite loi POPE) et décrets du 23 mai 2006**

Les objectifs politiques annoncés sont les suivants :

- contribuer à l'indépendance énergétique ;
- assurer des prix d'énergies compétitifs ;
- préserver la santé et l'environnement.

Ces objectifs induisent les axes d'action suivants :

- maîtriser la demande d'énergie ;
- diversifier les sources d'approvisionnement ;
- développer la recherche dans les domaines de l'énergie.

Cette loi fixe des objectifs chiffrés :

- Diminuer les émissions de gaz à effet de serre de 3 % par an ;
- Porter la production intérieure d'électricité d'origine renouvelable de 16 % à 21 % de la consommation intérieure d'électricité totale à horizon 2010 ;
- augmentation de 50 % de la production de chaleur d'origine renouvelable à l'horizon 2012.

▪ Grenelle de l'Environnement

Le Grenelle de l'Environnement, vaste processus de concertation qui s'est déroulé au deuxième semestre 2007, doit se traduire par des dispositions législatives dès le mois de juin 2007. L'objectif fixé par le Grenelle est d'équilibrer la production énergétique française, en adossant au réseau centralisé des systèmes décentralisés permettant davantage d'autonomie. Il s'agit aussi de réduire encore le contenu en carbone de l'offre énergétique française, et dans un premier temps, d'atteindre l'objectif de 20 % (voire 25 %) d'énergies renouvelables (énergie finale) en 2020, dans de bonnes conditions environnementales et de faisabilité. Cela suppose d'augmenter de 20 millions de TEP la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique à l'horizon 2020 en suivant deux lignes stratégiques, autonomisation et décentralisation, là où c'est possible.

Des comités opérationnels (COMOP) se sont réunis au premier semestre 2008 pour préparer le travail législatif. Ils ont été chargés de traduire les objectifs fixés en mesures concrètes. Ainsi, le comité opérationnel du plan de développement des énergies renouvelables (Comop n°10) estime que la géothermie doit constituer un des piliers du développement des énergies renouvelables. Dans son rapport, il indique que la géothermie est particulièrement pertinente pour la fourniture de chaud ou de froid dans le bâtiment, gros secteur consommateur d'énergie. La géothermie pourrait chauffer 47% du parc immobilier à l'échéance 2020.

Concernant le partage entre les différentes énergies renouvelables, la prospective dressée par le comité opérationnel énergie renouvelable est la suivante :

- Chaleur : + 10 millions tep
- Électricité : + 7 millions de tep
- Biocarburants : + 3 millions de tep

Concernant la chaleur renouvelable, la répartition est la suivante, en milliers de tep :

(Equivalent ENR en ktep)	2006	2012	2020	Supplément 2012	Supplément 2020
Bois Individuel	7 400	7 400	7 400	0	0
Biomasse collectif industrie	1 400	3 040	7 600	1 640	6 200
géothermie	220	535	1 300	315	1 080
PAC aérothermiques	160	960	1 050	800	890
Solaire thermique	27	185	927	158	900
UIOM et bois DIB (Part EnR)	400	470	900	70	500
Biogaz	55	60	555	5	500
TOTAL	9 662	12 650	19 732	2 988	10 070

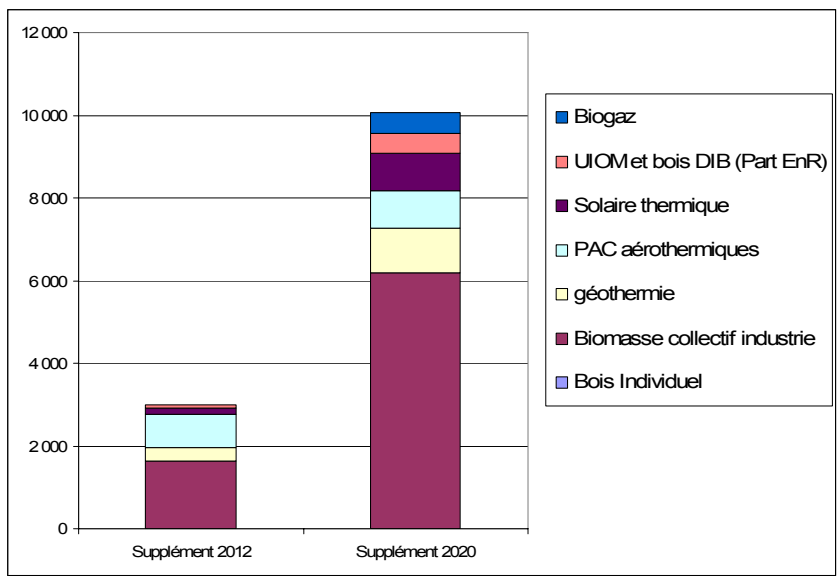


Figure 5 : Répartition de la chaleur renouvelable et supplément à acquérir d'ici 2012 et 2020

Plus précisément, pour la chaleur géothermique, l'évolution serait la suivante :

(Equivalent ENR en ktep)	2006	2012	2020	Supplément 2020
Réseaux de chaleur géothermiques	130	195	500	370
PAC géothermiques tertiaire et collectif	50	100	250	200
PAC géothermiques individuelles	40	240	550	510
Total géothermie	220	535	1 300	1 080

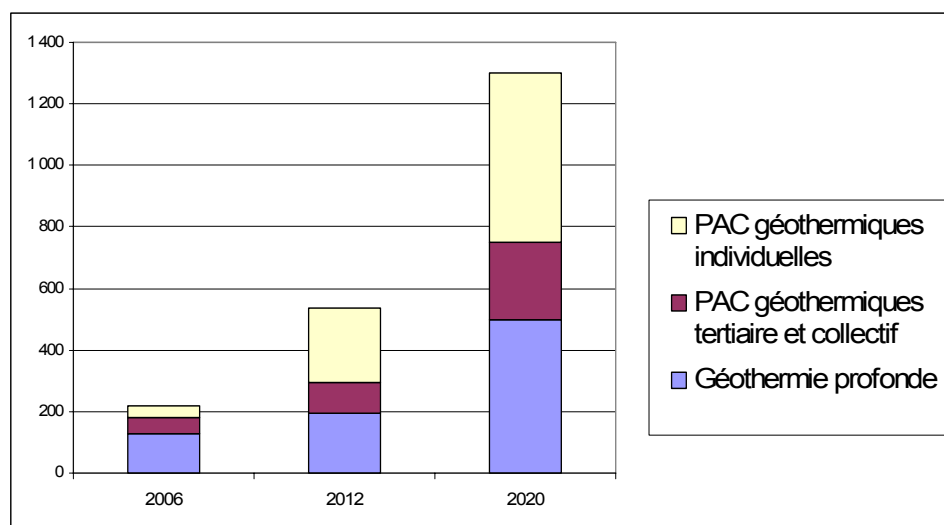


Figure 6 : Répartition de la chaleur renouvelable d'origine géothermique

Source : Grenelle de l'environnement - Plan de développement des énergies renouvelables à haute qualité environnementale

2.1.6. Principaux mécanismes d'accompagnement du développement de la géothermie

- **Certificats d'économie d'énergie (CEE)**

La loi POPE met place un mécanisme déjà éprouvé par ailleurs, en particulier en Angleterre : **les certificats d'économie d'énergie (CEE)**. Ce dispositif repose principalement sur l'obligation pour les fournisseurs d'énergie de déclencher chez leurs clients la réalisation d'économies d'énergie.

Le but des CEE est de relancer les économies d'énergie là où existent des gisements importants, mais diffus et difficiles d'accès (notamment dans les secteurs résidentiels et tertiaires), en mobilisant les acteurs du Marché (offre/demande) sans recourir à des subventions. Il s'agit donc d'un nouveau mécanisme de financement des projets d'efficacité énergétique adapté à un Marché libéralisé venant en complément d'outils publics existants (crédits d'impôt, subventions...).

Grâce à la création d'un véritable Marché de l'efficacité énergétique, le dispositif des CEE devrait ainsi permettre d'injecter 500 à 1'000 millions d'euros dans les trois années à venir. Seule serait définie la période de rodage du dispositif (2006-2008) à l'issue de laquelle 54 TWh d'économie d'énergie devront avoir été réalisés. Cet objectif de 54 TWh représente environ 2,13 TWh d'économie par an, soit 0,14 % de la consommation française annuelle totale, dont 1 TWh pour les réseaux de chaleur ou de froid.

Principe du dispositif CEE : l'obligation d'économie d'énergie s'impose aux principaux opérateurs (EDF, GDF, CPCU, etc.) qui fournissent au moins 400 GWh d'énergie finale par an (ce qui représente une vingtaine d'obligés).

Les fournisseurs de fioul sont également soumis à obligation. Cependant, le Marché étant constitué d'une myriade de petites entreprises, la loi POPE a prévu explicitement une possibilité de regroupement. Pour l'instant, les fournisseurs de carburants ont été exclus du dispositif.

Pour s'acquitter de cette obligation, les opérateurs disposent de trois voies possibles (variantes) :

- Investir sur leur propre patrimoine ;
- Inciter, par de la sensibilisation ou l'octroi d'aides financières, les clients (particuliers, petites entreprises, collectivités locales...) à réaliser des investissements permettant de réaliser des économies en énergie ;
- Acheter des certificats d'économie d'énergie auprès d'autres acteurs (dits éligibles).

C'est pourquoi ce dispositif s'accompagne de la mise en place d'un Marché de CEE.

L'offre de certificats provient de toute personne morale (acteur éligible) présentant un programme d'actions de taille suffisante (au moins 3 GWh d'économies d'énergie finale réalisées par programme, actualisées sur toute la période du programme présenté). Le dossier devra être validé par les DRIRE (Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement).

La demande de certificats vient des « Obligés », qui doivent atteindre leurs objectifs d'économies d'énergie fixés par décret, en complétant éventuellement leurs propres économies par l'achat de certificats auprès d'acteurs éligibles. Ainsi, ce dispositif ouvre à d'autres acteurs (collectivités publiques et territoriales, notamment), la possibilité de participer à la réalisation d'économies d'énergie.

Le CEE est immatériel, il est inscrit dans un registre national et peut faire l'objet de tractations négociées. Les certificats d'économies d'énergie concernent la géothermie, puisque le bénéfice des CEE a été élargi aux énergies renouvelables pour le chauffage des bâtiments, lorsqu'elles viennent se substituer aux énergies fossiles. C'est le cas de la géothermie sur réseaux de chaleur.

Le dispositif des certificats d'économies d'énergie devrait ainsi constituer une source de financement appréciable permettant de lancer de nouveaux projets de géothermie, sachant que les premières évaluations de projets potentiels ont montré que parmi les actions standards proposées, la géothermie sur réseaux de chaleur offrait les coûts de certificats parmi les moins élevés.

- **Opérations standardisées**

Le décret du 23 mai 2006, relatif aux conditions d'application des certificats d'économies d'énergie, a introduit la notion d'opérations standardisées : un calcul forfaitaire, attribué pour une installation nouvelle type, par rapport à une situation de référence. Les économies réalisées permettent aux obligés de revendiquer des certificats. Le dispositif est entré en vigueur le 1^{er} juillet 2006.

L'article 2 du décret précise que les « opérations standardisées d'économies d'énergie sont définies par arrêtés du ministre chargé de l'énergie ». À ce titre, la DGEMP a confié à cinq groupes de travail (industrie, bâtiment, résidentiel et tertiaire, service énergétique, transport, collectivités territoriales et ENR) l'établissement de fiches-types de ces opérations standardisées sous la houlette de l'ATEE (Association Technique Energie Environnement) et de l'ADEME (Agence gouvernementale De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie).

À l'heure actuelle, 2 fiches concernent les pompes à chaleur géothermiques :

- Système eau/eau en résidentiel ;
- Système eau/eau pour le tertiaire ;

Un autre système concerne la géothermie : production de chaleur renouvelable en réseau (France métropolitaine).

Les 3 fiches types adaptées à la géothermie sont présentées en annexe 22.

- **Dispositif incitatif de l'ADEME adopté le 14/02/08 (Système d'aide ADEME aux énergies renouvelables 2008-2013 : délibération n° 08-2-2 du CA ADEME)**

L'ADEME a mis en place un dispositif d'aides financières spécifique à la géothermie permettant de financer :

- des études de faisabilité et des missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage,
- des investissements tant pour la réhabilitation d'opérations existantes que pour la réalisation de nouvelles opérations. Les aides sont ramenées au coût du MWh géothermal produit.

Quatre types d'aides sont proposés :

Les aides à la décision

Pour accompagner les organismes et collectivités à étudier l'opportunité d'utilisation des ENR, l'ADEME propose des outils méthodologiques et des aides financières, sous forme de subventions, aux organismes des secteurs concurrentiel et non concurrentiel qui font appel à un prestataire pour réaliser plusieurs types d'interventions : pré diagnostic, diagnostic ou étude de faisabilité.

Le système général des aides à la décision¹ s'applique sans dérogation, hormis pour les projets de géothermie dont l'ampleur n'est pas compatible avec les plafonds prévus par le système général. Pour les opérations de géothermie profonde, le plafond de l'assiette est porté à 300 000 €, avec un taux d'aide maximum de 50 %.

Les aides à la démonstration

Elles concernent des premières mises en œuvre de technologies issues de la R&D ou de technologies existantes transférées vers des applications nouvelles. L'ADEME propose d'aider ces opérations à un taux déterminé par une analyse économique. Dans tous les cas ce taux sera au maximum de 40 % et compatible avec l'encadrement communautaire des aides d'Etat en faveur de l'environnement en vigueur.

Les opérations exemplaires

Elles visent à introduire et développer, dans un territoire (par exemple, région ou département) ou un secteur d'activités (branches industrielles ou agricoles, par exemple), des technologies, des pratiques ou modes d'organisation permettant de progresser de manière exemplaire dans la voie d'un développement plus "durable".

Les aides à la diffusion

Outre les aides mentionnées précédemment, par nature très sélectives, l'Agence propose, dans des domaines particuliers, des aides plus systématiques à la diffusion de technologies ou de bonnes pratiques, de manière à surmonter des obstacles de marché, notamment dans la perspective de la baisse importante des coûts attendue de la croissance des volumes commercialisés. Elles visent principalement à structurer les filières concernées.

¹ Délibération n° 06-5-3 du Conseil d'administration du 11 octobre 2006

- **Loi de finances 2007**

En 2005, la loi de finances accordait 40 % de crédit d'impôt pour les pompes à chaleur géothermiques (ayant un COP – Coefficient de Performance – supérieur ou égal à 3).

*La loi de finances 2006 portait ce crédit d'impôt à 50 % pour l'achat de pompes à chaleur géothermique dont le COP est supérieur ou égal à 3. **La loi de finances 2007 maintient le crédit d'impôt à 50 %, en revanche le COP doit à présent être au minimum de 3.3, selon les dispositions des arrêtés du 12 décembre 2005 et du 13 novembre 2007***

Le crédit d'impôt porte sur le prix des équipements et des matériaux, hors main d'œuvre (travaux de forage et pose des sondes ou de la pompe par exemple). L'installation doit être réalisée par une entreprise et une facture (ou une attestation fournie par le vendeur ou le constructeur du logement neuf), qui porte la mention des caractéristiques requises dans l'arrêté, doit être établie pour les services fiscaux.

En cas d'aide publique supplémentaire à l'investissement (Conseil Régional, Conseil Général, Agence nationale de l'habitat (ANAH)...), par exemple pour l'achat d'équipements permettant d'utiliser les énergies renouvelables ou les pompes à chaleur, le calcul du crédit d'impôt se fait sur le coût des équipements déductions faites des aides publiques, selon les modalités qui seront définies dans l'instruction fiscale.

Les particuliers peuvent également profiter du taux réduit de TVA (5,5 %) appliqué par les entreprises qui vendent le matériel et en assurent la pose, à condition que la pompe à chaleur soit installée dans une résidence principale ou secondaire achevée depuis plus de deux ans.

Pour un même contribuable, le montant des dépenses donnant droit au crédit d'impôt en faveur du développement durable ne peut excéder la somme de 8 000 € pour une personne seule et de 16 000 € pour un couple. Ce plafond est majoré pour tenir compte de la situation de famille du contribuable. Ces montants sont majorés de 400 € par personne à charge (dont le premier enfant) au sens des articles 196 à 196 B du Code général des impôts. Cette majoration est portée à :

500 € pour le second enfant ;

600 € par enfant à compter du troisième.

- **Garantie AQUAPAC®**

Pour palier à l'incertitude locale sur la présence et/ou la pérennité de la nappe d'eau souterraine, la garantie Aquapac® a été initiée en 1983 sous l'égide de l'ADEME (AFME à l'époque), d'EDF et du BRGM.

Elle offre une double garantie portant sur les ressources pérennes en eau souterraine :

La garantie « recherche » couvre le risque d'échec consécutif à une ressource en eau souterraine insuffisante pour fournir le débit d'eau nécessaire. Le taux de cotisation pour cette garantie est désormais de 5 %² du montant des ouvrages garantis en recherche ;

La garantie « pérennité » couvre le risque de diminution du débit exploitable à terme qui serait liée à une détérioration prouvée de la ressource (non considérées les variations saisonnières du débit et/ou les cycles hydrologiques statistiquement normaux). La durée de cette garantie est de 10 ans³, et le taux de cotisation pour cette garantie est de 4 % du montant des ouvrages garantis en pérennité. Cette garantie est limitée aux installations d'une puissance thermique de 30 kW minimum.

La gestion de la garantie est confiée à la SAF Environnement⁴. L'instruction des dossiers de demande de garantie et la décision d'octroi de garantie sont décidées par un comité Aquapac composé de trois représentants de : l'ADEME, de EDF et du BRGM. Ce comité se réunit périodiquement, avec la participation de la SAF Environnement. Il statue également sur la recevabilité des éventuels sinistres.

Plus récemment, des mécanismes financiers ont été mis en place pour la production de chaleur géothermique, aides à laquelle la filière Géothermie Très Basse Énergie peut prétendre accéder.

- **Conclusions**

Toutes les mesures progressivement mises en place sont favorables au développement de la géothermie en général, des pompes à chaleur géothermiques utilisées dans le neuf ou dans la rénovation, pour assurer les besoins de chaleur et de rafraîchissement en particulier.

² Le taux initial de 10 % a été abaissé à 5 % depuis le 1^{er} septembre 2005.

³ La durée initiale de la garantie était de 5 ans et a été portée à 10 ans en 1997.

⁴ SAF Environnement, 195 boulevard Saint-Germain, 75007 Paris tél : 01 58 50 76 76

Les pompes à chaleur géothermiques contribuent en effet à la réduction des consommations d'énergies fossiles, à la valorisation énergétique (par leur COP) et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

2.1.7. Description des usages géothermiques en fonction du type de ressource

La géothermie très basse énergie (TBE), associée aux systèmes de pompes à chaleur, peut apporter une réponse énergétique et environnementale satisfaisante dans le domaine du chauffage (et rafraîchissement) résidentiel et tertiaire (logements, bureaux, commerces).

Une pompe à chaleur permet de prélever de la chaleur à basse température (généralement 9 – 15 °C) dans un milieu et de la restituer à plus haute température dans un autre milieu.

La pompe à chaleur fonctionne selon le cycle thermodynamique suivant :

La chaleur absorbée au milieu extérieur (eau souterraine ou sondes géothermique) est transférée au circuit de la PAC par un échangeur (évaporateur) dans lequel un fluide frigorigène se vaporise à basse température ;

Le compresseur de la PAC (entraîné par un moteur électrique) comprime cette vapeur à haute pression ;

Par l'échange thermique entre le condenseur et le milieu extérieur (= production de chaleur) la vapeur repasse à l'état liquide ;

Le détendeur assure le passage du fluide liquide de la haute pression à la basse pression.

L'alimentation de la pompe à chaleur se fait par l'intermédiaire d'un "forage de prélèvement" d'eau souterraine (nappe phréatique, nappe captive peu profonde, nappe artésienne). En fin de cycle, l'eau est réinjectée dans un "forage de réinjection" (circuit plus ou moins fermé).

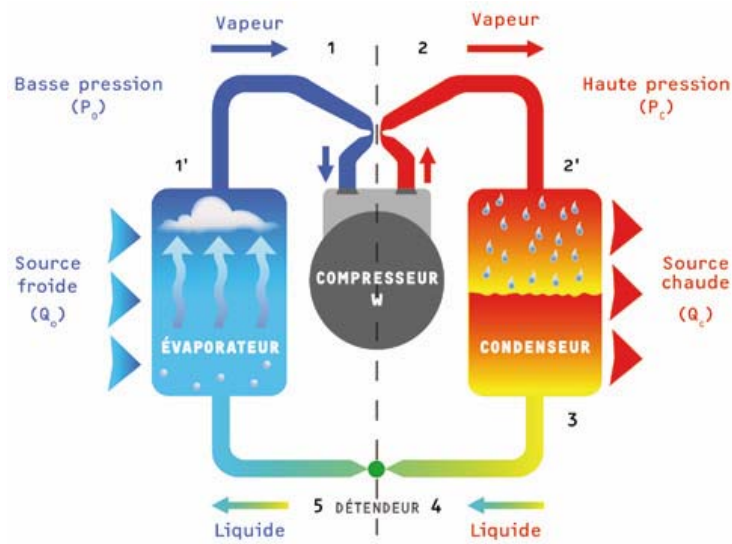


Figure 7 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur à compression (Tirée du Guide technique sur les pompes à chaleur géothermiques sur aquifère –ADEME, ARENE, BRGM mars 2008)

Pompe à chaleur sur aquifère superficiel

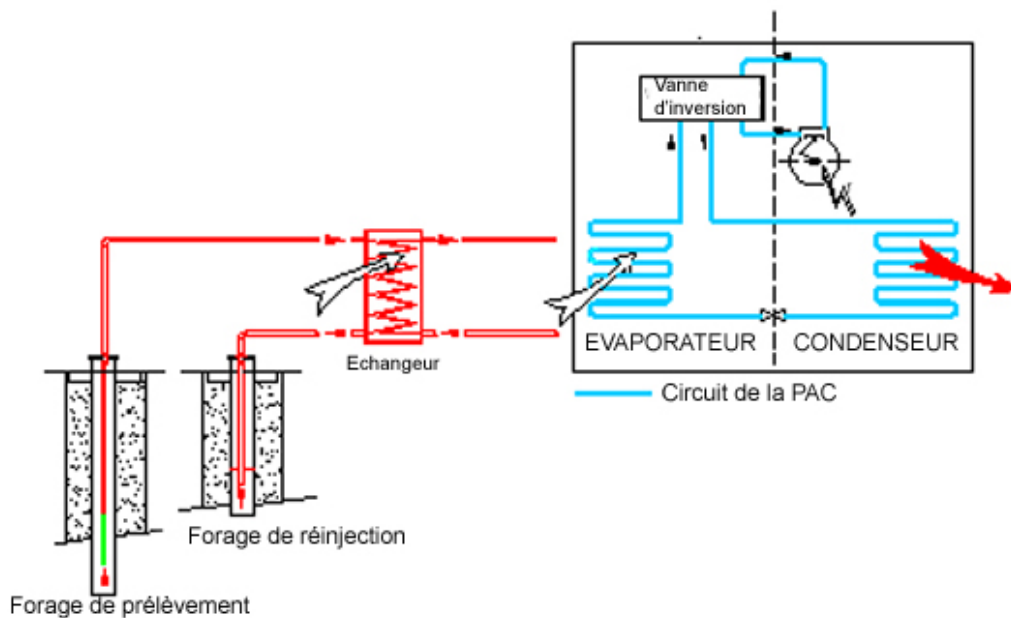


Figure 8 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur nappe (rapport ALTO)

En **fonctionnement d'hiver**, la pompe à chaleur géothermique prélève la chaleur contenue dans l'eau souterraine et restitue la chaleur à une température utilisable dans le circuit de chauffage du bâtiment (air, boucle d'eau, chauffage au sol). En **fonctionnement d'été**, une pompe à chaleur réversible permet (en mode rafraîchissement) de prélever l'énergie excédentaire à l'intérieur du bâtiment et de transférer la chaleur excédentaire (chaleur prélevée + la chaleur issue de la puissance du compresseur) dans l'eau souterraine.

Une autre option est le **rafraîchissement direct**, qui consiste à utiliser directement (avec interposition d'un échangeur) l'eau de la nappe pour assurer le rafraîchissement. On by-pass ainsi la pompe à chaleur. Enfin, le fonctionnement en « **thermofrigopompe** » permet la production simultanée de chaud et de froid (destinés aux appareils terminaux qui assurent le traitement d'ambiance des différentes parties du bâtiment). L'eau souterraine constitue la source d'énergie sur laquelle la production vient puiser le chaud ou le froid nécessaire.

Pompe à chaleur sur sondes géothermiques

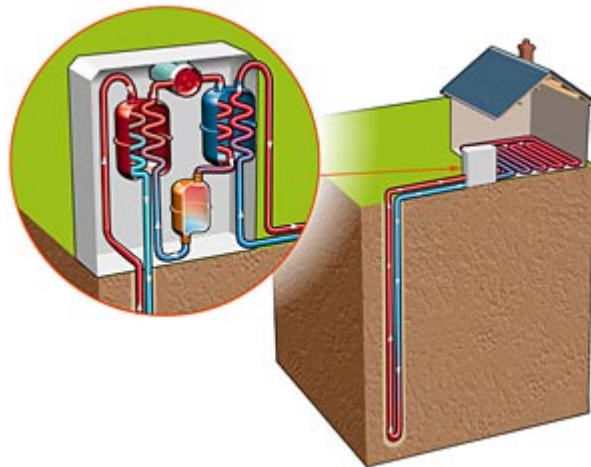


Figure 9 : Schéma de principe général d'une pompe à chaleur sur sondes géothermiques
(© ADEME – BRGM)

Les capteurs géothermiques verticaux (sondes géothermiques) sont des échangeurs thermiques qui prélèvent, par conduction thermique, la chaleur emmagasinée dans le sous-sol et la transportent vers la pompe à chaleur (PAC), par l'intermédiaire d'un liquide caloporteur (eau glycolée). Ils sont constitués d'un ou plusieurs forages verticaux, de quelques dizaines de mètres de profondeur, parfois plus, dans lesquels sont insérés des tubes en matériau synthétique, en général du polyéthylène haute densité (PEHD), raccordés à la PAC. Ces tubes peuvent être reliés entre eux, soit par une chambre commune, soit deux par deux en double U. Le fluide antigel caloporteur est composé d'eau glycolée (avec l'ajout de 10 – 30 % de monopropylène glycol, pour éviter le gel

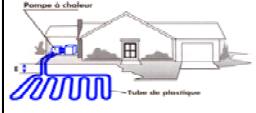
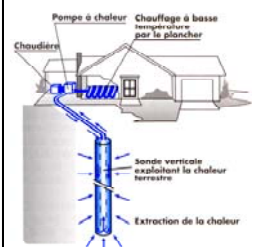
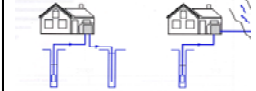
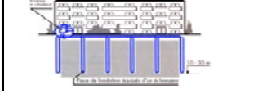
du circuit), et a la particularité d'avoir un très faible point d'ébullition et donc un grand pouvoir d'absorption de chaleur.

La PAC restitue en surface la chaleur prélevée et pour chauffer une habitation, de préférence au moyen d'un plancher chauffant. Pareillement que la pompe à chaleur sur aquifère superficiel, le système peut être inversé en été pour fonctionner en mode rafraîchissement (cas d'une PAC réversible).

Cette technique est adaptée aux maisons individuelles, à l'habitat individuel groupé, au résidentiel collectif ou au tertiaire. Elle bénéficie d'aides financières publiques (crédits d'impôts, aides aux opérations exemplaires de l'ADEME, aides de l'ANAH,...) et peut se satisfaire de démarches administratives simplifiées qu'il faut cependant connaître et respecter.

Le tableau présenté ci-après récapitule les différents types d'exploitation géothermique de très basse énergie.

Caractéristiques des principaux types d'échangeurs géothermiques très basse énergie

Type d'échangeur géothermique	Principe Conditions d'implantation Profondeur moyenne	Paramètres dimensionnement Puissance extraction Coût investissement	Réglementation et procédures administratives liées au sous-sol	Avantages / inconvénients
CAPTEURS HORIZONTAUX Applications : Individuel 	Principe : Prélèvement de la chaleur dans le sol à partir d'un réseau de tuyaux (en polyéthylène) dans lequel circule un fluide frigorigène ou de l'eau glycolée (selon la technologie de PAC utilisée), enterré horizontalement dans le jardin Conditions d'implantation : Sol meuble ou reconstitué. Espace demandé ~2 fois la surface à chauffer. Proscrit dans les terrains en pente. Attention aux racines d'arbres et à l'écrasement des tuyaux Profondeur moyenne (m) : 0.80 - 1.50	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Nature du sol (conductivité thermique qui va influencer la puissance d'extraction par m ² de sol en W/m ²), diamètre des tubes PE (20 - 32 mm), espacement des tubes (0.30 - 0.75 m) Puissance d'extraction (W/m) : 3.3 - 21.1 W/m ¹⁾ Coût d'investissement (€) : 30 - 45 €/ml ²⁾	Déclaration à la DRIRE - Ingénieur en chef des mines si : Profondeur < 10 m + gîte géothermique à basse température de minime importance (débit calorifique maximum calculé par référence à 20 °C < 200 th/h et profondeur < 100 m) Références : Code minier : Art. 102 + 131 Décret no78-498 du 28 mars 1978 modifié : Art. 17	Avantages : Coût d'investissement selon les cas (nature du sol, coût du décapage) Inconvénient : COP influencé par les conditions climatiques (température extérieure, pluies) et ne bénéficiant pas du gradient géothermique. Nécessite une grande surface de pose. Jouissance de la parcelle limitée
SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES Applications : Individuel, collectif, tertiaire 	Principe : Prélèvement de la chaleur par conduction dans le sous-sol à partir d'un échangeur thermique vertical dans lequel circule, en circuit fermé, un liquide caloporteur de qualité alimentaire. Conditions d'implantation : Tous types de sous-sol avec présence ou absence d'eau souterraine. Espace demandé sur le terrain pour une sonde (0,120 - 0,180 m) et espace recommandé entre 2 sondes 10 m Profondeur moyenne (m) : 80 - 100 3)	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Conductivité thermique des terrains qui va influencer la puissance d'extraction en W/m de sonde, présence d'eau souterraine, écoulement souterrain, diamètre des tubes (25 - 32 mm), conductivité thermique du laithier de scellement. Ratios de dimensionnement utilisés pour prédimensionnement : 50 W/m (terrains saturés); 30 W/m (terrains secs). Pour les champs de sondes, le dimensionnement sera réalisé par un bureau d'étude et validé in-situ par un ou plusieurs tests de réponse thermique. Puissance d'extraction (W/m) : 20 - 85 W/m ⁴⁾ Coût d'investissement (€) : 30 - 80 €/ml de sonde posée (inclus travaux de forage) ⁵⁾	Déclaration à la DRIRE - Ingénieur en chef des mines si : Profondeur de l'ouvrage (puits, forage) dépasse 10 m Ou Débit calorifique prélevé (calculé par référence à 20 °C) est < 200 th/h (232.5 kW) Références : Code minier : Art. 102 + 131 Décret no78-498 du 28 mars 1978 modifié : Art. 17 Demande d'autorisation à la Préfecture : Pour les travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques Si profondeur est > 100 m ou débit calorifique prélevé (calculé par référence à 20 °C) est > 200 th/h (232.5 kW) Si l'ouvrage est situé dans une zone de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public Si l'ouvrage est de nature à détruire les frayères ou les zones d'alimentation de la faune piscicole Références : Code minier : Art. 83 et Art. 98 à 102 Code environnement : Art. R214-1 (5.1.2.0) Décret no78-498 du 28 mars 1978 modifié : Art. 17 Code santé publique : Art. L.1322-4 Code environnement : Art. L.214-1 à L.214-6 et R214-1 (3.1.5.0)	Avantages : Technique simple et sûre (pas besoin d'eau souterraine). Rendements élevés (température d'entrée dans la PAC stable) et bénéficient du gradient géothermique). Nécessite un espace d'implantation réduit (zones urbaines). Jouissance totale de la parcelle. Entretien pluri-annuel minimum. Inconvénients : Coût d'investissement élevé en fonction de la profondeur totale forée et du type de terrain (tubage à l'avancement)
PAC SUR AQUIFERES Applications : Individuel, collectif, tertiaire 	Principe : Prélèvement de la chaleur dans l'eau souterraine par l'intermédiaire d'un puits de pompage et d'un forage de réinjection (doublet). Après son passage dans la pompe à chaleur, l'eau peut être également rejetée, après autorisation, dans un réseau, un cours d'eau ou un lac. Conditions d'implantation : Tous les types de sols à perméabilité de pore ou de fissure permettant l'écoulement de l'eau souterraine. Distance entre le puits de prélèvement et le forage de réinjection à déterminer en fonction des conditions hydrogéologiques locales (perméabilité, sens découlement de la nappe...) Profondeur moyenne (m) : "profondeur de l'aquifère déterminée par la géologie"	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Profondeur de la nappe, débit disponible pérenne dans le temps et température de l'eau souterraine. La garantie AQUAPAC pourra être souscrite (pour les puissances >30 kW) permettant de garantir le risque d'échec sur la ressource (débit insuffisant) et la pérennité de la ressource à long terme (diminution du débit). Puissance d'extraction (W/m) : 10 000 W par m ³ /h pompé ⁶⁾ Coût d'investissement (€) : 40 - 150 €/ml ⁷⁾	Déclaration à la Commune (mairie) pour : Dispositifs de prélèvements, puits ou forages à des fins d'usage domestique de l'eau (débit <1000 m ³ /an) Références : Décret n° 2008-652 du 2 juillet 2008 Déclaration à la Préfecture : Pour prélèvement souterrain temporaire ou permanent non destiné à un usage domestique (débit >1000 m ³ /an) Si 10 000 m ³ /an < débit < 200 000 m ³ /an Si débit entre 400 et 1000 m ³ /h ou 2 et 5% débit cours d'eau Références : Code environnement : Art. R214-1 (1.1.2.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.2.1.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.3.1.0) Demande d'autorisation à la Préfecture : Si débit > 200 000 m ³ /an Pour prélèvement en plan d'eau si débit >1000 m ³ /h ou 5% débit du cours d'eau Zones où mesures permanentes de répartition quantitative des eaux souterraines si débit >8 m ³ /h Références : Code environnement : Art. R214-1 (1.1.2.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.2.1.0) Code environnement : Art. R214-1 (1.3.1.0)	Avantages : Excellent rendement (COP gén. > 4) favorisé par une température de l'eau souterraine stable et plus ou moins élevée). Adapté aux grosses puissances Inconvénients : Réinjection parfois problématique. Problèmes de colmatage, de corrosion ou d'incrustation liés à la qualité de l'eau souterraine à vérifier. Coûts d'investissement élevés si aquifère profond ou mauvaise qualité de l'eau
GEOSTRUCTURES Applications : Collectif ou tertiaire 	Principe : Pieux géotechniques équipés de tubes PEHD, identiques à ceux des sondes géothermiques verticales. Conditions d'implantation : Terrains dont les caractéristiques mécaniques montrent une faible portance sur une épaisseur de plus de 5 - 8 m depuis la surface. Terrains cibles : sables, argiles, limons, marnes, graviers. Profondeur moyenne (m) : 20 - 30 m	Paramètres de dimensionnement du sous-sol : Même approche que pour les sondes géothermiques verticales, avec en plus les paramètres liés à la résistance thermique (conductivité thermique du ciment) et mécanique (résistance à la compression simple, angle de frottement, interne, cohésion) des pieux, ainsi qu'aux modifications physico-chimiques de ces paramètres notamment en présence d'eau souterraine. Valeurs cibles : Conductivité thermique et capacité thermique volumique de l'ordre de 2.0 [W/mK] et de 2.3 [MJ/m ³ K] respectivement. En tous les cas, la conductibilité thermique du sol devrait être d'au moins 1.3 [W/mK] et si possible supérieure à 1.8 [W/mK] pour un bon fonctionnement d'un système.	Idem que sondes géothermiques verticales Déclaration à la Préfecture : Si la puissance électrique absorbée par la PAC est comprise entre 50 kW et 500 kW Demande d'autorisation à la Préfecture : Si la puissance électrique absorbée par la PAC est > 500 kW Références : Rubrique 2920 des ICPE	Avantages : Valorisation énergétique d'un système nécessitant une structure porteuse. Implantation au-dessous du bâtiment. Inconvénients : Coût d'investissement élevé. Système nécessitant une étude globale englobant la géotechnique, la thermique, l'hydrogéologie et les altérations physico-chimiques des pieux à terme.

¹⁾ Pour une boucle de 100 m. Principaux paramètres : nature du sol (puissance d'extraction par m² de sol en W/m²), diamètre du PE (20 - 32 mm), espacement des tubes (0.30 - 0.75 m)

²⁾ Le prix dépendra essentiellement de la nature du sol et du coût du décapage

³⁾ Il s'agit d'une profondeur moyenne des sondes réalisées en France pour le domestique. A noter qu'en Suisse ou en Allemagne, des sondes sont couramment réalisées à une profondeur de 150 m et qu'une sonde a déjà été réalisée en Suisse à une profondeur de 706 m.

⁴⁾ La puissance linéaire d'extraction va dépendre du type de roche (20 w/m pour des sables secs à 85 W/m pour des roches consolidées type gneiss par exemple)

⁵⁾ Le prix dépendra essentiellement de la technique de forage utilisée (MFT ou rotary, le deuxième se situant dans la fourchette haute des prix).

⁶⁾ Puissance extraite avec un delta T °C de 6°C et un COP de l'ordre de 3.0

⁷⁾ Le prix tient compte du forage de prélèvement, du forage de réinjection et de la pompe de prélèvement (immergée). Il dépendra essentiellement de la profondeur de la nappe et du tubage à l'avancement

2.1.8. Procédure technique pour la mise en œuvre des pompes à chaleur sur aquifères

La validation d'un projet de pompe à chaleur sur nappe nécessite, en plus des études de conception nécessaires à tout projet une approche spécifique de la connaissance de la ressource en eau souterraine qui sera sollicitée.

Les principales étapes de la mise en œuvre sont les suivantes :

Détermination des besoins.

Il s'agit de déterminer les puissances chaud et froid qu'il faudra fournir au bâtiment.

Convertir ces deux puissances en débit d'eau à prélever sur la nappe ;

Identification préalable de la ressource.

L'analyse des données de l'atlas et l'estimation du débit nécessaire pour satisfaire tout ou partie des besoins thermiques permettra une première orientation.

Dans l'analyse de l'adéquation besoins/ressources, il n'est pas toujours pertinent de chercher à couvrir la totalité des besoins avec la solution PAC sur nappe. L'analyse du fonctionnement dynamique du bâtiment et des systèmes peut mettre en évidence des fluctuations importantes d'appel de puissance sur de faibles parts du temps de fonctionnement.

Etude de faisabilité hydrogéologique.

Cette étape requiert l'intervention d'un bureau d'étude spécialisé, car il s'agit d'affiner la démarche d'identification préalable de la ressource, en intégrant en particulier le nombre et le dimensionnement préalable des ouvrages, leur positionnement prévisionnel en fonction des contraintes du site,

Une première approche réglementaire peut également être réalisée à ce niveau ; ce qui permettra de connaître les documents administratifs à prévoir.

Conception, suivi, réception des travaux en sous-sol.

Dans cette étape, le bureau d'étude hydrogéologique intervient en tant qu'assistant à la maîtrise d'œuvre de la phase de conception jusqu'à la réception des travaux, tant pour les aspects techniques et financiers des ouvrages (forages, équipements, maintenance) que pour la partie administrative et réglementaire.

Enfin, il faut noter qu'il existe une procédure de « garantie sur la ressource en eau souterraine à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques » qui est destinée à couvrir le risque d'aléa sur la ressource et sa pérennité. C'est la procédure AQUAPAC.

Ces différentes étapes doivent être menées en concertation avec les autres intervenants du projet, afin d'obtenir le meilleur ajustement besoin - ressource. Une analyse économique devra comprendre une étude comparative afin de justifier la

solution pompes à chaleur sur nappe, intégrant les coûts d'investissement et les coûts de fonctionnement (énergie, maintenance), ainsi que l'aspect environnemental.

Dans le cas d'opération pour l'habitat individuelle

Si les principes de la démarche restent les mêmes, il est rarement fait appel à un bureau d'étude hydrogéologique. C'est sur le savoir faire et l'expérience de l'installateur chauffagiste et du foreur que repose la réussite de l'opération.

Enfin, on peut noter que dans le cas de logements pavillonnaires groupés, il peut être envisagé de mutualiser la ressource, en distribuant l'eau souterraine extraite à chacun des pavillons à partir d'un seul forage (ou groupe de forages).

2.2. OPERATIONS DE GEOTHERMIE CONNUES EN PAYS-DE-LOIRE ET SUR LE TERRITOIRE DE NANTES METROPOLE

La géothermie a connu un essor notable lors des dernières années. A titre d'exemple, l'Figure 10 montre l'évolution des déclarations de projets de géothermie reçues au BRGM de 1999 à 2007 (les données s'arrêtent à Août 2007) pour la région Pays de Loire.

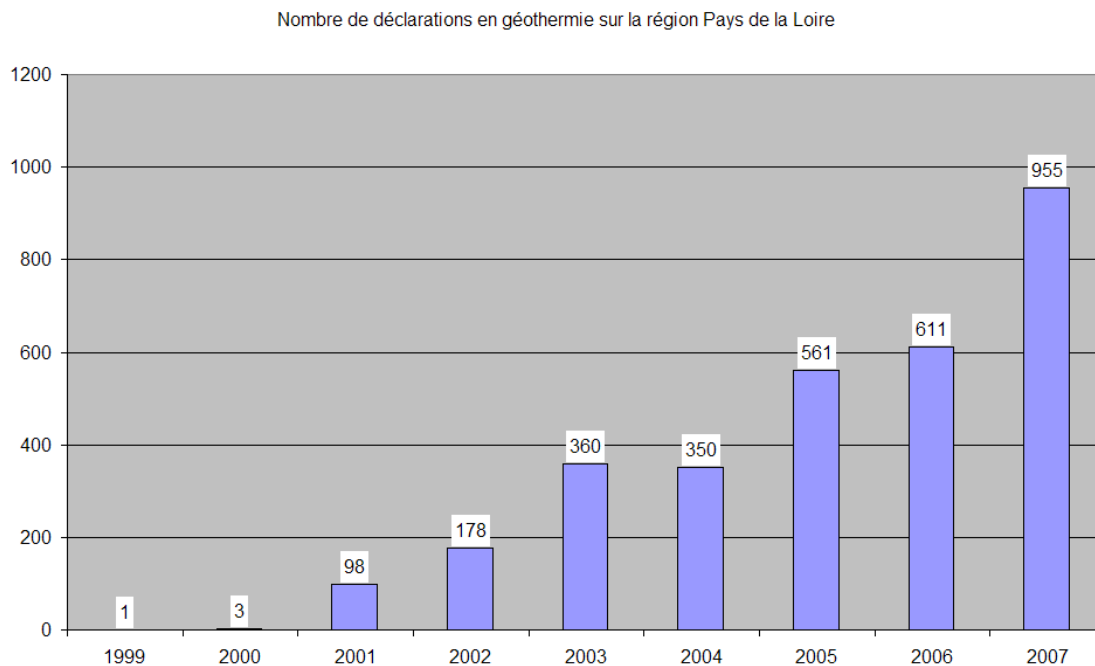


Figure 10 : Evolution du nombre de déclarations de projets de géothermie reçues au BRGM entre 1999 et août 2007 pour la région Pays de Loire

Consultée à ce sujet, l'ADEME ne dispose pas d'un recensement des opérations de géothermie conduites sur le territoire de Nantes Métropole. Les seules données disponibles proviennent donc de la Banque du Sous-Sol. 78 ouvrages dédiés à la géothermie sont connus en BSS. Il s'agit de :

- 7 forages avec pompage (période de réalisation : 1982-1984) ;
- 71 forages avec une sonde verticale (période de réalisation : 2001-2006).

Cette situation est vraisemblablement fortement sous-évaluée.

Par exemple, 146 déclarations d'intention de projet géothermique ont été transmises au BRGM, chacune pouvant correspondre à un ou plusieurs forages.

La Figure 11 cartographie les ouvrages de géothermie connus, ainsi que les sites ayant fait l'objet d'une déclaration d'intention de projet.

La liste des ouvrages recensés et celle des déclarations reçues de 2001 à Août 2007 sont placées en annexes 1 et 2.

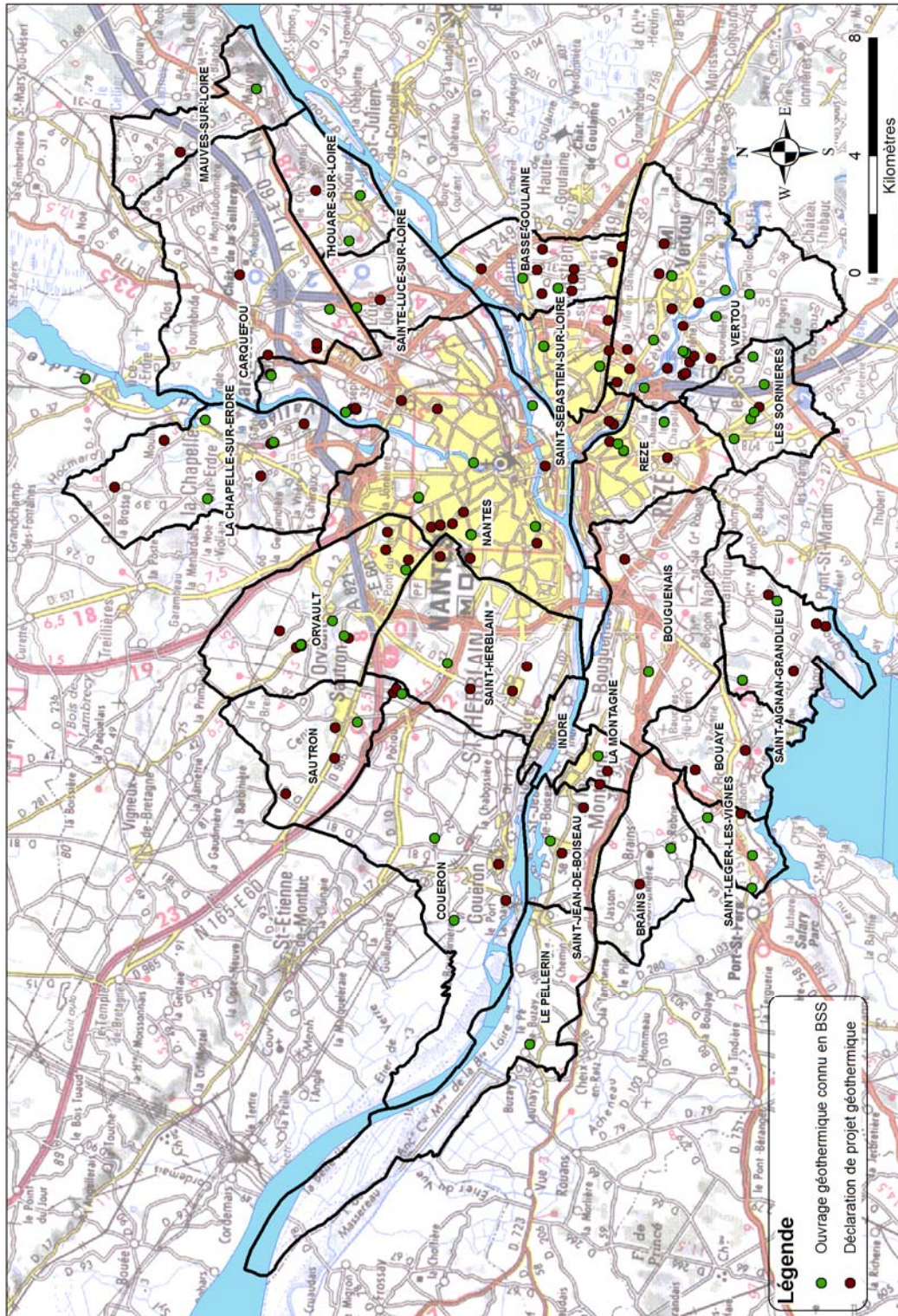


Figure 11 : Localisation des ouvrages géothermiques connus en BSS et des sites ayant fait l'objet d'une déclaration d'intention de projet de géothermie

3. Géologie

3.1. INTRODUCTION

L'implantation de sondes géothermiques dans les roches de sub-surface (0-100 m) implique de connaître ou d'estimer la nature, la géométrie et l'état des roches qui y seront rencontrées. Les cartes géologiques apportent une partie de ces informations, en fournissant des données sur la nature, la structure et l'âge des terrains.

Dans la zone d'investigation (0-100 m) les roches présentent des degrés d'altération qui varient en fonction de la profondeur. Cette variation de l'état de la roche se traduit par des modifications importantes de ses propriétés (mécaniques, hydrodynamiques...). Ces modifications influent directement sur la capacité de la roche à transmettre la chaleur ainsi que sur les systèmes hydrogéologique et hydrologique.

L'objectif de ce travail est donc la reconnaissance géologique des formations superficielles et plus particulièrement celles associées à l'altération.

3.2. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La région nantaise, traversée d'est en ouest par la Loire, présente un relief faible (de 0 à 80 m). Morphologiquement, cette zone est constituée par deux plateaux situés de part et d'autre du fleuve. Ils sont entaillés par de nombreux cours d'eau formant vallées et vallons.

La zone d'étude est centrée sur la carte géologiques de la France au 1/50 000ème de Nantes (feuille 481). Elle chevauche également une partie des cartes de Nort-sur-Erdre (feuille 451), Paimboeuf (feuille 480), Vallet (feuille 482) et St-Philbert-de-Grand-Lieu (508).

La diversité des roches composant le substratum de Nantes Métropole (cf. annexe 3) s'explique par la complexité de l'histoire géologique régionale qui s'inscrit dans celle du Massif armoricain et celle du seuil du Poitou.

Le contexte géologique au sud du Massif armoricain est guidé par la mise en place de la Loire sur un substratum paléozoïque structuré et recouvert par les sables pliocènes. Les dépôts argilo-sableux à caillouteux de la Loire recouvrent les versants de part et d'autre du lit actuel du fleuve sur 1 km à 3 km de largeur. Ces dépôts récents recouvrent les sables pliocènes et un socle structuré lors de l'orogénèse hercynienne. Le socle est constitué par des formations plutoniques et meta-volcano-sédimentaires, métamorphisées lors de l'orogénèse. Les roches qui constituent le bâti hercynien sont structurées selon une direction N110-120, parallèlement au Cisaillement Sud

Armoricaïn (CSA) qui traverse la communauté urbaine de Nantes Métropole depuis l'ouest (Couëron) jusqu'au sud-ouest (Vertou).

3.2.1. Les formations de socle et du Pliocène

Les unités de socle se répartissent en bandes de largeur variable, parallèlement au Cisaillement Sud Armoricaïn :

- L'unité située au sud-ouest du territoire de Nantes Métropole correspond à la Formation des Mauves. Elle est essentiellement constituée de micaschistes et correspond au substrat des communes de Mauves-sur-Loire, Carquefou, La Chapelle-Sur-Erdre, Thouare-Sur-Loire, Saint-Lucie-Sur-Loire, Basse-Goulaine, Saint-Sébastien-Sur-Loire, le nord et l'est de Nantes, le nord de la commune de Vertou, le sud de la commune d'Orvault et le centre de la commune de Sautron.
- Vers le sud-ouest, après une fine bande d'amphibolite (Formation de Drain), traversant les communes de Vertou, Nantes et Saint-Herblain, on passe à la Formation de Landreau constituée de micaschistes et de gneiss à biotite et muscovite. Ce niveau forme une bande partant du sud de la commune de Sautron et passant par Saint-Herblain, Nantes, Rezé pour se terminer à Vertou.
- Le nord des communes d'Orvault et de Sautron, ainsi qu'une bande partant du nord de la commune de Couëron pour passer par Saint-Herblain, l'extrémité sud-ouest de Nantes, l'est de Bouguenais, le sud-ouest de Rezé, l'ensemble de la commune des Sorinières et l'extrémité sud de Vertou ont un substrat granitique traversé par le Cisaillement Sud Armoricaïn à l'origine de la déformation intense des granites.
- Vers l'ouest, la Formation de Pellerin-Montaigu, constituée de gneiss feuilletés à muscovite et de leptynite, forme l'essentiel du substrat du territoire des communes de Couëron, Indre-Sur-Loire, du sud-ouest de Saint-Herblain, d'une partie des communes de Bouguenais, La Montagne, Saint-Jean-de-Boiseau, Brain et le Pellerin ainsi que de l'extrémité orientale de la commune de Vertou. Elle est associée à la Formation de Paimboeuf, constituée de gneiss leptynitique à sillimanite qui est présente sur les communes de Couëron et de Saint-Herblain.
- Au sud de la commune de Vertou est présent le massif de Château-Thébaud marqué par des granodiorites et des diorites. Les formations de Saint-Paul-en-Pareds, constituées par des micaschistes à biotite, de Chauvé-l'Angle-Mervent constituées d'orthogneiss à deux micas et la Formation de Montaigu, constituée d'amphibolite massive, constituent le substrat affleurant des villes du sud-ouest de la communauté urbaine.
- Les massifs de l'Ortay et du Bignon correspondent à des massifs granitiques à deux micas et sont présents sur les communes de Rezé, Bouguenais et les Sorinières. La Formation de Champtoceaux est présente à l'est de la commune de Vertou sous la forme leptynite à biotite et muscovite.

- Il existe d'autres faciès associés essentiellement à des filons comme les filons de quartz, de pegmatites ou encore de péridotites et de serpentinites. Ils représentent de très faible surface sur la carte (moins de 1 %) et sont dispersés au sein de l'ensemble des communes de la moitié ouest et sud de Nantes Métropole.

Après l'orogénèse hercynienne, la région est soumise à une intense érosion permettant l'aplanissement progressif de la topographie. Les dépôts sableux et rouges du Pliocène recouvrent une surface marquée par une topographie localement accusée. Ainsi, au nord-est de la communauté urbaine, les dépôts correspondent à des remplissages de graben de 70 m de profondeur orientées NNW-SSE. Ces dépôts du Pliocène reposent sur les altérites de socle préservées au niveau des plateaux. Ceci indique que l'essentiel des phénomènes d'altération se sont produits avant le Pliocène.

Sur les cartes géologiques au 1/50 000ème, les altérites sont représentées par des « limons des plateaux » ou « limon éoliens ». Elles correspondent en fait à des argiles silteuses à sableuses d'altération qui était autrefois interprétée, à tort, comme le résultat de dépôts éoliens. Ces altérites sont préservées au niveau des plateaux.

Selon la carte géologique, il ne semble pas y avoir de préservation d'altérite au sommet du massif granitique d'Orvault-Mortagne. Or, les observations sur le terrain démontrent le contraire. Les géologues en charge du levé de la carte avaient décidé de ne pas représenter les altérites en place car la lithologie du substratum sous-jacent était identifiable.

Le long de la Loire et au niveau des communes situées dans la partie occidentale de la zone d'étude, les formations quaternaires, fluviatiles et fluvio-marines recouvrent de manière importante le substratum pour le masquer.

3.2.2. Les formations alluviales

Les alluvions fluviatiles modernes

• La Loire

Creusée à peu près dans son état actuel dès avant le Pliocène, la gouttière rocheuse de la Loire a été déblayée et remblayée au cours des régressions et des transgressions eustatiques, au Quaternaire. Pendant la dernière transgression du Quaternaire, le fleuve s'est déplacé d'un bord à l'autre de son lit, si bien que les parties les plus profondes de celui-ci ne se situent généralement pas à l'aplomb du lit actuel. D'anciens thalwegs atteignent – 30 m NGF au niveau de Nantes, avec un remplissage de 35 m d'alluvions. Ce creusement est retrouvé dans les affluents, tels la Sèvre Nantaise (lit ancien à - 21 m NGF, l'Erdre (cote du fond connue : - 23 m NGF à Nantes), la Chezine (- 17 m à l'embouchure). La zone de l'île Cheviré constitue une

Figure intéressante de cette paléomorphologie fossilisée par les alluvions (Figure 12). Des thalwegs profonds sont mis en évidence, dont certains représentent probablement l'amorce de lits anciens d'affluents. Le remblaiement récent de la vallée de la Loire est connu par de nombreux sondages (Nantes, Ile Cheviré, Pé de Buzay). Sur les alluvions anciennes (sables et galets datant de la dernière glaciation, le Würm) repose un complexe de sédiments fins, fluvio-estuariens, épais d'une quinzaine de mètres à Nantes.

Au pont Haudaudine, il comprend, du sommet à la base : de la vase sableuse micacée (avec débris de charbon) (+ 2 à - 0,60 m NGF), du sable jaune grossier et du gravier (- 0,60 à - 3,80 m), de l'argile grise sableuse : «jalle» (- 3,80 à - 6,20 m), du sable argileux ou grossier avec gravier et petits silex (- 6,20 à 13,30 m). Les minéraux lourds provenant du Massif Central sont très abondants dans les sables jaunes : augite (71 à 85 %), olivine (9 %), fibrolite (jusqu'à 4 %).

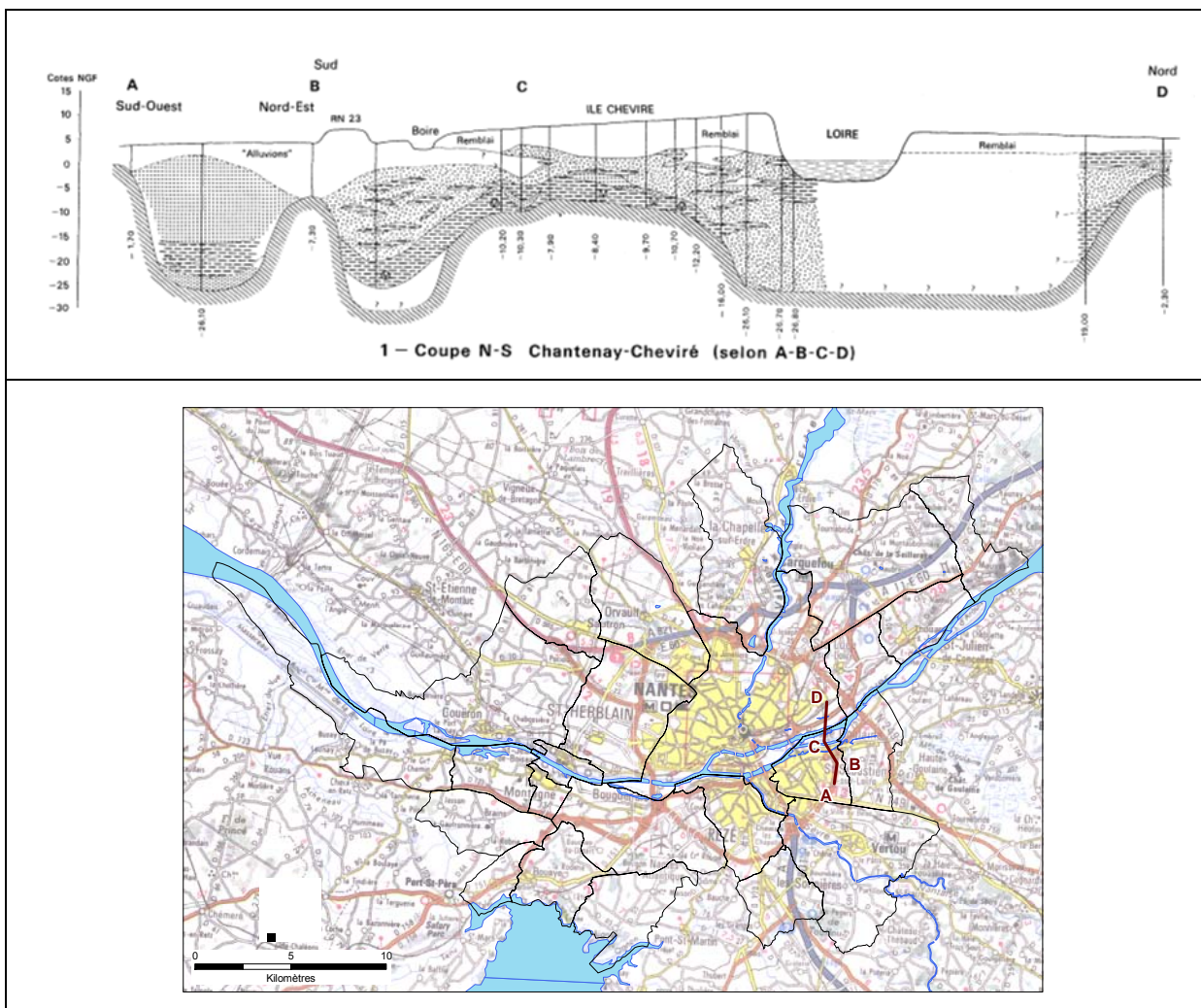


Figure 12 : Morphologie du lit rocheux de la Loire et nature des alluvions dans la zone de Cheviré (coupe localisée sur fond IGN©)

- **L'Erdre**

En bordure de l'Erdre ainsi que dans les cours inférieurs et moyens de ses tributaires se sont déposées des alluvions grises, argileuses ou argilo-sableuses. Les dépôts ont moins d'un mètre et sont toujours entaillés par le lit mineur. Dans les vallons des ruisseaux, ces dépôts se réduisent à un voile de limon d'inondation qu'il est difficile de délimiter par rapport aux colluvions des berges. Leur âge est holocène à historique.

Les terrasses et alluvions fluviales anciennes

- **Alluvions anciennes (Würm)**

Les alluvions de la Loire déposées lors de la dernière glaciation (le Würm) recouvrent partout le lit rocheux du fleuve, A l'amont de Nantes, elles forment une terrasse entre Chouzé et Saumur (à + 5 m d'altitude relative), puis elles passent sous les alluvions actuelles. A Nantes, elles gisent sous les alluvions fluvio-marines récentes (Flandrien), entre - 13 et - 27 m de profondeur (NGF). Le thalweg rocheux descend de - 27 m à Nantes jusqu'à - 37 m environ à la Martinière, et - 50 m à Mindin. Épaisses de 14 m en moyenne à Nantes, ces alluvions sont constituées par du sable siliceux, du gravier et des galets de roches cristallines non altérées.

- **Terrasses**

Un lambeau résiduel d'une **haute terrasse** culmine à 33 m au Sud de Basse-Goulaine. La fraction argileuse est plus importante dans ces sédiments que dans les alluvions plus récentes.

Sur la rive droite de la Loire, **une moyenne terrasse** (25 m NGF) s'étend largement au pied du Sillon de Bretagne, où elle atteint 8 m d'épaisseur. Les alluvions ont été arrachées par l'érosion des vallons, mais peuvent atteindre 6 m d'épaisseur au sommet de l'interfluve. Au Nord de Bois Corbeau la moyenne terrasse comprend de haut en bas : du sable fin rouge, du sable graveleux avec de nombreux silex jaunes et de l'argile grise reposant sur le gneiss altéré. La caractéristique pétrographique de ces alluvions est la présence, parmi les galets de quartz et de grès siliceux, de nombreux silex bruns ou jaunes apportés par la Loire

A Sainte-Luce et à l'Est de Nantes, subsistent des restes d'une nappe alluviale formant une **basse terrasse** (+12 m NGF) emboîtée dans la moyenne terrasse. Le sédiment qui la compose est plus sableux et les galets plus petits que dans la moyenne terrasse.

3.3. GEOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES

La reconnaissance géologique des formations superficielles, notamment des effets des processus d'**altération** sur les différents types de roches est indispensable dans le cadre du présent projet. En effet, l'altération se manifeste par des modifications importantes des propriétés des roches : propriétés mécaniques, mais aussi et surtout propriétés hydrodynamiques, qui vont **conditionner en premier lieu l'hydrogéologie de ces formations**.

Dans le cadre de l'étude, la reconnaissance géologique portera tout particulièrement sur l'altération des roches de socle, le territoire de Nantes Métropole reposant en grande partie sur des formations de socle de type plutonique et métamorphique.

3.3.1. Définitions et processus

La plupart des régions où affleurent les roches métamorphiques ou plutoniques, comme le Massif central ou le Massif armoricain, sont des régions dites « stables », exposées pendant des durées souvent très longues (plusieurs dizaines de millions d'années) à l'altération météorique, sous des climats humides, éventuellement plus chauds que ceux qui règnent actuellement. Cette altération a permis le développement de puissants profils d'altération de type latéritique, dont on retrouve des traces dans le Massif armoricain.

La stabilité d'une région s'établit selon la règle qui veut que la région considérée soit caractérisée par un relief doux en domaine émergé. Cette condition est indispensable pour le développement d'un profil d'altération. En effet, pour que l'altération se développe, le taux d'érosion mécanique doit être inférieur à la vitesse de propagation verticale de l'altération au sein de la roche ; dans le cas contraire, les produits d'altération sont systématiquement évacués par l'érosion et les profils d'altération ne peuvent se constituer.

L'altération latéritique, dite « soustractive », résulte de la déstabilisation chimique, au contact de l'eau d'infiltration, des minéraux les plus sensibles (biotite, feldspaths), et de l'exportation en solution des éléments les plus solubles contenus dans ces minéraux (potassium, sodium, calcium, etc.) ; les éléments chimiques restants se réorganisent en de nouveaux minéraux stables dans les nouvelles conditions : ce sont principalement des argiles, des oxydes et des hydroxydes. Le processus est continu tant qu'il y a de l'eau qui circule dans le profil et aboutit, sur de longues périodes, à une concentration relative des éléments les moins solubles (Fer, Aluminium) associée au départ des autres éléments.

Un **profil latéritique**, lorsqu'il est complet, comprend typiquement, de haut en bas, plusieurs niveaux ou « horizons » (Figure 13) :

- une **cuirasse ferrugineuse ou bauxitique** épaisse de quelques mètres ;

- un **horizon meuble** épais de plusieurs dizaines de mètres (« saprolite »), à dominante argileuse, notamment pour les roches riches en minéraux phylliteux, comme les schistes par exemple, ou argilo-sableuse (arène) pour les roches riches en quartz comme les granites. Au sein de la saprolite, on peut distinguer deux horizons :
 - un niveau supérieur, l'**allotérite**, au sein duquel l'altération soustractive s'est traduite par une diminution très importante de volume de la roche et où sa structure originelle n'est plus identifiable,
 - un niveau inférieur, l'**isaltérite**, au sein duquel l'altération s'est traduite par des modifications isovolumiques et où la structure originelle de la roche est préservée.

Les recherches développées au BRGM depuis la fin des années 1990 sur les propriétés physiques acquises par les roches de socle au cours de l'altération météorique ont conduit à la mise en évidence, sous la partie meuble des profils, d'un **horizon fissuré** stratiforme de 50 à 100 m de puissance (Figure 13). L'origine de cette fissuration est généralement attribuée à des processus de « décompression » (Davis and Turk 1964 ; Acworth 1987 ; Wright 1992). Cependant, des observations récentes (Wyns et al. 1999 ; Lachassagne et al. 2001 ; Cho et al. 2003 ; Wyns et al. 2003), menées tant à l'échelle du paysage qu'à celle des minéraux, montrent que le gonflement des minéraux au cours du processus d'altération peut être à l'origine de contraintes engendrant une fracturation du massif rocheux. Ainsi, par exemple, la biotite, en s'hydratant, va se transformer en vermiculite ; ce processus s'accompagne du « gonflement » du minéral avec un écartement interfoliaire qui passe de 10 Å à 14 Å (Figure 14). Cette augmentation volumique à l'échelle du minéral engendre des contraintes au sein de la roche et sa fracturation (Wyns, 2003).

Généralement, notamment au sein des roches isotropes (granites par exemple), cette augmentation de volume de la roche et les contraintes associées se traduisent par la formation de fissures horizontales, car les contraintes accumulées ne peuvent se « libérer » que vers le haut, là où il existe de l'espace disponible.

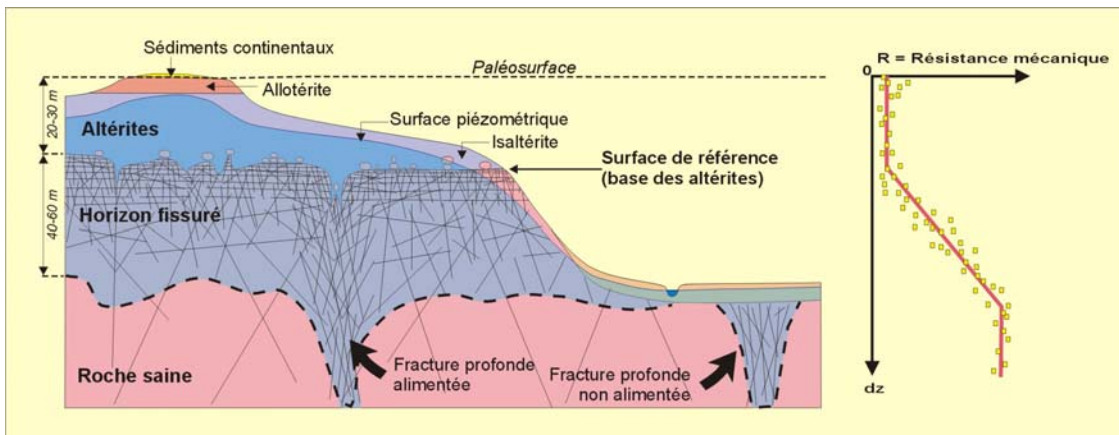


Figure 13- Modèle conceptuel des propriétés physiques des roches en contexte de socle altéré (Wyns, 1999)

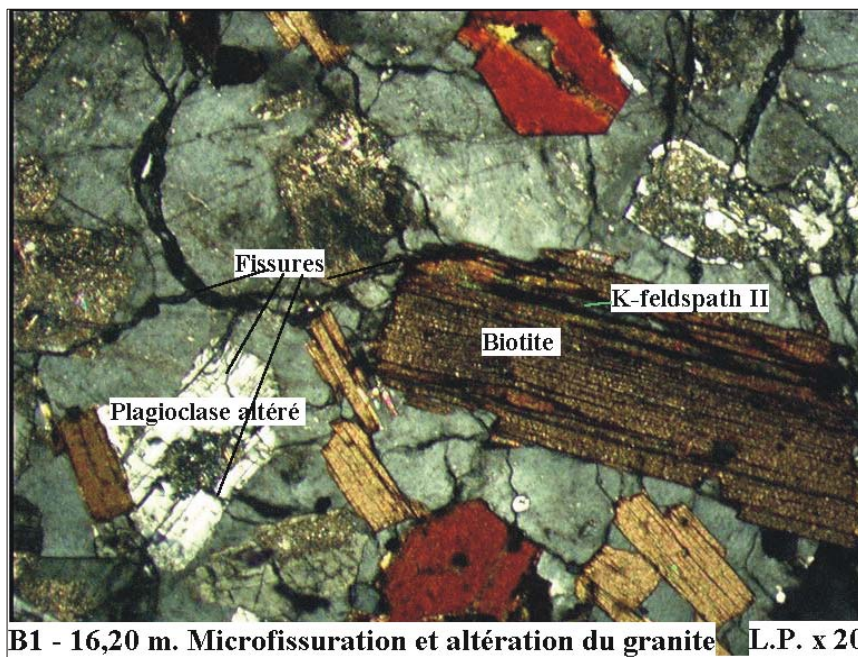


Figure 14 - Développement de microfissures au voisinage des minéraux gonflants (biotite notamment)

3.3.2. L'horizon fissuré

Plus le degré d'altération de la roche est important, plus la densité des fissures est importante. Ainsi, la fréquence des fissures de l'horizon fissuré est maximale au sommet du bed-rock, juste sous la saprolite, et décroît régulièrement vers le bas.

L'existence et l'intensité du réseau de fissures induit par l'altération sont contrôlées par la minéralogie et la texture de la roche. Les roches riches en biotite présentent un horizon fissuré bien développé. Les roches dépourvues de biotite ou de minéraux susceptibles d'augmenter de volume ne développent pas ce type de fissuration. A minéralogie équivalente, les roches à gros grain présentent un horizon fissuré plus développé que les roches à grain fin.

L'épaisseur de l'horizon fissuré est proportionnelle à celle des altérites meubles du profil d'altération avant érosion. Pour une lithologie donnée, elle dépend principalement de la durée pendant laquelle s'est exercée l'altération et du potentiel topographique (altitude du sol) au moment de l'altération, permettant au profil de s'enfoncer (Wyns, 2003).

Exemples de typologie de l'horizon fissuré

Les caractéristiques de l'horizon fissuré diffèrent en fonction de la nature lithologique de la roche et de la géométrie des corps qui la composent :

- **roches grenues isotropes** (notamment les granites) : les biotites ne sont pas orientées, le gonflement a pour effet d'augmenter fortement les composantes horizontales du tenseur de contraintes⁵ par rapport à la composante verticale. Le déviateur de contraintes⁶ ainsi créé entraîne la rupture de la roche selon des plans horizontaux, perpendiculaires à la contrainte minimale. Il en résulte des fissures planes, subhorizontales, bien reconnaissables à l'affleurement (Figure 15). Cet effet mécanique s'observe également dans la partie inférieure des arènes, qui prennent un aspect feuilleté (« horizon feuilleté »). C'est la coalescence de ces plans horizontaux au sommet de l'horizon fissuré qui matérialise la transition avec les arènes ;
- **roches foliées et non plissées** (orthogneiss) : l'intensité de la fissuration est maximale pour une foliation verticale, et minimale pour une foliation horizontale ;
- **roches foliées et plissées** (schistes, micaschistes, etc.) : la variation rapide de l'orientation et de la proportion des minéraux gonflants jointe à celle des surfaces de faiblesse de la roche entraîne une géométrie anarchique du réseau de fissures ; toutefois, pour ces roches comme pour les précédentes, cette fissuration présente également un gradient décroissant vers le bas du profil.

⁵ **Tenseur de contraintes** : Représentation mathématique de l'état des contraintes au sein d'un milieu continu, c'est à dire des forces par unité de surface agissant entre volumes élémentaires.

⁶ **Déviateur de contraintes** : Représentation mathématique exprimant la partie associée aux déformations cisailantes iso volumiques du tenseur des contraintes.



Figure 15 - Aspect caractéristique de l'horizon fissuré dans un granite (Livradois – Auvergne)

3.3.3. Perturbation de la géométrie des horizons d'altération

Influence des variations lithologiques

D'une manière générale, les roches à gros cristaux et riches en biotite/micas noirs s'altèrent plus facilement que les autres. Dans le cas de roches métamorphiques, on remarque que la fissuration est plus désordonnée. Pour certaines roches contenant des biotites, la fissuration horizontale ainsi que l'augmentation de la densité de fissures vers le haut des profils d'altération sont très bien marquées.

Les roches de type leptynite ou orthogneiss dérivées de séries sédimentaires gréseuses, pauvres en mica, s'altèrent plus difficilement (Figure 16).



Figure 16 : Différence de pénétration de l'altération au sein des micaschistes (au Nord) et des faciès leptynitiques (au Sud) (Carrière des Chaudières, située dans la partie sud du territoire étudié)

Certains filons de granite, microgranite, quartz... vont mieux résister à l'altération. En revanche, ils vont se fracturer sous l'effet des contraintes induites par leur encaissant lors des transformations minéralogiques. Ces filons peuvent donc constituer, au sein du massif, des zones où les fractures ouvertes peuvent constituer des zones de drains hydrologiques préférentiels.

Comme indiqué plus haut, la minéralogie des différentes formations géologiques a un impact direct sur leur susceptibilité vis à vis des processus d'altération. Ainsi, les profils d'altération seront généralement plus épais au toit de formations riches en biotite (granite à biotite, gneiss par exemple) que de roches qui en sont dépourvues (leucogranites par exemple) ou, a fortiori, de roches très peu sensibles au processus d'altération (grès ou quartzites par exemple).

Il en résulte des variations locales de la profondeur de la base des différents horizons d'altération qui peuvent s'accompagner d'une morphologie spécifique en surface (Figure 17).

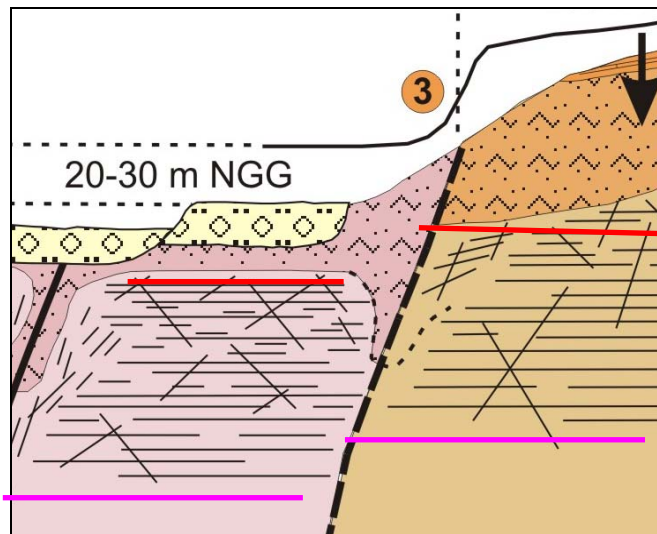


Figure 17 : Schéma illustrant les variations de la profondeur de la base de la saprolite (traits rouges) et de la base de l'horizon fissuré (traits violets) pour deux lithologies contrastées (granodiorite à gauche et schistes et quartzites à droite) (Extrait de Courtois et al., 2003)

Influence des discontinuités

Dans le cas d'une structuration tectonique préexistante à l'altération ou contemporaine, de la présence de corps magmatiques injectés au sein du massif (filons, dykes), ou de contacts lithologiques, ces discontinuités constituent des lieux privilégiés de diffusion (voire éventuellement d'écoulement) des eaux d'origine météorique, au niveau desquels les phénomènes d'altération se développent préférentiellement. Ces structures sont alors à l'origine de l'approfondissement local de la base de la saprolite et donc de l'approfondissement de l'horizon fissuré (Figure 18).

Au sein d'un massif, la présence de discontinuités (fractures, fissures, gorges de failles, filons, contacts lithologiques, etc.) va être à l'origine d'une forte perturbation locale de l'orientation des différentes composantes du tenseur de contraintes. Le développement de la fissuration sera en partie contrôlé par la(les) discontinuité(s) locale(s) mais également par la composante régionale. Les fissures engendrées au cours de l'altération ne seront alors plus guidées uniquement par la composante verticale, elles auront tendance à se paralléliser à la ou les discontinuité(s) et se développeront de manière non réglée.

Afin de ne pas compliquer la modélisation et d'obtenir un modèle réaliste, il sera fait abstraction de ces zones dans la présente étude.

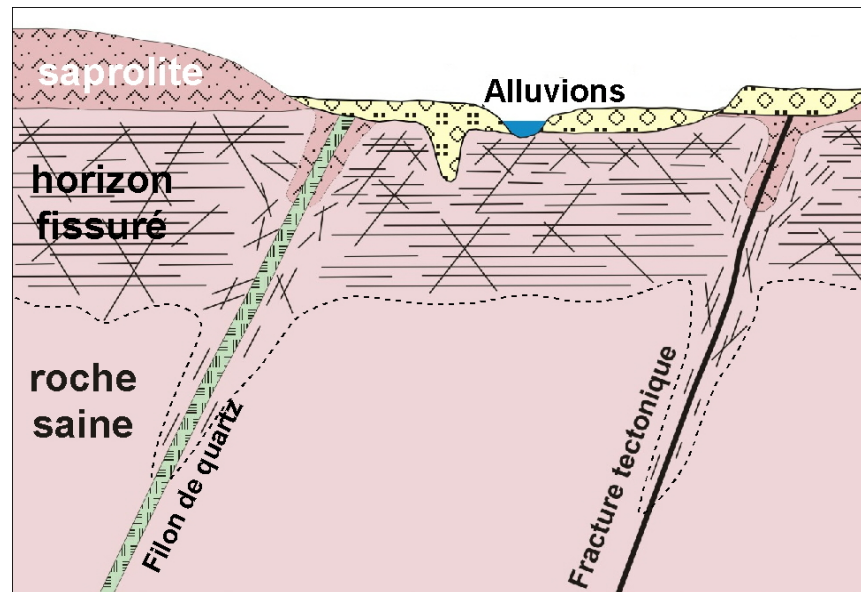


Figure 18 : Schéma illustrant l'approfondissement local du front d'altération au niveau de discontinuités (fractures et filons pré-existant à l'altération) (Extrait de Courtois et al., 2003).

Paléosurfaces étagées

Chacune des phases d'altération suffisamment longue dans le temps est à l'origine de la formation d'une saprolite et de son horizon fissuré. Sur les massifs hercyniens français, loin des zones orogéniques, si deux phases d'altération se succèdent dans le temps et que la plus ancienne n'est pas totalement érodée avant la formation de la seconde, on observe généralement que les restes (saprolite et horizon fissuré) de la première phase seront préservés au niveau d'inselbergs. C'est à dire au sommet de reliefs résiduels anciens (Figure 19).

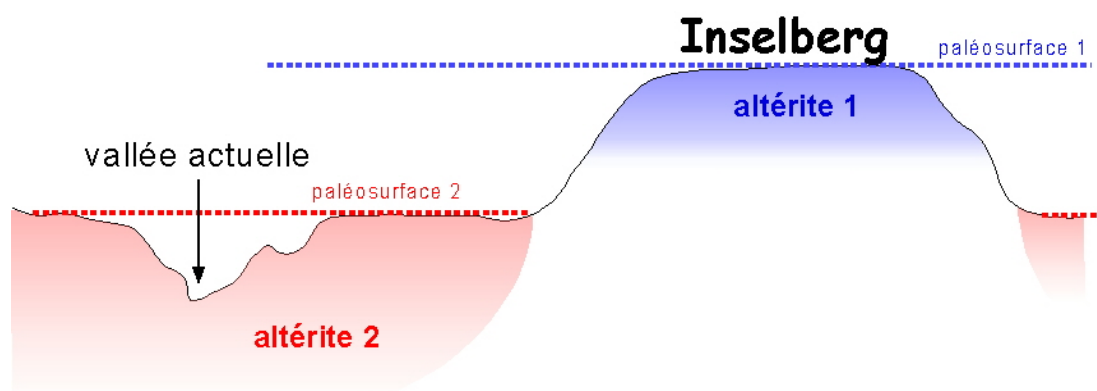


Figure 19 : Schéma représentant des paléosurfaces étagées et définissant la notion d'inselberg

3.3.4. Déformation des paléosurfaces

Ultérieurement à la phase d'altération, une phase tectonique peut être à l'origine de la formation de failles majeures et/ou mineures, ou de flexures venant déformer les horizons altérés en basculant et/ou décalant les altérites.

Comme le sommet de la saprolite est généralement érodé, seul le passage de la saprolite à l'horizon fissuré est alors observable et cartographiable sur le terrain, si l'horizon fissuré est bien conservé. Si l'érosion a atteint l'horizon fissuré, la détermination de la morphologie des terrains altérés anciens devient alors impossible à partir d'observations de terrain.

La cartographie de cet horizon repère (passage de la saprolite à l'horizon fissuré) peut permettre de caractériser des déplacements relatifs verticaux, qu'ils soient associées à un basculement des paléosurfaces ou à des décalages par failles ou par flexures. Par contre, les déplacements horizontaux associés par exemple à des décrochements sont quasiment impossibles à mettre en évidence.

Lorsque les déformations se marquent par la formation de failles, en régime extensif ou compressif, avec ou sans composante décrochante, ces failles sont alors généralement fortement pentées à subverticales. Les décalages relatifs entre blocs doivent être supérieurs à la dizaine de mètres pour pouvoir être identifiés de manière significative au moyen du marqueur que constitue la base de la saprolite.

Les structures décalant la base de la saprolite ont été identifiées et sont prises en compte dans la modélisation de la base de l'altérite.

3.3.5. Géométrie des paléosurfaces

La combinaison des variations lithologiques et faciologiques, de la structuration tectonique et des différentes phases d'altération et d'érosion est à l'origine de la complexité du relief actuel. Un exemple de reconstitution de l'évolution du relief est proposé ci-dessous (Figure 20).

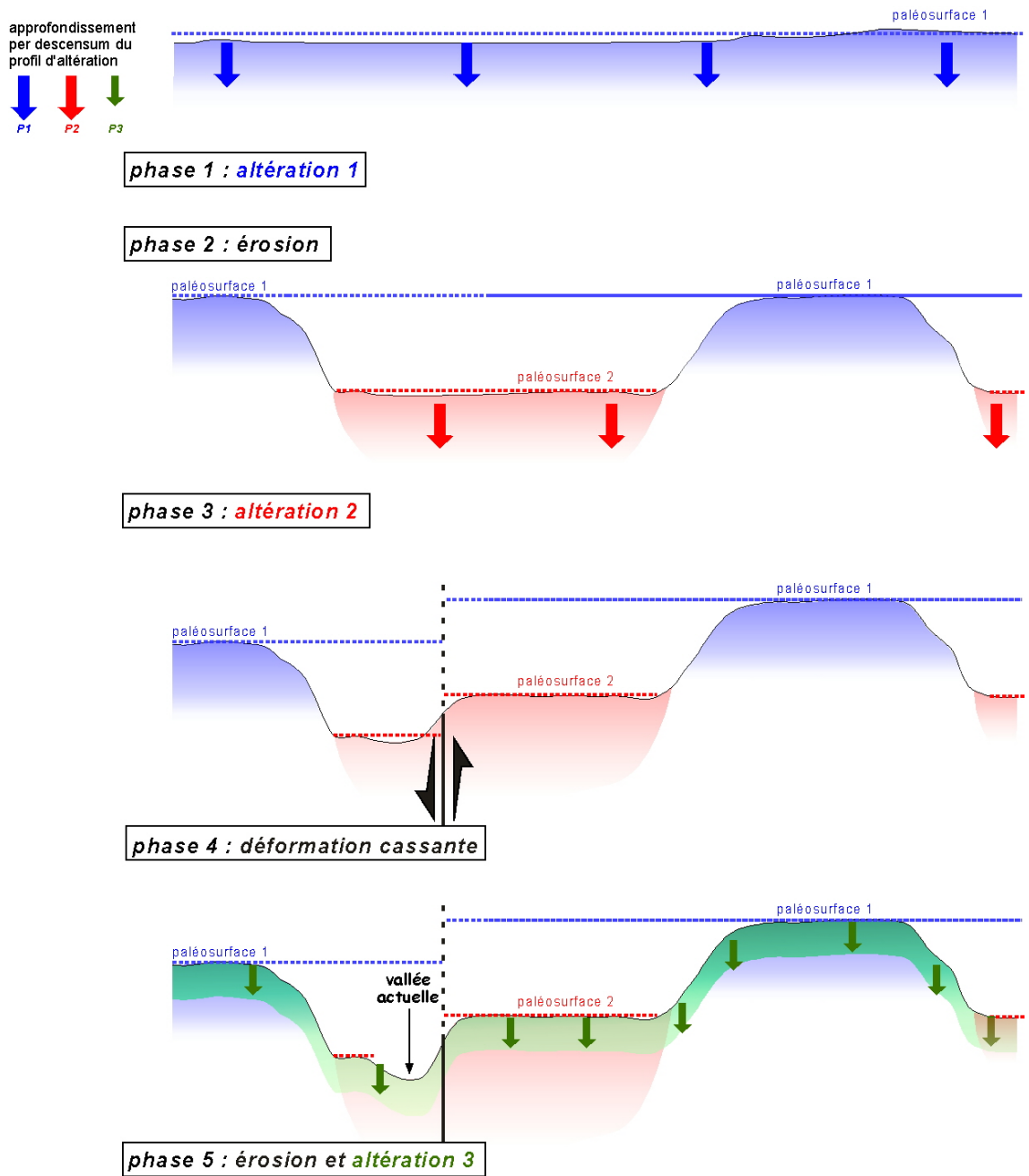


Figure 20 : Reconstitution schématique d'un relief résultant de 3 phases d'altération entrecoupées de périodes d'érosion et de déformation

3.3.6. Périodes propices à l'altération du Massif armoricain

En Europe, trois périodes géologiques ont maintenu suffisamment longtemps des conditions spécifiques à la formation de profils latéritiques avec des effets significatifs (Wyns et al. 2003) :

- au **Permien et au Trias** : l'altération infra-Triasique. La création de la Pangée puis son évolution avant son morcellement au Jurassique permettent la formation d'un puissant horizon fissuré (de l'ordre de 70 à 100 m) et d'une saprolite. Fortement érodée par la suite, on ne la retrouve généralement que sous forme résiduelle ;
- au **Crétacé inférieur**, l'émersion ayant duré de 20 à 25 Ma a eu pour conséquence, dans les domaines de socle, le développement d'un horizon fissuré de 50 à 70 m d'épaisseur sous 20 à 50 m d'altérites meubles (Thiry et al, 2006) ;
- du **Paléocène à l'Eocène moyen**, l'émersion ayant duré de 20 à 25 Ma a eu pour conséquence, dans les domaines de socle, le développement d'un horizon fissuré de 50 à 70 m d'épaisseur sous 20 à 30 m d'altérites meubles.

Du fait de leur âge, les deux dernières phases d'altération (Crétacé inférieur et Paléocène à l'Eocène moyen) dominent en répartition en France Métropolitaine (Massif armoricain, Ardenne et Massif central, pour les domaines de socle).

A titre de comparaison, la période du **Miocène** au **Quaternaire** inclus n'a produit que des altérites d'une épaisseur ne dépassant pas quelques décimètres à quelques mètres (Wyns, 1991). Ces altérations suivent généralement les courbures topographiques avec des variations dans la profondeur d'altération suivant la nature lithologique de la roche mère.

Dans la zone d'étude, les cuirasses ferrugineuses et l'altérite meuble (une arène par exemple) anciennes n'ont pas à très peu été préservées, elles ont pour la plupart été érodées. Toutefois, elles persistent aux sommets des plateaux et sont à l'origine d'une partie de la morphologie des paysages.

3.4. METHODOLOGIE DE LA CARACTERISATION DES ALTERITES DE SOCLE DE LA REGION NANTAISE

Dans le cadre de ce projet, il est réalisé une base de données de l'altitude du mur des altérites. La base sera composée à partir des données de la Banque de données du Sous Sol (BSS), de la carte géologique harmonisée au 1/50000^{ème} du département de la Loire Atlantique et d'une campagne de contrôle sur le terrain. Cette dernière a permis de valider les contours géologiques des faciès issus de l'altération des roches du socle et de confirmer les choix de typologie des formations.

Parallèlement, les roches du socle, selon leur minéralogie, leurs structures et les déformations qu'elles ont encaissées présentent une résistance variable face à l'altération. Comme les roches du territoire de Nantes Métropole présentent une forte variabilité de faciès, une approche qualitative du degré d'altération des roches en fonction de leur nature sera adoptée.

3.4.1. Observations de terrain

Lors des reconnaissances de terrain réalisées au mois de janvier 2008, 167 points d'observations ont été réalisés. Ces observations ont été couplées avec un examen attentif des données de la BSS afin d'identifier les forages rencontrant les formations altérées.

Au cours du terrain, plusieurs points de contrôle ont pu être effectué afin de déterminer la position des altérites et de vérifier que les « Limon des plateaux » ou « Limons éoliens » correspondent à des formations issues de l'altération. Globalement, les caissons « LP » ou « limons éoliens », correspondent bien à la saprolite et sont bien les résultats de l'altération du substrat. Dans le détail, certains contours géologiques nécessiteraient d'être modifiés car ils ne reflètent pas exactement la réalité du terrain. Toutefois, ces modifications resteraient mineures.

Les observations de terrains permettent de mettre en évidence plusieurs caractéristiques importantes :

Concernant la structuration

Les cartes géologiques présentent peu ou pas de structures faillées. Or, sur le terrain, plusieurs failles ont pu être observées ou identifiées.

Ainsi, au sud de la Loire, sur la commune de Bougenais, dans la carrière des Maraîchères et dans l'ancienne carrière des Chaudières, ont été observés des couloirs de failles subverticales à fortement pentées. Les déformations qu'elles induisent au sein de la roche indiquent que ces failles sont postérieures ou tardives par rapport à l'orogénèse varisque. Ces failles sont orientées NE-SW (N 020-030). Les géométries associées aux plans des failles suggèrent que les compartiments occidentaux semblent s'être effondrés par rapport aux compartiments orientaux (Figure 21).

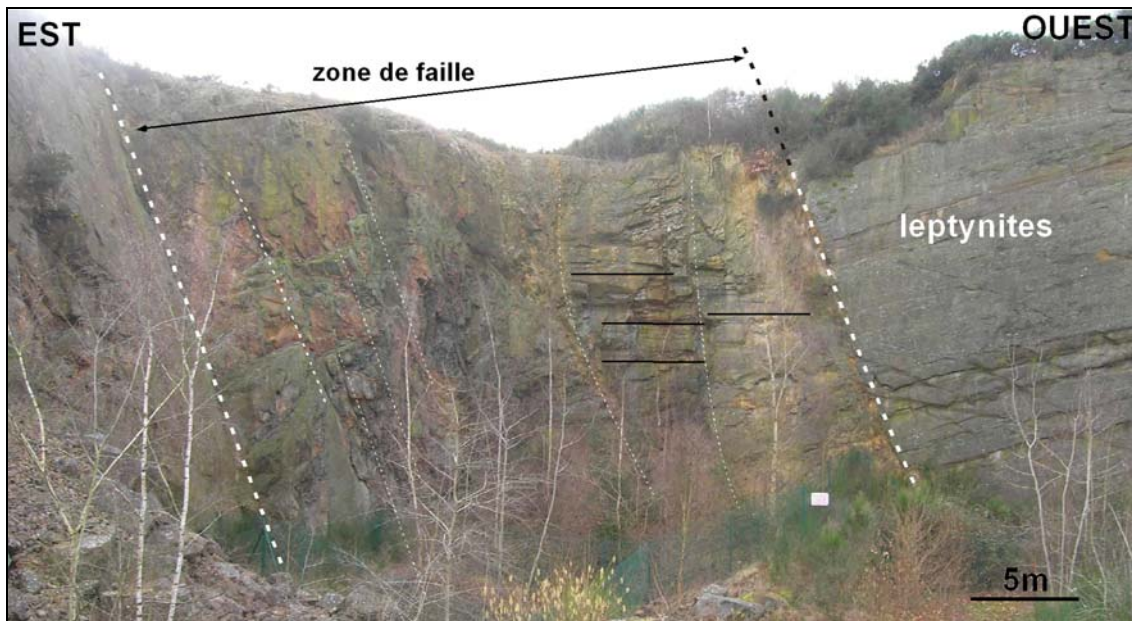


Figure 21 : Couloir de failles orientées NE-SW dans la carrière des Chaudières

A l'échelle de la communauté urbaine, il existe d'autres structures faillées affectant le substratum. Certaines d'entre elles sont antérieures à la formation des altérites, d'autres postérieures. Ainsi, sont identifiées dans cette région : les failles N120, les failles N020-030, la faille N150 et dans la partie nord de la communauté urbaine, les failles globalement N-S associées au fonctionnement du graben de Nort-sur-Erdre.

Comportement des différents faciès face à l'altération

Au vu du faible dénivelé entre la base de la saprolite et le fond des vallées (généralement moins de 50 m) et du faible nombre d'affleurement de qualité, seules des estimations de l'épaisseur de l'horizon fissuré peuvent être proposées en fonction des différents faciès. Ces épaisseurs sont basées sur la connaissance géologique et sur les différentes observations réalisées lors de la campagne de terrain.

Au sein du substratum, onze faciès différents principaux sont identifiés :

- 1 Péridotites
- 2 Pegmatites
- 3 Quartz
- 4 Granites
- 5 Granites mylonitisés
- 6 Granodiorites

- 7 Orthogneiss
- 8 Gneiss leptynitiques
- 9 Micaschistes
- 10 Amphibolites
- 11 Cornéennes

Les trois premiers (péridotites, pegmatites et quartz) sont situés dans des filons et ont une extension cartographique limitée. Au sein du massif, ces filons constituent des discontinuités structurales susceptibles de constituer des zones de drains préférentiels. Ce sera notamment le cas des filons de pegmatites qui présenteront une fissuration importante, induite par l'altération du massif au sein duquel le filon est encaissé.

Pour les autres faciès, la géométrie des structures a un effet sur la puissance de l'horizon fissuré. Ici, comme toutes les structures sont redressées (pente supérieure à 40°), l'effet de la géométrie des structures va favoriser l'enfoncement du front d'altération. On pourra ainsi s'attendre à rencontrer un horizon fissuré puissant qui localement au droit de discontinuités tectoniques, pourra s'enfoncer plus profondément.

Les différents faciès peuvent être regroupés en 5 familles de roches :

- micaschiste et cornéennes
- gneiss et orthogneiss
- granite, granodiorite et granite mylonitisé
- gneiss leptynitique
- amphibolites

Les différentes familles sont individualisées en fonction de leur comportement face à l'altération et plus particulièrement à partir de leur composition minérale et de leurs structures. L'absence d'affleurements et d'informations indirectes permettant d'estimer avec précision l'épaisseur de l'horizon fissuré présent sous les altérites nous contraint à appuyer notre étude sur notre connaissance géologique régionale.

Dans le cadre du groupe des granites, mylonites et granodiorites, l'épaisseur de l'horizon fissuré sous l'arène est estimée à une cinquantaine de mètres. Les observations de terrain suggèrent que le sommet de l'horizon fissuré sur ces roches est systématiquement plus élevé que pour les autres faciès, ce qui suggère que l'altération pénètre moins profondément dans ces roches.

Pour les micaschistes, les cornéennes, les gneiss et les orthogneiss, l'épaisseur de l'horizon fissuré, du fait de la verticalité des structures, doit atteindre 70 à 80 m. Face à l'altération, ces faciès se comportent différemment. Toutefois, à l'échelle du massif, l'épaisseur de la tranche altérée devrait être voisine.

Les amphibolites semblent s'altérer plus profondément au sein du massif que les autres roches. En effet, situées dans les cuvettes topographiques, elles sont systématiquement observées à l'état altéré. Toutefois, les processus d'altération des roches basiques sont encore mal compris et il est difficile de dire si l'épaisseur de l'horizon fissuré est importante. On considère que cette épaisseur est équivalente aux roches encaissantes, à savoir de l'ordre de 70 m.

Pour les gneiss leptynitique, les observations de terrain montrent que l'absence ou la faible présence de minéraux gonflant ne permet pas à la roche de se fissurer. En carrière, l'épaisseur de l'horizon fissuré semble être très réduite, car rapidement, la roche apparaît massive à quelques mètres sous la saprolite, soit moins d'une dizaine de mètres de puissance (Figure 22).

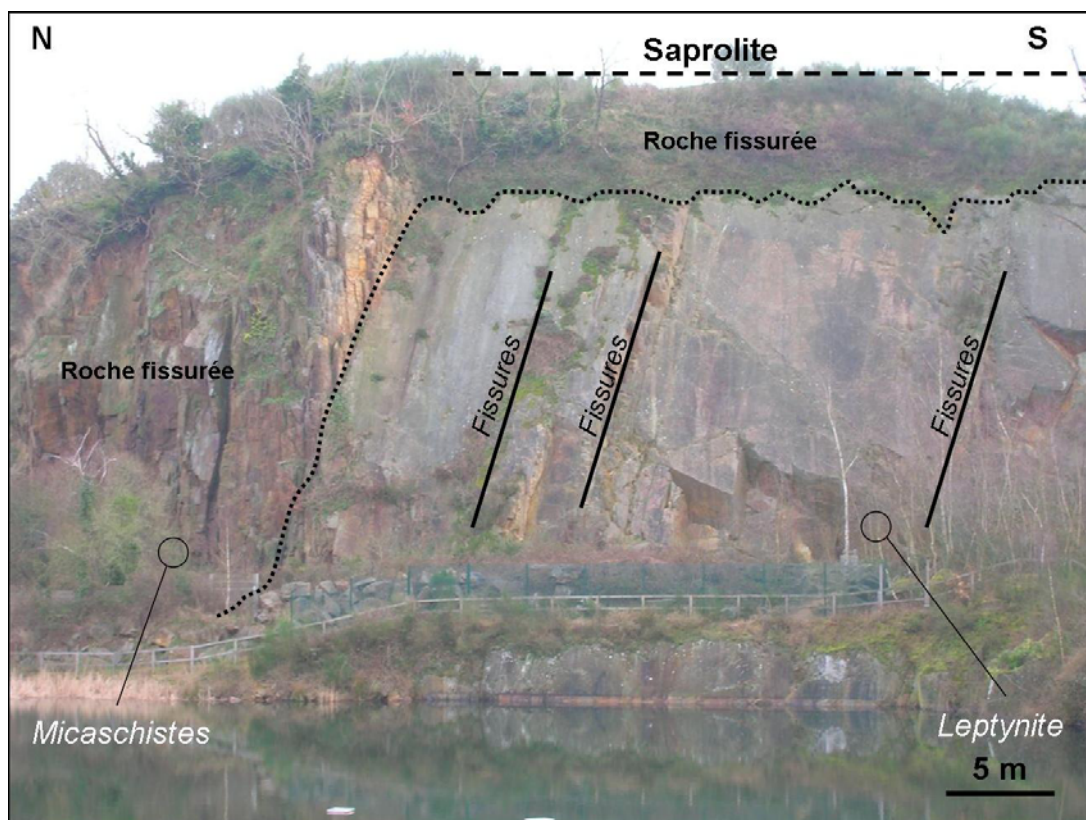


Figure 22 : Différence d'épaisseur de l'horizon fissuré au sein des micaschistes et des faciès leptynitiques (Carrière des Chaudières, située dans la partie sud du territoire étudié)

Seuls les couloirs de fracturation ante-altération permettent à l'altérite de s'approfondir.

Les formations sédimentaires reposent en discordance sur le substrat altéré. Par conséquent, elles n'ont pas subi la phase d'altération majeure à l'origine de la formation de la saprolite et de l'horizon fissuré. Elles ne sont donc pas concernées.

3.4.2. Datation des altérations

Compte tenu du contexte géologique régional, les altérites observées dans le secteur semblent résulter de l'altération éocène. Ceci est confirmé au moins pour la partie la plus récente par l'existence de dépôts éocènes supérieurs reposant sur les altérites.

3.5. METHODOLOGIE DE LA MODELISATION DU MUR DES ALTERITES

L'objectif de ce travail est de modéliser la base (ou le « mur ») des altérites. On rappelle que cela correspond au sommet de l'horizon fissuré. Il s'agit d'un niveau de référence utile pour l'hydrogéologie et les calculs de potentiels géothermiques.

3.5.1. Données utilisées :

Notre étude se base sur la carte géologique harmonisée au 1/50000^{ème} du département de la Loire Atlantique (44), à laquelle sont associés les forages de la banque de données du Sous-Sol. L'extraction a été exhaustive sur le territoire de Nantes Métropole et sa périphérie. Les données ont été extraites et ont été réinterprétées lorsque cela a été nécessaire.

Dans nos documents de travail, les données de forage seront identifiées sous l'appellation « **BSS** ».

Remarquons que les données de forages (BSS) comprennent deux types d'informations :

- les « altérites ». Lorsque le forage est arrêté dans la couche d'altérite et n'a pas atteint le contact altérite/socle ; l'altimétrie de la base de la saprolite, le « Zmur » est donc une valeur minimale ;
- les « limites altérites/socle ». Lorsque le forage a atteint le mur des altérites ; le « Zmur » indiqué correspond alors au mur des altérites.

Afin de valider et de préciser la nature et la position des roches altérées, une campagne de terrain sur le territoire de Nantes Métropole a été organisée avec comme objectifs de :

- vérifier la nature et la répartition des « limons des plateaux » et des « limons éoliens » signalés sur la carte géologique et vérifier s'ils correspondent à une saprolite ;
- parcourir le territoire à la recherche de secteurs clés et d'affleurements d'altérites de socle non représentés sur la carte géologique ;
- repérer les sédiments (pliocènes et leur extensions) sur la carte géologique.

Le but de ce projet n'est pas de reprendre le levé de la carte géologique mais essentiellement de déterminer des points de contrainte destinés à modéliser le mur

des altérites de socle. Les imprécisions de limite des contours géologiques relevées au cours de la campagne de terrain sont globalement mineures et ne justifient pas une modification du tracé des contours géologiques.

Les données d’affleurements comprennent 4 types de données :

- les « altérites ». Lorsque les altérites sont à l’affleurement, la valeur du « Ztopo » est la valeur locale de l’altimétrie de la base des altérites.
- les « limite altérites/socle ». Lorsque le contact est visible en surface. Le « Ztopo » et le « Zmur » sont alors équivalents.
- le « socle ». Lorsque les roches du substratum sont à l’affleurement, le mur des altérites est situé au dessus. Son altimétrie peut être parfois estimée.
- les « sédiments ». Ils correspondent aux sables rouges notés p2m sur la carte géologique. Ces sables recouvrent les altérites.

Dans les documents de travail, les données de terrain seront identifiées sous l’appellation « **AFF** ».

Le croisement des observations de terrain avec les informations figurant sur la carte géologique a permis d’ajouter des points complémentaires et utilisables pour la modélisation de la base de la saprolite. Ces points de contrôle correspondent aux endroits où le tracé de la carte géologique a été vérifié, soit systématiquement à des limites « altérites/socle ». Le « Ztopo » et le « Zmur » sont alors égaux et correspondent au mur des altérites.

Dans nos documents de travail, les données issues de la carte géologique seront identifiées sous l’appellation « **CG** ».

Le MNT (modèle numérique de terrain) à la maille 20 m de Nantes Métropole et le tracé des failles géologiques issu des cartes au 1/50000^{ème} ont également servi de support à cette étude. La Figure 23 illustre la carte de situation des données.

Les triangles rouges matérialisent les points où l’on dispose de la cote du mur des altérites, soit dans les données initiales, soit par ajout d’un point de contrainte après vérification des contraintes d’inégalité (voir plus loin).

Les points matérialisés par un symbole autre que le triangle rouge sont ceux qui n’apportent pas d’information directe sur le mur des altérites. Par exemple un sondage se terminant dans les altérites indique que le mur des altérites se situe plus bas que la fin de sondage, sans en fournir la valeur précise. Inversement un point où le socle sain affleure indique que le mur des altérites passe (virtuellement) au dessus de la surface topographique (cette surface a pu exister mais a été érodée et n’existe plus aujourd’hui). Ces deux types d’information sont des « contraintes d’inégalité » que le modèle doit respecter.

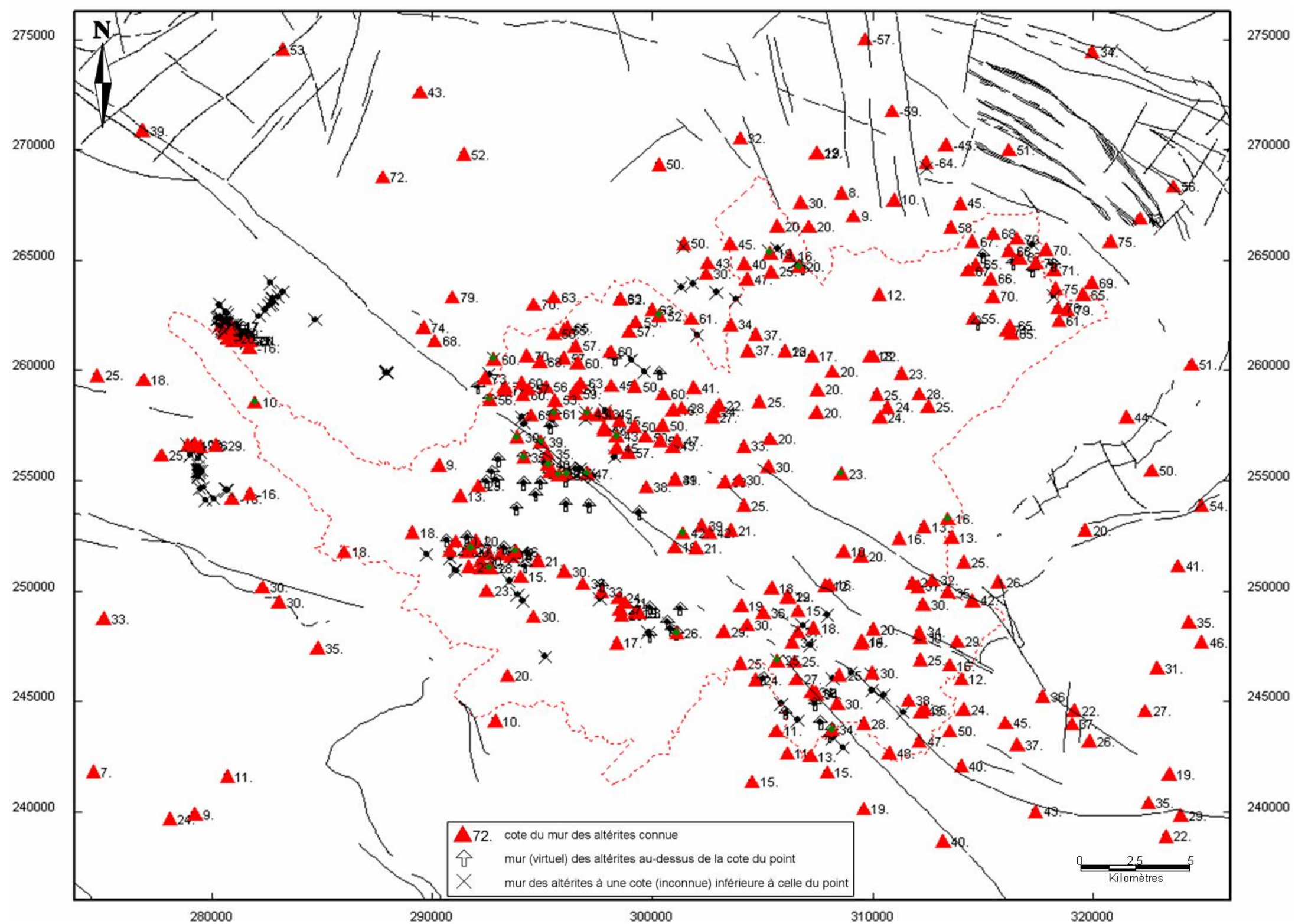


Figure 23- Carte de situation des données utilisées pour la modélisation du substratum des altérites (coordonnées Lambert II zone centre)

3.5.2. Analyse des données de la base des altérites

Les points de contact à l’affleurement, entre altérites et substratum, correspondent à des points de passage de la base des altérites, dont l’altitude correspond à la cote topographique. Le premier traitement consiste donc à attribuer la cote topographique à ces points, ce qui est fait à partir du Modèle numérique de terrain. Pour les sondages, le point de passage des altérites au substratum fournit également un point du mur des altérites. Son altitude est déduite de l’altitude de départ du sondage, à laquelle on retranche la profondeur à laquelle on atteint la base des altérites.

Initialement on dispose de 622 points de données :

- 382 forages BSS,
- 156 points issus d’observations terrain sélectionnées,
- 84 points issus des contacts de la carte géologique,

Après vérifications, il s’avère nécessaire de retirer 138 forages BSS, ceux-ci étant douteux ou non exploitables, ainsi que 4 points d’affleurement.

Restent alors 480 points qui fournissent :

- 285 points où l’on dispose de la cote du mur des altérites (donnée « exacte »)
- 142 points où on dispose de cote maximale des altérites (donnée d’inégalité)
- 53 points où on dispose de leur cote minimale (donnée d’inégalité)

Une fois ce tri effectué, on calcule le variogramme de la base des altérites à partir des 285 points disponibles (Figure 24).

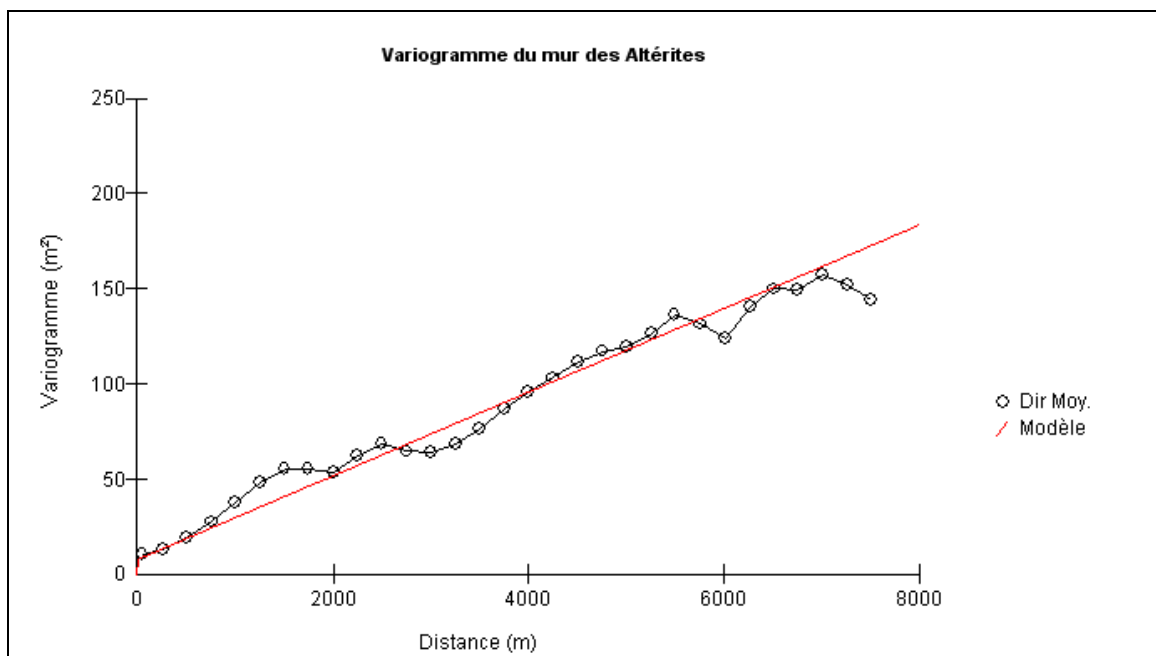


Figure 24 : Variogramme expérimental du mur des altérites, et son ajustement

Ce variogramme est ajusté par un modèle de type linéaire, avec un léger effet de pépité :

$\gamma(h) = 8 + 0.022h$, où h est la distance.

3.5.3. Interpolation de la surface de base des altérites

Une première surface est calculée par krigeage au nœud d'une grille de maille 60*60 m, prenant en compte les 285 données du mur des altérites, ainsi que le tracé des failles (Figure 25).

Cette surface est confrontée aux données d'inégalité. Lorsqu'une anomalie est constatée, un retour aux données permet de vérifier si cela provient d'une donnée erronée ou douteuse, auquel cas la donnée est éliminée (c'est ainsi nous avons éliminé 138 forages BSS). Dans le cas contraire, il est nécessaire d'introduire un point de contrainte compatible avec les informations disponibles et donnant une solution géologiquement et géométriquement satisfaisante (Figure 26).

Dans certains cas, l'anomalie peut provenir du positionnement imprécis d'une faille (les traces de failles étant issues d'une carte à échelle beaucoup plus globale), voir même d'une faille non mentionnée sur la carte au 1/50 000. Au besoin le tracé de quelques failles est légèrement modifié afin de le rendre compatible avec les données disponibles.

Ce travail de vérification de cohérence conduit à ajouter 25 points de contrainte au droit des données d'inégalité. 6 autres points de contrainte sont ajoutés pour obtenir un meilleur rendu géologique, dans les zones mal informées. Ces 31 points de contrainte sont symbolisés en vert sur la carte des données.

Une seconde surface est calculée à partir des 285 + 31 points. Cette surface est contrôlée puis intersectée avec la topographie, de façon à éliminer les parties érodées du fait de la topographie actuelle (la surface calculée est en fait une paléo surface, avant érosion par la topographie).

Ces différents traitements ont été effectués à l'aide des logiciels GDM[®] et MultiLayer[®], développés par le BRGM. Le logiciel Mapinfo[®] a été utilisé en complément pour situer les données et vérifier résultats dans leur contexte géographique et géologique, en reportant le modèle (sous forme de coupes) dans un document Mapinfo.

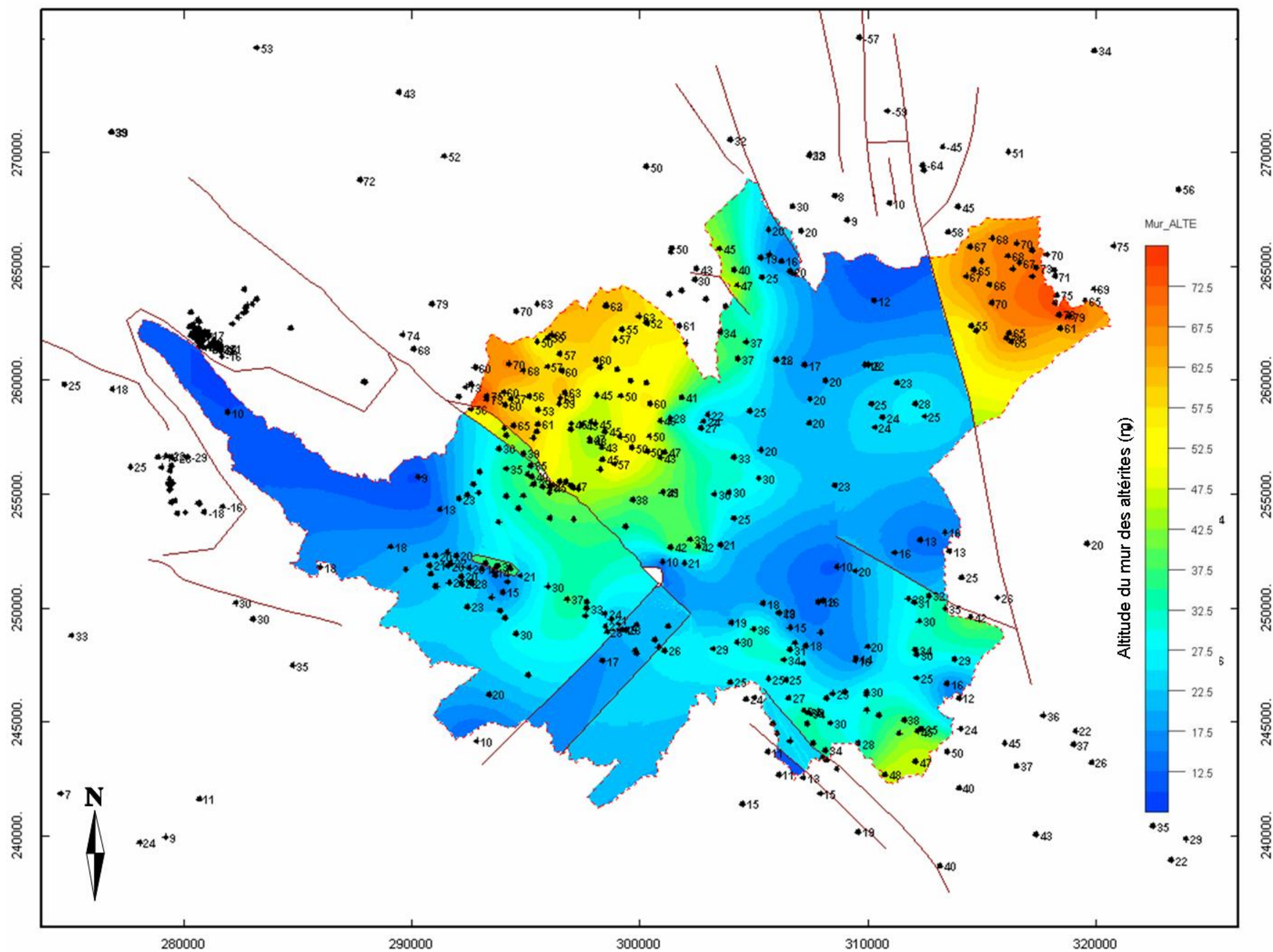


Figure 25 : « Paléo-surface » de base des altérites, avant élimination des parties érodées par la topographie actuelle

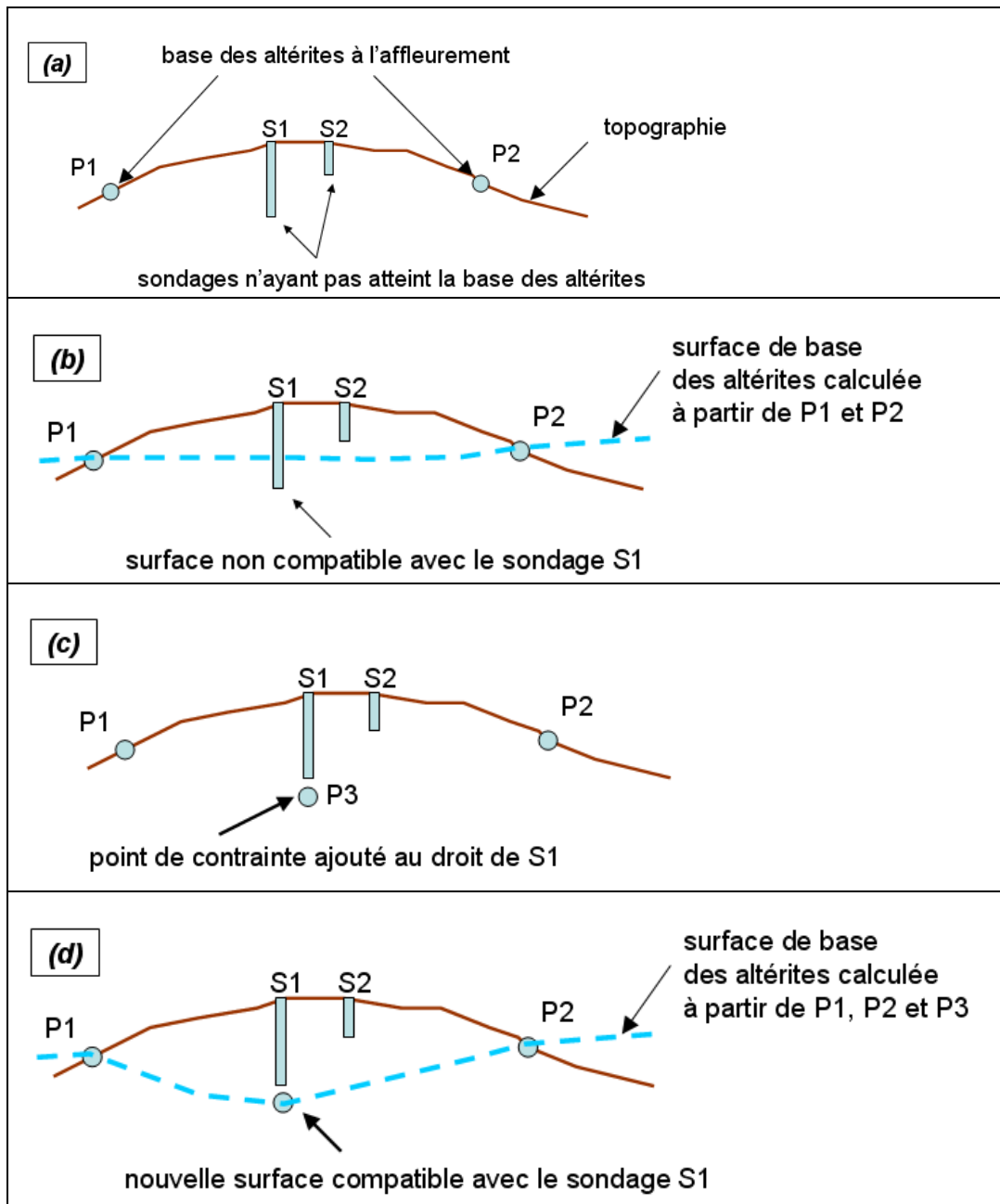


Figure 26 : Principe de prise en compte des inégalités

- (a) données exactes (P1 et P2) et données d'inégalité (S1 et S2) disponibles
- (b) interpolation à partir des données exactes et confrontation aux données d'inégalité
- (c) ajout d'un point de contrainte après vérification de la cohérence des informations
- (d) Reconstruction d'une surface correcte

3.6. CARACTERISATION DES ALTERITES DE SOCLES DE LA REGION NANTAISE

La modélisation de la base des altérites ne tient pas compte des structures de détail.

La modélisation s'attache à reprendre la composante régionale, afin d'illustrer la répartition et d'estimer la puissance de l'altérite au toit du substrat rocheux (cf. annexes 4 et 5 qui représentent respectivement l'altitude du mur et l'épaisseur des altérites). Cette surface est également une surface de référence pour ce qui concerne le substrat. C'est en effet à partir de cette surface que l'on détermine la profondeur de l'horizon fissuré selon la lithologie ayant subi l'altération.

La puissance des altérites ne dépasse pas quelques mètres en règle générale. Ceci est lié à un décapage important de celles-ci depuis le Pliocène.

Le compartiment au sud-ouest du Cisaillement Sud Armoricaïn est affaissé après altération et la puissance des altérites y est relativement faible.

Au nord, on observe la terminaison du graben de Nort-Sur-Erdre qui passe par Carquefou.

Dans la zone centrale, les massifs granitiques, les mylonites et les granodiorites forment un ensemble surélevé par rapport aux formations encaissantes. L'épaisseur de l'altérite qui les recouvre est faible.

Pour en revenir au potentiel géothermique, la connaissance du mur des altérites présente un intérêt aussi bien pour les pompages en nappe que pour les sondes verticales :

- d'un point de vue hydrogéologique, l'interface entre les altérites et l'horizon fissuré constitue le point de rencontre entre une zone capacitive (soit susceptible de stocker des volumes d'eau importants) et une zone transmissive (et donc capable de faciliter la circulation de l'eau souterraine). Les cartographies fournissent donc des informations indicatives (compte tenu de l'échelle cartographique), notamment utiles pour la phase de foration (estimation de la profondeur à forer, méthode de foration, équipement de l'ouvrage) ;
- concernant les sondes verticales, la nature de la roche joue un rôle primordial (cf. chapitre 5.1.1 et la variabilité de la conductivité thermique en fonction de la lithologie). Des écarts importants sont constatés entre la partie altérée et la partie saine de la roche, la partie altérée disposant d'une conductivité thermique plus faible. Compte tenu de la méthode utilisée (estimation du potentiel à partir de forages réels dont les coupes géologiques sont validées), ces cartographies ne sont pas directement utilisées pour l'évaluation du potentiel géothermique mais elles permettront de disposer d'indications en préalable à la réalisation de sondes verticales.

4. Hydrogéologie

4.1. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Comme indiqué dans la description du contexte géologique, le territoire de Nantes Métropole est principalement inscrit dans un domaine de socle. Des formations sédimentaires plus récentes sont venues se déposer sur ces formations anciennes. Certaines sont encore présentes aujourd'hui et recouvrent donc les formations de socle. On identifie principalement :

- des placages sableux du Pliocène ;
- des formations alluviales, situées en fond de vallées mais aussi sous la forme de terrasses alluviales de faibles extensions ;
- des formations superficielles, de type limons ou lœss.

Du point de vue hydrogéologique, ces formations ne présentent pas toutes le même intérêt. Pour qu'une roche – ou qu'un groupe de roches – soit qualifiée d'aquifère, celle-ci doit contenir de l'eau et être « suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables » (cf. dictionnaire d'hydrogéologie – G. Castany et J. Margat).

La notion « appréciable » laisse une certaine part d'interprétation mais on pourra considérer que des formations de faible extension géographique – telle des terrasses alluviales – ne peuvent être considérées comme aquifères ou en tout état de cause, ne présentent qu'un intérêt très faible en la matière.

L'étude s'est donc concentrée sur les formations présentant un intérêt potentiel en termes d'exploitabilité, à savoir les formations de socle et les formations alluviales de la Loire. Le cas des formations de socle sous les formations alluviales de la Loire n'est pas traité par manque de connaissance et dans la mesure où les formations alluviales sont susceptibles de fournir des débits plus intéressants que les formations de socle sous-jacentes.

En conséquence, les nappes traitées dans le cadre de cette étude sont des nappes libres.

Les paragraphes 4.1.1, 4.1.2 et 4.1.4 sont fortement inspirés du rapport BRGM RP-53917-FR : « profondeur des eaux souterraines sur le périmètre intérieur au périphérique nantais » (mai 2005).

4.1.1. Rappel concernant le cycle de l'eau

Les précipitations se répartissent en deux ensembles : les pluies dites efficaces et l'eau qui subit l'évapotranspiration du couvert végétal et du sol (cf. Figure 27).

Les pluies efficaces représentent la quantité d'eau, issue des pluies, sujette à écoulement. Cette eau peut ruisseler en surface ou s'écouler par voie souterraine en rechargeant la nappe.

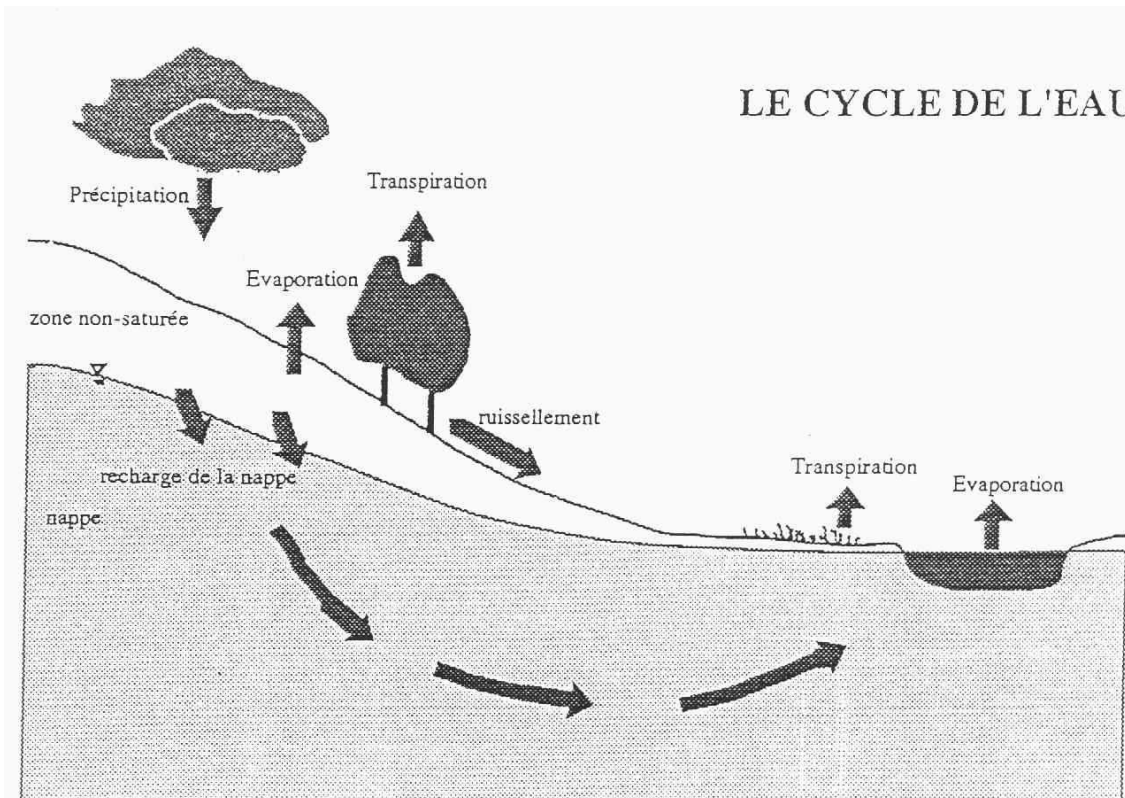


Figure 27 : Schéma du cycle de l'eau

Dans notre région, l'évapotranspiration (notée ETP) représente environ 2/3 de la pluie et le ruissellement et les infiltrations environ 1/3.

L'eau de surface et l'eau souterraine sont drainées par les rivières qui se jettent ensuite dans la mer où l'eau s'évapore ensuite et forme des dépressions susceptibles d'entraîner des précipitations.

La zone non saturée est située entre le sol et la surface de la nappe. Cette zone de l'aquifère comporte des vides (pores) qui sont remplis par de l'eau mais aussi par de l'air. La zone saturée correspond à la partie saturée en eau de l'aquifère, c'est-à-dire que les pores de la roche sont entièrement remplis d'eau.

La profondeur des eaux souterraines est variable au cours d'une année. Les niveaux de nappe maximums sont rencontrés en hiver (faible profondeur des eaux souterraines) et les minimums en fin d'été et au début de l'automne (plus forte profondeur).

4.1.2. Rappel sur les aquifères de socle

Il n'existe pas en Pays-de-la-Loire de grands aquifères, mais une mosaïque de petits systèmes imbriqués (la surface au sol de chacun d'eux n'excède pas en général quelques dizaines d'hectares) indépendants les uns des autres, du moins dans les conditions actuelles des exploitations qui en sont faites. Un bassin versant, même lorsqu'il est homogène au plan géologique peut être constitué par plusieurs dizaines (centaines) de systèmes unitaires.

Un système aquifère, c'est à la fois un réservoir capable d'emmagasiner des volumes plus ou moins importants d'eau provenant des pluies infiltrées, et un conducteur permettant les écoulements souterrains et la vidange progressive du réservoir vers ses exutoires naturels que sont les rivières. En milieu de socle, les deux fonctions sont le plus souvent séparées:

- le rôle de réservoir (fonction «capacitive») est assuré principalement par la partie altérée de la roche en place (altérites de la Figure 28), développée depuis la surface sur, parfois, plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur ;
- tandis que l'eau circule surtout par le réseau de fissures et fractures existant plus bas, dans la roche fissurée ou moins atteinte par l'altération (horizon fissuré de la Figure 28).

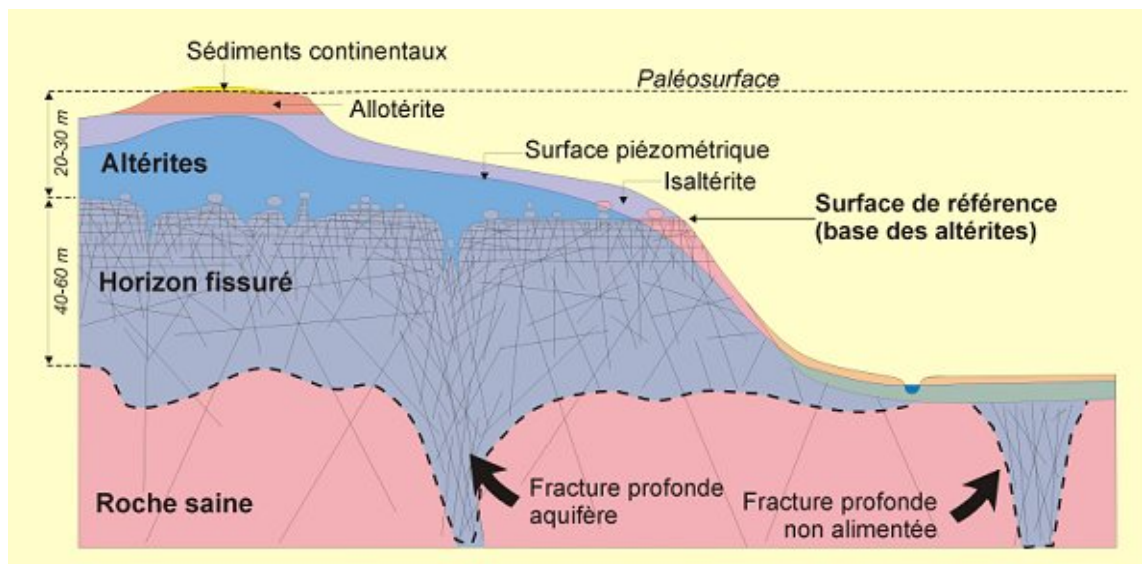


Figure 28 : Modèle conceptuel des altérations supergènes en domaine granitique (Wyns, 1998)

Ce concept où la fissuration et l'altération ont des fonctions spécifiques séparées doit parfois être largement modulé : l'emménagement des fissures le long desquelles peut se développer une altération importante n'est pas nul, il peut être notable dans le cas des réseaux denses. D'autre part, les capacités conductrices des altérites ne sont pas négligeables, notamment lorsqu'il s'agit d'arènes sableuses.

4.1.3. Délimitation des entités hydrogéologiques

L'étude géologique a permis d'établir une cartographie géologique simplifiée du territoire de Nantes Métropole (cf. Figure 29). Cette cartographie présente la nature des formations de socle lorsque celles-ci sont à l'affleurement. Cependant, dans plusieurs secteurs, des altérites ou des formations superficielles (comme les alluvions – dont les terrasses – les remblais ou les placages sableux du Pliocène) empêchent d'identifier les formations de socle dont elles sont issues ou sur lesquelles elles reposent.

Il a donc été nécessaire de cartographier les formations de socle sous-jacentes. Ce travail a permis de constituer une nouvelle carte, représentant une sorte « d'écorché » des formations géologiques présentes sur le territoire de Nantes Métropole. Des regroupements des formations de socle ont ensuite été effectués, sur la base des préconisations fournies par l'étude géologique dans le paragraphe 3.4.1. Pour mémoire, l'approche qui a été suivie est basée sur un comportement homogène vis-à-vis de l'altération.

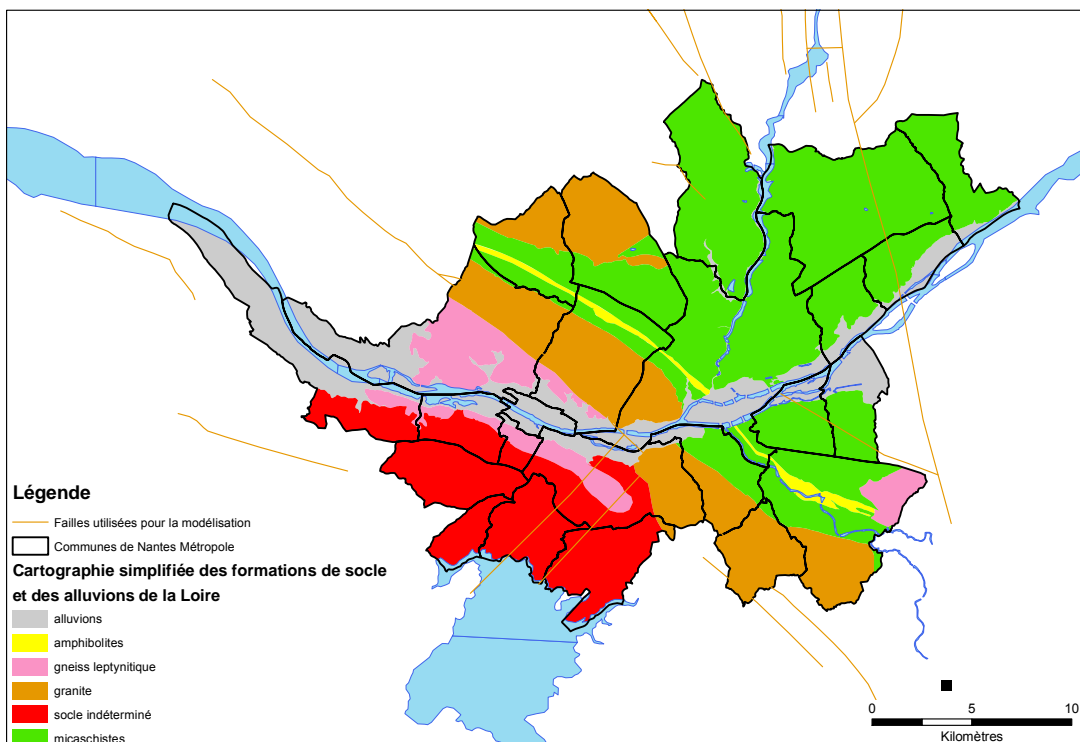


Figure 29 : Cartographie simplifiée des formations de socle et des alluvions de la Loire

La carte obtenue fournit ainsi une délimitation des entités hydrogéologiques qui sera utilisée dans la suite de l'étude (cf. Figure 29).

Cette carte fait apparaître une zone située au sud-ouest de Nantes Métropole et dans laquelle le socle demeure indéterminé. Le caractère accidenté du secteur et l'hétérogénéité des formations de socle rencontrées à l'affleurement ne permettent pas en effet d'identifier de façon certaine les formations de socle présentes sous les formations superficielles (colluvions, alluvions) et les sédiments du Pliocène.

4.1.4. Battement des nappes

Afin de visualiser l'évolution de la profondeur des eaux souterraines en fonction de la période de l'année, les informations relevées dans un forage situé à proximité du secteur d'étude ont été téléchargées sur internet (ADES «Accès aux Données sur les Eaux Souterraines» <http://ades.mde.tm.fr>).

Cet ouvrage, d'une profondeur de 8 m, appartient au réseau de suivi quantitatif des eaux souterraines de Loire-Atlantique (réseau piézométrique). Il est situé sur la commune de St-Julien-de-Concelles (n° BSS : 04818X0544/PZ34) : le niveau de la nappe est suivi par le Conseil Général de Loire-Atlantique depuis le 9 juillet 1994 (cf. Figure 30).

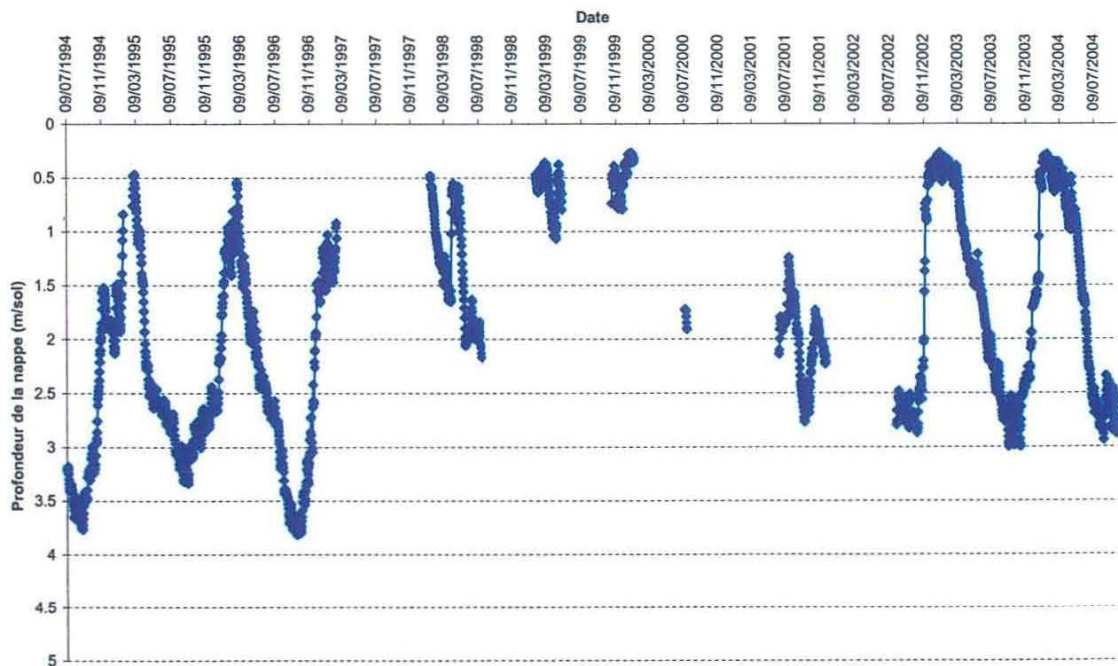


Figure 30 : Chronique piézométrique du forage de « La Blonière » sur la commune de St-Julien-de-Concelles (1994-2004)

Cette figure montre que le niveau de la nappe est variable en cours d'année et suit un cycle de recharge-décharge : la nappe se rapproche du sol en hiver (nappe à 0,25-

1 m/sol) et le niveau devient maximum, tandis que la nappe s'approfondit en période d'étiage (fin d'été, début automne, niveau à 3-4 m/sol) et le niveau est alors minimum.

Le niveau de la nappe peut également s'approfondir brusquement en cas de pompage. Le forage de la Figure 30 mesure un niveau de nappe qui n'est soumis à aucun pompage (au sein du point d'eau ou à proximité).

4.1.5. Température des nappes

Nous ne disposons pas de mesures directes de la température des nappes présentes sur le territoire de Nantes Métropole.

Cependant, pour une nappe libre, on considère que sa température reste constante sur l'ensemble de l'année et que sa valeur est très proche de la température moyenne interannuelle de l'air.

La fiche climatique de MétéoFrance pour la station de Nantes-Bouguenais fait état d'une température interannuelle moyenne de l'air de 12,2°C, sur la période 1971-2000. La station se situe à une altitude de 26 m.

Le modèle numérique de terrain fourni par Nantes Métropole montre que l'altitude varie de 0 à + 83 m NGF. On rappelle que le gradient général de variation de la température avec l'altitude s'élève à -0,65°C pour une élévation de 100 m. De fait, compte tenu du type de climat (océanique) et de la faible variation d'altitude, on peut considérer que la nappe libre présente une température moyenne de l'ordre de 12°C sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole.

La température de la nappe libre (qu'il s'agisse d'une nappe alluviale ou d'une nappe contenue dans un aquifère de socle) n'est donc pas un facteur discriminant à l'échelle du territoire de Nantes Métropole.

4.2. PIEZOMETRIE

La modélisation de la surface piézométrique (altitude de la surface de la nappe) a été réalisée dans l'environnement ArcGis version 9.1 d'ESRI.

4.2.1. Données disponibles et description de la méthode utilisée

En l'absence de carte piézométrique couvrant la totalité de la zone d'étude, l'altitude du niveau de la nappe a été modélisée à partir :

- du Modèle Numérique de Terrain (MNT) au pas de 20 m fourni par Nantes Métropole (cf. Figure 31). L'altitude du sol varie entre -93.9 (carrière des Pontreaux au Sud de la zone alluviale de la Loire) et 83 m. Ce MNT fournissant l'altitude des ponts et non de la Loire, le MNT de l'IGN au pas de 50 m a été utilisé en complément.

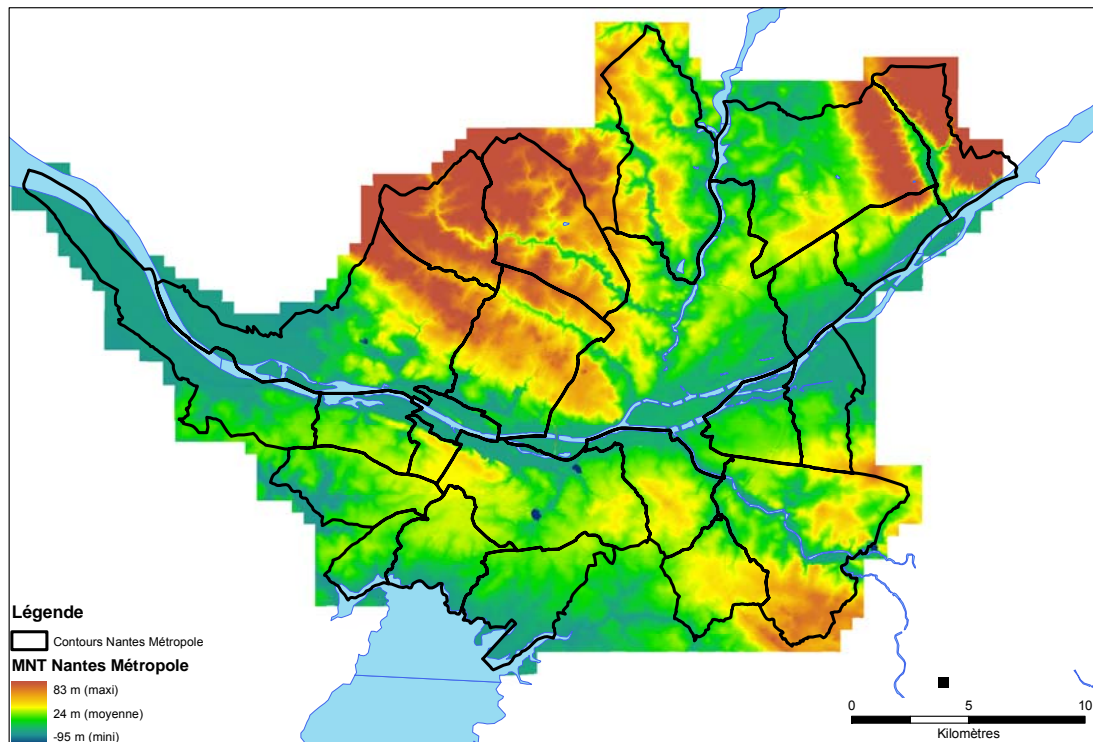


Figure 31 : Modèle Numérique de Terrain de Nantes Métropole (pas de 20 m)

- des 118 mesures de la profondeur du niveau de nappe réalisées lors de l'étude conduite sur le périphérique intérieur nantais en 2005 qui visait à cartographier le niveau de la nappe. Comme à l'époque lors de cette étude, 11 mesures ont été écartées ;
- des mesures de niveaux d'eau disponibles dans la Banque du Sous-Sol au BRGM. Ces mesures sont asynchrones et elles ne permettent donc pas de fournir une image d'une situation réelle de la piézométrie (les valeurs mesurées ont pu l'être aussi bien en situation de « hautes eaux » qu'en situation de « basses eaux »). Malgré cette limite, ces données permettent de fournir une première approche d'une situation piézométrique moyenne à l'échelle de Nantes Métropole, dans un intervalle de confiance correspondant à celui d'un demi-batteement des nappes. Il existe 967 mesures de niveaux d'eau en Banque du Sous-Sol. La méthode s'appliquant au socle, les mesures effectuées en domaine alluvial ont été écartées (175 valeurs). 119 autres mesures ont aussi du être écartées car présentant des situations de nappe anormales par rapport aux mesures disponibles dans leur voisinage. Ces situations peuvent par exemple être dues à des pompages qui abaissent le niveau « naturel » de la nappe. Au final, 673 mesures issues de la BSS ont été prises en compte.

Les différentes mesures de niveau de nappe disponibles sont présentées en Figure 32.

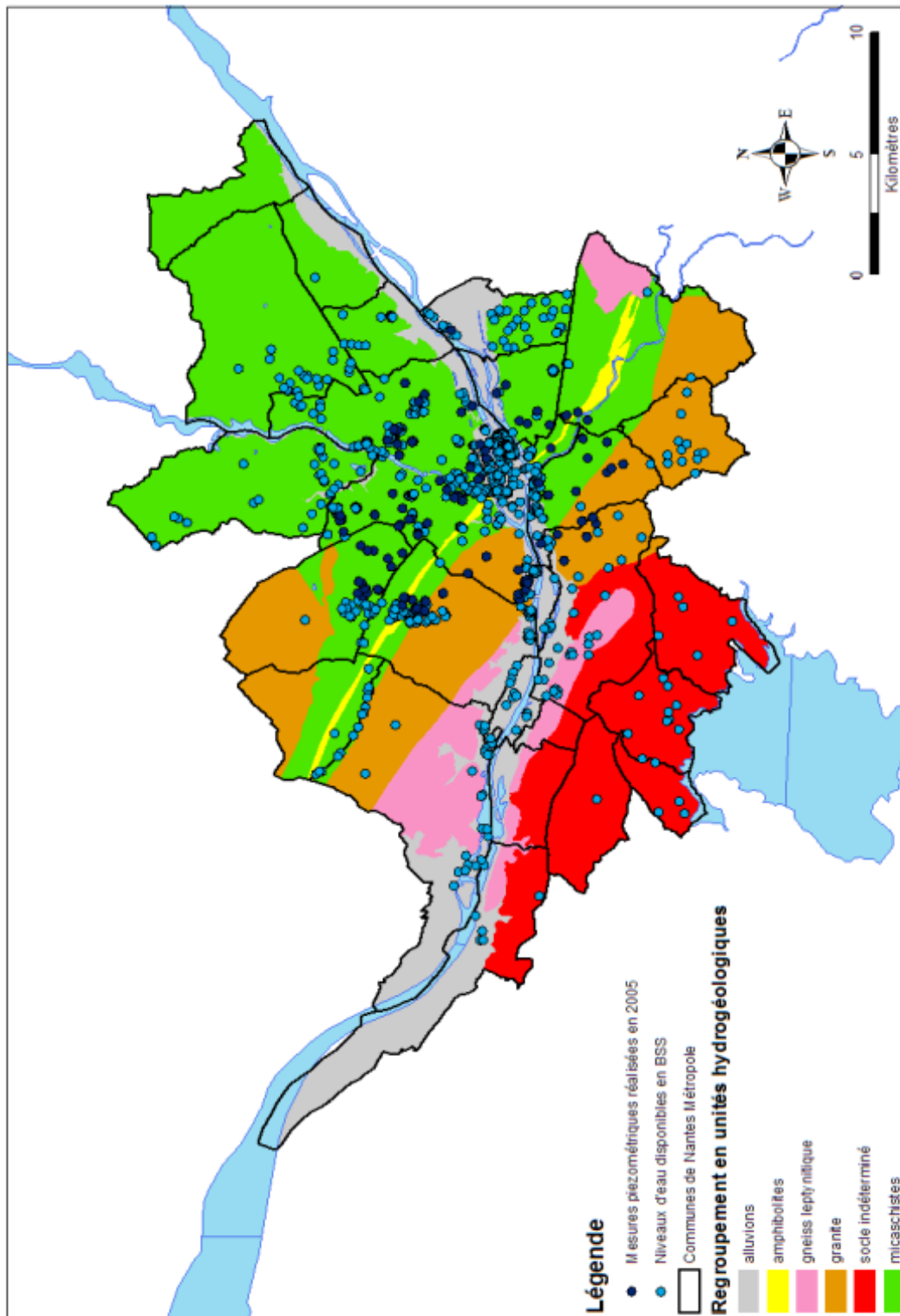


Figure 32 : Mesures de niveau de nappe disponibles sur le territoire de Nantes Métropole

Il est entendu que la carte piézométrique proposée dans le cadre de cette étude est provisoire, puisque la réalisation d'une campagne piézométrique sur le territoire de Nantes Métropole lors des hautes eaux 2008 permettra de produire une carte piézométrique basée sur des données synchrones. Le résultat de cette cartographie est attendu pour le deuxième semestre 2008.

La méthode appliquée a été mise au point et validée pour les contextes de socle altéré (Wyns et al., 2004). Son principe est rappelé ci-dessous (cf. Figure 33).

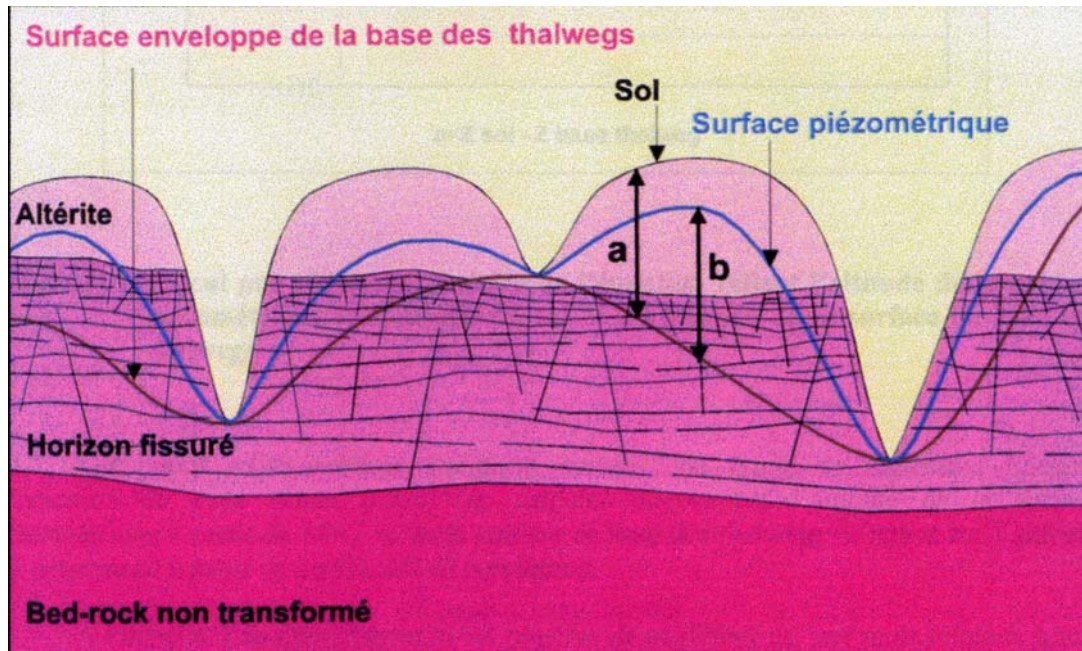


Figure 33 : Principe de modélisation de la surface piézométrique en domaine de socle

En contexte de nappe libre où les débits d'étiage des rivières sont fournis par la nappe, on peut considérer que les rivières pérennes représentent des zones d'affleurement de la surface piézométrique. Les rivières représentant les exutoires de la nappe, la surface piézométrique remonte donc sous les plateaux lorsque l'on s'écarte des vallées. La surface piézométrique est donc toujours comprise entre la surface topographique et la surface enveloppe des rivières pérennes (ou enveloppe de la base des thalwegs).

Une corrélation linéaire relie d'une part la dénivellation entre l'altitude du sol et celle de la surface-enveloppe des rivières (« a » sur la Figure 33), et d'autre part la dénivellation entre l'altitude de la surface piézométrique et celle de la surface-enveloppe des rivières (« b » sur la Figure 33). L'équation de cette droite permet de calculer en tout point l'altitude de la surface piézométrique à partir de l'altitude du sol et de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes.

4.2.2. Mise en œuvre de la méthode et résultats obtenus

Trois sources de données ont été utilisées pour cartographier la surface-enveloppe des rivières pérennes :

- le réseau hydrographique pérenne issu de la BD Carthage ;
- le réseau digitalisé en 2005 sur le territoire du périphérique nantais à partir des fonds scannés 1/25 000 de l'Institut Géographique National ;
- un réseau hydrographique généré à partir du MNT de Nantes Métropole. Ce réseau a été utilisé à l'extérieur du périphérique intérieur nantais.

A partir de ces réseaux, un semis de points a été généré et renseigné à l'aide du MNT pour obtenir l'altitude des points représentatifs du réseau hydrographique pérenne. Ensuite, une analyse variographique et une interpolation par krigeage de l'altitude de ce semis de points ont été conduites. Ceci a permis d'obtenir une grille représentant l'altitude de la surface-enveloppe du réseau hydrographique pérenne.

L'étape suivante consiste alors à définir les paramètres de la relation linéaire liant « a » et « b », tels que définis dans la Figure 33.

Pour chacun des 780 points retenus (107 de la campagne 2005 et 673 issus de la BSS) pour lesquels une mesure du niveau de la nappe est disponible, on a calculé par croisement avec les grilles correspondantes l'altitude du sol et l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes, de manière à calculer les paramètres «a» (*Zsol-Zrivières*) et « b » (*Zpiézométrie -Zrivières*). Ces données ont été rassemblées dans un tableau de mesures (cf. Figure 34) :

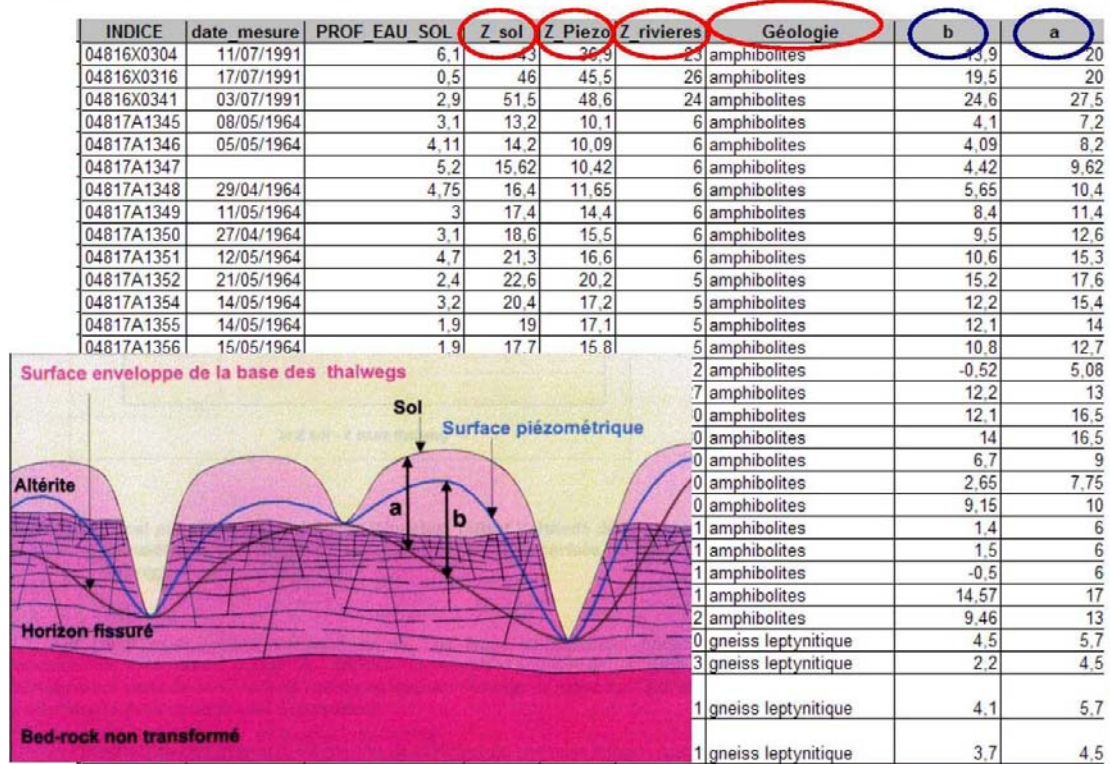


Figure 34 : Tableau de données pour la réalisation de la régression linéaire

Le report des couples de variables a et b sur un diagramme binaire (cf. Figure 35) a permis de calculer l'équation suivante pour l'ensemble des 780 valeurs, soit l'ensemble des formations de socle du territoire de Nantes Métropole :

$$b = 0,9476 \cdot a - 2,8452$$

La pente de la droite $b = f(a)$ (environ 0,95) est représentative de la perméabilité en grand des roches présentes sur le secteur d'étude. Plus la pente est proche de 1 plus le massif est imperméable ($Z_{sol} = Z_{piézométrie}$) et inversement plus la pente se rapproche de 0 plus le massif est perméable ($Z_{rivières} = Z_{piézométrie}$). Le secteur d'étude apparaît donc assez peu perméable.

L'ordonnée à l'origine négative (-2.85 m) représente l'encaissement moyen des rivières par rapport à leurs berges. Celle-ci peut également être en partie liée à des pompages situés à proximité des points de mesures.

Par comparaison, les résultats obtenus pour la réalisation de la carte piézométrique sur le périphérique intérieur nantais étaient très similaires :

$$b = 0,9500 \cdot a - 2,9082$$

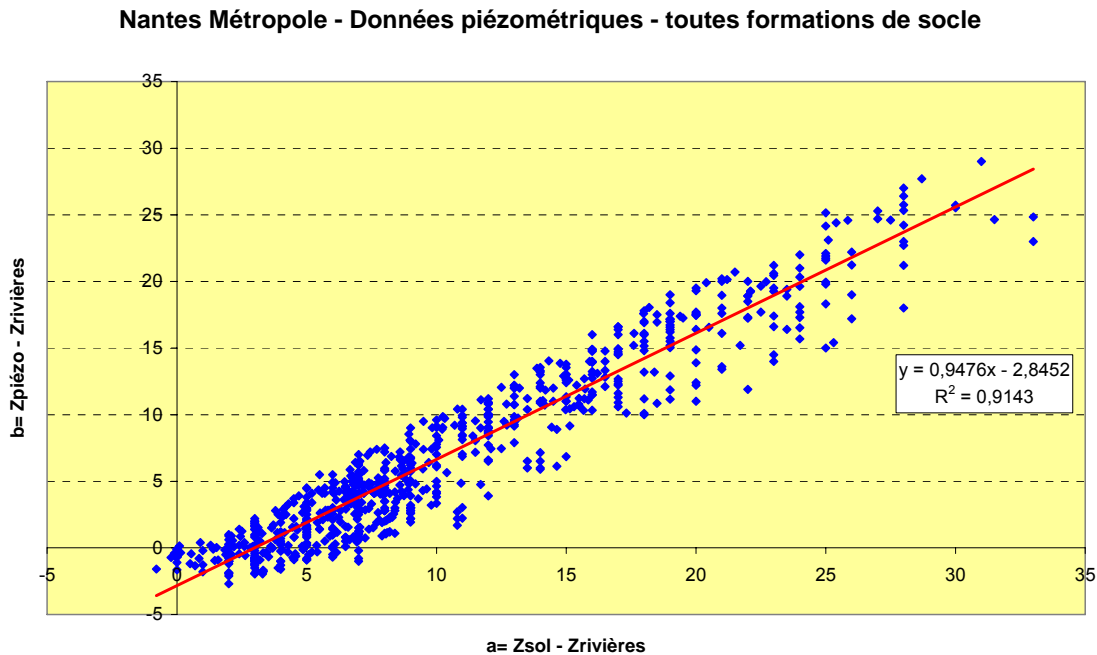


Figure 35 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant l'altitude de la surface piézométrique à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes

Les paramètres de cette équation permettent de calculer directement l'altitude de la surface piézométrique à partir du MNT et de la grille de l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes. La carte piézométrique en A3 est présentée en annexe 6. La cartographie réalisée fait apparaître que la nappe se situe à une profondeur de moins de 15 m sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole et à moins de 10 m sur plus de 98% du territoire. Compte tenu de l'incertitude liée à l'utilisation des données de la BSS, les résultats sont fournis sous la forme de polygones de classes de profondeur de la nappe.

4.2.3. Perméabilité relative des formations

Comme indiqué précédemment, la valeur obtenue pour la pente de la droite est un indicateur de la perméabilité de la formation que l'on considère : de façon théorique, une valeur de 1 indique un milieu imperméable, tandis qu'une valeur de 0 représente un milieu de perméabilité infinie.

Il a donc été décidé de tester un classement de la perméabilité des formations à partir de la pente obtenue pour chacune d'entre elles. Cet élément fournira pour la suite une première information que l'on comparera au traitement statistique sur les débits des forages.

Afin de pouvoir examiner la perméabilité relative des différentes formations géologiques, une analyse par formation a été effectuée. Les différentes mesures du niveau piézométrique ont été classées par formations hydrogéologiques principales :

- micaschistes ;
- granites ;
- amphibolites ;
- gneiss leptynitique ;
- socle indéterminé.

Les régressions linéaires obtenues pour les micaschistes, les granites et les amphibolites sont présentées de la Figure 36 à la Figure 38. Compte tenu de la faiblesse du nombre d'échantillons, les résultats sont peu probants pour les gneiss leptynitiques et la zone de socle indéterminé.

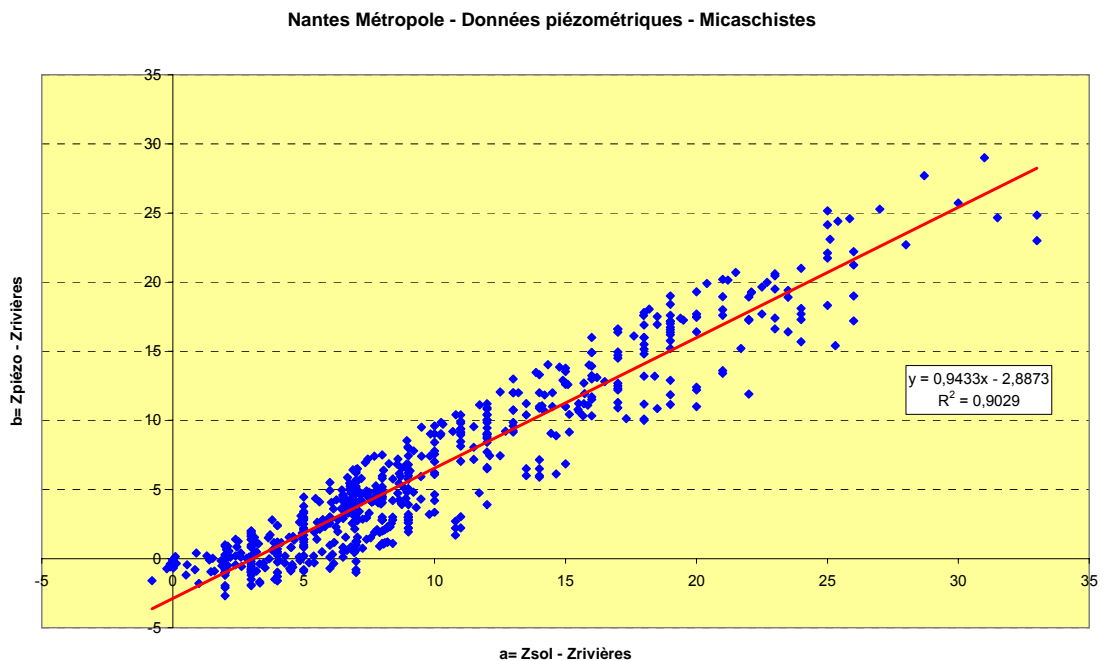


Figure 36 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant pour les micaschistes l'altitude de la nappe à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes

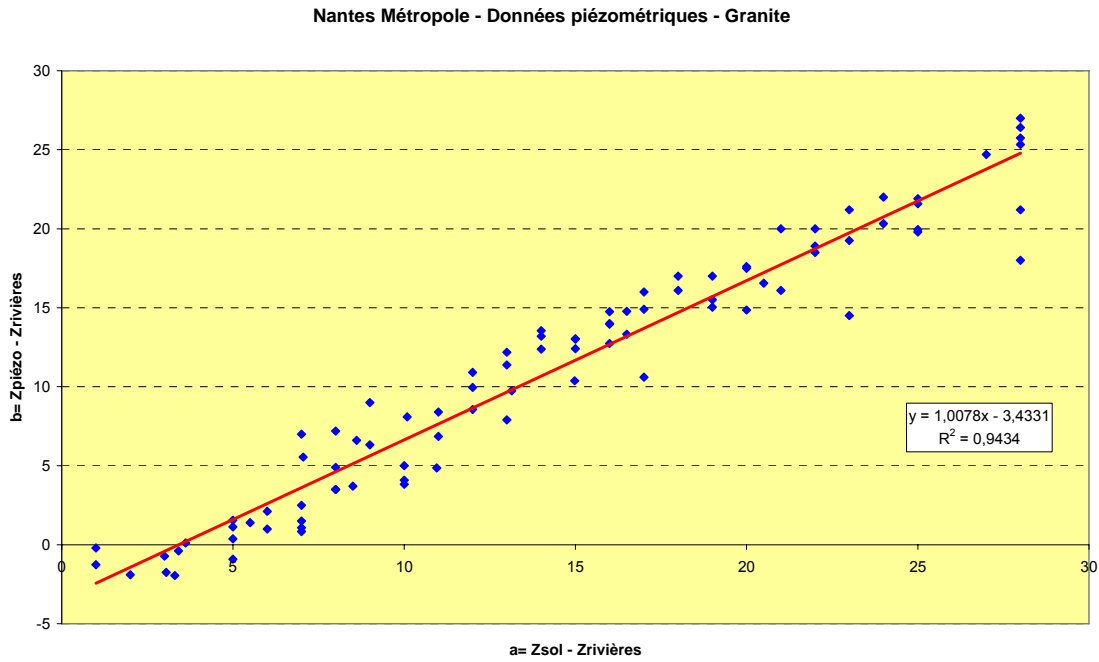


Figure 37 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant pour les granites l'altitude de la nappe à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes

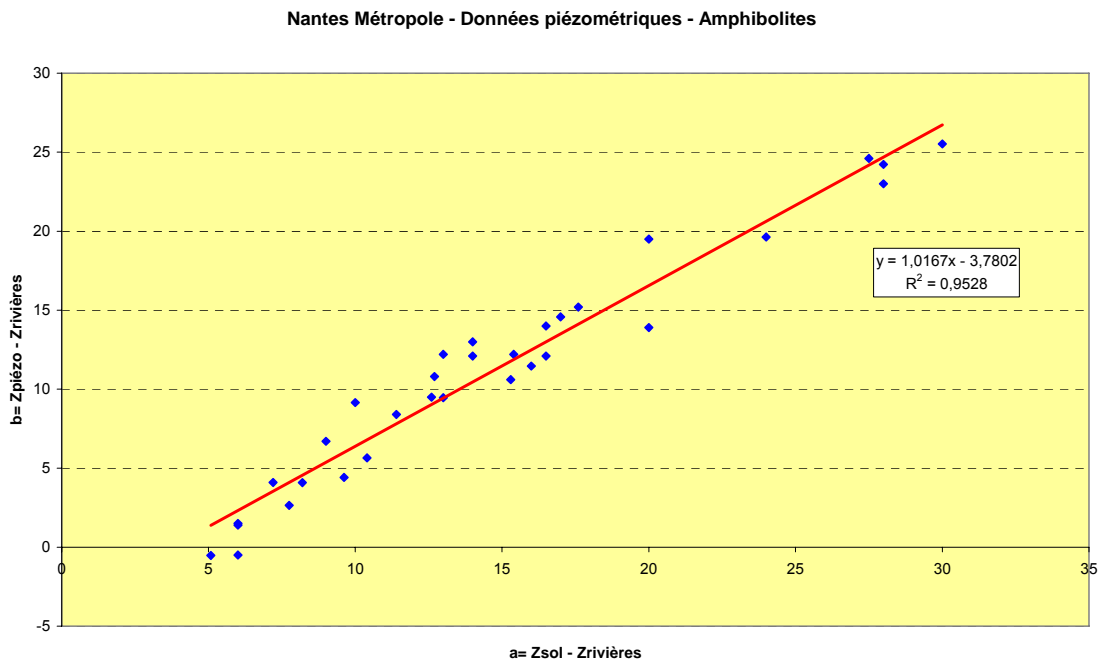


Figure 38 : Calcul par régression linéaire de l'équation reliant pour les amphibolites l'altitude de la nappe à l'altitude du sol et à l'altitude de la surface-enveloppe des rivières pérennes

Le Tableau 5 récapitule les valeurs obtenues par formation pour chacun des paramètres.

Formations	Echantillons	Pente de la droite	Ordonnée à l'origine
Amphibolites	32	1,0167	-3,7802
Granite	89	1,0078	-3,4331
Socle (toutes formations)	780	0,9476	-2,8452
Micaschistes	608	0,9433	-2,8873

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats obtenus pour les paramètres a et b

Les pentes obtenues laissent donc entrevoir une plus forte perméabilité des micaschistes que des granites, eux-mêmes plus perméables que les amphibolites. Du point de vue de la capacité d'altération de ces formations, les résultats semblent cohérents dans la mesure où :

- les micaschistes présentent un feuilletage favorable à la circulation de l'eau ;
- les granites comportent peu de biotites et celles-ci sont de petites tailles, ce qui est défavorable à la création de fissures ;
- les amphibolites sont déjà hydratées, ce qui limite leur capacité à augmenter de volume lors de l'altération.

5. Cartographie du potentiel géothermique très basse énergie

5.1. SONDES VERTICALES

5.1.1. Paramètres cartographiés dans l'atlas pour le dimensionnement de la sonde géothermique verticale

Principe

La sonde géothermique verticale est un échangeur thermique souterrain installé verticalement dans un forage de l'ordre d'une centaine de mètres de profondeur. Sa mise en œuvre nécessite la réalisation d'un ou plusieurs forages de diamètre 100 à 180 mm, la mise en place d'une boucle de 2 tubes de polyéthylène haute densité (PEHD) en forme de U⁷ et de diamètre 25, 32 ou 40 mm. L'espace annulaire entre la boucle et les parois du forage est rempli avec un mélange à base de ciment conducteur et bentonite, afin d'assurer un bon contact entre les tubes et la paroi du forage.

Un fluide caloporteur, de qualité alimentaire et biodégradable, composé d'eau additionnée d'antigel, généralement du mono propylène glycol, circule en circuit fermé par l'intermédiaire d'une pompe de circulation et assure la liaison entre la pompe à chaleur et le forage. Il permet en outre d'extraire la chaleur du sous-sol par conduction, de la transporter et de la restituer au plancher chauffant à l'aide de la pompe à chaleur (PAC).

Approches du dimensionnement

Le dimensionnement d'une sonde géothermique verticale peut être présenté à travers deux approches :

1. **Un pré-dimensionnement ou dimensionnement grossier ("à la louche")**, qui s'appuie sur des données de terrain générales (carte géologiques, bibliographie...) et sur des ratios de dimensionnement (puissance soutirée par mètre de sonde en présence de terrains secs ou saturés). Cette méthode est couramment utilisée par les professionnels (foreurs en particuliers ou installateurs) qui désirent

⁷ Il existe également d'autres types de géométries de boucles de tubes PEHD non prises en considération dans la présente étude, par exemple la sonde coaxiale, dont la diffusion en France et la mise en œuvre sont, à l'heure actuelle, moins maîtrisés

dimensionner rapidement la longueur des capteurs. Ils utilisent, pour ce faire, deux ratios de dimensionnement de la puissance linéaire moyenne soutirée par mètre de sonde aux terrains. Ces ratios ont été validés scientifiquement (simulations) et sont mentionnés dans la littérature :

- 50 W/m en présence de terrains saturés (nappe souterraine) ;
- 30 W/m en présence de terrains secs.

Ces ratios ne tiennent en revanche pas compte de la nature réelle des terrains in-situ. En revanche, ils permettent de garantir une marge de sécurité pour ne pas surexploiter les terrains (pour autant que le choix des 2 ratios soit en adéquation avec les terrains et avec la présence ou l'absence d'eau souterraine).

La prise en compte de la nature des terrains au droit du forage permet d'affiner le dimensionnement et d'optimiser la longueur des sondes (répercussions sur le coût de l'ouvrage). L'étude portée sur le territoire de Nantes Métropole a pour objectif de prendre en compte spatialement la nature des terrains à travers les logs géologiques validés et la carte géologique. La méthodologie détaillée est explicitée dans le paragraphe 5.1.2.

2. **Un dimensionnement affiné**, réalisé dans le cadre d'une étude de préfaisabilité, qui s'appuie sur des données prélevées in-situ (forage carotté, niveau d'eau souterraine,...), réalisé avec des outils de simulations plus ou moins évolués (EED, TRNSYS, EWS...). Cette approche nécessite l'intervention de spécialistes (bureaux d'étude, universités...). L'objectif d'un tel dimensionnement est d'optimiser la longueur des sondes et d'assurer l'optimum entre rendement/pérennité et coût d'investissement.

L'étude menée et notamment la cartographie du potentiel géothermique TBE pour les sondes géothermiques n'a pas pour objectif de fournir des données qui permettent de réaliser un dimensionnement affiné réalisé dans le cadre d'une étude de préfaisabilités. En revanche, les données fournies par les cartes (conductivités thermiques, puissances linéaires par mètre de sonde) pourront orienter le bureau d'étude dans le choix de ces paramètres.

Conductivité thermique

Les deux paramètres fondamentaux se rapportant au sous-sol pour dimensionner la longueur des sondes géothermiques sont la conductivité thermique des terrains, exprimée en W/mK, et les puissances linéaires en W/m.

La conductivité thermique caractérise la capacité des terrains à transmettre la chaleur par conduction. Au sens strict de la définition, c'est le flux de chaleur qui traverse la paroi d'un matériau de 1 mètre d'épaisseur, pour 1 mètre carré de surface, avec une différence de température de 1 degré entre les 2 faces de cette paroi. La chaleur se propage à l'intérieur du matériau de particule à particule. C'est une donnée intrinsèque à chaque matériau (roche dans notre cas).

Dans le cas des terrains, il est à noter que les roches meubles (sables, graviers...) ont une conductivité thermique nettement améliorée en présence d'eau (facteur pouvant aller jusqu'à 6 !) (cf. Tableau 7). Cette caractéristique est moins prononcée pour les roches fissurées (granite, gneiss).

La cartographie du potentiel très basse énergie pour les sondes géothermiques s'appuie essentiellement sur ce paramètre. La méthodologie d'attribution d'une conductivité thermique aux différentes lithologies ainsi que le calcul de la puissance soustraite aux terrains est décrite ci-dessous.

5.1.2. Méthodologie pour cartographier les conductivités thermiques et les puissances par mètre linéaire de sonde

Création d'une bibliothèque de lithologies simplifiées :

La première étape a été de rechercher, dans la Banque de données du sous-sol (BSS) et sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole, les données ponctuelles de forage (logs validés). A partir de ces données brutes, un tableau synthétique a été réalisé et traité sous SIG, qui présente la succession des lithologies pour chaque forage et pour chaque formation géologique. On peut remarquer, sur l'annexe 7, que la bibliothèque des lithologies est très détaillée, avec notamment des redondances dans la dénomination des couches (par exemple, argile organique, argile sableuse, argile tourbeuse...). La démarche a donc été de créer une colonne "lithologie simplifiée", qui regroupe les différentes lithologies en fonction de leur nature et de leur propriété thermique communes. Le regroupement réalisé est présenté dans le Tableau 6 et à l'annexe 8 :

Lithologie simplifiée	Lithologies détaillées (logs validés)
Remblais ou autre	Remblais, terre végétale, tourbe, colluvions
Sable autre	Sable, sable fin, sable grossier, graviers, galets
Sable argileux	Sables argileux +/- graviers, galets, grès pourri
Argile	Argile, argile sableuse, argile sableuse fine, argile organique, argile tourbeuse
Grès	Grès
Granite	Granite, socle indéterminé (granite à deux micas), leucogranite, granodiorite
Altérite_saprolite	Altérite des micaschistes, arène argileuse, arène meuble (arène de micaschiste), roche d'altération s.l. (schiste altéré, argile et schiste mi-dur, schiste pourri)
Arène granitique	Arène granitique, granite marron pourri, gneiss altéré
Gneiss	Gneiss, orthogneiss, paragneiss, prasinite, socle indéterminé (Gneiss de Rezé)
Schiste	Schiste, micaschiste, schiste noir, schiste bleu, schiste blanc, socle indéterminé (micaschistes albitiques à deux micas)
Quartz	Filon de quartz (épaisseur 1 m)

Tableau 6 : Regroupement des lithologies

Attribution des conductivités thermiques :

La seconde étape a été d'attribuer des conductivités thermiques (fourchettes min - max et moyenne) aux différentes lithologies simplifiées, à partir d'un abaque⁸ et de recherches bibliographiques. La conductivité moyenne a été déterminée en calculant la moyenne des valeurs min. et max. lorsqu'elles sont disponibles dans l'abaque. Lorsqu'elles ne sont pas connues (arènes, altérites, remblais), elles ont été estimées par association de la composition minéralogique des roches :

- **Remblais ou autre :**

Approximation : les valeurs min. max se rapportent à celles données pour la terre végétale sèche ou à 20 % de saturation en eau. Dans le domaine sec, la valeur moyenne ainsi calculée (0,4 W/mK) est cohérente en comparaison à la même valeur donnée par les abaques pour le sable sec qui comporte 20 – 30 % de porosité.

⁸ SIA D025 OFEN (Suisse) – Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température, mai 1988

- **Sable autre, argile, grès, granite, gneiss, schiste :**
Les valeurs sont données par l'abaque (cf. Tableau 7)
- **Sable argileux :**
Approximation : les valeurs sont calculées en faisant la moyenne entre celles du sable et celles de l'argile. Remarque : les grès pourris (roches d'altération s.l.) sont assimilés à cette catégorie.
- **Arène granitique :**
Approximation : la valeur moyenne considérée correspond à la valeur moyenne donnée pour les sables argileux
- **Altérite, saprolite :**
Approximation : la valeur moyenne considérée correspond à la valeur moyenne donnée pour les argiles.

Le tableau récapitulatif d'attribution des conductivités thermiques aux lithologies simplifiées est présenté ci-dessous :

Lithologie simplifiée	Kth sec min (W/mK)	Kth sec max (W/mK)	Kth sec moy (W/mK)	Kth saturé min (W/mK)	Kth saturé max (W/mK)	Kth saturé moy (W/mK)
remblais ou autre	0.150	0.580	0.365	0.800	2.600	1.700
sable autre	0.300	0.400	0.350	2.000	3.300	2.650
sable argileux	0.250	0.350	0.300	1.600	2.450	2.025
argile	0.200	0.300	0.250	1.200	1.600	1.400
grès	1.800	3.500	2.650	2.300	4.000	3.150
granite	2.600	3.800	3.200	2.700	3.800	3.250
altérite saprolite			0.250			1.400
arène granitique			0.300			2.025
gneiss	2.400	3.300	2.850	2.500	3.500	3.000
schiste	1.400	2.500	1.950	1.400	2.600	2.000
Quartz			7.700			7.700

Tableau 7 : Attribution des conductivités thermiques aux lithologies simplifiées

Calcul de la conductivité thermique moyenne pour chaque forage :

La troisième étape a été le calcul de la conductivité thermique moyenne pour chaque forage, en fonction de l'épaisseur de chaque couche, d'une part pour la profondeur réelle de chaque forage, et d'autre part pour chaque forage normé à une profondeur de 100 m :

$$K_{th_{moy}} = \frac{\text{somme (épaisseurs}_{\text{couches } i} * \text{conductivités}_{\text{couches } i})}{\text{somme des épaisseurs}_{\text{couches } i}}$$

Les conductivités moyennes cartographiées dans l'atlas ont été celles calculées à partir des forages normés à 100 m. Ce choix a été fait pour les raisons suivantes :

- Les sondes réalisées en France ont une profondeur moyenne qui se situe entre 80 et 100 m, pour des raisons administratives et réglementaires (Code Minier, demande d'autorisation au-delà de 100 m) ;
- Les données de terrain (forages) sur le territoire de Nantes Métropole sont généralement inférieures à 100 m, donc peu de données disponibles au-delà de cette profondeur ;
- Le choix de normer les forages à une profondeur identique permet de comparer les conductivités thermiques calculées (étalon).

Postulats pour cartographier les conductivités thermiques :

La cartographie a été réalisée par le biais d'une analyse thématique qui s'est portée sur les conductivités thermiques moyennes pour les forages normés à 100 m et pour les postulats suivants (cf. annexe 9) :

- **Terrains secs** : en relation avec ce qui a été dit sur la conductivité thermique des terrains en absence d'eau (cf. paragraphe 5.1.1), on peut considérer que c'est le cas le plus défavorable ;
- **Terrains saturés** : on tient compte des valeurs de conductivité thermique pour le cas des terrains saturés sur toute la hauteur du forage. C'est le cas le plus favorable ;
- **Moyenne terrains secs et saturés** : la conductivité thermique a été calculée par la moyenne des deux précédentes. C'est le cas intermédiaire.

Les deux premiers cas ont été traités pour montrer la variabilité des résultats (cf. annexe 10). En revanche, c'est le troisième cas qui a été considéré pour les calculs statistiques et la représentation du potentiel géothermique, excepté pour les alluvions de la Loire où les valeurs de conductivités thermiques ont été attribuées aux terrains saturés (en admettant le postulat simplificateur que les terrains sont saturés à moins de 5 mètres de profondeur, soit à plus de 95 % de la hauteur d'une sonde de 100 m).

Postulats pour cartographier les puissances linéaires par mètre de sonde

Les puissances soutirées par ml de forage ont été déterminées à partir des conductivités thermiques moyennes, en utilisant l'abaque établi par B. Sanner, D-35390 Giessen (cf. Tableau 8), qui utilise le modèle de calcul EED de l'Université de Lund et qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain. Cet abaque tient compte des postulats suivants qui en limitent l'utilisation des résultats :

- Géométrie des sondes : double U
- Durée effective de fonctionnement annuelle de la PAC : 2200 heures
- Production d'eau chaude : oui
- Puissance des installations de chauffage : inf. ou égales à 10 kW
- Il n'est pas tenu compte d'interactions entre les sondes géothermiques qui s'influenceraient mutuellement
- Aucune réinjection de chaleur à travers les sondes (freecooling)

Remarque : pour les puissances de chauffage supérieures à 10 kW, en particulier dans le cas d'immeubles locatifs bien isolés, le dimensionnement sera réalisé par un bureau d'étude (utilisation d'outils de simulation tels que TRNSYS par exemple) prenant en compte notamment la conductivité moyenne des terrains (voir annexe 9) et la géométrie du champ captant (champ de sondes). Un surdimensionnement des sondes est généralement nécessaire pour couvrir la part de la production d'eau chaude qui devient prépondérante.

Les puissances linéaires ont ainsi été attribuées pour chaque forage normé à 100 m de profondeur, en relation avec la conductivité moyenne calculée pour les trois cas mentionnés (terrains secs, saturés, moyenne secs et saturés). En parallèle, les puissances totales en kW ont été calculées pour une sonde de 100 m de profondeur

Conductivité thermique (W/mK)	Puissance linéaire sans nappe (W/m)	Puissance linéaire avec une nappe (W/m)	Commentaire
0.5	22.7	26.5	Calculé avec EED
1.0	29.8	35.0	
1.1	30.9	36.2	
1.2	32.1	37.3	
1.3	33.2	38.5	
1.4	34.2	39.6	
1.5	35.3	40.6	
1.6	36.3	41.7	
1.7	37.3	42.7	
1.8	38.3	43.8	
1.9	39.4	44.8	
2.0	40.4	45.8	
2.1	41.4	46.8	
2.2	42.4	47.8	
2.3	43.4	48.8	
2.4	44.3	49.7	
2.5	45.3	50.6	
2.6	46.2	51.5	
2.7	47.1	52.4	
2.8	47.9	53.3	
2.9	48.8	54.0	
3.0	49.7	54.8	
3.1	50.5	55.6	
3.2	51.3	56.4	
3.3	52.1	57.2	
3.4	52.9	57.8	
3.5	53.7	58.6	
3.6	54.4	59.3	
3.7	55.2	60.0	
3.8	55.9	60.6	
3.9	56.6	61.2	
4.0	57.3	61.7	

Tableau 8 : Abaque établi par B. Sanner, D-35390 Giessen qui utilise le modèle de calcul EED de l'Université de Lund et qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain

Délimitation des entités géothermiques et analyse statistique

En partant de l'approche que la conductivité thermique d'une roche dépend principalement de sa composition minéralogique et, à l'échelle du forage, de la nature lithologique des couches, les entités géothermiques ont été délimitées à partir des formations géologiques définies sur la carte géologique regroupée (cf. paragraphe 4.1.3).

A partir de la carte géologique a été réalisée une extraction des forages pour chacune des formations géologiques, pour permettre de réaliser une analyse statistique sur les valeurs calculées de conductivités thermiques moyennes et de puissances linéaires par mètre de sonde (cf. annexes 11 et 12). La méthode statistique utilisée a été celle des "boîtes à moustache" de Tuckey (cf. annexe 18), avec pour calcul les valeurs suivantes : minimum, maximum, premier quartile, médiane, troisième quartile, moyenne (cf. annexes 13, 14).

Remarque :

Parmi les trois cas évoqués ultérieurement (terrains secs, saturés, moyenne secs et saturés), les calculs statistiques prennent en considération, pour les alluvions, les conductivités thermiques saturées. En revanche, pour les autres formations, c'est la moyenne entre les conductivités thermiques (sec + saturé) qui ont été considérées.

5.1.3. Interprétation des résultats obtenus

L'interprétation des résultats a été menée en deux étapes, la première consistant à analyser les valeurs moyennes de conductivités thermiques et respectivement des puissances linéaires calculées pour chaque forage (logs validés) situé sur le territoire de Nantes Métropole, puis dans une deuxième étape, à analyser les résultats issus de l'analyse statistique portée sur les entités géothermiques (formations géologiques) décrite ci-dessus.

Conductivités thermiques moyennes et puissances linéaires respectives calculées pour chaque forage (log validé)

Sur le territoire de Nantes Métropoles, 173 forages ont été traités. Pour rappel, la conductivité thermique moyenne a été calculée, pour chaque forage, en tenant compte de la nature des différentes lithologies.

Trois cas ont été différenciés (cf. annexe 9) : terrains totalement secs (cas défavorable), terrains totalement saturés (cas favorable), moyenne terrains secs et saturés (cas intermédiaire).

Conductivité thermique (W/mK)	Terrains secs	Terrains saturés	Moyenne terrains secs et saturés
	% du nb de forages (173 au total)		
< 2.0	37	12	21
2.0 – 3.0	27	37	36
> 3.0	36	50	42

Tableau 9 : Pourcentage du nombre de forages (logs validés) par rapport à 3 fourchettes de conductivité thermique et à la saturation en eau souterraine des terrains

En considérant les terrains comme étant totalement secs sur la profondeur du forage, les conductivités thermiques calculées pour les 173 forages présentent une répartition plus ou moins homogène de 30 % pour les 3 fourchettes différenciées. En considérant les terrains totalement saturés, on remarque en revanche que 50 % des forages présentent une conductivité supérieure à 3.0 W/mK, ce qui représente une puissance linéaire supérieure à ~55 W/m.

En prenant le cas intermédiaire qui moyenne les terrains secs et saturés (ne connaissant pas par exemple l'état local de la nappe), **36 % des forages présentent une conductivité comprise entre 2.0 et 3.0 W/mK, soit une puissance linéaire comprise entre 40 et 55 W/m, et 42 % supérieure à 55 W/m.**

Remarque :

Les puissances linéaires calculées pour les terrains secs et pour les terrains saturés mettent en évidence une variabilité (cf. annexe 10), exprimées en % du sec par la différence entre (saturé – sec) :

Sur 173 forages au total, 75 % des valeurs calculées expriment une différence de puissance linéaire supérieure de 15 % en terrains saturés par rapport à celles calculées en considérant des terrains secs.

On peut donc estimer que la variabilité des résultats entre les terrains secs et les terrains totalement saturés est de ~15 %, ce qui peut se traduire, en termes de coût, de la manière suivante :

Pour une puissance à chauffer de 5 kW (en considérant que cette puissance correspond à la puissance soutirée aux terrains), une puissance linéaire en terrains saturés de 50 W/m, par exemple, impliquera une longueur de sonde de 100 m. En terrains secs, avec une puissance de 42.5 W/m (soit 15 % inférieure), la longueur respective de la sonde sera portée à 117 m, soit un surcoût de 17 m de forage et de sonde posée.

Conductivités thermiques moyennes, puissances linéaires et puissances totale pour une sonde de 100 m calculées pour chaque entité géothermique (Analyse statistique)

L'extraction des données de forage pour chaque formation est représentée dans les annexes 16 et 17. On remarque que la répartition du nombre de forages pour chacune des formations géologiques est inégale :

Nombre de forages	
Alluvions :	7
Amphibolites :	4
Gneiss leptynitiques :	20
Granites :	41
Indifférencié :	21
Micaschistes :	77

Ainsi, la formation "Micaschistes" est la mieux contrainte (77 forages), avec en deuxième position les granites (41 forages), puis les gneiss leptynitiques et indifférencié (20 forages). Les alluvions et amphibolites sont peu documentées en données de terrain (< 10 forages).

Pour chacune des 6 formations et en tenant compte des trois cas différenciés (sols secs, saturés, moyenne secs et saturés) les grandeurs statistiques (min, max, 1^{er} et 3^{ème} quartile, médiane, moyenne) calculées pour les conductivités thermiques (W/mK), les puissances linéaires par mètre de sonde (W/m) et les puissances totales soutirées pour une sonde de 100 m (kW) sont présentées dans les annexes 15, 16, 17. Pour rappel, n'ont été cartographiées (colonne en jaune dans l'annexe 15) que les valeurs correspondant à la moyenne des terrains secs et saturés, excepté pour les alluvions où ce sont les valeurs des terrains saturés qui ont été prises en compte. Parallèlement, les résultats présentés ci-dessous sont restreints aux valeurs cartographiées.

Les 6 formations géologiques peuvent être classées en 3 classes de conductivité thermique ou 3 classes de puissance linéaire, en tenant compte de la valeur médiane :

Conductivité thermique (W/mK)		
Médiane		
~2.0	~2.5	>3.0
Micaschistes (2.0)	Amphibolites (2.4)	Granite (3.2)
indifférenciés (2.0)	Alluvions (2.6)	Gneiss leptynitiques (3.0)

Puissance linéaire (W/m)		
Médiane		
40 - 45	45 - 50	50 - 55
Micaschistes (42.1)	Amphibolites (45.9)	Gneiss leptynitiques (50.6)
indifférenciés (42.1)		Alluvions (51.5)
		Granite (53.0)

Tableau 10 : Classification des formations géologiques en fonction des valeurs médiane de la conductivité thermique et de la puissance linéaire

5.1.4. Analyse critique sur les résultats et limites de l'étude

Ce paragraphe a pour objectif de définir les limites de l'étude et de souligner les précautions à prendre quand à l'utilisation des résultats.

En premier lieu, il faut garder en mémoire qu'ils sont le fruit d'un travail statistique effectué à partir de la description lithologique des forages, telle qu'elle est décrite dans la Banque de données du Sous-Sol. Une grande précision des valeurs de conductivité thermique et des puissances linéaires calculées ne peut donc pas être assurée. Elles sont d'ordre indicatif et ne remplacent, en aucun cas une étude de faisabilité locale.

La conductivité thermique moyenne a été calculée, pour chaque forage, pour une profondeur normée à 100 m. La plupart des forages étant de profondeur inférieure, leur dernière couche a été extrapolée jusqu'à 100 m. Cette extrapolation est une approximation de la réalité. Dans le cas des granites, on peut considérer que cette extrapolation affecte peu les risques d'erreur, étant donné que les granites sont des

roches plutoniques intrusives et que l'épaisseur du pluton est probablement supérieure à 100 m.

En revanche, pour les formations "micaschistes, indifférencié, amphibolites et gneiss leptynitique" qui sont des roches métamorphiques, cette extrapolation est plus aléatoire. Cependant, étant donné que les couches géologiques sur le territoire de Nantes Métropole ont un pendage globalement sub-vertical, les risques d'erreur sur l'extrapolation de la dernière couche à 100 m peuvent être considérés comme diminués. L'extrapolation est la plus délicate pour les alluvions dont 5 forages, sur les 7 forages au total, ont une profondeur inférieure à 60 m (ce qui implique une extrapolation de la dernière couche supérieure à 40 m).

Les trois cas traités (terrains secs, saturés, moyenne secs et saturés) représentent les cas théoriques. En réalité, les terrains sont rarement totalement secs, il s'agit du cas le plus défavorable qui peut être pris en compte, par exemple, pour prendre la plus grande marge de sécurité sur le dimensionnement des sondes. Le cas intermédiaire représente quant à lui un compromis, dans le cas où la présence d'une nappe n'est pas connue. La prise en compte des terrains totalement saturés peut être considérée comme un cas "très favorable", dans les formations du socle, qui représentent des milieux discontinus et fracturés. En revanche, c'est un cas qui peut être considéré comme proche de la réalité pour les alluvions (après vérification in-situ, lors d'une étude de faisabilité, de la profondeur réelle de la nappe pour corriger la valeur de conductivité thermique en tenant compte de la hauteur des terrains non saturés). Pour rappel, le % de variabilité des résultats entre les terrains secs et saturés est le plus important pour les alluvions, soit de 126 %, alors qu'il est de l'ordre de 15 % pour les autres formations.

Le calcul de la puissance linéaire a été réalisé à partir de l'abaque établi par B. Sanner, qui tient compte d'un certain nombre de postulats (cf. paragraphe 5.1.2) dont il faudra tenir compte pour l'approche du dimensionnement. Cet abaque définit également la variabilité des résultats. En effet, on peut remarquer que la conductivité thermique correspondant à un granite de 2.7 – 3.8 W/mK est associée à une puissance linéaire située entre 52.4 – 60.6 W/m en présence d'une nappe. D'après les fourchettes de valeurs disponibles sur d'autres abaques (notamment la norme VDI 4640 allemande), un granite peut restituer une puissance linéaire de 55 – 70 W/m, ce qui représente un écart positif de ~17 %. Pour le cas des alluvions (gravier et sables saturés), la norme allemande indique une puissance d'extraction de 55 – 65 W/m, ce qui représente, par rapport à l'abaque de Sanner qui attribue une puissance de 50.6 – 57.2 W/m, un écart positif de ~14 %.

Si l'on tient compte des résultats statistiques sur la puissance totale d'extraction (en kW) calculée pour le cas intermédiaire (moyenne terrains secs et saturés), on s'aperçoit que la variabilité maximale des résultats est de l'ordre de ~40 % entre les granites (5.13 kW) et les alluvions (3.63 kW). En revanche, dans les formations de socle qui représentent la majeure partie du territoire de Nantes Métropole, elle varie entre 3 % entre les granites (5.13 kW) et les gneiss 4.97 kW et 18 % entre les granites et les indifférenciés (4.35 kW).

Les propriétés thermiques sont fortement améliorées dans le cas d'écoulements souterrains. En effet, le transport de chaleur par advection est beaucoup plus efficace

que la conduction simple, comme l'ont montré des tests de réponse thermique in-situ [Gehlin, 2002 ; Signorelli, 2004]. Dans la pratique, ces effets se traduisent par des puissances d'extraction plus importantes et donc la possibilité de diminuer la longueur des sondes géothermiques. Afin de définir les lieux où l'influence des écoulements souterrains est importante, il faut déterminer le gradient hydraulique et la vitesse d'écoulement. L'évolution des puissances d'extraction (ou des conductivités thermiques effectives) en fonction de la vitesse d'écoulement souterrain est cependant mal documentée, raison pour laquelle elle n'a pas été abordée dans le cadre de cette étude. Pour mémoire, la directive VDI 440 indique une puissance d'extraction pour les alluvions (graviers, sables) de 80 – 100 W/m (contre 55 – 65 W/m sans écoulement) pour un écoulement "fort", sans spécifier à partir de quelle vitesse un écoulement est fort. D'après des simulations réalisées en Suisse (A. Fromentin, D. Pahud, EPFL - LASSEN, 1015 Lausanne, 1997), un écoulement souterrain avec une vitesse de Darcy supérieure à 1 m/jour, sur une portion significative de la longueur des sondes géothermiques, permet de sensiblement augmenter les valeurs de puissance et d'énergie soutirées. **Dans les alluvions, en présence d'un écoulement souterrain significatif, on peut s'attendre, d'après les valeurs de la VDI 440, à une augmentation de la puissance d'extraction de l'ordre de 50 % par rapport à la valeur maximale normale.**

5.1.5. Cartographie du potentiel géothermique

Le potentiel géothermique pour une sonde géothermique verticale a été défini, dans le cadre de cette étude, par la puissance totale (en kW) pour une sonde normée à 100 m de profondeur et la puissance linéaire par mètre de sonde (en W/m). Le premier résultat permet de comparer facilement les puissances totales entre les sondes géothermiques et les puissances soutirées à partir des pompages (voir paragraphe 6.1). Le deuxième permet en revanche de dimensionner la longueur d'une sonde en fonction de la puissance à soutirer aux terrains.

Le potentiel géothermique a été régionalisé, sur le territoire de Nantes Métropole, en réalisant une analyse thématique qui prend en compte les résultats de l'analyse statistique décrite ci-dessus. Pour mettre en évidence la variabilité du potentiel dans les alluvions en fonction de la saturation des terrains, deux cas ont été traités :

- Alluvions totalement saturés. Les autres formations prennent en compte la moyenne des terrains secs et saturés (cf. annexe 16) ;
- Toutes les formations (y compris alluvions) prennent en compte la moyenne des terrains secs et saturés (cf. annexe 17).

On peut remarquer, dans le premier cas, que la médiane de la puissance totale pour une sonde de 100 m se situe entre 4 et 4.5 kW dans les parties SW et NE du territoire de Nantes Métropole (micaschistes et indifférencié) et que la partie centrale se situe entre 5 et 5.5 kW (granites, alluvions et gneiss leptynitique), soit un différentiel de plus de 20 %.

Dans le deuxième cas, lorsque les alluvions ne sont pas considérées comme totalement saturées, la médiane chute entre 3.5 et 4 kW, soit un différentiel de plus de 55 % en prenant la fourchette extrême (5.5 kW et 3.5 kW).

Cette comparaison montre l'importance de la profondeur du niveau de la nappe pour le dimensionnement des sondes et montre que cette dernière devra en tous les cas être prise en compte, dans le cadre d'une étude de faisabilité.

5.2. POMPAGE EN NAPPE

5.2.1. Méthodologie

La définition d'un potentiel géothermique de très basse énergie nécessite une connaissance spatialisée d'un certain nombre de paramètres. Il s'agit notamment de préciser :

- la géométrie du ou des aquifère(s), à commencer par son (leur) extension latérale ;
- la profondeur du niveau piézométrique, qui dans le cas d'un aquifère à nappe libre correspond au niveau de la nappe ;
- la productivité de la partie mouillée de l'aquifère, que l'on caractérise habituellement par sa perméabilité ou sa transmissivité ;
- la température de l'eau de la nappe ;
- la qualité physico-chimique de l'eau de nappe, notamment son caractère corrosif ou entartrant. Ce paramètre est idéalement mesuré par l'indice de Ryznar I_R , qui est égal à : $I_R = 2 \text{ pHs} - \text{pH}$. Le pH de saturation (pHs) est déterminé à partir de la température, de la salinité totale, de l'alcalinité (TAC) et de la teneur en calcium. En pratique, cet indice est relativement complexe à calculer et est rarement rencontré dans la littérature : on s'attend à ne trouver que peu voire aucune valeur.

La cartographie d'un potentiel résulte du croisement de ces ou d'une partie de ces paramètres. Ce travail est effectué sous SIG. Les données collectées et élaborées sont stockées dans une base de données ACCESS.

5.2.2. Données disponibles et choix des critères pris en compte

Géométrie des aquifères

La délimitation des unités hydrogéologiques a été présentée au paragraphe 4.1.3. Cette délimitation fournit un découpage du territoire en « unités fonctionnelles »

présentant un comportement supposé comme homogène du point de vue hydrogéologique.

Compte tenu du caractère discontinu des formations de socle, il est bien entendu que cette approche n'est valable qu'à l'échelle de Nantes Métropole et que ces unités sont hétérogènes dans le détail. Des écarts importants de productivité sont par exemple à attendre sur de faibles distances.

Ainsi, les résultats proposés à l'échelle de ces unités fonctionnelles fournissent une vision globale de leur potentialité. **En aucun cas ces résultats ne se substituent à la réalisation d'une étude de faisabilité pour l'implantation d'une installation de géothermie avec pompage en nappe.**

En termes de profondeur de foration dans le socle, une valeur moyenne de 30 à 40 mètres peut être retenue. L'objectif étant d'atteindre l'horizon fissuré du socle, la profondeur du mur des altérites constitue un repère important.

Profondeur du niveau de la nappe

Dans le cas d'aquifères peu profonds, ce paramètre impacte peu dans les projets de mise en œuvre de géothermie très basse énergie avec pompage en nappe. De fait, ce critère n'est pas discriminant pour l'évaluation du potentiel : il n'est donc pas utilisé pour la cartographie.

Productivité des aquifères

L'étude de la productivité des aquifères est basée sur la connaissance de la transmissivité, produit de l'épaisseur d'une nappe par sa perméabilité. Les valeurs de transmissivité (exprimées en m^2/s) sont acquises par le biais de pompages d'essai de longue durée, souvent lourds à réaliser à titre privé. De fait, leur nombre est assez limité et l'information disponible en BSS insuffisante au regard de l'extension de la zone d'étude.

La Figure 39 montre les ouvrages pour lesquels des mesures de transmissivité ou de perméabilité sont susceptibles d'être disponibles. Outre leur très faible nombre (36 ouvrages sur l'ensemble de la zone), ils présentent une répartition très inégale puisque 28 d'entre eux sont situés en zone alluviale.

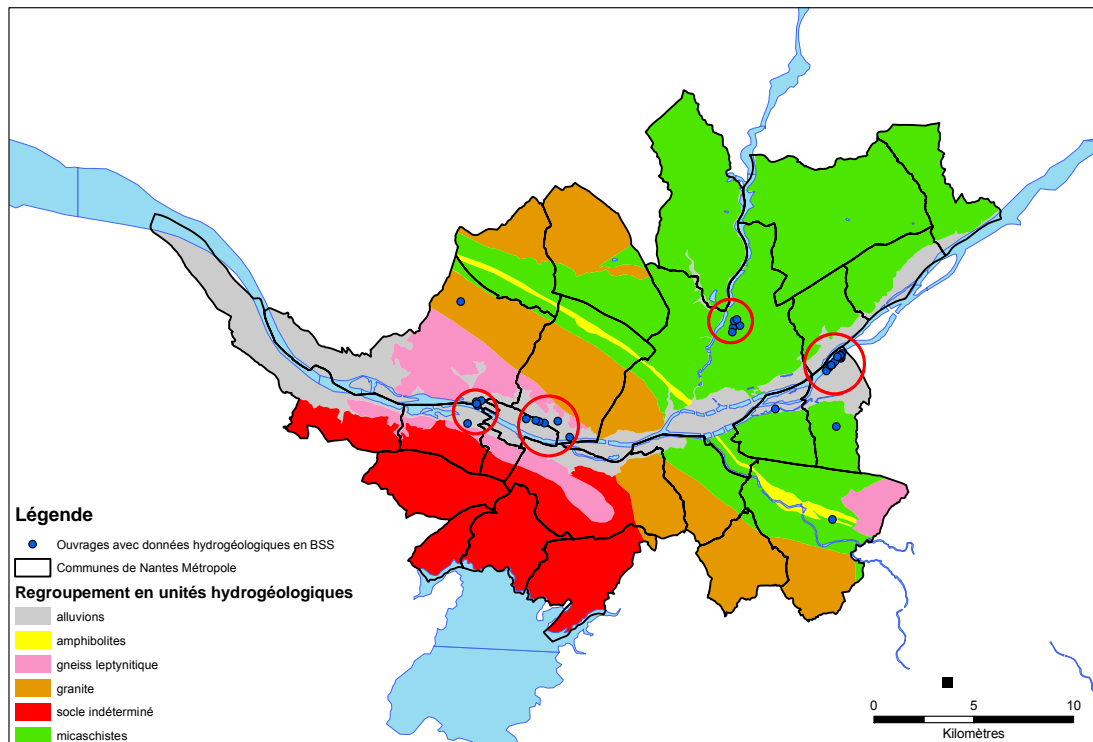


Figure 39 : Localisation des données de perméabilité ou de transmissivité disponibles en BSS

Par défaut, le paramètre utilisé peut alors être le débit spécifique, rapport entre le débit d'un puits ou d'un forage et le rabattement induit à l'équilibre dans l'ouvrage lui-même. Ce paramètre, dont l'unité est identique à celle de la transmissivité (bien que le plus souvent exprimée en $m^3/h/m$), diffère de cette dernière par la prise en compte des pertes de charges liées à l'ouvrage : on ne mesure plus directement la productivité de l'aquifère mais sa capacité à être extraite par des ouvrages (puits ou forages). Là encore, les données disponibles sont insuffisantes pour l'utilisation que l'on souhaite en faire.

Ainsi, en l'absence de données de transmissivité ou de débits spécifiques suffisamment nombreuses au regard de la zone d'étude, il a été décidé de travailler directement avec les débits. Ce choix conduit à une approche globalisante (en termes d'effets intervenants dans la dynamique de sollicitation d'un aquifère) et finalement assez empirique (on ne s'intéresse plus au détail de la dynamique mais on s'appuie sur l'existant pour fournir une représentation acceptable des conditions réelles de captage de la ressource) des capacités d'exploitation des ressources en eaux souterraines.

406 valeurs de débit de forage ont été recensées en BSS. La Figure 40 montre leur répartition sur le territoire de Nantes Métropole.

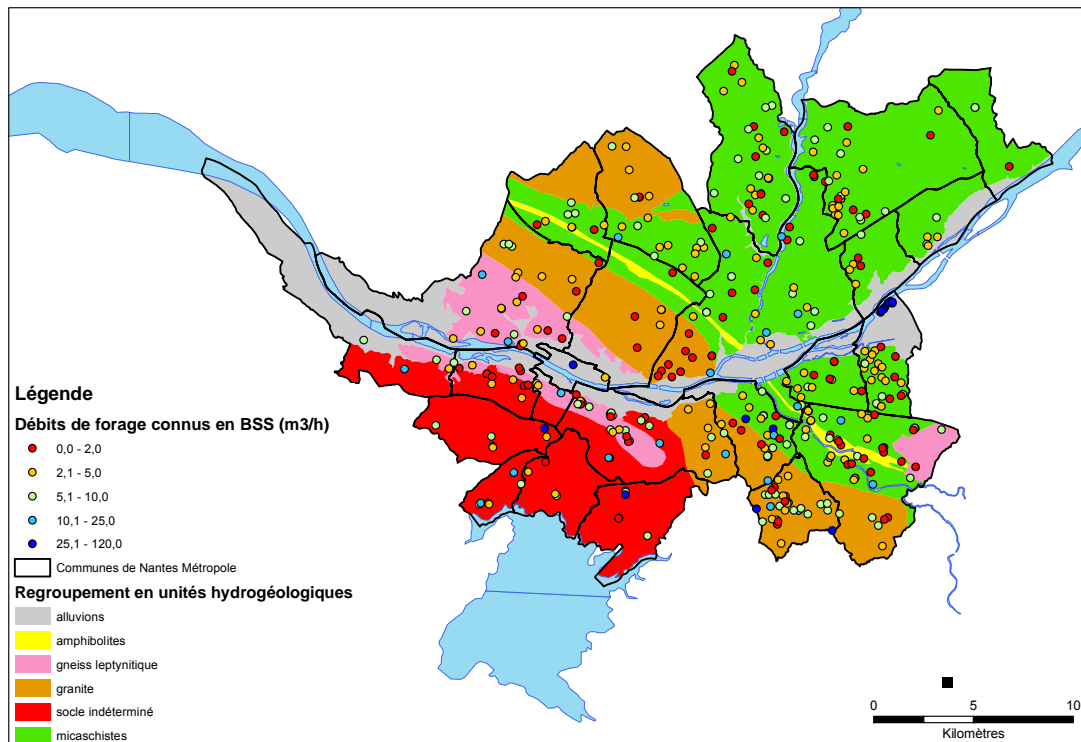


Figure 40 : Localisation des données de débits de forage recensées sur le territoire de Nantes Métropole

L'utilisation des valeurs de débits disponibles en BSS comporte un certain nombre de biais. En particulier et malgré les efforts consentis par chacun, il est probable qu'une quantité non négligeable de forages « secs » échappe à la connaissance, ce qui pourrait conduire à fournir une vision optimiste de la situation. De la même façon, le débit des forages n'est pas une valeur figée au cours du temps, le vieillissement des ouvrages induisant souvent une perte de débit. Enfin, le débit d'un forage peut être estimé de différentes manières (débit au soufflage, essai de pompage, estimation,...).

Si la Figure 40 laisse apparaître une disparité assez importante des débits de forage par unité hydrogéologique, le traitement statistique en page 103 montre la cohérence de ces unités (voir les valeurs atypiques).

Température de l'eau

On a vu au paragraphe 4.1.5 que la température des nappes libres pouvait être considérée comme identique sur l'ensemble du territoire de Nantes Métropole.

De fait, ce critère n'est pas discriminant à l'échelle du territoire : il n'est pas utilisé dans la cartographie du potentiel.

Physico-chimie de l'eau

Selon son profil physico-chimique, une eau souterraine est susceptible d'induire un vieillissement plus ou moins important des installations de pompage qui la captent.

Nous avons donc recherché dans la banque de données nationale ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines, <http://www.ades.eaufrance.fr/>) les données physico-chimiques relatives aux eaux souterraines qui sont disponibles sur le territoire de Nantes Métropole. Les captages pour lesquels des données sont disponibles sont cartographiés en Figure 41. On appelle ces captages des qualitomètres.

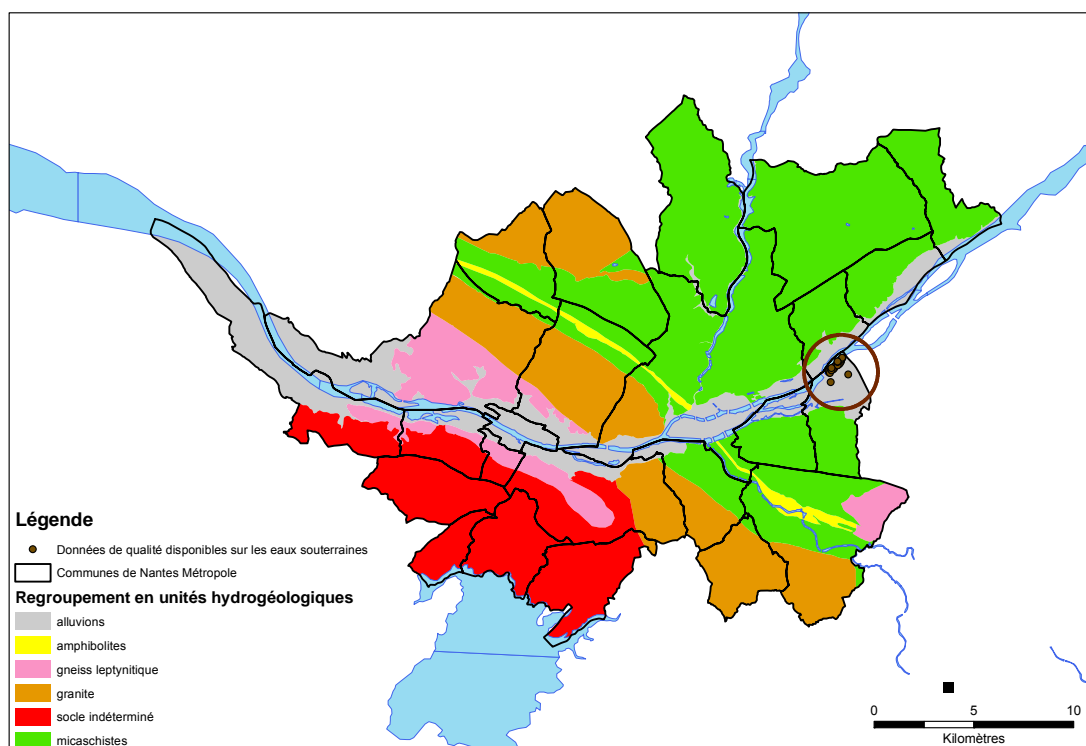


Figure 41 : Localisation des captages d'eau souterraine pour lesquels des données physico-chimiques sont disponibles (source : ADES)

70 qualitomètres sont recensés en Loire-Atlantique dans la banque ADES. Seuls 32 sont localisés sur le territoire de Nantes Métropole : ces 32 ouvrages sont tous situés dans le champ captant de Basse-Goulaine, qui alimente en eau potable la ville de Nantes.

Les données physico-chimiques sont donc insuffisantes et surtout insuffisamment réparties sur le territoire de Nantes Métropole pour envisager prendre en compte ce critère.

La géométrie des aquifères (présentée en 4.1.3) et leur productivité sont donc les deux critères qui sont utilisés pour cartographier le potentiel de géothermie très basse énergie avec pompage en nappe.

5.2.3. Evaluation de la productivité de l'aquifère

La productivité de l'aquifère est approchée, compte tenu des données disponibles, à partir des débits des forages dont la connaissance est disponible en BSS.

Identification de l'aquifère capté

L'aquifère capté par chaque ouvrage n'étant pas fourni en BSS, il a été identifié de la façon suivante.

Pour chaque forage dont le débit est connu, l'aquifère capté a été identifié à partir de la carte géologique simplifiée et du regroupement proposé en 4.1.3 lorsque la formation géologique identifiée par la carte simplifiée était une formation superficielle (limons, altérites, colluvions, alluvions...). Pour les forages situés en bordure des alluvions de la Loire (alluvions ou socle sous-jacents), l'identification de l'aquifère capté a été effectuée en croisant l'épaisseur connue pour les alluvions avec la profondeur de l'ouvrage.

4 valeurs de débit ont été écartées lors de cette étape, l'association à un aquifère donné n'étant pas réalisable. Ce sont donc 402 valeurs de débit qui ont été utilisées par la suite. Elles ont été regroupées dans un fichier Excel (cf. Figure 42).

	A	B	C	D	M	N	O
1	INDICE	DESIGNATION	NATURE	PROFONDEUR (m)	GEOLOGIE DETAILLEE	GEOLOGIE SIMPLIFIEE	DEBIT (m3/h)
2	04808X0039	F	FORAGE	-999	Réseau hydrologique	alluvions	8
3	04811X0037	F	FORAGE	46	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite, orienté	granite	6
4	04811X0038	F	FORAGE	49	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite, mylonitique	granite	8
5	04811X0042	F	FORAGE	43	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite, orienté	granite	5.4
6	04812X0007	F	FORAGE	76	Formation de Mauves-sur-Loire, micaschistes albitiques à biotite et muscovite	micaschistes	4
7	04812X0008	F	FORAGE	52	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	4.5
8	04812X0009	SF	SONDAGE	43	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	4.5
9	04812X0010	F	FORAGE	25	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite	granite	7
10	04812X0047	F	FORAGE	43	Formation de Mauves-sur-Loire, micaschistes albitiques à biotite et muscovite	micaschistes	5.5
11	04812X0048	GEO	FORAGE	84	Formation de Mauves-sur-Loire, micaschistes albitiques à biotite et muscovite	micaschistes	10
12	04812X0049	F	FORAGE	85	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite	granite	5
13	04812X0051	F	FORAGE	110	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	granite	9
14	04812X0052	F	FORAGE	80	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	14.4
15	04812X0053	F	FORAGE	49	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	granite	8
16	04812X0054	F	FORAGE	58	Formation de Mauves-sur-Loire, micaschistes albitiques à biotite et muscovite	micaschistes	7
17	04812X0055	F	FORAGE	40	Formation de Mauves-sur-Loire, micaschistes albitiques à biotite et muscovite	micaschistes	2.7
18	04812X0056	F	FORAGE	61	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	18
19	04812X0057	F	FORAGE	61	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	2.4
20	04812X0059	F	FORAGE	40	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite	granite	3
21	04812X0069	F	FORAGE	-999	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	2
22	04812X0073	F	FORAGE	82	Altérites argileuses indifférenciées, Paléocène supposé	micaschistes	1.3
23	04812X0078	F	FORAGE	50	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite	granite	2
24	04812X0080	F	FORAGE	28	Massif d'Orvault-Mortagne, granite à biotite et muscovite	granite	9

Figure 42 : Extrait du fichier de données de débit

Traitement statistique des données de débit

Un traitement statistique des données a été effectué par aquifère capté. Ce traitement a été réalisé à l'aide du logiciel XLSTAT. Les résultats obtenus figurent dans le Tableau 11 et sous forme de carte en annexe 19. Il est par ailleurs possible de se reporter à l'annexe 18 pour consulter quelques rappels de statistiques.

Le lecteur sera attentif au fait que les valeurs minimales et maximales fournies dans le Tableau 11 sont celles de l'échantillon (groupe de forages) et non pas celles de la formation aquifère.

Traitement statistique des débits de forage (exprimés en m ³ /h)							
Formation	Nbre Valeurs	1er quartile	Médiane	3ème quartile	Moy.	Valeurs atypiques	Remarques
Alluvions de la Loire	11	50,0	55,0	62,5	60,7	18,2%	9 sur 11 sont issues du champ captant de Basse-Goulaine : hétérogénéité
Amphibolites	15	2,0	3,0	5,3	3,7	0,0%	
Gneiss leptynitique	42	2,1	4,5	7,8	6,0	4,8%	
Granite	85	1,8	4,0	7,0	5,3	4,7%	
Micaschistes	221	2,0	4,0	6,0	4,9	2,7%	
Socle indéterminé	24	2,2	5,5	8,0	7,6	12,5%	Echantillon très hétérogène
Socle (tous)	391	2,0	4,0	7,0	5,2	2,3%	

Tableau 11 : Traitement statistique des débits de forages (les débits sont exprimés en m³/h).

En complément des données statistiques « brutes », une représentation sous forme de « boîtes à moustaches de Tukey » est proposée en Figure 43. Cette représentation permet de rendre compte de l'existence de valeurs atypiques (comptabilisées dans le Tableau 11), susceptibles notamment de fausser la représentativité d'une valeur moyenne. Le pourcentage de valeurs atypiques permet par ailleurs de critiquer l'homogénéité d'un échantillon de valeurs. La méthode dite des boîtes à moustache est décrite en annexe 18.

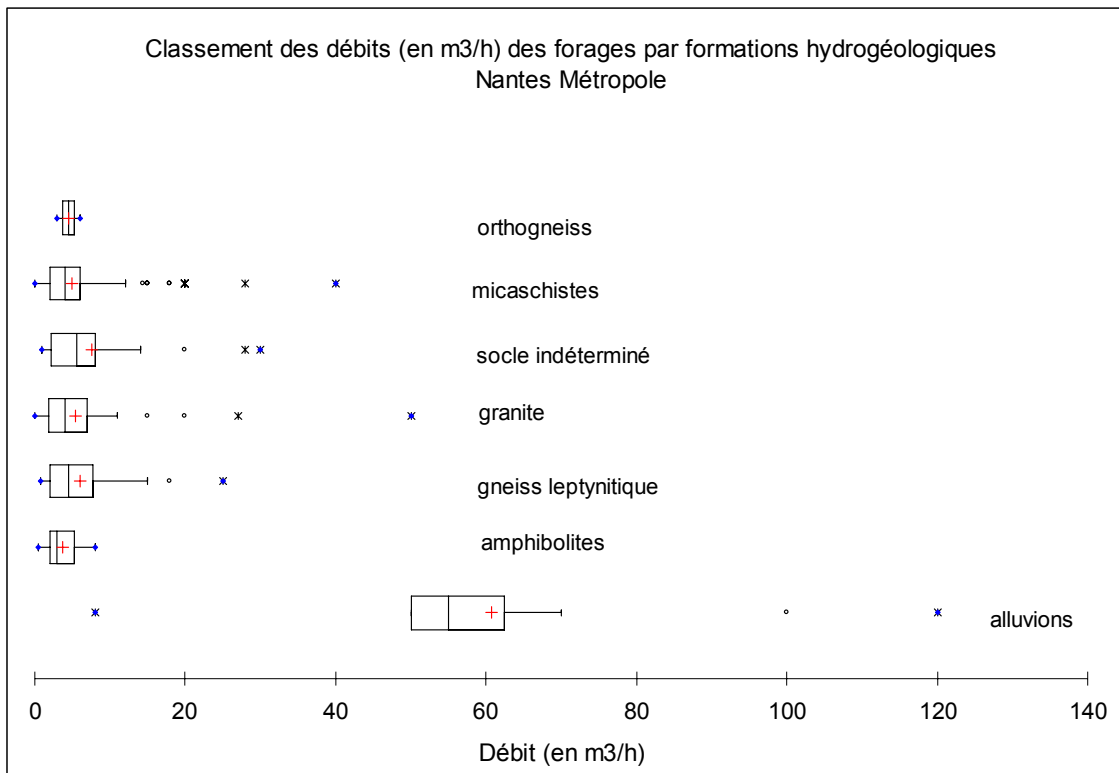


Figure 43 : Représentation des valeurs de débits sur l'ensemble des formations aquifères de Nantes Métropole : méthode des « boîtes à moustaches »

Sachant qu'un échantillon suivant parfaitement une loi normale de distribution aurait 0,7% de valeurs atypiques, on s'aperçoit que seuls deux échantillons présentent une forte hétérogénéité. Ce sont :

- les alluvions de la Loire, pour lesquels 9 des 11 valeurs connues sont concentrées dans le champ captant de Basse-Goulaine. Les résultats obtenus ne permettent donc pas de caractériser la situation réelle de l'aquifère mais une situation favorable (les études réalisées à l'amont de la réalisation du champ captant visant justement à optimiser son implantation en termes de quantité et de qualité). Il est vraisemblable, compte tenu de la nature hétérogène des alluvions, que la disparité en termes de potentiel soit élevée ;
- le socle indéterminé, pour lequel, par définition, la formation de socle captée par les ouvrages n'est pas connue. De nombreuses formations de socle sont présentes dans cette zone : micaschistes, granite, gneiss, amphibolites... Compte tenu de la méconnaissance actuelle de l'extension de ces formations dans cette zone, ce sont les valeurs obtenues sur l'ensemble des formations de socle qui seront utilisées.

Enfin, un échantillon (orthogneiss) est trop faible pour être représentatif. La zone correspondante est traitée de façon similaire à celle des gneiss leptynitiques.

De façon générale, les résultats montrent un décalage important entre les valeurs de débits obtenues pour les alluvions de la Loire et pour les aquifères de socle. L'existence d'un écart est conforme à ce qui est attendu selon la littérature. Par ailleurs, le résultat obtenu pour l'ensemble des formations de socle montre une assez forte homogénéité (2,3% de valeurs atypiques).

Néanmoins, dans le détail (cf. Figure 44) et sur la base du traitement statistique effectué, il est possible de proposer un premier classement des formations de socle sur le territoire de Nantes Métropole. On a ainsi, des valeurs de débits les plus faibles aux valeurs les plus fortes (classement selon les valeurs médianes et moyennes) :

- les amphibolites ;
- le granite, les micaschistes et de façon général le socle sur le territoire de Nantes Métropole ;
- les gneiss leptynitiques.

Ce classement est compatible avec les résultats obtenus au paragraphe 4.2.3, même si la pente obtenue pour les granites rapprochait d'avantage cette formation des amphibolites.

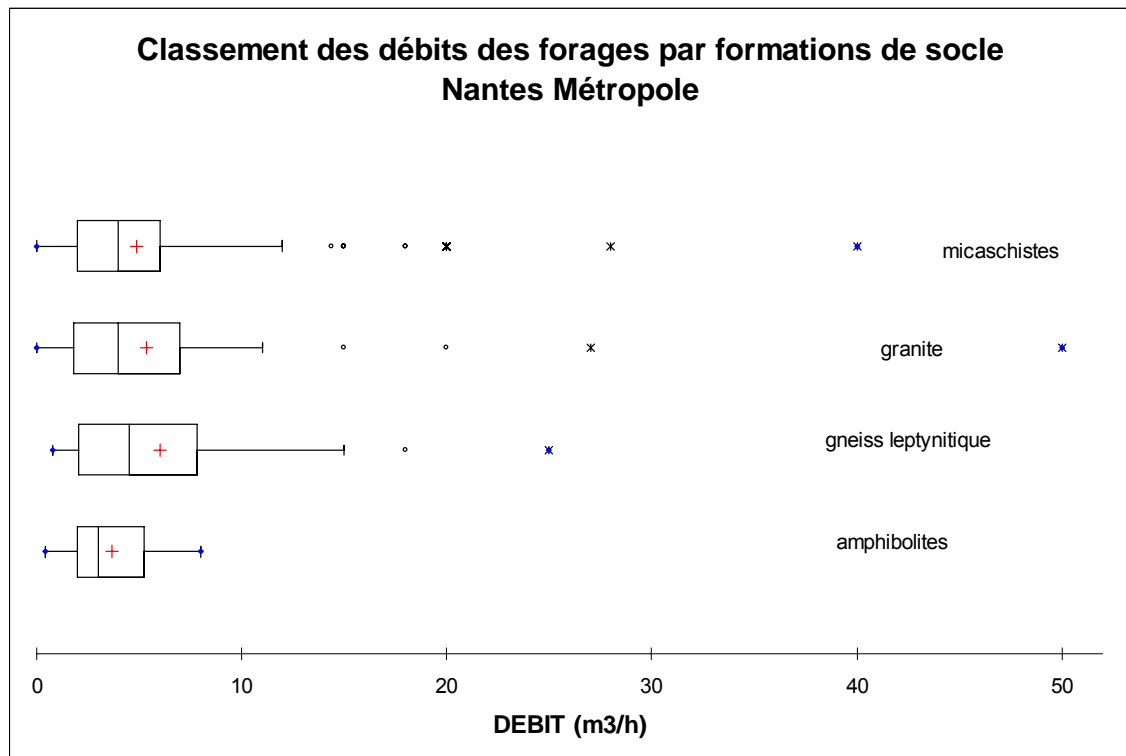


Figure 44 : Représentation des valeurs de débits sur les principales formations de socle de Nantes Métropole : méthode des « boîtes à moustaches »

5.2.4. Cartographie du potentiel

A partir des données statistiques obtenues pour les différents aquifères, le potentiel géothermique pour l'installation de pompes à chaleur avec pompage en nappe a été estimé sous la forme d'une puissance prélevée sur la ressource (Pev). Exprimée en kilowatts, elle est calculée à partir des débits (Q en m³/h), selon la formule suivante :

$$P_{ev} = \text{coefficient calorifique eau} * \text{débit (Q)} * (\Delta T \text{ échangeur})$$

$$P_{ev} \text{ (kW)} = 1,163 * Q \text{ (m}^3\text{/h)} * \Delta T \text{ (}^\circ\text{C)}$$

La température prélevée sur la ressource (ΔT en °C) est prise égale à 6°C.

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 12 et sous forme cartographique dans l'annexe 20. Pour cette annexe, les puissances soutirables à la ressource ont été calculées pour chaque forage où une donnée de débit était disponible.

Puissance prélevée par forage sur la ressource (en kW), calculée à partir des valeurs de débits						
Formation	Nbre Valeurs	1er quartile	Médiane	3ème quartile	Moy.	Remarques
Alluvions de la Loire	11	349	384	436	424	Résultat fortement influencé par le champ captant de Basse-Goulaine
Amphibolites	15	14	21	37	26	
Gneiss leptynitique	42	15	31	54	42	
Granite	85	13	28	49	37	
Micaschistes	221	14	28	42	34	
Socle (tous)	391	14	28	49	36	

Tableau 12 : Puissance prélevable par un forage sur la ressource par formations aquifères de Nantes Métropole (en kW)

Il convient à l'utilisateur de ces résultats de garder en mémoire qu'ils sont le fruit d'un travail statistique effectué sur les débits des forages, tels qu'ils sont connus en Banque du Sous-Sol. Il devra, dans ses décisions, prendre en compte le caractère discontinu des formations de socle, caractère qui est susceptible d'induire des écarts de productivité importants, même sur de petites distances.

D'autre part, et de même que pour les débits, les résultats obtenus pour les alluvions de la Loire donnent une vision favorable de la situation, qu'il convient impérativement de préciser localement avant toute implantation de projet de pompage en nappe.

5.2.5. Pistes d'amélioration

La cartographie du potentiel géothermique a été réalisée au meilleur des connaissances disponibles, à partir des données existantes. De fait, des acquisitions de données et la réalisation d'études complémentaires pourraient permettre d'améliorer la cartographie proposée.

Voici quelques pistes d'amélioration :

- cartographie géologique et lithologique en 3D des alluvions de la Loire, et dans une moindre mesure des alluvions de l'Erdre ;
- cartographie géologique du socle dans la partie sud-ouest du territoire de Nantes Métropole ;
- cartographie au 1/25000^{ème} de la géologie sur le territoire de Nantes Métropole ;
- acquisition de données piézométriques complémentaires pour comparer les résultats obtenus par l'approche débits et par l'approche liée à la régression linéaire sur la piézométrie ;
- préciser la lithologie et le débit des ouvrages d'exploitation des eaux souterraines situés sur le territoire de Nantes Métropole ;
- retour sur expérience des installations de géothermie avec pompages en nappe présentes sur le territoire de Nantes Métropole.

Enfin, l'imprégnation des sédiments alluviaux et la salinité de la nappe alluviale de la Loire sont méconnues, alors que les effets de la marée se font sentir jusqu'à Nantes. De fait, il est probable que l'on assiste à une augmentation de la conductivité électrique de l'eau en allant vers l'estuaire de la Loire. Une minéralisation plus élevée des eaux captées induisant généralement un vieillissement plus rapide des forages, une salinité plus importante de la nappe alluviale dans l'ouest du territoire de Nantes Métropole interviendrait comme un facteur pouvant dégrader le potentiel. Il serait donc intéressant d'améliorer la connaissance concernant la salinité des eaux contenues dans les alluvions de la Loire.

6. Synthèse et comparaison des techniques de géothermie très basse énergie potentiellement applicables sur le territoire de Nantes Métropole

Ce paragraphe a pour objectif de comparer cinq échangeurs thermiques souterrains exploitant l'énergie très basse température ($< 30^{\circ}$) du sous-sol ou des nappes, de présenter leurs avantages et leurs défauts pour permettre de guider le Maître d'ouvrage dans un choix approprié. Il s'agit des sondes géothermiques verticales, des champs de sondes, des capteurs horizontaux, des pieux énergétiques et des forages d'eau.

La comparaison se porte sur les paramètres suivants :

- **Les conditions d'implantation et implications respectives** : types de terrains (ou sols), espace demandé (milieu urbain), contraintes administratives et réglementaires, répercussions possibles sur l'environnement, type de forage ;
- **Les implications particulières de mise en œuvre (dimensionnement, réalisation) ;**
- **Entretien ;**
- **Le coût d'investissement pour le particulier.**

Il est choisi de porter la première comparaison entre la sonde géothermique et le forage d'eau; ces deux techniques faisant l'objet de la cartographie sur le territoire de Nantes Métropole. De plus, elles se prêtent bien à comparaison, car elles ont un rendement sensiblement comparable, impliquent un encombrement du terrain identique et sont bien adaptées pour l'individuel.

6.1. CHOIX ENTRE FORAGE D'EAU ET SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE

Le choix de la sonde ou du forage d'eau dépendra essentiellement du débit prévisible disponible, de la puissance totale soustraite aux terrains correspondant à la surface à chauffer et du coût d'investissement. La sonde est économiquement adaptée, pour l'individuel, à des puissances soustraites aux terrains < 10 kW. Les forages d'eau sont adaptés aux puissances supérieures (pour mémoire, un débit de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ fournit

une puissance calorifique de 100 kW, avec un delta T°C de 6°C⁹ et un COP¹⁰ de l'ordre de 3.0).

A titre indicatif, une puissance extraite à l'eau souterraine de 30 kW (qui correspond à une puissance calorifique de 45 kW, ce qui permet de chauffer une surface approximative de 450 m², en tenant compte d'un COP de l'ordre de 3) impliquerait, en termes de coûts d'investissement, pour un forage de prélèvement d'eau de 60 m (profondeur arbitraire, mais qui représente un ordre de grandeur cohérent dans les formations de socle) et un forage de réinjection de même profondeur, en considérant un coût moyen de 45 €/ml HT ¹¹ (forage tubé, gravillonné et cimenté, essai de pompage et d'absorption compris) + une pompe de 1500 € HT (soit un prix unitaire total de 58 €/ml HT forages et pompe comprise) un prix total de 6.9 k€. Pour la même puissance extraite avec une sonde géothermique verticale, en tenant compte d'une puissance linéaire de 45 W/m (qui correspond à la moyenne des médianes des formations de socle), il faudrait respectivement une longueur totale de 666 m, soit 6 forages de 100 m et un septième de 70 m. En prenant un coût moyen de 40 €/ml HT ¹² de sonde (forage au marteau fond de trou dans les formations du socle et sonde posée), cela représenterait un coût total de plus de 26 k€, soit près de 4 fois plus élevé.

A noter que la profondeur moyenne des sondes géothermiques en France est de 80 – 100 m. Il est cependant tout-à-fait possible de réaliser une sonde jusqu'à 300 m de profondeur (pour mémoire, une sonde géothermique de 700 m unitaire a été posée en Suisse).

En ce qui concerne le choix des terrains pour l'implantation de l'ouvrage, la sonde géothermique peut être implantée dans presque tous les types de terrains, contrairement au forage d'eau qui nécessite un aquifère productif. La productivité des aquifères sur le territoire de Nantes métropole est donnée par la carte des débits (cf. annexe 19), les alluvions représentant la formation la plus adaptée (par contre, la foration est plus coûteuse dans les alluvions). Des contre-indications peuvent cependant être formulées pour les sondes. C'est le cas de formations géologiques

⁹ Le delta T°C de 6°C pris en compte est une valeur indicative. La valeur réelle sera dimensionnée par le bureau d'étude, en fonction de la température de la nappe (température d'entrée dans la PAC en mode chauffage). Le delta T°C est généralement compris entre 3 et 8°C. Le facteur limitant étant la sécurité antigel de l'évaporateur de la pompe à chaleur.

¹⁰ On définit un coefficient de performance théorique (**COP**) qui est le rapport de la quantité d'énergie transmise à la source chaude (**Q2**) par la quantité d'énergie mécanique dépensée (**W**) donc :

$$\text{COP chaud} = Q2/W$$

Pour plus d'informations, cf. annexe 23

¹¹ Le coût du forage est donné à titre indicatif. Il dépend du type de terrains à forer. Pour le forage d'eau, il est de l'ordre de 40 – 60 €/ml HT dans les terrains compétents, type granite (marteau fond de trou) et de l'ordre de 80 – 150 €/ml HT dans les terrains meubles (forage au rotary ou tubage à l'avancement).

¹² Le coût du forage dépend du type de terrains à forer. Pour la sonde géothermique verticale, il est de l'ordre de 30 – 50 € HT/ml dans les terrains compétents, type granites (marteau fond de trou) et de l'ordre de 60 – 70 € HT/ml dans les terrains meubles (forage au rotary ou tubage à l'avancement).

particulières, tel le karst ou la craie, qui peuvent présenter des « vides » importants qui nuisent au transfert de chaleur ou à la cimentation (pertes de ciment). Cependant, ces formations ne sont pas présentes sur le territoire de Nantes Métropole.

Un avantage commun significatif, en comparaison avec d'autres techniques, est leur faible emprise sur le sol, ce qui permet de les envisager dans les milieux urbains (la réglementation devra toutefois être prise en compte). Contrairement aux capteurs horizontaux, la jouissance de l'utilisation du sol est très peu affectée par l'implantation d'une sonde verticale ou d'un forage d'eau. En revanche, un espace minimal entre les sondes devra être respecté. Selon la norme VDI allemande :

- 5 m entre les sondes pour des forages de 40 à 50 m de profondeur ;
- 6 m entre les sondes pour des forages > 50 m à 100 m de profondeur.

Le BRGM recommande, dans le cahier des charges de la démarche Engagement qualité des foreurs de sondes géothermiques, de respecter un espacement de **10 m**.

Quant au choix de l'implantation et à la certitude du résultat, les sondes géothermiques verticales garantissent une plus grande fiabilité, particulièrement dans des terrains qui présentent une incertitude sur le débit exploitable, ce qui peut être le cas sur le territoire de Nantes Métropole concernant les formations du socle, selon si l'on pompe dans un milieu plus ou moins fracturé. Il faut rappeler que dans le cadre de cette étude, les formations du socle ont été traitées comme un milieu continu. Si l'on compare, par exemple, la médiane moyenne des puissances totales soutirées par les forages d'eau dans les formations du socle (~27 kW) avec celle des sondes géothermiques verticales (~5 kW), on s'aperçoit qu'il y a un écart correspondant à un facteur 5 - 6. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'une puissance de 20 – 30 kW pour le forage d'eau implique un débit continu d'environ 4 - 5 m³/h, difficilement prévisible avec certitude. En revanche, une puissance totale de l'ordre de 4 - 5 kW peut quasiment être garantie pour une sonde de 100 m, si l'on considère la moyenne des premiers quartiles sur les formations du socle (4.5 kW). De plus, la discontinuité du milieu qui peut être défavorable aux écoulements souterrains, influence peu les puissances linéaires pour une sonde verticale.

Pour se prémunir des risques d'échec sur la diminution ou la détérioration de la ressource en cours d'exploitation, le Maître d'Ouvrage pourra avoir recours à la garantie Aquapac (voir annexe 21). Cette assurance couvre les coûts relatifs aux études préalables, forages, tests et analyses, équipement des puits. Le montant garanti est fixé par le contrat, déduction faite des subventions reçues. Cette garantie se limite aux installations de puissances supérieures à 30 kW, ainsi qu'aux aquifères situés en général à moins de 100 m de profondeur.

En ce qui concerne la maintenance, c'est la sonde géothermique verticale qui nécessite le moins d'entretien (purger le circuit d'eau glycolée selon les prescriptions de l'installateur en chauffage). Le forage d'eau, suivant la qualité physico-chimique de l'eau souterraine pompée, peut impliquer un nettoyage systématique : dessablage, décolmatage... De plus, un soin particulier devra être apporté à la pompe immergée qui ne devra, en aucun cas, pomper du sable ou être dessaturée. En revanche, un forage d'eau qui alimente une pompe à chaleur avec une eau de bonne qualité (sans sable ou

limons, sans précipitations ou colmatage de la crépine) n'engendre quasiment pas d'entretien.

Les principales contraintes administratives et réglementaires¹³ qui peuvent limiter la réalisation :

- D'une sonde géothermique sont :
 - Obligation de **déclaration** préalable imposée à tout maître d'ouvrage réalisant un forage dont la profondeur **dépasse 10 m**, quelle que soit sa destination.
 - **Demande d'autorisation** si La profondeur des forages est supérieure à 100 m ou/et si le prélèvement de chaleur souterraine a un débit calorifique supérieur à 200 thermies par heure (232.5 kW).
 - **Interdiction** de forer dans le périmètre rapproché d'un captage en eau potable.
- D'un forage d'eau :

On peut considérer qu'un forage d'eau pour alimenter une pompe à chaleur n'est pas considéré, au titre de la loi sur l'eau, comme étant un usage domestique, car il implique un volume annuel d'eau pompée supérieur à 1000 m³/an (voir Décret n°93-743 du 29 mars 1993 modifié, article 3). La rubrique 1.1.2.0 de l'annexe du décret n°93-743 modifié, qui concerne tous les prélèvements permanents ou temporaires issus d'un forage dans un système aquifère, à l'exclusion de nappes d'accompagnement de cours d'eau, fixe les seuils de déclaration ou d'autorisation en fonction du **volume total prélevé** :

1. Supérieur ou égal à 200'000 m³/an : demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau¹⁴ ;
2. Supérieur à 10'000 m³/an mais inférieur à 200'000 m³/an : déclaration au titre de la loi sur l'eau¹⁵.

Dans le cas du pompage et du rejet dans la même nappe des eaux prélevées pour la géothermie, la limite de déclaration est contrainte par le volume de rejet et est comprise entre 8 et 80 m³/h (voir décret 881 du 17 juillet 2006, rubrique 5.1.1.0).

En termes de répercussions sur l'environnement, la mise en activité d'une sonde géothermique verticale engendre peu de risques de pollution, étant donné que le liquide caloporteur circule en circuit fermé et n'a pas de contact direct avec la nappe souterraine ou les terrains. En cas de fuite, le liquide est de qualité alimentaire et biodégradable à 98 %. Les risques de pollutions peuvent avoir lieu lors du forage, étant donné qu'il permet le contact direct entre la surface et le sous-sol.

En conclusion, pour guider le Maître d'Ouvrage dans son choix, on pourra lui proposer de s'orienter, pour le cas du particulier, vers la sonde géothermique

¹³ Pour de plus amples informations, se reporter à la réglementation en vigueur.

¹⁴ Ce qui reviendrait, pour une durée de fonctionnement de la PAC de l'ordre de 2200 h (voir postulats page 89) à un volume prélevé par heure de fonctionnement de la PAC supérieur à 90 m³

¹⁵ Ce qui reviendrait, pour une durée de fonctionnement de la PAC de 2200 h (voir postulats page 89) à un volume prélevé par heure de fonctionnement de la PAC supérieur à 4.5 m³, mais inférieur à 90 m³.

verticale, pour des puissances inférieures à 10 kW, si le forage d'eau n'est économiquement pas compétitif (profondeur à forer trop importante pour trouver le débit nécessaire) ou pour un maximum de sécurité. Pour le cas du collectif et Tertiaire qui nécessitent des puissances à chauffer plus importantes, le forage d'eau sera privilégié. On pourra également proposer la variante du forage d'eau qui sera transformé en sonde géothermique verticale si le débit nécessaire n'est pas disponible.

6.2. LES CAPTEURS HORIZONTAUX

Le choix de l'implantation d'un capteur horizontal dépendra principalement de deux paramètres :

- Présence d'un sol meuble, d'une épaisseur minimum de 1 à 1.5 m ;
- Espace disponible, environ deux fois la surface à chauffer.

A titre indicatif, un pré dimensionnement du capteur pourra être réalisé en tenant compte du type de sol, du diamètre du tube et de l'espacement entre les tubes. Le tableau suivant permet de dimensionner la puissance d'extraction unitaire par mètre linéaire de tube, à partir d'une puissance d'extraction unitaire par m² de sol et en tenant compte des paramètres susmentionnés :

	mini	maxi
	W/m ²	W/m ²
Sol sableux sec	10	15
Sol sableux humide	15	20
Sol argileux sec	20	25
Sol argileux humide	25	30
Sol aquifère	30	35

Longueur maxi d'une boucle (m) :	100
----------------------------------	-----

Tableau 13 : Puissance d'extraction des capteurs horizontaux par m² de sol

Diamètre du PE	espacement en m	m tubes/m ²	Puissance d'extraction en W/m ² du sol					
			10	15	20	25	30	35
16x20	0.30 - 0.35	3	3.3	5.0	6.7	8.3	10.0	11.7
19x25	0.45 - 0.50	2.2	4.6	6.8	9.1	11.4	13.6	15.9
26x32	0.60 - 0.75	1.7	6.0	9.0	12.0	15.0	18.1	21.1

Tableau 14 : Puissance d'extraction (W/m) par ml de tube (Source : documentation fournisseurs de capteurs)

La puissance exploitable par mètre linéaire de capteur est de l'ordre de 3 à 20 W/ml de capteur, selon le type de sol et la teneur en eau.

Comparativement, une surface à chauffer de 100 m² (puissance soutirée aux terrains de l'ordre de 5 kW) nécessite approximativement :

- Capteur horizontal : 250 m (20 W/m) à 1670 m (3 W/m) de longueur de capteurs ;
- Sonde géothermique verticale : 100 m (50 W/m) à 125 m (40 W/m) de longueur de sonde ;
- Forage d'eau : un débit de 0,6 m³/h, soit 10 l/min (avec un delta T°C de 6°C).

Ces chiffres sont donnés à titre indicatifs. Ils mettent en évidence que la sonde géothermique est 2,5 fois (fourchette haute) à 13 fois (fourchette basse) plus performante en terme de longueur de capteur. La profondeur du forage d'eau dépendra en revanche de la profondeur de la ressource en eau souterraine.

Pour mettre en œuvre un capteur horizontal, il faudra en outre prendre en considération les paramètres suivants :

- Epaisseur du sol : le capteur doit être enterré à minimum 0,6 m de profondeur (1.5 m recommandé), pour éviter de pénaliser son rendement en hiver. En absence d'antigel dans le liquide caloporteur, il faudra garantir une profondeur qui maintienne le capteur hors gel. En présence d'antigel, le liquide caloporteur n'a en revanche pas de risques de geler. Un taux de 25 % de mono-propylène glycol assure par exemple un point de congélation au-dessous de -10°C, de 33 % au-dessous de -17°C. Il faut également que le sol ne présente pas de difficulté pour le décapage sur la zone envisagée et que l'on aie donc pas de la roche dure près de la surface ;
- Nature du sous-sol : il faudra prendre des précautions sur la présence d'argiles gonflantes. Il est cependant difficile de juger des répercussions effectives (arrachement de collecteurs...) ;

- Racines d'arbres : le sol devra être dépourvu d'arbres et autres végétaux sur la parcelle et aux abords du capteur, pour éviter son endommagement par les racines ;
- Jouissance de la parcelle : il faudra aménager la parcelle de façon à ne pas risquer d'écraser les capteurs par le poids des véhicules.

Le coût d'investissement pour l'installation d'un capteur horizontal est de l'ordre de 85 à 135 € par m² TTC. Il est difficile de l'estimer précisément, car il dépendra essentiellement du coût du décapage, en fonction de la nature du sol.

A titre indicatif, pour une surface à chauffer de 100 m², soit une puissance totale soustraite aux terrains de l'ordre de 5 kW, le coût d'investissement total en k€ TTC pour le forage d'eau et la sonde géothermique verticale est de 4 à 6 k€ Il est en revanche de 8 à 14 k€ pour le capteur horizontal (voir Tableau 14) :

Type d'échangeur	Surface à chauffer (m ²)	Puissance soutirée aux terrains (kW)	Puissance unitaire par ml considérée (W/ml)	Longueur de capteur considérée (m)	Ratio utilisé pour le calcul du coût (€/ml)	Coût d'investissement total (k€ TTC)	Terrains considérés
Capteurs horizontaux	100	5	15	300 m	28 - 45 (€/ml)	8.5 - 13.5	Sol meuble épaisseur > 1 m
Sonde géothermique verticale	100	5	50	100 m	45 - 60 (€/ml)	4.5 - 6.0	Granites (forage au marteau fond de trou)
Forage d'eau	100	5	85 ¹⁶	60 m forage prélèvement + 60 m forage réinjection	60 - 80 ¹⁷ (€/ml)	7.0 - 9.5	Granites (forage au marteau fond de trou)

Tableau 15 : Calcul du coût d'investissement pour une surface à chauffer de 100 m², à partir du ratio qui tient compte de la réalisation du forage (marteau fond de trou), de la mise en œuvre et de l'équipement de l'échangeur thermique souterrain

¹⁶ Ce chiffre correspond à la puissance à soutirer à la nappe (5 kW) divisée par la profondeur à forer pour le forage de prélèvement (ici fixée arbitrairement à 60 m) pour obtenir le débit nécessaire à la production de 5 kw avec un delta T°C de 6°C

¹⁷ Ce ratio tient compte de la pompe de production, de la réalisation du forage de prélèvement et du forage de réinjection

6.3. LE CHAMP DE SONDES

La notion du champ de sonde est définie par un ensemble de sondes géothermiques verticales raccordées en série ou en parallèle, qui sont mises en œuvre selon les mêmes méthodes que la sonde géothermique verticale (mise en place de la boucle, cimentation ...), mais qui nécessite un dimensionnement spécifique.

La géométrie du champ de sonde peut être multiple : en L, en carré, en diagonale... Le nombre de sondes dépendra de la puissance installée. Le dimensionnement est un élément clé, car il permet de trouver l'optimum "profondeur des sondes – rendement – investissement". Il doit être réalisé par un bureau d'étude spécialisé, à travers des simulations numériques qui prennent en compte notamment les paramètres suivants :

- Climat et température de l'air ;
- Conductivité thermique et capacité calorifique des terrains ;
- Configuration du champ de sonde : nombre de sondes, espacement, géométrie ;
- Nature des composants : type de tube PEHD, conductivité thermique du ciment, type de liquide caloporteur, % d'antigel ;
- Débit du liquide caloporteur ;
- Besoins énergétiques annuels et mensuels ;
- Puissance de la pompe à chaleur installée fréquence de fonctionnement...

Afin de vérifier le dimensionnement in-situ, il est recommandé de réaliser un test de réponse thermique sur les premières sondes réalisées. Ce test permettra de calculer la conductivité thermique du sous-sol et de corriger, si nécessaire, les paramètres simulés.

A titre indicatif, un dimensionnement qui induirait par exemple un raccourcissement de la profondeur des sondes de 10 % (par exemple en remplissant l'espace annulaire avec du ciment particulièrement conducteur) sur un champ de 30 sondes aurait pour conséquence une économie significative sur les coûts de forage (~12 000 € pour une sonde de 90 m au lieu de 100 m, en tenant compte d'un prix unitaire de 40 €/ml de forage), ainsi que sur le coût du mètre de boucle et du volume de ciment.

Le champ de sonde est adapté aux projets de moyenne à grande envergure (tertiaire, collectif, immeubles...). Il implique un coût d'investissement qui prendra en compte une étude thermique (simulation), le test de réponse thermique (~7000 €), les tranchées de raccordements hydrauliques entre les sondes. Raccorder un champ de sondes nécessite une conception du réseau et un équilibrage des pressions et des débits qui ne sont pas comparables aux prestations réalisées pour une installation de particulier (deux à trois sondes).

Il est à souligner que la cartographie du potentiel géothermique donne des puissances linéaires qui sont adaptées pour les sondes verticales unitaires et non pour des

champs de sondes. La puissance linéaire devra donc être corrigée pour dimensionner un champ de sondes.

6.4. LES PIEUX ENERGETIQUES.

Les pieux énergétiques ou géostructures énergétiques sont en fait des pieux géotechniques équipés de tubes PEHD, identiques à ceux des sondes géothermiques.

La prise en compte des principaux critères qui permettent l'identification et la sélection de zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques donne au promoteur et au concepteur de projet une première indication sur la faisabilité du projet.

Critères	Paramètres à déterminer
Critères conditionnant la réalisation de géostructures	<ul style="list-style-type: none"> - Genre de construction - Caractéristiques mécaniques du sol (résistance à la compression simple, angle de frottement interne et cohésion,...)
Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques de l'aquifère (profondeur, épaisseur, gradient et vitesse d'écoulement) - Caractéristiques thermiques du sous-sol (conductibilité thermique et capacité thermique volumique)
Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques	<ul style="list-style-type: none"> - Eventualité de courts-circuits entre aquifères, de contamination de l'aquifère ou de formation d'un barrage hydraulique. - Emplacement du site vis-à-vis des secteurs de protection des eaux, ainsi que des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines. - Evaluation de la perturbation thermique.

Tableau 16 : Paramètres permettant de répondre aux critères d'identification et de sélection des zones potentielles pour l'implantation de pieux énergétiques

Une zone favorable à l'implantation de géostructures énergétiques est caractérisée par des terrains dont les caractéristiques mécaniques montrent une faible portance sur une épaisseur de plus de 5 à 8 m depuis la surface. Les zones de remblais sont à considérer avec prudence et à traiter cas par cas, en raison de leur hétérogénéité locale (présence possible de vides, instabilité structurelle et composition variable). Les

terrains cibles sont les sables, argiles, limons, marnes, graviers¹⁸. Les profondeurs cibles sont situées entre 20 et 30 m.

C'est pourquoi, même si, sur le territoire de Nantes Métropole, les zones potentielles pour l'implantation de pieux énergétiques n'ont pas fait l'objet d'une cartographie spécifique, elles peuvent quand même être définies globalement par la formation géologique des alluvions. Leur implantation ne devra toutefois en aucun cas s'affranchir d'une étude de faisabilité locale.

Pour les principales installations de pieux échangeurs en Suisse par exemple, la conductibilité thermique des sols est de l'ordre de 2,0 [W/mK] et la capacité thermique volumique de 2,35 [MJ/m³K] environ (Fromentin et al., 1997). Ce sont de bonnes valeurs pour ces paramètres. En tous les cas, la conductibilité thermique du sol devrait être d'au moins 1,3 [W/mK] et si possible supérieure à 1,8 [W/mK] pour un bon fonctionnement d'un système avec géostructures énergétiques. La présence d'eau souterraine est aussi fortement souhaitée. Il est par contre interdit de réaliser des géostructures énergétiques dans les zones de protection rapprochées de captages en eau potable. Tout risque de court-circuit entre aquifères et de contamination depuis la surface, lors de la construction ou par une fuite de liquides caloporteurs doit être réduit au maximum. Enfin, il faut éviter la création d'un barrage hydraulique et limiter les vibrations et le bruit lors de la construction.

¹⁸ Les terrains mentionnés sont caractérisés par une portance qui nécessite, selon l'ouvrage, la réalisation de pieux énergétiques. La conductibilité thermique des argiles ou limons n'étant pas excellent, la longueur et le nombre de tubes PEHD devront être dimensionnés en conséquence.

7. Conclusions

L'évaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole a été réalisée sur la base des données existantes, notamment celles issues de la Banque du Sous-Sol.

Cette évaluation a été effectuée sur une base cartographique pour les sondes verticales et pour les pompages en nappe. Ces cartographies ont nécessité un important travail d'identification, de collecte et de traitement des données disponibles. Celles-ci ont été rassemblées dans une base de données pour être ensuite utilisées sous SIG.

Des données ont du être élaborées lors de l'étude, comme par exemple une carte géologique simplifiée ou une première approche d'un niveau moyen de la nappe à l'échelle du territoire de Nantes Métropole.

Pour les sondes verticales comme pour les pompages en nappe, une approche statistique par unité fonctionnelle a été adoptée. Les cartographies proposées et présentées dans le rapport fournissent donc une vision probabiliste de la potentialité géothermique des roches exploitable par des ouvrages. Dans l'utilisation de ces cartes, le décideur devra prendre en compte le caractère fortement discontinu des roches majoritairement en présence sur le territoire de Nantes Métropole.

Une meilleure connaissance de la géologie et de l'hydrogéologie du territoire permettrait sans doute d'améliorer les cartographies proposées. On gardera par exemple en mémoire que la physico-chimie de l'eau souterraine (température mise à part) n'a pas pu être utilisée pour l'évaluation du potentiel « pompages en nappe ».

Les potentiels géothermiques présentés pour d'autres techniques – les champs de sonde, les pieux énergétiques et les sondes horizontales – ont été décrits et comparés entre eux et avec les deux techniques précédentes dans le corps du rapport. Ces éléments permettront aux décideurs de s'orienter – à l'échelle du territoire – vers la technique la plus adaptée. Une étude de faisabilité sera bien entendu à conduire avant la réalisation des travaux.

En sus de ces éléments, un descriptif du fonctionnement des différents process géothermiques a été rédigé. Il est complété par des fiches de synthèse présentant les différentes techniques de géothermie très basse énergie décrites dans le corps du rapport.

Enfin, les informations disponibles auprès des partenaires de cette étude (Nantes Métropole, ADEME et BRGM) et relatives aux ouvrages de géothermie réalisés sur le territoire de Nantes Métropole ont été intégrées dans le corps du rapport et en annexe.

Résumé des principaux résultats sur la cartographie du potentiel très basse énergie pour les sondes géothermiques verticales :

Pour rappel, les éléments d'évaluation du potentiel ont été réunis à partir des données de 173 forages situés sur le territoire de Nantes métropole. Sur ces ouvrages, une conductivité thermique moyenne a été calculée, à partir de la nature des différentes lithologies. Cependant, il convient de prendre en compte que l'état de saturation en eau souterraine des terrains a un impact notable sur cette conductivité. Les calculs ont donc été réalisés successivement sous trois hypothèses : terrains secs (cas défavorable), terrains totalement saturés (cas favorable), moyenne terrains secs et saturés (cas intermédiaire).

En prenant comme référence l'hypothèse intermédiaire, (moyenne des terrains secs et saturés), **36 % des forages présentent une puissance linéaire comprise entre 40 et 55 W/m, et 42 % supérieure à 55 W/m, ce qui permet de mettre en évidence des zones favorables à la réalisation de sondes.**

L'impact de la saturation en eau a été mis en évidence, avec un gain de 15% de conductivité sur plus de 75% des forages. Le cas des alluvions est à distinguer particulièrement :

- dans ces terrains, l'impact de la saturation en eau peu induire plus d'un doublement de la puissance d'extraction ;
- en présence d'un écoulement souterrain significatif, on peut s'attendre à une augmentation de la puissance d'extraction de l'ordre de 50 % par rapport à la valeur maximale normale.

Les valeurs ci-dessous traduisent cette caractéristique :

- Puissance d'extraction dans les alluvions sèches : < 20 W/m
- Puissance d'extraction dans les alluvions saturées : 55 – 65 W/m
- Puissance d'extraction dans les alluvions en présence d'un écoulement significatif : 80 – 100 W/m.

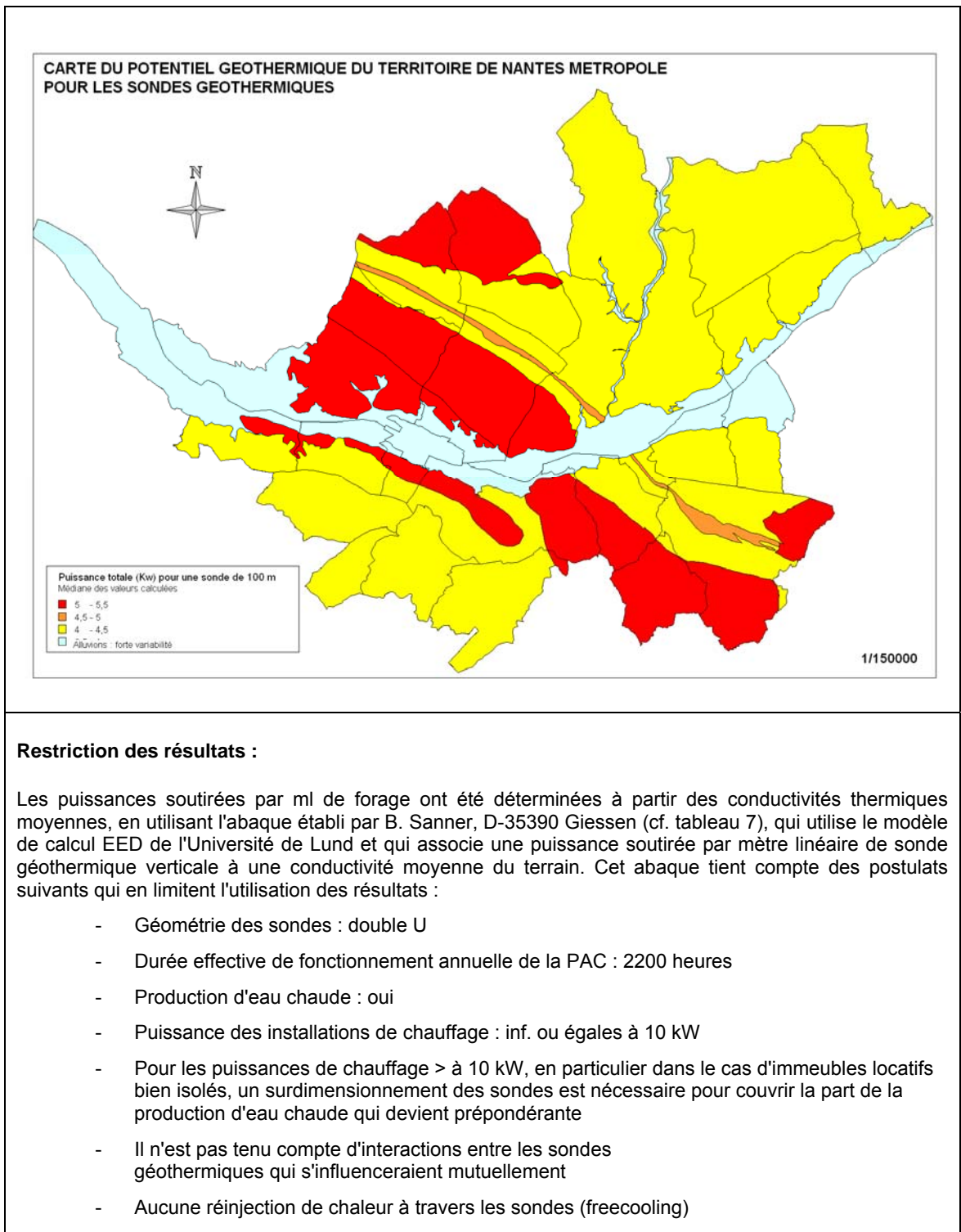


Figure 45 : Carte du potentiel géothermique sur le territoire de Nantes métropole. Puissance total (kW) pour une sonde géothermique de 100 m.

La traduction cartographique de ces éléments est la suivante :

4. Les zones les plus favorables pour la réalisation de sondes sont celles des granites et des gneiss qui forment sur le territoire de Nantes Métropole un ensemble orienté WNW-ESE (en rouge sur la carte) : dans ces zones, la médiane de la puissance totale pour une sonde de 100 m se situe entre 5 et 5,5 kW, soit 20 % au-dessus du reste du territoire.
5. Sur le reste de l'agglomération de Nantes, (parties SW et NE du territoire de Nantes Métropole), on peut s'attendre à une conductivité moindre ; médiane de la puissance totale pour une sonde de 100 m entre 4 et 4,5 kW, excepté dans l'étroit sillon d'amphibolite (en orange sur la carte) où elle doit être un peu meilleure.
6. Dans les alluvions, une grande variabilité des données est attendue, en fonction de la saturation en eau des terrains et de l'écoulement de la nappe. Dans ces zones, cet impact devra être pris en compte au cas par cas, dans le cadre d'une étude de faisabilité pour le dimensionnement des sondes. Par ailleurs, d'un point de vue économique, on peut s'attendre à ce que le coût du forage soit supérieur la tenue des terrains.

Résumé des principaux résultats sur la cartographie du potentiel très basse énergie pour les pompages en nappe :

Le potentiel a été caractérisé de façon statistique à partir des données disponibles, notamment en Banque du Sous-Sol. Il s'est appuyé sur :

- la délimitation géographique des formations de socle et des alluvions présentant une extension importante et un intérêt d'un point de vue hydrogéologique (alluvions de la Loire) ;
- la capacité d'ouvrages souterrains (puits, forages) à capter l'eau souterraine. Ceci s'est traduit par l'utilisation d'un échantillon de 402 valeurs de débit répartis sur le territoire de Nantes Métropole.

On notera en particulier que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (hormis la température) n'ont pas pu être prises en compte dans l'évaluation du potentiel.

La cartographie proposée pour le potentiel (cf. annexe 20 et Figure 46 dans une version simplifiée) présente un découpage de Nantes Métropole en 6 zones. Ces zones correspondent à des formations géologiques distinctes.

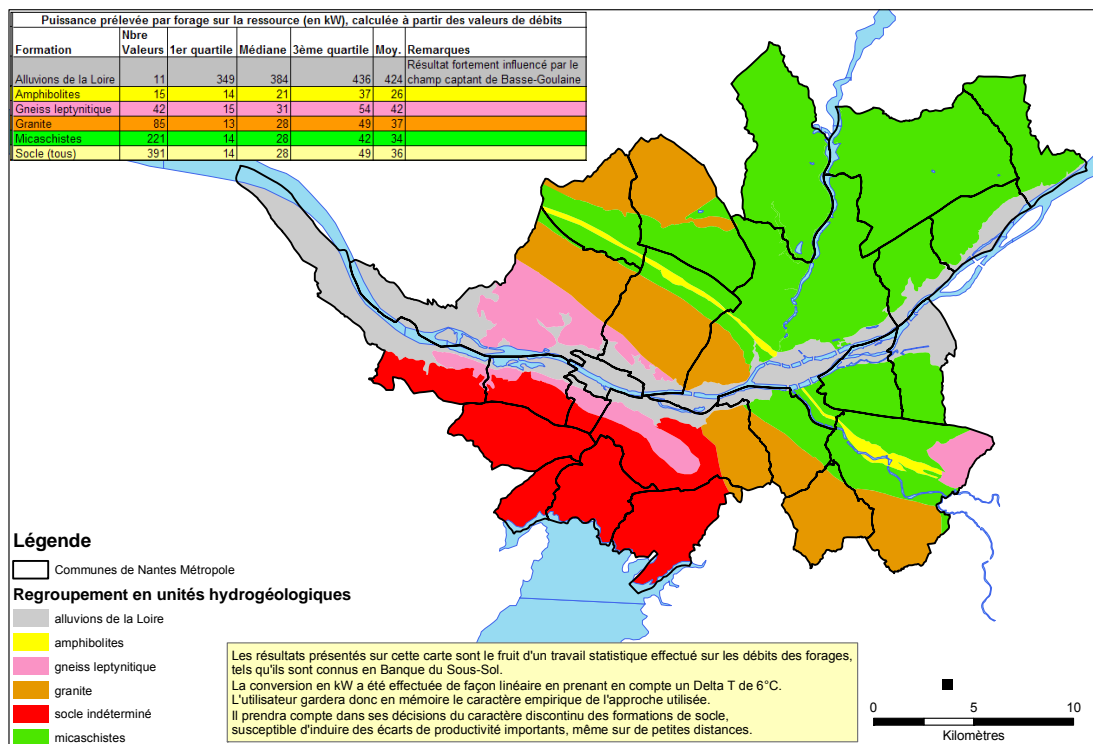


Figure 46 : Puissance potentiellement soutirable à la ressource par pompage en nappe (en kW – les valeurs à prendre en compte pour le socle indéterminé sont celles de la formation intitulée « Socle (tous) » dans le tableau)

Il convient à l'utilisateur de cette cartographie de garder en mémoire qu'elle est le fruit d'un travail statistique effectué sur les débits des forages, tels qu'ils sont connus en Banque du Sous-Sol. Il devra, dans ses décisions, prendre en compte le caractère discontinu des formations de socle, caractère qui est susceptible d'inclure des écarts de productivité importants, même sur de petites distances.

Deux éléments ressortent principalement de cette cartographie :

- A l'exception des alluvions et de formations superficielles, le territoire de Nantes Métropole est constitué de formations de socle. Il est caractérisé par des puissances prélevables médianes de l'ordre de 20 à 30 kW, ce qui est relativement faible pour de la géothermie effectuée à partir d'un pompage en nappe. Les données présentent par ailleurs dans la zone de socle une relative homogénéité.
- Les données disponibles pour les alluvions de la Loire indiquent des puissances prélevables environ dix fois supérieures. Il est à noter cependant que la valeur statistique de ces données est fortement impactée par les valeurs des forages du champ captant de Basse-Goulaine (9 valeurs sur 11 disponibles pour les alluvions de la Loire). Les résultats obtenus sont donc biaisés par

rapport à la situation réelle de l'aquifère. Il est vraisemblable, compte tenu de la nature hétérogène des alluvions, que la disparité en termes de potentiel soit élevée. Plus encore qu'en zone de socle, **il est impératif en zone alluviale de conduire une étude de faisabilité détaillée, portant notamment sur la productivité de l'aquifère et la salinité de la nappe qu'il contient.** C'est néanmoins dans la zone alluviale que le potentiel géothermique par pompage en nappe paraît le plus favorable.

8. Bibliographie

Rapports consultés

Ghyselinck-Bardeau M., Wuilleumier A. (2007) – Outil d'aide à la décision en matière de géothermie très basse à basse énergie (nappes alluviales et thermalisme) dans la région Midi-Pyrénées – Rapport final –. Rapport BRGM/RP-55888, 307 pages, 59 ill., 33 annexes.

Petit V., Lachassagne P., Arnaud L., Coueffé R, Tourlière B. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet relatif aux aquifères de socle. Rapport BRGM/RP-55671-FR, 78 pages, 33 Figures, 2 annexes.

Petit V., Lachassagne P., Rouxel E., Baudouin V., Lereculey A. (2007) – Détermination de contextes favorables à la présence de ressources en eau souterraine de moyenne profondeur en domaine de socle, Département de Loire-Atlantique. Rapport final - BRGM/RP-55585-FR, 71 pages, 35 Figures, 2 Annexes.

Courtois N., Marchal JP., Menjoz A., Monnot P., Noël Y., Petit V., Thiéry D., Grisey A. (Ctifl), Grassely D. (Ctifl), (2007) – Application du stockage thermique en aquifère au chauffage et au refroidissement de serres maraîchères en France : étude de préfaisabilité. Rapport BRGM/RP-55481-FR, 288 pages, 94 ill., 8 annexes.

Martin J.-C., Bacquet I., Tourlière B., Gomez E., Gateau C. (2006) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région centre. Rapport final. Rapport BRGM/RP-55088-FR, 60 pages, 25 fig., 9 tableaux, 1 annexe.

Martin J.-C., Bacquet I., Tourlière B. (2006) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région centre. Géométrie et niveaux piézométriques des principales formations aquifères. Rapport intermédiaire n°2b. BRGM/RP-54715-FR, 73 pages, 36 ill., 4 annexes.

Mougin B. et Conil P. avec la collaboration de Blanchin R., Jégou J-P., Thomas E. et Gauvrit P. (2005) - Profondeur des eaux souterraines sur le périmètre intérieur au périphérique nantais - Rapport final - BRGM/RP-53917-FR - 29 pages, 1 tableau, 11 fig., 4 pl., 2 annexes.

Courtois N., Lachassagne P., Weng Ph., Theveniaut H., Wyns R., Joseph B., Laporte P. (2003). Détermination de secteurs favorables pour la recherche d'eau souterraine à Cacao (Guyane). Rapport final.-Communauté de Commune du Centre Littoral. Rapport BRGM N°RP-52758-FR. 39 pages, 4 figures, 4 cartes, 3 Tableaux.

Courtois N., avec la collaboration de Béchenec F. (1999) - Ressources en eaux souterraines en zone de socle de la Vendée - Aspects quantitatifs. Rapport BRGM/RR-40830-FR, 145 pages.

SIA (1988): Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température, Documentation D 025; Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich

Carte géologiques consultées

Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 451 Nort-sur-Erdre

Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 480 Paimboeuf

Carte géologique détaillée de la France à 1/50 000, feuille [481] Nantes

Carte géologique détaillée de la France à 1/50 000, feuille [482] Vallet

Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille 508 St-Philbert-de-Grand-Lieu

Publications

Acworth, R. I. (1987) - "The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment." *Q. J. Eng. Geol.* **20**: 265-272.

Cho M., Choi Y.S., Ha K.K.C., Kee W.S., Lachassagne P., Wyns R. (2003) - Paleoweathering covers in korean hard rocks : a methodology for mapping their spatial distribution and the thickness of their constituting horizons. Applications to identify brittle deformation and to hard rock hydrogeology, *Korean institute of geoscience and mining bulletin*, **6**, 2, 12-25

Davis, S. N. and L. J. Turk (1964) - "Optimum depth of wells in crystalline rocks." *Groundwater* **2**, (2), 6-11

Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. & Morath M. (1997) - Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; Rapport final, Programme de recherche : géothermie, Office fédéral de 'Energie (OFEN), Lausanne

Fromentin A., Pahud D., Laloui L. & Moreni M. (1999): Pieux échangeurs: conception et règles de pré-dimensionnement ; *Revue française de génie civil* n°6/1 999, vol. 3, pp. 387-421

Lachassagne P., Bérard P., Bruel T., Chéry L., Coutand T., Desprats J.F., Le Strat P., Wyns R. (2001) - Exploitation of high-yield in hard-rock aquifers. Downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones., *Ground Water*, **39**, 4, 568-581

Sanner, B., G. Hellström, J. Spitler and S. Gehlin (2005) Thermal response test — current status and world-wide application. Proc WGC2005, CD, p1-9

Thiry M., Quesnel F., Yans J., Wyns R., Vergari A., Théveniaut H., Simon-Coincon, R.; Ricordel C., Moreau M.G., Giot D., Dupuis C., Bruxelles L., Barbarand J., Baele J.M. (2006) - Continental France and Belgium during the Early Cretaceous; paleoweatherings and paleolandforms. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol.177, no.3, pp.155-175.

Wright, E. P. (1992) - The hydrogeology of crystalline basement aquifers in *Hydrogeology of Crystalline Basement Aquifers in Africa*. E. P. a. B. Wright, E.G., *Geological Society Special Publication*, London. **66**, 1-27

Wyns R., (1991) - L'utilisation des paléosurfaces continentales en cartographie thématique probabiliste. *Géologie de la France*, **3**, 3-9, 3 fig

Wyns R., Gourry J.C., Baltassat J.M., Lebert F. (1999) - Caractérisation multi-paramètres des horizons de subsurface (0-100m) en contexte de socle altéré. in *GEOFCAN 1997 - Colloque géophysique des sols et des formations superficielles - Orstom – Bondy, France, 11-12/09/1997*, Actes du colloque, 139-142

Wyns R. (2003) – Fissuration profonde induite par l'altération : processus d'acquisition et répartition 3D des propriétés physiques des profils d'altération. In *9^{ème} Congrès Français de Sédimentologie, Bordeaux, France, 14-16 octobre 2003 : Livre des Résumés, Publ. ASF, Paris*, 38, 529-530.

Wyns R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J. (2004) – Application of Magnetic Resonance Soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). *Bull. Soc. Géol. France*, (175), 1, 21-3

Annexe 1

Liste des ouvrages géothermiques connus en Banque du Sous-Sol

Ouvrages de géothermie connus en BSS (extraction : juillet 2007)

Index BSS	Désignation	Déclaration	X_L2E	Y_L2E	Commune	Lieu dit	Nature de l'ouvrage	Prof. Atteinte (en m)
04518X0146	F		308570	2268090	CHAPELLE-SUR-ERDRE(LA)	LE BAS JAILLE	SONDE-GEOTHERMIQUE	60
04808X0038	FGEO	9594	285877	2252986	PELLERIN(LE)	53 ROUTE DU PE DE BUZAY	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04812X0007	F		300340	2259690	ORVAULT	1 AVE DE LA GREE	FORAGE	76
04812X0048	GEO		299834	2259298	ORVAULT	LOT DU PONT MARCHAND	SONDE-GEOTHERMIQUE	84
04812X0058	FGEO1	9388	296870	2258839	SAUTRON	RUE DES IRIS	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04812X0060	FGEO1	9587	299519	2260750	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUCET	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04812X0063	FGEO2	9388	296875	2258839	SAUTRON	RUE DES IRIS	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04812X0064	FGEO2	9587	299529	2260750	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUCET	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04812X0065	FGEO3	9587	299539	2260750	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUCET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04812X0066	FGEO4	9587	299509	2260750	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUCET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04812X0067	FGEO5	9587	299490	2260750	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUCET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04812X0068	FGEO6	9587	299519	2260760	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUCET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04813X0258	GEO1		306393	2261671	CHAPELLE-SUR-ERDRE(LA)	26 RUE DE LA HAIE	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04813X0259	GEO2		306412	2261684	CHAPELLE-SUR-ERDRE(LA)	26 RUE DE LA HAIE	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04813X0305	GEO		304494.3	2263928.1	CHAPELLE-SUR-ERDRE(LA)	La Maissonneuve	SONDE-GEOTHERMIQUE	90
04813X0306	GEO		307189.1	2284012	CHAPELLE-SUR-ERDRE(LA)	15 Avenue de l'Orangerie	SONDE-GEOTHERMIQUE	120
04814X0019	F		308660	2261760	NANTES	56 CH GUI BLINIÈRE GACHET	FORAGE	100
04814X0200	F		311025	2258860	SAINTE-LUCE-SUR-LOIRE	10 rue des lavandès	SONDE-GEOTHERMIQUE	116
04814X0202	GEO	11852	310966	2259793	CARQUEFOU	4, Rue des Lilas	SONDE-GEOTHERMIQUE	61
04814X0212	GEO	12232	307443	2259244	NANTES	22 rue du Port des Charettes	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04814X0215	GEO	14658	313288	2259121	THOUARE-SUR-LOIRE	29, Rue de la Rousselière	SONDE-GEOTHERMIQUE	64
04815X0125	F2		292580	2248200	BRAINS	LE PLESSIS	FORAGE	61
04815X0141	FGEO1	9372	290128	2255548	COUERON	LA BOURDINIÈRE	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04815X0144	FGEO2	9372	290138	2255548	COUERON	LA BOURDINIÈRE	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04815X0156	GEO		292929	2256221	COUERON	L'erdrière	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04815X0157	GEO	14544	292824	2252297	SAINTE-JEAN-DE-BOISEAU	Le Château du Pé	SONDE-GEOTHERMIQUE	82
04816X0386	F	17086	298582	2248954	BOUGUENAIS	2 BIS RUE DE LA MATRASSERIE	SONDE-GEOTHERMIQUE	99
04816X0387	GEO	17129	297838	2257330	COUERON	BRIMBERNE	SONDE-GEOTHERMIQUE	121
04816X0413	GEO		295717	2250672	MONTAGNE(LA)	33 route du petit bois	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04816X0426	GEO		298891	2255792	SAINTE-HERBLAIN		SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04817X0996	F		302080	2257200	ORVAULT	UU AVE DES GOBELINS	FORAGE	51
04817X1002	F		305720	2254900	NANTES	10 PL WALDECK-ROUSSEAU	FORAGE	52
04817X1395	F1	16605	303278	2254993	NANTES	RUE MORINET	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
04817X1396	F2	16605	303273	2254977	NANTES	RUE MORINET	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
04817X1397	GEO1	16144	304518	2256763	NANTES	18 CHEMIN JOSEPH PIERRE	SONDE-GEOTHERMIQUE	99
04817X1398	GEO2	16144	304538	2256759	NANTES	18 CHEMIN JOSEPH PIERRE	SONDE-GEOTHERMIQUE	99
04817X1408	GEO1		303543	2252793	NANTES	41 BD SAINT AIGNAN	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04817X1409	GEO2		303548	2252797	NANTES	41 BD SAINT AIGNAN	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04817X1429	GEO1		306122	2249801	REZE	5 CHEMIN DE L'ANGLE	SONDE-GEOTHERMIQUE	55
04817X1430	GEO2		306139	2249806	REZE	5 CHEMIN DE L'ANGLE	SONDE-GEOTHERMIQUE	45
04817X1668	GEO		306359	2249997	REZE	10 Avenue du Chêne Gala	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04818X0453	F		308260	2249100	VERTOU	LA ROUSSELIÈRE	FORAGE	60
04818X0550	GEO	16147	309452	2247689	VERTOU	4 IMPASSE DU QUEBEC	SONDE-GEOTHERMIQUE	96
04818X0591	GEO		309509	2247781	VERTOU	LA CHINTIÈRE	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04818X0595	GEO1		312114	2248183	VERTOU	LA MORTALIÈRE	SONDE-GEOTHERMIQUE	50

Ouvrages de géothermie connus en BSS (extraction : juillet 2007)

Index BSS	Désignation	Déclaration	X_L2E	Y_L2E	Commune	Lieu dit	Nature de l'ouvrage	Prof. Atteinte (en m)
04818X0596	GEO2		312092	2248164	VERTOU	LA MORTALIERE	SONDE-GEOTHERMIQUE	50
04818X0600	GEO1		309670	2252491	SAINT-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	HAMEAU DE LA DOITEE	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04818X0601	GEO2		309673	2252516	SAINT-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	HAMEAU DE LA DOITEE	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
04818X0607	FGE01	7769	309887	2248789	VERTOU	121 ROUTE DU VIGNOBLE	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
04818X0608	FGE02	7769	309887	2248789	VERTOU	121 ROUTE DU VIGNOBLE	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
04818X0609	FGE01	8118	307102	2248419	REZE	79 RUE DE LA CORAU	SONDE-GEOTHERMIQUE	50
04818X0610	FGE02	8118	307100	2248419	REZE	79 RUE DE LA CORAU	SONDE-GEOTHERMIQUE	50
04818X0611	FGE03	8118	307105	2248419	REZE	79 RUE DE LA CORAU	SONDE-GEOTHERMIQUE	55
04818X0612	FGE04	8118	307102	2248425	REZE	79 RUE DE LA CORAU	SONDE-GEOTHERMIQUE	55
04818X0614	FGE01	10534	308984	2250615	SANT-HERBLAIN	63 RUE LARGEAU	SONDE-GEOTHERMIQUE	55
04818X0615	FGE02	10534	308995	2250615	SANT-HERBLAIN	63 RUE LARGEAU	SONDE-GEOTHERMIQUE	46
04818X0626	GEO		311688	2252030	BASSE-GOULAIN	Rue g sond	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04818X0990	GEO		312023	2253239	BASSE-GOULAIN	33 Rue du Gignon	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
04818X1042	F		307670	2252905	NANTES	Hôtel de région	FORAGE	29.5
04821X0127	GEO		318449	2262260	MAUVES-SUR-LOIRE	LA FONTAINE BRUNO	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
04821X0133	FGE0	8459	314831	2258747	THOUARE-SUR-LOIRE	LA CHAINE	SONDE-GEOTHERMIQUE	inconnue
05081X0076	F	16640	291230	2245450	SAINT-LEGER-LES-VIGNES	RUE DU MOULIN	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
05081X0078	GEO		292328	2245432	SAINT-LEGER-LES-VIGNES	12 RUE DE PORNIC	SONDE-GEOTHERMIQUE	90
05082X0104	FGE01	9578	298294	2245764	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	ZAC LE BOIS CHOLET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
05082X0107	FGE02	9578	298284	2245764	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	ZAC LE BOIS CHOLET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
05082X0108	FGE03	9578	298304	2245764	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	ZAC LE BOIS CHOLET	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
05082X0159	GEO	12254	293624	2246949	SAINT-LEGER-LES-VIGNES	46 rue de la Minoterie	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
05083X0075	F	17128	306536	2246054	SORINIERES(LES)	10 RUE DU GENERAL DE GAULLE	SONDE-GEOTHERMIQUE	70
05083X0170	GEO		301014	2244590	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	16. Route du Pré Maison	SONDE-GEOTHERMIQUE	76
05084X0109	GEO		311611	2246347	VERTOU	DOMAINE DE LA BOUTIERE	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
05084X0110	GEO1		310720	2246673	VERTOU	CHEMIN DES HAIES	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
05084X0111	GEO2		310718	2246651	VERTOU	CHEMIN DES HAIES	SONDE-GEOTHERMIQUE	80
05084X0112	GEO		307215	2245489	SORINIERES(LES)	25 RUE DU CHAMP FLEURI	SONDE-GEOTHERMIQUE	120
05084X0121	GEO		307439	2245375	SORINIERES(LES)		SONDE-GEOTHERMIQUE	100
05084X0129	FGE0	9617	309329	2245396	SORINIERES(LES)	15 RUE DE LA GRAND MAISON	SONDE-GEOTHERMIQUE	inconnue
05084X0132	GEO		311481	2245522	VERTOU	Rte des peyers	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
05084X0135	GEO		311610	2246340	VERTOU	12 ALLE DES ARPENTS	SONDE-GEOTHERMIQUE	100
05084X0174	GEO	14573	308373	2245025	SORINIERES(LES)	La Bessière	SONDE-GEOTHERMIQUE	67

Annexe 2

Liste des déclarations de projet géothermiques reçues au BRGM (2001/ Août 2007)

Déclarations d'intention de projets géothermiques transmises au BRGM (à août 2007)

Déclaration	Commune d'implantation	Lieu dit	X L2E	Y L2E	Date de travaux
6448	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	RUE DE LA BOUILLONNIERE "MOULINE"			01/05/2001
6449	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	18 LA ROAUDIERE			01/05/2001
6558	NANTES	18 CHEMIN JOSEPH PIERRE	304538	2256759	
6561	VERTOU	4 IMP DU QUEBEC			
6834	THOUARE-SUR-LOIRE	LOT N°7, LOTISSEMENT DE LA SAULZAIE			01/09/2001
6836	CARQUEFOU	LA PINTINIERE			01/10/2001
6899	BRAINS	5 CHEMIN DE L'ANGLE, LA GAUTRONNIERE	306139	2249806	01/08/2001
7009	NANTES	RUE MORISSET	303273	2254977	23/04/2001
7043	SAINT-LEGER-LES-VIGNES	RUE DU MOULIN	291230	2245450	
7110	REZE	26 AVENUE CHENE CARA			01/02/2002
7353	SAUTRON	LA GADEBOISERIE			01/06/2002
7441	SAINT-LEGER-LES-VIGNES	12 RUE DE PORNIC	292328	2245432	01/03/2002
7522	LES SORINIERES	10 RUE DU GENERAL DE GAULLE	306536	2246054	03/06/2002
7523	COUERON	M. DRUART	297838	2257330	10/06/2002
7584	CARQUEFOU	LA BURTIERE			01/10/2002
7735	VERTOU	LA MORTALIERE	312092	2248164	12/11/2002
7746	SAUTRON	LOT DES MUGUETS			01/10/2002
7767	NANTES	41 BD SAINT AIGNAN	303548	2252797	01/09/2002
7769	VERTOU	121 ROUTE DU VIGNOBLE	309887	2248789	01/09/2002
7826	BASSE-GOULAIN	36 RUE DU HAMELIN			
8113	BASSE-GOULAIN	RUE DE LA JARNIGARNIERE			01/07/2003
8118	REZE	79 RUE DE LA CORAU	307102	2248419	01/07/2003
8163	SAUTRON	LOT DU MAGUET			01/04/2003
8344	MAUVES-SUR-LOIRE	BELLEVUE			01/06/2003
8429	NANTES	24 RUE DE LA FONTAINE CORON			
8430	CARQUEFOU	24 AVENUE CLIO			
8431	CARQUEFOU	8 RUE SANTOS DUMONT			
8456	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	2 CHEMIN DE LA GAGNERIE	304886	2267084	
8459	THOUARE-SUR-LOIRE	LA CHAINE	314831	2258747	
8516	SAINT-LEGER-LES-VIGNES				
8602	LES SORINIERES	25 RUE DU CHAMP FLEURI	307215	2245489	10/01/2003
8672	SAINTE-HERBLAIN	ZAC DE LA GAGNERIE DES PLUCHETS LOT 52 3 RUE H. TOCHE			01/09/2003
8685	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	26 RUE DE LA HAIE	306412	2261684	01/09/2003
8706	MAUVES-SUR-LOIRE	LA FONTAINE BRUNO	318449	2262280	01/10/2003
8857	VERTOU	DOMAINE DE LA BOUTIERE	311611	2246347	03/04/2003
8896	LES SORINIERES	25 AVENUE DU CHAMP FLEURI			10/01/2003
8925	ORVAULT	LOT DU PONT MARCHAND	299834	2259298	25/06/2003
8962	VERTOU	CHEMIN DES HAIES	310718	2248651	31/07/2003
9217	CARQUEFOU	14 CHEMIN DES HERBIERS			01/04/2004
9263	COUERON	RUE DU STADE, LA CHABOSSIERE			01/03/2004
9372	COUERON	LA BOURDINIERE	290128	2255548	01/06/2004
9388	SAUTRON	RUE DES IRIS	296870	2258839	01/03/2004

Déclarations d'intention de projets géothermiques transmises au BRGM (à août 2007)

Déclaration	Commune d'implantation	Lieu dit	X_L2E	Y_L2E	Date de travaux
9578	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	ZAC LE BOIS CHOLET	298294	2245764	01/07/2004
9587	ORVAULT	20 TER CHEMIN DE DOUGET	299519	2260750	01/08/2004
9594	LE PELLERIN	53 ROUTE DU PE DE BUZAY	285877	2252986	01/07/2004
9917	LES SORINIÈRES	15 RUE DE LA GRAND MAISON	309329	2246396	30/11/2003
10096	NANTES	43-45 RUE DU BELLAUTON			14/10/2004
10151	VERTOU	LA GRASSINIÈRE	308690	2247780	15/12/2004
10389	CARQUEFOU	LA PINTINIÈRE	312130	2262845	01/12/2004
10534	SAINT-HERBLAIN	63 RUE LARGEAU	308984	2250615	01/01/2005
10806	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	LA HAL BRANDIÈRE	300250	2243250	01/04/2005
10823	LES SORINIÈRES	LE CHAMP FLEURY	307606	2245195	15/04/2005
10842	NANTES	LE FORT - SAINT JOSEPH DE LA PORTERIE	307557	2259029	23/05/2005
10956	ORVAULT	6 RUE DES ANANANTES			30/09/2004
11278	BRAINS	15 RUE CLAIRE FONTAINE	291357	2249248	01/09/2005
11356	LA MONTAGNE	35 RUE JEAN MERMOZ	295208	2250357	15/06/2005
11389	REZE	117 VUE	305894	2248302	31/07/2005
11555	VERTOU	52 BIS RUE DU MORTIER VANNERIE	309567	2249663	15/07/2005
11830	SAINT-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	RUE MARIE CURIE	310594	2250325	01/10/2005
11836	VERTOU	44 RUE DE LA FONTENELLE	308901	2249594	01/09/2005
12136	REZE	4 RUE JEAN VIGAMS	306434	2250266	
12170	SAUTRON	6 ALLÉE DU BOIS	295637	2259609	01/12/2005
12209	NANTES	13 RUE SALONIQUE	303526	2256339	30/11/2005
12232	NANTES	22 RUE DU PORT DES CHARENTES	307435	2259249	01/10/2005
12254	BOUAYE	LOT DE LA CHAUSSERIE, 46 RUE DE LA MINOTERIE, SAINT LEGER LES VIGNEUX	293622	2246935	28/09/2005
12261	NANTES	2 RUE DU MONT SAINT JOSEPH DE PORTERIE	307565	2256888	01/12/2005
12291	NANTES	73 RUE GALLILEE	302975	2252740	01/12/2005
12370	BASSE-GOULAINE	29 AVENUE CHATELIER - LE HAMELIN 2	311487	2252578	01/12/2005
12418	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	LA MOULINE	306474	2265413	15/01/2006
12669	BASSE-GOULAINE	31 RUE DES VALLEES	312350	2254640	01/02/2006
12702	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	10 BIS RUE DE MAZAIRE	305259	2262125	14/02/2006
12740	SAINT-HERBLAIN	18 IMPASSE DE CERETS	302523	2256038	16/02/2006
12742	COUERON	LA BRIMBERNE	297996	2257522	16/02/2006
12747	SAINT-HERBLAIN	9 RUE ADENAEUR	298770	2253090	16/02/2006
12754	NANTES	AVENUE PETIT CLOS	303648	2255607	01/03/2006
12797	CARQUEFOU	11 CHEMIN DE L'OUICHE CORMIER	309373	2261877	01/09/2006
12799	SAINT-HERBLAIN	1 RUE THEOPHILE GUILLOU	297918	2253578	01/09/2006
12809	VERTOU	L'ANGEBARDIÈRE	308918	2248315	01/09/2006
12815	VERTOU	49 RUE DU CLOS DES VIGNES	308758	2247685	01/04/2006
12907	SAINT-AIGNAN-GRANDLIEU	16 ROUTE DU PRE DE LA MAISON	301229	2244880	01/09/2006
12960	ORVAULT	GAGNE	300000	2261477	01/07/2006
12969	BOUAYE	LES MARES	295236	2247373	01/09/2006
12979	ORVAULT		299759	2259149	25/05/2006
12987	VERTOU	RUE ROBERT MAUKEL	311168	2247257	01/05/2006

Déclarations d'intention de projets géothermiques transmises au BRGM (à août 2007)

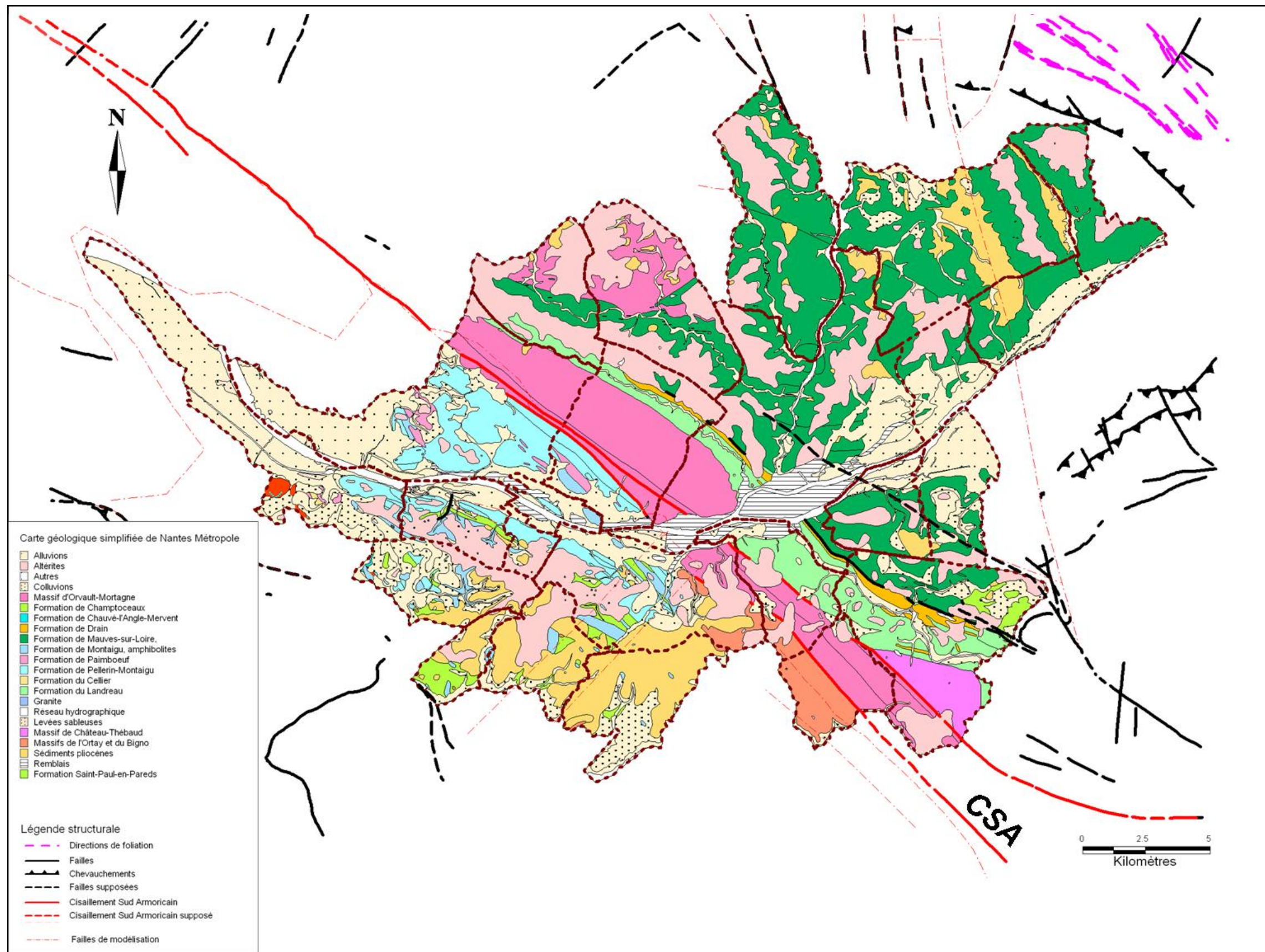
Déclaration	Commune d'implantation	Lieu dit	X L2E	Y L2E	Date de travaux
12988	VERTOU	GRANDS NOELLES	309128	2247554	01/05/2006
12989	BASSE-GOULAIN	LES CHAMPS MENARDS	312326	2251477	01/05/2006
12994	VERTOU		311185	2247241	01/06/2006
13037	BOUGUENAIS	RUE DES ECOLES	302437	2249767	01/06/2006
13038	SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	18 RUE DU VIEUX FOUR	293963	2251168	01/06/2006
13041	BASSE-GOULAIN	RUE DU CORVELEAU	312311	2252740	01/06/2006
13047	NANTES	26 PETITE AVENUE DE LONGCHAMP	303596	2256036	01/06/2006
13055	NANTES	56 RUE GUIBLINIÈRE	308740	2261800	20/06/2006
13056	NANTES	21 RUE DES MARAICHERS	307556	2256119	01/06/2006
13071	SAINT-JEAN-DE-BOISEAU		292414	2251898	01/04/2006
13733	BOUYE	LOTISSEMENT "LE BOIS DE LA NOE"	295898	2245661	15/08/2006
13736	BASSE-GOULAIN	LE PARC DES ONCHERES	311992	2251527	15/07/2006
13738	NANTES	35 RUE DE L'OUEST			01/12/2006
13740	NANTES	ROUTE LOUIS BRISSET	302466.54	2255012.08	01/09/2006
13745	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE	10 ALLEE DU PROU	306366	2261780	01/08/2006
13765	SAUTRON	13 RUE DE BELLEVUE	296680	2259593	14/08/2006
13847	NANTES	26 PETITE AVENUE DE LONGCHAMP	303576	2256030	01/10/2006
13920	COUJON	RUE DES PLEDORS	292035	2254050	19/09/2006
13921	COUJON	ROUTE DE LA GUERINIÈRE	297871	2257622	19/09/2006
13930	NANTES	24 RUE DU FORT	307526	2258870	19/09/2006
13931	NANTES	103 ROUTE DE VERTOU	307134	2250291	18/09/2006
13982	NANTES	RUE CONAN MERIADEC	305610	2252465	22/11/2005
14072	MAUVES-SUR-LOIRE		318466	2262880	01/09/2006
14080	BASSE-GOULAIN	147 RUE DE LA CASSARDIERE	312564	2250183	01/10/2006
14081	SAINTE-LEGER-LES-VIGNES	9 RUE DE CORBON	293756	2245823	01/10/2006
14321	COUJON		290810	2253809	01/11/2006
14332	NANTES	BD JEAN XXIII	304032	2255230	01/11/2006
14340	ORVAULT	50 CHEMIN DU DOUCET	299430	2260920	01/02/2007
14445	ORVAULT	69 AVENUE DE LA PRAUDIERE	303361	2257821	01/10/2006
14448	SAINTE-HERBLAIN		298891	2255792	11/12/2006
14456	SAINTE-LUCE-SUR-LOIRE	32 TER RUE DU BUISSON	311289	2258074	01/01/2007
14460	VERTOU	LES GRANDES NOELLES	309343	2247401	01/01/2006
14472	ORVAULT	21 RUE DE LA PAIX	302755	2257875	01/03/2007
14520	SAINTE-AIGNAN-GRANDLIEU	ROUTE HALBRAUDIERE	300151	2242935	01/02/2007
14544	SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	LE CHATEAU DE PE	292824	2252297	05/12/2007
14558	THOUARE-SUR-LOIRE	29 RUE DE LA ROUSSELLIERE	313288	2259121	14/11/2006
14573	LES SORINIÈRES	LA BESSIERE	308373	2245025	16/10/2006
14597	NANTES	RUE DE L'OLIVERAIE	307013	2250139	15/02/2007
14668	VERTOU	ZAC DE LA GRANDE NOELLE	310387	2247786	01/03/2007
14693	CARQUEFOU	2 IMPASSE DES ABEILLES	309596	2260220	28/02/2007
14721	CARQUEFOU	5 RUE DU MELPOMENE	309775	2260211	01/03/2007
14780	VERTOU		310979	2248161	31/03/2007

Déclarations d'intention de projets géothermiques transmises au BRGM (à août 2007)

Déclaration	Commune d'implantation	Lieu dit	X_L2E	Y_L2E	Date de travaux
14781	VERTOU		313187	2248427	31/03/2007
14782	VERTOU		308460	2250035	31/03/2007
14784	SAINTE-AIGNAN-GRANDLIEU		298605	2244030	31/03/2007
14856	MAUVES-SUR-LOIRE				01/12/2006
14859	SAINT-JEAN-DE-BOISEAU	42 RUE DE LA BELLE ETOILE	294755	2250610	23/04/2007
14923	NANTES	17 RUE DE LA PETITE BARATTE	307840	2257356	16/04/2007
14952	BASSE-GOULAIN	71 RUE DU BOIS BRULE	313088	2249850	01/09/2007
14977	SAINTE-HERBLAIN	LA NIVELLIERE	298001	2255005	30/05/2007
14980	ORVAULT	11 RUE PICHET	302418	2257103	30/05/2007
15006	THOUARE-SUR-LOIRE	54 RUE DES CHALONGES	315003	2260250	31/07/2007
15111	SAINTE-SEBASTIEN-SUR-LOIRE	28 ROUTE DE CLISSON	309532	2250298	01/06/2007
15112	BASSE-GOULAIN	LA RAVELONNIERE	313000	2252550	30/06/2007
15334	LA CHAPELLE-SUR-ERDRE		307040	2260650	01/08/2007
15356	SAUTRON	CHEMIN DES MARES	294424	2261281	25/06/2007
15365	VERTOU	RESIDENCE DE LA LANDE GUINGAND	309274	2246840	18/06/2007
15403	BASSE-GOULAIN	93 RUE DES ONCHERES	311586	2251550	18/07/2007
15453	VERTOU		312163	2248600	01/08/2007
15455	MAUVES-SUR-LOIRE		316304	2264852	01/08/2007
15475	BOUAYE				09/07/2007
15503	NANTES	13 PETITE RUE DE LONGCHAMPS			

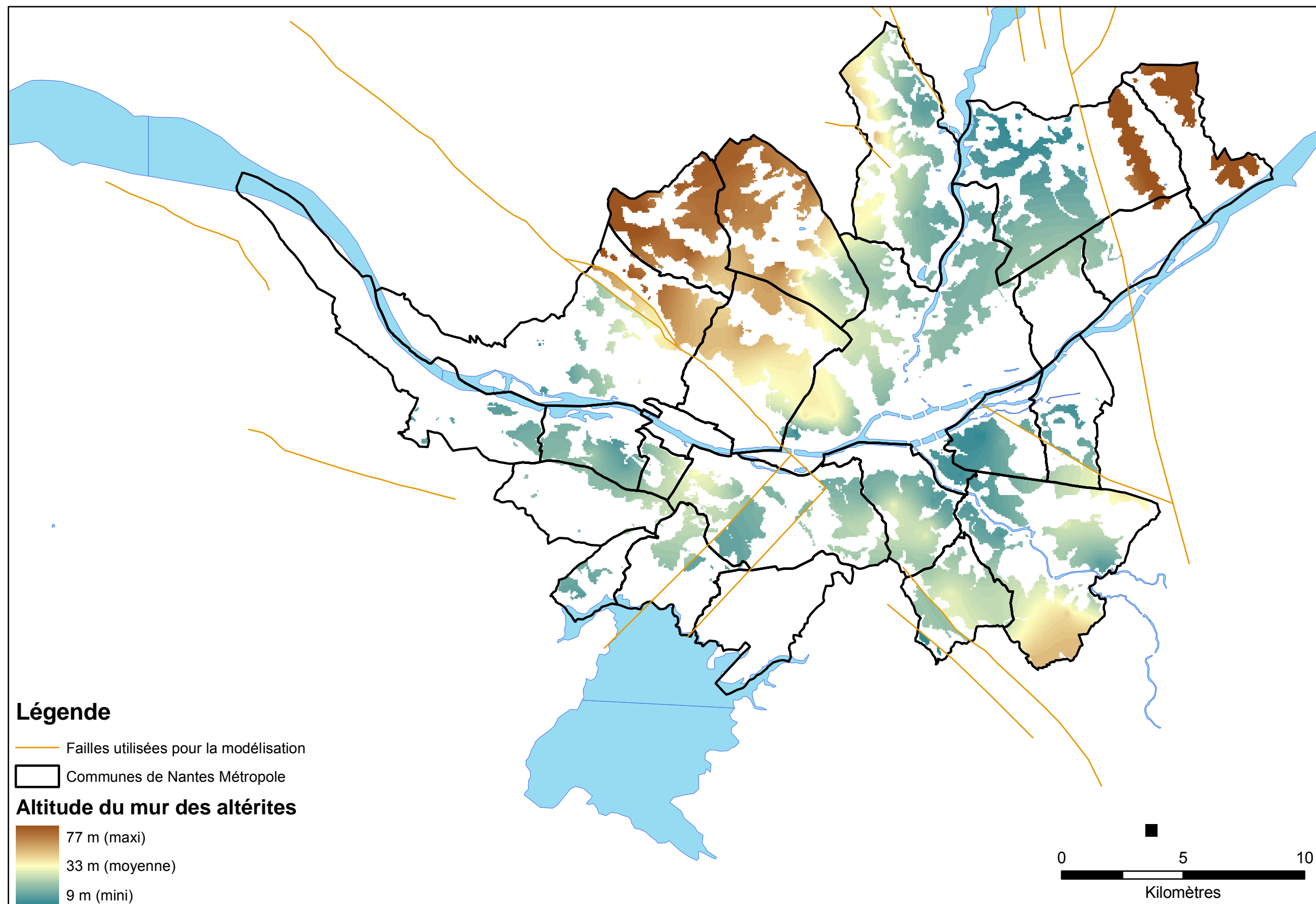
Annexe 3

Carte géologique simplifiée sur le territoire de Nantes Métropole



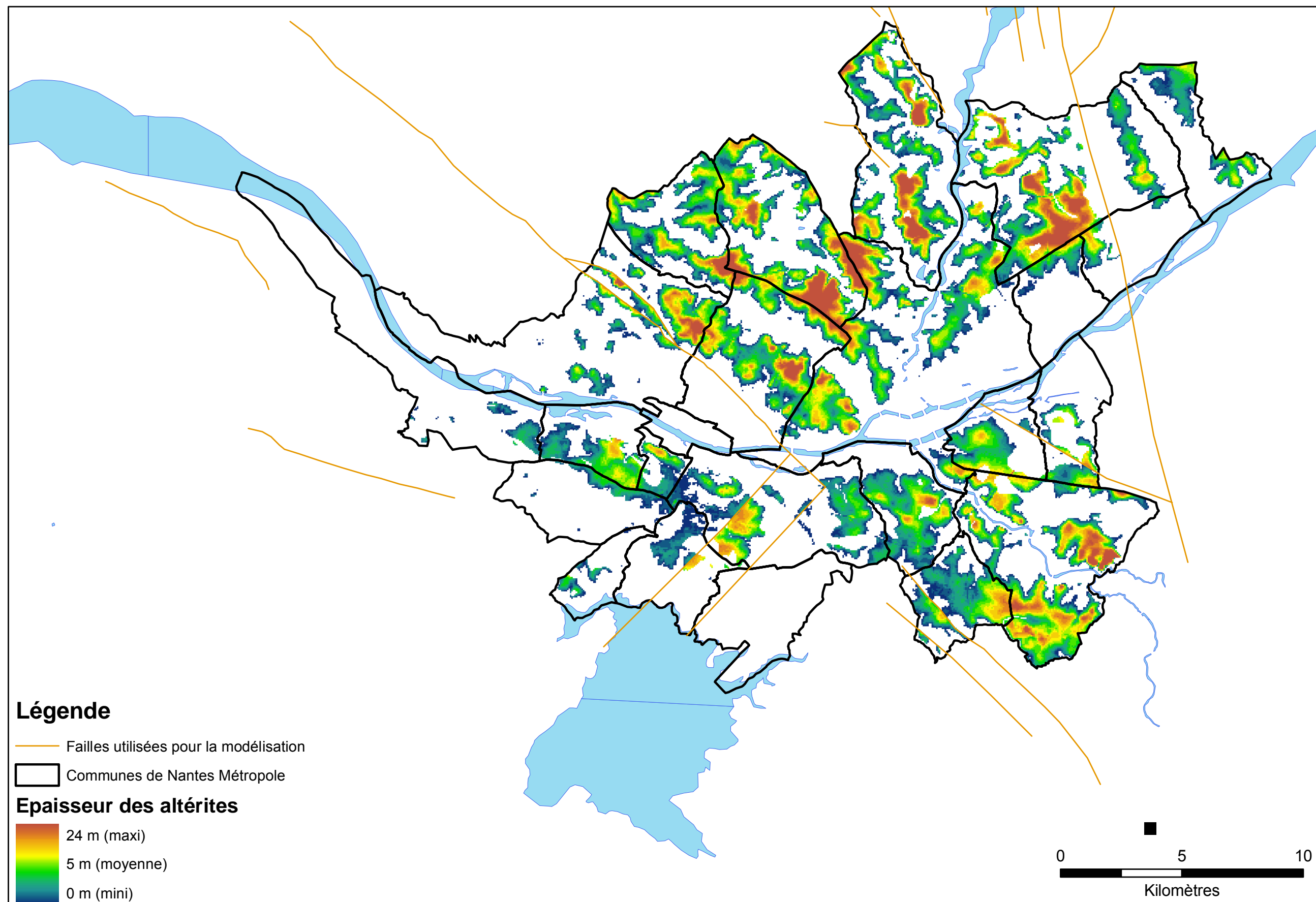
Annexe 4

Modélisation de l'altitude de la base (ou « mur ») des altérites



Annexe 5

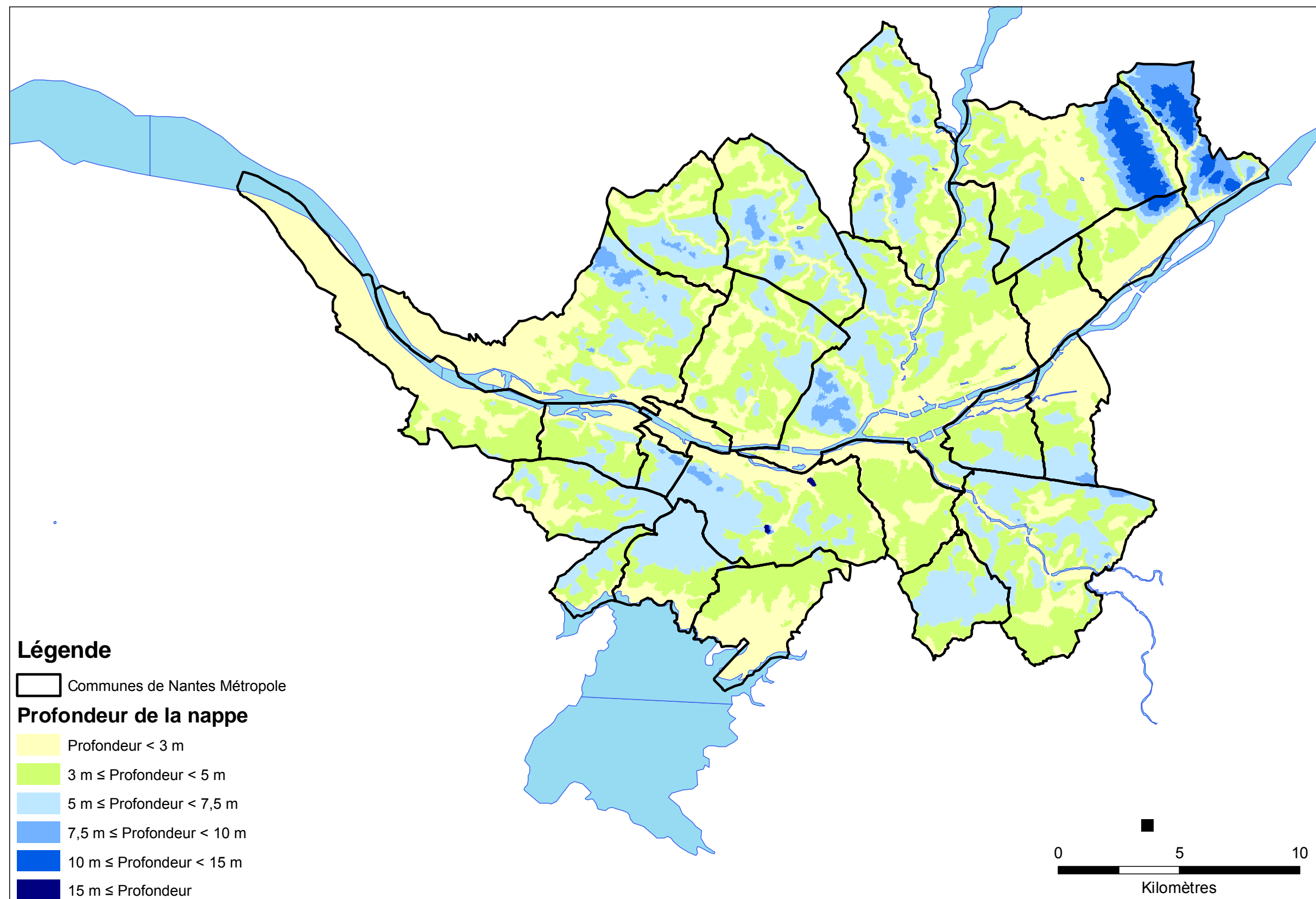
Modélisation de l'épaisseur des altérites



Annexe 6

Première approche de la profondeur moyenne de la nappe sur le territoire de Nantes Métropole

Compte tenu notamment de la nature des données utilisées pour la cartographie (incluant les données disponibles en Banque du Sous-Sol), la situation de la nappe est présentée sous la forme de fourchettes de profondeur.



Annexe 7

Logs validés : lithologie détaillée (première couche géologique représentée)

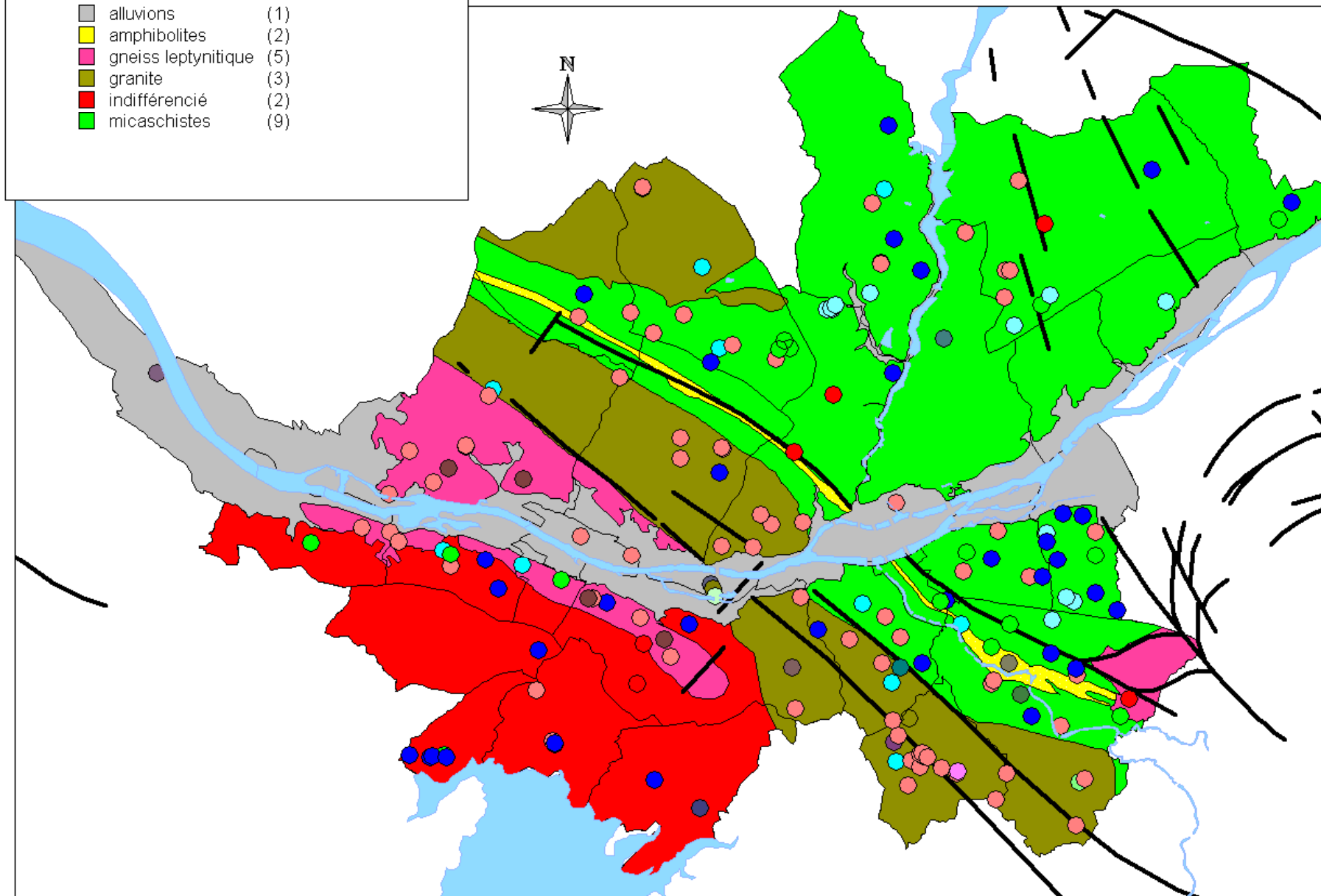
**LOGS VALIDES : LITHOLOGIE DETAILLEE (première couche représentée)
CARTE GEOLOGIQUE REGROUPEE : UNITE FONCTIONNELLES**

Logs_validés_zone_étude par LITHOLOGIE

- altérite. (0)
- argile organique. (1)
- argile sableuse fine. (2)
- argile sableuse. (2)
- argile tourbeuse. (2)
- argile. (98)
- arène argileuse. (0)
- arène granitique. (0)
- arène meuble. (0)
- colluvions. (1)
- galets. (2)
- gneiss. (1)
- granite. (160)
- granodiorite. (1)
- grès. (0)
- leucogranite. (1)
- limon. (1)
- micaschiste. (13)
- orthogneiss. (4)
- paragneiss. (1)
- prasinite. (1)
- quartz filonien. (1)
- quartz. (1)
- remblais. (15)
- Roches d'altération s.l.. (0)
- sable argileux. (7)
- sable argileux; galets. (3)
- sable argileux; graviers. (1)
- sable fin. (4)
- sable grossier. (5)
- sable. (7)
- sable; argile. (2)
- sable; graviers. (4)
- sable; vase. (1)
- schiste ardoisier. (2)
- schiste blanc. (2)
- schiste bleu. (10)
- schiste noir. (31)
- schiste. (63)
- schiste; grès. (0)
- socle indéterminé. (0)
- terre végétale. (0)
- tourbe. (1)

Geol_09_03_19 par GEOL_SANS_

- alluvions (1)
- amphibolites (2)
- gneiss leptynitique (5)
- granite (3)
- indifférencié (2)
- micaschistes (9)



Geol_09_03_19 par GEOL_SANS_

- alluvions (1)
- amphibolites (2)
- gneiss leptynitique (5)

1/200 000

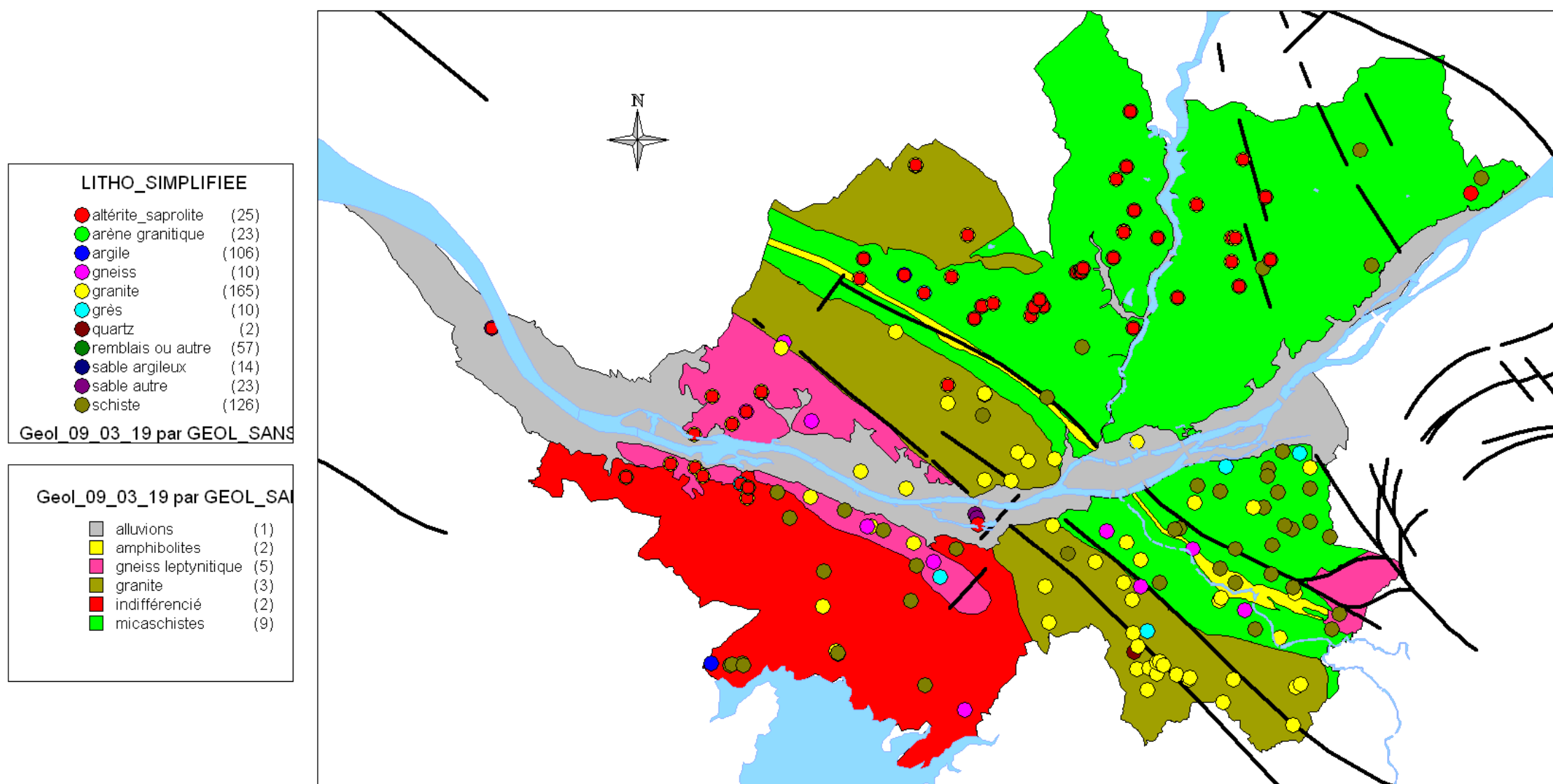
BRGM - Département Géothermie - Orléans

01.04.08

Annexe 8

Logs validés : lithologie simplifiée (première couche géologique représentée)

LOGS VALIDES : LITHOLOGIE SIMPLIFIEE (première couche représentée)



1/200 000

Annexe 9

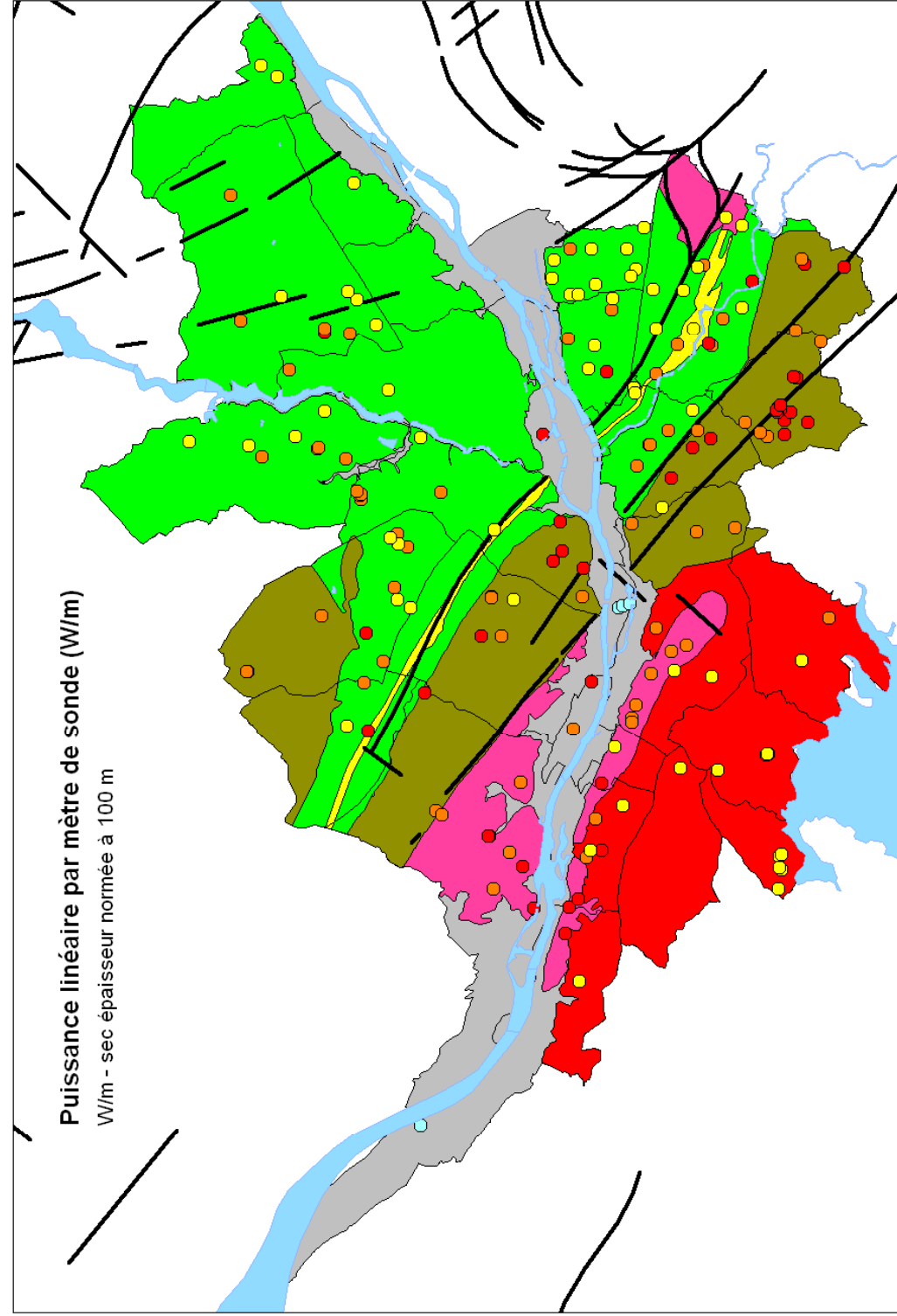
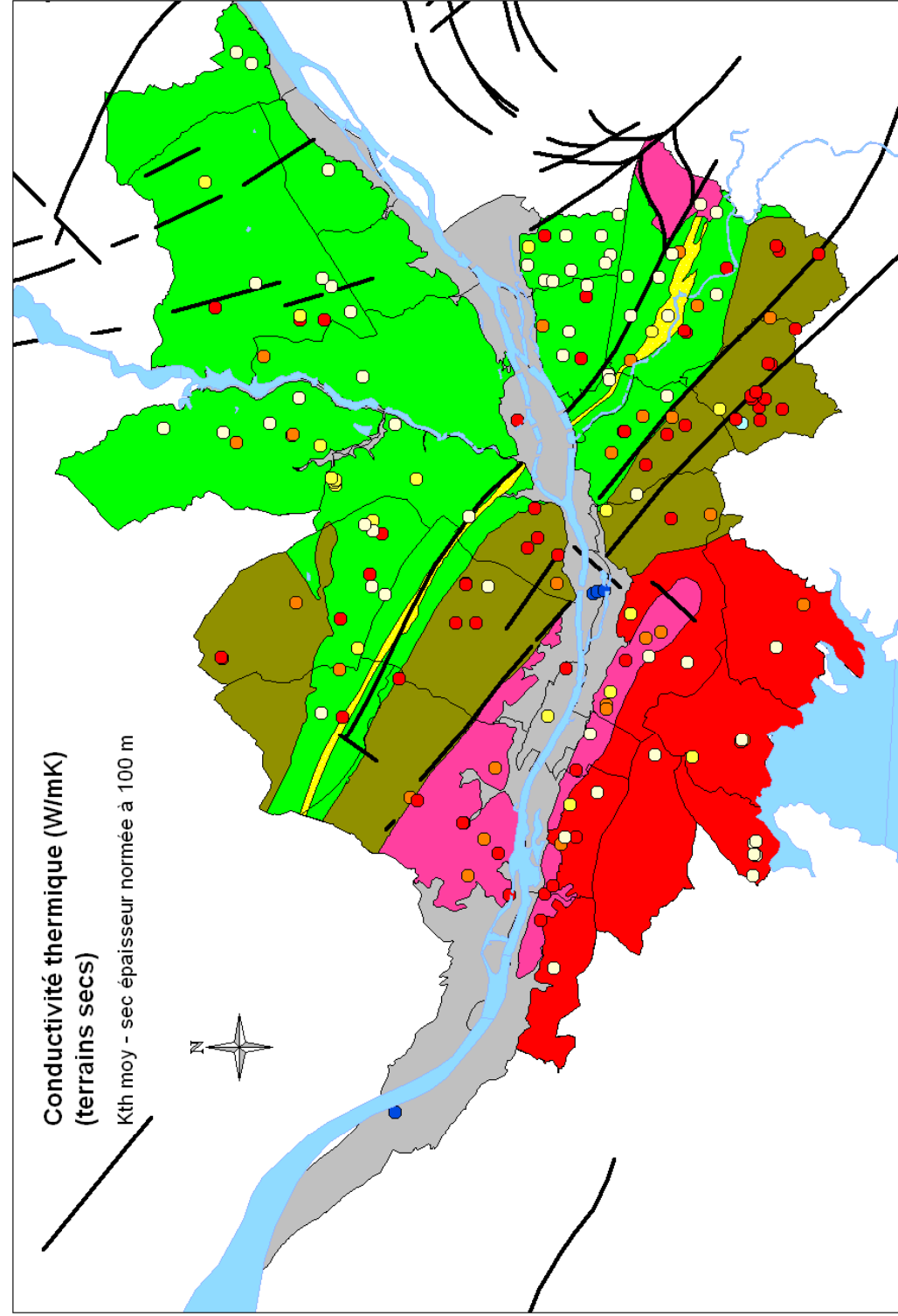
Analyse thématique sur les conductivités thermiques moyennes calculées pour chaque forage

**Cas traités :
Terrains secs
Terrains saturés
Moyenne terrains secs et saturés**

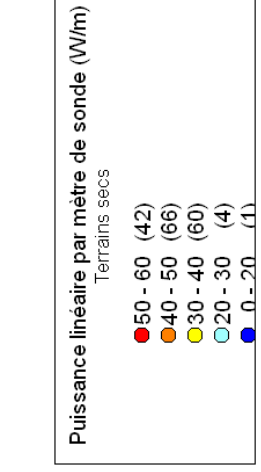
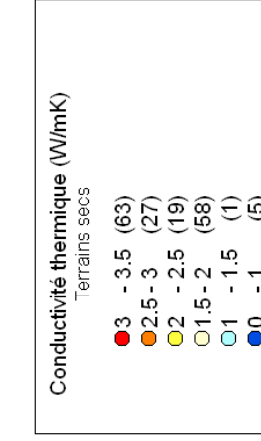
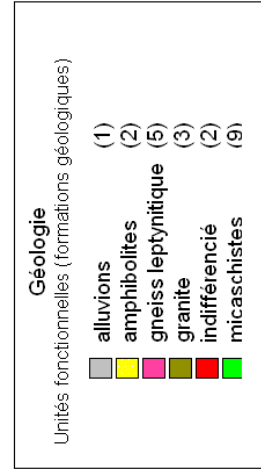
Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

TERRAINS SECS (CAS LE PLUS DEFAVORABLE)

CONDUCTIVITE THERMIQUE ET PUISSANCE LINEAIRE PAR METRE DE SONDE



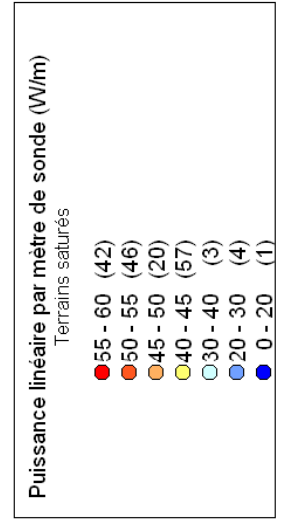
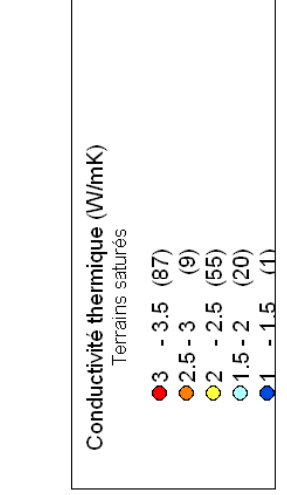
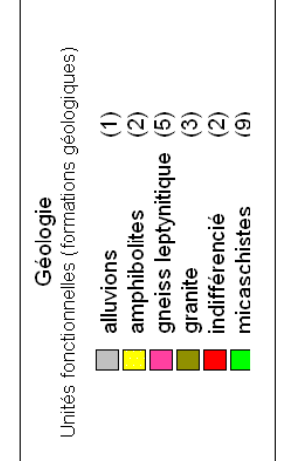
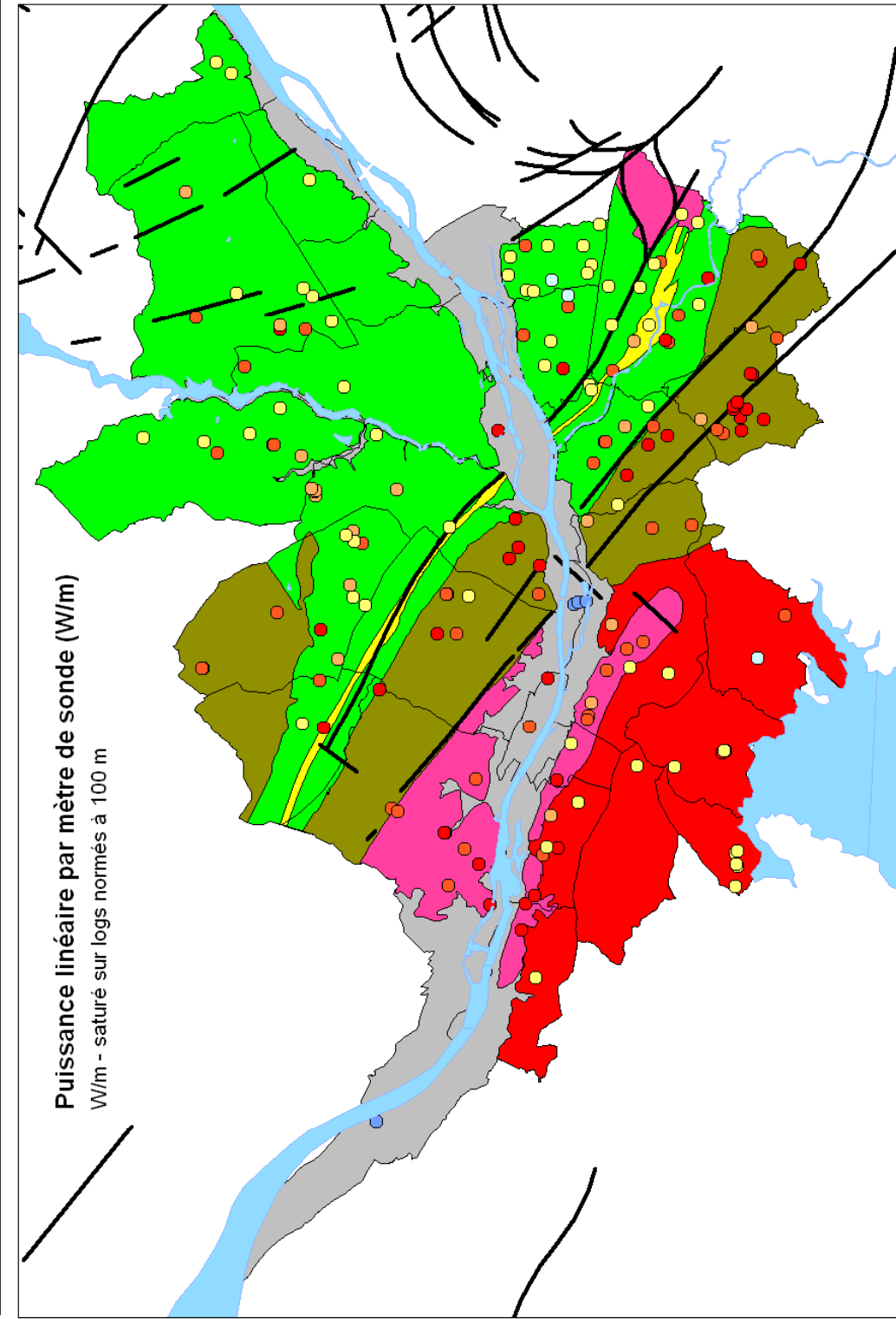
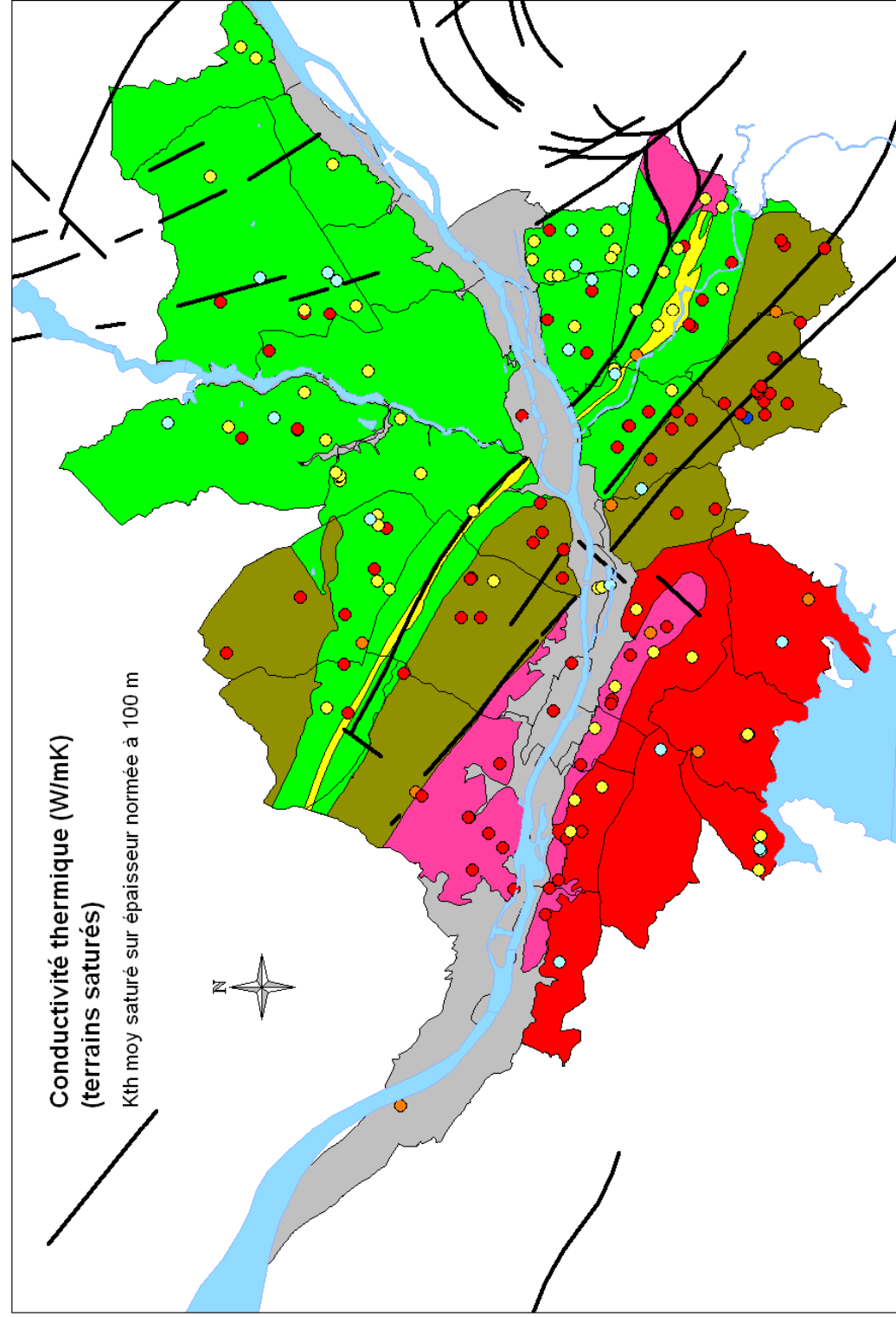
1/200 000



Nombre total de forages (173)

TERRAINS SATURÉS (CAS LE PLUS FAVORABLE)

CONDUCTIVITE THERMIQUE ET PUISSANCE LINEAIRE PAR METRE DE SONDE

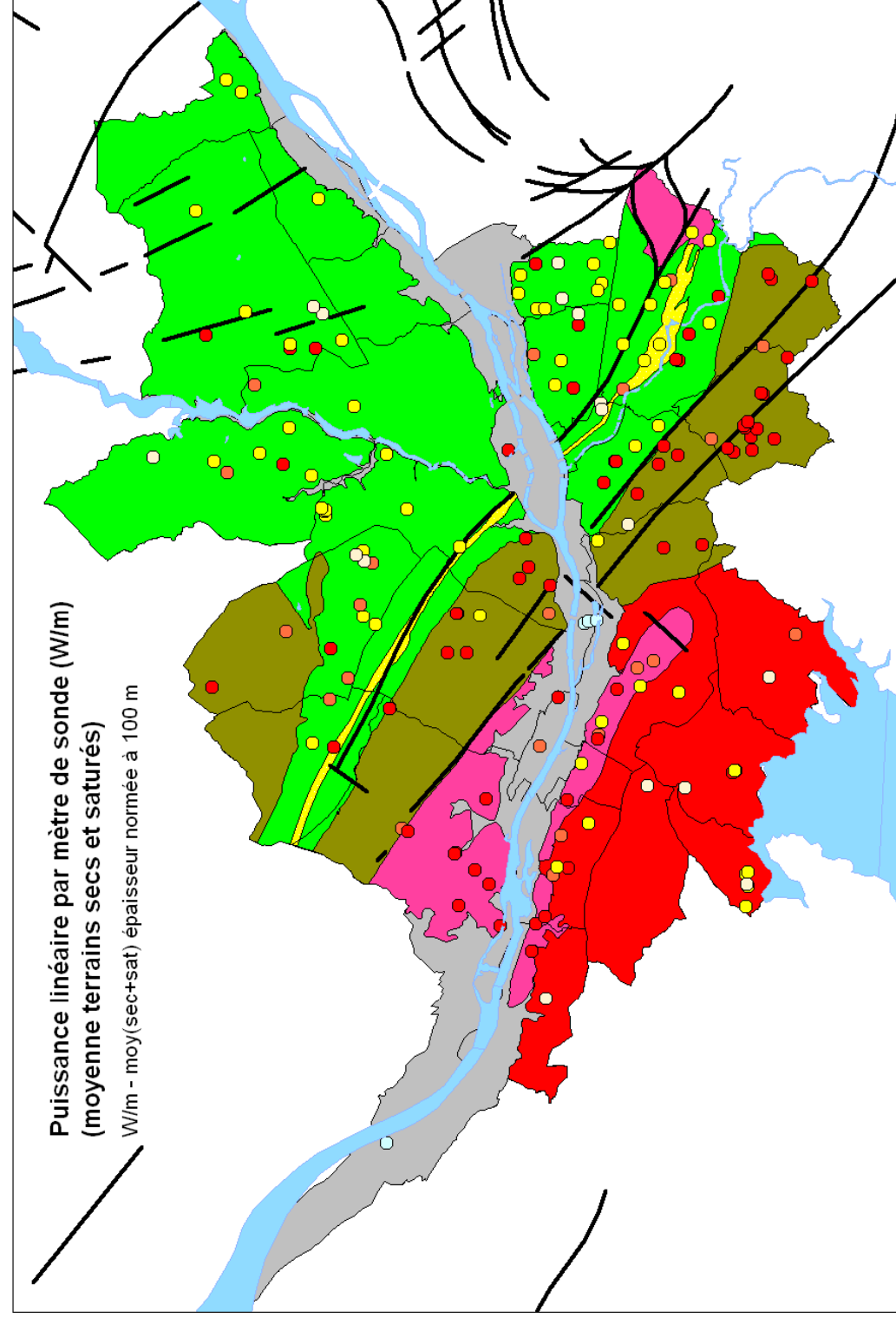
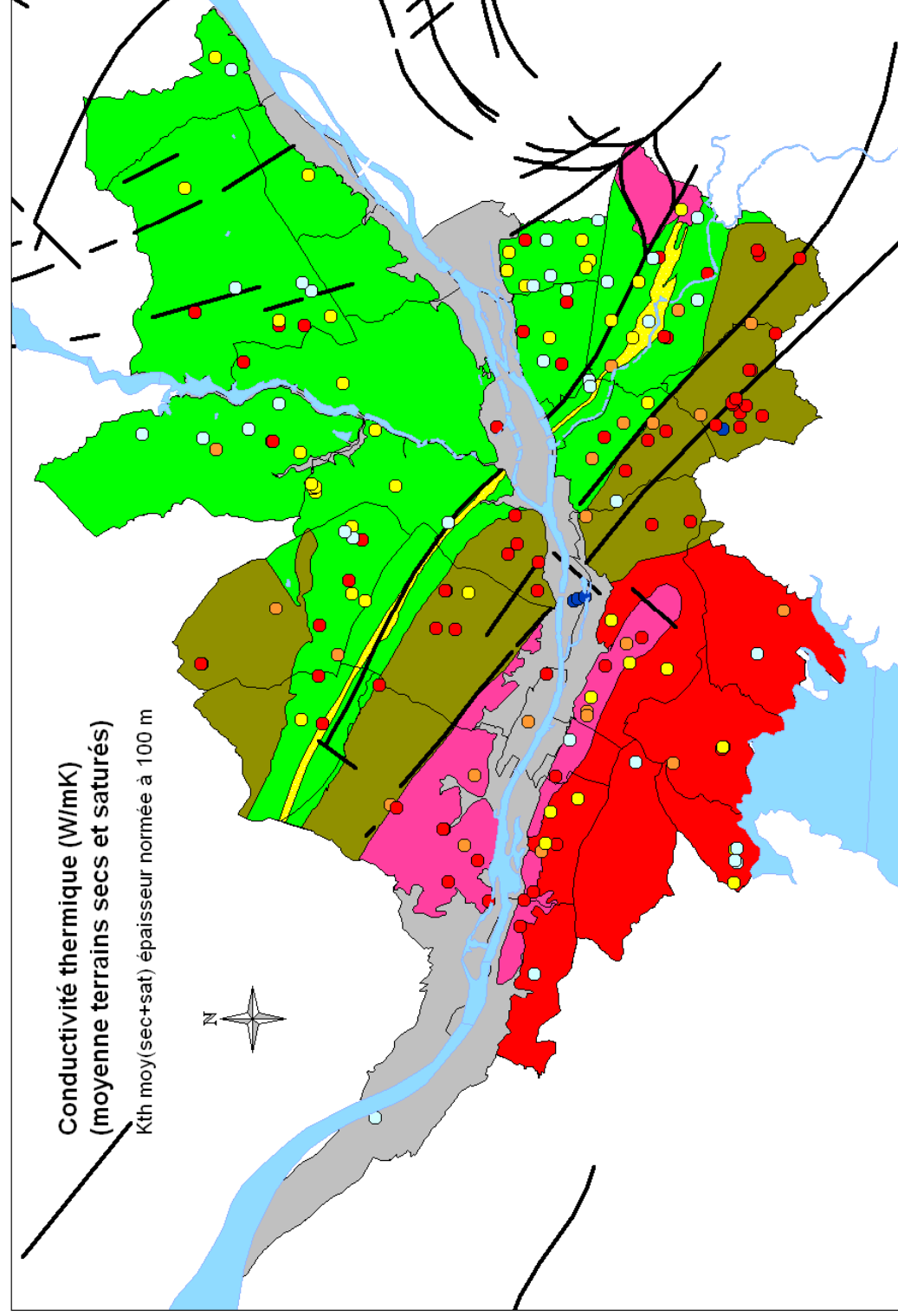


Nombre total de forages (173)

1/200 000

**MOYENNE TERRAINS SECS ET SATURÉS
(CAS INTERMEDIAIRE)**

CONDUCTIVITE THERMIQUE ET PUISSANCE LINEAIRE PAR METRE DE SONDE



Géologie
Unités fonctionnelles (formations géologiques)

alluvions	(1)
amphibolites	(2)
gneiss leptynitique	(5)
granite	(3)
indifférencié	(2)
micaschistes	(9)

Conductivité thermique (W/mK)
Moyenne terrains secs et saturés

3 - 3.5	(73)
2.5 - 3	(22)
2 - 2.5	(40)
1.5 - 2	(33)
1 - 1.5	(4)

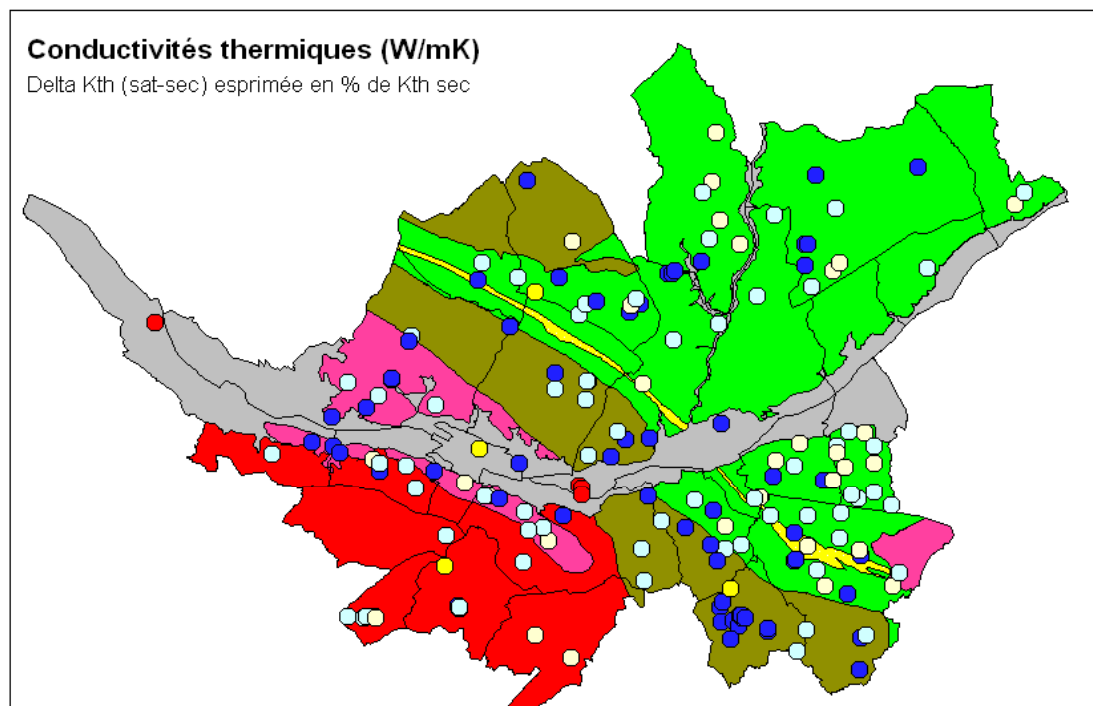
Puissance linéaire par mètre de sonde (W/m)
Moyenne terrains secs et saturés

50 - 55	(72)
45 - 50	(22)
40 - 45	(58)
30 - 40	(16)
20 - 30	(4)
0 - 20	(1)

Nombre total de forages (173)

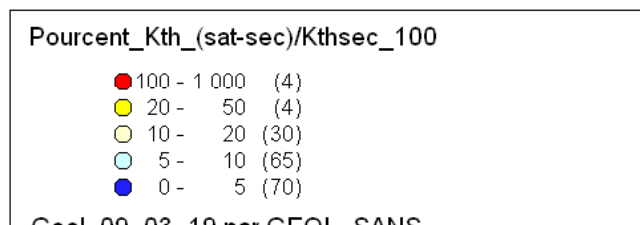
Annexe 10

Variabilité des conductivités thermiques entre les terrains secs et saturés (exprimée en % des terrains secs)

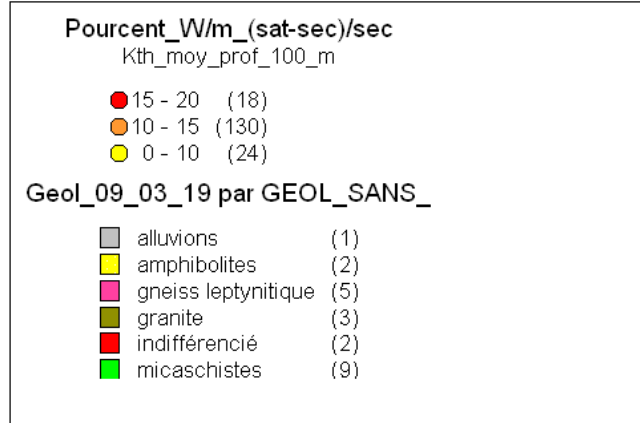
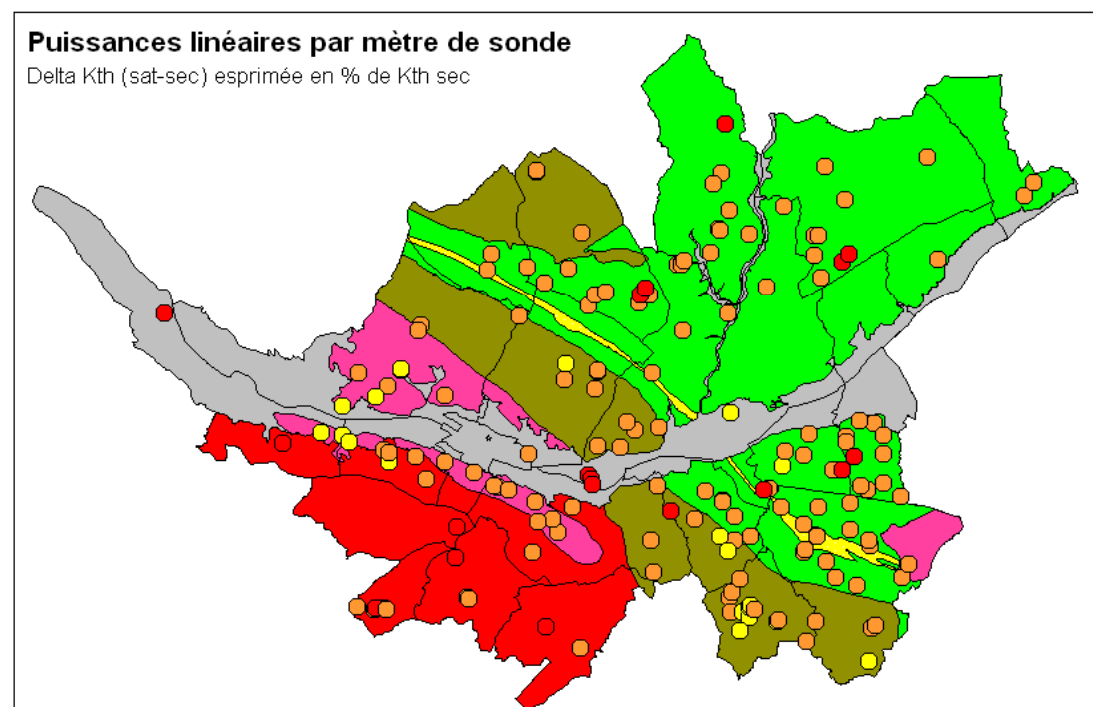


**VARIABILITE DES RESULTATS
(en % du sec)**

**CONDUCTIVITE THERMIQUE ET
PUISSANCE LINEAIRE PAR METRE DE SONDE**



Nombre total de forages (173)

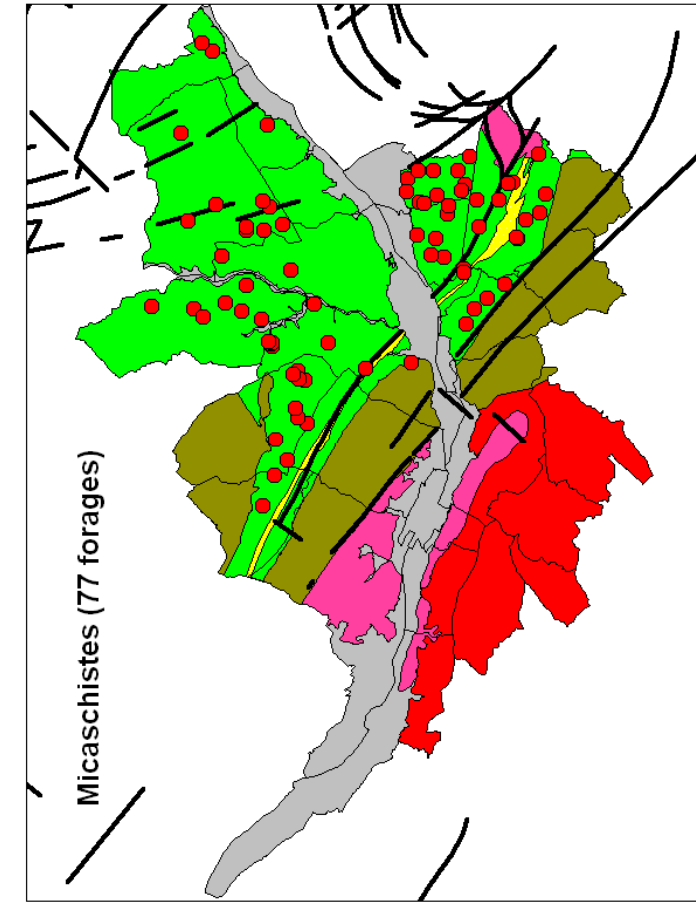
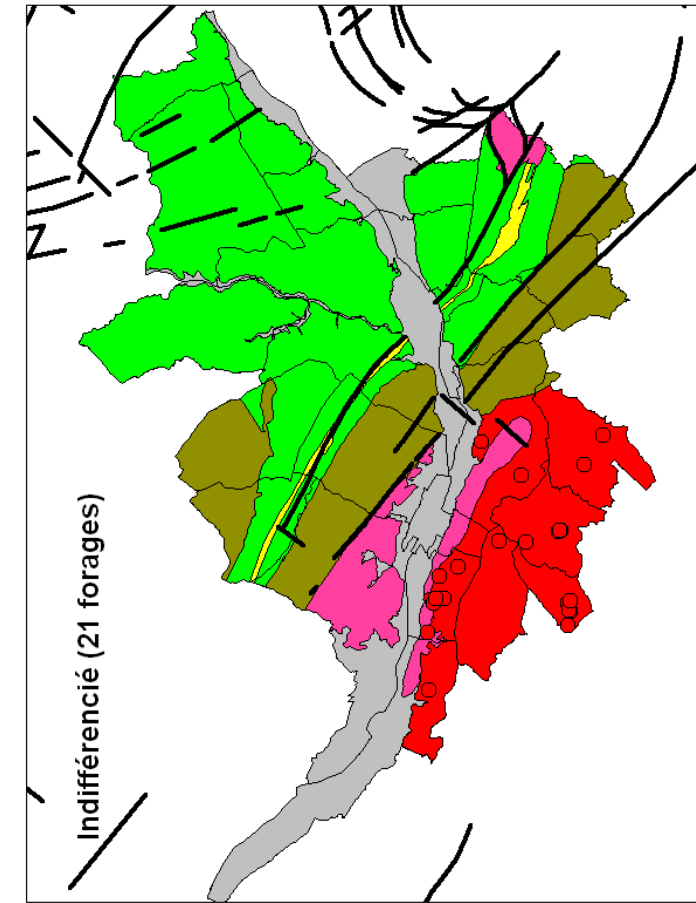
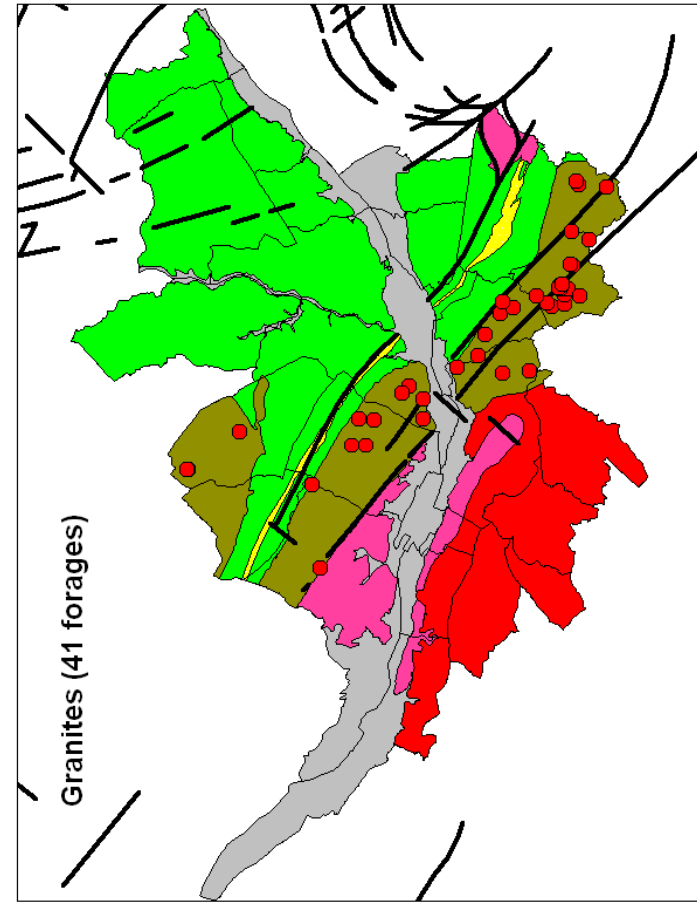
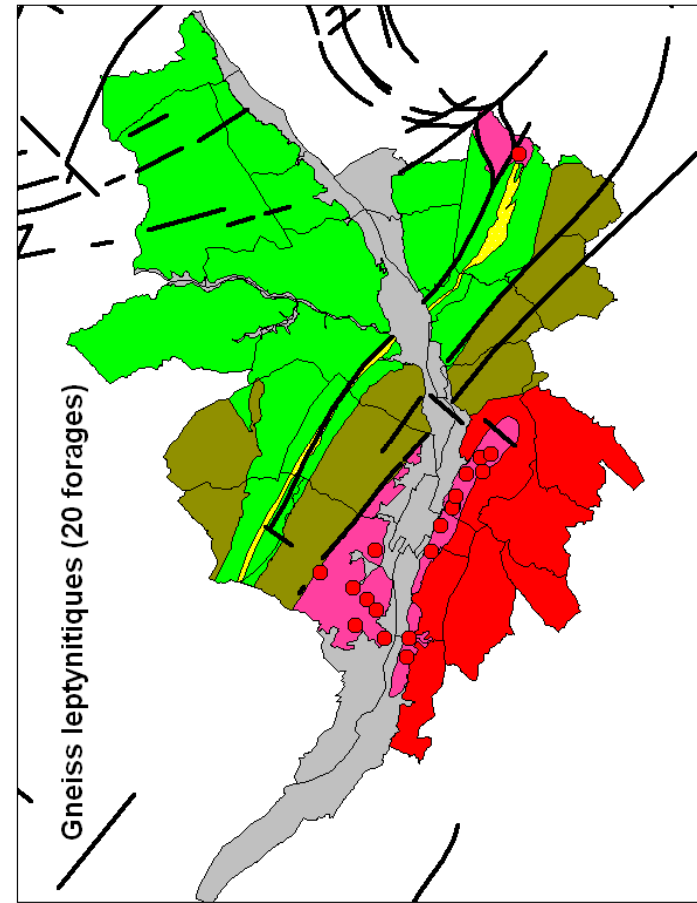
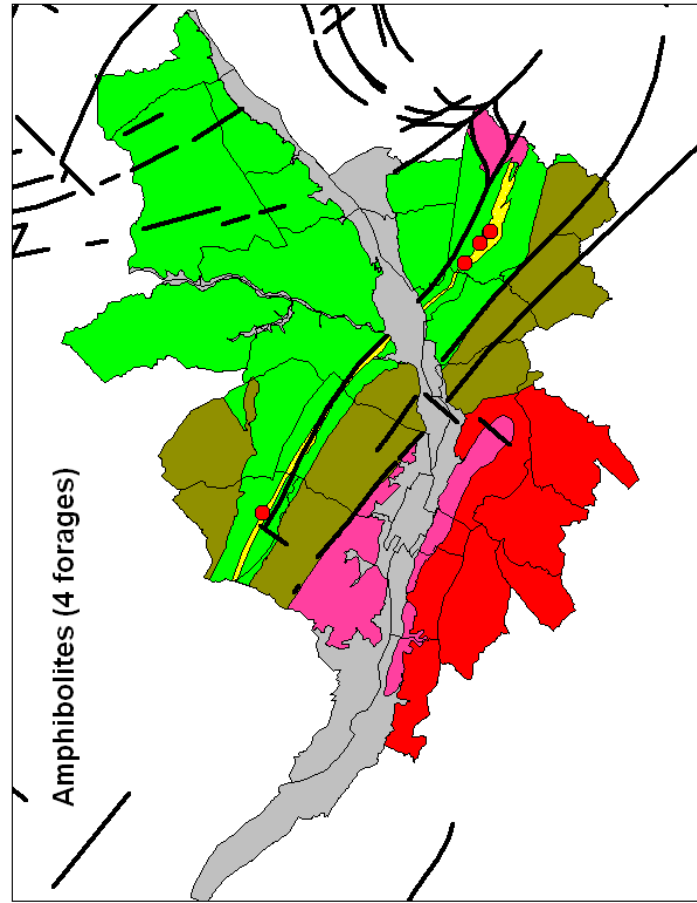
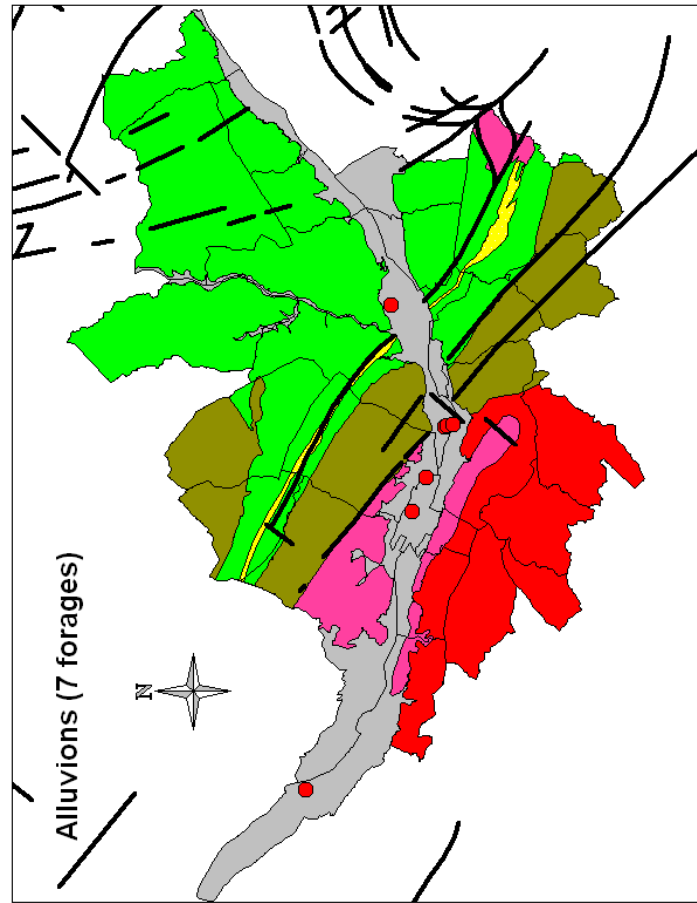


1/320 000

Annexe 11

Forages inclus dans chaque formation géologique

**FORAGES INCLUS DANS CHAQUE FORMATION GEOLOGIQUE
(LOGS VALIDES INCLUS DANS CHAQUE UNITE FONCTIONNELLE)**



Geol_09_03_19 par GEOL_SANS_

alluvions	(1)
amphibolites	(2)
gneiss leptynitique	(5)
granite	(3)
indifférencié	(2)
micaschistes	(9)

1/330 000
Nombre total de forages (173)

Annexe 12

Récapitulatif des valeurs de conductivités thermiques et puissances linéaires pour les forages inclus dans chaque formation géologique

ALLUVIONS	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04808X0025	283350	2257450	6.5	100	93.5	0.3	22.7	2.27	2.6	51.5	5.15	1.5	37.1	2.46
04816X0399	296599	2252334	40	100	60	2.2	42.4	4.24	3	54.8	5.48	2.6	48.6	4.86
04816X0400	298203	2251716	85	100	15	3.2	50.5	5.05	3.2	56.4	5.64	3.2	53.45	5.3
04817X0760	300685	2250820	57.7	100	42.3	0.3	22.7	2.27	2.3	48.8	4.88	1.3	35.75	2.46
04817X0761	300750	2250685	54.15	100	45.85	0.3	22.7	2.27	2.4	49.7	4.97	1.3	36.2	2.46
04817X0869	300800	2250430	50.7	100	49.3	0.3	22.7	2.27	1.8	43.8	4.38	1.1	33.25	2.46
04817X1414	306477	2253369	76	100	24	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.85	5.38

AMPHIBOLITES	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04812X0056	296547	2259218	61	100	39	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04818X0578	308504	2249552	61	100	39	2.7	46.2	4.62	2.9	51.5	5.15	2.8	48.8	4.88
04818X0584	310010	2248315	78	100	22	1.8	38.3	3.83	2	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04818X0585	309470	2248835	76	100	24	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31

GNEISS	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04815X0127	293015	2255141	64	100	36	3.1	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.2	52.2	5.22
04815X0128	293010	2255173	90	100	10	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04815X0129	291252	2255024	79	100	21	2.9	47.9	4.79	3.1	53.3	5.33	3	50.6	5.06
04815X0130	292467	2254481	103	100	-3	2.8	47.9	4.79	3	53.3	5.33	2.9	50.6	5.06
04815X0131	291976	2254020	52	100	48	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04815X0132	290603	2253647	58	100	42	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04815X0134	289751	2252592	31	100	69	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04815X0135	290645	2252457	85	100	15	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04816X0371	299210	2249060	61	100	39	2.7	46.2	4.62	2.9	51.5	5.15	2.8	48.8	4.88
04816X0375	296960	2250360	70	100	30	2.7	45.3	4.53	3	50.6	5.06	2.8	48	4.8
04816X0382	298470	2249740	67	100	33	3	48.8	4.88	3.2	54	5.4	3.1	51.4	5.14
04816X0385	296830	2250380	70	100	30	2.8	47.9	4.79	3	53.3	5.33	2.9	50.6	5.06
04816X0386	298582	2248954	99	100	1	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04816X0389	294815	2254114	58	100	42	2.8	47.9	4.79	3	53.3	5.33	2.9	50.6	5.06
04816X0390	293734	2256730	70	100	30	3	48.8	4.88	3.1	54	5.4	3	51.4	5.14
04816X0394	297413	2250244	73	100	27	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04816X0395	299420	2248531	52	100	48	2.7	47.1	4.71	3.2	52.4	5.24	3	49.7	4.97
04816X0401	294776	2251404	91	100	9	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04816X0402	295994	2250931	55	100	45	1.8	38.3	3.83	2	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04825X0041	313753	2247225	50	100	50	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21

GRANITE	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04812X0049	300407	2260783	85	100	15	2.7	47.1	4.71	3	52.4	5.24	2.8	49.7	4.97
04812X0050	298541	2263258	127	100	-27	3	49.7	4.97	3.1	54.8	5.48	3	52.2	5.22
04812X0051	298546	2263285	110	100	-10	3	49.7	4.97	3.1	54.8	5.48	3	52.2	5.22
04816X0315	299715	2255412	85	100	15	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04816X0387	297838	2257330	121	100	-21	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04816X0388	293842	2256947	67	100	33	2.7	46.2	4.62	2.9	51.5	5.15	2.8	48.8	4.88
04816X0403	299704	2254756	80	100	20	3	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.1	52.2	5.22
04817X1406	303477	2250386	70	100	30	2.4	41.4	4.14	2.5	46.8	4.68	2.5	44.1	4.41
04817X1410	304018	2249367	35	100	65	1.8	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.9	38	3.8
04817X1411	306022	2248344	85	100	15	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04817X1413	303214	2248206	79	100	21	3	48.8	4.88	3.2	54	5.4	3.1	51.4	5.14
04817X1415	301026	2252029	41	100	59	2.9	45.3	4.53	3.1	50.6	5.06	3	48	4.8
04817X1416	302570	2252695	70	100	30	3.2	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04817X1423	301985	2251989	60	100	40	3.2	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04817X1432	306331	2247720	100	100	0	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04817X1435	306608	2248179	85	100	15	2.8	47.9	4.79	3	53.3	5.33	2.9	50.6	5.06
04817X1437	305011	2249062	61	100	39	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04817X1438	300948	2254341	58	100	42	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04817X1439	301036	2255086	61	100	39	3.1	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.2	52.2	5.22
04817X1440	301012	2255097	40	100	60	3	47.9	4.79	3.2	53.3	5.33	3.1	50.6	5.06
04817X1441	302223	2253017	130	100	-30	3	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.1	53	5.3
05083X0014	306400	2245840	50	100	50	1.4	47.9	4.79	1.4	53.3	5.33	1.4	50.6	5.06
05083X0017	306480	2245240	76	100	24	3.2	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
05083X0073	303330	2246900	76	100	24	2.9	47.9	4.79	3.1	53.3	5.33	3	50.6	5.06
05083X0075	306536	2246054	70	100	30	3.1	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.2	52.2	5.22
05084X0045	308360	2244860	95	100	5	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0070	306940	2245260	80	100	20	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0071	307200	2245060	70	100	30	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0073	307320	2245400	75	100	25	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0074	307380	2245440	80	100	20	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0078	309940	2244880	78	100	22	2.6	44.3	4.43	2.8	49.7	4.97	2.7	47	4.7
05084X0101	308390	2244940	106	100	-6	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
05084X0105	312189	2244590	64	100	36	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
05084X0106	312360	2244685	76	100	24	3	48.8	4.88	3.2	54	5.4	3.1	51.4	5.14
05084X0107	312100	2243250	85	100	15	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0108	309580	2244050	98.5	100	1.5	3	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.1	52.2	5.22
05084X0112	307215	2245489	120	100	-20	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0118	307290	2245518	37	100	63	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0121	307439	2245375	100	100	0	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
05084X0122	306858	2244488	106	100	-6	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
05084X0123	306869	2246582	70	100	30	2.4	43.4	4.34	3	48.8	4.88	2.7	46.1	4.61

INDIFFERENCIE	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04815X0136	288163	2252129	31	100	69	1.8	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.9	38	3.8
04815X0137	290908	2252168	55	100	45	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04815X0138	292526	2251380	52	100	48	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04815X0139	292282	2251891	50	100	50	2.6	45.3	4.53	3.1	50.6	5.06	2.8	48	4.8
04815X0140	292543	2251752	52	100	48	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04816X0370	298380	2247680	69	100	31	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04816X0393	295264	2248733	40	100	60	1.8	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.9	38	3.8
04816X0404	293599	2251598	46	100	54	2.1	42.4	4.24	2.3	47.8	4.78	2.2	45.1	4.51
04816X0405	294024	2250684	25	100	75	1.9	37.3	3.73	2	42.7	4.27	2	40	4
04817X1412	300001	2249562	16	100	84	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
05081X0076	291230	2245450	70	100	30	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
05081X0078	292328	2245432	90	100	10	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
05081X0079	291902	2245364	55	100	45	1.8	37.3	3.73	1.9	42.7	4.27	1.9	40	4
05081X0080	291967	2245418	45	100	55	1.8	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.9	38	3.8
05081X0081	292393	2245364	49	100	51	1.8	37.3	3.73	2	42.7	4.27	1.9	40	4
05082X0090	295210	2247480	46	100	54	2.4	35.3	3.53	2.9	40.6	4.06	2.6	38	3.8
05082X0091	295770	2245780	82	100	18	2.9	47.9	4.79	3.1	53.3	5.33	3	50.6	5.06
05082X0093	295710	2245870	43	100	57	3.2	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
05082X0094	295770	2245820	58	100	42	1.9	38.3	3.83	2	43.8	4.38	2	41	4.1
05082X0101	298898	2244677	64	100	36	1.6	34.2	3.42	1.9	39.6	3.96	1.8	36.9	3.69
05083X0089	300329	2243775	88	100	12	2.5	45.3	4.53	2.8	50.6	5.06	2.6	48	4.8

MICASCHISTES	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04812X0048	299834	2259298	84	100	16	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04812X0052	298856	2258719	80	100	20	2.4	43.4	4.34	2.9	48.8	4.88	2.6	46.1	4.61
04812X0054	296697	2259919	58	100	42	1.9	38.3	3.83	2	43.8	4.38	2	41	4.1
04812X0055	298147	2259340	40	100	60	2.9	45.3	4.53	3.1	50.6	5.06	3	48	4.8
04813X0149	304310	2259463	88	100	12	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04813X0151	305640	2259955	70	100	30	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04813X0152	304438	2259502	70	100	30	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04813X0153	304478	2259464	94	100	6	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04813X0154	304562	2259601	79	100	21	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04813X0258	306393	2261671	100	100	0	1.7	37.3	3.73	1.9	42.7	4.27	1.8	40	4
04813X0261	307242	2260680	55	100	45	1.8	37.3	3.73	2	42.7	4.27	1.9	40	4
04813X0262	306100	2263216	58	100	42	1.8	37.3	3.73	2	42.7	4.27	1.9	40	4
04813X0263	306234	2265230	49	100	51	1.7	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.8	38	3.8
04813X0264	305732	2262777	64	100	36	2.8	45.3	4.53	3	50.6	5.06	2.9	48	4.8
04813X0267	306000	2260910	52	100	48	2.8	44.3	4.43	3	49.7	4.97	2.9	47	4.7
04813X0268	306009	2260885	76	100	24	2.9	47.9	4.79	3.1	53.3	5.33	3	50.6	5.06
04813X0270	306358	2257444	82	100	18	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04813X0272	300665	2257801	79	100	21	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04813X0273	300926	2258225	52	100	48	1.9	38.3	3.83	2	43.8	4.38	2	41	4.1
04813X0274	302705	2257904	52	100	48	3	47.1	4.71	3.1	52.4	5.24	3	49.7	4.97

MICASCHISTES	X Ouvrage	Y Ouvrage	PROF DEBUT	PROF FIN	Epaisseur_dernière_couche_100	Kth sec	W/m sec	kW sec	Kth sat	W/m sat	kW sat	Kth moy sec- sat	Wm moy sec-sat	kW moy sec- sat
04813X0275	303145	2258219	40	100	60	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04813X0276	302794	2258192	25	100	75	1.8	35.3	3.53	2	40.6	4.06	1.9	38	3.8
04813X0277	301347	2258323	31	100	69	3	44.3	4.43	3.1	49.7	4.97	3	47	4.7
04813X0278	302993	2258472	46	100	54	1.8	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.9	38	3.8
04814X0170	310160	2258940	97	100	3	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04814X0171	309870	2259830	85	100	15	3	49.7	4.97	3.1	54.8	5.48	3	52.2	5.22
04814X0172	311110	2262140	106	100	-6	1.8	38.3	3.83	1.9	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04814X0174	309880	2260660	100	100	0	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04814X0175	311010	2259590	61	100	39	1.7	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.8	38	3.8
04814X0179	310020	2260660	61	100	39	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04814X0180	310020	2260660	52	100	48	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04814X0181	310300	2263480	61	100	39	3	48.8	4.88	3.1	54	5.4	3	51.4	5.14
04814X0182	311280	2259896	64	100	36	1.7	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.8	38	3.8
04814X0183	307946	2258538	58	100	42	1.9	38.3	3.83	2	43.8	4.38	2	41	4.1
04814X0184	308638	2261861	52	100	48	2.9	46.2	4.62	3.1	51.5	5.15	3	48.8	4.88
04817X1395	303278	2254993	70	100	30	1.8	38.3	3.83	2	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04817X1397	304518	2256763	99	100	1	2	40.4	4.04	2.1	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04817X1408	303543	2252783	100	100	0	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04817X1429	306122	2249801	55	100	45	3.1	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.2	52.2	5.22
04817X1431	306122	2249774	40	100	60	3	47.9	4.79	3.1	53.3	5.33	3	50.6	5.06
04817X1434	305411	2250195	55	100	45	2.8	47.9	4.79	3	53.3	5.33	2.9	50.6	5.06
04817X1436	306614	2249141	40	100	60	2.7	40.4	4.04	3	45.8	4.58	2.8	43.1	4.31
04818X0550	309452	2247689	96	100	4	3.1	49.7	4.97	3.2	54.8	5.48	3.2	52.2	5.22
04818X0551	311190	2252430	55	100	45	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0553	312040	2250250	70	100	30	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0555	311793	2250403	55	100	45	1.9	38.3	3.83	2	43.8	4.38	2	41	4.1
04818X0559	312320	2252970	72	100	28	2.1	39.4	3.94	2.4	44.8	4.48	2.2	42.1	4.21
04818X0560	312704	2251723	70	100	30	1.7	36.3	3.63	1.9	41.7	4.17	1.8	39	3.9
04818X0566	312700	2252450	76	100	24	3	48.8	4.88	3.2	54	5.4	3.1	51.4	5.14
04818X0569	311180	2252170	52	100	48	1.8	37.3	3.73	2	42.7	4.27	1.9	40	4
04818X0570	311529	2251579	52	100	48	1.7	34.2	3.42	1.9	39.6	3.96	1.8	36.9	3.69
04818X0571	313400	2249980	100	100	0	1.8	38.3	3.83	1.9	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04818X0572	312701	2250536	73	100	27	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0580	312147	2247953	57	100	43	2.9	46.2	4.62	3	51.5	5.15	3	48.8	4.88
04818X0581	310365	2247332	52	100	48	2.8	47.9	4.79	3	53.3	5.33	2.9	50.6	5.06
04818X0582	311340	2249673	91	100	9	1.8	38.3	3.83	1.9	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04818X0583	310022	2249560	50	100	50	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0587	311320	2248630	52	100	48	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0590	308030	2250306	45	100	55	1.8	36.3	3.63	2	41.7	4.17	1.9	39	3.9
04818X0591	309509	2247781	100	100	0	3.1	50.5	5.05	3.2	55.6	5.56	3.2	53	5.3
04818X0593	307295	2248344	61	100	39	1.9	38.3	3.83	2	43.8	4.38	2	41	4.1
04818X0594	308565	2251210	43	100	57	3.2	51.3	5.13	3.2	56.4	5.64	3.2	53.8	5.38
04818X0596	312092	2248164	50	100	50	1.8	37.3	3.73	2	42.7	4.27	1.9	40	4
04818X0597	311703	2253035	55	100	45	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0599	307845	2250264	40	100	60	1.8	35.3	3.53	1.9	40.6	4.06	1.9	38	3.8
04818X0601	309673	2252516	80	100	20	2.7	47.1	4.71	3.2	52.4	5.24	3	49.7	4.97
04818X0603	309460	2251623	70	100	30	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04818X0604	308668	2251826	76	100	24	1.7	37.3	3.73	1.9	42.7	4.27	1.8	40	4
04818X0605	310656	2251044	52	100	48	3	48.8	4.88	3.1	54	5.4	3	51.4	5.14
04818X0606	311036	2251030	49	100	51	1.6	32.1	3.21	1.9	37.3	3.73	1.8	34.7	3.47
04821X0037	314900	2259700	86	100	14	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
04821X0123	314488	2263830	70	100	30	2	40.4	4.04	2	45.8	4.58	2	43.1	4.31
04821X0127	318449	2262280	100	100	0	1.8	38.3	3.83	2	43.8	4.38	1.9	41	4.1
04821X0129	318840	2262796	130	100	-30	1.9	39.4	3.94	2	44.8	4.48	2	42.1	4.21
05081X0082	313480	2246680	52	100	48	1.8	38.3	3.83	2	43.8	4.38	1.9	41	4.1

Annexe 13

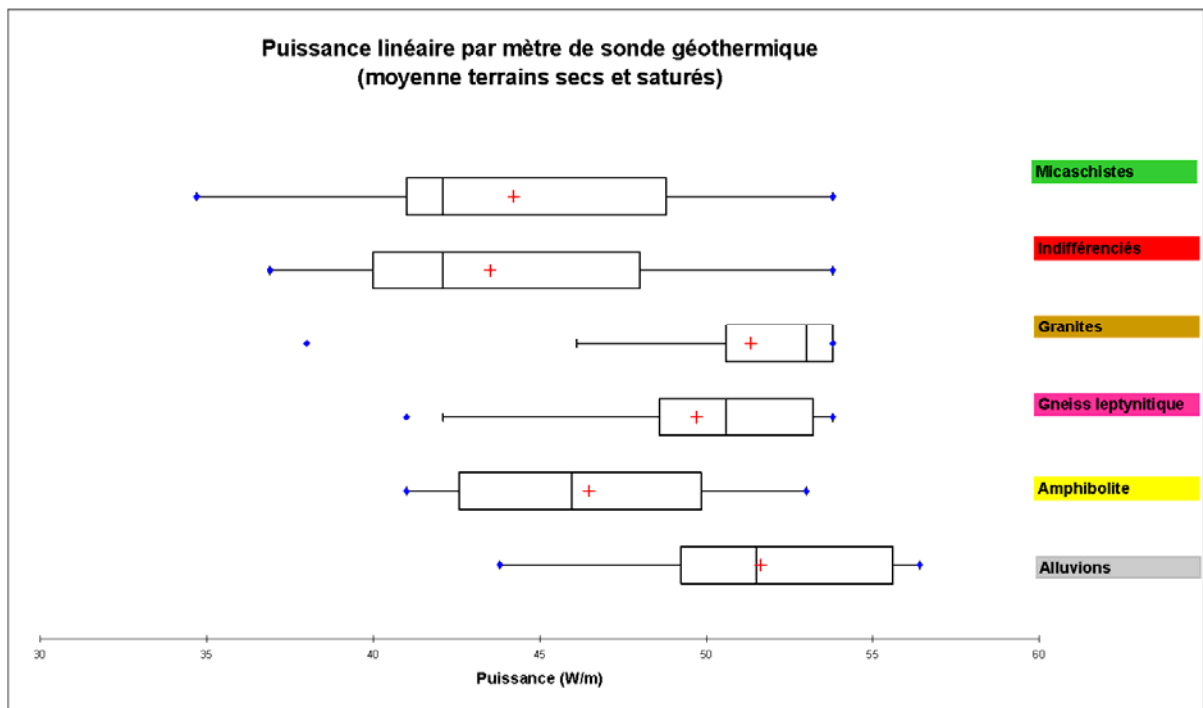
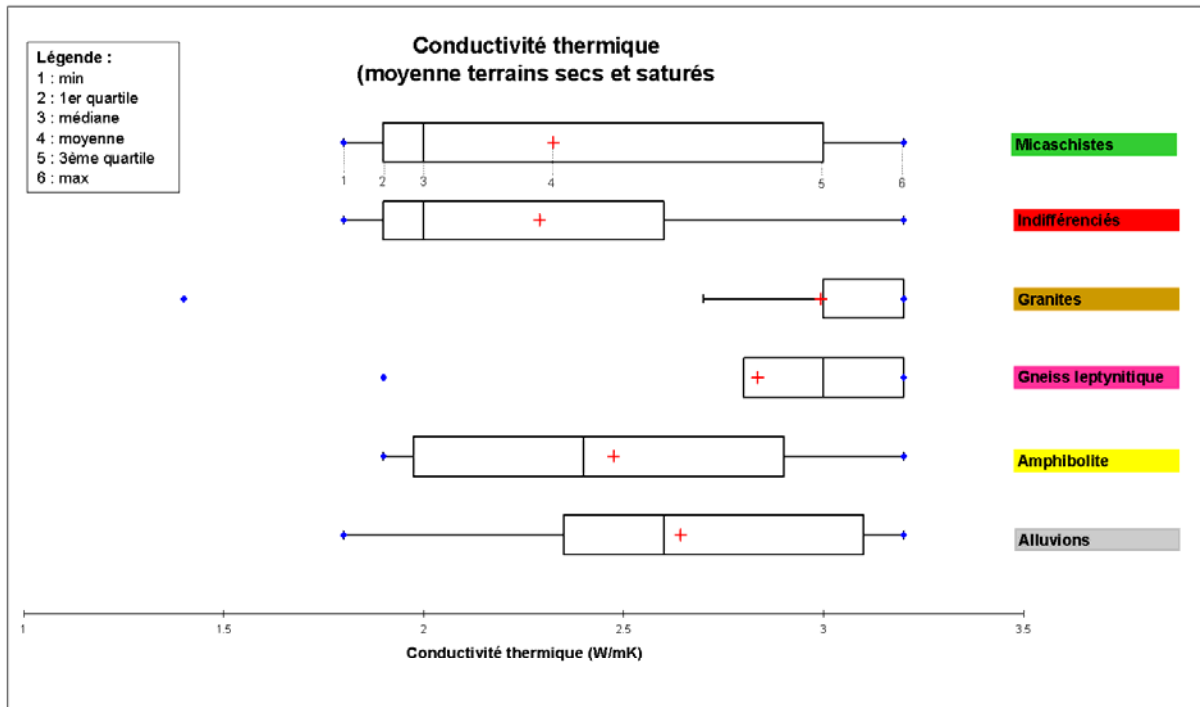
Récapitulatif des analyses statistiques pour chaque unité fonctionnelle

	Conductivité thermique (W/mK)			Puissance linéaire soutirée par mètre de sonde (W/m)				Puissance totale soutirée par une sonde de 100 m (kW)		
	Terrains secs	Terrains saturés	Moyenne (sec - saturé)	Terrains secs	Terrains saturés	Moyenne (sec - saturé)	Variabilité (%)	Terrains secs	Terrains saturés	Moyenne (sec - saturé)
	Kth sec	Kth sat	Moy Kth (sec_sat)	W/m sec	W/m sat	Moy W/m	%W/m (sat-sec)/sec	kW ₁₀₀ sec	kW ₁₀₀ sat	Moy kW ₁₀₀ (sec_sat)
ALLUVIONS										
Nb. d'observations	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00	7.00
Minimum	0.30	1.80	1.10	22.70	43.80	33.25	9.94	2.27	4.38	3.33
Maximum	3.20	3.20	3.20	51.30	56.40	53.85	126.87	5.13	5.64	5.39
1er Quartile	0.30	2.35	1.30	22.70	49.25	35.98	20.46	2.27	4.93	3.60
Médiane	0.30	2.60	1.50	22.70	51.50	37.10	92.95	2.27	5.15	3.71
3ème Quartile	2.70	3.10	2.90	46.45	55.60	51.03	116.96	4.65	5.56	5.10
Moyenne	1.40	2.64	2.03	33.57	51.63	42.60	72.09	3.36	5.16	4.26
AMPHIBOLITES										
Nb. d'observations	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Minimum	1.80	2.00	1.90	38.30	43.80	41.00	10.10	3.83	4.38	4.10
Maximum	3.10	3.20	3.20	50.50	55.60	53.00	14.40	5.05	5.56	5.30
1er Quartile	1.95	2.00	1.98	39.88	45.30	42.58	11.15	3.99	4.53	4.26
Médiane	2.35	2.45	2.40	43.30	48.65	45.95	12.45	4.33	4.87	4.60
3ème Quartile	2.80	2.98	2.90	47.28	52.53	49.85	13.65	4.73	5.25	4.99
Moyenne	2.40	2.53	2.48	43.85	49.18	46.48	12.35	4.39	4.92	4.65
GNEISS LEPTYNITIQUE										
Nb. d'observations	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Minimum	1.80	2.00	1.90	38.30	43.80	41.00	9.90	3.83	4.38	4.10
Maximum	3.20	3.20	3.20	51.30	56.40	53.80	14.40	5.13	5.64	5.38
1er Quartile	2.70	2.98	2.80	45.98	51.28	48.60	10.05	4.60	5.13	4.86
Médiane	2.85	3.10	3.00	47.90	53.30	50.60	11.30	4.79	5.33	5.06
3ème Quartile	3.13	3.20	3.20	50.70	55.80	53.20	11.55	5.07	5.58	5.32
Moyenne	2.76	2.90	2.84	47.10	52.37	49.71	11.31	4.71	5.24	4.97
GRANITE										
Nb. d'observations	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00
Minimum	1.40	1.40	1.40	35.30	40.60	38.00	9.90	3.53	4.06	3.80
Maximum	3.20	3.20	3.20	51.30	56.40	53.80	15.00	5.13	5.64	5.38
1er Quartile	2.90	3.10	3.00	47.90	53.30	50.60	9.90	4.79	5.33	5.06
Médiane	3.10	3.20	3.20	50.50	55.60	53.00	10.10	5.05	5.56	5.30
3ème Quartile	3.20	3.20	3.20	51.30	56.40	53.80	11.30	5.13	5.64	5.38
Moyenne	2.93	3.04	2.99	48.78	53.96	51.34	10.70	4.88	5.40	5.13
INDIFFERENCIE										
Nb. d'observations	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
Minimum	1.60	1.90	1.80	34.20	39.60	36.90	9.90	3.42	3.96	3.69
Maximum	3.20	3.20	3.20	51.30	56.40	53.80	15.80	5.13	5.64	5.38
1er Quartile	1.80	2.00	1.90	37.30	42.70	40.00	11.70	3.73	4.27	4.00
Médiane	1.90	2.00	2.00	39.40	44.80	42.10	13.70	3.94	4.48	4.21
3ème Quartile	2.50	2.90	2.60	45.30	50.60	48.00	14.50	4.53	5.06	4.80
Moyenne	2.20	2.35	2.29	40.84	46.17	43.51	13.30	4.08	4.62	4.35
MICASCHISTES										
Nb. d'observations	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00
Minimum	1.60	1.90	1.80	32.10	37.30	34.70	9.90	3.21	3.73	3.47
Maximum	3.20	3.20	3.20	51.30	56.40	53.80	16.20	5.13	5.64	5.38
1er Quartile	1.80	2.00	1.90	38.30	43.80	41.00	11.50	3.83	4.38	4.10
Médiane	1.90	2.00	2.00	39.40	44.80	42.10	13.70	3.94	4.48	4.21
3ème Quartile	2.90	3.10	3.00	46.20	51.50	48.80	14.40	4.62	5.15	4.88
Moyenne	2.24	2.38	2.32	41.56	46.91	44.22	13.09	4.16	4.69	4.42
Représenté cartographiquement										

Annexe 14

Représentation des conductivités thermiques et puissances linéaires pour chaque formation géologique à l'aide de la méthode des « boîtes à moustaches de Tuckey »

Représentation des conductivités thermiques et des puissances linéaires par mètre de sonde à l'aide des "Boîtes à moustache de Tuckey" pour chaque unité fonctionnelle (formation géologique)

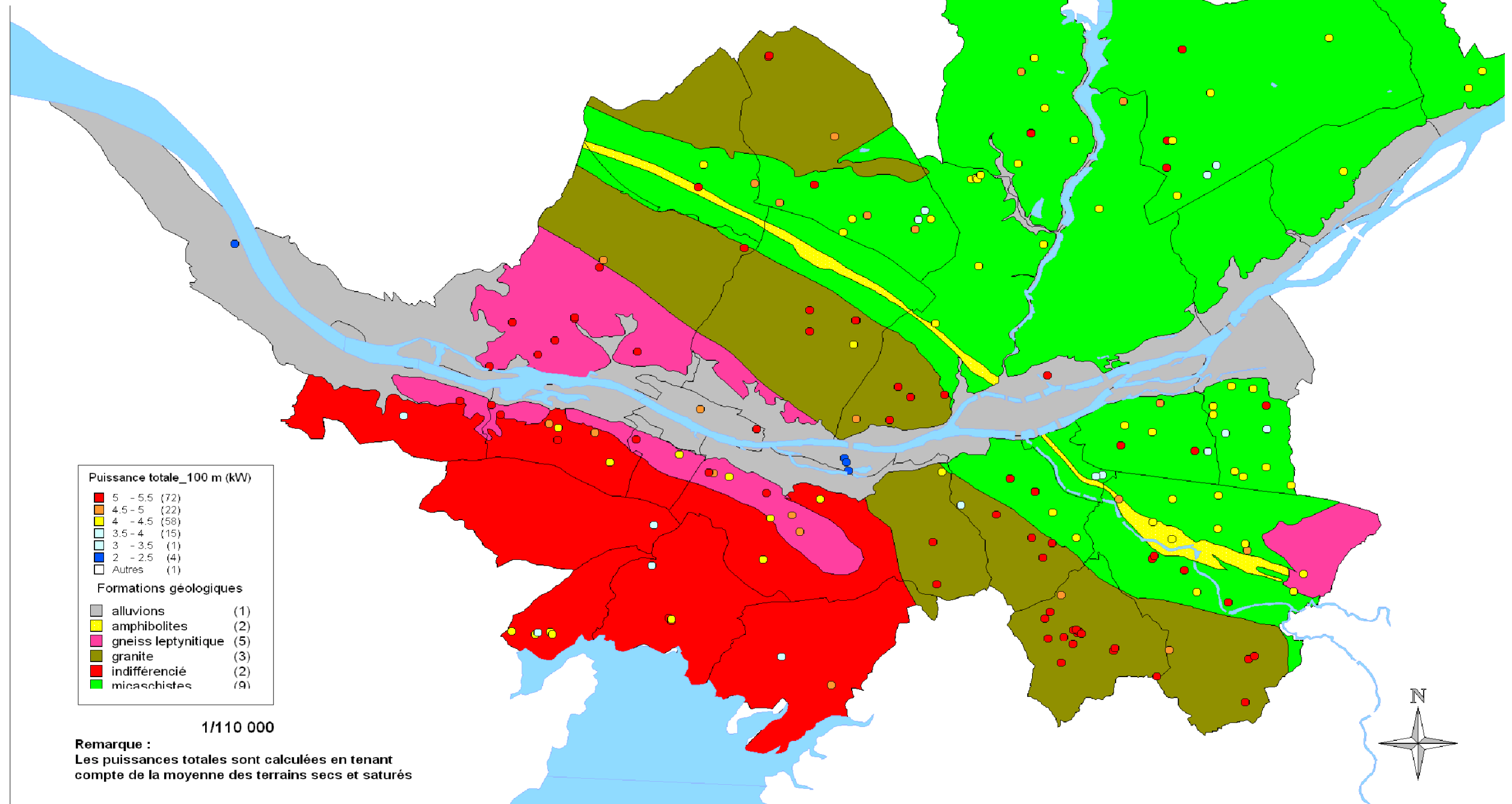


Annexe 15

Conductivités thermiques et puissances linéaires pour chaque formation géologique (traitement statistique) et puissances totales calculées au droit de chaque forage

TRAITEMENT STATISTIQUE POUR CHAQUE FORMATION GEOLOGIQUE ET PUISSANCES TOTALES CALCULEES POUR UNE SONDGE GEOTHERMIQUE DE 100 M AU DROIT DE CHAQUE FORAGE

Formation	Nb valeurs	Conductivité thermique (W/mK)				Puissance linéaire (W/m)				Puissance totale (kW)			
		1er quartile	Médiane	3ème quartile	Moy	1er quartile	Médiane	3ème quartile	Moy	1er quartile	Médiane	3ème quartile	Moy
alluvions	7	1.3	1.5	2.9	2.64	35.98	37.1	51.03	42.6	3.59	3.71	5.1	4.26
amphibolites	4	1.98	2.4	2.9	2.48	42.58	45.95	49.85	46.5	4.26	4.6	4.99	4.65
gneiss leptynitique	20	2.8	3	3.2	2.84	48.6	50.6	53.2	49.7	4.86	5.06	5.32	4.97
granite	41	3	3.2	3.2	2.99	50.6	53	53.8	51.3	5.06	5.3	5.38	5.13
indifférencié	21	1.9	2	2.6	2.29	40	42.1	48	43.5	4	4.21	4.8	4.35
micaschistes	77	1.9	2	3	2.32	41	42.1	48.8	44.2	4.1	4.21	4.88	4.42



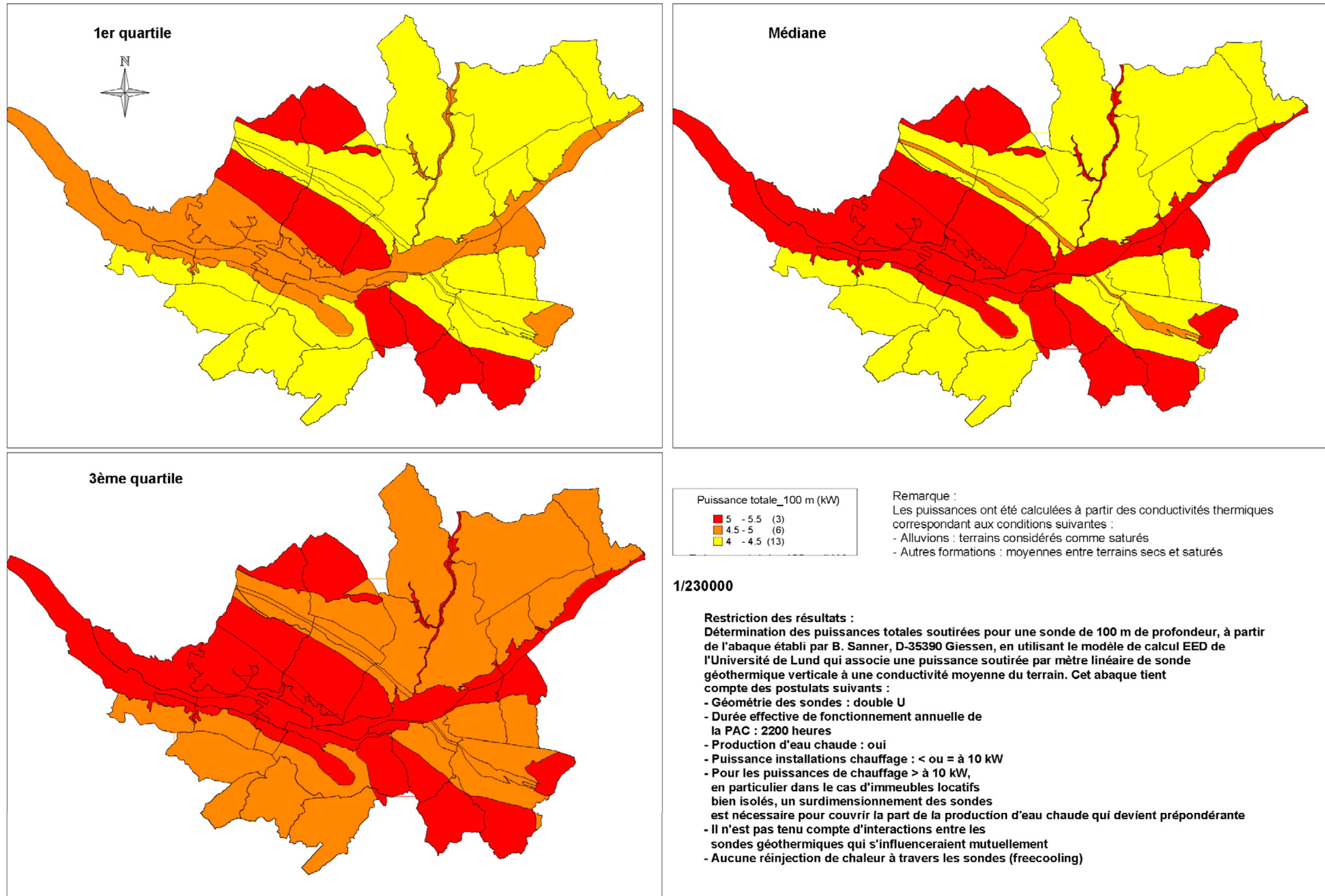
Annexe 16

Potentiel géothermique pour l'implantation des sondes géothermiques verticales

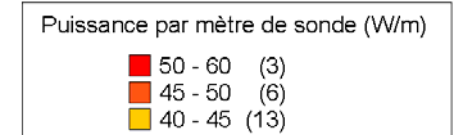
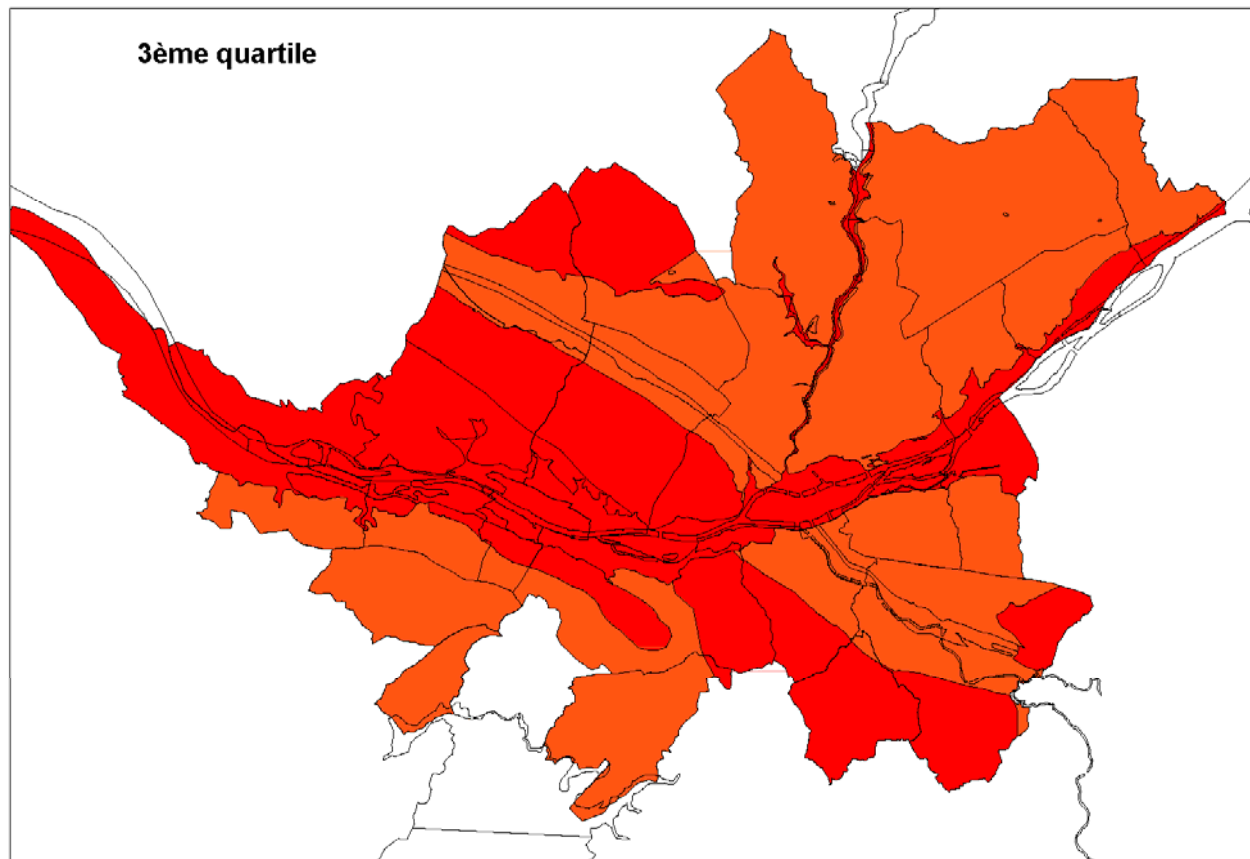
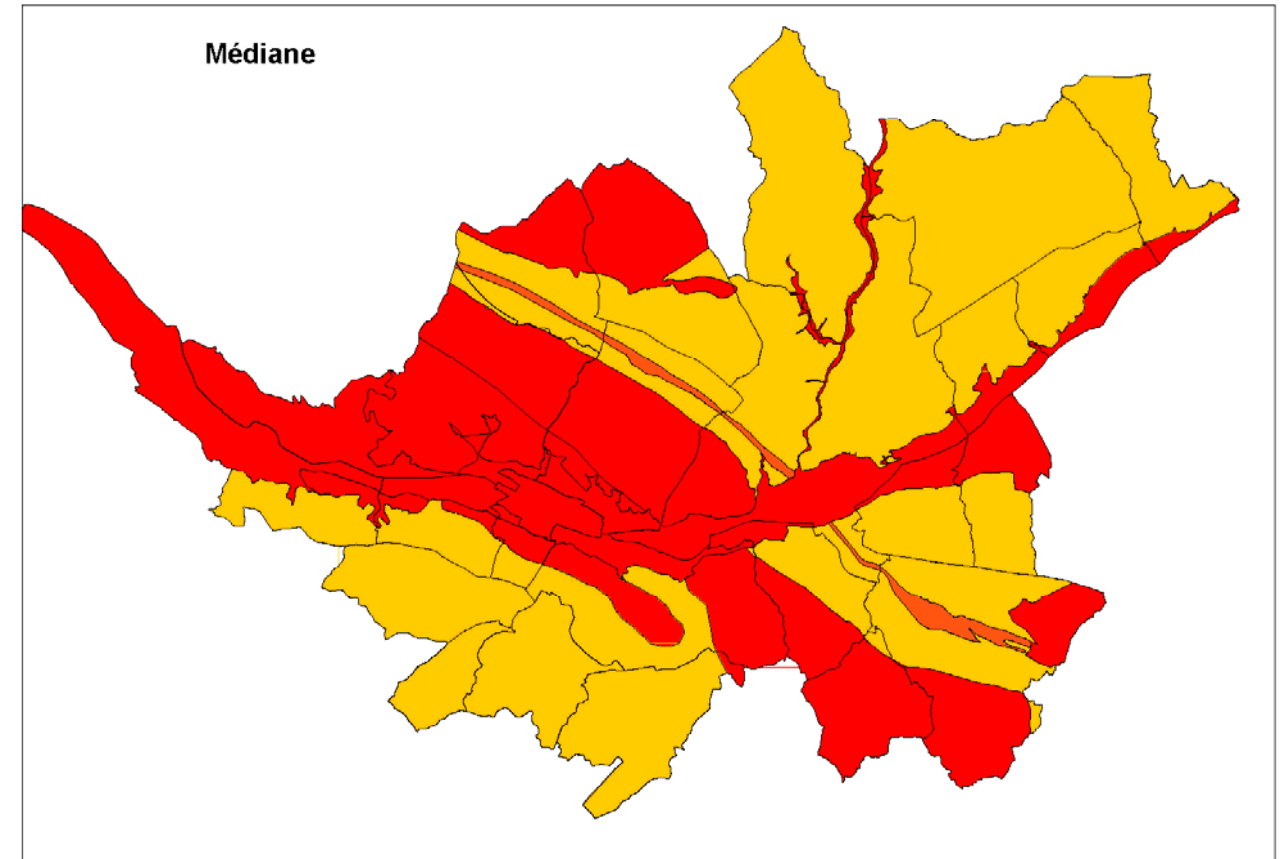
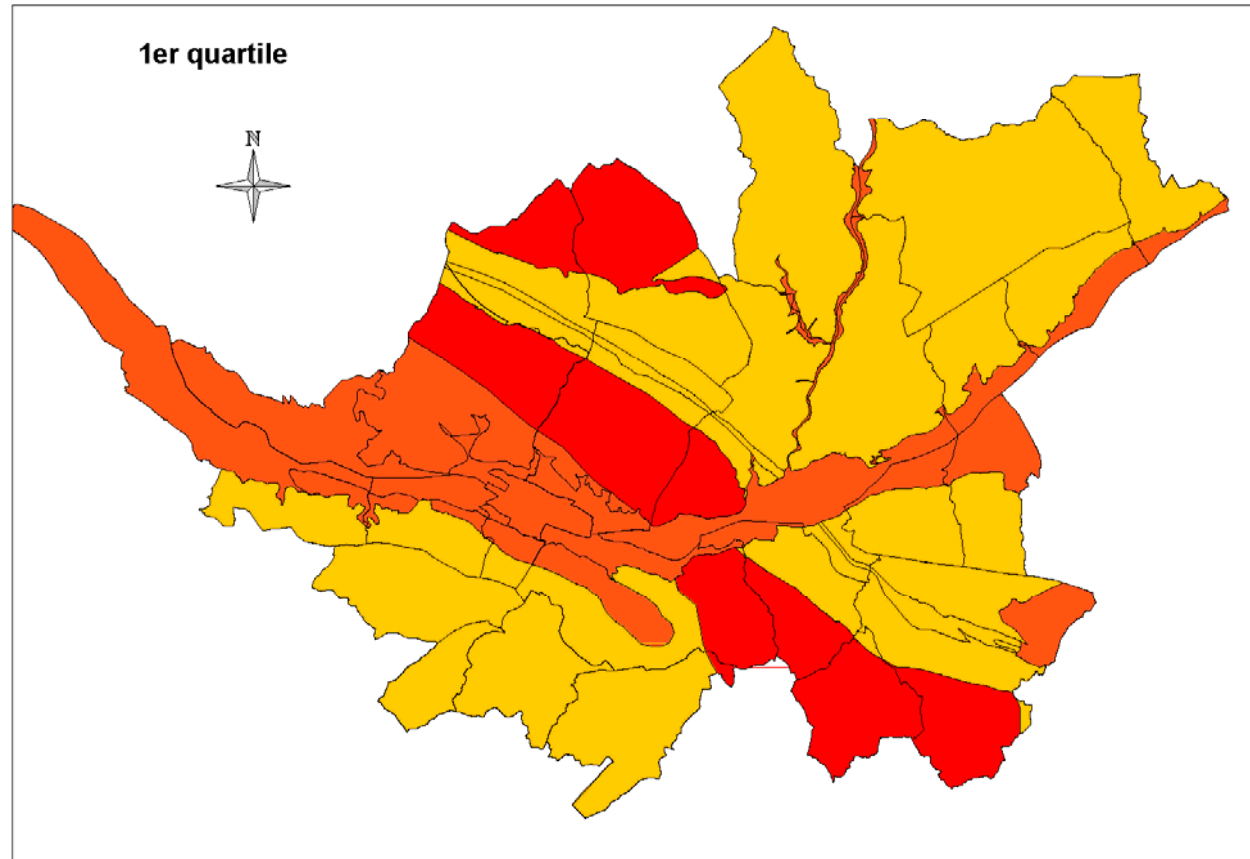
Puissance totale (kW) pour une sonde de 100 m et puissance linéaire (W/m)

**Saturation des terrains :
Alluvions totalement saturées ;
Autres formations : moyenne terrains secs et saturés**

POTENTIEL GEOTHERMIQUE : PUISSANCE TOTALE (kW) POUR UNE SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE DE 100 M
SATURATION DES TERRAINS : ALLUVIONS TOTALEMENT SATURES



POTENTIEL GEOTHERMIQUE : PUISSANCE LINEAIRE PAR METRE DE SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE (W/m)
SATURATION DES TERRAINS : ALLUVIONS TOTALEMENT SATURES



Remarque :
 Les puissances linéaires ont été calculées à partir des conductivités thermiques correspondant aux conditions suivantes :
 - Alluvions : terrains considérés comme saturés
 - Autres formations : moyennes entre terrains secs et saturés

1/230 000

Restriction des résultats :

Détermination des puissances soutirées par ml de forage à partir de l'abaque établi par B. Sanner, D-35390 Giessen, en utilisant le modèle de calcul EED de l'Université de Lund qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain. Cet abaque tient compte des postulats suivants :

- Géométrie des sondes : double U
- Durée effective de fonctionnement annuelle de la PAC : 2200 heures
- Production d'eau chaude : oui
- Puissance installations chauffage : < ou = à 10 kW
- Pour les puissances de chauffage > à 10 kW, en particulier dans le cas d'immeubles locatifs bien isolés, un surdimensionnement des sondes est nécessaire pour couvrir la part de la production d'eau chaude qui devient prépondérante
- Il n'est pas tenu compte d'interactions entre les sondes géothermiques qui s'influenceraient mutuellement
- Aucune réinjection de chaleur à travers les sondes (freecooling)

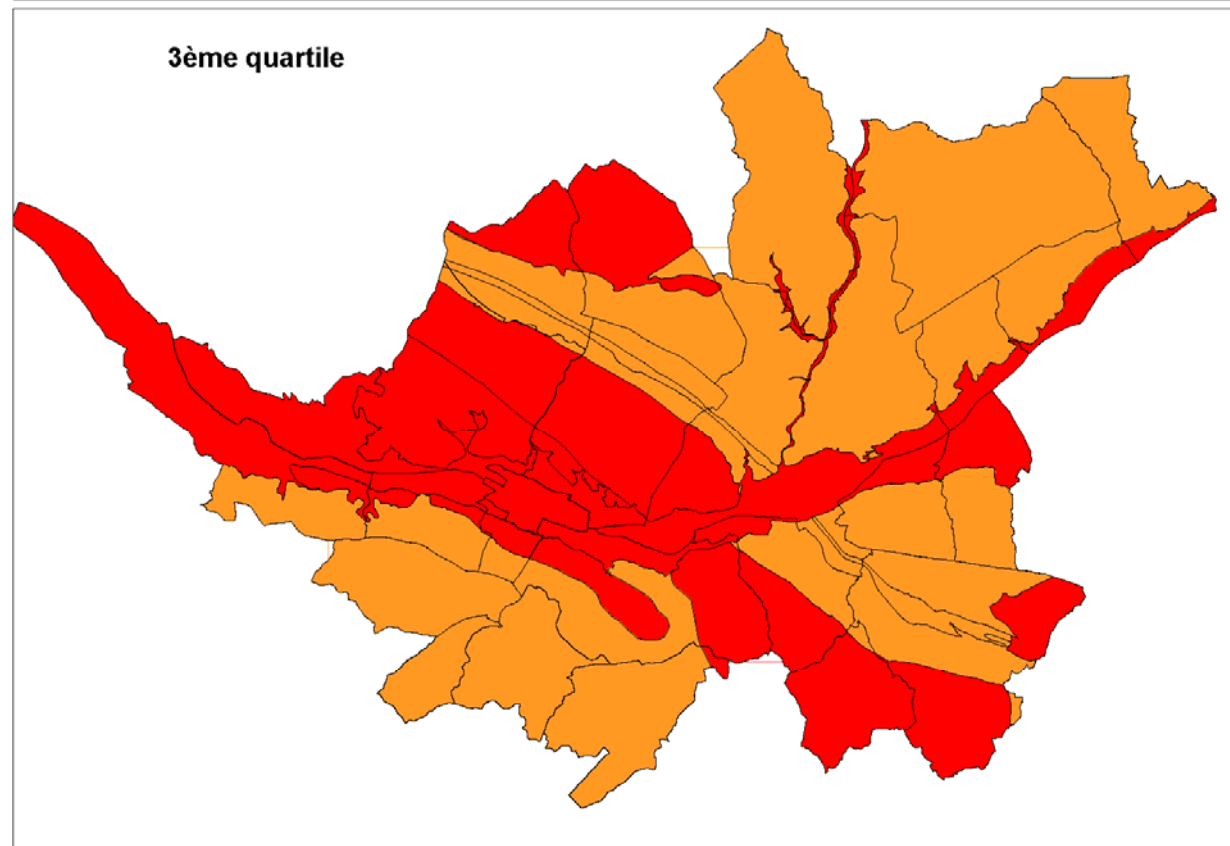
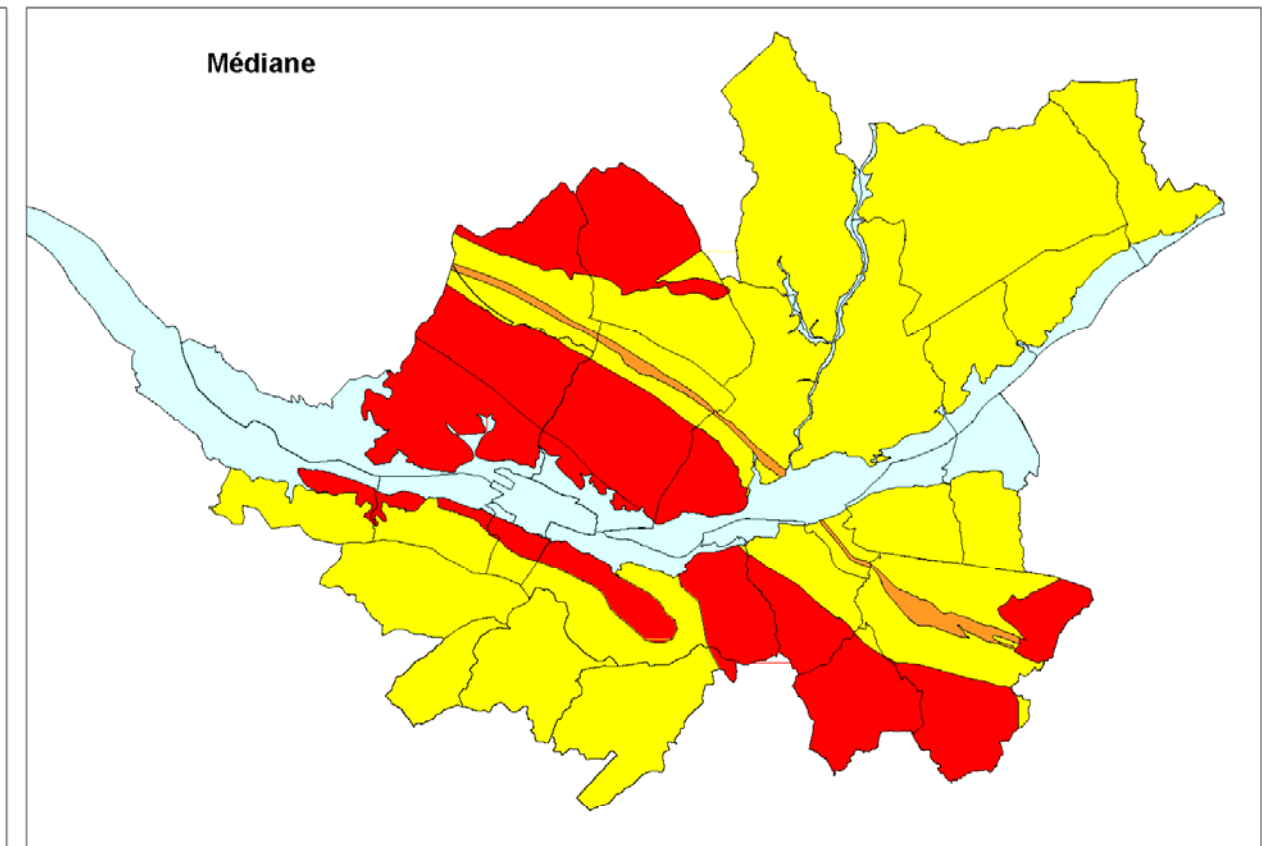
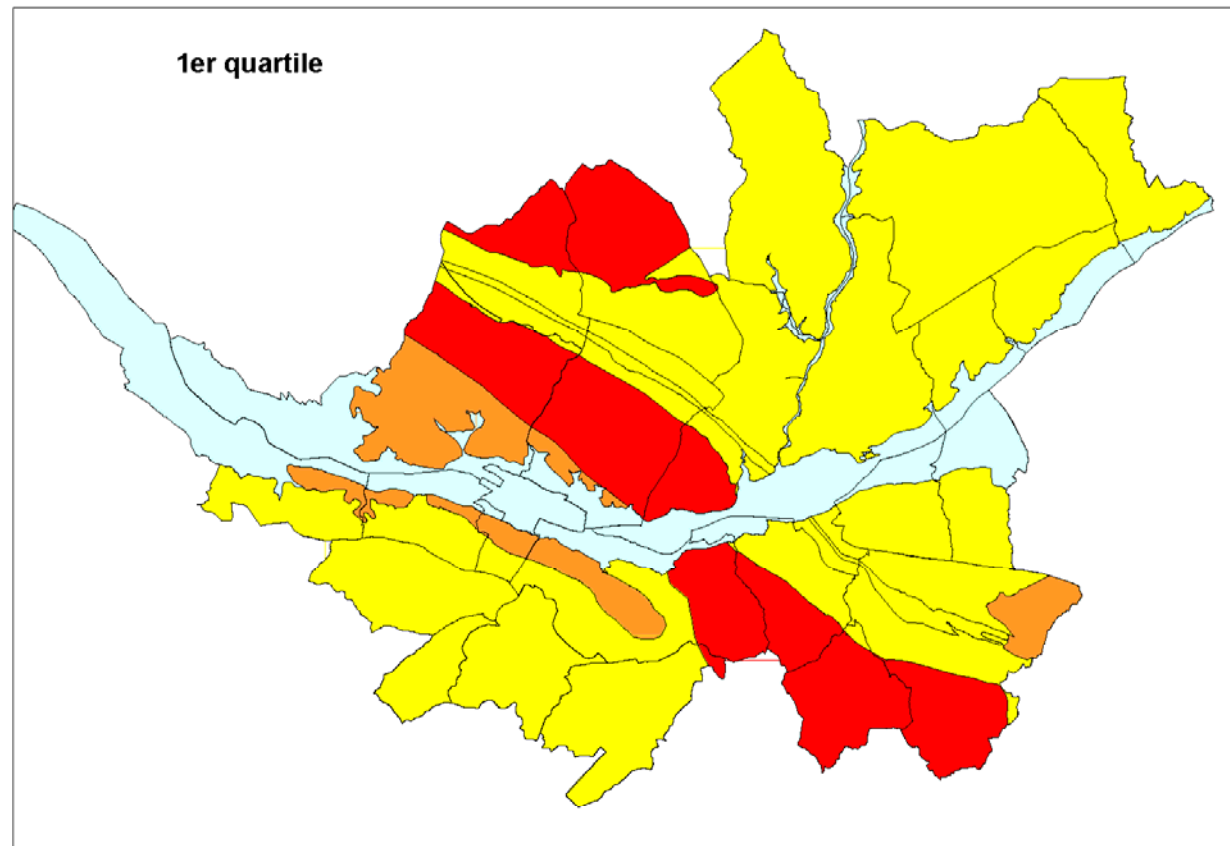
Annexe 17

Potentiel géothermique pour l'implantation des sondes géothermiques verticales

Puissance totale (kW) pour une sonde de 100 m et puissance linéaire (W/m)

**Saturation des terrains :
Moyenne terrains secs et saturés**

POTENTIEL GEOTHERMIQUE : PUISSANCE TOTALE (kW) POUR UNE SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE DE 100 M
SATURATION DES TERRAINS : MOYENNE TERRAINS SECS ET SATURES



Puissance totale_100 m (kW)	
■ 5 - 5.5	(3)
■ 4.5 - 5	(5)
■ 4 - 4.5	(13)
■ 3.5 - 4	(1)

Remarque :
 Les puissances ont été calculées à partir des conductivités thermiques correspondant à la moyennes entre terrains secs et saturés

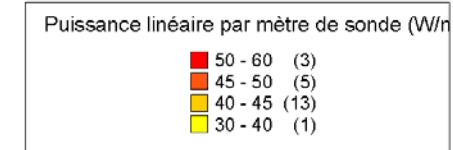
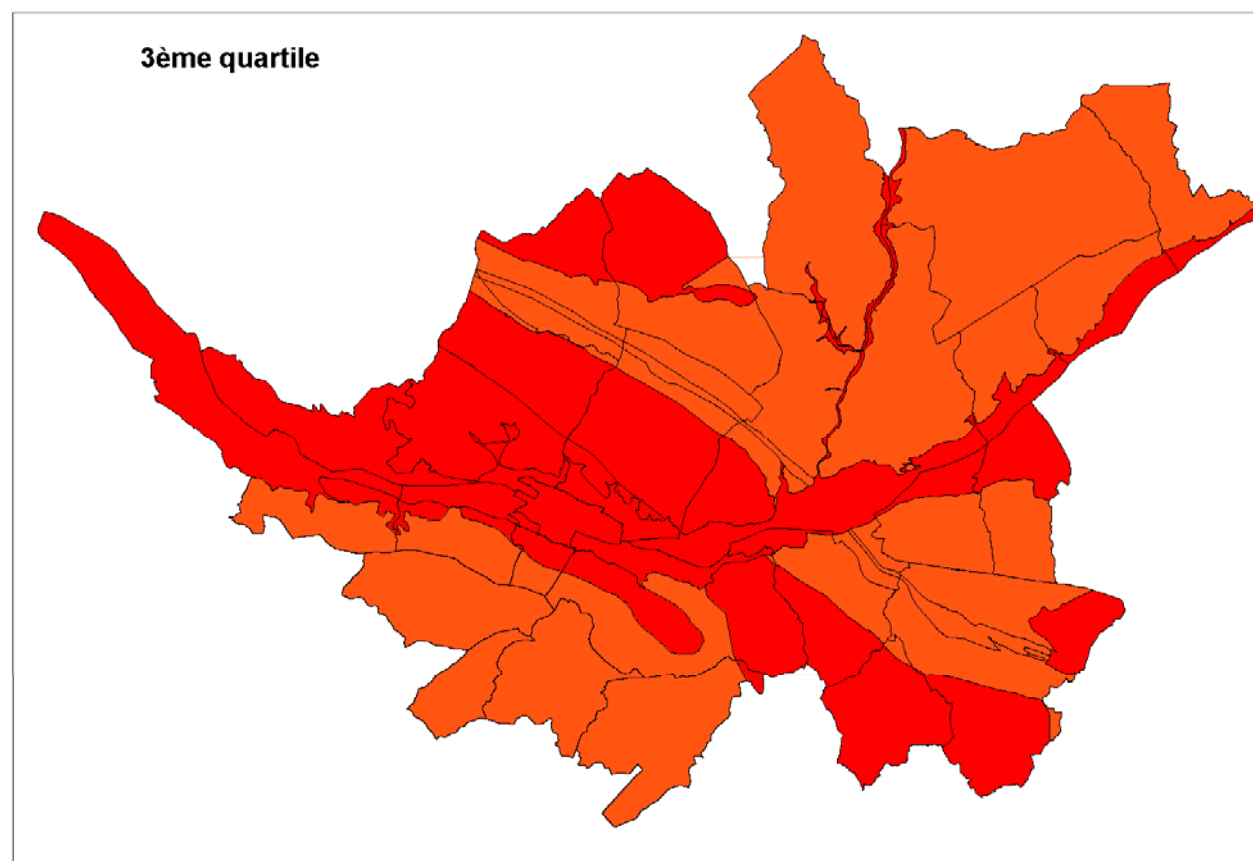
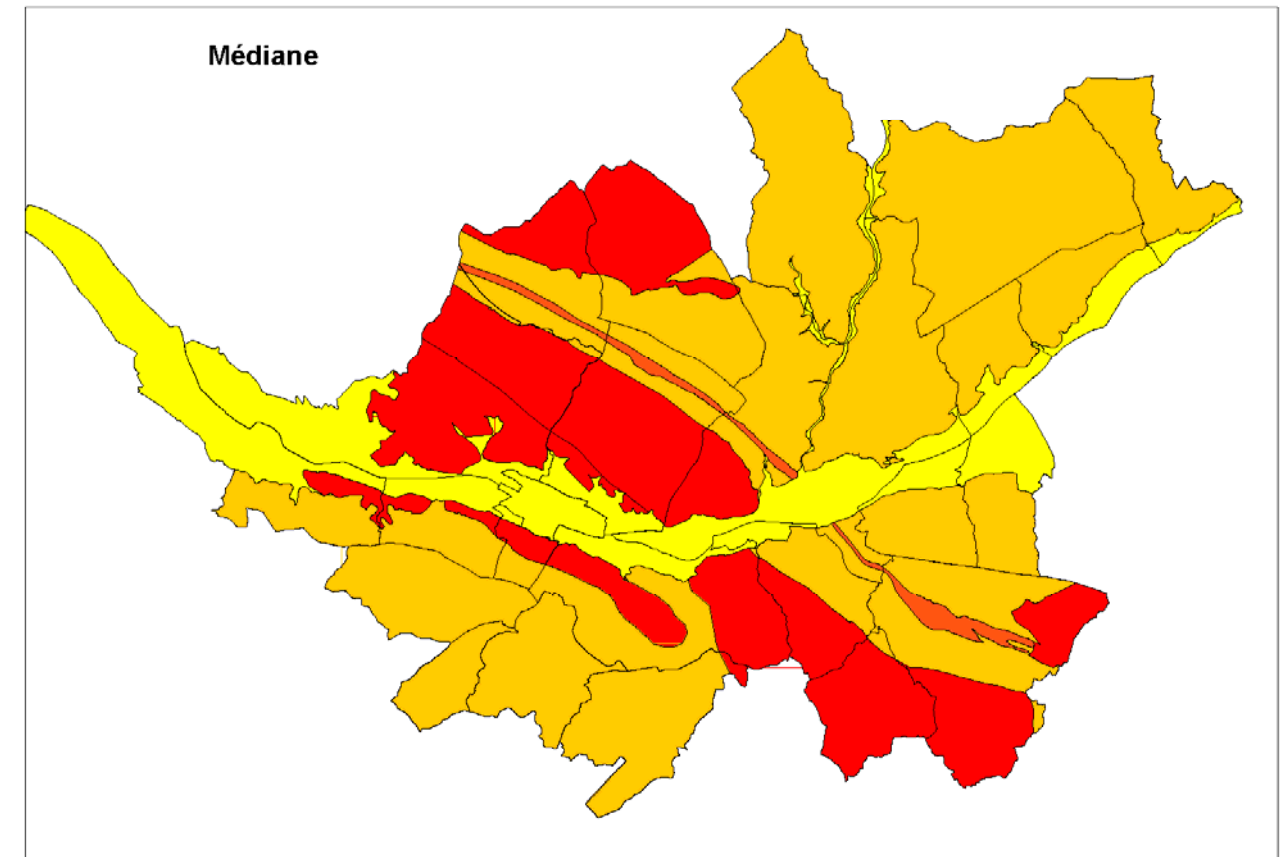
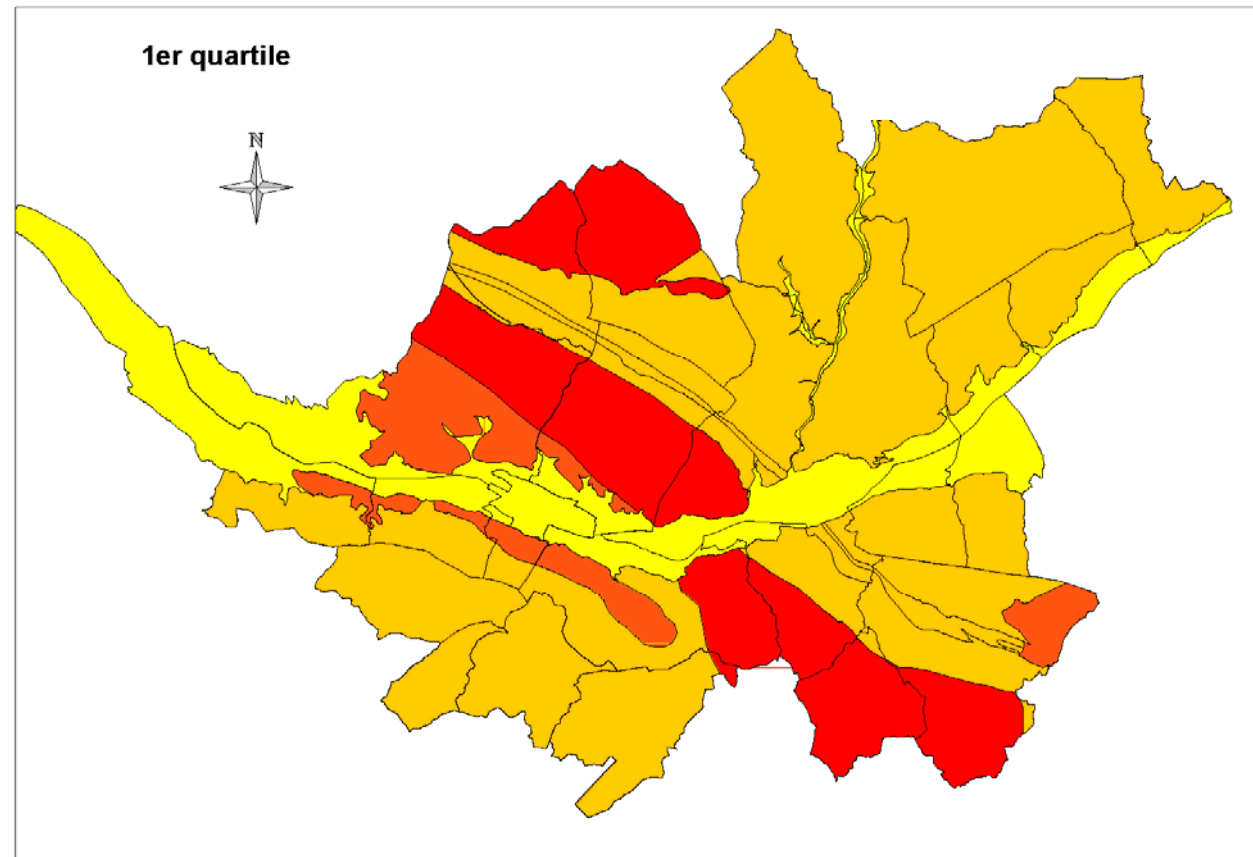
1/23000

Restriction des résultats :

- Détermination des puissances totales soutirées pour une sonde de 100 m de profondeur, à partir de l'abaque établi par B. Sanner, D-35390 Giessen, en utilisant le modèle de calcul EED de l'Université de Lund qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain. Cet abaque tient compte des postulats suivants :
- Géométrie des sondes : double U
 - Durée effective de fonctionnement annuelle de la PAC : 2200 heures
 - Production d'eau chaude : oui
 - Puissance installations chauffage : < ou = à 10 kW
 - Pour les puissances de chauffage > à 10 kW, en particulier dans le cas d'immeubles locatifs bien isolés, un surdimensionnement des sondes est nécessaire pour couvrir la part de la production d'eau chaude qui devient prépondérante
 - Il n'est pas tenu compte d'interactions entre les sondes géothermiques qui s'influenceraient mutuellement
 - Aucune réinjection de chaleur à travers les sondes (freecooling)

POTENTIEL GEOTHERMIQUE : PUISSANCE LINEAIRE PAR METRE DE SONDE GEOTHERMIQUE VERTICALE (W/m)

SATURATION DES TERRAINS : MOYENNE TERRAINS SECS ET SATURES



Remarque :
Les puissances ont été calculées à partir des conductivités thermiques correspondant à la moyenne entre terrains secs et saturés

1/230 000

Restriction des résultats :

Détermination des puissances soutirées par ml de forage à partir de l'abaque établi par B. Sanner, D-35390 Giessen, en utilisant le modèle de calcul EED de l'Université de Lund qui associe une puissance soutirée par mètre linéaire de sonde géothermique verticale à une conductivité moyenne du terrain. Cet abaque tient compte des postulats suivants :

- Géométrie des sondes : double U
- Durée effective de fonctionnement annuelle de la PAC : 2200 heures
- Production d'eau chaude : oui
- Puissance installations chauffage : < ou = à 10 kW
- Pour les puissances de chauffage > à 10 kW, en particulier dans le cas d'immeubles locatifs bien isolés, un surdimensionnement des sondes est nécessaire pour couvrir la part de la production d'eau chaude qui devient prépondérante
- Il n'est pas tenu compte d'interactions entre les sondes géothermiques qui s'influenceraient mutuellement
- Aucune réinjection de chaleur à travers les sondes (freecooling)

Annexe 18

Rappels de statistiques et présentation des boîtes à moustaches de Tukey

Quelques définitions

Les variables quantitatives nécessitent trois types de mesure pour avoir une idée complète de la distribution des données : les mesures de tendance centrale, les mesures de position et les mesures de dispersion, c'est-à-dire la mesure de la répartition des données autour de cette position centrale.

Quelques éléments de statistiques sont présentés ci-après, en fonction de leur appartenance à l'une ou l'autre des trois catégories :

- **la médiane**, qui constitue un indice de mesure des tendances centrales, est la valeur qui partage la distribution d'une série en deux parties égales en nombre d'observations ;
- **la moyenne**, qui est également un indice de mesure des tendances centrales, est la valeur égale à la somme des observations divisées par le nombre d'observations ;
- **les quartiles**, qui sont des mesures de position, divisent un nombre d'observations en quatre parties égales. Le premier quartile correspond à 25% des effectifs les plus petits et le troisième quartile à 75% des effectifs les plus petits ;
- **l'intervalle interquartile** représente l'intervalle comprenant 50% des observations les plus au centre de la distribution.

Les boîtes à moustaches de Tukey

Les données de débits ont été traitées par la méthode des « boîtes à moustaches de Tukey » qui permet de représenter schématiquement une distribution (Figure 1). Cette représentation est très intéressante pour visualiser rapidement les points aberrants qui doivent faire l'objet d'une attention particulière.

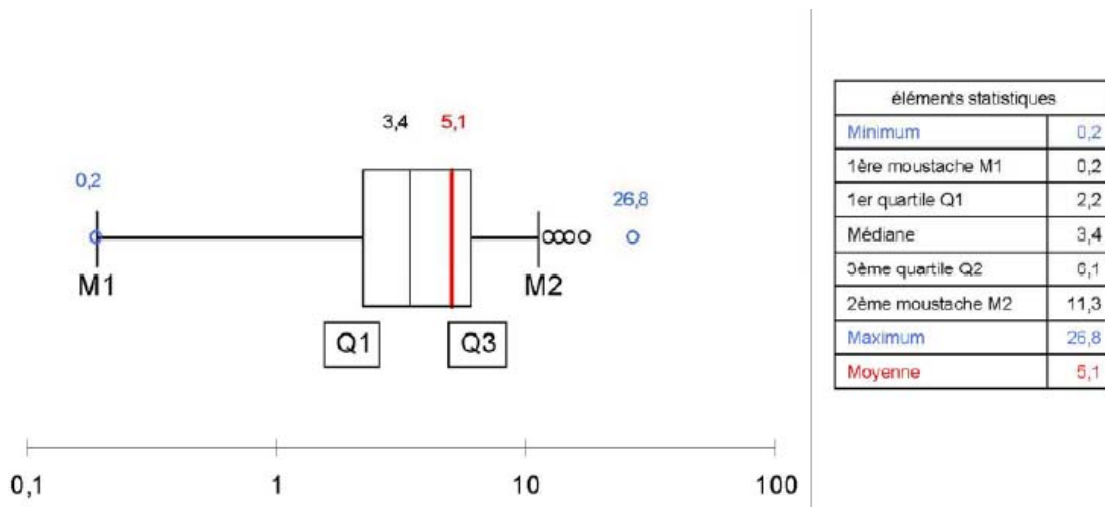


Figure 1 : Exemple de représentation par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

Plusieurs paramètres sont indiqués sur une boîte à moustaches :

- le premier quartile Q1 (25 % des effectifs) et le troisième quartile Q3 (75 % des effectifs), qui correspondent aux deux extrémités de la boîte ;
- la valeur du deuxième quartile Q2 (50 % des effectifs) ou médiane, représentée par un trait vertical à l'intérieur de la boîte ;
- les deux « moustaches » inférieure et supérieure représentées par les segments horizontaux de part et d'autre de la boîte. Ces deux moustaches délimitent les valeurs dites adjacentes qui sont déterminées à partir de l'écart interquartile (Q3-Q1) ;
- les valeurs dites extrêmes, atypiques ou anormales et qui sont situées au-delà des valeurs adjacentes sont individualisées. Elles sont représentées par les cercles noirs ;
- les valeurs des minimum et maximum sont également individualisées et sont représentées par les cercles bleus ;

- la valeur de la moyenne représentée par une barre ou une croix rouge.

L'extrémité de la moustache inférieure est la valeur minimum dans les données qui est supérieure à la valeur frontière basse : $Q1 - 1,5 * (Q3 - Q1)$.

L'extrémité de la moustache supérieure est la valeur maximum dans les données qui est inférieure à la frontière haute : $Q3 + 1,5 * (Q3 - Q1)$ (Figure 2).

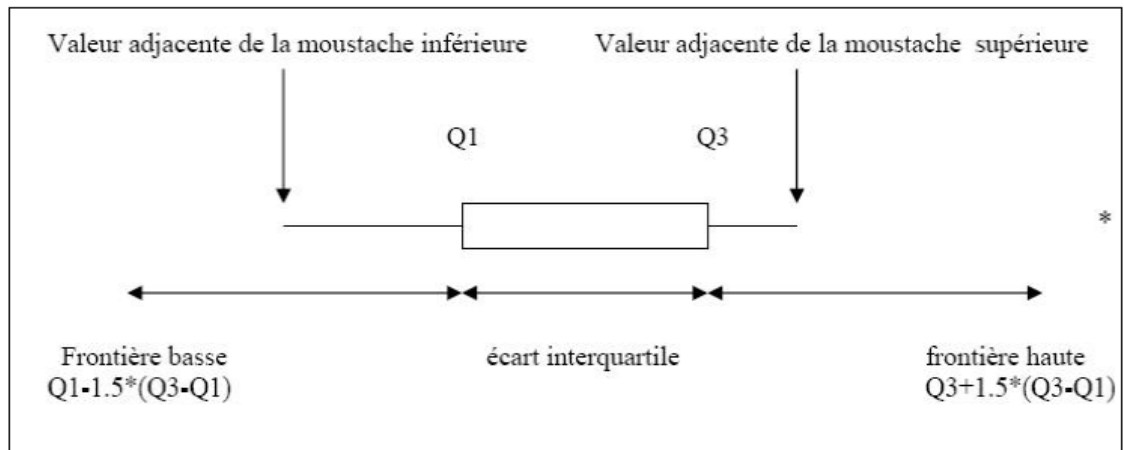


Figure 2 : Evaluation des valeurs des extrémités des moustaches

Dans la boîte à moustaches définie par Tukey, la boîte a pour longueur la distance interquartile ($Q3 - Q1$), et les moustaches sont basées généralement sur **1,5** fois la longueur de la boîte. Dans ce cas, une valeur est atypique si elle dépasse de 1,5 fois l'écart interquartile audessous du 1^{er} quartile ou au dessus du 3^{ème} quartile.

En se basant sur les quartiles, c'est-à-dire des statistiques d'ordre, la médiane et l'écart interquartile ne sont jamais influencés par les valeurs extrêmes. La valeur 1,5 est selon Tukey une valeur pragmatique (*rule of thumb*), qui a une raison probabiliste. Si une variable suit une distribution normale, alors la zone délimitée par la boîte et les moustaches devrait contenir **99,3 %** des observations. On ne devrait donc trouver que **0,7 %** d'observations atypiques (*outliers*). Si le coefficient valait 1, la probabilité serait de **0,957**, et elle vaudrait **0,999** si le coefficient était égal à 2.

Pour Tukey, la valeur 1,5 est donc un compromis pour retenir comme atypiques assez d'observations mais pas trop d'observations.

Annexe 19

Représentation cartographique du traitement statistique effectué sur les débits de forages connus en BSS

Traitement statistique des débits de forage (exprimés en m3/h)							
Formation	Nbre Valeurs	1er quartile	Médiane	3ème quartile	Moy.	Valeurs atypiques	Remarques
Alluvions de la Loire	11	50,0	55,0	62,5	60,7	18,2%	9 sur 11 sont issues du champ captant de Basse-Goulaine : hétérogénéité
Amphibolites	15	2,0	3,0	5,3	3,7	0,0%	
Gneiss leptynitique	42	2,1	4,5	7,8	6,0	4,8%	
Granite	85	1,8	4,0	7,0	5,3	4,7%	
Micaschistes	221	2,0	4,0	6,0	4,9	2,7%	
Socle indéterminé	24	2,2	5,5	8,0	7,6	12,5%	Echantillon très hétérogène
Socle (tous)	391	2,0	4,0	7,0	5,2	2,3%	

Légende

Débits de forage connus en BSS (m3/h)

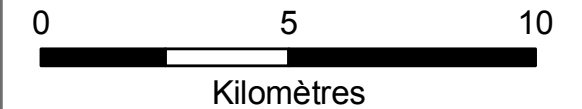
- 0,0 - 2,0
- 2,1 - 5,0
- 5,1 - 10,0
- 10,1 - 25,0
- 25,1 - 120,0

□ Communes de Nantes Métropole

Regroupement en unités hydrogéologiques

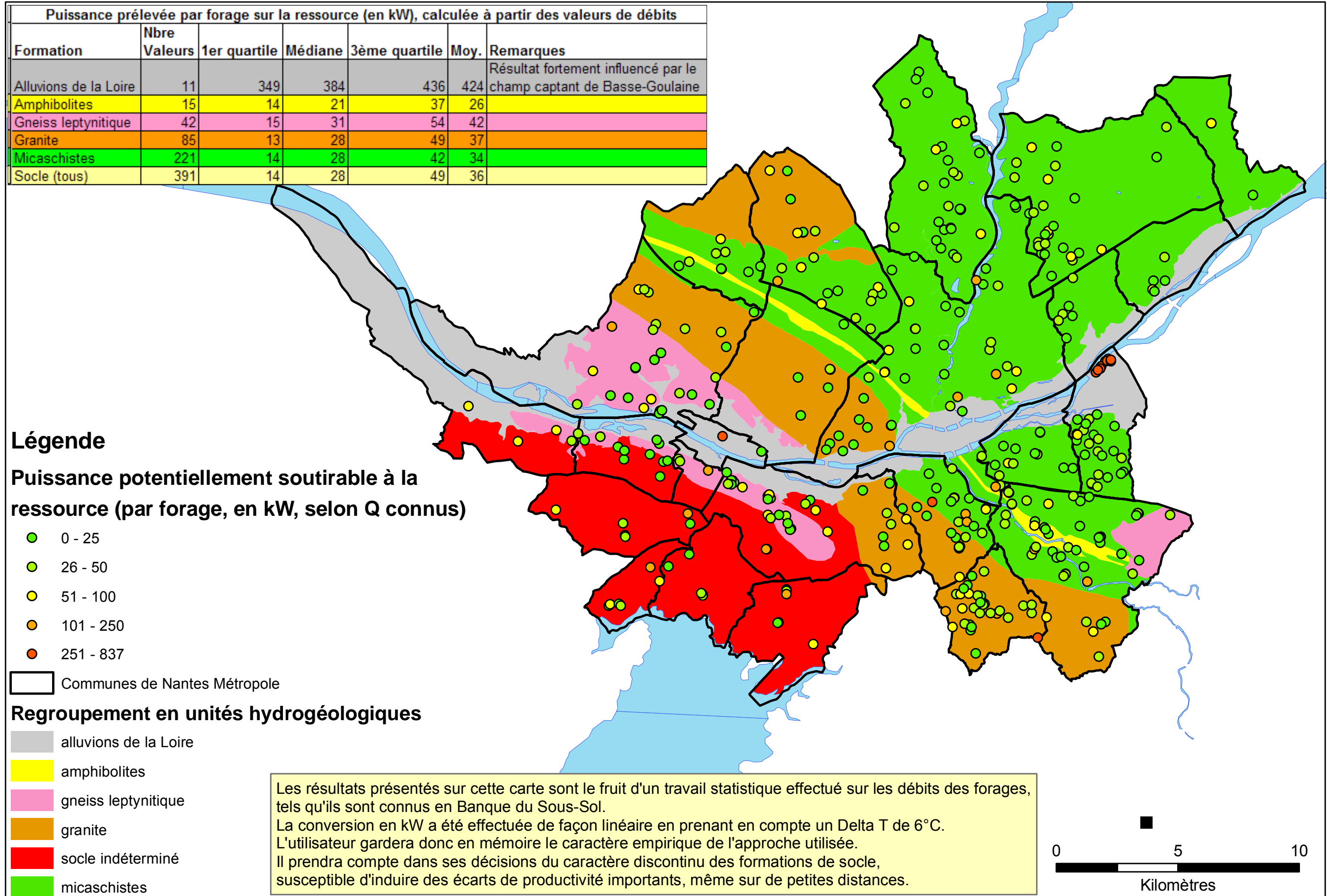
- alluvions de la Loire
- amphibolites
- gneiss leptynitique
- granite
- socle indéterminé
- micaschistes

Les résultats présentés sur cette carte sont le fruit d'un travail statistique effectué sur les débits des forages, tels qu'ils sont connus en Banque du Sous-Sol. L'utilisateur gardera donc en mémoire le caractère empirique de l'approche utilisée. Il prendra compte dans ses décisions du caractère discontinu des formations de socle, susceptible d'induire des écarts de productivité importants, même sur de petites distances.



Annexe 20

Puissance potentiellement soutirable à la ressource par pompage en nappe (en kW)



Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Annexe 21

Garantie AQUAPAC[®]

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole



**GARANTIE SUR LA RESSOURCE
EN EAU SOUTERRAINE
A FAIBLE PROFONDEUR
UTILISEE
A DES FINS ENERGETIQUES**

Les nappes d'eau souterraines de faible profondeur recèlent un potentiel énergétique utilisable grâce aux pompes à chaleur.

Cependant, il peut exister une incertitude sur les conditions d'utilisation de la ressource naturelle qui dépend des caractéristiques géologiques locales.

La garantie **AQUAPAC**[®], créée par l'**ADEME**, le **BRGM**, et **EDF** prend en charge la couverture financière de ce risque géologique,

Gestion administrative et financière du système de garantie :
SAF-ENVIRONNEMENT
195, Boulevard Saint Germain
75007 PARIS
Tél : 01 58 50 76 76
Fax : 01 58 50 06 80

Herve.raimbault@caissedesdepots.fr

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

AQUAPAC est une assurance qui couvre les risques **géologiques** liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère située en général à **moins de 100 m de profondeur**, puis au maintien de ses capacités dans le temps. Cette assurance s'applique en faveur des installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique **supérieure à 30 KW**. C'est donc une double garantie, dont les deux aspects sont indissociables :

- **La garantie de recherche** couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu,

- **La garantie de pérennité** couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource, en cours d'exploitation.

AQUAPAC assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage et le transfert de la ressource jusqu'à l'échangeur eau-eau et sa réinjection.

La garantie ne concerne pas les éventuels incidents de chantier, ni les conséquences des défauts de conception, de réalisation ou de maintenance.

Le Maître d'Ouvrage conserve l'entière responsabilité du respect de la réglementation, du choix des bureaux d'études ou entreprises, et de la réalisation de l'opération.

En aucun cas, **AQUAPAC** n'a pour objet de se substituer aux polices d'assurances dommage-ouvrage ou de responsabilité décennale au titre desquelles les opérateurs doivent normalement être couverts.

BENEFICIAIRES DE LA GARANTIE AQUAPAC

Les Maîtres d'ouvrages ou leurs mandataires (bureaux d'études, entreprises, prestataires de services, exploitants) désireux de se prémunir vis-à-vis des aléas géologiques liés à l'utilisation énergétique de l'eau souterraine à des fins de **chauffage** et/ou de **climatisation** peuvent souscrire la garantie **AQUAPAC**.

Cette garantie s'applique à tous les secteurs économiques: habitat, tertiaire, industriel ou agricole, qu'il s'agisse de bâtiments neufs ou existants, et quelle que soit la puissance de l'installation thermique.

ATTRIBUTION DE LA GARANTIE

Un Comité composé des représentants de l'ADEME, du BRGM, et d'EDF, assisté de la SAF-Environnement, décide de l'attribution, ou non, de la garantie, après examen d'un dossier que le requérant aura déposé auprès de la Saf-Environnement .

Ce dossier, dont un modèle peut être demandé auprès de la Saf-Environnement doit comprendre :

- **L'identification** de l'opération concernée, sa localisation et ses différents acteurs,

- **Une fiche descriptive** des besoins thermiques, et du mode d'évaluation des besoins en eau,

- **Une étude de faisabilité du projet** comportant une évaluation des contraintes réglementaires et environnementales, les caractéristiques de la ressource, le mode de captage et de réinjection, les essais et mesures hydrogéologiques prévus, la description de l'installation et des ouvrages de sous-sol et de surface,

- **les éléments économiques** comprenant les coûts prévisionnels d'investissement et de fonctionnement : études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, échangeur, PAC,

- **Le montant des investissements** pour lesquels la garantie est demandée, qui devra être clairement établi.

Si l'avis du Comité **AQUAPAC** est favorable, un contrat est alors signé entre la SAF et le Maître d'Ouvrage qui verse **en une seule fois, et au moment de la souscription de chaque garantie**, les cotisations et commissions forfaitaires suivantes :

- **Pour la garantie de recherche** :
- une cotisation égale à **5%** du montant des ouvrages garantis en recherche,

- **Pour la garantie de pérennité** :
- une cotisation égale à **4%** du montant des ouvrages garantis en pérennité,

FONCTIONNEMENT DE LA GARANTIE

Garantie de recherche

Risques couverts

Le risque couvert est celui de l'échec quant à la découverte du débit d'eau maximal de production fixé dans le contrat de garantie comme suffisant au fonctionnement correct des installations, à partir des éléments techniques fournis.

Le risque couvert est aussi celui de l'échec quant à la possibilité de réinjection du débit.

Montant garanti en recherche

Le montant garanti en recherche, fixé dans le contrat, est égal au coût réel des études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, désignés dans la demande de recherche, (plafonné au montant prévisionnel), déduction faite des subventions reçues.

Lorsque plusieurs forages sont prévus, le contrat est établi pour le premier, et étendu par avenant au suivant après chaque constat de succès.

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Fonctionnement de la garantie

La garantie prend effet dès la signature du contrat et le versement des primes de la garantie de recherche. Le Maître d'Ouvrage peut alors faire réaliser les travaux de forage.

Il doit informer la Saf-Environnement de la date des essais et de la date de réception des ouvrages.

La capacité des ouvrages est mesurée à la fin des travaux, et le rapport de fin de forage avec les résultats des essais hydrogéologiques doit être envoyé à la Saf-Environnement

Evaluation du résultat du forage

Suivant la valeur du débit mesuré au cours des essais, il y aura succès, échec partiel ou échec total :

- *Succès* : le débit trouvé est supérieur ou égal au débit contractuel ;
- *Echec total* : le débit trouvé est inférieur à la moitié du débit contractuel ;
- *Echec partiel* : le débit trouvé est compris entre ces deux valeurs.

En cas de succès le demandeur reçoit alors l'appel de cotisation pour la garantie de pérennité, qui est accordée pour dix ans à partir de la date de réception du paiement de la cotisation correspondante.

Calcul de l'indemnité « recherche »

En cas d'échec total, le Comité AQUAPAC déclenche le versement de l'indemnité, égale au montant garanti.

En cas d'échec partiel, le Maître d'ouvrage peut néanmoins exploiter la ressource en son état et bénéficier alors de la garantie de pérennité :

- la nouvelle valeur du débit exploitable est définie par un avenant au contrat de garantie ;
- le montant de l'indemnité est alors proportionnel au déficit en eau sur le débit garanti initial

Garantie de pérennité

Risques couverts :

Sous réserve d'un entretien correct des ouvrages et des équipements d'exploitation, attesté par un carnet de maintenance ou des factures de prestations de services, la garantie de pérennité couvre les risques suivants :

a) *diminution des débits d'exhaure ou de réinjection* au-dessous de la valeur garantie :

- sinistre partiel : le débit diminue et atteint une valeur comprise entre la valeur garantie et la moitié de cette valeur.

- sinistre total : le débit atteint une valeur inférieure à la moitié du débit de garantie

b) *dommages* aux matériels de puisage et de réinjection et/ou aux équipements du circuit primaire, y compris l'échangeur, occasionnés par des changements survenus dans les caractéristiques de la ressource dus à des causes naturelles ou de voisinage.

Durée de la Garantie

La garantie est accordée pour une période de **10 ans** à partir de la date effective de mise en service.

Elle peut être différée en cas de forage d'essai. Si ce délai dépasse 6 mois, un nouvel essai de pompage devra être effectué.

Montant garanti en pérennité

Le montant garanti, fixé par contrat, est égal au coût de l'ensemble des ouvrages primaires neufs : forages, pompes, matériels de surface, y compris l'échangeur eau-eau. Ces coûts s'entendent toutes subventions déduites.

Pour tenir compte de l'amortissement de l'installation, ce montant garanti diminue de 5 % par semestre écoulé.

En cas d'échec total, le coût prévisionnel des travaux nécessaires à la restauration fonctionnelle de l'installation, peut être également garanti.

Calcul de l'indemnité « pérennité »

L'assiette A de l'indemnisation est calculée ainsi :

a) *Diminution des débits d'exhaure ou de réinjection* :

- en cas de sinistre partiel, A = la fraction du montant garanti proportionnelle au déficit en eau,
- en cas de sinistre total, A = montant garanti

b) *Dommages* :

- en cas de poursuite de l'exploitation, A = coût réel des travaux de remise en état, plafonné au montant garanti,
- en cas d'abandon de l'exploitation, A = montant garanti.

Fonctionnement de la garantie

En cas de constat de modification des caractéristiques de la ressource de nature à perturber l'exploitation, le maître d'ouvrage ou l'exploitant adresse une déclaration de sinistre à la Saf-Environnement.

Des essais hydrogéologiques peuvent alors être réalisés par le maître d'ouvrage, en accord avec le Comité qui pourra mandater un expert.

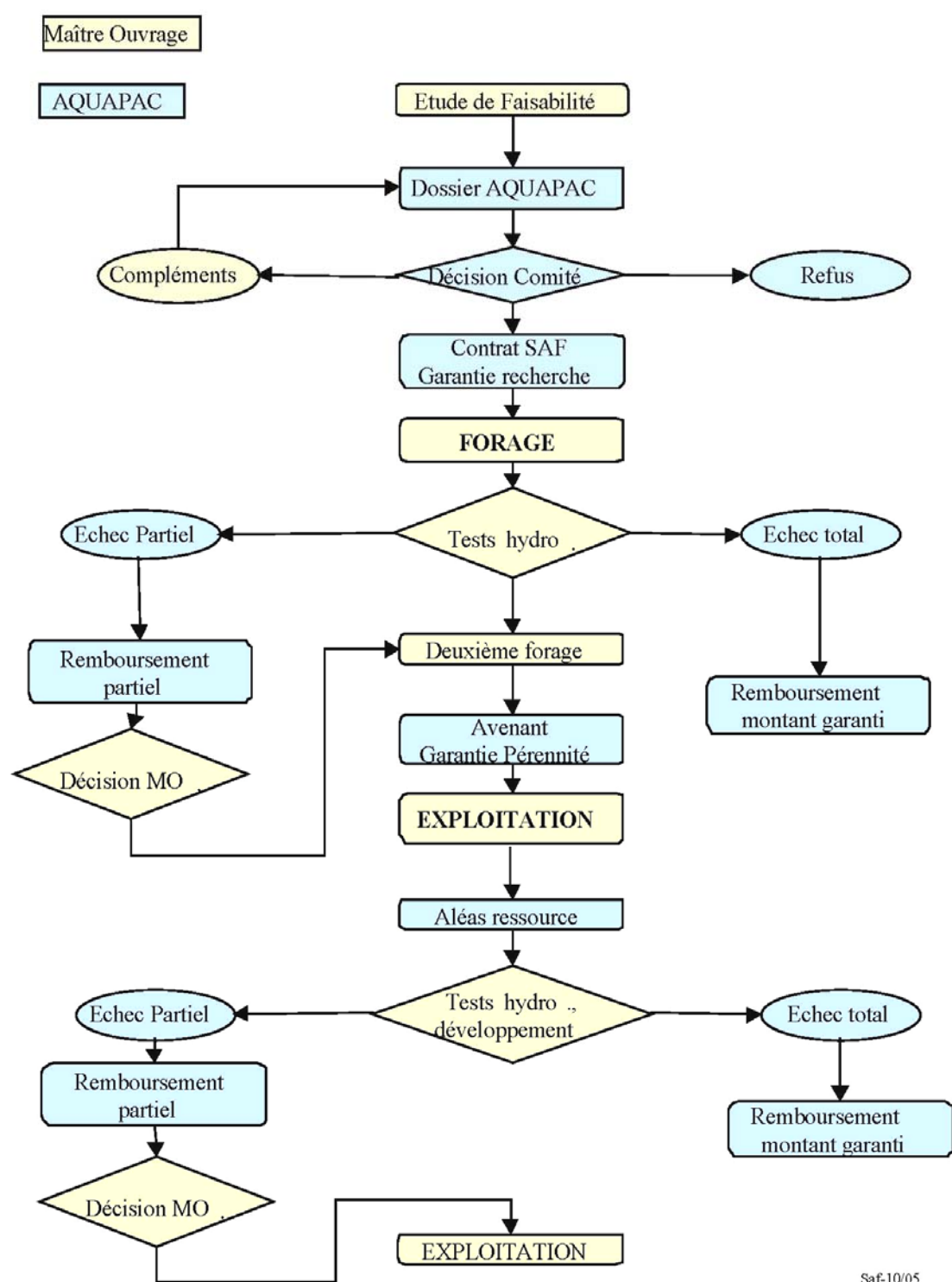
Ensuite, le Comité apprécie la recevabilité du sinistre et déclenche, s'il y a lieu, le paiement des indemnités.

Le Comité se réserve toutefois la possibilité en lieu d'indemnisation de restaurer le forage ou l'installation

PLAFOND

Les indemnisations sont plafonnées à **115 000 Euros** par sinistre.

Procédure AQUAPAC



SaF-10/05
4

Annexe 22

Fiches descriptives des différents types d'exploitation en géothermie très basse énergie

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Sonde géothermique verticale

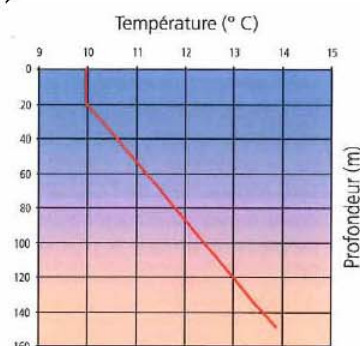
Couplée à une pompe à chaleur

PRINCIPE

A partir d'une profondeur de 20m, la température du sous-sol est constante et ne dépend plus des variations de la température de l'air entre le jour et la nuit ou d'une saison à l'autre. La température entre 20 et 100 m est comprise entre 8 et 12°C selon les zones géographiques (et l'altitude) et augmente de ~ 3.3 °C/100 m (gradient géothermique).

La sonde géothermique verticale est un échangeur de chaleur installé verticalement dans un forage de l'ordre d'une centaine de mètres de profondeur.

Un fluide caloporteur, de qualité alimentaire, composé d'eau additionnée d'antigel, généralement du monopropylène glycol, circule en circuit fermé et assure la liaison entre la pompe à chaleur et le forage. Il permet en outre d'extraire la chaleur du sous-sol (par conduction), de la transporter (circulation du fluide assuré par une pompe de circulation) et de la restituer au plancher chauffant à l'aide de la pompe à chaleur (PAC).

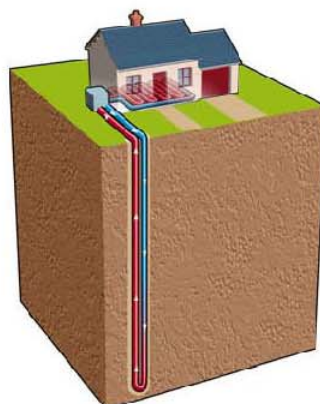


CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT

Un ou deux forages d'un diamètre généralement compris entre 100 -180 mm sont réalisés à proximité du bâtiment à chauffer. La profondeur du forage est déterminée d'après le volume des locaux à chauffer et le type de terrain.

Dans le forage terminé, on installe une boucle formée de 2 tubes de polyéthylène haute densité (PEHD) généralement en forme de U et de diamètre 23, 32 ou 40 mm. L'espace annulaire entre la boucle et les

parois du forage est rempli avec un mélange à base de ciment conducteur et bentonite, afin d'assurer un bon contact entre les tubes et la paroi du forage. Les parties du forage en contact avec l'eau souterraine peuvent également être remplies avec du gravier roulé.



La sonde géothermique verticale peut-être installée dans pratiquement tous les types de sous-sol.

L'installateur peut choisir de réaliser 1 ou plusieurs forages selon les besoins énergétiques du logement et en fonction des terrains. Il est important, pour pérenniser le fonctionnement de l'installation dans le temps et ainsi éviter d'appauvrir énergétiquement le sous-sol, que les forages respectent une distance minimale de 10 mètres. Dans le cas de bâtiments tertiaires ou de petits collectifs par exemple, un champ de sondes sera réalisé. L'espacement et la profondeur des sondes seront dimensionnés par un bureau d'étude spécialisé.

DOMAINES D'APPLICATION

Ce type d'installation permet d'assurer toute la saison de chauffage d'une habitation par plancher chauffant ou par radiateur basse température (35°C); elle peut également fournir l'eau chaude sanitaire à la température de 60°C ou être associée à une production d'eau chaude sanitaire solaire.

Le principe de la pompe à chaleur est particulièrement bien adapté au chauffage basse température, type plancher chauffant (température de l'eau de chauffage < 30°C) pour l'habitat individuel. L'installation peut

être conçue, sans surcoût, pour fournir du rafraîchissement d'été.

Pour des immeubles d'habitation ou des bâtiments tertiaires, la même technologie peut être mise en œuvre mais avec un plus grand nombre de sondes ; on parle alors de Champ de Sondes géothermiques.

ORDRES DE GRANDEUR

Nombre et longueur de forage

En fonction des caractéristiques géologiques et climatiques locales, une sonde de 100 m de profondeur ou deux sondes géothermiques de 50 m de profondeur conviennent pour chauffer, par plancher chauffant, une maison d'environ 100 m² habitables et de soutirer aux terrains une puissance totale de 5 kW, soit une puissance linéaire par mètre de sonde de 50 W.

Investissement* :

145 à 185 € par m² chauffé

Coût de fonctionnement* :

2,3 à 3,5 € TTC par m² et par an

La réalisation d'une sonde géothermique verticale induit un coût d'investissement non négligeable, mais offre l'avantage d'une emprise au sol minimum, d'une jouissance du sol sans contrainte et un rendement annuel de la PAC très favorable.

EXEMPLE DE REALISATION

L'ADEME réalise des suivis d'installations de PAC chez des particuliers de façon à évaluer les performances de ces systèmes en situation réelle.

Un exemple standard est celui d'une maison individuelle de 175 m² située à Vaugneray (Rhône) et construite en 2002.

Cette habitation est chauffée par une PAC eau glycolée/eau d'une puissance thermique de 10,6 kW et utilise 2 sondes géothermiques de 80 m de profondeur pour soutirer cette puissance aux terrains, soit ~66 W par mètre linéaire de sonde, pour alimenter un plancher chauffant-rafraîchissant.

Sur la période de suivi, d'octobre 2003 à septembre 2004, le COP annuel moyen mesuré a été de 3,1 (pour un COP initial de la machine de 3,8) et le coût du chauffage de seulement 2,1 € HT/m², soit 367,5 € HT pour 175 m². L'énergie électrique consommée pour le chauffage a été de 32 kWh/m², soit de 5600 kWh pour 175 m². Ce coût est très faible par rapport aux valeurs rencontrées usuellement pour d'autres modes de chauffage.

L'appoint électrique a représenté moins de 0,5 % de la consommation totale de chauffage. Sur cette année de mesure, le CO₂ évité par rapport à un système de chauffage par chaudière gaz a été de 2,7 tonnes.

Ces valeurs sont représentatives de PAC installées dans de l'habitat neuf. Dans le cas de rénovation, on rencontre habituellement des COP moyens annuels de 2,5 à 2,6.

(ADEME, N°1 Bâtiment, Economie d'énergie, 2007)

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

Une liste des foreurs engagés dans une démarche qualité pour la réalisation des forages pour sondes géothermiques est accessible sur <http://www.geothermie-perspectives.fr/>. Le BRGM assure le pilotage de cette démarche.

L'ADEME propose un guide pratique Pompes à Chaleur géothermique à l'usage des particuliers : <http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/pacg/rub3.htm>

Le site de l'Association Française pour les Pompes à Chaleur (AFPAC) : <http://www.afpac.org/>

L'appellation QualiPAC a été créée par l'AFPAC en 2007, dans le but de faciliter la mise en relation des particuliers avec des installateurs de pompe à chaleur qui s'engagent sur le respect de cette Charte. <http://www.afpac.org/qualite-installateurs-qualipac.php>

Pour le choix des pompes à chaleur la marque NF PAC, mise en œuvre par l'AFPAC est délivrée par l'AFAC-AFNOR, certification permettant de vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales ainsi que le respect des performances. <http://www.certita.org/refere-ntiel-integral.html>

Les pompes à chaleur géothermiques sont éligibles au crédit d'impôts et peuvent bénéficier d'aides locales, les Espaces Info-Energie de l'ADEME peuvent vous préciser les dispositifs régionaux en place : <http://www.ademe.fr/particuliers/PIE/infoenergie2.html>

* (données ADEME, 2006)

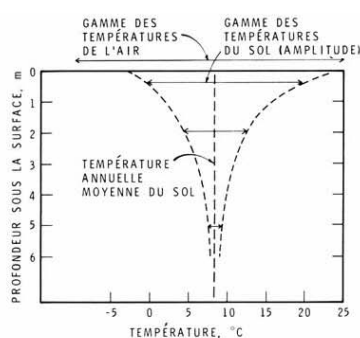
Capteurs géothermiques horizontaux Couplés à une pompe à chaleur

PRINCIPE

La température des deux premiers mètres du sous-sol, bien que soumise aux effets du climat, présente des fluctuations très atténuées par rapport aux variations diurnes et nocturnes ou inter saisonnières de la température atmosphérique (sous nos latitudes le sol n'est pas gelé au delà de quelques cm, même par grands froids).

En hiver par exemple, le sol est plus chaud que la température extérieure sur la tranche comprise entre 1 et 2 m de profondeur. A l'inverse en été, le sol est plus froid que la température extérieure.

Bien que les fluctuations de la température atmosphérique soient atténuées en profondeur, le potentiel énergétique des capteurs horizontaux est influencé par les conditions météorologiques locales (température, ensoleillement, pluviométrie).



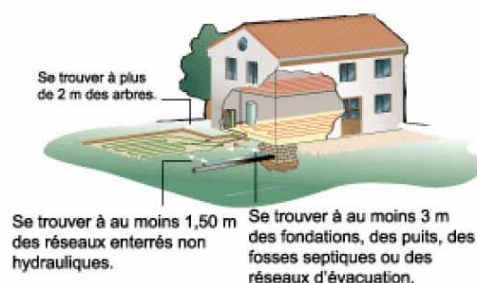
Exemple de la relation entre la profondeur et les températures annuelles du sol - Ottawa

CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT

Un capteur horizontal est constitué par un réseau de tuyaux (en polyéthylène) dans lequel circule un fluide frigorigène ou de l'eau glycolée (selon la technologie de PAC utilisée), enterré horizontalement dans le jardin, à une profondeur généralement comprise entre 0,6 et 1,20 m. Les capteurs sont installés sur le terrain jouxtant la maison à chauffer. Les calories du sol sont absorbées et transférées via la pompe à chaleur et sont

restituées dans la maison à chauffer par un plancher chauffant basse température.

Les capteurs horizontaux sont généralement des tubes de polyéthylène, installés en boucle dans le sol à une profondeur comprise entre 0,60 et 1,50 m. Dans ces boucles circule, en circuit fermé, un fluide caloporteur, qui va recueillir l'énergie prélevée dans le sous-sol (par conduction) et la transférer à la pompe à chaleur.



Le dispositif permet également la mise en œuvre d'une fonction de rafraîchissement en été dans le cas des plancher chauffants ou ventilo convecteurs.

DOMAINES D'APPLICATION

Ce type d'installation est limité aux maisons individuelles avec une surface de jardin libre suffisante.

Dans l'habitation, la chaleur peut être transmise par plancher chauffant, radiateur basse température, ventilo-convecteur ou système centralisé d'air pulsé. La production d'eau chaude sanitaire est généralement indépendante de la PAC.

Certains principes de pose sont préconisés, en particulier en ce qui concerne les profondeurs d'enfouissement et l'espacement entre les tubes.

ORDRES DE GRANDEUR

La surface nécessaire occupée par les capteurs horizontaux est estimée à 1,5 à 2 fois la surface habitable à chauffer; soit pour une maison de 150 m², entre 225 et 300 m² de jardin. Il est possible de disposer deux couches de capteurs superposés, par exemple à 1,20 m et 0,60 m de profondeur.

La surface au dessus du capteur doit être libre de toute construction (pas de terrasse), ne pas être traversée par des réseaux d'eau, et ne pas comporter d'arbres dont le développement des racines pourrait endommager les capteurs. Un sol plan et meuble est une configuration favorable à ce type de dispositif.

L'installation des capteurs peut se faire à faible coûts pendant les travaux de terrassement de la construction du logement. Le coût d'investissement est généralement compris entre 80 et 130 €/m², il varie selon le type de sol (il peut être nécessaire de placer les échangeurs sur un lit de sable) le besoin éventuel de remblaiement (cas de terrains pentus) et la technologie de PAC utilisée.

La puissance d'extraction sur les capteurs horizontaux peut varier de 10 à 35 W/m² selon le type de sol et la disposition des échangeurs (1 ou 2 niveaux).

EXEMPLE DE REALISATION

Une maison de 190 m², située en région Poitou-Charente est chauffée depuis 2004 par des capteurs horizontaux enterrés sur 2 niveaux à 0,6 et 1,20 m de profondeur pour une surface de jardin occupée de 400 m². Le chauffage et le rafraîchissement sont assurés dans l'habitation par un plancher chauffant-rafraîchissant. Sur une année d'exploitation, l'énergie thermique produite par le système à été de 13 233 kWh pour le chauffage, pour un coût de fonctionnement annuel (chauffage et rafraîchissement) de l'ordre de 4,7 €/m² TTC (valeurs 2004-2005), ce qui est très inférieur au coût d'un système classique gaz ou fuel, avec une réduction notable des émissions de CO₂.

(Données de suivi ADEME/EDF/MD3E)

POUR EN SAVOIR PLUS

L'ADEME propose un guide pratique "Pompes à Chaleur géothermique à l'usage des particuliers" :

<http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/pac/rub3.htm>

Une appellation QualiPAC a été créée en 2007, dans le but de faciliter la mise en relation des particuliers avec des installateurs de pompe à chaleur : <http://www.afpac.org/qualite-installateurs-qualipac.php>

Pour le choix des pompes à chaleur, la marque NF PAC est délivrée par l'AFAQ-AFNOR. Certification permettant de vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales, ainsi que le respect des performances :

<http://www.certita.org/referentiel-integral.html>

Le site de l'Association Française pour les Pompes à Chaleur (AFPAC) :

<http://www.afpac.org/>

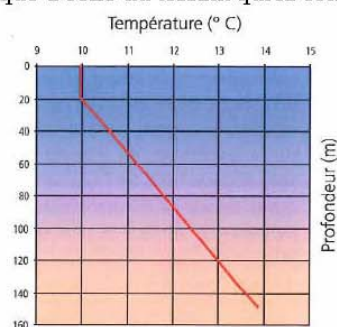
Les pompes à chaleur géothermiques sont éligibles au crédit d'impôts et peuvent bénéficier d'aides locales. Les Espaces Info-Energie de l'ADEME peuvent préciser au client les dispositifs régionaux mis en place : <http://www.ademe.fr/particuliers/PIE/infoenergie2.html>

FORAGE D'EAU

Pour alimenter une pompe à chaleur

PRINCIPE

L'eau souterraine, contenue dans les formations aquifères, est à une température identique à celle du terrain qui la contient.



Température moyenne du sous-sol

En France la température de l'eau souterraine peu profonde (20 à 100 m de profondeur) est généralement comprise entre 10 et 14 °C. Cette eau souterraine, à température plus ou moins constante tout au long de l'année, peut servir de source de calories pour alimenter une pompe à chaleur Eau/eau.

CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT

Le prélèvement de l'eau souterraine s'effectue par l'intermédiaire d'un puits de pompage ou d'un forage d'eau. Après son passage dans la pompe à chaleur, cette eau doit être rejetée dans sa formation géologique d'origine à l'aide d'un second forage dit de réinjection, ou bien, exceptionnellement et après autorisation, dans un réseau, un cours d'eau, un lac,...

Il existe différentes techniques de forage adaptées aux types de terrains (meubles ou consolidés) et à la profondeur du forage. Pour assurer un fonctionnement pérenne et fiable de la PAC, le forage d'exploitation doit être réalisé en tenant compte des caractéristiques propres du terrain, avec un choix d'équipements et de matériaux appropriés. Une fois réalisé et équipé, le forage devra être testé (pompage d'essai) pour confirmer ses caractéristiques d'exploitation.

DOMAINES D'APPLICATION

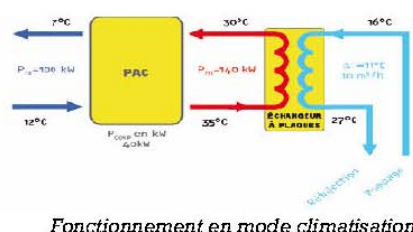
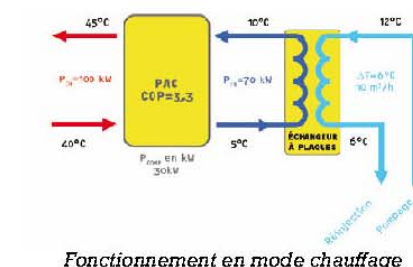
Ce type d'installation permet d'assurer la totalité des besoins de chauffage d'une habitation ou d'un bâtiment collectif ou tertiaire ou encore pour des bâtiments commerciaux (type super marché par exemple). Ce type de dispositif peut également fournir l'eau chaude sanitaire.

En été, l'eau souterraine permet une fonction de rafraîchissement, par simple circulation de l'eau dans un plancher chauffant/rafraîchissant ou via un aérotherme. Les PAC réversibles sur eau souterraine peuvent également assurer les besoins de climatisation des bâtiments.

La réalisation d'un ou plusieurs forages augmente le coût d'investissement, mais offre une emprise au sol minimum et des conditions de fonctionnement de la PAC très favorables au cours des saisons.

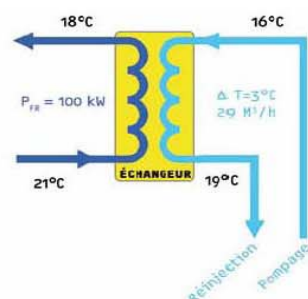
ORDRES DE GRANDEUR

Un débit d'eau souterraine de l'ordre de 10 m³/h permet, avec une PAC ayant un COP de l'ordre de 3,3, de fournir une puissance de 100 kW en mode chauffage (avec un delta T°C prélevé de 6°C) ou en climatisation (avec un delta T°C restitué de 11°C) avec une PAC réversible.



Un débit compris entre 1 à 2 m³/h permettra d'assurer les besoins de chauffage d'un pavillon individuel de l'ordre de 150 m²,

Pour un fonctionnement en rafraîchissement direct (free cooling), le débit nécessaire sera plus important car le delta T°C restitué est plus faible, de l'ordre de 3 °C. En revanche, les coûts de fonctionnement seront plus bas (la PAC ne fonctionnant pas).



Fonctionnement en mode rafraîchissement direct

EXEMPLE DE REALISATION

Depuis 9 ans la CAF de Lyon est équipée d'une installation de Pompe à Chaleur sur nappe phréatique.



Façade du bâtiment de la CAF à Lyon

Le bâtiment a une surface de 16633 m². L'installation comporte deux pompes à chaleur eau/eau (600 kW chaud, 600 kW froid), qui alimentent un réseau de ventilo-convecteurs 4 tubes et des centrales de traitement comportant des récupérateurs afin de limiter la consommation d'énergie. Les coûts d'investissements étaient en 1995 de :

- 149 € HT/m², pour le chauffage, la climatisation, la ventilation ;
- 21 € HT/m² pour la GTB,

soit un total de 170 € HT/m².

Par rapport à une solution traditionnelle (chaufferie gaz et groupe froid), la solution PAC sur nappe permet une économie annuelle de 0.94 € HT/m², soit une diminution

du coût énergétique de la production de chaud et froid de 37%. Elle permet une diminution des rejets de CO₂ de 14.8 kg/m², soit une baisse de 70%. Sur 9 années de fonctionnement, le coefficient de performance annuel moyen de l'installation est de 3,8.

INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES

<http://www.geothermie-perspectives.fr/>

Guide pratique ADEME : "Pompes à Chaleur géothermiques à l'usage des particuliers" : <http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/pac/rub3.htm>

Une l'appellation QualiPAC a été créée en 2007, dans le but de faciliter la mise en relation des particuliers avec des installateurs de pompe à chaleur. <http://www.afpac.org/qualite-installateurs-qualipac.php>

Pour le choix des pompes à chaleur, la marque NF PAC est délivrée par l'AFAQ-AFNOR. Certification permettant de vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales ainsi que le respect des performances. http://www.certita.org/referentiel_integral.html

Le site de l'Association Française pour les Pompes à Chaleur (AFPAC) : <http://www.afpac.org/>

Les pompes à chaleur géothermiques pour les particuliers sont éligibles au crédit d'impôts et peuvent bénéficier d'aides locales. Les Espaces Info-Energie de l'ADEME peuvent vous préciser les dispositifs régionaux mis en place : <http://www.ademe.fr/particuliers/PIE/infoenergie2.html>



Guide technique **Pompes à chaleur géothermiques sur aquifère**. ADEME, BRGM, EDF (2008), 72 pages. Editions du BRGM <http://brgm.fr/>

Fondations géothermiques **Couplées à une pompe à chaleur**

PRINCIPE

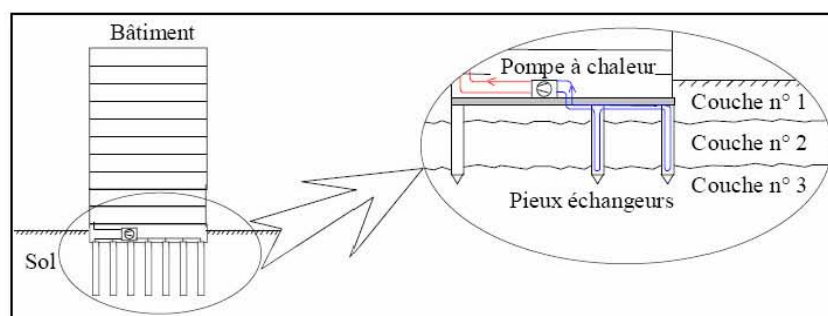
Les fondations géothermiques ou géostructures énergétiques sont des ouvrages souterrains (*dalles, parois ou pieux géotechnique*) destinés à reporter les charges d'un bâtiment en profondeur ou encore à stabiliser le terrain. À l'intérieur de ces fondations, un réseau de tubes en polyéthylène haute densité (PEHD) est installé de manière à pouvoir faire circuler un fluide caloporteur pour échanger de l'énergie thermique avec le terrain. On parle alors de fondations géothermiques ou fondations thermo-échangeuses. Le but de ces types de fondations est de fournir de la chaleur pour le chauffage en hiver et également de permettre la production de froid durant l'été. Le raccordement de la tuyauterie au système de chauffage ou de refroidissement du bâtiment par un circuit hydraulique comportant une pompe à chaleur permet ce fonctionnement selon un cycle annuel. Le terrain portant l'immeuble est exploité en hiver comme producteur naturel de chaleur. En été, la chaleur

dégagée dans l'ouvrage construit est évacuée dans le sol et stockée en vue de son exploitation hivernale. C'est la « **recharge thermique du terrain** ».

CONSTRUCTION ET FONCTIONNEMENT

Le choix d'un système de pieux géothermiques doit intervenir très tôt dans la planification d'un bâtiment.

Les pieux en béton armé sont généralement d'un diamètre de 0.4 à 1.5 m et atteignent une longueur de quelques mètres à plus de 30 m de longueur. À l'intérieur de ces pieux est installé un tube ou un réseau de tubes en polyéthylène, souvent des doubles ou quadruples U, selon le diamètre des pieux. Ces tubes sont ensuite noyés dans le béton pour assurer un bon contact thermique. Un fluide caloporteur circule du réseau en boucle entre les pieux et la pompe à chaleur, afin de pouvoir échanger la chaleur ou le froid du terrain.



Aujourd'hui, les pieux énergétiques ont pris un grand essor en Europe.

Plusieurs dizaines de références d'installations fonctionnant sur ce principe existent en Europe. En Suisse, ces fondations géothermiques semblent même appelées à

un développement significatif au cours des prochaines années. En France, la Cité du Design à Saint Etienne sera en 2008 la première réalisation de ce type sur un bâtiment HQE.

DOMAINES D'APPLICATION

Un système de pieux échangeurs est ainsi constitué par les pieux équipés de tubes en polyéthylène permettant la circulation du fluide caloporteur. Ces tubes sont ensuite connectés entre eux et reliés à une pompe à chaleur pour le chauffage. Pour la production de froid, deux variantes existent en fonction du niveau de température souhaité :

- La première utilise une machine de froid (thermofrigopompe) à la place de la pompe à chaleur pour abaisser la température, ou utilise une pompe à chaleur réversible ;
- La seconde est le refroidissement direct (free cooling) par le biais de la température naturelle du liquide

caloporteur dans les pieux. Dans ce cas, la pompe à chaleur est by passée et la chaleur excédentaire du bâtiment est simplement injectée dans le terrain par le biais des pieux.

Dans la majorité des cas, la possibilité de réversibilité de la pompe à chaleur est utilisée de manière à assurer une production alternée de chaleur et de froid. Ceci est fortement recommandé pour l'évolution à long terme de la température du terrain, notamment dans le cas avec faible écoulement de la nappe souterraine.

ORDRES DE GRANDEUR

Tous les pieux nécessaires aux fondations d'un bâtiment peuvent être équipés d'un système énergétique, ou seulement une partie d'entre eux.

Cette technologie simple et rationnelle ne demande pas des surcoûts excessifs, mais nécessite, d'une part son intégration dès le début du projet, et d'autre part une réflexion globale sur les aspects de la construction et de la consommation de l'énergie. Il existe actuellement plus de 400 installations de type géostructures énergétiques en Autriche et en Allemagne, dont la puissance installée va de quelques dizaines de kW pour des petits immeubles jusqu'à 1000 kW pour des grands bâtiments industriels.

EXEMPLE DE REALISATION



Dock Midfield de l'aéroport de Zürich (Suisse)

Le Dock Midfield est le nouveau terminal de l'aéroport de Zürich en Suisse, avec une longueur de 500 m sur une largeur de 30 m. En raison de mauvaises conditions géologiques (*terrains meubles formés par d'ancien fonds lacustres*), le bâtiment a dû être construit sur 440 pieux de fondation. Les pieux sont de gros diamètres (*de 90 à 150 cm*) et sont fichés dans une couche de moraine de fond située à environ 30 mètres de profondeur. Dans le but de contribuer au chauffage et au refroidissement du bâtiment, plus de 300 pieux sont utilisés en pieux énergétiques. Le bâtiment a été mis en service en automne 2003 :

- Puissance nominale de la PAC couplées sur les pieux : 630 kW
- Énergie annuelle de chauffage délivrée par la P.A.C : 2 300 MWh/an
- Appoint par chauffage à distance
- Refroidissement direct (geocooling) sur les pieux et appoint avec du rafraîchissement actif en utilisant la PAC couplée sur des tours de refroidissement.
- Température minimum du fluide circulant dans les pieux : 0 °C (*ce qui permet d'éviter le gel des pieux et donc de ne pas influencer les propriétés mécaniques*).

- Longueur active moyenne des pieux : 26.8 m
- 5 tubes en U par pieu.
- Diamètre des pieux : de 90 à 150 cm
- Espacement moyen entre les pieux : 9 m environ

POUR EN SAVOIR PLUS

Des exemples de réalisations en Europe peuvent être consultés sur les sites suivants :
<http://www.enercret.com>
http://www.geothermie.ch/index.php?p=ex_amp_geostructures

Travaux de recherche sur les fondations énergétiques- Programme **COFOGE** (ADEME, CSTB, ALTO, BRGM, INESLOCIE, SOLETANCHE) :
http://enr.cstb.fr/webzine/preview.asp?id_u ne=165

Pour le choix des pompes à chaleur la marque NF PAC est délivrée par l'AFAQ-AFNOR. Certification permettant de vérifier la conformité des pompes à chaleur aux différentes normes en vigueur, françaises, européennes et internationales ainsi que le respect des performances.
http://www.certita.org/referentiel_integral.html

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Annexe 23

Principes relatifs aux pompes à chaleur

Evaluation du potentiel géothermique très basse énergie sur le territoire de Nantes Métropole

Principes thermodynamiques

Le principe de la pompe à chaleur est connu depuis longtemps, si l'on prend pour origine l'énoncé des principes de la thermodynamique par Carnot (1824), qui a établi l'équivalence du travail et de la chaleur.

Une pompe à chaleur est système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à transférer des calories de la source froide vers la source chaude, donc à un niveau de température supérieur. Ce transfert se fait via un fluide caloporteur (fluide frigorigène) et ne peut se réaliser, que s'il y a apport d'énergie sous forme de travail (dans le cas de PAC à compression)

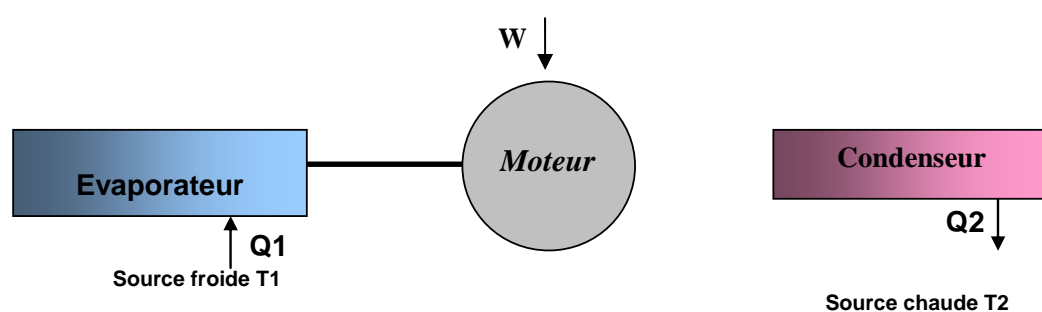


Fig :1 : Schéma de principe d'une machine thermodynamique

Si l'on désigne par :

Q1 : la quantité de chaleur prélevée dans la source froide

Q2 : la quantité de chaleur restituée au niveau de la source chaude

W : l'énergie mécanique apportée au système

T1 : Température d'évaporation à la source froide en Kelvin (évaporateur) soit $T1 = t_1 + 273,15$ si t_1 est la température en degré Celsius de la source froide

T2 : Température de condensation à la source chaude en Kelvin (condenseur) soit $T2 = t_2 + 273,15$ si t_2 est la température en degré Celsius de la source chaude

On peut écrire d'après le premier principe de Carnot l'égalité suivante : $Q_2 = Q_1 + W$

On définit un coefficient de performance théorique (**COP**) qui est le rapport de la quantité d'énergie transmise à la source chaude (**Q2**) par la quantité d'énergie mécanique dépensée (**W**) donc :

$$\text{COP chaud} = Q_2/W$$

En application du deuxième principe de Carnot, le COP théorique ou idéal est égal à :

$$\text{COP} = T_2/(T_2 - T_1)$$

On peut également en déduire un coefficient de réfrigération **Cr**, rapport de la chaleur absorbée à l'évaporateur à l'énergie reçue au compresseur.

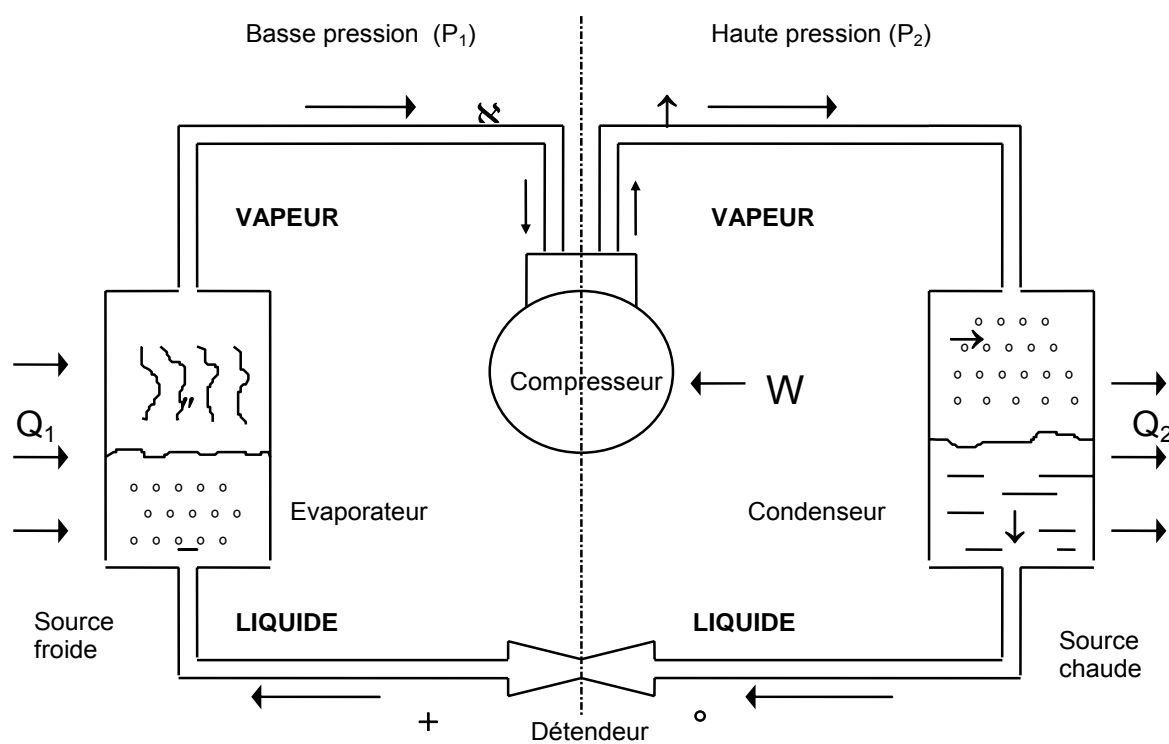
$$\text{Cr} = Q_1/W$$

Pompes à chaleur

Il existe deux grandes familles de pompes à chaleur : les pompes à chaleur à compression et les pompes à chaleur à absorption (qui sont beaucoup moins diffusées que les PAC à compression). Les éléments généraux ci-après ne concerneront donc que les PAC à compression.

Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (compression)

La chaleur prélevée au niveau de l'environnement (air, sol, eau...) est captée par le fluide caloporteur (à faible point d'ébullition) au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur surchauffée transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Le fluide toujours comprimé redevient liquide en se condensant. Le détendeur réduit la pression du fluide caloporteur. La température de ce dernier s'abaisse fortement le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur et le cycle peut recommencer.



Principe de fonctionnement d'une PAC à compression

Le diagramme ci-dessous dit de Mollier permet de suivre l'évolution du cycle thermodynamique idéal du fluide qui circule dans la pompe à chaleur.

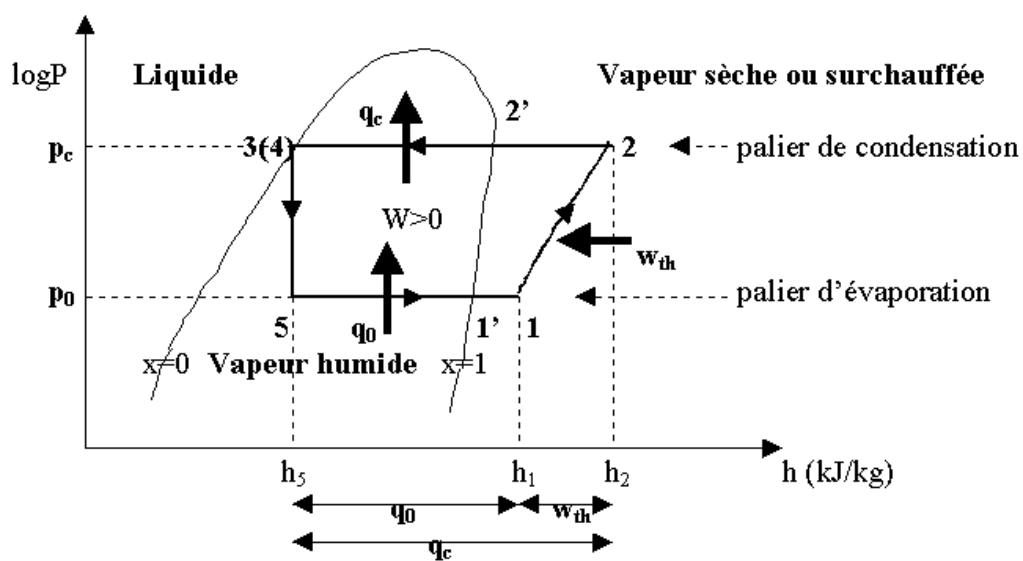


Fig 3 : Diagramme de Mollier pour une pompe à chaleur à compression

On vérifie ainsi le premier principe sur l'échelle en abscisse, car on constate que :

- la quantité de chaleur dégagée au condenseur : $q_c = h_2 - h_4$
- la quantité de froid produite à l'évaporateur : $q_0 = h_1 - h_4$
- le travail dépensé au compresseur : $w_{th} = h_2 - h_1$

En application du deuxième principe de Carnot, le COP théorique ou idéal est égal à :

$$\text{COP} = T_c / (T_c - T_o)$$

Sur le diagramme de Mollier $\text{COP} = (h_2 - h_4) / (h_2 - h_1)$

On peut également en déduire un coefficient de réfrigération Cr (appelée parfois coefficient d'efficacité énergétique), rapport de la chaleur absorbée à l'évaporateur à l'énergie reçue au compresseur.

$$\text{Cr} = Q_o / W_{th} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1)$$

Dans la pratique du fait de la difficulté d'évoluer selon le cycle théorique de Carnot et des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, pertes de charges des circuits frigorifiques...) le COP effectif est affecté d'un coefficient de 0,4 à 0,7.

On note dès à présent l'importance que revêtira la nature des émetteurs de chauffage pour l'efficacité du système thermodynamique appliqué au chauffage

Le graphique ci-dessous illustre ce phénomène : le COP sera d'autant plus élevé que l'écart de température entre la source et milieu à chauffé sera faible

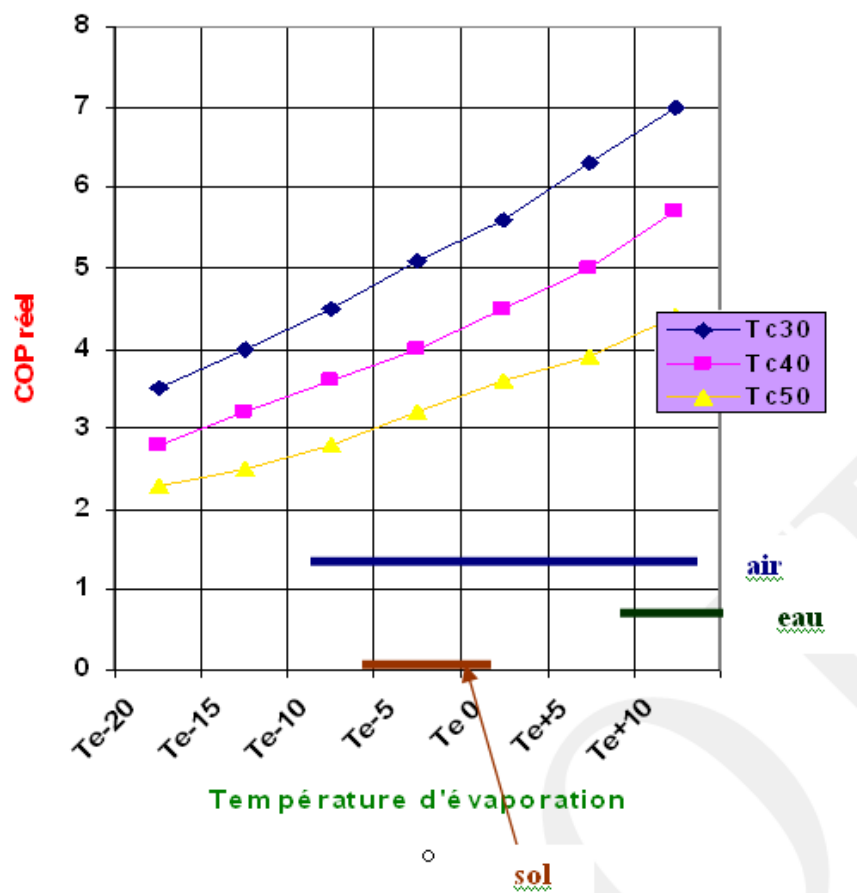


Fig 4 : Evolution du COP réel en fonction des températures d'évaporation(T_e) et de condensation (T_c)



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Pays de Loire
1, rue des Saumonières
BP 92342
44323 – Nantes Cedex 3 - France
Tél. : 02-51-86-01-51