

Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre

Rapport final

BRGM/RP-55088-FR
mars 2007



Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre

Rapport final

BRGM/RP-55088-FR
mars 2007

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2005-ENE-B02

J.-C. Martin, I. Bacquet, B. Tourlière, E. Gomez, C. Gateau

Vérificateur :

Nom : A. DESPLAN

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : J.-P. LEPRETRE

Date :

Signature :

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



Mots clés : Atlas, Géothermie très basse énergie, Région Centre, Eaux souterraines, Débit spécifique, Géologie, Piézométrie, Qualité des eaux.

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

Martin J.-C., Bacquet I., Tourlière B., Gomez E., Gateau C. (2007) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région centre. Rapport final. BRGM/RP-55088-FR, 60 p., 25 fig., 9 tabl., 1 ann.,

© BRGM, 2007, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet « *Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre* » fait l'objet d'une convention de recherche et développement partagée entre le Conseil régional du Centre, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), Électricité de France (EDF) et le BRGM.

Le projet comprend trois principales phases qui sont :

- un rappel sur la géothermie ;
- un atlas géothermique des ressources en eau souterraine en région Centre ;
- une analyse multicritère aboutissant à un système d'information géographique permettant les prises de décisions.

Les données qui servent à définir la ressource en eau souterraine de la région Centre, utilisable pour la géothermie très basse énergie comprise entre 0 et 100 m de profondeur, ont fait l'objet de deux rapports qui ont été approuvés en comité de pilotage. Ces rapports ont été présentés au cours de l'année 2006, il s'agit des rapports suivants :

Rapport BRGM/RP-54542-FR - février 2006. Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Etude cartographique et statistique des débits spécifiques des forages d'eau - Rapport intermédiaire n° 2a.

Rapport BRGM/RP-54715-FR - juin 2006. Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Géométrie et niveaux piézométriques des principales formations aquifères - Rapport intermédiaire n° 2b.

Ce rapport final complète les deux rapports précédents par un examen de la qualité chimique des eaux souterraines vis-à-vis d'une utilisation géothermale, et présente l'ensemble des données qui seront accessibles par l'intermédiaire d'un CD-ROM interactif.

Le territoire de la région Centre a été découpé en mailles carrées de 500 m de côté. Chaque maille contient les paramètres suivants : les formations géologiques aquifères rencontrées, les débits disponibles, la profondeur de la nappe, la note de productivité géothermale attribuée.

On identifie 12 formations géologiques aquifères différentes (11 en terrain sédimentaire et une en zone de socle). La configuration de la géologie de la région Centre permet, bien souvent, d'avoir deux formations aquifères superposées disponibles pour une utilisation géothermale (56 % du territoire présente un second niveau aquifère dans la tranche 0 à 100 m). On rappelle qu'une formation géologique aquifère est une formation géologique qui, de par sa structure poreuse et/ou fracturée, peut contenir de l'eau.

Il a été décidé lors du comité de pilotage du 18 octobre 2006 qu'une **note de productivité sera calculée** prenant en compte les règles suivantes :

- une note unique, indépendante de l'utilisation de la ressource géothermale ;
- une note globale, calculée à partir des valeurs de débit (*), de la profondeur minimale (**), de la qualité chimique de l'eau ;
 - (*) le débit retenu sera celui qui correspond à un rabattement de 5 m dans le puits, valeurs présentées sous forme d'une fourchette : 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit, 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit,
 - (**) profondeur minimale : profondeur de l'eau pour l'aquifère supérieur, profondeur du toit de la formation pour l'aquifère inférieur.

Après le choix d'un lieu d'interrogation, la présentation des résultats sera faite à 2 niveaux :

- niveau n° 1 : simple et synthétique, avec une note de productivité (FORTE - MOYENNE - FAIBLE) ;
- niveau n° 2 : plus détaillé, sous forme d'une coupe hydrogéologique avec ses données.

La note de productivité géothermale a été établie à partir du débit disponible (3 seuils : moins de 5 m³/h, de 5 à 15 m³/h et plus de 15 m³/h), et de la profondeur de la ressource (trois seuils : moins de 15 m, de 15 à 30 m et plus de 30 m). Aucune note de productivité n'a été attribuée dans les secteurs où l'une ou l'autre des données n'est pas connue.

Le résultat de la note de productivité géothermale, exprimée en pourcentage de couverture du territoire de la région Centre, est le suivant :

FORTE : 46 % du territoire

MOYENNE : 24 % du territoire

FAIBLE : 11 % du territoire

Non connue précisément : 19 %.

La qualité chimique des eaux souterraines ne présente pas de contre-indication pour une utilisation géothermale de la ressource. Cet aspect n'a donc pas été retenu pour établir la note de productivité géothermale. Des difficultés pourraient éventuellement apparaître sur les installations géothermales à la suite de problèmes rencontrés lors de la foration des ouvrages de captage (présence de sable ou de bactéries). Cet aspect dépend davantage de l'ouvrage de captage que de la qualité naturelle de l'eau souterraine.

Le CD-ROM interactif réalisé permet une recherche géographique basée sur le choix d'une commune.

On rappelle que les informations présentées dans le CD-ROM n'ont qu'un caractère indicatif. Elles doivent permettre d'orienter un projet pompe à chaleur. La détermination exacte des caractéristiques de la ressource nécessite une étude de faisabilité qui sera confiée par le Maître d'ouvrage à un bureau d'étude spécialisé.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Rappel des données utilisées	13
2.1. GÉOLOGIE ET AQUIFÈRES DE LA RÉGION CENTRE	13
2.2. DÉBIT DE PRODUCTION POSSIBLE DES AQUIFÈRES	15
2.3. PROFONDEUR DES AQUIFÈRES ET DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES	17
2.4. CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES	17
2.5. TEMPÉRATURE DE LA NAPPE	19
3. Potentialité géothermique des aquifères	21
3.1. ORGANISATION DES DONNÉES	21
3.2. SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA PRÉSENTATION DES DONNÉES	21
3.3. AQUIFÈRES CAPTÉS	23
3.4. DÉBIT DE PRODUCTION POSSIBLE	24
3.5. PROFONDEUR DE LA NAPPE OU DE L'AQUIFÈRE	24
3.6. NOTE DE PRODUCTIVITÉ GÉOTHERMALE	29
4. Carte des potentialités géothermales pour un forage, exprimées en KW thermique	31
5. Typologie des bâtiments susceptibles d'être chauffés par énergie géothermale	33
6. CD ROM interactif de présentation des potentialités géothermales	37
7. Conclusion	43
Annexe 1 – Étude des caractéristiques chimiques des eaux souterraines	45

Liste des figures

Figure 1 – Cône de rabattement d'une nappe suite à un pompage.....	15
Figure 2 – Représentation de l'influence de la température sur l'index de Riznar moyen en fonction des niveaux captés.....	19
Figure 3 – Courbe profondeur de la nappe - température de l'eau.....	20
Figure 4 – Coupe hydrogéologique simplifiée des aquifères potentiellement exploitables.	22
Figure 5 – Carte des potentialités géothermiques des niveaux aquifères supérieurs.	26
Figure 6 – Carte des potentialités géothermiques des niveaux aquifères inférieurs.	26
Figure 7 – Carte des potentialités géothermiques des aquifères de la région Centre.....	28
Figure 8 – Puissance thermique disponible dans la nappe - Hypothèse basse, exprimée en KW thermique, pour 6 °C de puisement sur la ressource.....	32
Figure 9 – Page de titre du CD-ROM.....	38
Figure 10 – Page avertissement.	38
Figure 11 – Carte géologique de la région Centre.....	39
Figure 12 – Carte des potentialités géothermiques de la région Centre.....	39
Figure 13 – Recherche d'une commune. Sélection du département.....	40
Figure 14 – Recherche d'une commune. Choix de la commune.....	40
Figure 15 – Affichage de la commune recherchée avec les potentialités de la ressource géothermale.	41
Figure 16 – Coupe hydrogéologique standard au droit du point sélectionné et caractéristiques débit-profondeur de la ressource.....	41
Figure 17 – Fiche synthétique de la recherche.....	42
Figure 18 – Exemple de répartition des chlorures en nappe des calcaires de Beauce à l'aide d'une boîte à moustaches (149 points d'observation).....	49
Figure 19 – Représentation du TH en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.....	50
Figure 20 – Représentation du TAC en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.....	51
Figure 21 – Représentation du pH en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.....	52
Figure 22 – Représentation des teneurs en chlorures en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.....	53
Figure 23 – Représentation des teneurs en fer en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.....	54
Figure 24 – Représentation de l'index de Riznar en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.....	58

Figure 25 – Localisation des points d'eau utilisés pour le calcul des indices de Riznar (liste des aquifères déterminée à partir de la liste simplifiée présentée dans le rapport BRGM/RP-54542).	59
---	----

Liste des tableaux

Tableau 1 – Débit de production possible par niveau aquifère.	16
Tableau 2 – Les niveaux aquifères et leur pourcentage par rapport à la superficie totale de la région Centre.	23
Tableau 3 – Note attribuée aux mailles de 500 m en fonction de leur débit disponible (fourchette basse).....	24
Tableau 4 – Note attribuée aux mailles de 500 m en fonction de la profondeur de la nappe ou de l'aquifère.	27
Tableau 5 – Potentialité de la ressource géothermale - Pourcentage du territoire en fonction des notes attribuées (dans le cas d'une superposition d'aquifères, c'est la meilleure note qui a été retenue).	30
Tableau 6 – Résultats de l'enquête faite auprès de l'ADEME et de bureaux d'étude sur les besoins thermiques des bâtiments en fonction de leur superficie.	34
Tableau 7 – Typologie des bâtiments susceptibles d'être chauffés par énergie géothermale.....	35
Tableau 8 – Distribution du nombre de points d'observation par paramètre et par aquifère.....	48
Tableau 9 – Statistiques des valeurs d'index de Riznar en fonction des niveaux captés.	58

1. Introduction

Le projet « *Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre* » fait l'objet d'une convention de recherche et développement partagée entre le Conseil régional du Centre, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), Electricité de France (EDF) et le BRGM.

Le projet comprend trois principales phases qui sont :

- un rappel sur la géothermie ;
- un atlas géothermique des ressources en eau souterraine en région Centre ;
- une analyse multicritère aboutissant à un système d'information géographique permettant les prises de décisions.

Ce rapport final complète les deux rapports précédents par un examen de la qualité chimique des eaux souterraines vis-à-vis d'une utilisation géothermale, et présente l'ensemble des données qui sont accessibles par l'intermédiaire d'un CD-ROM interactif.

Une note de productivité géothermale est attribuée à chaque point de la région Centre selon trois classes : FORTE, MOYENNE, FAIBLE. Ce choix a été décidé lors de la réunion du comité de pilotage du 18 octobre 2006.

On rappelle que les informations présentées dans le CD-ROM n'ont qu'un caractère indicatif, mais elles doivent permettre d'orienter un projet pompe à chaleur. La détermination exacte des caractéristiques de la ressource nécessite une étude de faisabilité qui sera confiée par le Maître d'ouvrage à un bureau d'étude spécialisé.

2. Rappel des données utilisées

2.1. GÉOLOGIE ET AQUIFÈRES DE LA RÉGION CENTRE

La géologie de la région Centre présente de nombreux aquifères, qui sont présentés succinctement et de manière générale ci-dessous selon un ordre chronologique, en partant des plus récents.

On distingue deux types d'aquifères :

- les aquifères continus : constitués par des sables, de la craie sableuse, des grès, et exceptionnellement par du calcaire à réseau fissuré très dense ;
- les aquifères discontinus : calcaire, granite, . . . Ces roches sont intrinsèquement compactes ; l'eau ne peut y être contenue que dans des fissures ou des fractures, voire des cavités karstiques. La rencontre de l'eau dans une telle roche est considérée comme hasardeuse. De ce fait, on ne peut pas parler de débit moyen pour un aquifère, mais d'une probabilité de débit avec un risque non négligeable d'être nul.

a) Alluvions

Elles sont composées de sables et de graviers avec des argiles plus ou moins abondantes.

Leur épaisseur n'excède pas 10 m.

Seuls les grands cours d'eau offrent une ressource exploitable : Loire, Eure, Loir, Indre, Creuse, Cher.

La ressource est souvent irrégulière. Elle se trouve souvent dans des chenaux sableux anastomosés dans des ensembles argileux. De façon générale, les forages situés dans les alluvions traversent la totalité de celles-ci, et captent en même temps l'aquifère sous-jacent qui peut être la Craie du Séno-Turonien ou les Calcaires de Beauce. Ainsi, il n'est pas possible d'isoler les alluvions comme une ressource propre. La ressource en eau étant assurée bien souvent par l'aquifère sous-jacent.

b) Sables et argiles de Sologne

Très hétérogène, cette formation a une grande épaisseur au centre de la Sologne (près de 100 m). Les petits captages ne fournissent que des débits réduits (3 à 8 m³/h), mais la probabilité d'obtenir un débit plus important augmente avec la profondeur du captage (plus de 50 m³/h pour quelques forages profonds).

c) Calcaires de Beauce

C'est l'aquifère le plus productif de la région Centre, avec des débits possibles supérieurs à 100 m³/h, et un risque géologique faible.

En bordure occidentale, les débits peuvent être réduits en raison du dénoyage possible de la nappe en période de basses eaux.

d) Calcaires de Touraine

Ils constituent des nappes perchées peu importantes. Les débits, peu connus, sont souvent faibles (6 m³/h).

e) Calcaires du Berry

Ils forment souvent l'unique ressource aquifère au Sud de la Sologne. Sa productivité dépend de la fracturation de la roche et de l'envahissement des fractures par des argiles.

f) Argiles à silex (aquifère)

L'argile à silex, résultant en partie de la décalcification de la craie, forme une couverture en principe imperméable. Cependant au Nord du département du Cher, en bordure de la Sologne, par le jeu de la tectonique et de l'hydraulique, les silex ont été lessivés et cette formation peut constituer un aquifère.

Les silex, très durs, et la consistance de certains niveaux argileux (mastic) rendent parfois la foration des terrains difficile.

g) Craie séno-turonienne et cénomaniennne

La craie, bien que poreuse, est généralement peu perméable. Elle constitue cependant un bon aquifère dans sa partie supérieure lorsqu'elle est fissurée et altérée. Cette condition se rencontre aux affleurements, dans les grandes vallées et le long des accidents géologiques. Sur les plateaux et sous recouvrement, elle est moins productive.

h) Sables du Cénomanienn

Cette formation se prolonge sous toute la partie ouest de la région Centre. Elle est constituée de sables fins qui nécessitent des captages soignés. La nappe est bien protégée et l'eau est de bonne qualité, d'où l'importance de cette ressource pour les besoins en eau potable.

i) Calcaires du Jurassique

Dans cet étage Jurassique, la ressource est uniquement contenue dans les formations calcaires fracturées. Cette ressource qui peut être importante présente un caractère aléatoire.

j) Grès du Trias

Cette formation est réduite en surface. Elle se développe en profondeur sous les formations des calcaires du Jurassique.

k) Socle

Le socle est constitué par du granite ou des roches métamorphiques (gneiss, micaschistes). Ces roches sont compactes, l'eau ne peut y être trouvée qu'en petite quantité dans des fractures, des arènes ou des puits d'altération.

2.2. DÉBIT DE PRODUCTION POSSIBLE DES AQUIFÈRES

L'examen des données de débit a été présenté dans le rapport suivant :

- rapport BRGM/RP-54542-FR (février 2006). Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Étude cartographique et statistique des débits spécifiques des forages d'eau - Rapport intermédiaire n° 2a.

Pour chaque formation géologique aquifère, il a été établi des probabilités de dépassement des débits possibles.

On a retenu pour chaque débit disponible une fourchette basse, qui correspond à 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit, et une fourchette haute, qui correspond à 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit. Les débits présentés supposent un rabattement de 5 m dans l'ouvrage de production (tableau 1).

On présente sur la figure 1 le cône de rabattement induit par un pompage dans une nappe. Le pompage crée une baisse du niveau de l'eau dans le forage, appelée « rabattement s ». Le rapport du débit d'exploitation sur le rabattement est le débit

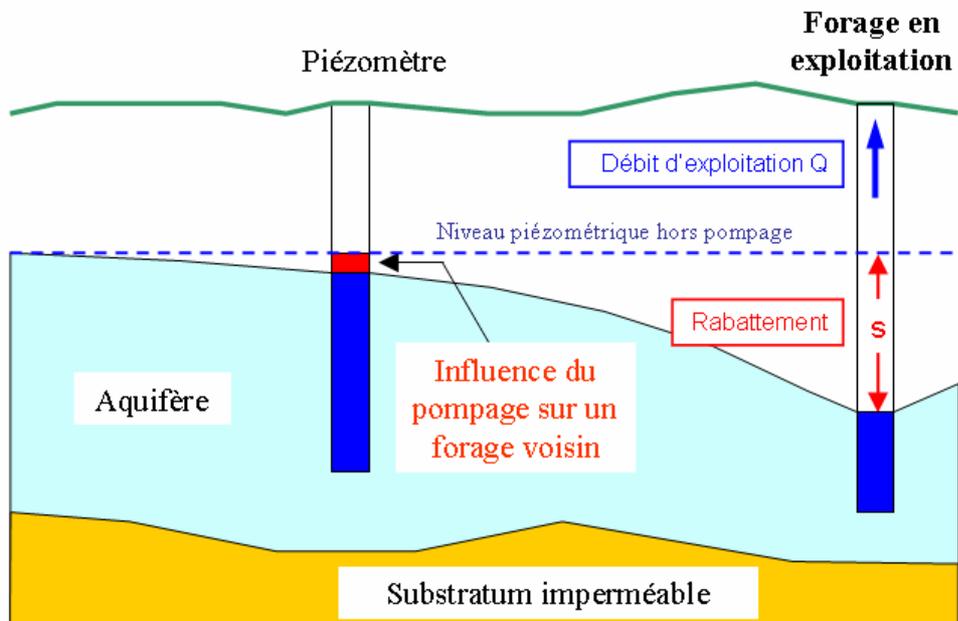


Figure 1 – Cône de rabattement d'une nappe suite à un pompage.

Aquifère	Débit de production possible (m ³ /h)	
	Fourchette basse	Fourchette haute
Alluvions	Indéterminé	Indéterminé
Sables et argiles de Sologne	3	8
Calcaires de Beauce	44	113
Calcaires de Beauce (sous recouvrement Nord Loire)	33	73
Calcaires de Beauce (sous recouvrement Sud Loire)	16	45
Calcaires de Touraine	6	36
Calcaires du Berry	12	53
Argiles à silex (aquifère)	3	8
Craie séno-turonienne	6	15
Craie séno-turonienne (Nord)	21	55
Craie cénomaniennne	6	15
Sables du Cénomanienn	11	17
Calcaires du Jurassique	20	3
Grès du Trias	1	0
Socle	3	0

Tableau 1 – Débit de production possible par niveau aquifère.

La fourchette basse correspond à 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit. La fourchette haute correspond à 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit. Les débits présentés supposent un rabattement de 5 m dans l'ouvrage de production.

spécifique de l'ouvrage. Un forage est d'autant plus productif que le débit spécifique est élevé (rabattement faible pour un débit élevé).

Le rabattement de 5 m, retenu comme condition d'exploitation, tient compte de ce que, d'une part, un trop fort rabattement peut avoir pour effet l'entraînement de particules (sables par exemple), d'autre part, induire des coûts de pompage élevés.

2.3. PROFONDEUR DES AQUIFÈRES ET DES NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

Les données relatives à la profondeur de la ressource ont été présentées dans le rapport suivant :

- rapport BRGM/RP-54715-FR (juin 2006). Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Géométrie et niveaux piézométriques des principales formations aquifères - Rapport intermédiaire n° 2b.

La profondeur de la ressource correspond à la profondeur du niveau de la nappe pour le premier aquifère, à la profondeur du toit du second aquifère.

2.4. CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES

On présente ci-dessous un résumé de l'analyse des caractéristiques chimiques des eaux souterraines. L'étude complète figure en annexe de ce rapport.

Afin de caractériser les eaux souterraines d'un point de vue chimique, nous avons sélectionné les 5 éléments suivants en retenant les analyses les plus récentes :

- titre hydrotimétrique (TH) ou dureté ;
- titre alcalimétrique complet (TAC) ;
- pH ;
- teneurs en chlorures ;
- teneurs en fer.

Le croisement des données issues de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et de la banque d'Accès aux Données des Eaux souterraines (ADES) conduit à la constitution d'une base de données propre à répondre à l'objectif de caractérisation de la stabilité chimique des eaux souterraines pour un usage géothermique.

Nous avons sélectionné les points pour lesquels on disposait, à la fois :

- du niveau capté connu ;
- d'au moins une analyse physico-chimique récente parmi les 5 paramètres retenus.

Seuls les forages dont la profondeur était inférieure à 110 m (cas de la géothermie très basse énergie) ont été retenus.

On a ainsi constitué un échantillon de 364 points disponibles pour la caractérisation des formations aquifères.

L'équilibre calco-carbonique de l'eau a été étudié pour les problèmes de corrosion car l'excès de CO₂ libre est responsable de l'agressivité de l'eau et de la dissolution des métaux. À l'inverse une faible teneur en CO₂ entraîne des dépôts de carbonate de calcium (incrustation).

L'équilibre des bicarbonates de calcium en solution dans l'eau s'écrit de la façon suivante :



Cette réaction montre bien que le départ d'une certaine quantité de CO₂ déplace l'équilibre et conduit à la formation de carbonate de calcium très peu soluble, le gaz carbonique libre est donc un facteur déterminant de l'équilibre physico-chimique d'une eau.

On utilise de plus en plus souvent, pour caractériser l'équilibre d'une eau, l'index de stabilité ou index de Riznar :

$$\text{IR} = 2 \text{ pHs} - \text{pH réel}$$

Cet index permet non seulement de différencier aisément, une eau entartrante d'une eau agressive ou d'une eau stable, mais aussi d'évaluer l'importance de l'entartrage ou de l'agressivité comme le montre le tableau suivant :

IR > 8,7	Eaux très agressives
8,7 > IR > 6,9	Eaux moyennement agressives
6,9 > IR > 5,8	Eaux stables
5,8 > IR > 3,7	Eaux entartrantes
3,7 > IR	Eaux très entartrantes

L'application de l'index de Riznar sur 185 analyses d'eau montre que les eaux sont plutôt agressives aux températures *in situ* rencontrées dans les nappes, soient 12 à 15 °C (figure 2).

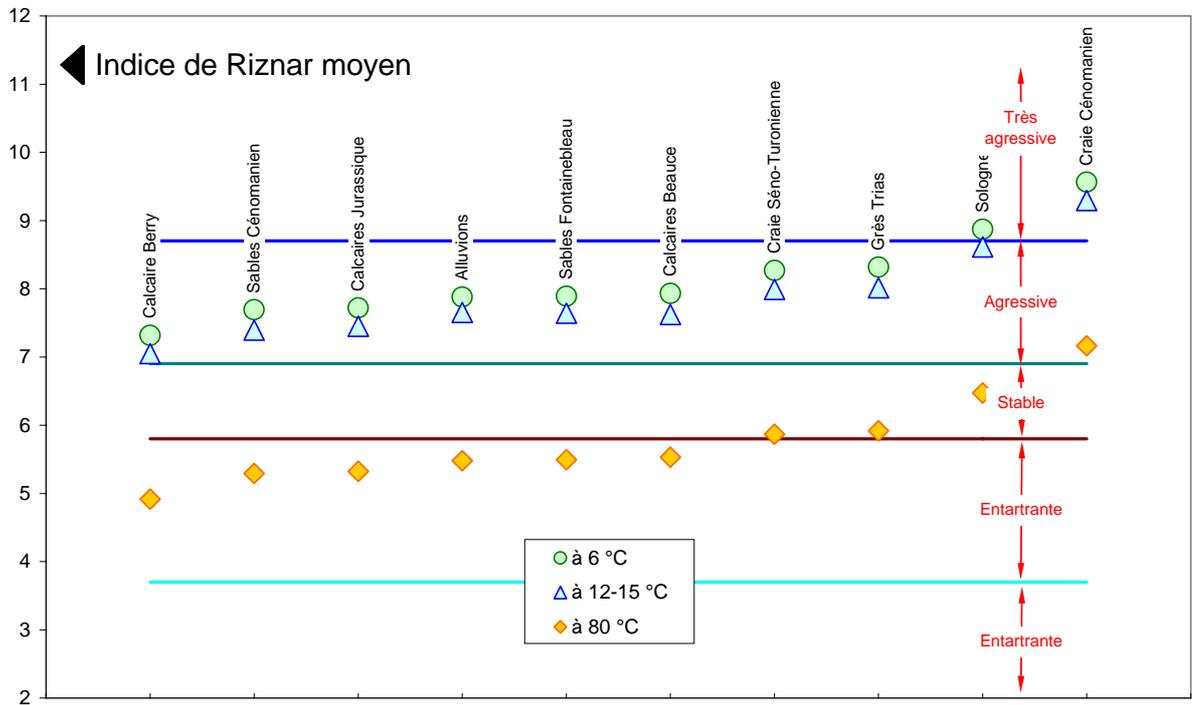


Figure 2 – Représentation de l'influence de la température sur l'index de Riznar moyen en fonction des niveaux captés.

2.5. TEMPÉRATURE DE LA NAPPE

L'analyse d'un échantillon de 619 mesures de température *in situ*, réalisées sur des forages d'eau situés en région Centre, permet de dresser le diagramme température de l'eau - profondeur de la nappe, et d'en tirer les tendances pour la tranche 0 à 100 m. Les résultats sont indiqués sur la figure 3. Les 462 mesures, réalisées sur les forages de moins de 100 m de profondeur, montrent que les températures, pour une profondeur de moins de 100 m, sont comprises entre 10 et 15 °C, avec une moyenne de 12,8 °C, sans que l'on puisse en dégager de tendance beaucoup plus précise. En effet, pour des forages compris entre 0 et 20 m de profondeur, les températures s'évalent déjà entre 10 et 15 °C. Au-delà de 100 m de profondeur, la température augmente régulièrement avec un gradient de température de 4 °C pour 100 m de profondeur.

On retiendra dans notre projet, comme estimation de la température de la nappe, préalablement à la réalisation d'un forage, une température voisine de 12 °C sous la surface du sol, qui augmente avec la profondeur et qui peut atteindre 15 °C à 100 m de profondeur.

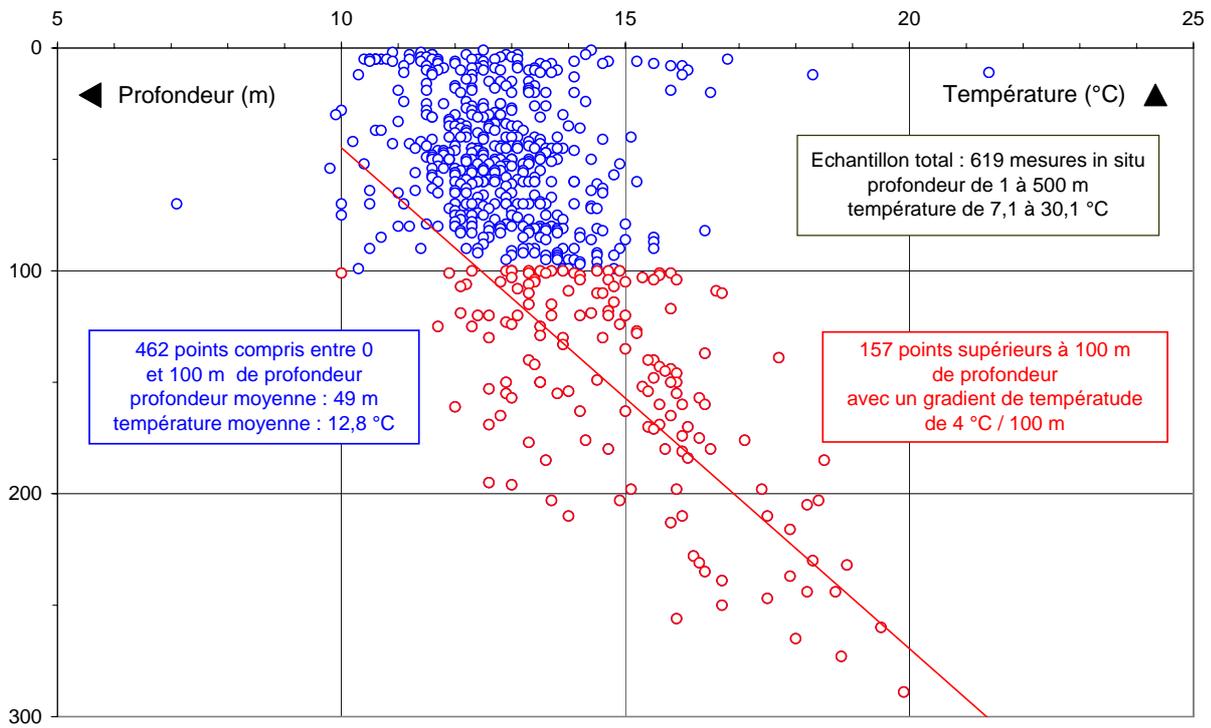


Figure 3 – Courbe profondeur de la nappe - température de l'eau.

3. Potentialité géothermique des aquifères

3.1. ORGANISATION DES DONNÉES

C'est afin de mieux pouvoir manipuler les informations physiques et chimiques que celles-ci ont été ramenées sur une maille carrée. Ainsi, les données relatives à la définition du potentiel géothermique des aquifères (nature de l'aquifère, débit disponible, profondeur de la nappe, profondeur du toit de l'aquifère sous recouvrement) ont été mises sur un maillage régulier de 500 m de côté qui couvre, avec 158 121 mailles, l'ensemble du territoire de la région Centre. En interrogeant ponctuellement le potentiel géothermique, à l'aide du CD-ROM interactif, on fait afficher les données associées à la maille sélectionnée sous-jacente.

3.2. SCHÉMA DE PRINCIPE DE LA PRÉSENTATION DES DONNÉES

La géologie de la région Centre présente de nombreux aquifères, bien souvent superposés. En chaque point du territoire, la coupe hydrogéologique standard peut être schématisée comme une superposition de deux aquifères (figure 4). Cependant, lorsque le niveau supérieur a une épaisseur de plus de 100 m, le deuxième aquifère n'est pas représenté.

Les données présentées sur le schéma de principe sont les suivantes :

altitude sol : altitude moyenne du sol en m NGF (par rapport au niveau de la mer) ;

aquifère n° 1 : nature de l'aquifère (alluvions, sables et argiles de Sologne, . . .) ;

profondeur niveau 1 : profondeur par rapport au sol de la surface de la nappe du niveau géologique aquifère supérieur (niveau n° 1) ;

niveau imperméable : niveau imperméable qui sépare les niveaux aquifères 1 et 2 ;

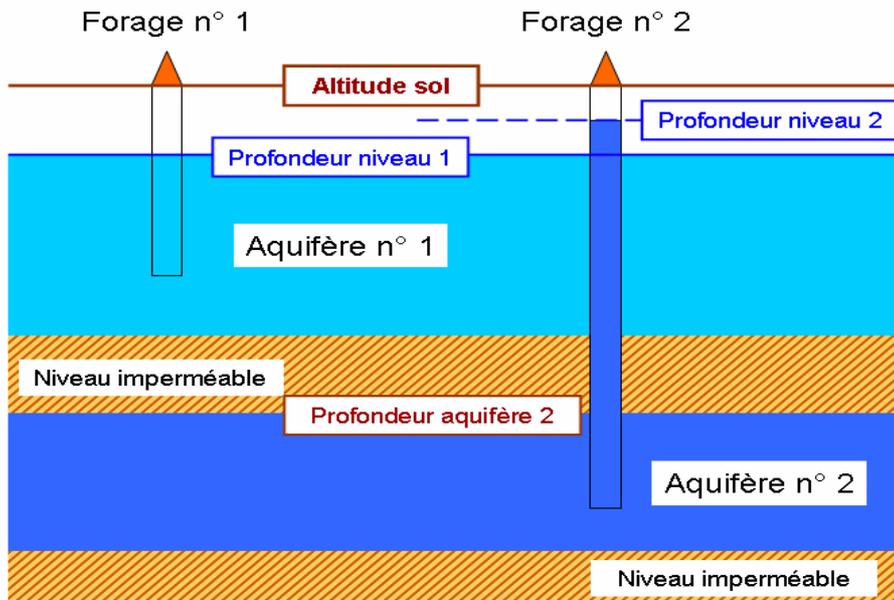
aquifère n° 2 : nature de l'aquifère (calcaires de Beauce, Craie du Séno-Turonien, . . .) ;

profondeur aquifère 2 : profondeur par rapport au sol du toit du niveau géologique aquifère inférieur (niveau n° 2) ;

profondeur niveau 2 : profondeur par rapport au sol de la surface de la nappe du niveau géologique aquifère inférieur (niveau n° 2).

Selon la configuration hydrogéologique locale, la profondeur du niveau 2 peut être supérieure ou inférieure à la profondeur de l'aquifère 2, de même vis-à-vis de la profondeur du niveau 1.

Cas de deux niveaux aquifères superposés



Cas d'un seul niveau aquifère

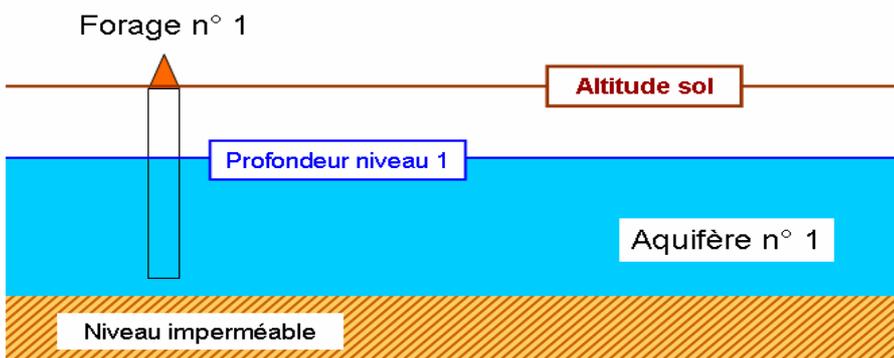


Figure 4 – Coupe hydrogéologique simplifiée des aquifères potentiellement exploitables.

3.3. AQUIFÈRES CAPTÉS

On présente dans le tableau 2, les niveaux aquifères et leur pourcentage par rapport à la superficie totale de la région Centre.

56 % du territoire de la région Centre offre deux niveaux aquifères superposés sur l'épaisseur 0 à 100 m.

Les cartes des formations géologiques sont indiquées sur les figures 5 et 6.

Aquifère	% niveau aquifère 1	% niveau aquifère 2
Alluvions	5	0
Sables et argiles de Sologne	16	0
Calcaires de Beauce	14	15
Calcaires de Touraine	3	0
Calcaires du Berry	1	0
Argiles à silex (aquifère)	1	0
Craie séno-turonienne	29	18
Craie cénomaniennne	1	5
Sables du Cénomanienn	6	15
Calcaires du Jurassique	20	3
Grès du Trias	1	0
Socle	3	0
Sup. à 100 m	-	44
TOTAL	100	100

Tableau 2 – Les niveaux aquifères et leur pourcentage par rapport à la superficie totale de la région Centre.

Les niveaux aquifères 1 sont généralement des nappes libres, tandis que les niveaux aquifères 2 sont toujours des nappes captives.

3.4. DÉBIT DE PRODUCTION POSSIBLE

Pour chaque formation géologique aquifère, il a été établi des probabilités des débits possibles. On a retenu pour chaque débit disponible une fourchette basse, qui correspond à 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit, et une fourchette haute, qui correspond à 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit. Les débits présentés supposent un rabattement de 5 m dans l'ouvrage de production.

On a retenu pour le calcul de la note de productivité géothermale la fourchette basse du débit de production possible (tableau 3).

On a retenu 3 classes de débit selon les critères suivants :

- débit de moins de 5 m³/h : en dessous de cette valeur, les risques d'avoir un échec de production sont élevés, la ressource est considérée comme faible, même si 3 m³/h peuvent bien souvent suffire pour couvrir les besoins d'un petit pavillon ;
- débit de 5 à 15 m³/h : cette gamme de débit permet d'envisager le chauffage d'un ou deux pavillons dans de bonnes conditions économiques ;
- débit de plus de 15 m³/h : cette gamme de débit permet d'envisager le chauffage de grands bâtiments ou d'un ensemble de plusieurs pavillons.

Les cartes des débits de production possibles sont indiquées sur les figures 5 et 6.

Débit (m ³ /h) (*)	Note	(% du territoire) niveau aquifère 1	(% du territoire) niveau aquifère 2
plus de 15	3	39	18
de 5 à 15	2	35	39
moins de 5	1	26	43

(*) pour un rabattement de 5 m au puits de pompage

Tableau 3 – Note attribuée aux mailles de 500 m en fonction de leur débit disponible (fourchette basse).

3.5. PROFONDEUR DE LA NAPPE OU DE L'AQUIFÈRE

Une des caractéristiques principales de la ressource géothermale est sa profondeur. Celle-ci va se traduire par une profondeur minimale du forage de production qui sera à réaliser pour mobiliser la ressource. Selon que l'aquifère visé est un aquifère à nappe libre (niveau n° 1 - sans couverture géologique) ou un aquifère à nappe captive (niveau n° 2 - avec une couverture géologique), la profondeur de la ressource sera soit la profondeur nécessaire pour atteindre la surface piézométrique (le plan d'eau du niveau n° 1) de la nappe libre, soit la profondeur nécessaire pour atteindre le toit (la partie supérieure du niveau n° 2) de l'aquifère captif. Le plus souvent, dans le second cas, la surface piézométrique de la nappe captive va remonter dans le forage de production à un niveau supérieur à celui-ci du toit de la formation. Ce schéma de principe est

Géothermie en région Centre Potentialité de la ressource du niveau supérieur

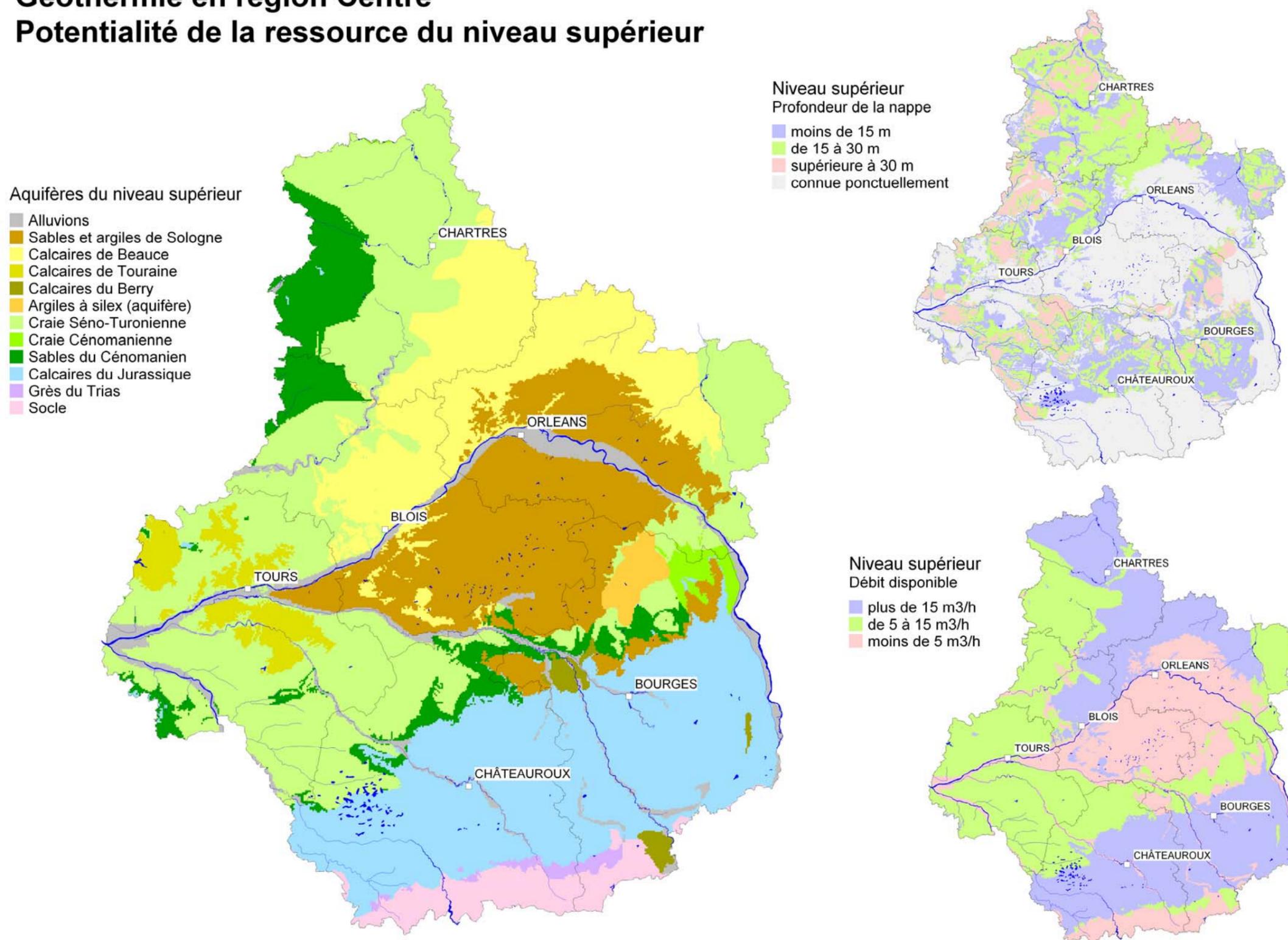


Figure 5 – Carte des potentialités géothermiques des niveaux aquifères supérieurs.

Géothermie en région Centre Potentialité de la ressource du niveau inférieur

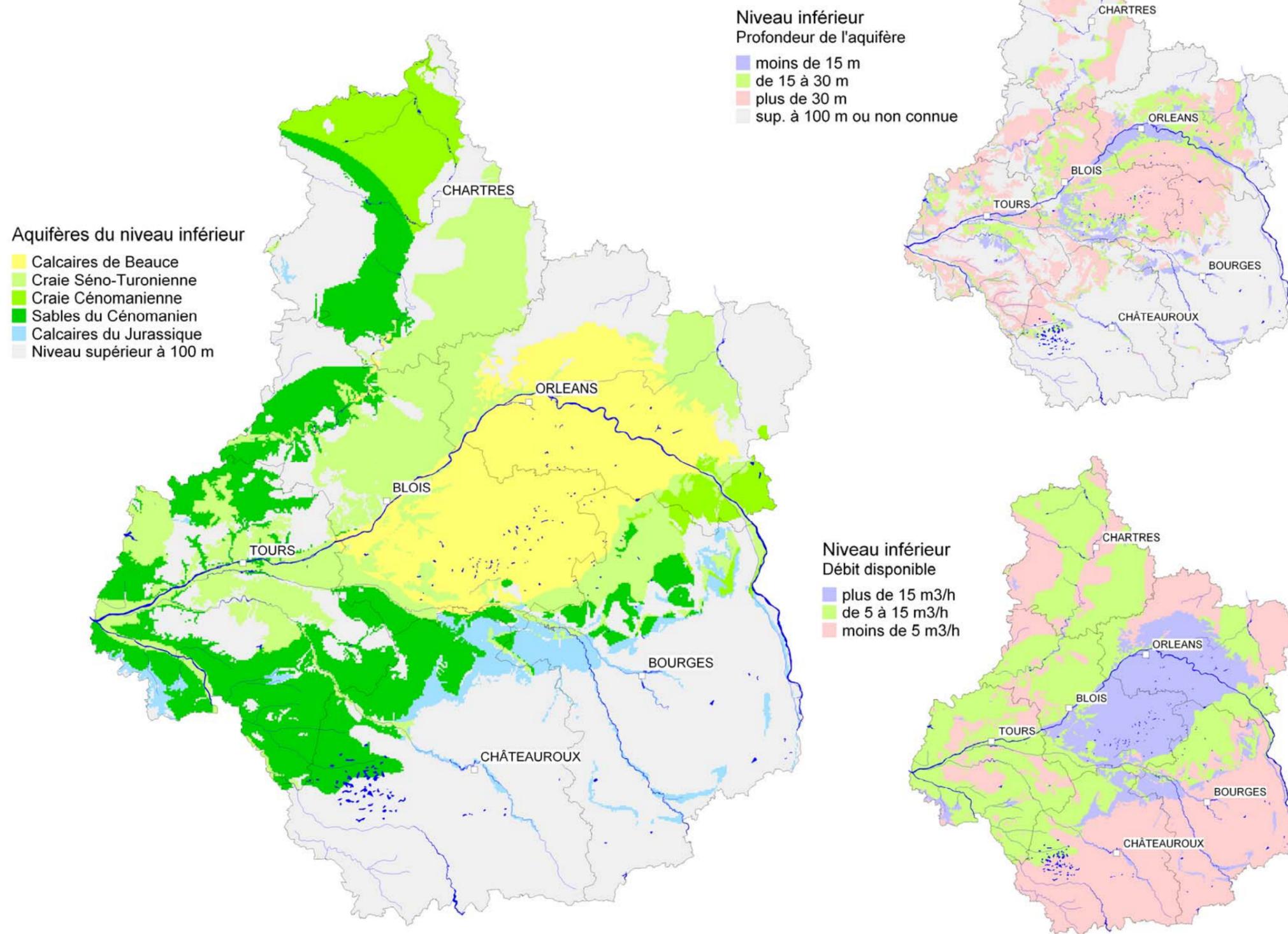


Figure 6 – Carte des potentialités géothermiques des niveaux aquifères inférieurs.

représenté sur la figure 4. Pour le calcul de la note du potentiel géothermique de la ressource du niveau n° 2, il a été retenu la valeur la plus grande des deux profondeurs (toit de l'aquifère ou niveau piézométrique).

La profondeur de la nappe ou de l'aquifère, indiquée dans la base de données de l'atlas géothermique, outre le fait qu'elle n'a « qu'un caractère indicatif » (voir le chapitre introduction de ce rapport), constitue la profondeur réelle du forage à réaliser pour capter la ressource. En effet, la profondeur réelle d'un forage d'eau doit tenir compte de la profondeur de la nappe ou de l'aquifère comme il est indiqué ci-dessus, mais également du rabattement induit dans le puits de production (voir cône de rabattement de la figure 1) par l'exploitation de la ressource (hypothèse retenue de 5 m de rabattement), de la hauteur de la pompe immergée et d'une tranche d'eau d'au moins un mètre entre le bas de la pompe immergée et le fond du forage. Ces précisions techniques des caractéristiques du projet de captage géothermique devront être apportées, au cas par cas, par le bureau d'étude chargé d'étudier le projet de réalisation.

La profondeur de la nappe ou de l'aquifère a été estimée d'après les cartes piézométriques disponibles ou de la géométrie des aquifères sous recouvrement (tableau 4).

On a retenu 4 classes de profondeur selon les critères suivants :

- forage de moins de 15 m de profondeur : forage d'un moindre coût, permettant la réalisation économique d'un projet de pompe à chaleur pour un pavillon ;
- forage de 15 à 30 m de profondeur : forage dont le coût commence à peser assez fortement sur l'économie d'un projet de pompe à chaleur pour un pavillon ;
- forage de plus de 30 m de profondeur : forage dont le coût ne peut être amorti que sur une forte consommation en surface (grand bâtiment ou ensemble de plusieurs pavillons) ;
- forage de plus de 100 m de profondeur : géothermie profondeur qui dépasse le cadre de cet atlas géothermique.

Profondeur (m)	Note	(% du territoire) niveau 1	(% du territoire) niveau 2
moins de 15	3	24	6
de 15 à 30	2	24	10
plus de 30	1	10	25
supérieur à 100 m	0	0	43
non connue	-	42	16

Tableau 4 – Note attribuée aux mailles de 500 m en fonction de la profondeur de la nappe ou de l'aquifère.

Les cartes des profondeurs sont indiquées sur les figures 5 et 6.



Figure 7 – Carte des potentialités géothermiques des aquifères de la région Centre.

Caractéristiques du forage géothermique de production : réalisation d'un doublet géothermique.

Une opération de géothermie par prélèvement d'eau dans la nappe suppose que l'eau prélevée soit retournée, une fois refroidie, dans l'aquifère d'origine. Cette condition nécessite la conception pour chaque opération de géothermie d'un doublet de forages, constitué d'un puits de production appelé puits chaud, et d'un puits de réinjection appelé puits froid. Ces deux puits doivent être réalisés à des distances suffisantes, et en tenant compte du sens d'écoulement de la nappe, pour éviter le recyclage des eaux de la nappe. Les forages doivent être conçus en respectant les recommandations de la Loi sur l'eau qui interdit le mélange des eaux de plusieurs nappes, et la mise en communication des nappes.

3.6. NOTE DE PRODUCTIVITÉ GÉOTHERMALE

Il a été décidé lors du comité de pilotage du 18 octobre 2006 qu'une **note de productivité sera calculée** prenant en compte les règles suivantes :

- une note unique, indépendante de l'utilisation de la ressource géothermale ;
- une note globale, calculée à partir des valeurs de débit (*), de la profondeur minimale (**), de la qualité chimique de l'eau.
 - (*) Le débit retenu sera celui qui correspond à un rabattement de 5 m dans le puits, valeurs présentées sous forme d'une fourchette : 75 % de probabilité d'avoir au moins ce débit, 50 % de probabilité d'avoir au moins ce débit.
 - (**) Profondeur minimale : profondeur de l'eau pour l'aquifère supérieur, profondeur du toit de la formation pour l'aquifère inférieur.

On a attribué à chaque point du territoire (maille de 500 m de côté) une note de productivité géothermale qui correspond à la somme des notes correspondant au débit de production possible (note variant de 1 à 3) et à la profondeur de la nappe ou de l'aquifère (note variant de 0 à 3). Lorsqu'il existe deux niveaux aquifères, la meilleure note a été retenue. Les notes de productivité géothermale varient ainsi de 1 à 6. Celles-ci ont été regroupées en 3 classes : FORTE, MOYENNE, FAIBLE comme il est indiqué dans le tableau 5.

La carte des notes de productivité géothermale est indiquée sur la figure 7.

Le choix des notes attribuées et la pondération identique affectée aux notes des débits et aux notes des profondeurs résultent du fait qu'il est possible d'avoir plusieurs cas de figure :

- cas n° 1 : lorsque l'on cherche un site avec un fort potentiel géothermique, le coût du forage de production peut être rapidement amorti par l'exploitation de la ressource, et dans ce cas la composante profondeur de l'ouvrage a moins d'importance ;
- cas n° 2 : lorsque l'on cherche un site avec un potentiel géothermique faible, le coût du forage de production peut avoir une forte influence sur l'économie du projet, et dans ce cas la composante profondeur de l'ouvrage a plus d'importance que

l'aspect débit disponible, dans la mesure où un débit bien supérieur aux besoins n'apporterait rien à l'intérêt du projet.

Le tableau 5 présente donc une situation non ciblée pour une utilisation particulière.

À partir de la base de données constituée, il peut toujours être possible de réaliser des traitements spécifiques à des usages particuliers, comme par exemple liste des communes présentant un fort potentiel géothermique ponctuel.

Note	Potentialité géothermale	% du territoire
5 et 6	FORTE	46
4	MOYENNE	24
< 3	FAIBLE	11
-	Non connues précisément	19

Tableau 5 – Potentialité de la ressource géothermale - Pourcentage du territoire en fonction des notes attribuées (dans le cas d'une superposition d'aquifères, c'est la meilleure note qui a été retenue).

4. Carte des potentialités géothermales pour un forage, exprimées en KW thermique

Le potentiel géothermique de la ressource souterraine peut être exprimé en puissance thermique - exprimée en KW - prélevable sur la ressource souterraine par une pompe à chaleur, pour un forage de production, avec certaines hypothèses de fonctionnement.

La puissance thermique prélevée sur la ressource souterraine correspond à la puissance de l'évaporateur de la pompe à chaleur. La puissance thermique disponible au condenseur de la pompe à chaleur pour le chauffage correspond à la puissance de l'évaporateur à laquelle il faut rajouter la puissance électrique du compresseur.

On a calculé le potentiel géothermique, exprimé en KW thermique, pour un forage de production, avec les hypothèses suivantes :

- débit du forage de production : valeur minimum, le plus élevé des deux niveaux aquifères de l'atlas géothermique ;
- écart de température pris sur la ressource géothermale : 6 °C ;
- puissance thermique disponible en KW thermique = $1,16 \times \text{débit (m}^3/\text{h)} \times 6 \text{ (}^\circ\text{C)}$.

Les résultats sont indiqués sur la carte de la figure 8. Ils correspondent en tout point à un forage de production. Une bonne partie du territoire de la région Centre dispose d'une puissance thermique disponible supérieure à 10 KW, ce qui est suffisant pour envisager le chauffage de pavillons.

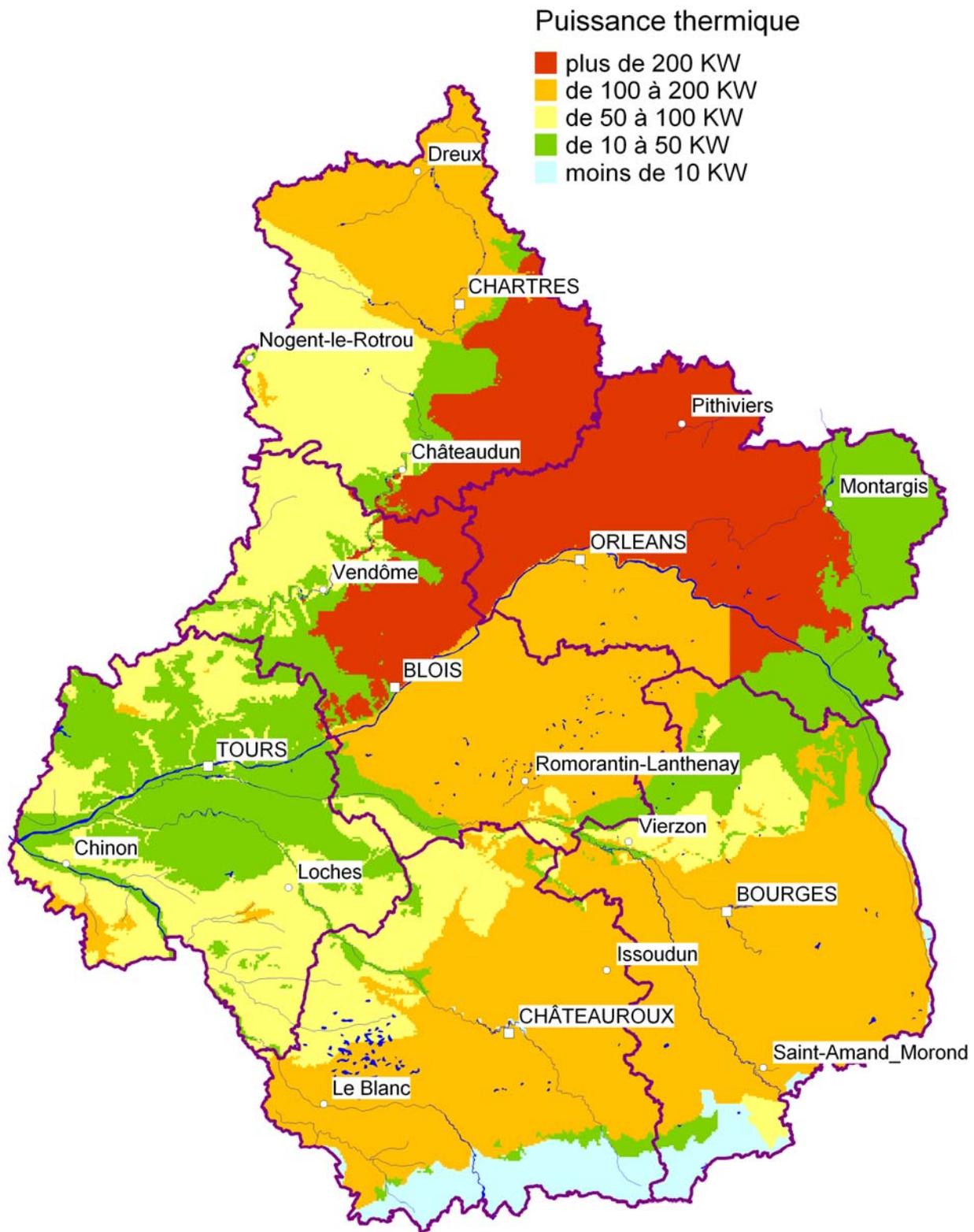


Figure 8 – Puissance thermique disponible dans la nappe - Hypothèse basse, exprimée en KW thermique, pour 6 °C de puisement sur la ressource.

5. Typologie des bâtiments susceptibles d'être chauffés par énergie géothermale

En fonction de la puissance thermique apportée par la ressource géothermale, contenue principalement dans le débit de production du forage, il est possible de raccorder différents types de bâtiments. Pour le choix des bâtiments et de leur superficie, il faut tenir compte également de deux aspects qui sont d'une part la classe d'isolation thermique des bâtiments (différence entre du neuf et de l'ancien), d'autre part le fait que la géothermie peut ne couvrir qu'une partie seulement des besoins de chauffage, le complément étant alors apporté par une énergie traditionnelle (gaz ou fioul).

On rappelle ci-dessous la définition du coefficient d'une pompe à chaleur, et les éléments du bilan thermique d'un projet de pompe à chaleur.

Énergie de chauffage = Énergie souterraine + Énergie électrique (compresseur PAC).

Coefficient de performance (COP) : il caractérise les performances de la PAC. Ordre de grandeur : 4.

$COP = \text{Énergie de chauffage} / \text{Énergie électrique (compresseur PAC)}$.

Une enquête réalisée auprès de l'ADEME et de bureaux d'étude thermiques a permis de dresser une typologie des bâtiments susceptibles d'être chauffés par énergie géothermale. Les résultats sont présentés dans les tableaux 6 et 7.

Source	Type de bâtiment	Superficie (m ²)	Ancien/Neuf	Puissance installée (KW)	Ratio (W/m ²)	P GTH (KW)	Débit (m ³ /h)	Catégorie
BET Grimoin	Collège (650 élèves)	5 600	Ancien	505	90	379	54	
BET Grimoin	Maison de retraite (81 lits)	4 900	Ancien	480	98	360	52	Débit > 40 m ³ /h
Clim Pratique	Supermarché	2 900		412	142	309	44	
ADEME	Centre administratif Besançon			260		195	28	Débit entre 20 et 40 m ³ /h
Clim Pratique	Résidence (49 appartements)			208		156	22	
BET Grimoin	Structure enfance	1 450	Neuf	88	61	66	9	Débit environ 10 m ³ /h
BET Grimoin	13 logements	740	Neuf	72	97	54	8	
BET Grimoin	Centre social	590	Ancien	42	71	32	5	
BET Grimoin	Mairie - École	445	Ancien	39	88	29	4	
BET Grimoin	Collège demi-pension (435 repas/jour)	585	Ancien	38	65	29	4	
BET Grimoin	Locaux techniques	410	Neuf	30	73	23	3	
BET Grimoin	Restaurant scolaire	320	Neuf	28	88	21	3	Débit < 10 m ³ /h
BET Grimoin	Centre social	245	Neuf	23	94	17	2	
BET Grimoin	Extension école	180	Neuf	14	78	11	2	
Clim Pratique	Pavillon	195		10	51	8	1	
Statistiques nationales	Pavillon	150		10	67	8	1	

Tableau 6 – Résultats de l'enquête faite auprès de l'ADEME et de bureaux d'étude sur les besoins thermiques des bâtiments en fonction de leur superficie.

Débit du forage	Puissance de chauffage (KW)	Type d'usage (*)
< 8 m ³ /h	moins de 40 KW	Pavillon 100 m ² - Petits bâtiments jusqu'à 500 m ² (mairie, école)
8 à 20 m ³ /h	moins de 100 KW	Petit logement collectif (10 appartements) - Bâtiments jusqu'à 1 500 m ²
20 à 40 m ³ /h	100 à 200 KW	Logement collectif (50 appartements) - Grand Centre administratif
> 40 m ³ /h	plus de 200 KW	Collège - Lycée - Maison de retraite - Supermarché - Bâtiment de 3 000 m ² et plus

(*) dépend aussi de la classe d'isolation thermique des bâtiments (neuf / ancien)

(*) possibilité de couvrir une partie seulement des besoins de chauffage (exemple Hôpitaux)

Tableau 7 – Typologie des bâtiments susceptibles d'être chauffés par énergie géothermale.

6. CD ROM interactif de présentation des potentialités géothermales

On présente ci-après (figures 9 à 17) les copies d'écran du CD-ROM inter actif qui permet de choisir une commune et d'afficher la coupe hydrogéologique standard avec les caractéristiques débit-profondeur.



Figure 9 – Page de titre du CD-ROM.

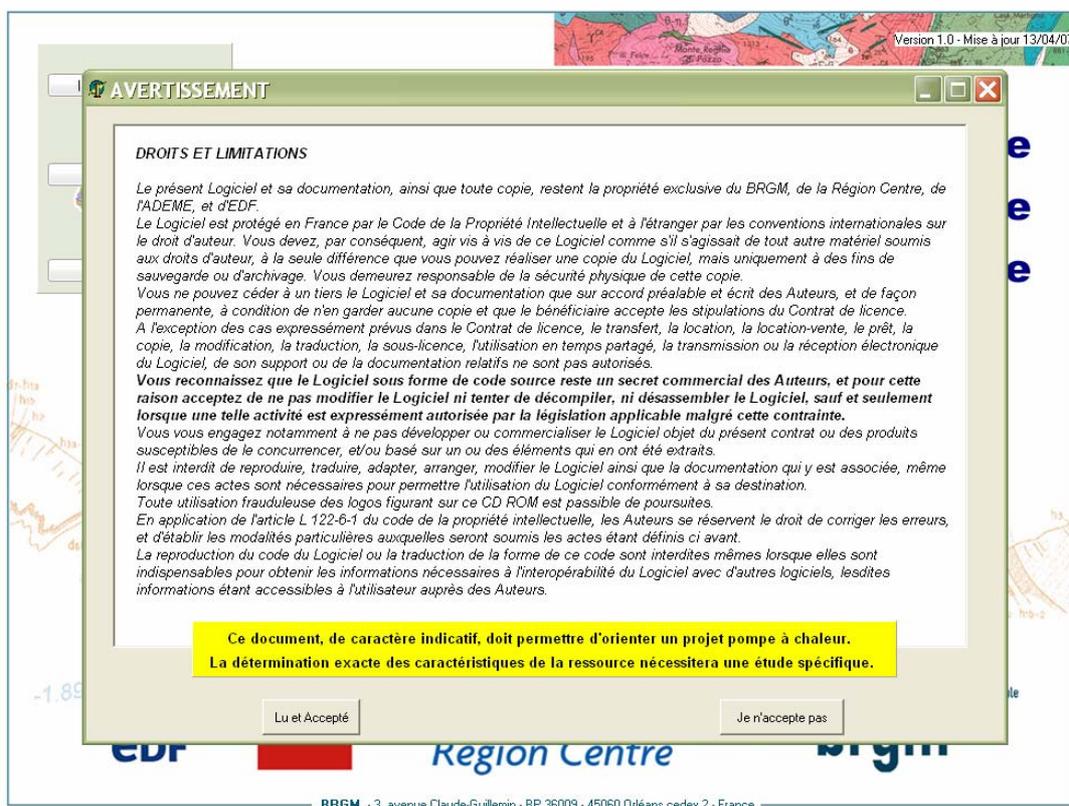


Figure 10 – Page avertissement.

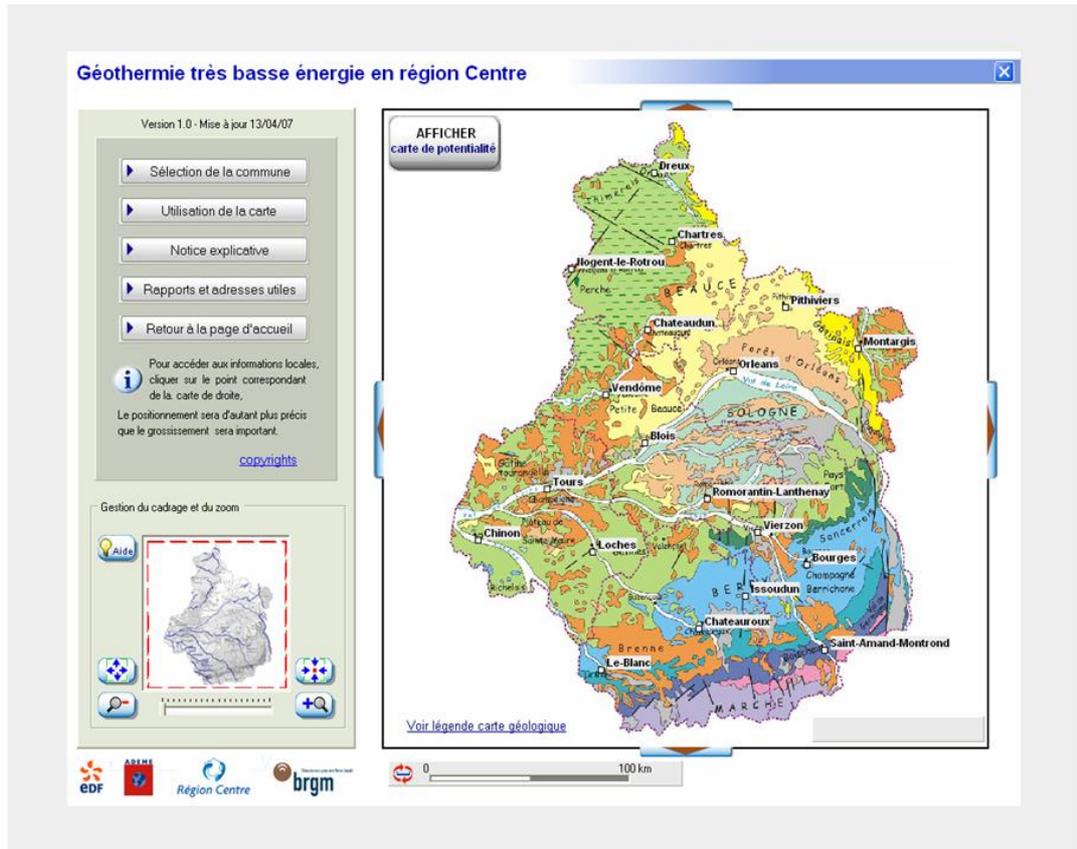


Figure 11 – Carte géologique de la région Centre.

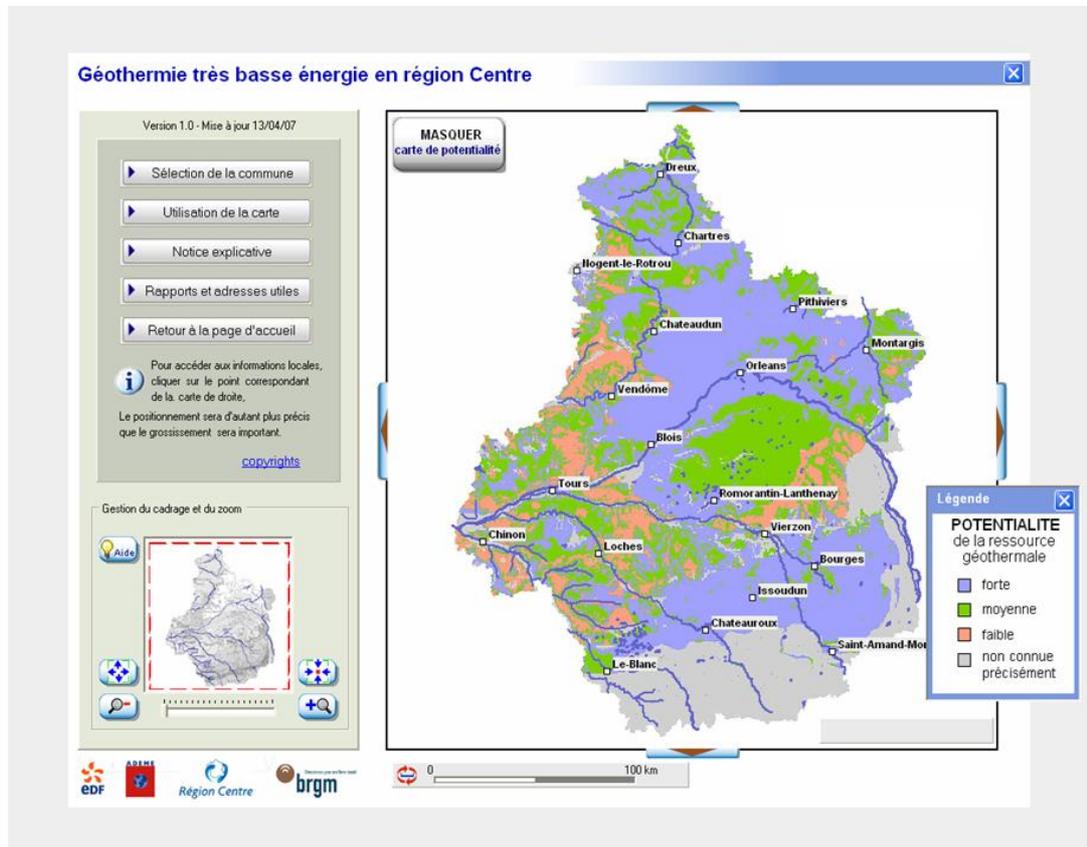


Figure 12 – Carte des potentialités géothermiques de la région Centre.

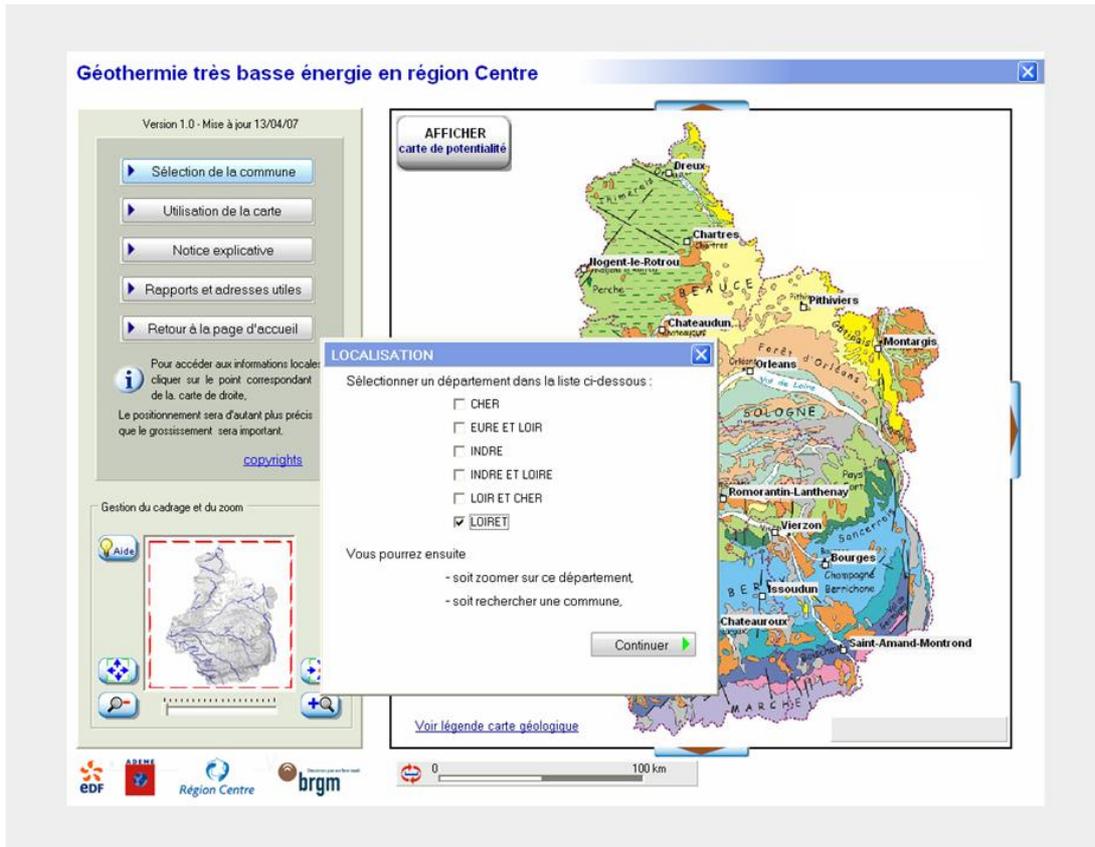


Figure 13 – Recherche d'une commune. Sélection du département.

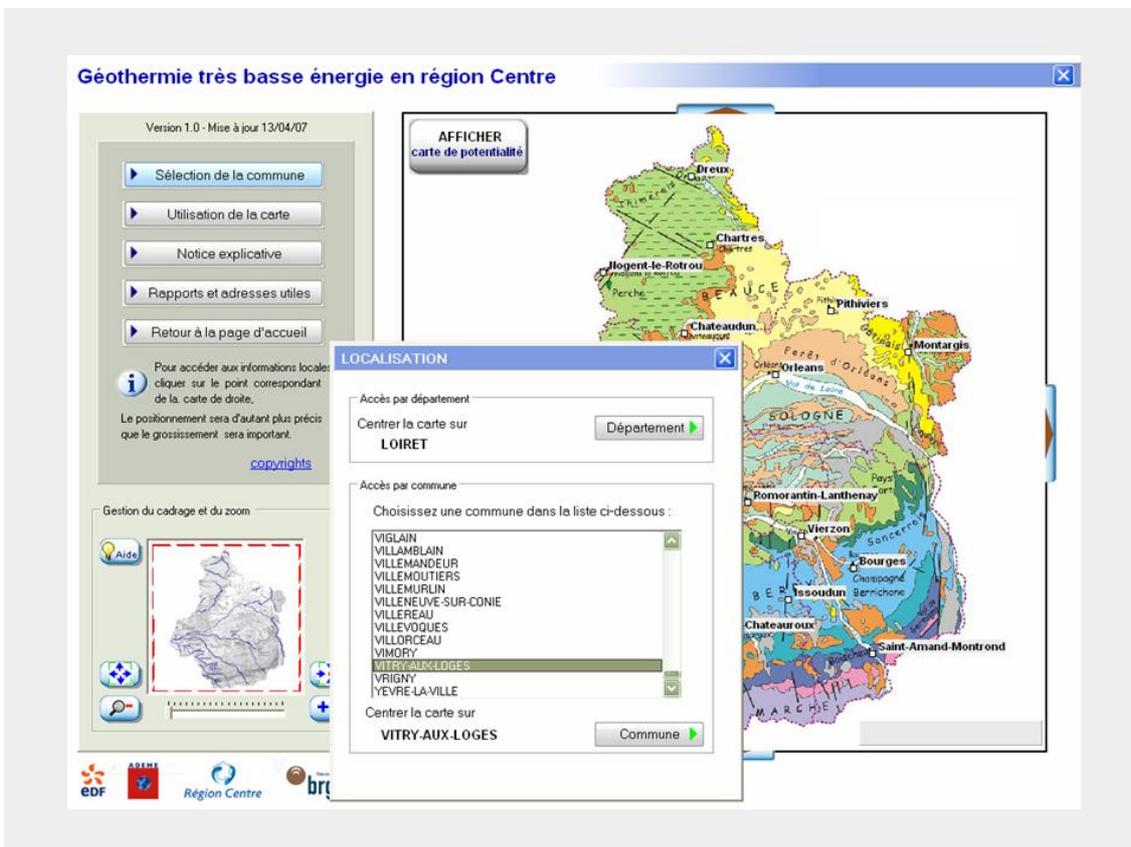


Figure 14 – Recherche d'une commune. Choix de la commune.

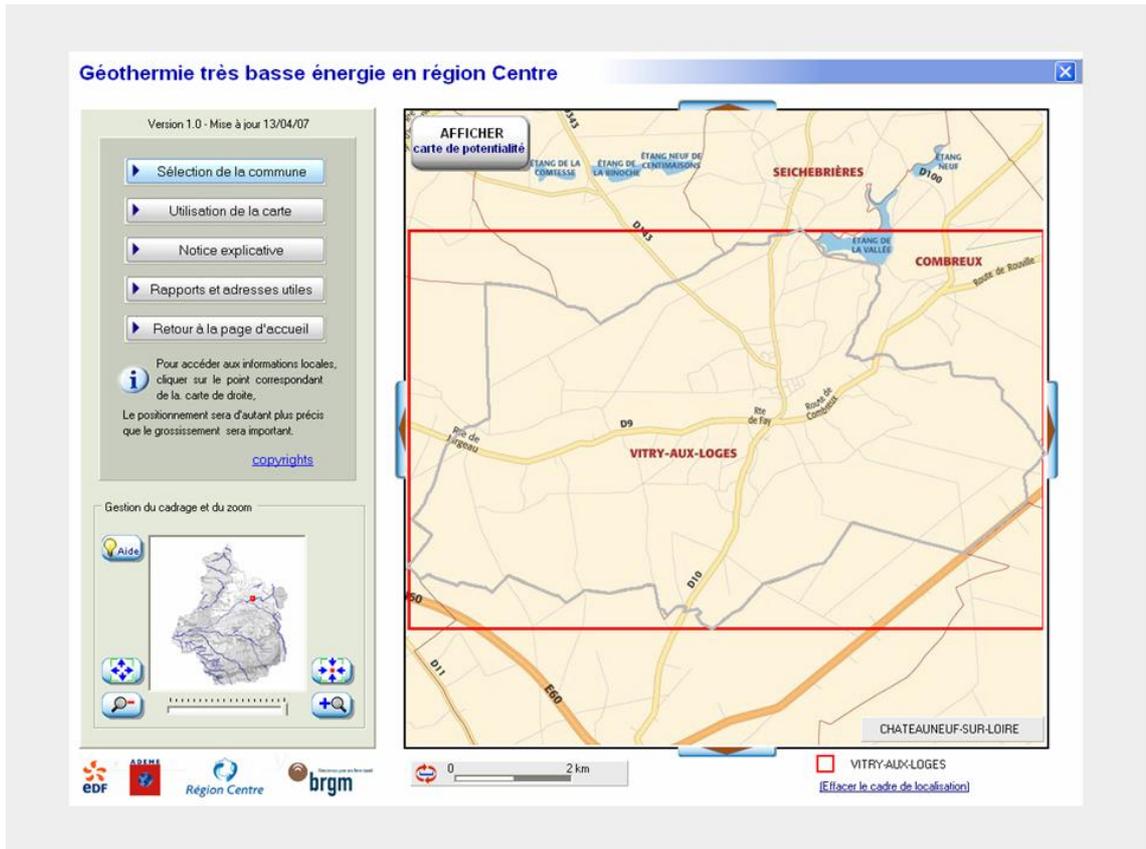


Figure 15 – Affichage de la commune recherchée avec les potentialités de la ressource géothermale.

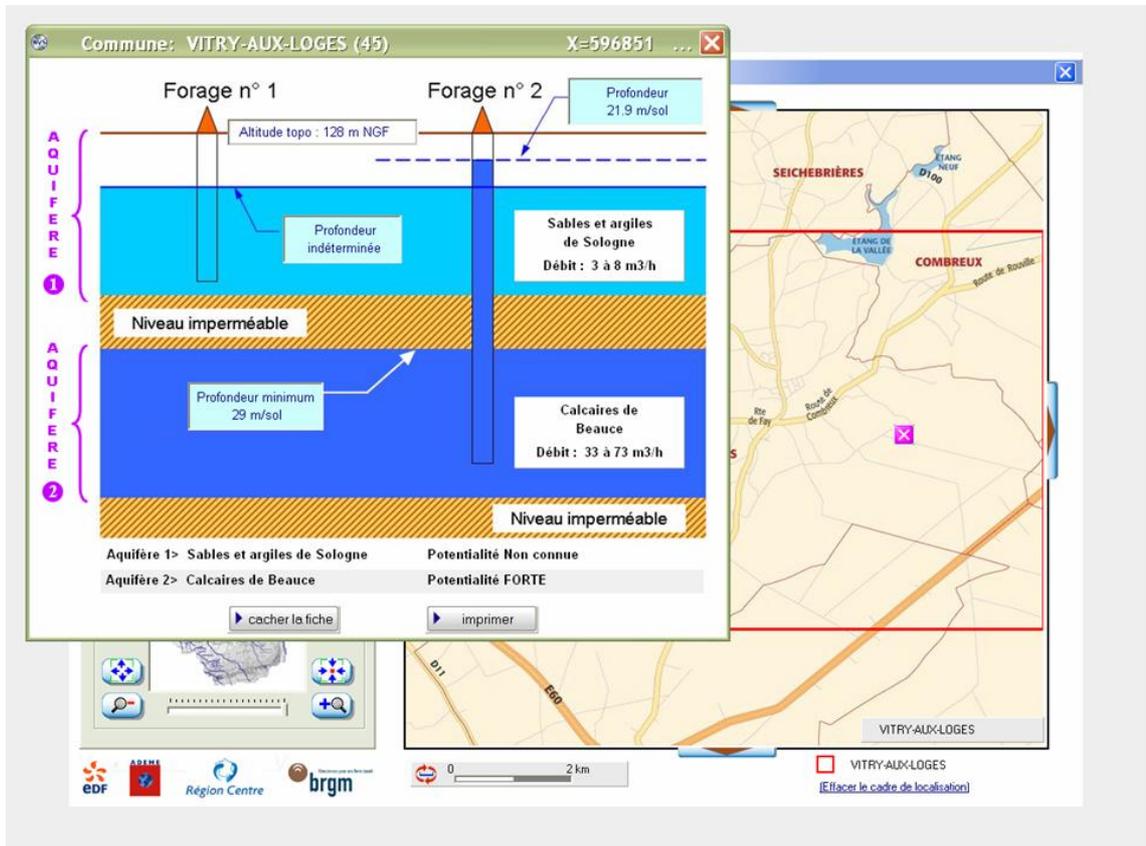


Figure 16 – Coupe hydrogéologique standard au droit du point sélectionné et caractéristiques débit-profondeur de la ressource.

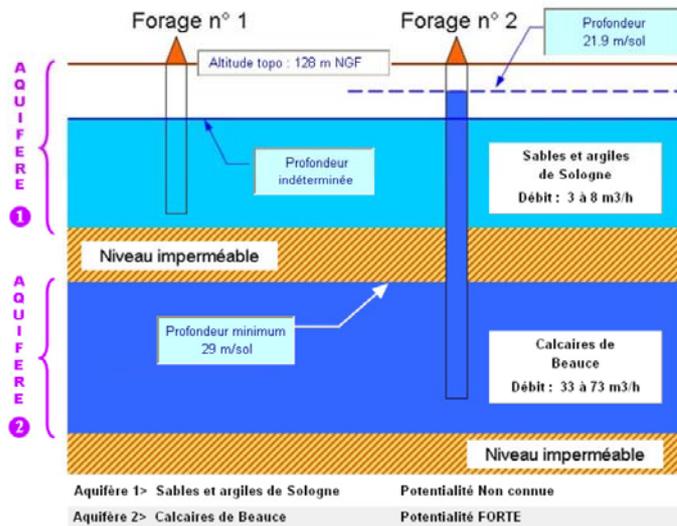


Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre

Résultat de l'interrogation : (maille MF229)

Commune : VITRY-AUX-LOGES (45)

Coordonnées du point (Lambert 2 étendu) : X=596851 Y=2325844



Version 1.0 - Mise à jour 13/04/07

Ce document de caractère indicatif, doit permettre d'orienter un projet pompe à chaleur.
La détermination exacte des caractéristiques de la ressource nécessitera une étude spécifique.

BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, BP36009, 45060 ORLEANS Cedex 2 - France

Figure 17 – Fiche synthétique de la recherche.

7. Conclusion

Le CD ROM de l'Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre, qui a été mis au point à partir de très nombreuses données géologiques, hydrogéologiques et chimiques, permet d'afficher en tous points du territoire de la région Centre le potentiel géothermique disponible ainsi que les caractéristiques débit-profondeur du point choisi. La recherche géographique peut se faire par le choix de la commune désirée.

Près de la moitié de la surface du territoire de la région Centre (46 %) présente une productivité géothermale jugée FORTE, permettant des opérations géothermiques conséquentes, près de la moitié du territoire de la région Centre (45 %) présente une productivité géothermale jugée MOYENNE, permettant des opérations géothermiques adaptées à du pavillon. Seuls 9 % du territoire ne se prêtent pas à la géothermie.

Annexe 1

Étude des caractéristiques chimiques des eaux souterraines

Introduction

L'exploitation géothermique de la ressource en eau nécessite de connaître la stabilité chimique des eaux afin d'évaluer leur impact éventuel sur les systèmes de pompe à chaleur.

À ce titre, une analyse physico-chimique des eaux a donc été entreprise afin de qualifier ces eaux sous l'aspect des phénomènes de dissolution-précipitation.

La méthode de caractérisation physico-chimique des eaux souterraines s'appuie sur une démarche qui se décompose en 4 étapes :

- recueil des données (interrogation des bases BSS et ADES) ;
- analyse statistique des données ;
- choix d'un indice de stabilité chimique des eaux ;
- représentation statistique par aquifère et cartographique de cet indice de stabilité.

1 - Recueil des données (interrogation des bases BSS et ADES)

Tous les forages de plus de 10 m de profondeur doivent être déclarés au titre de l'article 131 du titre VIII du Code minier. Les données relatives à ces forages sont enregistrées de façon numérique dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) du BRGM. On dénombre ainsi environ 40 000 points d'eau sur la région Centre. Les informations contenues dans la BSS concernent : l'indice de référence, les coordonnées géographiques, le nom de l'aquifère capté, la profondeur de l'ouvrage etc. On dispose, pour quelques forages, de données relatives à la qualité chimique des eaux captées.

La banque nationale ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines) rassemble des données quantitatives et qualitatives relatives aux eaux souterraines. Cette base de données permet de connaître, de localiser les réseaux et les stations de mesures et d'accéder aux résultats de mesures quantitatives (niveau des nappes) et qualitatives (concentration de nombreux paramètres dans l'eau). Les informations régulièrement actualisées sont disponibles par point et réseau de mesure, par bassin hydrographique, région et département, par aquifère.

Afin de caractériser les eaux souterraines d'un point de vue chimique, nous avons sélectionné les 5 éléments suivants en retenant les analyses les plus récentes :

- titre hydrotimétrique (TH) ;
- titre alcalimétrique complet (TAC) ;
- pH ;
- teneurs en chlorures ;
- teneurs en fer.

Le croisement des données issues de la BSS et de ADES conduit à la constitution d'une base de données propre à répondre à l'objectif de caractérisation de la stabilité chimique des eaux souterraines pour un usage géothermique.

Nous avons sélectionné les points pour lesquels on disposait, à la fois :

- du niveau capté connu ;
- d'au moins une analyse physico-chimique récente parmi les 5 paramètres retenus.

Seuls les forages dont la profondeur était inférieure à 110 m (cas de la géothermie très basse énergie) ont été retenus.

On a ainsi constitué un échantillon de 364 points disponibles pour la caractérisation des formations aquifères.

2 - Analyse statistique des paramètres physico-chimiques

Il s'agit de caractériser les aquifères de la région Centre pour chacun des 5 paramètres physico-chimiques retenus : titre hydrotimétrique (TH), titre alcalimétrique complet (TAC), pH, chlorures, fer total.

Le tableau 8 présente, de manière synthétique, la distribution des points d'observation par niveau aquifère.

Aquifère	Nombre de points d'observation / paramètre				
	TH	TAC	pH	Chlorures	Fer
Alluvions	11	19	19	19	19
Sables et argiles de Sologne	3	5	5	5	5
Calcaires de Beauce	61	152	149	149	169
Calcaires de Touraine	0	1	1	1	1
Calcaires du Berry	3	3	3	3	3
Craie Séno-Turonienne	50	95	104	105	105
Craie Cénomaniennne	4	5	5	5	6
Sables du Cénomanienn	4	7	7	7	7
Calcaires du Jurassique	36	37	37	37	37
Grès du Trias	12	12	12	12	12
Total	184	336	342	343	364

Tableau 8 – Distribution du nombre de points d'observation par paramètre et par aquifère.

Ainsi, les formations les plus représentées sont les calcaires de Beauce et la craie séno-turonienne.

Par ailleurs, notons que la liste des aquifères retenus correspond à la liste simplifiée présentée dans le rapport de février 2006 (BRGM/RP-54542-FR).

2.1. Représentation des paramètres chimiques à l'aide des boîtes à moustaches de Tukey

Les données chimiques ont été traitées par la méthode des « boîtes à moustaches de Tukey » qui permet de représenter schématiquement une distribution (figure 18 du rapport BRGM/RP-54542-FR). Plusieurs paramètres sont indiqués sur une boîte à moustaches :

- le premier quartile Q1 (25 % des effectifs) correspondant au trait inférieur 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 ;
- le troisième quartile Q3 (75 % des effectifs) correspondant au trait supérieur 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 situées au-delà des valeurs adjacentes sont individualisées. Elles sont représentées par les cercles noirs ;

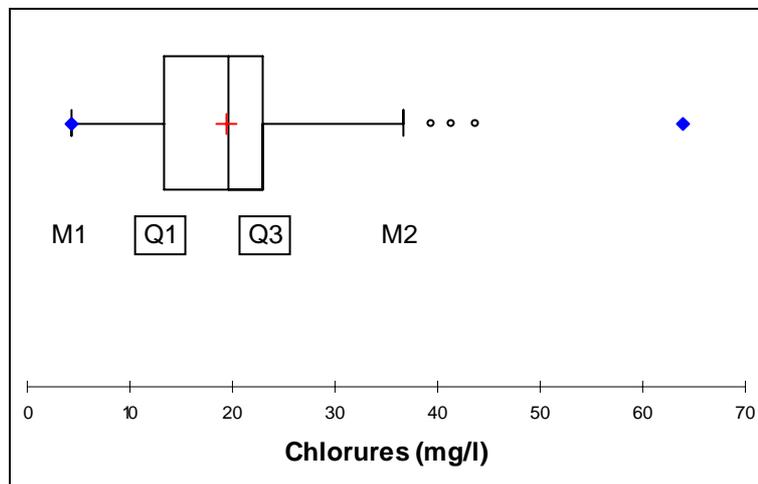


Figure 18 – Exemple de répartition des chlorures en nappe des calcaires de Beauce à l'aide d'une boîte à moustaches (149 points d'observation).

- les valeurs des minimum M1 et maximum M2 sont également individualisées et sont représentées par les points bleus ;
- la valeur de la moyenne représentée par une croix rouge.

2.2. Résultats statistiques sur les valeurs de titre hydrotimétrique

Le titre hydrotimétrique (TH), ou dureté, est une mesure de la concentration en ions alcalino-terreux : calcium et magnésium essentiellement. Il traduit le pouvoir entartrant de l'eau. 1 °f de TH correspond à une concentration de 10 mg/l de carbonate de calcium. Ainsi, on peut classer les eaux en fonction de leur dureté :

- TH < 10 °f : eau très peu calcaire,
- 10 < TH < 20 °f : eau peu calcaire,
- 20 < TH < 30 °f : eau calcaire,
- TH > 30 °f : eau très calcaire.

La figure 19 présente le résultat du traitement des valeurs TH, classées par aquifère (184 points d'observation au total).

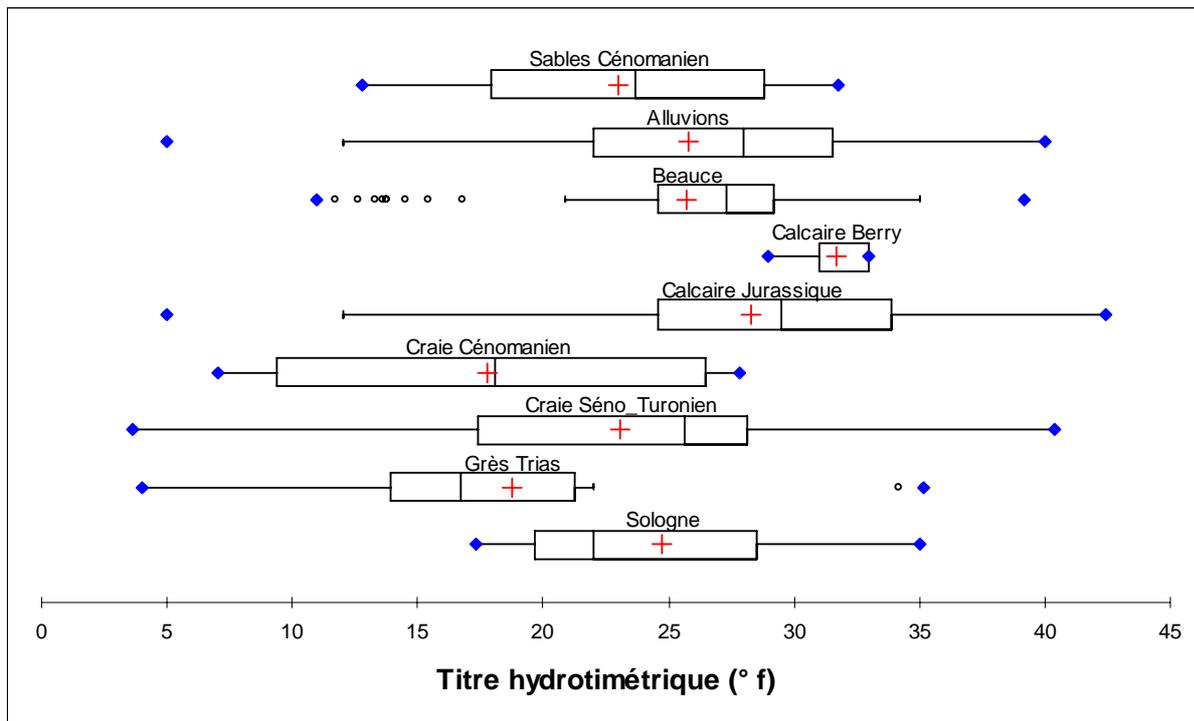


Figure 19 – Représentation du TH en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.

Si l'on s'intéresse aux valeurs moyennes ou médianes, on remarque que la majeure partie des nappes de la région Centre sont caractérisées par un faciès plutôt calcaire (TH de 20 à 30 °f). Cependant, compte tenu de l'étendue des valeurs, les faciès chimiques des eaux peuvent être très contrastés localement.

2.3. Résultats statistiques sur les valeurs de titre alcalimétrique complet

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est une mesure de l'alcalinité de l'eau (carbonates alcalins, hydrogencarbonates et total des hydroxydes). Il caractérise le pouvoir tampon de l'eau, c'est-à-dire la capacité d'influence d'un produit acide ou basique sur le pH de l'eau. Plus le TAC est élevé, et plus il est difficile de faire varier le pH de l'eau.

Ainsi, les alcalinités assurent la protection des métaux contre la corrosion. En conséquence, une trop faible alcalinité entraîne la dégradation des métaux.

La figure 20 présente le résultat du traitement des valeurs TAC, classées par aquifère (336 points d'observation au total).

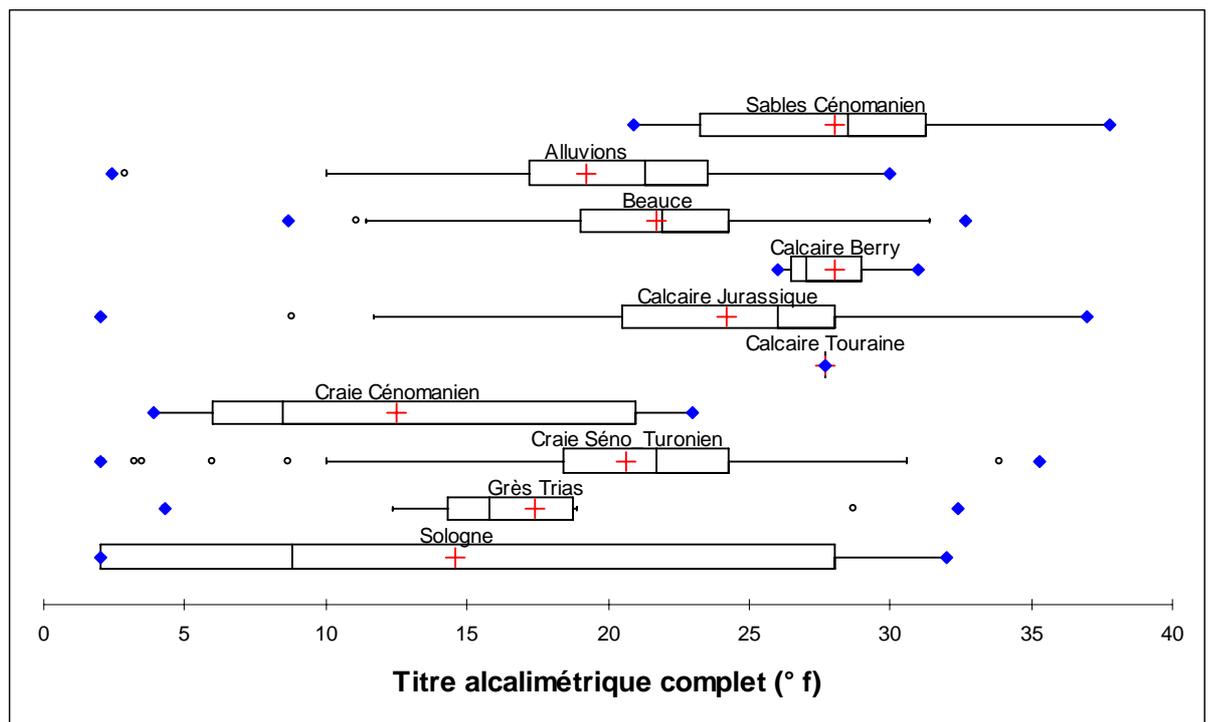


Figure 20 – Représentation du TAC en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.

Les plus basses valeurs moyennes et médianes de TAC se rencontrent notamment pour la craie cénonianienne et les sables et argiles de Sologne. Par conséquent, il semble que les forages implantés dans ces formations seront plus facilement sujets à des phénomènes de corrosion.

2.4. Résultats statistiques sur les valeurs de pH

Le pH mesure l'activité de protons solvatés. On en déduit le caractère acide ou basique d'une solution.

Ainsi, le pH du milieu a une influence sur :

- les phénomènes de corrosion (corrosion des métaux plus rapide à $\text{pH} < 6,5$) ;
- les phénomènes d'entartrage (carbonate de calcium plus soluble à faible pH) ;
- le développement des légionelles (développement favorisé à $6,8 < \text{pH} < 7$).

La figure 21 présente le résultat du traitement des valeurs pH, classées par aquifère (342 points d'observation au total).

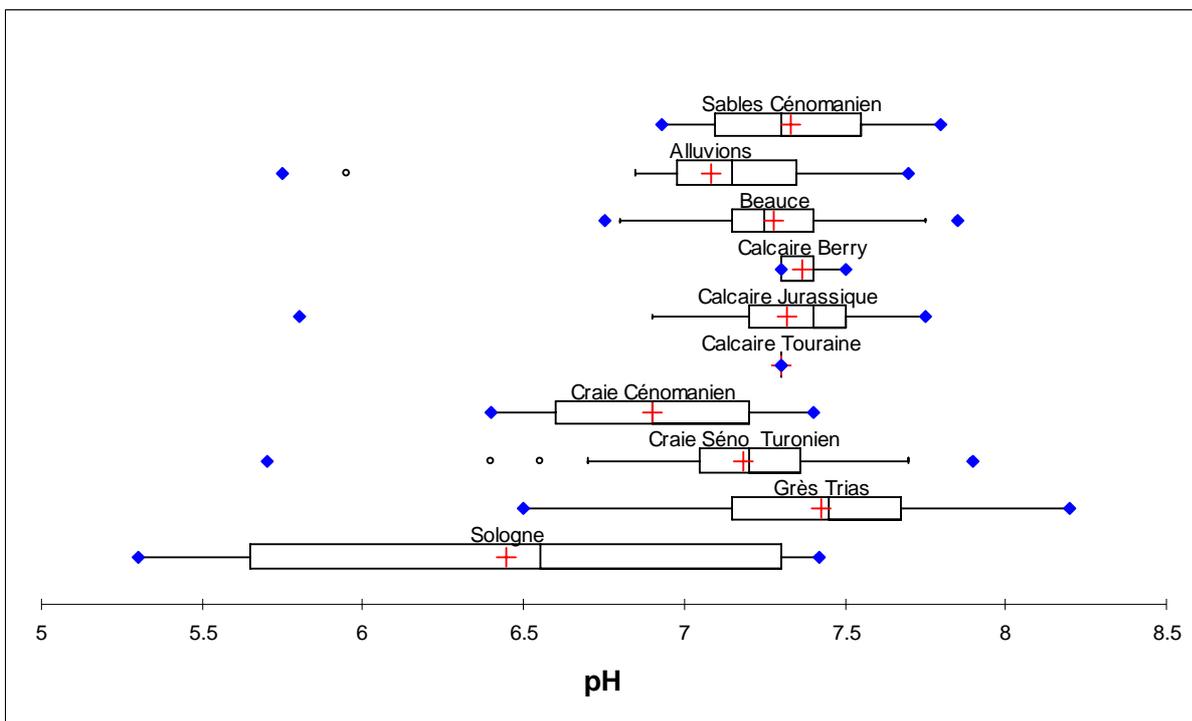


Figure 21 – Représentation du pH en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.

Les plus basses valeurs de pH se rencontrent notamment pour la craie cénonomienne et les Sables et argiles de Sologne. D'une manière générale, les valeurs moyennes et médianes se situent entre 7,1 et 7,4 (eau peu corrosive mais plus propice au développement de légionelles).

2.5 - Résultats statistiques sur les teneurs en chlorures

Les ions chlorures sont susceptibles de réagir avec l'eau en produisant de l'acide chlorhydrique. Il s'ensuit localement des zones à pH très faibles qui accélèrent la corrosion du métal.

Ainsi, par exemple, l'eau en contact avec du cuivre dans un circuit de pompe à chaleur risque de provoquer des corrosions dès l'instant où la teneur en chlorures est supérieure à 150 mg/l (valeur-guide à ne pas dépasser).

La figure 22 présente le résultat du traitement des valeurs chlorures, classées par aquifère (343 points d'observation au total).

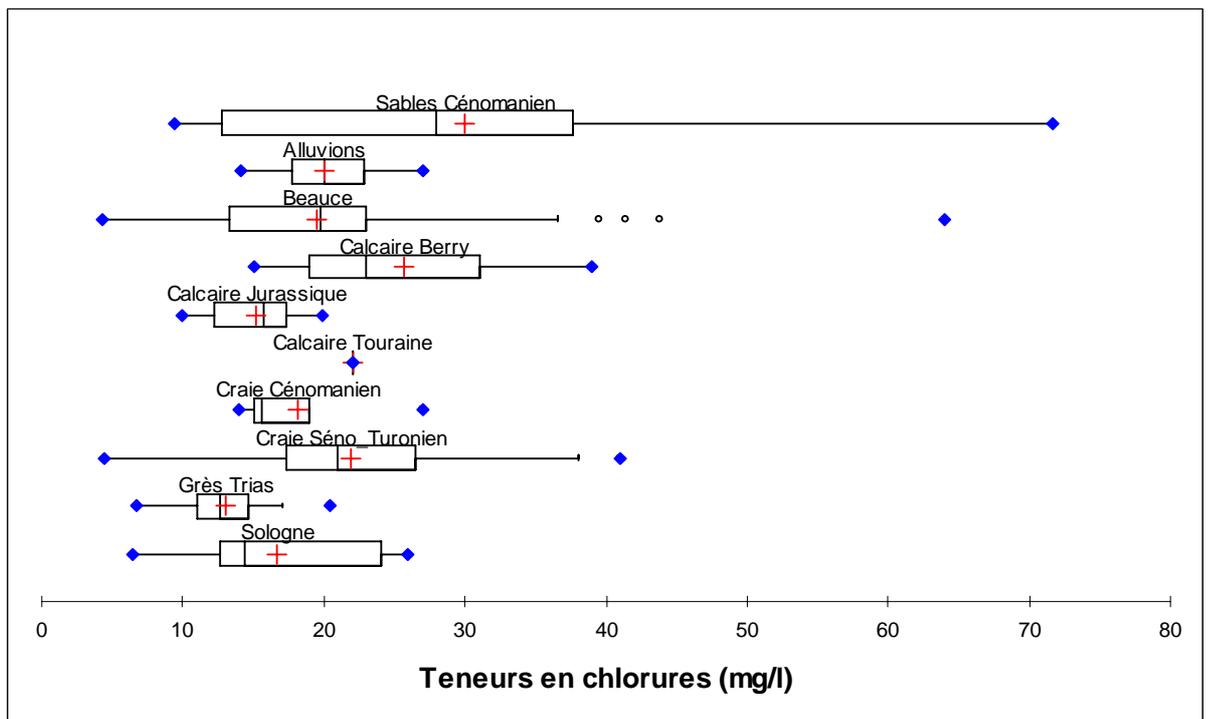


Figure 22 – Représentation des teneurs en chlorures en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.

Parmi les analyses d'eau disponibles, aucun dépassement de la valeur guide de 150 mg/l n'est constaté. Les valeurs moyennes et médianes se situent entre 12,6 et 30 mg/l.

2.6. Résultats statistiques sur les teneurs en fer total

La concentration en fer dans les eaux souterraines est principalement contrôlée par le pH et l'Eh du milieu, ainsi que par la matière organique. D'une manière générale, deux cas se distinguent :

- dans les eaux bien oxygénées, la concentration en fer ferrique dissous n'excède pas quelques dizaines de $\mu\text{g/l}$. Elle est en effet limitée par la précipitation de l'hydroxyde ferrique ;
- dans les eaux plus réductrices, la forme réduite du fer prédomine et peut atteindre des concentrations de quelques mg/l , surtout si le pH est acide.

Par ailleurs, en présence de matière organique, la solubilité du fer croît. En revanche, en présence de sulfures, le fer tend à précipiter.

La figure 23 présente le résultat du traitement des valeurs chlorures, classées par aquifère (364 points d'observation au total).

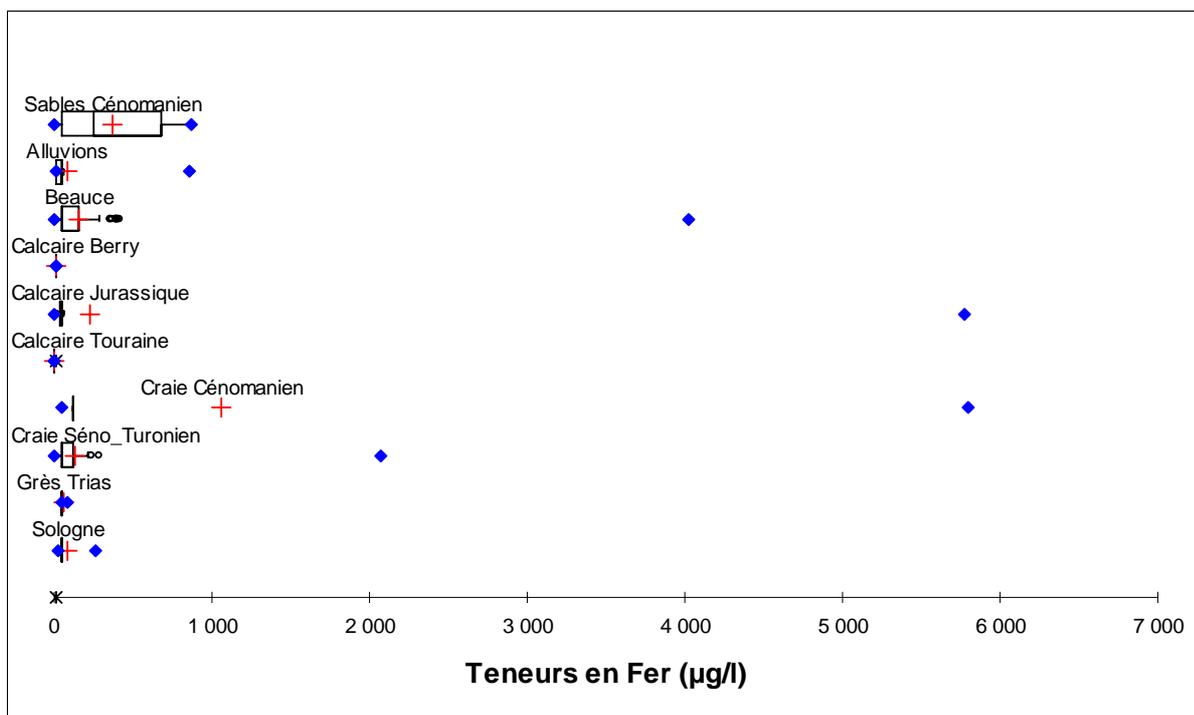


Figure 23 – Représentation des teneurs en fer en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.

Les teneurs en fer sont globalement inférieures à 1 mg/l dans les nappes de la région Centre. Les fortes teneurs en fer, rencontrées ponctuellement, rendent compte globalement des conditions d'oxydo-réduction et de pH du milieu.

Notons qu'au-delà de 300 $\mu\text{g/l}$, l'eau devient colorée.

3. Choix d'un indice de stabilité – Index de Riznar

3.1. Évaluation de la stabilité chimique des eaux

L'équilibre calco-carbonique de l'eau a été étudié pour les problèmes de corrosion car l'excès de CO₂ libre est responsable de l'agressivité de l'eau et de la dissolution des métaux. À l'inverse une faible teneur en CO₂ entraîne des dépôts de carbonate de calcium (incrustation).

L'équilibre des bicarbonates de calcium en solution dans l'eau s'écrit de la façon suivante :



Cette réaction montre bien que le départ d'une certaine quantité de CO₂ déplace l'équilibre et conduit à la formation de carbonate de calcium très peu soluble, le gaz carbonique libre est donc un facteur déterminant de l'équilibre physico-chimique d'une eau.

Toutefois, les travaux de nombreux auteurs (Hoover, Langelier, Larson & Duswell, etc.) ont permis d'établir que d'autres facteurs y jouent un rôle important, tels que la teneur en calcium, l'alcalinité, le pH, la totalité des sels dissous et la température.

Il suffit donc que l'un ou plusieurs de ces éléments subissent une modification quelconque pour que l'équilibre physico-chimique de l'eau varie, avec comme conséquence une augmentation de ses tendances à l'incrustation ou à l'agressivité.

Afin d'étudier, et surtout de prévoir le comportement d'une eau donnée, la notion théorique du pH d'équilibre ou pH de saturation (pHs) a été introduite. Cette valeur de pH correspondant à un équilibre physico-chimique parfait des bicarbonates de calcium en solution, et donc à la disparition de toute tendance incrustante ou agressive.

Le pHs est généralement déterminé à l'aide de la formule établie par Langelier :

$$\text{pHs} = (\text{pK}'2 - \text{pK}'s) + \text{pCa} = \text{pAlc}$$

où : K'2 = constante dérivée de K2, deuxième constante de dissociation du gaz carbonique.

K'S = constante dérivée de ks, produit d'activité du carbonate de calcium.

pCa = cologarithme de la concentration molaire en ion calcium.

$pAlc$ = cologarithme de l'alcalinité totale (TAC) exprimée en équivalent gramme/litre.

Ainsi, le calcul du pH_s d'une eau dépend de sa teneur en bicarbonates ($pAlc$), en sels de calcium (pCa) et du paramètre ($pK'2 - pK's$) qui varie avec la salinité totale, la force ionique et la température.

De nombreux abaques et diagrammes ont été déterminés à partir de cette formule, pour permettre un calcul rapide, toutefois, la formule de Langelier a été modifiée et simplifiée par Larson et Buswell comme suit :

$$pH_s = 9,3 + A + B - (C + D)$$

où : A = facteur de T.D.S. (totalité des sels dissous) ;

B = facteur de température ;

C = facteur de dureté du calcium exprimé en °f ;

D = facteur d'alcalinité totale (au méthylorange) TAC exprimé en °f.

Ainsi, directement à partir d'une analyse de l'eau, des tables ont été construites pour permettre le calcul du pH de saturation (pH_s).

Une fois le pH d'équilibre calculé, l'index Langelier, ou index de saturation se calcule comme suit :

$$I = pH \text{ réel} - pH_s$$

Cette différence algébrique permet d'estimer le degré de saturation d'une eau en carbonate de calcium.

Ainsi l'index de Langelier indique :

- s'il est positif, une tendance à la formation de dépôts de $CaCO_3$ (entartrage) ;
- s'il est négatif, une tendance à la dissolution de $CaCO_3$ (agressivité).

Cet index ne donne qu'une indication relative et surtout qualitative, et ne permet pas de savoir si le degré de saturation est suffisant pour donner un dépôt appréciable ou former seulement un film de protection.

De plus, dans le cas d'eaux peu minéralisées, à faible teneur en bicarbonates de calcium, l'utilisation de l'index de Langelier est sujette à caution.

C'est pourquoi, afin d'obtenir des indications plus précises, l'on utilise de plus en plus une notation différente, appelée index de stabilité ou index de Ryznar :

$$IR = 2 \text{ pHs} - \text{pH réel}$$

Cet index permet non seulement de différencier aisément, une eau entartrante d'une eau agressive ou d'une eau stable, mais aussi d'évaluer l'importance de l'entartrage ou de l'agressivité comme le montre le tableau suivant :

IR > 8,7	Eaux très agressives
8,7 > IR > 6,9	Eaux moyennement agressives
6,9 > IR > 5,8	Eaux stables
5,8 > IR > 3,7	Eaux entartrantes
3,7 > IR	Eaux très entartrantes

3.2. Valeurs de l'index de Ryznar sur 185 points d'eau

L'application de l'index de Ryznar sur les 185 analyses d'eau disponibles en région Centre montre que les eaux sont plutôt agressives aux températures *in situ* rencontrées dans les nappes, soient 12 à 15 °C (tableau 9, figure 24).

Notons toutefois que l'index de Ryznar présenté ci-dessous est majoré (principe de précaution) dans la mesure où il correspond à une eau peu minéralisée.

Niveau capté	Index RIZNAR à 12-15 °C				
	Nb de points	Minimum	Médiane	Moyenne	Maximum
Calcaires du Berry	3	6.97	7.09	7.05	7.09
Sables du Cénomaniens	4	7.02	7.42	7.39	7.7
Calcaires Jurassique	36	6.58	7.19	7.45	12.57
Alluvions	11	6.9	7.51	7.65	8.33
Calcaire de Beauce	61	6.9	7.58	7.62	8.76
Craie séno-turonienne	50	6.82	7.59	7.99	12.14
Grès du Trias	12	6.83	7.67	8.01	11.28
Sables et argiles de Sologne	3	6.77	7.45	8.61	11.62
Craie cénomaniens	5	7.4	10.04	9.29	10.84
Total	185				

Tableau 9 – Statistiques des valeurs d'index de Riznar en fonction des niveaux captés.

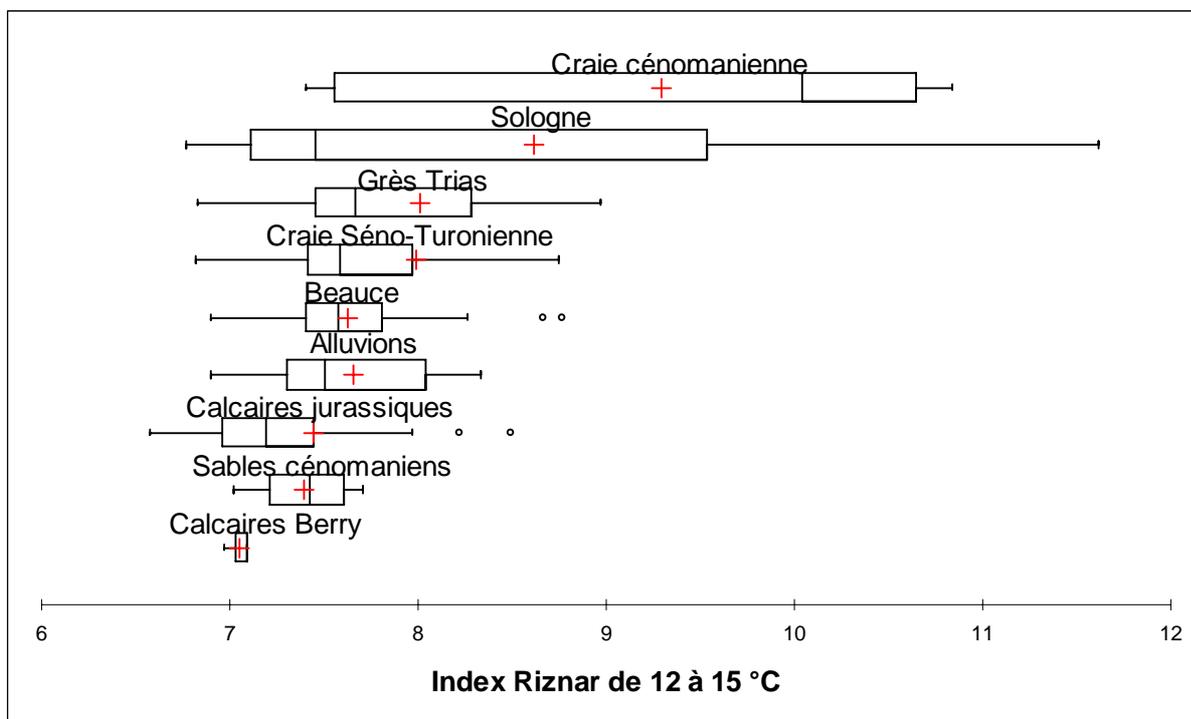


Figure 24 – Représentation de l'index de Riznar en fonction des niveaux captés par la méthode des boîtes à moustaches.

Pour la majorité des formations aquifères considérées, les eaux sont donc « moyennement agressives ». En revanche, les eaux de la craie cénomaniennne semblent de nature très agressive. Cependant, ce résultat a été obtenu avec seulement 5 points de mesure.

La distribution spatiale des points d'eau ayant servi à calculer l'index de Riznar est présentée par la figure 25. À ce titre, on remarque une caractérisation insuffisante des eaux sur le département d'Indre-et-Loire.

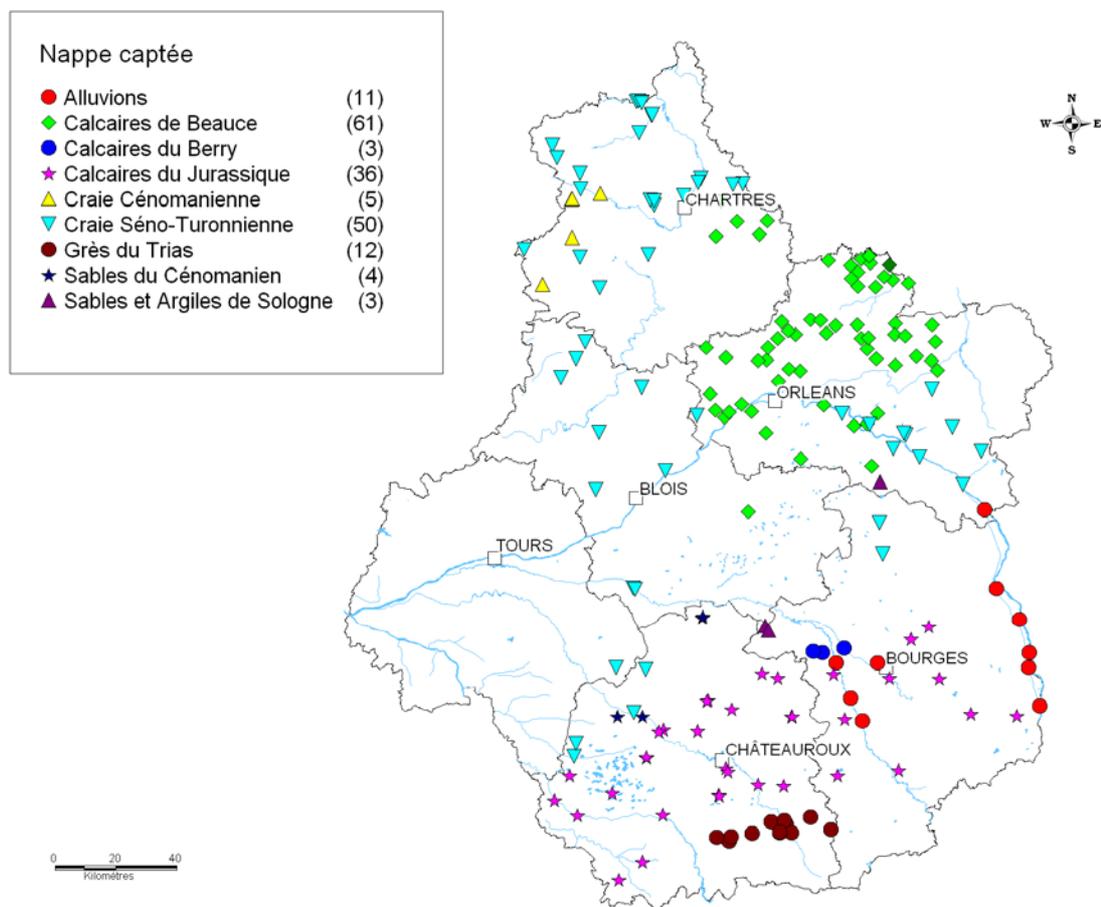


Figure 25 – Localisation des points d'eau utilisés pour le calcul des indices de Riznar (liste des aquifères déterminée à partir de la liste simplifiée présentée dans le rapport BRGM/RP-54542).

Afin de quantifier l'effet de la température sur la stabilité chimique des eaux souterraines, l'index de Riznar a été évalué à différentes températures.

En effet, l'eau prélevée dans les nappes est rejetée à une température minimale de 6-7 °C (en sortie de l'évaporateur de la pompe à chaleur). Il convient par conséquent de calculer l'index de Riznar à cette température afin d'évaluer l'incidence sur les équipements de production. L'index de Riznar moyen à 12-15 °C (entrée), à 6 °C (sortie) et à 80 °C à titre de comparaison est présenté dans le texte du rapport à la figure 2 (dans le corps du rapport).

On remarque ainsi une augmentation générale de l'agressivité des eaux à 6 °C (en sortie de l'évaporateur de la pompe à chaleur). Sinon, à titre d'information, notons qu'une augmentation de la température entraîne une tendance à l'entartrage, qui se matérialise par une diminution globale de l'index de Riznar.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Centre
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34