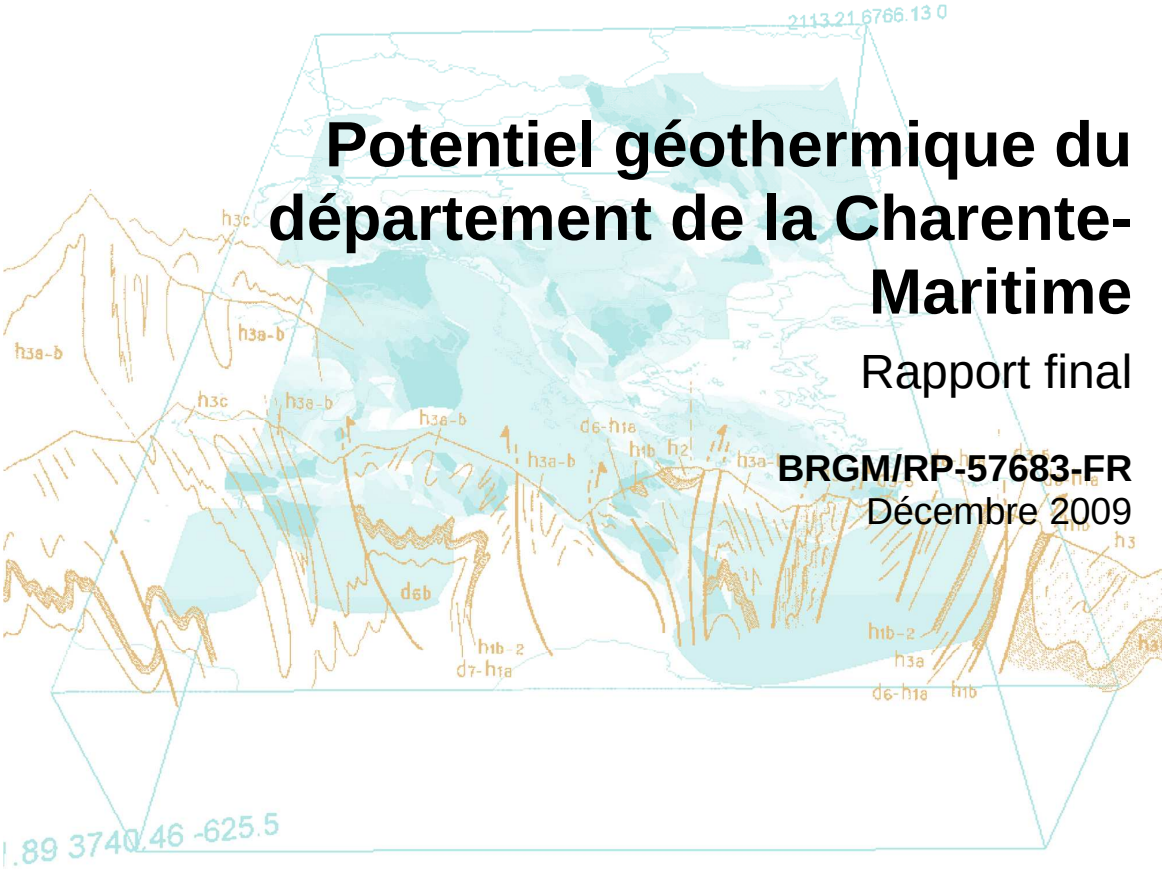
Document public



Potentiel géothermique du département de la Charente-Maritime

Rapport final

BRGM/RP-57683-FR
Décembre 2009

la Charente Maritime

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Document public

Potentiel géothermique du département de la Charente-Maritime

Rapport final

BRGM/RP-57683-FR
Décembre 2009

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2008 08GTHB01

F. BICHOT, R. BONFILS, D. DUGRILLON, J.Y. HERVE

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Sophie Bélzèlgues-Courtade	Nom : Philippe Dutartre
Date : Novembre 2009	Date : Novembre 2009
Signature :	Signature **:**

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

la Charente Maritime

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Mots clés : géothermie, Charente-Maritime, Atlas, CD-Rom Interactif, Hydrogéologie, PAC

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
BICHOT F., BONFILS R., DUGRILLON D., HERVE J.Y. (2009) - Potentiel géothermique du département de la Charente-Maritime. BRGM/RP-57683-FR, 76 p., 22 ill., 10 tab., 16 planches hors texte

© BRGM, 2009, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le Conseil Général de la Charente-Maritime et le BRGM se sont associés pour valoriser le potentiel géothermique du département.

En premier lieu, le BRGM a réalisé l'inventaire et la cartographie des principaux aquifères du département pouvant fournir une solution géothermique basée sur des Pompes A Chaleur (PAC) ou sur des circuits de chaleur pour les ressources les plus profondes. Ce rapport accompagne un atlas cartographique de 16 Planches A1. Les cartes s'appuient sur la création d'une grille à mailles carrées de 500 m, couvrant tout le département et dans laquelle, pour chaque maille, sont renseignés les caractéristiques des aquifères présents (profondeur, température, débit possible et puissance pouvant être attendue, estimation des coûts d'un projet basé sur un doublet prélèvement/ré-injection).

Ce travail s'adresse principalement aux décideurs qui envisagent un projet basé sur des énergies renouvelables pour chauffer des locaux collectifs ou des ensembles d'habitations. Les données de la grille sont accessibles à travers un CDROM. Celui-ci constitue un outil d'aide à la décision qui permet de visualiser en tout point du département la superposition des aquifères présents. Le texte de ce rapport se retrouve en grande partie sur ce CDROM.

En second lieu, cette opération comporte aussi un volet communication, à travers la réalisation par le BRGM de 5 panneaux d'exposition, d'une plaquette tirée en 2000 exemplaires, et de la reproduction en 500 exemplaires du fascicule BRGM/ADEME présentant la géothermie. S'y ajoute une base de données des 51 collèges du département, demande spécifique du Conseil Général pour la gestion de ses établissements.

Sommaire

1. Introduction 11

2. La Géothermie 13

2.1. GENERALITES 13

2.2. LA GEOTHERMIE EN FRANCE 14

2.3. LES DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE 14

2.4. DEFINITION ET PRINCIPE GENERAL D'UNE POMPE A CHALEUR 18

2.5. LA TECHNOLOGIE DES PAC GEOTHERMALES 19
2.5.1. Les capteurs horizontaux 19
2.5.2. Les Capteurs verticaux 20

2.6. LA GARANTIE AQUAPAC 24

2.7. REGLEMENTATION 25
2.7.1. Code de l'Environnement (anciennement Loi sur l'Eau n°92-3 du 3 janvier 1992) 25
2.7.2. .Le Code Minier 27
2.7.3. Impositions diverses relatives aux prélèvements d'eau 29

3. Cartographie du potentiel géothermique 31

3.1. GEOGRAPHIE PHYSIQUE DE LA CHARENTE-MARITIME 31

3.2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE [PLANCHE 1] 35
3.2.1. Contexte géologique 35
3.2.2. Contexte hydrogéologique 38
3.2.3. Caractéristiques et exploitation des aquifères 39
3.2.4. Bilan hydrogéologique global 42

3.3. CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE PAR AQUIFERE 44
3.3.1. Méthodologie 44
3.3.2. Cartes du Dogger/Infra-Toarcien 57
3.3.3. Cartes du Jurassique supérieur 58
3.3.4. Cartes du Cénomanien 59
3.3.5. Cartes du Turonien-Coniacien 60

3.3.6. Cartes du Campano-Maastrichtien 61

4. Etude des caractéristiques chimiques des eaux souterraines 63

4.1. RECUEIL DES DONNEES 63

4.2. STATISTIQUES SUR LES VALEURS DE TITRE HYDROMETRIQUE..... 63

4.3. STATISTIQUES SUR LES VALEURS DE TAC 64

4.4. STATISTIQUES SUR LES VALEURS DE PH 65

4.5. STATISTIQUES SUR LES TENEURS EN CHLORURES..... 66

4.6. STATISTIQUES SUR LES TENEURS EN FER..... 67

4.7. CHOIX D'UN INDICE DE STABILITE DES EAUX 68

4.8. VALEURS DE L'INDICE DE RYZNAR POUR LES DIFFERENTS AQUIFERES72

4.9. TRAITEMENTS A PREVOIR..... 73

4.9.1. Corrosion chimique..... 73

4.9.2. Corrosion bactérienne 73

4.9.3. Entartrage 75

5. Conclusion..... 77

6. Bibliographie 79

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte de température des aquifère (www.geothermie-perspectives.fr)..... 15

Illustration 2 : Différentes applications de la Géothermie (Version Francisée de B. Lindal) 17

Illustration 3 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC (www.energie-edessa.com) 18

Illustration 4 : Représentation schématique de capteurs horizontaux (www.novenergie.com) 19

Illustration 5 : Représentation schématique de capteurs verticaux (www.novenergie.com) 20

Illustration 6 : Représentation schématique des pieux énergétiques (www.geothermal-energy.ch) 21

Illusration 7 : Représentation schématique d'une pompe à chaleur sur nappe (www.novenergie.com) 22

Illustration 8 : réseau hydrographique sur carte en relief du département 32

Illustration 9 : réseau hydrographique sur carte géologique simplifiée du département 31

Illustration 10 : Carte géologique de la Charente-Maritime 34

Illustration 11 : Coupe géologique à travers le seuil du Poitou montrant la structure géologique profonde de la Charente-Maritime entre la Boutonne et la Gironde 37

Illustration 12 : Cartographie simplifiée du contexte en eaux souterraines du département 40

Illustration 13 : Réactivité de la nappe du Jurassique supérieur à une pluie efficace (exemple du piézomètre d'Ensigné, bassin de la Boutonne)..... 41

Illustration 14 : Réactivité de la nappe du Cénomanien à une pluie efficace (exemple du piézomètre de Bois) 41

Illustration 15 : Bilan global annuel pour le département de la Charente-Maritime en milliards de m^3 42

Illustration 16 : Représentation des débits en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey 47

Illustration 17 : Représentation du Titre Hydrométrique (TH) en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey..... 62

Illustration 18 : Représentation du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey 63

Illustration 19 : Représentation du pH en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey..... 64

Illustration 20 : Représentation des Chlorures en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey..... 65

Illustration 21 : Représentation de l'indice de Ryznar en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey..... 70

Illustration 22 : Photographie d'un tubage victime de corrosion bactérienne 72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Evolution du nombre de PAC en France (www.afpac.org/marche-pac.php).....15

Tableau 2 : Statistiques des données de débit par niveau aquifère.....47

Tableau 3 : Synthèse des calculs des débits de la grille pour chaque nappe..... 49

Tableau 4 : Caractéristiques des principaux forages géothermiques de Charente-Maritime 51

Tableau 5 : Bases de calcul de la puissance possible 53

Tableau 6 : Valeurs utilisées pour remplir la grille pour la distance entre les forages de production et d'injection 54

Tableau 7 : Valeurs du paramètre A en fonction du TDS..... 67

Tableau 8 : Valeurs des paramètres B, C,et D en fonction des la température, du TH ou de la TAC..... 68.

Tableau 9 : Agressivité d'une eau en fonction de l'indice de Ryznar..... 69

Tableau 10 : Statistiques des valeurs d'index de l'indice de Ryznar en fonction de l'aquifère capté 70

Liste des annexes

Planche 1 : Carte hydro-géologique

Planche 2 : Carte de la profondeur de l'aquifère du Jurassique moyen et inférieur (base)

Planche 3 : Carte des températures maximales de la nappe du Jurassique inférieur

Planche 4 : Carte du potentiel géothermique de la nappe du Jurassique moyen et inférieur

Planche 5 : Carte de la profondeur de l'aquifère du Jurassique supérieur

Planche 6 : Carte de la productivité et des potentialités géothermiques de la nappe du Jurassique supérieur

Planche 7 : Conductivités de la nappe du Jurassique supérieur

Planche 8 : Carte de la profondeur de l'aquifère du Cénomanien

Planche 9 : Carte de la productivité de la nappe du Cénomanien

Planche 10 : Carte des potentialités géothermiques de la nappe du Cénomanien

Planche 11 : Carte de la profondeur de la base de l'aquifère du Turonien-Coniacien

Planche 12 : Carte de la productivité de la nappe du Turonien-Coniacien

Planche 13 : Carte des potentialités géothermiques de la nappe du Turonien-Coniacien

Planche 14 : Carte de la profondeur de l'aquifère du Campano-Maastrichtien

Planche 15 : Carte de la productivité de la nappe du Campano-Maastrichtien

Planche 16 : Carte des potentialités géothermiques de la nappe du Campano-Maastrichtien

CD-ROM : Atlas des potentialités géothermiques du département de la Charente-Maritime. Outil d'aide à la décision

1. Introduction

Le développement des énergies renouvelables ne répond plus aujourd'hui seulement à des impératifs d'ordre économique tels que la recherche d'une moindre dépendance énergétique. En effet, depuis la mise en évidence de l'impact des consommations d'énergies fossiles sur le changement climatique, la réduction des émissions de gaz à effet de serre devient un élément de plus en plus déterminant des politiques publiques de l'énergie. Afin de satisfaire les engagements pris dans le cadre du protocole de Kyoto, la France s'est fixée des objectifs précis dans la loi d'orientation sur l'énergie du 13 juillet 2005 : pour les énergies thermiques renouvelables, elles devront progresser de 50 % d'ici 2010, et contribuer pour plus d'un million de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole) à l'objectif fixé par le Grenelle de l'environnement de faire 20 millions de TEP d'énergies renouvelables supplémentaire.

Après des débuts prometteurs dans les années 70 et 80, facilités par un prix élevé des produits pétroliers d'une part, et par une forte implication de l'Etat et des collectivités locales d'autre part, la géothermie a par la suite connu un manque d'intérêt dû principalement à la chute des prix de l'énergie mais également à un problème d'image suite à des opérations de mauvaises qualités techniques et/ou financières. Aujourd'hui, le « passif » est apuré, la connaissance de la ressource s'est affinée, les techniques se sont perfectionnées.

En géothermie on distingue la production de chaleur, liée en général à l'exploitation de sources à température inférieure à 90°C, de la prod uction d'électricité. Dans le premier cas, la production de chaleur est quasiment partout possible, à l'aide notamment des Pompes A Chaleur [PAC], et certains pays comme par exemple la Suède, la Suisse ou les Etat-Unis ont engagé une politique très volontariste dans ce domaine. Le second cas suppose des conditions géologiques favorables [zones tectoniques et volcaniques] ce qui explique la place importante de cette source d'énergie dans des pays comme les Philippines, le Japon, les Etats-Unis, ou en France la Guadeloupe avec Bouillante.

Situé dans le bassin Aquitain, le département de la Charente-Maritime dispose de ressources superficielles (très basse énergie) ou profondes (basse énergie) non négligeables pour la production de chaleur. Cependant, malgré ses atouts réels, la géothermie souffre en Charente-Maritime, comme dans beaucoup de départements français, d'une forte méconnaissance qui a pour conséquence une relative sous utilisation de cette énergie par rapport à sa capacité de développement (adéquation entre ressources géothermiques et besoins thermiques).

C'est pourquoi, le Conseil Général et le BRGM ont engagé en Charente-Maritime une démarche ayant pour objectif principal de mettre à disposition des élus et des porteurs de projets des informations objectives, concrètes et récentes, permettant de mieux valoriser le potentiel géothermique du département. Cette démarche s'appuie sur plusieurs volets :

- le bilan des installations existantes,
- la synthèse des données disponibles et la réalisation d'un atlas cartographique,
- la mise au point d'un outil de consultation des données basé sur une grille renseignée à maille de 500 m de coté,
- l'évaluation du potentiel géothermique au droit des collèges du département,
- un plan de communication comportant des panneaux d'exposition et des plaquettes.

Ce document explicite la réalisation de ces différents volets.

2. La Géothermie

2.1. GENERALITES

Du grec *gêo* (terre) et *thermos* (chaud), la géothermie consiste à exploiter la chaleur stockée dans le sous-sol de notre planète. L'énergie géothermique est l'énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. Les profondeurs de la terre recèlent d'énormes quantités de chaleur naturelle, dont l'origine réside essentiellement dans la désintégration d'éléments radioactifs. Cette énergie est potentiellement considérable : 1 km^2 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 ≅ 11630 kWh). 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/m^2. Ces valeurs peuvent être cependant nettement supérieures dans certaines zones instables du globe, et même varier de façon importante dans les zones continentales stables. Le but d'une exploitation de l'énergie géothermique est de capter la chaleur des profondeurs, pour l'amener à la surface de la terre en recourant à des technologies *ad hoc*. A certains endroits, la nature fournit elle-même le système de circulation requis, par exemple les sources thermales. En d'autres lieux, on doit faire appel à des forages avec pompes de production ou à des sondes géothermiques doublées de pompes de circulation.

Les premières traces d'utilisation de la géothermie par l'homme remontent à environ 20 000 ans. Les régions volcaniques ont constitué, très tôt, des pôles d'attraction, du fait de l'existence de fumerolles et de sources chaudes que l'on pouvait utiliser pour se chauffer, cuire des aliments ou tout simplement se baigner.

Avec l'apparition de la civilisation, la pratique des bains thermaux et l'utilisation des boues thermominérales se répandent, tant au Japon qu'en Amérique ou en Europe. Les établissements thermaux se multiplieront dans toutes les régions du monde, et notamment dans les îles volcaniques du Japon, d'Islande et de Nouvelle-Zélande.

Pendant longtemps l'homme s'est contenté d'utiliser la chaleur qui affleurait naturellement, ici ou là, à la surface du globe. Mais à partir du XIX^{e} siècle, les progrès techniques et une meilleure connaissance du sous-sol vont permettre de chercher cette ressource plus en profondeur. Au vingtième siècle, le mouvement s'amplifie, porté par des besoins toujours plus élevés en énergie pour alimenter la civilisation moderne et, dans une moindre mesure, par l'intérêt que l'on commence à trouver aux énergies renouvelables. Le premier réseau moderne de chauffage urbain alimenté grâce à la géothermie fut installé à Reykjavik (Islande) en 1930. Dès lors, des réseaux de chaleur utilisant la géothermie vont voir le jour en France, Italie, Hongrie, Roumanie, URSS, Turquie, Géorgie, Chine, Etats-Unis. La production mondiale d'électricité géothermique ne deviendra significative qu'à partir des années 1970, poussée par les crises pétrolières et le souci des pays en voie de développement d'utiliser une

ressource nationale pour produire leur électricité. La puissance électrique installée dans le monde est ainsi passée de 400 MW en 1960 à 8 000 MW à la fin du siècle précédent (Brgm, ADEME, 2004).

2.2. LA GEOTHERMIE EN FRANCE

En France métropolitaine, le flux thermique associé au gradient géothermal varie de 40 à 140 mW/m². Il est en moyenne de 100 mW/m², ce qui est supérieur à la moyenne européenne (62 mW/m²).

Les ressources géothermales françaises sont essentiellement de type basse température (ill.1) sur le territoire métropolitain. La géothermie très basse température est quant à elle accessible partout, ou presque, quel que soit le site géographique.

Dès le début des années 1980, la France s'est fait une spécialité du chauffage urbain géothermique. Une centaine de forages ont été mis en exploitation en France et actuellement 65 installations géothermiques sont exploitées en doublets, triplets ou puits uniques. En région parisienne, 54 opérations de géothermie basse énergie ont été réalisées. Elles sont toutes associées à des réseaux de chaleur urbains ; 34 sont toujours en activité aujourd'hui.

Actuellement on estime que 170 000 équivalents logements sont raccordés à des réseaux de chaleur géothermiques en France, permettant d'économiser annuellement 130 000 tonnes de pétrole et d'éviter l'émission de plus de 400 000 tonnes de gaz carbonique.

Depuis le début des années 90, le développement des pompes à chaleur (PAC) connaît un nouveau souffle. Le développement de l'offre produit associé au programme EDF de développement des PAC dans le cadre général de son offre commerciale *Vivrelec* a très fortement dynamisé le marché.

En 1997, on comptait seulement 1500 réalisations par an alors que ce chiffre était d'environ 17 300 PAC en 2004. La progression s'est encore accentuée en 2005 et 2006 avec la mise en place par les pouvoirs publics d'un crédit d'impôt en faveur des PAC. En 2007, la progression est toutefois plus faible que les années précédentes (+1% contre 40% en 2006) (cf. Tableau 1).

2.3. LES DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE

On distingue plusieurs types de géothermie, en fonction des caractéristiques de la ressource et de l'usage final (cf. ill. 2).

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Sol / Sol et Sol / Eau	7 700	5 400	6 800	7 800	9 600	9 600
Eau / Eau		3 600	4 900	5 400	8 850	9 000
	7700	**9000**	**11700**	**13200**	**18450**	**18600**

Tableau 1 : Evolution du nombre de PAC en France (www.afpac.org/marche-pac.php)

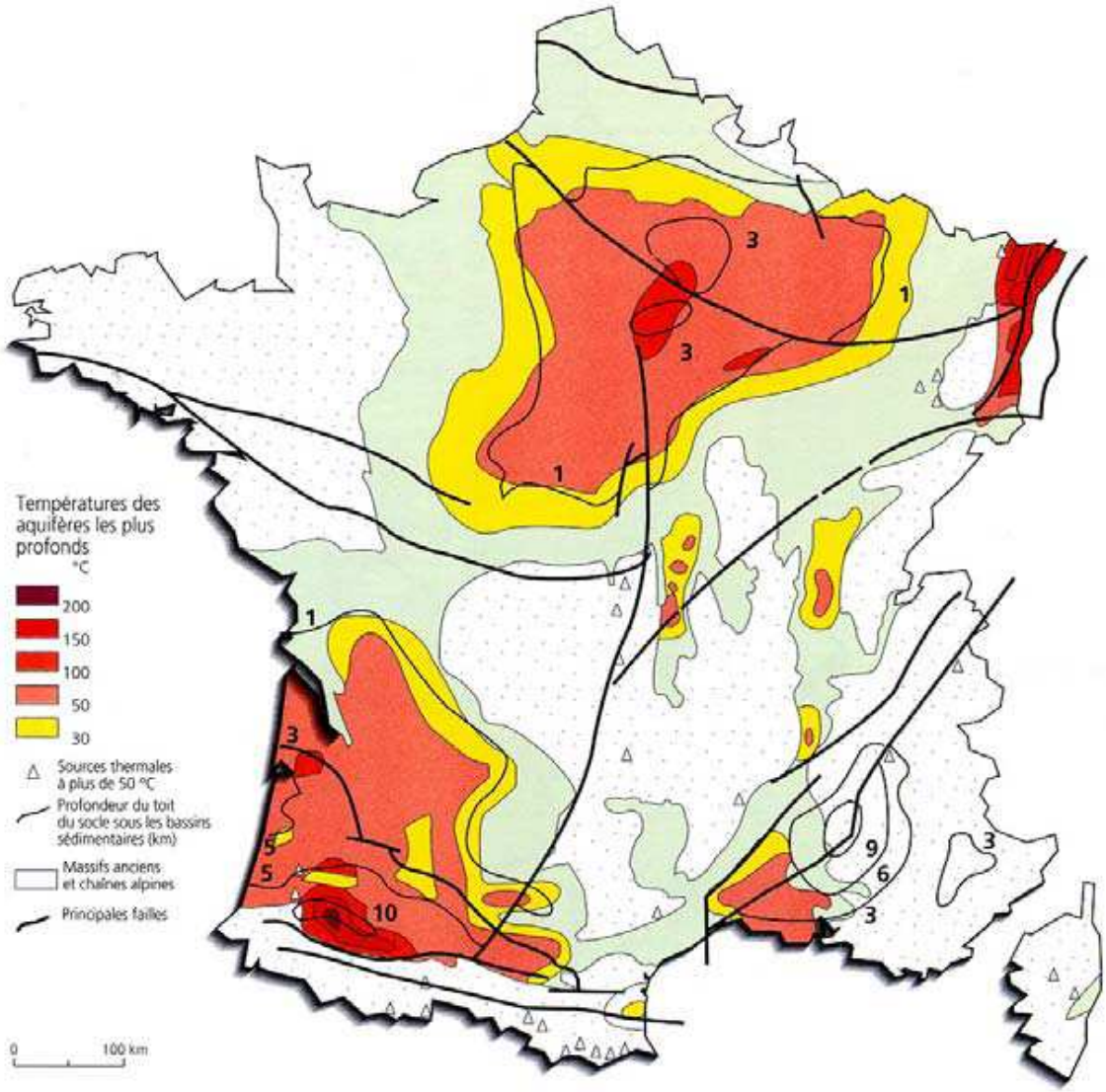


Illustration 1 : Carte de température des aquifère (www.geothermie-perspectives.fr)

Géothermie haute énergie (T℃ > 150 ℃)

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150℃. Les réservoirs, généralement localisés au-delà de 1 500 mètres de profondeur, se situent dans des zones de gradient géothermique anormalement élevé. Lorsqu'il existe un réservoir, le fluide peut être capté sous forme de vapeur sèche ou humide pour la production d'électricité.

Géothermie moyenne énergie (T℃ : 90 à 150℃)

La géothermie de moyenne température ou moyenne enthalpie se présente sous forme d'eau chaude ou de vapeur humide à une température comprise entre 90 et 150℃. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1 000 m. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2 000 à 4 000 mètres. Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire.

Géothermie basse énergie (T℃ : 30 à 90℃)

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères profonds (1 500 – 2 000 m) des bassins sédimentaires et d'utiliser cette eau directement (via un échangeur de chaleur) pour le chauffage. 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. A ces profondeurs, l'eau étant fréquemment salée et/ou chargée en sulfures, donc corrosive, il est interdit de la rejeter en surface. Il est nécessaire de forer un second puits pour réinjecter l'eau dans l'aquifère originel. Mais il convient d'implanter ce puits à environ 1 500 ou 2 000 mètres du puits de production afin que le recyclage de l'eau refroidie réinjectée ne soit pas trop rapide : c'est le concept de doublet géothermique très mis en pratique dans le Bassin de Paris.

Géothermie très basse énergie (T℃ < 30 ℃)

Elle concerne la production de chaleur et/ou de froid contenue dans les terrains ou les aquifères peu profonds (en général < 100 m). La température exploitée est inférieure à 30℃ (généralement comprise entre 9 et 15 ℃). 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 sol (capteurs horizontaux, profondeur < à 2 m), le sous-sol (capteurs verticaux, profondeur généralement inférieure à 100 m), l'eau souterraine des aquifères peu profonds (puits de pompage).

Les capteurs horizontaux dans le sol présentent l'inconvénient de la superficie de terrain nécessaire, de l'ordre de grandeur de la surface chauffée. Les capteurs verticaux présentent un rendement bien inférieur (rapport de l'ordre de 1 à 5) par rapport à l'exploitation géothermique d'un aquifère.

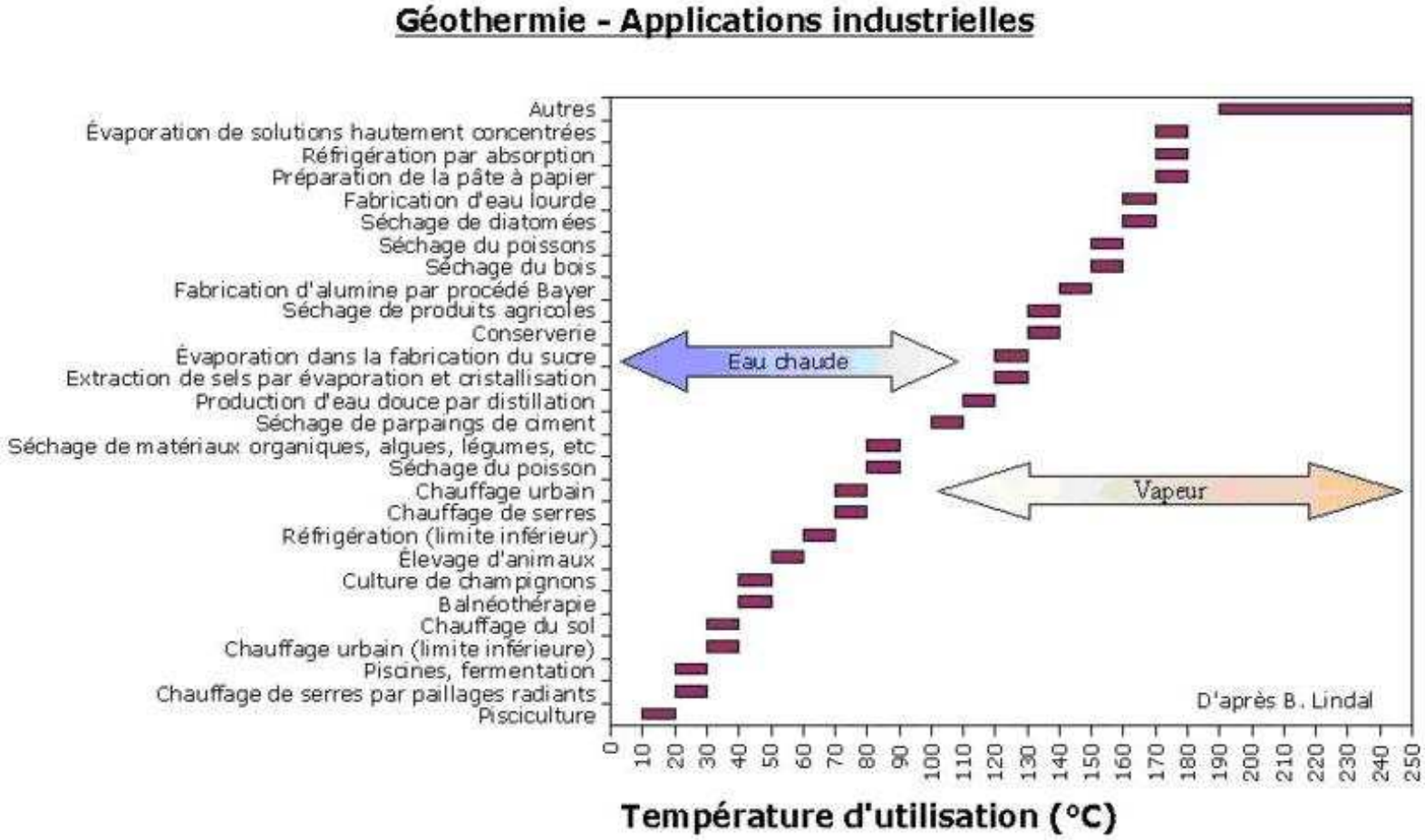


Illustration 2 : Différentes applications de la Géothermie (Version Francisée de B. Lindal)

2.4. DEFINITION ET PRINCIPE GENERAL D'UNE POMPE A CHALEUR

Une pompe à chaleur (PAC) permet de transférer de l'énergie d'un niveau à basse température vers un niveau à température plus élevée. Ce transfert consomme de l'énergie, mais l'énergie totale restituée par la PAC est supérieure à l'énergie fournie au système, ce qui permet donc une économie globale d'énergie primaire, ainsi qu'une diminution des émissions polluantes, à quantité égale d'énergie finale produite.

Une PAC (cf. Ill. 3) diminue donc la température du milieu qui fournit l'énergie (source froide) et augmente la température du milieu qui reçoit l'énergie (source chaude). Les deux sources pouvant être valorisées, un dispositif de PAC peut donc assurer simultanément et/ou successivement des besoins de chauffage et/ou climatisation ou rafraîchissement.

La chaleur est prélevée au milieu extérieur par un échangeur (évaporateur) dans lequel un fluide frigorigène se vaporise à basse température. Le compresseur (entraîné par un moteur électrique) comprime cette vapeur à haute pression. Par l'échange thermique entre le condenseur et le milieu intérieur (= 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, ce qui en abaisse la température.

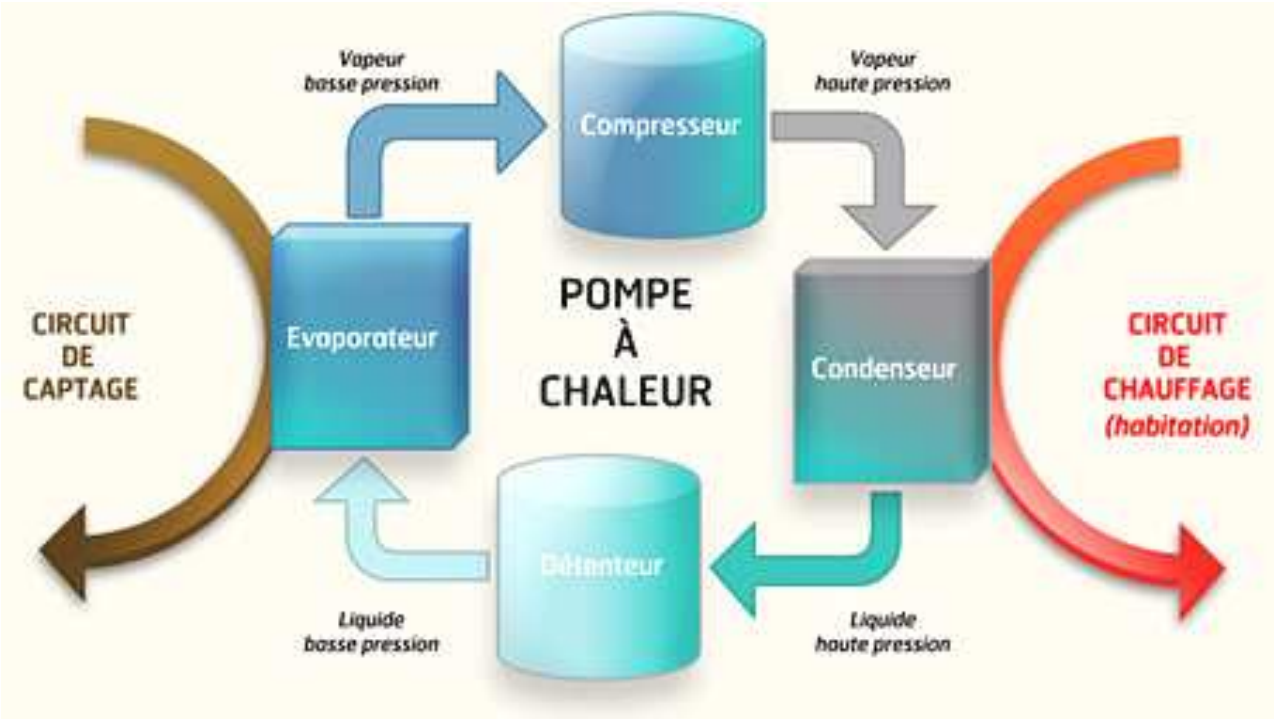


Illustration 3 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC (www.energie-edessa.com)

2.5. LA TECHNOLOGIE DES PAC GEOTHERMALES

2.5.1. Les capteurs horizontaux

Il s'agit de tuyaux (en polyéthylène généralement) enterrés horizontalement à faible profondeur (de 0,6 m à 1,2 m) dans lesquels circule un fluide caloporteur (cf. ill. 4). A cette profondeur l'incidence du flux géothermal sur les capteurs est inexistante. Les apports de chaleur sont effectués par l'énergie solaire et les infiltrations de pluie. C'est pourquoi le terrain doit répondre à différentes caractéristiques :

- Il doit de préférence bénéficier d'une bonne exposition au soleil,
- Il ne peut être recouvert d'un revêtement imperméable (terrasse, piscine…),
- La pente du terrain ne doit pas dépasser 10-12%.

Illustration 4 : Représentation schématique de capteurs horizontaux (www.novenergie.com)

Les capteurs horizontaux sont faciles d'installation et ont des coûts initiaux plus bas que les capteurs verticaux. Toutefois, ils affichent des rendements inférieurs à cause

des variations de température des sols, et nécessitent par ailleurs une grande surface de terrain (10 à 30 W par m^2).

2.5.2. Les Capteurs verticaux

Capteurs Sol

Il s'agit d'une sonde verticale qui va puiser l'énergie contenue dans le sous-sol de la Terre. Un capteur (tube en U, ou double U en polyéthylène) contenant un fluide caloporteur est implanté dans le forage (cf. ill. 5). Il est ensuite scellé par du ciment et de la bentonite. La profondeur du forage peut atteindre jusqu'à 200 m.

Illustration 5 : Représentation schématique de capteurs verticaux (www.novenergie.com)

A 10 m de profondeur, la température du sol est pratiquement constante toute l'année et est voisine de 13°C (= température moyenne annuelle du lieu). En descendant en profondeur, la température s'élève de 2 à 3°C tous les 100 m. La puissance linéaire

des capteurs verticaux varie de 30 à 70 W/m en fonction de la conductivité thermique du terrain.

La quantité d'énergie utilisable d'une sonde géothermique profonde est directement proportionnelle à sa longueur et dépend de plusieurs paramètres :

- des caractéristiques thermiques du sous-sol, notamment sa conductibilité thermique,
- du type de construction de la sonde et de la colonne de production.

Les capteurs verticaux ont des coûts beaucoup plus élevés que les capteurs horizontaux, surplus essentiellement lié au forage. Cependant, ils ont besoin d'une surface de terrain plus faible.

Les pieux géothermiques

Dans le cas de construction de bâtiments nécessitant des pieux à grandes profondeurs, il est possible d'utiliser ces structures de béton pour capter l'énergie thermique du sol. Les capteurs sont alors installés au cœur des fondations, d'où leur nom de pieux géothermiques (ill.6). Les pieux sont préfabriqués en béton centrifugé, évidés au centre, ce qui permet l'insertion de sondes géothermiques. Un remplissage avec du sable humide assure un bon contact thermique entre la sonde et le pieu de fondation. La France compte actuellement peu de références sur cette technique, cependant elle pourrait tirer des enseignements des 300 expériences menées à l'échelle européenne.

Illustration 6 : Représentation schématique des pieux énergétiques (www.geothermal-energy.ch)

Pompe à chaleur sur nappe

La pompe à chaleur sur nappe est basée sur l'exploitation de la température des eaux souterraines dont les variations sont faibles dans le temps et peu sensibles aux phénomènes climatiques. La température de l'eau à faible profondeur est en générale de l'ordre de 12°C et le rejet des eaux « refroidies » après exploitation géothermique est de l'ordre de 6 à 10 °C. Dans les nappes superficielles, le différentiel de température moyen (entre prélèvement et rejet) est de 6°C, le ΔT maximum autorisé est de 11°C. La température maximale de rejet est de 30°C. Il n'y a pas de température minimale imposée.

Afin de ne pas impacter les stocks d'eau souterraine déjà fortement sollicités par ailleurs (Alimentation en Eau Potable, irrigation, industrie), la solution du doublet, avec un forage de prélèvement et un forage de réinjection (ill. 7), est préconisée. C'est aussi une orientation prise au niveau régional et départemental par les administrations (DRIRE, DDAF/MISE).

Cette solution de pompe à chaleur sur nappe présente par ailleurs de nombreux avantage en matière d'intégration architecturale, de rendement énergétique, d'environnement et de coûts.

Illustration 7 : Représentation schématique d'une pompe à chaleur sur nappe (www.novenergie.com)

Les pompes à chaleur sur nappe constituent une alternative intéressante aux solutions chaufferie + groupe froid à compression ou à absorption. En effet, les solutions PAC sur nappe exonèrent le maître d'ouvrage de plusieurs contraintes : absence ou limitation des groupes extérieurs ou aéro-réfrigérants, des conduits de cheminée, des grilles de prise ou de rejet d'air. En particulier, l'installation en milieu urbain des groupes frigorifiques se révèle de plus en plus contraignante (BRGM/RP-53306 FR, 2005).

Ces critères d'intégration sont particulièrement sensibles dans les cas des bâtiments classés ou inscrits sur l'inventaire supplémentaire des « Monuments Historiques », ce qui peut être le cas pour des projets de réhabilitation de locaux tertiaires.

L'efficacité énergétique des installations de pompes à chaleur sur nappe résulte principalement de la stabilité des performances. En effet, la température de la nappe aquifère fluctue très peu contrairement à la température extérieure (qui influe directement les performances des PAC sur air). La puissance fournie est importante, de l'ordre de 10 KW pour 1 m^3/h.

L'application du second principe de la thermodynamique (principe de Carnot) permet d'écrire que :

COefficient de Performance (COP) « Théorique » = T2 / (T2 – T1) = 1/ (1 – T1/T2)

Avec T1 : température de la source froide et T2 : température de la source chaude

Cette formule permet d'expliciter la faible variation du COP d'une PAC sur nappe puisque la valeur de température d'eau de nappe (T1) varie peu.

D'un point de vue environnemental, la solution des PAC sur nappes possède l'avantage d'être une énergie propre qui n'émet pas directement de rejets polluants, et qui peut se substituer aux énergies fossiles et polluantes notamment en milieu urbain dense. Elle offre enfin l'avantage d'une utilisation optimisée de l'énergie électrique en regard d'installation de chauffage dites « tout électrique » qui ont conduit, depuis les années 70, à un usage anarchique de l'électricité pour le chauffage des locaux. Elle permet également de limiter les dégagements de CO_2 et les phénomènes des pluies acides (émissions de SO_2 et NOx) du fait de l'absence (ou tout au moins de la limitation) du recours aux énergies fossiles.

Au niveau des taux d'émissions, les chiffres retenus pour définir les émissions de CO_2 évitées par la mise en œuvre d'une solution pompe à chaleur sur nappe sont les suivants :

- gaz : 205 g CO_2/kWh d'énergie finale (PCS),
- chauffage = 180 g CO_2/kWh d'énergie finale,
- éclairage = 100 g CO_2/kWh d'énergie finale,
- climatisation = 40 g CO_2/kWh d'énergie finale,
- autres usages tertiaires = 60 g CO_2/kWh d'énergie finale.

Par exemple, dans le cadre d'une étude menée sur l'ancien collège des Bernardins en Ile de France, à partir des consommations électriques prévisionnelles, la contribution des fluides frigorigènes à l'effet de serre peut être convertie en taux de dégagement de CO_2 exprimé en g CO_2/kWh de consommations du système de production. La solution pompe à chaleur sur nappe permet d'éviter le rejet d'environ 63 tonnes CO_2 par an, soit un gain de 70 % par rapport à la solution chaufferie gaz + groupe froid. Cette solution permet également d'éviter le rejet d'environ 53 kg de NOx par an (BRGM/RP-53306 FR, 2005).

De même, les fluides frigorigènes (R410a, R407c, R134a) sont des composés chimiques pouvant générer un effet de serre très supérieur au gaz carbonique (GWP[1] compris entre 1 300 et 1 730), s'ils sont libérés accidentellement dans l'atmosphère. Ce risque concerne aussi les groupes frigorifiques utilisés dans les installations classiques. En fonctionnement normal, il est très limité, du fait de l'utilisation en circuit fermé.

Enfin, plusieurs critères peuvent contribuer à rendre la solution pompe à chaleur sur nappe plus intéressante économiquement qu'une solution « classique » telle que chaufferie gaz + groupe froid :

- recours à une seule machine pour faire le chaud et le froid,
- moindres coûts énergétiques en particulier si des transferts d'énergie peuvent être valorisés,
- moindre surface technique = un seul local en lieu et place de deux locaux ou d'une chaufferie et d'un espace technique extérieur pour le groupe froid. Ce critère est particulièrement important dans le cas de projets en milieu urbain (bureaux, bâtiments tertiaires) pour lesquels « chaque m^2 compte »
- coût de maintenance moindre car une seule « machine » à entretenir

2.6. LA GARANTIE AQUAPAC

L'ADEME, le BRGM et EDF ont créé la procédure AQUAPAC. Il s'agit d'une procédure qui garantit la ressource en eau souterraine à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques pour une pompe à chaleur. Le maître d'ouvrage qui la souscrit est indemnisé si la recherche d'un débit d'eau suffisant échoue, ou si le débit de la nappe utilisée diminue après l'installation de la pompe à chaleur. AQUAPAC assure aussi bien une garantie de recherche qu'une garantie de pérennité.

Cette procédure de « garantie sur la ressource en eau souterraine à faible profondeur utilisée à des fins énergétiques » est destinée à couvrir les risques d'aléas et de non-pérennité de la ressource.

[1] Global Warm Potential : Cet indice caractérise la participation de la molécule à l'effet de serre est calculé en kg eq. CO_2. Il est calculé pour une durée déterminée (20, 100, 500 ans…) et par rapport à une molécule de référence (CO_2 dans le cas présent) à laquelle on attribue un GWP de 1.

2.7. REGLEMENTATION

La réglementation associée à l'installation de pompe à chaleur dépend principalement de trois codes juridiques :

- Le code de l'environnement
- Le code minier
- Le code de la santé publique

2.7.1. Code de l'Environnement (anciennement Loi sur l'Eau n°92-3 du 3 janvier 1992)

Deux grandes thématiques du code de l'environnement s'appliquent aux ouvrages géothermiques : la réglementation relative à l'eau et aux milieux aquatiques et la réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement.

- **La réglementation relative à l'eau et aux milieux aquatiques**

Le texte qui s'applique plus particulièrement est la partie réglementaire relative à la nomenclature des opérations soumises à autorisation préfectorale ou à déclaration et correspondant au texte d'application des articles L. 214-1 à 214-6 du Code de l'Environnement (dite « nomenclature Eau »).

Les rubriques suivantes de la loi s'appliquent en particulier (les débits indiqués correspondent à la capacité de prélèvement de l'installation, même si le débit réel est inférieur) :

➔ **La réalisation de forages « en lien avec les eaux souterraines »** (rubrique 1.1.1.0)

Sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique, exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau, sont soumis à déclaration.

➔ **Les prélèvements d'eau** (rubrique 1.1.2.0.)

Débit < 1 000 m^3/an : néant

Débit > 1 000 m^3/an et < 200 000 m^3/an : Déclaration

Débit > 200 000 m^3/an : Autorisation

➔ **Zones de répartition des eaux** (rubrique 1.3.1.0)

Dans les régions présentant une insuffisance pérenne des ressources par rapport aux besoins, les seuils d'autorisation ou de déclaration appliqués aux ouvrages de prélèvement d'eau peuvent être abaissés.

➔ **Réinjection dans une même nappe des eaux prélevées pour la géothermie** (rubrique 5.1.1.0)

Débit < 8 m^3/h : néant

Débit > 8 m^3/h et < 80 m^3/h : Déclaration

Débit > 80 m^3/h : Autorisation

➔ **Recherche et exploitation de gîtes géothermiques** (rubrique 5.1.2.0)

Les rubriques 5.1.1.0 et 5.1.2.0 renvoient à l'autorisation de travaux régie par le décret 2006-649 d'application de l'article 83 du Code Minier (cf. paragraphe "Code Minier" ci-dessous). Une autorisation obtenue au titre du Code Minier (Art 83) vaut autorisation ou déclaration au titre du Code de l'Environnement, sous réserve que le dossier de demande comporte les éléments exigés par le code de l'Environnement (dispositions définies aux articles R.214-6 dans le cas d'une autorisation et R.214-32 dans le cas d'une déclaration).

Les déclarations ou demandes d'autorisation mentionnées ci-dessus sont à effectuer en préfecture et seront instruites en lien avec le service chargé de la police de l'eau et des milieux aquatiques. En tout état de cause, un prélèvement de moins de 1 000 m^3 par an est considéré comme « à usage domestique », et n'est donc pas soumis à cette réglementation.

➔ **Articulation avec le Code de la Santé Publique**

Le code de l'Environnement prévoit dans son article R214-4 que, *« Lorsqu'ils sont situés à l'intérieur du périmètre de protection d'une source d'eau minérale naturelle déclarée d'intérêt public et qu'ils comportent des opérations de sondage ou de travail souterrain, les installations, ouvrages, travaux et activités soumis à déclaration par la nomenclature annexée à l'article R. 214-1 sont également soumis à l'autorisation prévue à l'article L. 1322-4 du code de la santé publique. »*

- **La réglementation des installations classées pour la protection de l'environnement**

Les opérations de géothermie peuvent également être soumises à déclaration ou autorisation au titre de la réglementation des Installations Classées pour la Protection

de l'Environnement qui figure au Code de l'Environnement (Livre V "Prévention des pollutions, des risques et des nuisances" - titre 1er "Installations classées pour la protection de l'environnement").

➔ **Forages**

Dans la législation applicable aux opérations relevant des installations classées pour la protection de l'environnement, les forages en eux-mêmes ne font pas l'objet d'une rubrique de la nomenclature des installations classées. Toutefois, ils sont considérés comme des ouvrages connexes des activités soumises à autorisation ou déclaration lorsqu'ils sont nécessaires à leur fonctionnement.

Ainsi, l'autorisation d'exploiter délivrée au titre de la législation des installations classées vaut autorisation au titre de la loi sur l'eau pour les forages.

➔ **Pompes à chaleur**

Les PAC sur nappe sont concernées par la rubrique 2920 qui prévoit :

- Pour les installations de réfrigération ou compression fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10^5 Pa (mais ne comprimant pas ou n'utilisant pas des fluides inflammables ou toxiques) :

  - un régime d'autorisation si la puissance absorbée est supérieure à 500 kW ;

  - un régime de déclaration si la puissance absorbée est supérieure à 50 kW, mais inférieure ou égale à 500 kW.

Des réglementations spécifiques concernent l'utilisation des fluides frigorigènes.

D'une façon générale, concernant les ICPE, il est recommandé aux Maîtres d'ouvrages ou à leurs maîtres d'œuvre d'interroger la DRIRE au cas par cas.

2.7.2. .Le Code Minier

➔ **Autorisation d'exploiter un gîte géothermique**

Les gîtes géothermiques sont divisés en trois catégories : gîtes à haute température, gîtes à basse température, et gîtes de minime importance.

La recherche et l'exploitation de gîtes géothermiques à haute température (eau à plus de 150°C) sont soumis à la réglementation minière générale, notamment, obtention d'un permis exclusif de recherche par arrêté ministériel ou obtention d'une concession par décret en Conseil d'Etat (Code Minier, notamment titres II et III, et décret n°2006-648).

La recherche et l'exploitation de gîtes géothermiques à basse température (eau à moins de 150°C) est soumise à l'obtention d'un perm is de recherche ou d'exploitation minier, délivré par la préfecture (Code Minier, articles 98 à 103, et décret n°78-498).

L'exploitation de l'installation est soumise à la législation minière. D'après le décret n°2006-649, l'autorisation minière vaut autorisation au titre du Code de l'Environnement (anciennement Loi sur l'Eau) mentionnée au paragraphe **1**.

Sont exemptés de titre minier les gîtes géothermiques dits de "minime importance" (décret n°78-498 du 28 mars 1978), qui répondent aux caractéristiques suivantes : profondeur inférieure à 100 m et débit calorifique inférieur à 200 thermies par heure (= 232 kW), par rapport à une température extérieure de référence de 20°C. La géothermie à usage domestique relève généralement de cette exemption.

➔ Ouverture de travaux de recherche ou d'exploitation

L'article 83 du Code Minier prévoit que « *toute ouverture de travaux d'exploration ou d'exploitation de mines est subordonnée à une* ***autorisation*** *administrative, accordée, après enquête publique et consultation des communes intéressées, dans les conditions prévues par un décret en Conseil d'Etat* ».

Cet article fait partie du Titre IV du Code Minier qui s'applique à toute opération de géothermie (haute température, basse température et basse température de minime importance).

Les procédures de demande d'autorisation sont précisées par le décret n°2006-649.

➔ Déclaration de sondage

Tout sondage de plus de 10 m de profondeur doit être déclaré à l'ingénieur en chef des mines (Code Minier art. 131). Un formulaire adéquat se trouve sur le site de la DRIRE (dans la rubrique *Sous-sol, mines et carrières*) :

Cette imposition s'applique à tous les forages, quel que soit leur usage (eau potable, géothermie, etc.).

➔ Prescription techniques concernant la réalisation et l'exploitation des sondages

Les prescriptions techniques à respecter pour réaliser des sondages sont fixées dans le décret n°96-102 du 2 février 1996 , ainsi que dans les trois arrêtés du 11 septembre 2003 (en fonction de la catégorie de déclaration ou d'autorisation).

Ces arrêtés rendent obligatoires certaines précautions d'implantation et de construction des sondages, afin d'éviter de dégrader les ressources en eaux souterraines.

Les bonnes pratiques de conception, de réalisation, de suivi et de fermeture des forages d'eau et de géothermie sont décrites dans la norme NF X 10-999. Celle-ci sera bientôt complétée, notamment pour la conception des sondes géothermiques verticales (SGV), par la norme NF X 10-970 (en cours de rédaction).

2.7.3. Impositions diverses relatives aux prélèvements d'eau

➔ Code de la santé Publique

Le Code de la Santé Publique s'applique au cas particulier des forages destinés à un usage alimentaire (notamment eau destinée à la consommation humaine ou utilisée dans l'industrie agroalimentaire).

Si l'ouvrage destiné à un usage thermique est également utilisé pour une application entrant dans ce champ, il tombe sous le coup du Code de la Santé Publique.

Ainsi, lorsque le prélèvement d'eau dans le milieu naturel est destiné à la consommation humaine ou à une entreprise agroalimentaire, il est soumis à autorisation (articles R1321-6 à R1321-10 et R1322-4 du code de la santé publique).

Le captage doit respecter les prescriptions énoncées par son arrêté d'autorisation spécifique, pris en application de la législation sur l'eau et du code général de la santé. Il doit éviter les risques de pollution par retour d'eau (double réseau ou manchon souple). Les matériaux utilisés ne doivent pas être susceptibles d'altérer la qualité de l'eau.

Pour un usage alimentaire et/ou sanitaire collectif (captage d'alimentation en eau potable - AEP), le captage et la zone affectée par le prélèvement est protégé par des prescriptions spécifiques détaillées dans les différents périmètres de protection du captage :

- Périmètre de protection immédiate : surface clôturée de quelques ares ;
- Périmètre de protection rapprochée : zone d'appel du captage dont la surface varie suivant le type d'aquifère (nappe captive ou aquifère karstique…) ;
- Périmètre de protection éloignée : zone d'alimentation du captage.

➔ **Police des eaux** (Code de l'Environnement, articles L. 211-2 et suivants)

Des prescriptions nationales ou locales peuvent limiter ou interdire les prises d'eau ou les rejets. Les missions de police de l'eau sont confiées, dans le département de la Charente-Maritime à la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDTM).

➔ **Code général des collectivités territoriales**

- article L. 2223-5

« *Nul ne peut, sans autorisation, élever aucune habitation ni creuser aucun puits à moins de 100 mètres des nouveaux cimetières transférés hors des communes*. »

- article L. 2224-9 et décret 2008-652 : Tout prélèvement, puits ou forage réalisé à des fins d'usage domestique de l'eau ($Q< 1\ 000\ m^3/an$) doit faire l'objet d'une déclaration auprès du maire de la commune concernée.

3. Cartographie du potentiel géothermique

3.1. GEOGRAPHIE PHYSIQUE DE LA CHARENTE-MARITIME

Le département de la Charente-Maritime couvre une superficie de près de 6 900 km², ce qui représente 1,26 % de la surface du territoire Français. Il s'étend entre 45° et 46,20° de latitude Nord ; ses plus grandes dimensions sont de 90 km dans le sens Est-Ouest, et de 140 km dans le sens Nord-Sud (Cf. ill. 8). La Charente-Maritime est essentiellement formée de deux Provinces : la Saintonge qui couvre les 2/3 du département, et la plaine de l'Aunis au Nord.

Le climat est océanique tempéré de type aquitain, marqué par un ensoleillement moyen assez important. La pluviosité y est modérée, les précipitations ne dépassant pas 1 200 mm par an. Les températures, quant à elles, varient en moyenne de + 5°C en hiver à + 20°C en été. Les hivers sont doux et pluvieux, mais, en été, le climat peut être assez sec, si bien que des épisodes de sécheresse peuvent ponctuer certains étés.

Il existe toutefois un contraste entre le littoral, assez sec et ensoleillé, et l'intérieur des terres, davantage pluvieux. La pluviométrie passe ainsi de 750 mm sur le littoral à 950 mm en Haute Saintonge, et l'ensoleillement annuel est de 2 250 heures à La Rochelle en moyenne pour la période 1961-1990 et de 2 024 heures à Cognac.

De même, l'amplitude thermique augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'océan Atlantique : 7°C sur le littoral, 10°C sur l'Est du département. Les froids hivernaux sont notamment plus intenses dans l'Est que dans l'Ouest du département. Cognac (Charente) compte ainsi 40 jours de gels en moyenne par an, tandis que La Rochelle n'en compte que 23 (normales sur la période 1961/1990). Le record absolu de température négative à La Rochelle est de -13° contre -19° à Cognac. L'hiver, les premières gelées d'automne se produisent en moyenne avec un décalage d'un mois entre l'Est du département (1er novembre) et l'Ouest (1er décembre). En revanche, les étés sont en moyenne plus chauds à Cognac que sur le littoral, où les températures sont tempérées par la brise de mer.

La température des nappes les plus superficielles est en général très proche de la moyenne annuelle des températures en surface. Cette moyenne, située entre 12 et 13°C, varie dans le département, notamment entre l'Est et l'Ouest comme nous venons de le voir. La température moyenne de 12.4°C a été retenue comme base de calcul des températures des eaux souterraines, en fonction de leur profondeur, dans la base de données réalisée dans le cadre de ce travail.

Le relief du département est relativement plat avec le point le plus haut, 173 m NGF, dans le Nord-Est. Il reflète la géologie du département comme en témoigne la comparaison des illustrations 8 et 9.

L'hydrographie repose principalement sur les bassins de la Sèvre-Niortaise au Nord, la Charente, la Seudre et la Gironde-Dordogne au Sud. Pour les deux premiers, le département de la Charente-Maritime est à l'aval des bassins versants qui englobent une grande partie des départements des Deux-Sèvres (pour la Sèvre-Niortaise) et de la Charente (pour la Charente). Le débouché de ces cours d'eau sur le littoral correspond à de vastes zones de marais : Marais Poitevin, marais de Rochefort, de Brouage, de la Seudre.

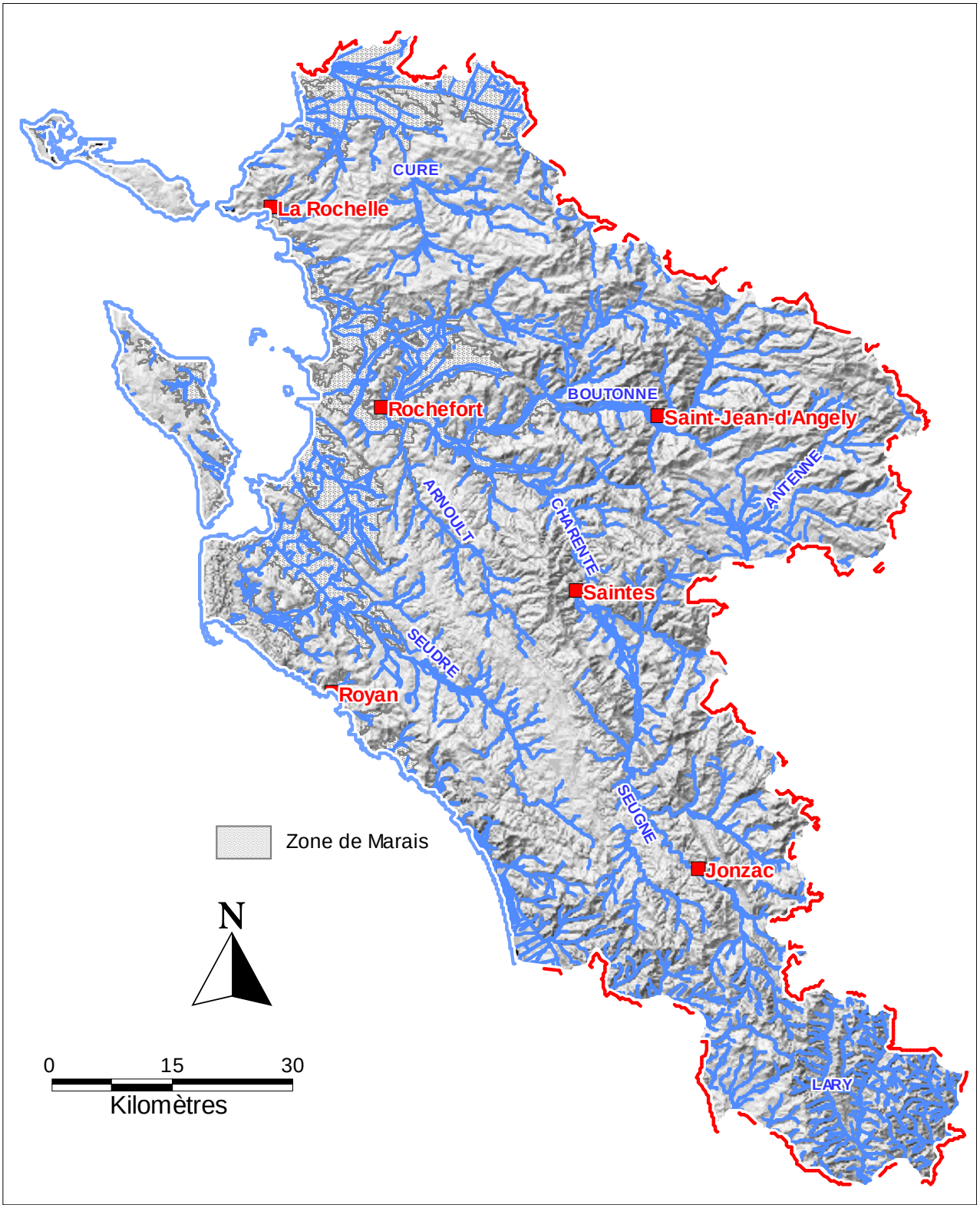


Illustration 8 : réseau hydrographique sur carte en relief du département

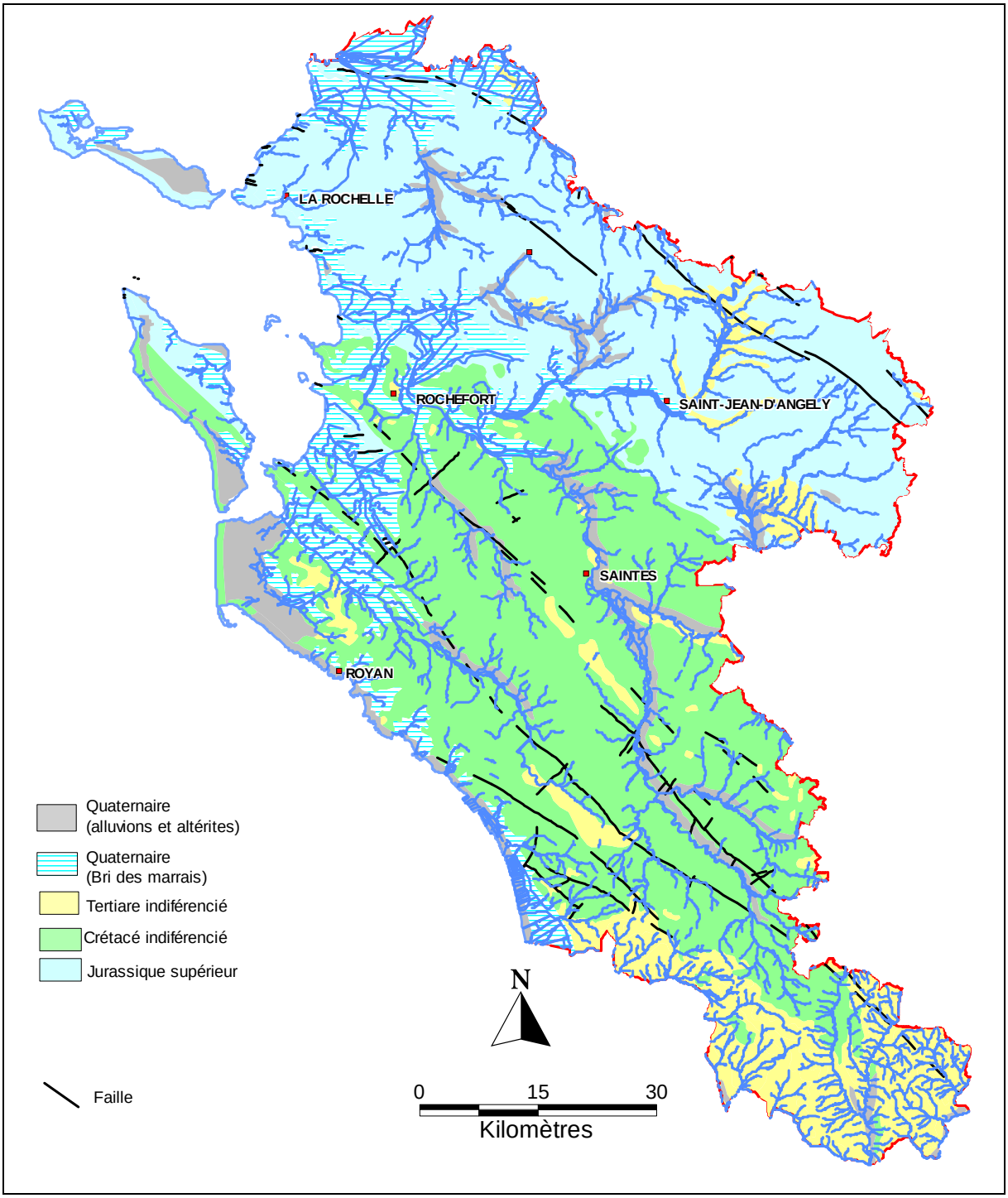


Illustration 9 : réseau hydrographique sur carte géologique simplifiée du département

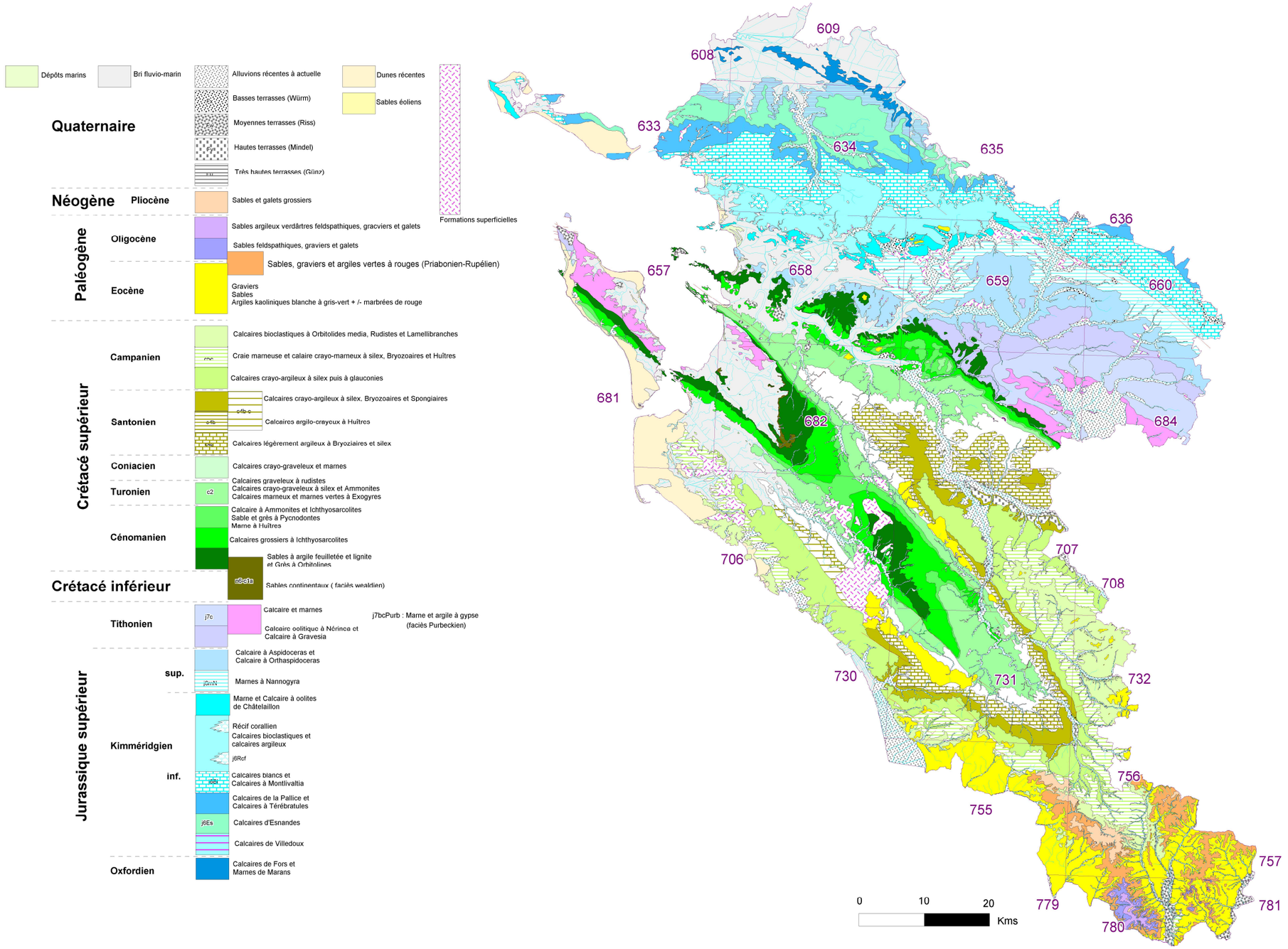


Illustration 10 : Carte géologique du département de Charente-Maritime (avec contours et numéro des cartes géologiques) [source : BRGM SGR Poitou-Charentes]

La densité du réseau hydrographique se calque bien sur la nature géologique du sol, soulignant les zones peu perméables, où il est dense (formations sablo-argileuses du Tertiaire au Sud, argiles des marais et des vallées alluviales), et les zones calcaires (Crétacé et Jurassique supérieur) où les circulations d'eau sont principalement souterraines.

3.2. GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE [PLANCHE 1]

3.2.1. Contexte géologique

Le département de la Charente-Maritime est entièrement situé dans la partie septentrionale du Bassin Aquitain. Ce bassin sédimentaire est limité au Nord par le socle cristallophyllien (roches granitiques, volcaniques et métamorphiques anciennes correspondant à de vieilles chaînes de montagnes plissées) du Massif Armoricain, à l'Est par le socle du Massif Central et au Sud par le Massif Pyrénéen structuré plus récemment.

Ce bassin sédimentaire s'est rempli progressivement au cours des aires secondaires et tertiaires, par le retour de la mer sur des reliefs aplanis après l'importante phase orogénique qui a vu la création au Paléozoïque (= Primaire) supérieur de la chaîne de montagnes hercynienne. Globalement la mer reculant vers le Sud-Ouest au fur et à mesure du remplissage sédimentaire, en Charente-Maritime, les terrains observables à l'affleurement sont de plus en plus jeunes dans cette direction : Jurassique supérieur au Nord-Est, Crétacé supérieur et Tertiaire au Sud. En profondeur, le remplissage sédimentaire au-dessus du socle primaire débute par des terrains salifères du Trias (présents que dans la moitié sud du département), ou du Jurassique inférieur (= Lias) et moyen (= Dogger).

Dans le détail l'histoire géologique est bien plus complexe.

Le Trias, reconnu par des forages profonds dans la partie sud du département, correspond à des faciès variés, principalement argileux et gréseux, qui se caractérisent surtout par des cortèges évaporitiques. Il s'agit en effet de faciès côtiers, de type lagunes dans lesquelles s'accumulent les sels. Ces faciès salés expliquent la qualité très minéralisée des eaux souterraines profondes exploitées pour le thermalisme et la géothermie à Jonzac ou Rochefort.

Au Lias (Jurassique inférieur) la mer revient franchement sur ce domaine avec des dépôts variés : argiles, sables, marnes, dolomies et calcaires. Ces faciès sont observables au Nord en bordure du socle armoricain, dans les régions de Niort et en Sud-Vendée. Le maximum de la transgression marine correspond au Toarcien avec le dépôt de marnes grises, niveau repère caractéristique imperméable. Ces marnes sont aussi caractérisées par les nombreuses ammonites que l'on y trouve, ce qui souligne leur caractère pélagique (franchement marin).

Au Dogger, un régime de plate-forme carbonatée s'établit. Les calcaires du Dogger forment les plateaux karstiques de la région de Niort et de la Boutonne amont (région de Melle). Vers le Sud-Ouest, ces calcaires passent à des faciès plus distaux par rapport aux paléo-côtes, c'est-à-dire à des marnes.

Au Jurassique supérieur les faciès sont moins franchement carbonatés. Ils correspondent à une vaste plate-forme carbonatée à l'aval de reliefs très arasés qui donnent des séries monotones principalement marneuses. Ces séries occupent à l'affleurement la partie septentrionale de la Charente-Maritime : bassins du Curé, de la Gère-Devise, de la Boutonne, de l'Antenne. Les séries sont de plus en plus récentes vers le Sud-Ouest. L'ensemble du Jurassique supérieur peut atteindre 500 m d'épaisseur. A la fin du Jurassique, la mer se retire vers le Sud-Ouest et l'on peut observer des faciès à gypse (et à faunes continentales, notamment des croccodiliens) dans les terrains du Jurassique terminal de la région de Cognac. Ces faciès correspondent au « Purbeckien » [Tithonien supérieur].

Durant le Crétacé inférieur (entre -130 et -100 Ma) le domaine correspondant au département de la Charente-Maritime reste émergé. La mer revient au Cénomanien en déposant en premier lieu des sables et argiles caractéristiques de milieux continentaux et littoraux, puis en installant une nouvelle plate-forme carbonatée qui va perdurer durant tout le Crétacé supérieur. Dans le détail toutefois, les faciès calcaires du Cénomanien au Coniacien enregistrent des phénomènes régressifs et transgressifs. La deuxième moitié du Crétacé supérieur (Santonien-Campanien) voit le dépôt d'une épaisse (plusieurs centaines de mètres) série marneuse très monotone à l'affleurement. Le Crétacé s'achève par une phase régressive, en relation avec les mécanismes pyrénéens qui se développent plus au Sud, et de nouveau le dépôt de faciès calcaires littoraux, bioclastiques, datés du Campanien terminal-Maastrichtien.

Ces séries calcaires et marneuses, parfois gréseuses, du Crétacé supérieur forment la moitié méridionale du département, principalement au Sud du fleuve Charente. Elles sont plissées et faillées au moment des déformations pyrénéennes. Les structures principales, qui se lisent nettement dans le relief du département, sont : l'anticlinal de Jonzac et le synclinal de Saintes.

Le Tertiaire est marqué par des conditions de dépôts continentales, avec des sables, des argiles, des calcaires lacustres appartenant à l'Eocène et à l'Oligocène. Ces dépôts, appelés aussi « Sidérolithique » du fait de leur richesse en fer, affleurent principalement dans l'extrémité sud du département. Le réseau hydrographique y est dense et les étangs nombreux traduisant un substratum peu perméable. C'est le domaine des forêts, notamment de pins.

Enfin, le Quaternaire est marqué par la transgression marine flandrienne (à partir de -12 000 ans) qui dépose les argiles du « Bri » au niveau des marais côtiers, puis par les accumulations sableuses des dunes littorales.

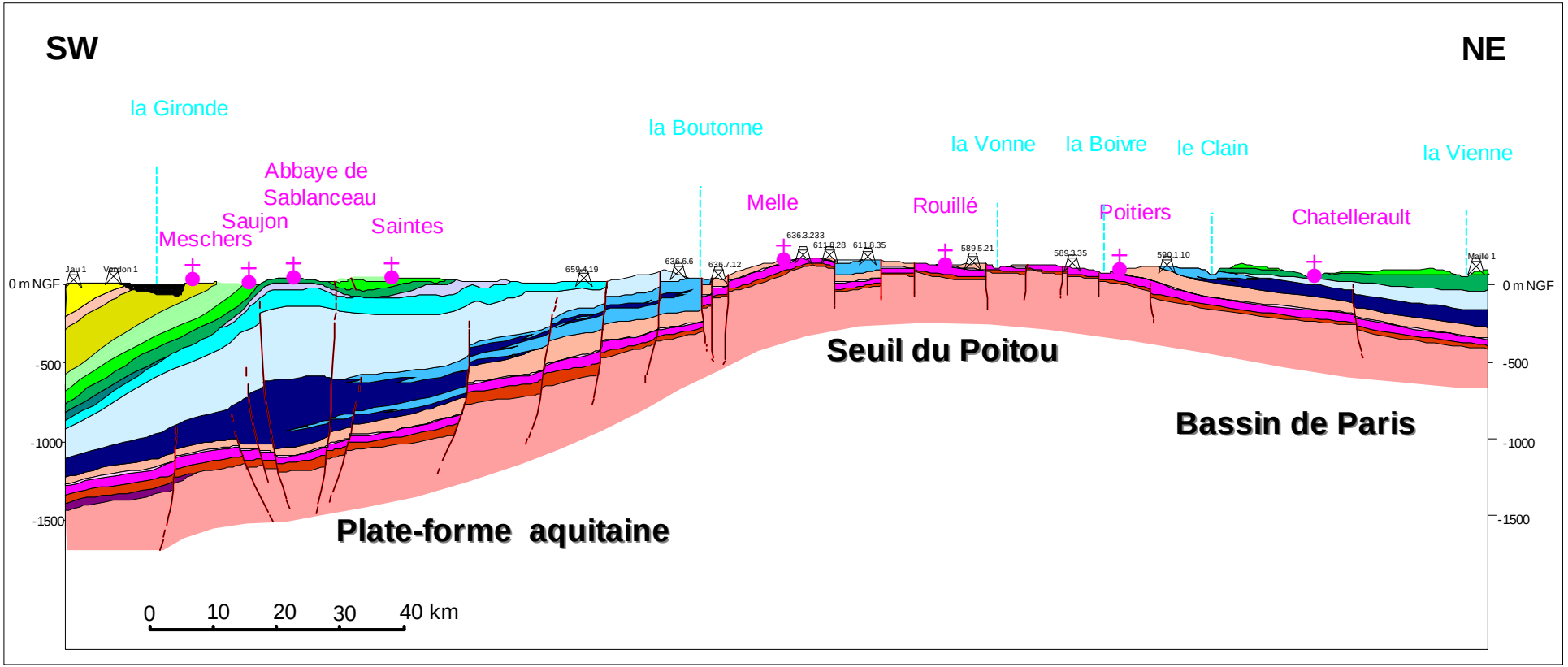


Illustration 11 : Coupe géologique à travers le seuil du Poitou montrant la structure géologique profonde de la Charente-Maritime, entre la Boutonne et la Gironde

3.2.2. Contexte hydrogéologique

A cet empilement sédimentaire correspond 6 grands aquifères régionaux, soit de bas en haut :

- A la base **l'Infra-Toarcien** correspondant à des faciès variés, sableux, calcaires et dolomitiques. Les eaux sont en général très minéralisées et il est souvent difficile de distinguer le Lias du Trias sous-jacent (dans la partie sud) qui peut lui aussi être aquifère.

- **Le Dogger** calcaire, au-dessus des marnes toarciennes qui l'isolent de l'aquifère du Lias.

- **Le Jurassique supérieur** n'est pas intrinsèquement perméable, à l'exception de quelques niveaux plus calcaires inter-stratifiés dans la série. Toutefois, l'intense fracturation et altération qui se développe en surface dans une frange d'une vingtaine de mètres d'épaisseur permet la circulation et le stockage des eaux souterraines et engendre un important aquifère superficiel en relation étroite avec les cours d'eau. Cet aquifère n'est plus connu lorsque le Jurassique s'enfonce sous le Crétacé. Par ailleurs, l'origine de l'altération superficielle est antérieure au dépôt du Bri, vraisemblablement en liaison avec les périodes glaciaires.

- **Le Cénomanien** (dans lequel on englobe en profondeur les sables Infra-Cénomanien au niveau de l'anticlinal de Jonzac) est un aquifère formé d'une partie inférieure plutôt sableuse et d'une partie supérieure calcaire.

- Séparé de l'aquifère du Cénomanien par des séries argileuses et marneuses, l'ensemble allant du **Turonien moyen au Coniacien** constitue un multicouche et correspond à l'aquifère le plus important de la partie sud des Charentes. Cet aquifère est formé par des calcaires bioclastiques et par des niveaux sableux.

- Au-dessus de l'épaisse série marneuse du Santonien-Campanien, les termes calcaires bioclastiques du **Campanien terminal-Maastrichtien** constituent de bons niveaux aquifères.

En Charente-Maritime, le Lias et le Dogger sont assez peu reconnus, uniquement à travers quelques forages profonds (La Rochelle, Ile de Ré, Rochefort, Jonzac…). Dans cet atlas, ces 2 aquifères ont été regroupés devant la difficulté de connaître à priori le réservoir géothermique. En effet, le Dogger peut se révéler « sec » là ou l'Infra-Toarcien présente une certaine productivité, et inversement.

En dehors de ces grands aquifères, il existe des aquifères plus localisés, en général superficiels, pouvant présenter un intérêt local, y compris pour la géothermie : les nappes alluviales dans les vallées, la frange altérée des marnes du Crétacé, les sables et calcaires du Tertiaire, les sables des dunes… Du fait de leur caractère local et du peu de connaissances disponibles sur ces nappes, ces aquifères n'ont pas fait l'objet d'une cartographie dans le cadre de ce travail.

3.2.3. Caractéristiques et exploitation des aquifères

En résumé du chapitre précédent et très schématiquement, d'un point de vue de la ressource en eaux souterraines, le département peut être divisé en 2 (ill.12).

La partie nord (en bleu sur la carte, illustration 12) comprend essentiellement une ressource superficielle (dans les 30 premiers mètres) correspondant aux calcaires marneux du Jurassique supérieur très fissurés. L'eau de pluie qui s'infiltre circule dans les fissures jusqu'à rejoindre rapidement les rivières. Il y a peu de réserves en eau. Un travail récemment réalisé par le BRGM permet de calculer l'inertie de cet aquifère. La courbe de l'illustration 13 doit être lue comme étant le temps d'impact d'une pluie efficace sur la nappe : l'impact d'une pluie est maximum au bout de moins de 2 mois et disparaît totalement en moins de 6 mois.

Cette nappe est très exploitée pour l'irrigation. En revanche elle est très vulnérable et pratiquement abandonnée pour l'Alimentation en eau Potable du fait de ses teneurs excessives en nitrates et phytosanitaires.

En profondeur le multicouche du Dogger/Infra-Toarcien peut être intéressant pour la géothermie mais est très peu reconnu et exploité à l'heure actuelle.

La partie sud (en vert) correspond à un empilement de couches géologiques aquifères :

- en profondeur (au-delà de 1 000 m), les réservoirs Dogger/infra-Toarcien utilisés en géothermie (Rochefort, Jonzac),

- les nappes du Cénomanien (calcaires et sables) et du Turonien-Coniacien (calcaires) très utilisées pour l'Alimentation en Eaux Potables et pouvant se situer à plus de 500 m de profondeur au Sud du département ; ces aquifères sont aussi très utilisés pour l'irrigation.

- en surface des nappes de moindre importance contenues dans les calcaires bioclastiques du Campano-Maastrichtien, dans les marnes fissurées du Santonien-Campanien, dans les sables du Tertiaire, dans les alluvions ou même les dunes.

Comme pour la nappe superficielle de la partie nord, les nappes du Cénomanien, du Turonien-Coniacien ou les nappes plus superficielles montrent des cycles annuels de recharge hivernale et de vidange à partir du printemps. Pour l'instant, il n'est pas connu pour ces aquifères une problématique de baisse des niveaux sur le long terme comme c'est le cas par exemple en région bordelaise. La problématique réside dans les

conflits d'usages en période d'étiage. Ces cycles annuels supposent en effet une alimentation relativement rapide d'un coté et une vidange en particulier vers les rivières de l'autre. Dans les parties les plus profondes, l'inertie est toutefois supérieure. Pour la nappe du Cénomanien en sud-Charente, le maximum d'impact d'une pluie se fait au bout de 3 mois mais son effet passe complètement en presque 2 ans (ill.14).

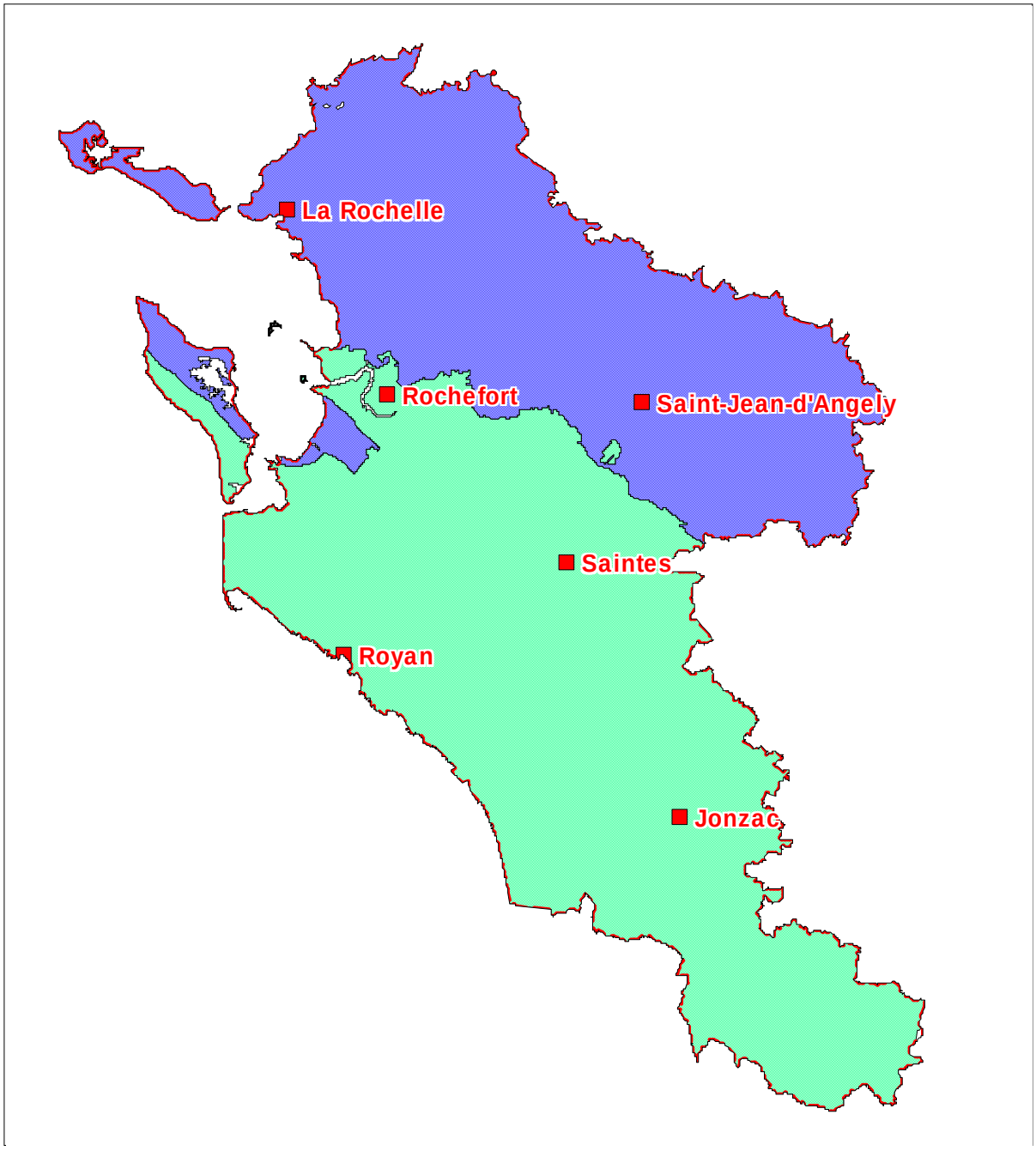


Illustration 12 : cartographie simplifiée du contexte en eaux souterraines du département

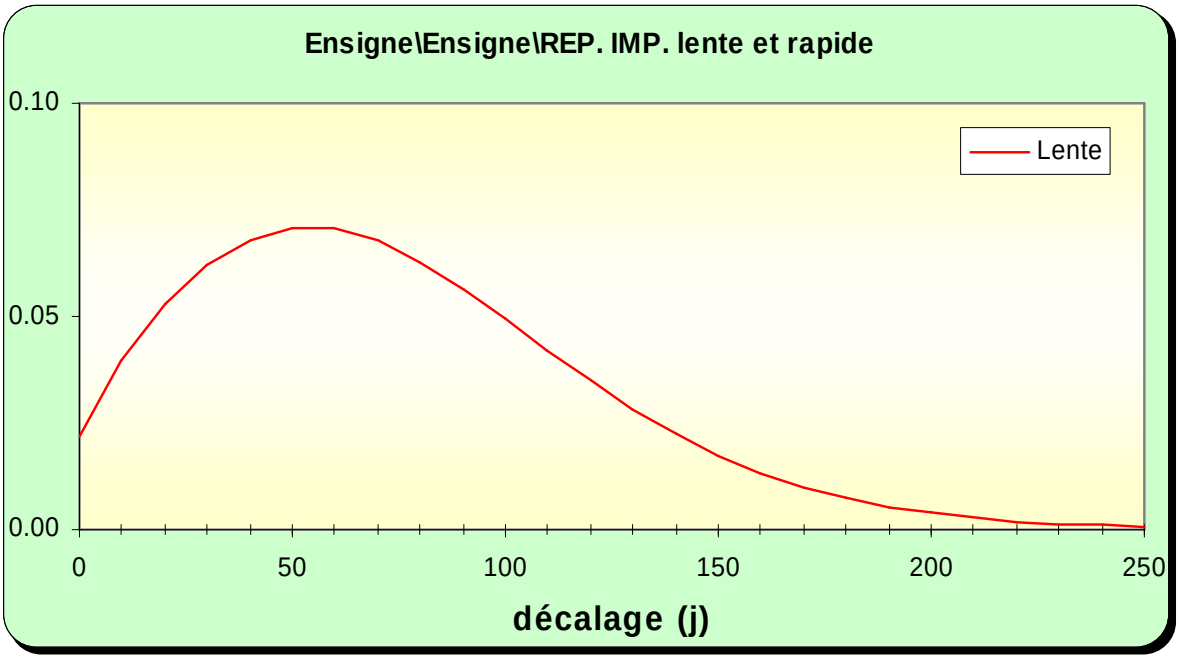


Illustration 13 : réactivité de la nappe du Jurassique supérieur à une pluie efficace (exemple du piézomètre d'Ensigné, bassin de la Boutonne)

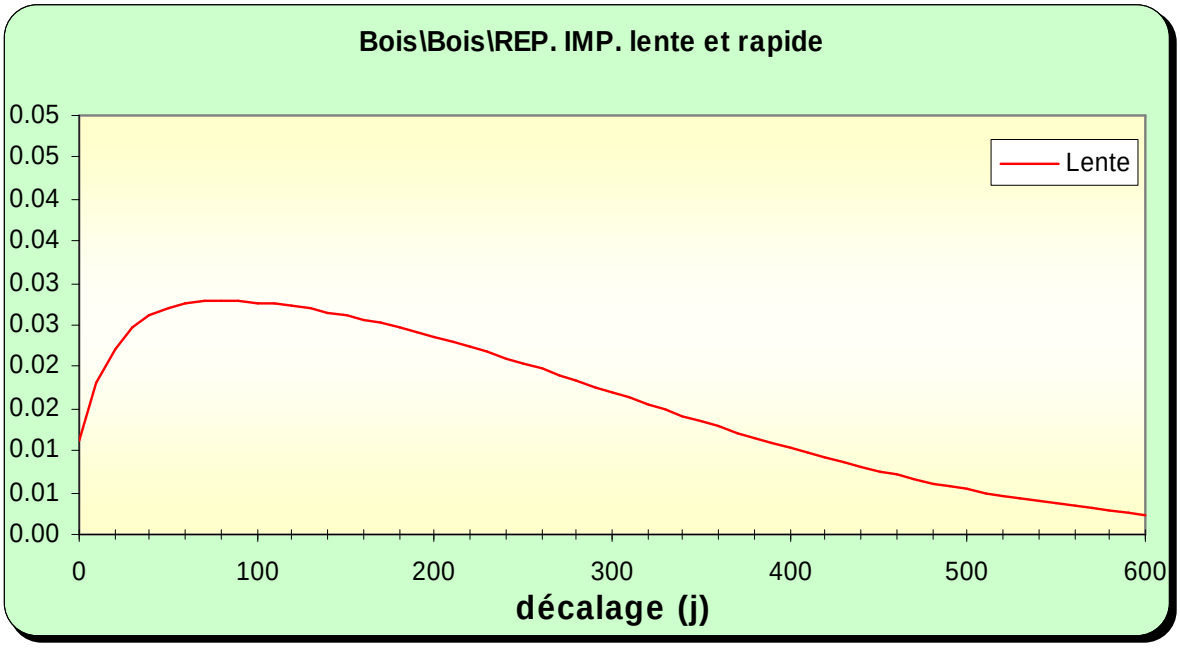


Illustration 14 : réactivité de la nappe du Cénomanien à une pluie efficace (exemple du piézomètre de Bois)

3.2.4. Bilan hydrogéologique global

Pour le département de la Charente-Maritime, un bilan global du cycle de l'eau peut être tenté (ill. 15). Malgré les incertitudes, il est représentatif des répartitions et proportions annuelles depuis la pluie qui tombe jusqu'à l'exploitation des eaux souterraines.

Basé sur une pluie moyenne de 800 mm, le volume qui tombe en année moyenne sur le département serait de l'ordre de 5.5 milliards de m^3. Mais une grosse partie de cette pluie est rapidement reprise par l'atmosphère ou intégrée dans le cycle biologique. La fraction restante, ou pluie efficace, va s'infiltrer dans le sous-sol ou ruisseler dans les cours d'eau. Les différentes proportions sont difficiles à estimer, mais il est vraisemblable que globalement, dans le contexte calcaire du département et au regard de la densité du réseau hydrographique, une majorité de la pluie efficace rejoint les nappes.

Ces circulations souterraines viennent rejoindre les rivières, s'ajoutant à la fraction qui ruisselle directement mais avec un décalage dans le temps. Une partie des eaux souterraines est aussi captée pour les besoins anthropiques.

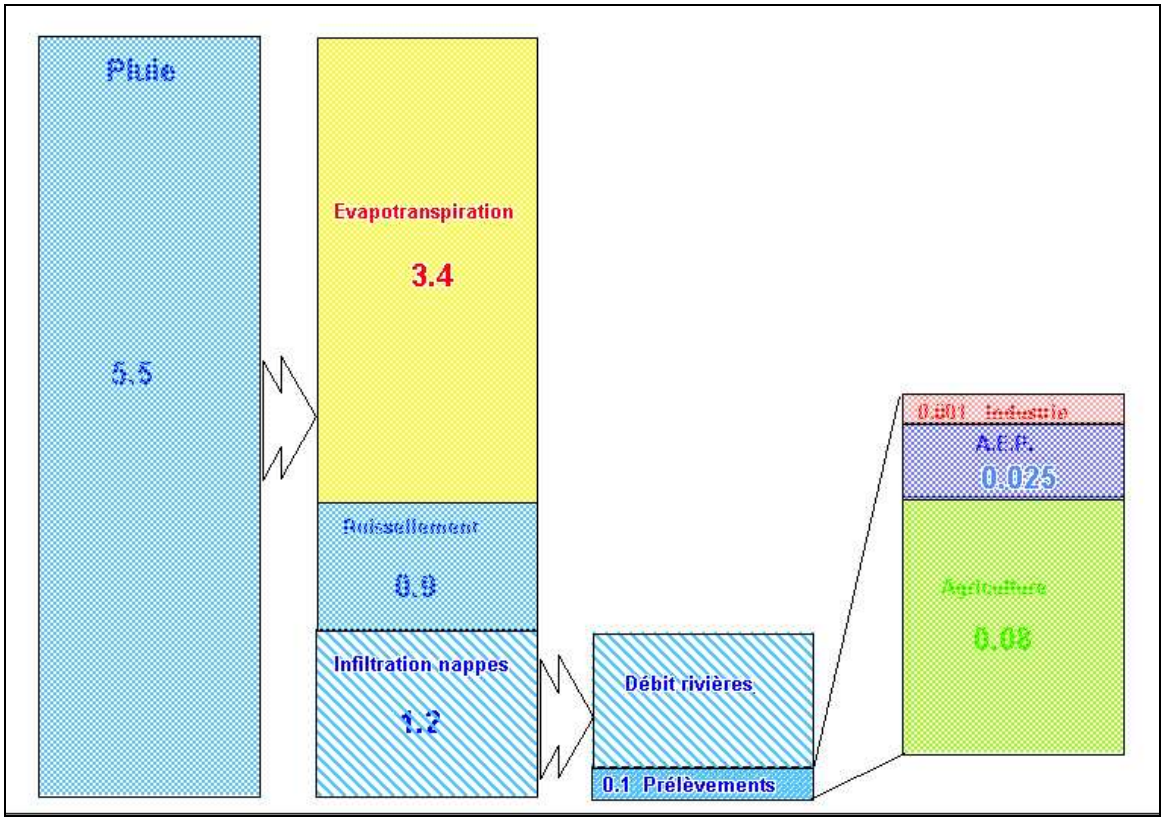


Illustration 15 : Bilan global annuel pour le département de la Charente-Maritime en Milliards de m^3

Ainsi les prélèvements en nappes souterraines (source des chiffres : AEAG, année 2001) représentent environ 10 % de la quantité d'eau qui transite annuellement par ces nappes. Mais ces chiffres masquent la réalité des problématiques car en règle générale les aquifères ne reçoivent pas d'eau de mai à septembre et pendant la même période constituent l'essentiel des débits des cours d'eau. Les prélèvements sont par ailleurs concentrés sur ces 5 mois, surtout en ce qui concerne l'irrigation.

Il en découle donc un impact significatif des prélèvements sur le débit des cours d'eau l'été. A titre d'exemple, un bilan peut être fait sur la Seugne à partir des données de la station de St-Seurin-de-Palenne. Si l'on considère le bilan annuel, il est passé à cette station : 298 Mm^3 d'eau en 2001 (année humide), 104 en 2002, 148 en 2003, 168 en 2004 et 55 en 2005 (année sèche). En revanche le même bilan sur 5 mois, de mai à septembre, donne : 58 Mm^3 en 2001, 30 en 2002, 22 en 2003, 40 en 2004 et 13 en 2005. En année très sèche, les volumes transitant par la Seudre sur ces 5 mois sont du même ordre de grandeur que les prélèvements sur ce bassin versant.

Le réchauffement climatique devrait accentuer ces déficits avec des contrastes plus marqués au niveau climatique. Certaines nappes seront peut être mieux rechargées du fait d'hivers plus humides, mais la faible inertie de l'hydrosystème (transit rapide vers les rivières) ne devrait pas permettre d'améliorer significativement les débits d'étiage.

En résumé, le bilan global présente un net excédent de la ressource en eau mais la mauvaise répartition dans le temps de cette ressource et les besoins pour les différents usages conduisent à des conflits entre usagers l'été. Une bonne gestion devrait conduire à essayer de réduire le déséquilibre en réalisant artificiellement ou « naturellement » des stockages d'eau en période hivernale. Enfin il est évident que les aménagements des bassins versants, qui ne sont plus du tout « naturels », avec le drainage des terres, la réduction du couvert végétal et des zones humides, la suppression des freins au départ des eaux (seuils, moulins, méandres…)…, jouent aussi un rôle important. Dans le contexte charentais, le bassin versant dans sa globalité apparaît donc comme l'unité de gestion adaptée pour les eaux superficielles comme souterraines.

3.3. CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE PAR AQUIFERE

3.3.1. Méthodologie

La grille de données

Le département a été découpé en mailles carrés de 500 m de coté afin de constituer une grille de travail permettant à la fois de réaliser les cartes de l'atlas et l'outil informatique consultable sur internet ou sur CDROM. Chaque maille de la grille a été renseignée :

- un identifiant constitué de la lettre associée à sa colonne (296 colonnes dans la grille identifiées de A à IF) suivi du numéro de la ligne (261 lignes dans la grille),
- le nom de la commune et son numéro INSEE, en considérant la position du centre de la maille par rapport à la cartographie des communes,
- l'altitude moyenne de la maille en m NGF prise à partir du modèle Numérique de Terrain de l'IGN,
- les coordonnées X et Y en lambert 2 étendu du centroïde de la maille,
- pour chaque aquifère (si présent au droit de la maille) :
    - la profondeur du toit de la nappe
    - la profondeur du mur (base) de la nappe
    - l'épaisseur de la nappe
    - une estimation du débit possible en m^3/h
    - une estimation de la puissance possible en KW
    - la température de l'eau
    - la transmissivité utilisée dans les calculs de débit en m^2/s
    - une estimation de la distance entre le forage de prélèvement et celui d'injection
    - une estimation des coûts d'un projet basé sur un doublet

Profondeurs du toit et du mur de l'aquifère

En fonction de la nappe et des données disponibles la géométrie de l'aquifère a été déterminée en utilisant plusieurs méthodes.

Les 2 nappes profondes du **Jurassique moyen et inférieur** ont été rassemblées dans un multicouche. Aussi, dans la grille, la profondeur du toit correspond à celle de l'aquifère du Dogger et la profondeur du mur à la base de l'aquifère de l'Infra-Toarcien. La géométrie introduite dans la grille est extraite de celle du modèle des aquifères du jurassique développé par le BRGM dans le cadre du Contrat de Plan 2000-2007 sous maitrise d'ouvrage du Conseil Régional. La construction de ce modèle a fait appel à toutes les données disponibles : logs des forages extraits de la Banque de données du Sous-Sol, documentations existantes, profils sismiques des pétroliers…

Toutefois, ce modèle s'arrête sur une limite sud-ouest correspondant à peu prés à une ligne Rochefort-Cognac. Au-delà, les données des forages profonds ou des projets de forages profonds (Saujon, Saintes) ont été exploitées et interpolées.

La base de la nappe superficielle du **Jurassique supérieur** qui, au regard des reconnaissances actuelles, disparaitrait lorsque le Jurassique s'enfonce sous le Crétacé ou sous le Bri (notamment dans le Marais Poitevin), a été calculée principalement en regardant la profondeur des très nombreux forages agricoles qui captent la nappe. En effet, l'altération et la fracturation tendent à disparaître avec la profondeur et la base de la nappe est marquée par un niveau massif, imperméable, caractérisé par une couleur bleu traduisant l'absence de circulation d'eau. Ce niveau caractéristique est connu des foreurs sous l'appellation « banc bleu ». La plupart des forages s'arrêtent dans ce banc et statistiquement la profondeur des ouvrages est un bon indicateur de l'épaisseur de la nappe.

Toutefois cette approche par interpolation des profondeurs de forages a été modulée pour tenir compte des particularités lithologiques de certains niveaux de la série carbonatée. Ainsi aux profondeurs correspondant aux termes plus franchement calcaires (les calcaires d'Aytré et récifs du Kimméridgien, les calcaires à ammonites du Kimméridgien supérieur, les calcaires oolithiques ou bioclastiques du Tithonien) a été ajoutée 5 m. En revanche, aux profondeurs des marnes à Nannogyra a été retranché 5 m. Les valeurs de la grille ont ensuite été seuillées[2] à 5 m pour les valeurs les plus faibles et à 50 m pour les profondeurs les plus élevées.

Pour les **3 aquifères du Crétacé supérieur** la géométrie du modèle du Crétacé des Charentes, autre modèle développé parallèlement dans le cadre du Contrat de Plan 2000-2007, a été utilisée. Cette géométrie est basée sur l'interprétation de plus de 400 forages dans le Crétacé, des données de géométrie figurant dans la littérature, des profils géophysiques des pétroliers.

[2] C'est-à-dire que les valeurs au-delà du seuil, au-dessous pour le seuil bas et au-dessus pour le seuil haut, ont été ramenées à la valeur du seuil correspondant.

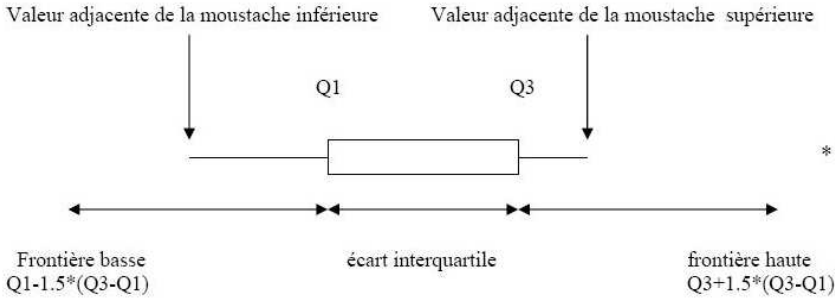
Calcul des débits possibles

La notion de débit potentiel est difficile à appréhender. Elle dépend de la productivité locale du forage, à commencer par les caractéristiques de l'ouvrage (diamètre, profondeur, équipement, pertes de charge…), et des possibilités intrinsèques de l'aquifère, c'est-à-dire les prélèvements que peut supporter la ressource en eau souterraine pour que l'impact soit raisonnable et réversible. La puissance de la pompe installée donne une idée sur la productivité locale mais on a souvent peu d'éléments pour apprécier réellement le potentiel de l'aquifère, surtout si l'on tient compte du cumul des prélèvements. Le renseignement de la grille vis-à-vis de ce paramètre a été réalisé en utilisant et en croisant plusieurs sources de données :

- la puissance des pompes installées, notamment sur les ouvrages agricoles, information provenant du croisement des données de la DDAF et du fichier de la Banque de données du Sous-Sol (plus de 3 350 données),
- les pompages d'essai longue durée réalisés sur certains ouvrages et disponibles dans les comptes-rendus d'études,
- les résultats fournis par les 2 modèles régionaux après calage en transitoire,
- le contexte hydrogéologique : lithologie du réservoir, nappe profonde ou superficielle, captive ou libre…

En préalable une première analyse a été faite sur les débits des pompes installées dans les forages en utilisant notamment la méthode de la « boîte à moustaches de Tukey »[3], ce qui a permis de mieux cerner la distribution des débits (cf. ill. 16).

[3] Cette méthode définie par Tukey permet de représenter schématiquement une distribution statistique de manière notamment à repérer les points extrêmes ou aberrants. Le premier quartile (25% des effectifs) correspond au trait inférieur de la boîte, la médiane est représentée par un trait vertical à l'intérieur de la boîte, le troisième quartile (75%) correspond au trait supérieur de la boîte, la valeur moyenne est représentée par une croix rouge, les 2 « moustaches » inférieure et supérieure correspondent respectivement à la valeur minimum dans les données qui est supérieur à la borne frontière basse égale au premier quartile moins 1.5 fois l'écart interquartile (Q3-Q1) et à la valeur maximum dans les données qui est inférieur à la borne égale au troisième quartile plus 1.5 fois l'écart interquartile. Les valeurs à l'extérieur de l'espace entre les 2 moustaches sont représentées.



	Nb de points	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moustache sup.
Jurassique moyen	19	10	29	50	70	125	132
Jurassique sup.	1632	5	25	40	50	150	88
Cénomanien	763	5	30	40	55	250	93
Turonien/Coniacien	581	5	30	40	60	300	105
Crétacé terminal	358	5	25	35	45	120	75

Tableau 2 : Statistiques des données de débit par niveau aquifère.

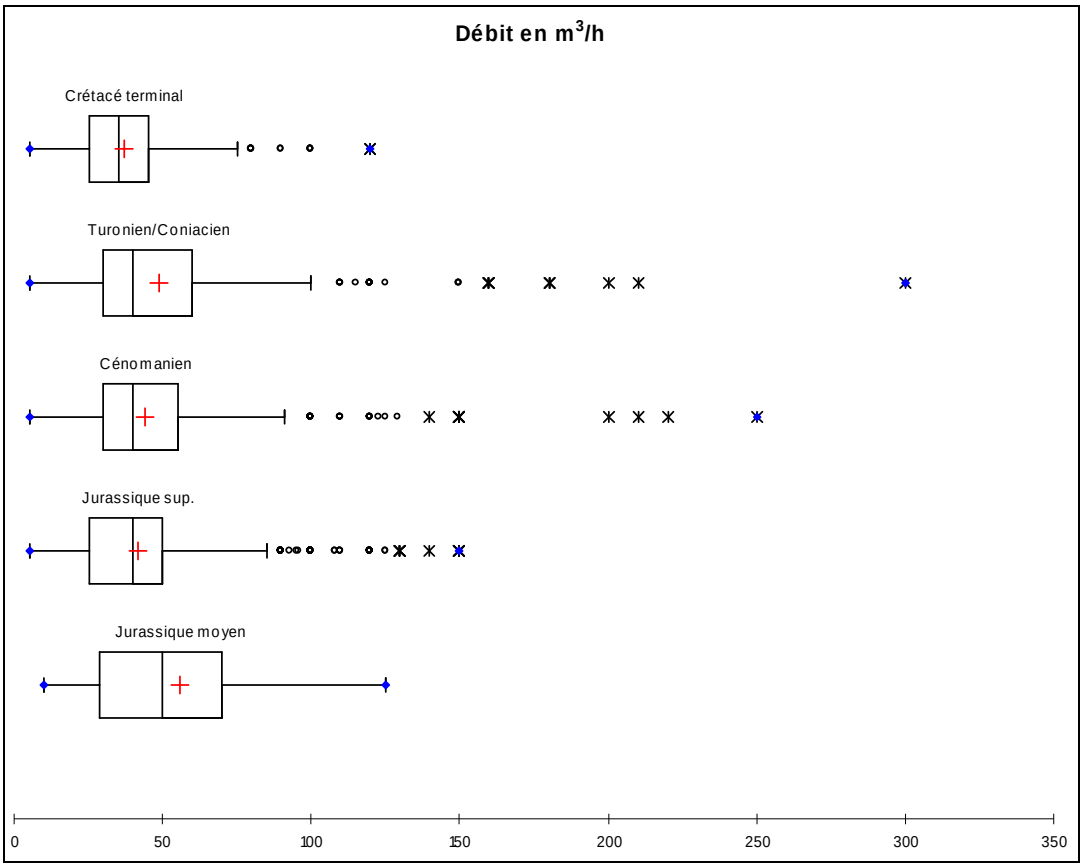


Illustration 16 : Représentation des débits en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustache de Tukey

L'interpolation cartographique des puissances des pompes installées dans les forages n'a cependant pas toujours pu donner des résultats réellement exploitables compte tenu des effets « pépites » liés à la répartition des points et aux conditions locales.

L'estimation des débits a *in fine* été réalisée par aquifère.

Pour l'aquifère profond du **Dogger et de l'Infra-Toarcien** les données sont relativement rares (peu de forages). L'étude des résultats des pompages d'essai longue durée et l'impact constaté sur la nappe autour des forages fonctionnant depuis plusieurs années (tableau 4) ont conduit à considérer un débit uniforme possible pour le multicouche Dogger/Infra-Toarcien de 20 m^3/h, sachant que cette nappe profonde est difficilement alimentée et que tout prélèvement a un impact important. Le recours à des doublets avec réinjection devrait toutefois limiter l'impact sur les niveaux piézométriques.

Pour l'aquifère superficiel du **Jurassique supérieur**, l'interpolation des débits des pompes installées a été utilisée, compte tenu du grand nombre de forages dans cette nappe. Comme pour les profondeurs, les valeurs de débit ainsi calculées et rentrées dans la grille ont été modulées en fonction de la lithologie :

- 10 m^3/h ont été ajoutés sur les valeurs correspondant aux calcaires d'Aytré, aux calcaires à Orthospidoceras (ammonites), au Tithonien inférieur et moyen,

- 10 m^3/h ont été retranchées aux valeurs de la grille correspondant aux marnes à Nannogyra.

Les valeurs de la grille ont ensuite été « seuillées » à 10 m^3/h pour les valeurs les plus basses et à 120 m^3/h pour les valeurs hautes.

Dans la moitié sud du département, pour les nappes du **Cénomanien**, du **Turonien-Coniacien**, du **Campano-Maastrichtien**, ce sont les données du modèle, jugées plus représentatives, qui ont été utilisées. En effet le calage d'un modèle hydrogéologique conduit à des champs de perméabilités, donc de transmissivités. Le modèle du Crétacé Charentes, ici utilisé, a été calé sur 2000-2005 à un pas de temps mensuel et reproduit assez fidèlement la piézométrie des aquifères.

Dans chaque maille de la grille, une valeur de transmissivité a été intégrée pour chaque nappe à partir du champ des perméabilités du modèle. Ensuite la formule approchée de Jacob[4] a été utilisée pour calculer une estimation de débit en différenciant les parties libres et captives de chaque aquifère. La valeur calculée correspond au débit de pompage créant un rabattement de 10 m dans un forage de 0.2 m de diamètre au bout d'un an d'exploitation. Les formules et paramètres utilisées sont les suivants :

[4] **$\Delta = Q/4\pi T \log(2.2459Tt/r^2S)$** avec

Δ rabattement en m ici pris égal à 10 m
Q débit en m^3/h
T transmissivité en m^2/s
t temps en s ici égal à 1 an
r rayon d'observation ici égal à 0.2 m
S emmagasinement

- en nappe libre Q = (3600 x 125.6T)/(10.54 + log(T)) avec S = 0.05
- en nappe captive : Q = (3600 x 125.6T)/(13.24 + log(T)) avec S = 10^{-4}

Toutefois, au regard des valeurs obtenues et afin de tenir compte de la grande épaisseur du réservoir du Turonien-Coniacien, la transmissivité de cet aquifère a été divisée par 10.

Pour les 3 aquifères du Crétacé, les valeurs obtenues ont ensuite été « seuillées » à 20 m^3/h pour les valeurs les plus basses et à 100 m^3/h pour les valeurs les plus élevées.

Il convient surtout de retenir de cette approche, qui intègre de nombreuses incertitudes et approximations, les valeurs relatives mettant en évidence des zones plus productives que d'autres. Sur les cartes, la répartition des valeurs de la grille est confrontée aux valeurs ponctuelles découlant de l'exploitation des pompages d'essai récupérés dans les différentes sources de données (BSS, rapports…).

Nappe	Débit nappe libre	Débit nappe captive
Dogger/Infra-Toarcien		20 m^3/h
Jurassique supérieur	Interpolation des débits des pompes installées modulée par la lithologie du réservoir, puis « seuillage » à 10 et 120 m^3/h	
Cénomanien	Q=(3600 x 125.6T)/(10.54 + log(T)) avec S = 0.05 Puis « seuillage » à 10 et 100 m^3/h	Q=(3600 x 125.6T)/(13.24 + log(T)) avec S = 10^{-4} Puis « seuillage » à 10 et 100 m^3/h
Turonien-Coniacien	Q=(360 x 125.6T)/(10.54 + log(T)) avec S = 0.05 Puis « seuillage » à 10 et 100 m^3/h	Q=(360 x 125.6T)/(13.24 + log(T)) avec S = 10^{-4} Puis « seuillage » à 10 et 100 m^3/h
Campano-Maastrichtien	Q=(3600 x 125.6T)/(10.54 + log(T)) avec S = 0.05 Puis « seuillage » à 10 et 100 m^3/h	Q=(3600 x 125.6T)/(13.24 + log(T)) avec S = 10^{-4} Puis « seuillage » à 10 et 100 m^3/h

Tableau 3 : Synthèse des calculs des débits de la grille pour chaque nappe

Commune, lieu dit	Numéro BSS	X	Y	Z	Date forage	Profond. forage	Aquifère Exploité	Profond. aq.	Niveau piezom.	Profond. eau	débit	Temp.	Lithologie aq.	Resistivité	Transmis.	Porosité	Références	Remarques
Chantemerle sur la soie, Herisson	06596X0009	370160	2112000	54,9	1983	776 m	*Pliensbachien*	De 732 à 810 m		16,70 m	10,5 m^3/h (et 30 m^3/h lors de l'essai de pompage à 777m)	34,5°	Dolomie, calcaire	248 ohms (à 20℃)				Trou nu de 115 à 822 m (les essais de pompages ont montrés un débit d'environ 30 m^3/h pour une température de 40 ℃)
Jonzac, Forage GJNC 1	07318X0027	383710	2351710	35	1980	1872 m	*Trias*	1670 à 1860 m	- 9 m NGF		25 m^3/h	62,5 °	Alternance argile rouge, de grès fin et grossier, de sable et de dolomie.	105,7 Ohms (à 20℃)		10,60%	Rapport BRGM 82SGN162POC	Estimation 17,25 Mwh/an, rejet dans la rivière Seugne par l'intermédiaire d'une lagune calculée pour stocker la production du forage pendant les étiages les plus importants
La Rochelle, Forage GLRL 1, Chasseloup-Laubat	06338X0021	330650	2135600	8,92	1984	403 m	*Bajocien/Bathonien (Dogger)*	354 à 403 m	+ 2,94 m NGF		125 m^3/h (au niveau de l'aquifère) et titre de demande fait pour 35 m^3/h	28 °	Calcaire blanc à ponctuation grise avec "un banc pourri" entre 380 et 382 m.	145 Ohms (à 20℃)	6,3.10^{-4} m^2/s		Rapports BRGM 84SPG01,	Trou nu de 354 à 403 m, rejet en mer via le ruisseau Lafont après passage sur l'échangeur thermique
Rochefort, Hôpital maritime	06856X0523	344090	2110370	17	1861	856,70 m	*Trias inf.*	815 m		10 m	10 m^3/h	40,60 °	Alternance calcaire bigarré et grés					Forage bouché par cristallisation de sulfate de chaux. Bouché depuis 1886 par outil cassé.
Rochefort, source l'empereur, Porte Bégon	06586X0524	344400	2110090	13,02	1953	854,50 m	*Trias inf.*		24,17 m NGF	12 m	14,5 m^3/h	42,2°	Alternance calcaire bigarré et grés	175 ohms (à 20℃)				Exploitation eau thermale. Possibilité d'exploiter le forage thermal à 36 m^3/h
Saint Agnant	06822X0014	344060	2101980	16	1980	85 m	*Cénomanien (crétacé basal)*	34 à 83 m	8 m NGF	87 m	32,5 m^3/h	15,6 °à 21,9 °	calcaire graveleux, argiles, et sables quartzeux	1395 ohms				Eau fortement minéralisée, dure, pauvre en oxygène riche en bactéries de type mésophiles (E. Coli) et présentant une charge en anhydrite assez élevée. Crépine de 34 à 40 m, de 64 à 70 m, et crépine Johnson de 70 à 83 m
Saint George de Didonne, Suzac.	07066X0017	340560	2070080	13	1980	44 m	*Maastrichtien*	16 à 44 m (28 m utile)	12,2 m NGF	12,2 m	40 m^3/h env.	13,7 °	calcaire avec alternance de marnes gris bleu	92 ohms (à 20℃)				Rejet directement dans la mer ou par un épandage dans le site prévus pour la récupération des eaux pluviales
Saint George de Didonne, Suzac.	07066X0019	340550	2070100	12	1980	15 m	*Maastrichtien*	3 à 15 m	11,70 m NGF	11,7 m		13,7 °	marnes et calcaire argilo-crayeux					
Saint Romain de benêt, lieu dit du "Griffarin"	07063X0019	350650	2081100	20	1981	43 m	*Cénomanien*	31 à 43 m	niveau statique à 4,87 m NGF	4,90 m	Débit d'exhaure de 2,5 m^3/h, débit spécifique de 5 m^3/h/m	13,9	calcaire avec alternance de calcaire gréseux et de marnes entre 36 et 38 m	510 µohms ou 1960 ohms				Crépine de 31 à 43 m, réinjection dans puits à 20 m du forage.
Saint Clément des Baleines - Ile de Ré	06324X0004	302175	2144125	3	1987	591 m	*Dogger Lias*	440 m dont 20 m d'utile	6 m NGF	12,70 m	Débit naturel 10 à 15 m^3/h. Débit de pompage : sup à 100 m^3/h,	30 °	calcaire et marnes (calcaire argileux et argiles vertes)	100 ohms/cm		5%	Rapport BRGM 85SGN587POC	Rejets dans le chenal de "Batardeau"
Bree-les-bains, Ferme marine de Douhet	06572X0003	316450	2117920	3	1984	56,5 m	*Tithonien*	4 à 44,00m		3m en hivers	25 m^3/h	34,5°	calcaires marneux à faciès purbeckien					
Cramchaban	06344X0118	362950	2141700	8	2006	15 m	*Oxfordien sup.*	0 à 15 m		4,5 m en été	Débit horaire escompté 4 m^3/h		calcaires					Crépine entre 11 et 15 m
Messeux	06814X0019	333180	2097520	17	1985	52 m	*Cénomanien inf.*	31 à 52 m		18 m	Capacité max de prod. : 22,5 m^3/h mais prélèvement à 15 m^3/h		sable					Crépine de 31 à 52 m
Saint Pierre D'amilly, Le Magneraud	06355X0012	365850	2132380	60	1986	25 m	*Kimméridgien inf.(U 4)*			En été : 14 m et 10 m en hivers	Débit aux essais 23 m^3/h. Débit d'exploitation 12 m^3/h		Calcaire					

Saint-Soulle	06341X0087	341566	2137134	37,5	2007	80 m											
Saintes, Quartier Bellevue, Forage GSNS 1		367740	2089670	38		1320 m	*Lias et Trias*	1300 m	+ 10 à 30 m		50 m^3/h	50	Calcaire dolomitisé et grès		$1,10^{-4}$ m^2/s		Rapport BRGM 81SGN876POC	Projet
Saujon		346800	208070	4		1340 ± 110 m	*Lias et Trias*	1300 m	+ 10 à 30 m		50 m^3/h	50	Calcaire dolomitisé et grès				Rapport BRGM 82SGN551POC	Projet
Saujon, Etablissement thermal	07062X0021	346190	2080170	3,3	1985	69 m	*Turonien*	44,5 à 48 m	- 0,7 m NGF		37 m^3/h	14 °	Calcaires fracturés	385 ohms				Risques de dépôts
St sauveur d'aunis .	06343X0087	351401	2140050	14	2005	45 m	*U 2 (Oxfordien)*				10 à 30 m^3/h (Estimation)	13,5° (Estimation)	marnes et calcaires argileux					Nécessite de prévoir un deuxième puits pour l'injection (absence de réseau pluvial), Géothermie basse température pour raccordement de 30 à 100 équivalents logements, débit de 50 m^3/h pour 150 équi. logements dans zones plus productives

Tableau 4 : Caractéristiques des principaux forages géothermiques de Charente-Maritime.

Estimation de la puissance possible

Le calcul de la puissance possible est basé sur l'utilisation d'une Pompe A Chaleur eau utilisée en mode chauffage si la température de la nappe est inférieure à 65 °C et sur un échangeur eau chaude si la température est supérieure à 65 °C.

Le calcul de la puissance s'appuie sur la formule suivante :

P(kw) = (Q(m^3/h) x dt x 1.16) / (1-1/COP)

Soit pour une COP[5] de 3.3, valeur habituellement considérée et ici utilisée dans les calculs :

P(kw) = Q(m^3/h) x dt x 1.66

Pour calculer la puissance introduite dans chaque maille de la grille et pour chaque aquifère, un dt (différence entre la température de l'eau prélevée et la température de l'eau rejetée) variable a été utilisé en fonction de la température de la nappe. En effet plus cette dernière est élevée plus le différentiel thermique peut être élevé. Ces températures de prélèvement et de rejet ayant servies aux calculs ont été introduites dans la grille. Le tableau ci-dessous résume la méthode suivie pour le calcul de la puissance possible.

[5]. Le COEFFICIENT DE PERFORMANCE (COP) correspond à la puissance thermique fournie, divisée par la puissance absorbée par le dispositif.

Sur une installation, on peut définir plusieurs types de COP :

- ***Le COP de la pompe à chaleur***
  C'est la quantité de chaleur fournie par la PAC divisée par la quantité d'énergie électrique consommée. Cette valeur est définie dans des conditions de référence de la machine (température du milieu extérieur et température fournie au système de chauffage par exemple).
- ***Le COP de l'installation***
  C'est la chaleur fournie par la PAC divisée par la quantité d'énergie électrique consommée par l'ensemble du dispositif (incluant généralement les pompes de circulation de l'eau dans le système de distribution de chauffage - idem dans le cas d'une chaudière - et de circulation du fluide dans le système d'échange extérieur), dans les conditions nominales de fonctionnement.
- ***Le COP annuel de l'installation***
  C'est le bilan global de l'énergie thermique fournie divisé par l'énergie consommée, calculé sur une année complète de fonctionnement. Par exemple, une pompe à chaleur consomme 1 kWh d'électricité pour fournir 4 kWh de chaleur : on dira qu'elle possède un COP de 4.

Solution géothermique	**Température de la nappe**	**dt**	**Equation utilisée**
PAC	< 20℃	6℃	P(kw) = Q(m^3/h) x dt x 1.66
	< 30℃	8℃	
	< 40℃	10℃	
	< 50℃	12℃	
	< 65℃	15℃	
Echangeur	≥ 65℃	20℃	P(kw) = Q(m^3/h) x dt x 1.16

Tableau 5 : Bases de calcul de la puissance possible

Estimation de la distance entre le forage de prélèvement et le forage de réinjection

Dans le cadre de la réinjection de l'eau « froide » après utilisation géothermique, il convient de respecter une certaine distance par rapport au forage producteur car la réinjection va diminuer localement la température de la nappe. L'impact thermique de la réinjection dépend de plusieurs facteurs en particulier : de la porosité de la roche, de l'épaisseur productive de la nappe, de la durée de l'exploitation et du débit, du gradient de la nappe et des caractéristiques thermiques des roches.

Le tableau 6 ci-dessous résume les valeurs utilisées en fonction des débits d'exploitation. Pour les calculs, une durée de pompage de 6 mois par an a été utilisée sauf pour la nappe du Dogger/Infra-Toarcien ou un fonctionnement continu a été considéré (chauffage l'hiver et climatisation l'été). Le tableau fournit une valeur optimale théorique pour une influence maximale de 1°C mais ne prend pas en compte la vitesse d'écoulement de la nappe. Si la nappe s'écoule de façon sensible, on peut corriger cette distance en fonction de la position de l'injection par rapport au forage de production. Le calcul de la distance entre les 2 forages dans les mailles de la grille est donc basé sur un ouvrage d'injection à l'aval nappe du forage de production, et sur un gradient de la nappe faible. Ce calcul est indicatif et devra être précisé lors de l'étude préalable au projet.

Pour la nappe du Dogger/Infra-Toarcien, le débit possible ayant été fixé à 20 m^3/h la distance entre les forages est homogène dans la grille et égale à 400 m.

Nappe	Epais-seur	Porosité	< 25 m^3/h	< 50 m^3/h	< 100 m^3/h	< 150 m^3/h
Dogger/Infra-Toarcien	70 m	1 %	410	580	820	1000
Jurassique supérieur	20 m	0.5 %	100	140	200	250
Cénomanien	50 m	5 %	60	90	130	160
Turonien-Coniacien	100 m	5 %	45	65	90	110
Campano-Maastrichtien	30 m	5 %	85	120	170	205

Tableau 6 : valeurs utilisées pour remplir la grille pour la distance entre les forages de production et d'injection (sur fond gris les valeurs non utilisées figurant pour information)

Estimation des coûts d'un projet de doublet géothermique

Dans le coût d'un projet géothermique il faut considérer la part relative à l'investissement de celle du fonctionnement.

Dans l'investissement il faut inclure :

- La réalisation des 2 forages[6] : foration et tubage globalement estimée à 1 000 € le mètre linéaire, diagraphies (de l'ordre de 1€/ml), pompage d'essai (de l'ordre de 3 000 € en moyenne), maitrise d'œuvre du Bureau d'Etudes…
- L'équipement d'exploitation de la boucle géothermale : pompes de prélèvement et d'injection, colonne d'exhaure et conduites en surface (les coûts sont liés aux distances et à l'occupation du sol), pause…

La grille ne prend en compte que ces coûts d'investissement et considère un projet réalisé dans les règles de l'art (notamment en matière de réalisation des ouvrages, tubages, pompages d'essai, avec encadrement par un maître d'œuvre).

Après consultation de foreurs locaux et analyse des retours d'expériences (notamment dans le Bassin de Paris), il a été choisi de retenir un coût moyen de **1 200 € par mètre linéaire** foré. A l'exception de la nappe du Jurassique supérieur, pour laquelle un coût uniforme de 50 K€ a été retenu, l'évaluation du coût d'un projet pour chaque maille de la grille est basée sur la profondeur de la base de la nappe multipliée par 2 (pour 2 forages), multipliée par 1 200 €. Bien entendu, cette estimation, comme pour les autres paramètres, est indicative et devra être affinée dans l'étude de faisabilité.

A titre d'information les coûts de maintenance correspondent à :

- Consommation électrique (pompage et injection) et inhibiteurs : le coût moyen est situé entre 2 000 et 4 000 € pour 3 000 h de fonctionnement par an ;
- Petits entretiens, suivi règlementaire (analyses de la qualité des eaux, suivi des pompages et des niveaux…) ;
- Gros entretiens, notamment le renouvellement des pompes tous les 5 à 10 ans en moyenne ;

[6] La réalisation d'un doublet avec forage de production et forage de réinjection est systématiquement préconisée dans la mesure où les eaux souterraines sont dans le département de la Charente-Maritime déjà fortement sollicitées par l'agriculture et l'Alimentation en eau Potable. L'impact de ces prélèvements est déjà important et un projet (qui nécessitera une étude d'incidence) basé sur un seul forage de prélèvement aurait peu de chance de recevoir l'aval des gestionnaires actuellement.

3.3.2. Cartes du Dogger/Infra-Toarcien

Cette nappe est profonde en Charente Maritime et son alimentation est à rechercher principalement sur les marges du Bassin Aquitain, notamment vers le Nord, en Vendée en bordure du marais Poitevin et dans le secteur de Niort. Elle est recouverte par les marno-calcaires du Jurassique supérieur qui forment une éponte peu perméable. Bien sûr des transferts verticaux sont possibles, à la faveur en particulier des réseaux de fractures, mais sont vraisemblablement marginaux en volume et, compte tenu des piézométries mesurées, seraient plutôt remontant.

La **Planche 2** présente la profondeur de la base de l'aquifère, c'est-à-dire la base de l'Infra-Toarcien. Cette base est située à des profondeurs de l'ordre de 200 m sous le Marais Poitevin, où la nappe est exploitée par quelques forages, et à des profondeurs supérieures à 1800 m dans l'extrémité sud du département. Dans cette partie, l'aquifère est connu à travers les forages de Jonzac et les forages pétroliers. Sur la carte, la profondeur des forages recensés est reportée avec indication de la nappe captée. Sont reportés aussi les 2 projets géothermiques de Saintes et de Saujon qui n'ont pas été suivis d'une réalisation.

La coupe géologique schématique figurant sur la carte montre la structure profonde de l'aquifère liée à un effondrement progressif du socle dans la direction du Sud-Ouest sous l'effet de failles orientées principalement NO-SE. Dans la partie sud du département (c'est le cas à Jonzac) le Trias salifère est présent sous le Lias et est englobé dans l'aquifère géothermique.

La **Planche 3** représente les températures maximales de la nappe basées sur un gradient géothermique de 3°C pour 100 m de profondeur en considérant la base de l'aquifère. Dans la partie sud du département les températures dépassent 60 °C et des projets basés sur l'utilisation d'échangeurs thermiques peuvent y être envisagés. Sur la carte, les valeurs moyennes des températures et des conductivités mesurées sur les forages profonds ont été reportées. Dans cet aquifère la conductivité est très élevée, de plusieurs µS/cm, témoignant d'une part d'un faible renouvellement de la nappe et d'autre part du caractère minéralisé du réservoir.

A partir d'un débit uniforme de 20 m^3/h introduit dans la grille et de la cartographie des températures on déduit la carte de la **Planche 4** de la puissance possible. Pour les forages disposant d'informations, le débit d'exploitation et la piézométrie (en cote NGF) à l'origine de l'ouvrage sont reportés. Enfin, se surimpose une piézométrie moyenne (en NGF) réalisée à partir des données actuelles.

Cette piézométrie permet d'identifier les sens d'écoulement de la nappe, globalement Est-Ouest avec un impact non négligeable des forages géothermiques profonds en exploitation depuis longtemps : Rochefort, La Rochelle, Jonzac. Dans ces secteurs les piézométries actuelles en statique (forage au repos) sont nettement inférieures au 0 m NGF (niveau de la mer) alors qu'elles étaient nettement positives avant la création des ouvrages. Cet impact non négligeable argumente en faveur des doublets géothermiques dans cette nappe.

3.3.3. Cartes du Jurassique supérieur

Cette nappe superficielle d'altération des épaisses séries marno-calcaires du Jurassique supérieur concerne la partie nord du département de la Charente-Maritime, les îles et la périphérie du marais de Brouage. Elle est en relation étroite avec les rivières comme le montre la coupe schématique de la **Planche 5**.

La géométrie de la nappe présentée sur la Planche 5 s'appui principalement sur l'interpolation des profondeurs des forages dans la mesure où le repère de la base de la nappe que constitue le « banc bleu » est bien connu des foreurs. D'une manière générale, la profondeur de la nappe est maximale dans les vallées (jusqu'à plus de 50 m de profondeur) et plus faible sur les reliefs. Toutefois, dans les niveaux plus calcaires, l'altération superficielle est plus développée, inversement pour les niveaux plus marneux et argileux. Au Nord de St-Jean-d'Angély, les marnes et calcaires argileux à Exogyres se distinguent notamment pour cette raison.

Le Tithonien inférieur et moyen du bassin de l'Antenne dans la région de Matha se distingue aussi par son caractère nettement plus aquifère. L'aquifère correspondant à ces niveaux s'enfonce et devient captif sous les marnes et calcaires argileux à gypses (faciès Purbeckien) du Tithonien supérieur.

Sous les marais, les ressources en eau du Jurassique supérieur sont assez peu reconnues. En général, les capacités aquifères sont peu développées et on y trouve des eaux salées confinées.

Cette nappe est très exploitée pour l'agriculture et de moins en moins pour l'Alimentation en Eau Potable du fait de la dégradation de sa qualité, cette nappe étant très vulnérable. Les forages recensés sont positionnés sur la carte avec indication de leur profondeur.

La carte des débits possibles, correspondant à la **Planche 6**, est basée sur l'interpolation de la puissance des pompes installées. Cette interpolation a cependant été modulée par la lithologie, puis par un seuillage pour les valeurs les plus élevées et les plus basses. La piézométrie moyenne présentée sur la carte est issue de plusieurs travaux du BRGM : piézométrie de la nappe du Tithonien [R50172], piézométrie du bassin de la Boutonne [RP-52454-FR], piézométrie de la nappe de l'Aunis [R40901].

Les écoulements des eaux souterraines sont en général conforment à la topographie et montrent un drainage par les rivières. Toutefois, en été, du fait de l'exploitation de l'aquifère, ces échanges avec les rivières peuvent s'inverser.

Un grand nombre de piézomètres du réseau régional permettent de suivre quantitativement cette nappe. Ces piézomètres sont reportés sur la carte. Les chroniques présentées montrent les cycles annuels de battement de la nappe avec des recharges hivernales et des vidanges estivales conduisant à des étiages le plus souvent en octobre.

Du fait de la faible profondeur de la nappe, la température de l'eau rentrée dans la grille est uniforme et égale à 13 °C. Le calcul des puissances possibles est basé sur

des Pompes A Chaleurs (PAC) avec des températures de rejet des eaux situées autour de 7°C (Δt = 6°C). La cartographie de ces puissances se calque donc sur celle des débits possibles.

Compte tenu des nombreuses analyses disponibles sur les forages, la cartographie de la conductivité est présentée sur la **Planche 7**. Celle-ci fait apparaître la salinité élevée des eaux en bordure du littoral et sur les îles, ce qui peut porter préjudice à une exploitation géothermique (cf. chapitre suivant). En dehors de ces zones littorales la conductivité est assez homogène variant entre 600 et 800 µS/cm.

3.3.4. Cartes du Cénomanien

Le Cénomanien est marqué par le retour de la mer sur un domaine continental qu'elle avait abandonné à la fin du Jurassique. Il correspond globalement à un cycle transgressif avec des faciès variés comme le souligne le log géologique de la **Planche 8**. La base de l'aquifère correspond à des faciès sableux et argileux reposant en discordance sur le Jurassique supérieur. On ne connaît pas dans ce Jurassique supérieur sous couverture de nappes importantes et le Cénomanien serait donc bien isolé de l'aquifère profond du Jurassique moyen et inférieur.

La partie inférieure de l'aquifère du Cénomanien, à laquelle on peut adjoindre les sables du cœur de l'anticlinal de Jonzac, attribués à « l'Infra-Cénomanien » par défaut de datation plus précise, correspond principalement à des sables et à des calcaires gréseux et bioclastiques. La partie supérieure est plus franchement calcaire. L'ensemble forme un réservoir assez capacitif et localement très productif. Le Cénomanien supérieur et le Turonien inférieur sont en grande partie formés par des marnes et calcaires argileux qui constituent l'éponte imperméable de la nappe.

Les grands plis (cf. coupe géologique), dus à la création de la chaîne des Pyrénées au Sud et qui structurent le Crétacé supérieur, déterminent la profondeur de l'aquifère. Celui-ci s'approfondi dans le synclinal de Saintes et vers le Sud-Ouest. Au Sud du département la base de l'aquifère est à plus de 700 m de profondeur.

Les forages agricoles et AEP (Alimentation en Eau Potable) sont principalement répartis dans les zones les moins profondes : le cœur de l'anticlinal de Jonzac et le flanc nord du synclinal de Saintes.

La cartographie de la productivité de l'aquifère (**Planche 9**) est basée (cf. chapitre précédent) sur l'exploitation des données du modèle hydrogéologique développé par le BRGM. Les zones où l'on a les plus fortes productivités, avec des débits pouvant atteindre 100 m^3/h, coïncident aussi avec les zones où l'on trouve les plus fortes concentrations de forages. La piézométrie récemment réalisée par le BRGM et figurant sur la carte souligne les relations complexes de la nappe avec les rivières dans les parties où le Cénomanien affleure : interconnections entre la nappe et la Seugne dans le secteur de Pons, contribution du Cénomanien au débit de la Seudre aval, contribution aux débits de la Charente sur le flanc nord du synclinal de Saintes…

Enfin 6 piézomètres du réseau régional permettent de suivre les niveaux de la nappe. Ils montrent tous des cycles annuels remplissage hivernal/vidange estival avec toutefois une inertie plus forte dans les parties captives. Les zones où la nappe est la plus profonde ne sont toutefois pas suivies, mais peu reconnues et peu exploitées. Dans ces zones difficilement réalimentées tout forage d'exploitation devrait avoir une incidence non négligeable, d'où là encore l'intérêt d'un doublet production/injection.

Calquée sur la carte des débits, la cartographie des puissances possibles de la **Planche 10** montre aussi le cœur de l'anticlinal de Jonzac et le flanc nord du synclinal de Saintes comme des zones à fort potentiel géothermique.

En ce qui concerne les températures, les valeurs les plus élevées, supérieures à 30°C, sont trouvées dans l'extrémité sud du département.

Selon les données disponibles, les valeurs de conductivité sont celles habituellement rencontrées en aquifère carbonaté à l'exception des zones littorales, des marais où la salinité de la nappe peut être élevée.

3.3.5. Cartes du Turonien-Coniacien

La nappe du Turonien moyen au Coniacien correspond à des dépôts de plate-formes carbonatées en marge de reliefs émergés situés vers l'Est comme le montre le bloc-diagramme schématique de la **Planche 11**. Les faciès les plus détritiques et bioclastiques forment les meilleures zones aquifères.

Comme pour l'aquifère du Cénomanien, les grandes structures conditionnent la profondeur de l'aquifère. Les forages d'exploitation se répartissent surtout dans les zones où l'aquifère est peu profond. Les forages profonds (300 à 500 m) sont en général exploités pour l'AEP car en zone captive la nappe présente une bonne qualité. Le toit de la nappe correspond en effet à une épaisse couverture marneuse (plusieurs centaines de mètres d'épaisseur), d'âge santonien à campanien, assurant une bonne protection.

Le Turonien-Coniacien correspond à l'aquifère le plus important et le plus productif du Sud des Charentes. Les débits possibles sont souvent supérieurs à 50 m^3/h comme le montre la **Planche 12**. Les zones les plus intéressantes, avec des débits de l'ordre de 100 m^3/h, sont rencontrés au cœur de l'anticlinal de Jonzac et le long de l'Estuaire où d'importantes sorties d'eau (sources) sont connues (et exploitées pour l'AEP), alimentant des zones humides. Ces sources en bordure de l'Estuaire sont en partie alimentées par les pertes de la Seudre dans le secteur de Virollet ce qui souligne le caractère karstique du réservoir. Inversement la piézométrie montre un drainage de la nappe du Turonien-Coniacien par la Seugne, entre Jonzac et Pons, et par la Charente au Nord.

Les températures de cette nappe peuvent atteindre 30°C dans l'extrémité sud du département. La cartographie du potentiel géothermique de la **Planche 13** croise le gradient géothermique avec la carte des débits. Il en ressort dans l'ensemble des puissances possibles élevées, souvent proches de 1 000 Kw. L'aquifère du Turonien-

Coniacien du fait de son épaisseur et de sa productivité constitue vraisemblablement la meilleure « cible » géothermique du département, alliant profondeur modérée et bon potentiel. Dans les zones les moins profondes, l'exploitation de la nappe a un impact sur le débit des cours d'eau. Dans les zones les plus profondes, du fait d'une alimentation qui se fait plus difficilement, l'exploitation de la nappe peut avoir un impact non négligeable sur son niveau piézométrique. Dans les 2 cas, le recours à la réinjection des eaux « froides » dans l'aquifère est donc là aussi recommandé.

3.3.6. Cartes du Campano-Maastrichtien

La nappe du Campano-Maastrichtien est en général assez peu épaisse mais correspond à des calcaires bioclastiques poreux qui peuvent fournir de bons débits. Cette nappe est toutefois confinée aux limites sud et ouest du département. Elle constitue en revanche un aquifère important en Gironde et dans l'Est de la Dordogne, notamment pour l'AEP. La profondeur de la base de l'aquifère (**Planche 14**) peut dépasser 200 m aux confins entre la Gironde et la Charente-Maritime, mais sur l'essentiel du territoire concerné de ce département elle reste accessible à moins de 100 m de profondeur.

Comme le montre la **Planche 15**, la productivité de la nappe est plutôt moyenne. Ces écoulements se font vers l'Estuaire, où des sorties d'eau de cette nappe ont été repérées par télédétection dans des travaux anciens de l'Université de Bordeaux. Au Sud, les écoulements se font vers les zones plus profondes de l'aquifère en Gironde. Enfin, le seul piézomètre qui permet de suivre cette nappe montre des cycles annuels de recharge hivernale et de vidange estivale.

Basée sur la productivité et sur la température, la cartographie du potentiel géothermique de la **Planche 16** montre des puissances possibles faibles à moyennes (moins de 100 à 500 Kw). Les eaux restent « froides », permettant des solutions géothermiques basées sur des PAC avec un différentiel thermique de l'ordre de 6°C, ce qui se traduit par des températures de rejet des eaux entre 7 à 10°C.

Il convient aussi de noter que cette nappe est en contact avec les terrains sablo-argileux de l'Eocène qui peuvent aussi apporter leur contribution aux débits de la nappe du Campano-Maastrichtien. Les valeurs plutôt faibles de conductivité trouvées dans les bases de données et reportées sur la carte suggèrent de telles contributions.

4. Etude des caractéristiques chimiques des eaux souterraines

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 pompes à chaleur. A ce titre, une analyse de la physico chimie des eaux a été entreprise afin de qualifier ces eaux sous l'aspect des phénomènes de dissolution-précipitation. La méthodologie utilisée comprend plusieurs étapes :

- ➔ recueil des données à partir des bases BSS et ADES
- ➔ analyse statistique des données
- ➔ choix d'un indice de stabilité chimique des eaux
- ➔ représentation statistique par aquifère de l'indice de stabilité
- ➔ traitements éventuels à prévoir.

4.1. RECUEIL DES DONNEES

Le croisement des données issues de la BSS et de la base 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. 5 paramètres ont été sélectionnés pour leur récurrence dans les analyses physico-chimiques et pour leur influence sur le pouvoir corrosif et/ou entartrant des eaux :

- Titre hydrométrique (TH)
- Titre alcalimétrique complet (TAC)
- pH
- Teneurs en chlorure
- Teneurs en fer

Un échantillon de 138 points à ainsi été retenu pour la caractérisation chimique de chaque aquifère (hormis l'aquifère du Jurassique inférieur et moyen en raison du faible nombre d'analyses disponibles) en fonction des 5 paramètres physico-chimiques précédents. Là encore un traitement statistique a été réalisé afin de représenter schématiquement les distributions des différents paramètres pour chaque aquifère.

4.2. STATISTIQUES SUR LES VALEURS DE TITRE HYDROMETRIQUE

Le titre hydrométrique (TH), ou dureté de l'eau, est une mesure de la concentration en ions alcalin terreux, calcium et magnésium essentiellement. Il traduit le pouvoir entartrant de l'eau. Ainsi 1°F de TH correspond à une concentration de 10 mg/l de carbonate de calcium. On peut donc 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.

Les eaux du Turonien/Coniacien, du Cénomanien et du Jurassique supérieur présentent des valeurs relativement élevée de TH (ill. 17), d'où la nécessité de prévoir des traitements pour lutter contre l'entartrage afin de préserver la pérennité des installations géothermiques. Les valeurs dans le Crétacé terminal (Campano-maastrichtien) sont plus étalées, traduisant vraisemblablement l'influence d'eau venant de l'aquifère de l'Eocène

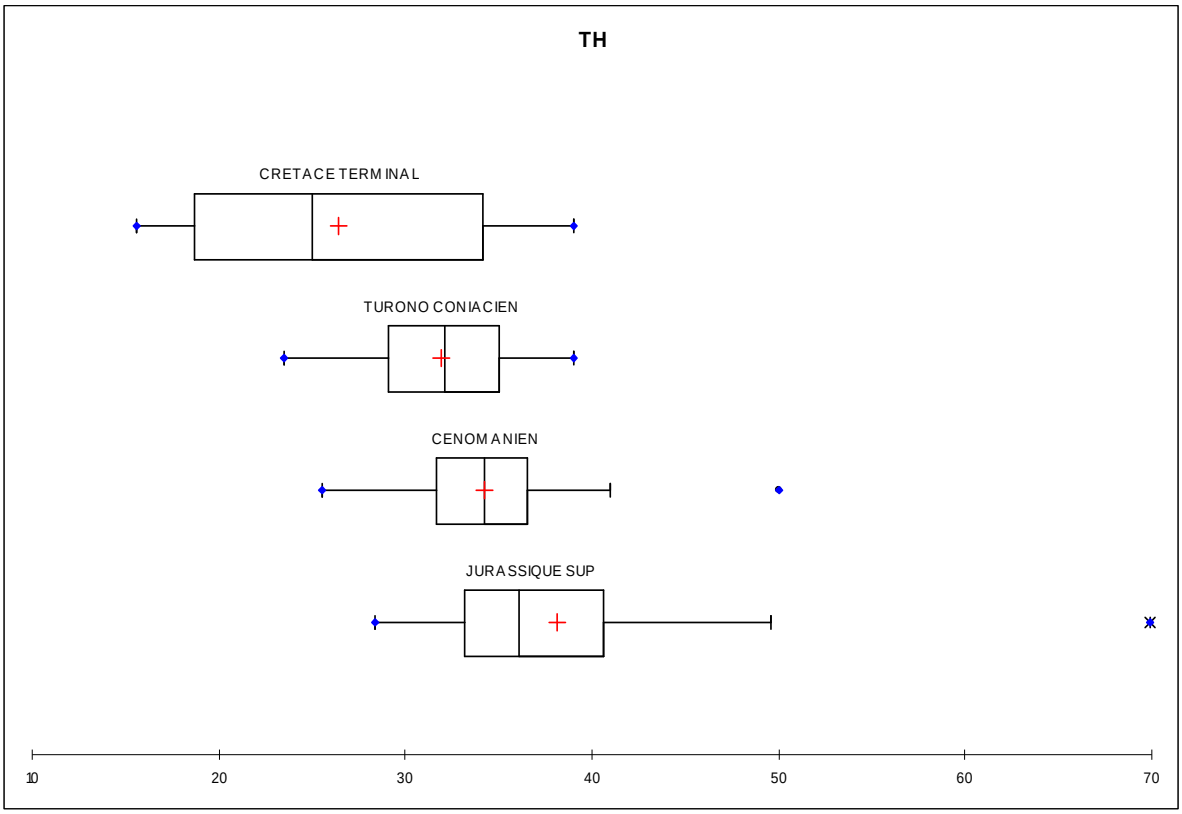


Illustration 17 : Représentation du Titre Hydrométrique (TH) en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey (cf. explication p. 44)

4.3. STATISTIQUES SUR LES VALEURS DE TAC

Le Titre Alcalimétrique complet (TAC) est une mesure de l'alcalinité de l'eau (carbonates alcalins, hydrogénocarbonates 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, plus il est difficile de faire varier le pH de l'eau. Ainsi, les alcalinites assurent la protection des métaux contre la corrosion, et donc en conséquence une trop faible alcalinité entraîne la dégradation des installations géothermiques.

Dans l'ensemble, les eaux issues des aquifère de la Charente-Maritime montrent des valeurs assez élevée de TAC. Les valeurs les plus faibles sont rencontrées dans l'aquifère du Crétacé terminal (pour les mêmes raisons que le TH). Par conséquent, les forages implantés dans cet aquifère seront plus sensibles aux phénomènes de corrosion.

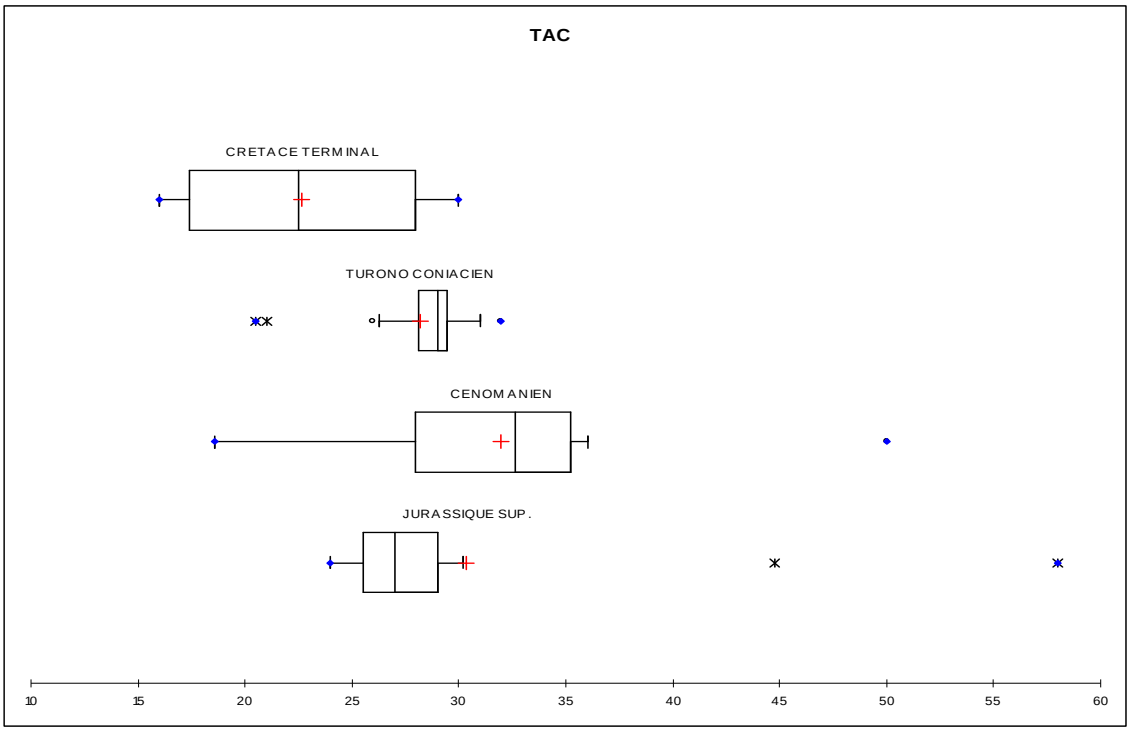


Illustration 18 : Représentation du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey

4.4. 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. Le pH des eaux d'un milieu a une influence sur :

- Les phénomènes de corrosion (corrosion plus rapide à pH < 6,5)
- Les phénomènes d'entartrage (carbonate de calcium plus solubles à faible pH)

Sur l'ensemble des aquifères de la Charente Maritime, les valeurs de pH sont proches de la neutralité (pH = 7) et ont donc peu d'influence sur la corrosion et l'entartrage des installations.

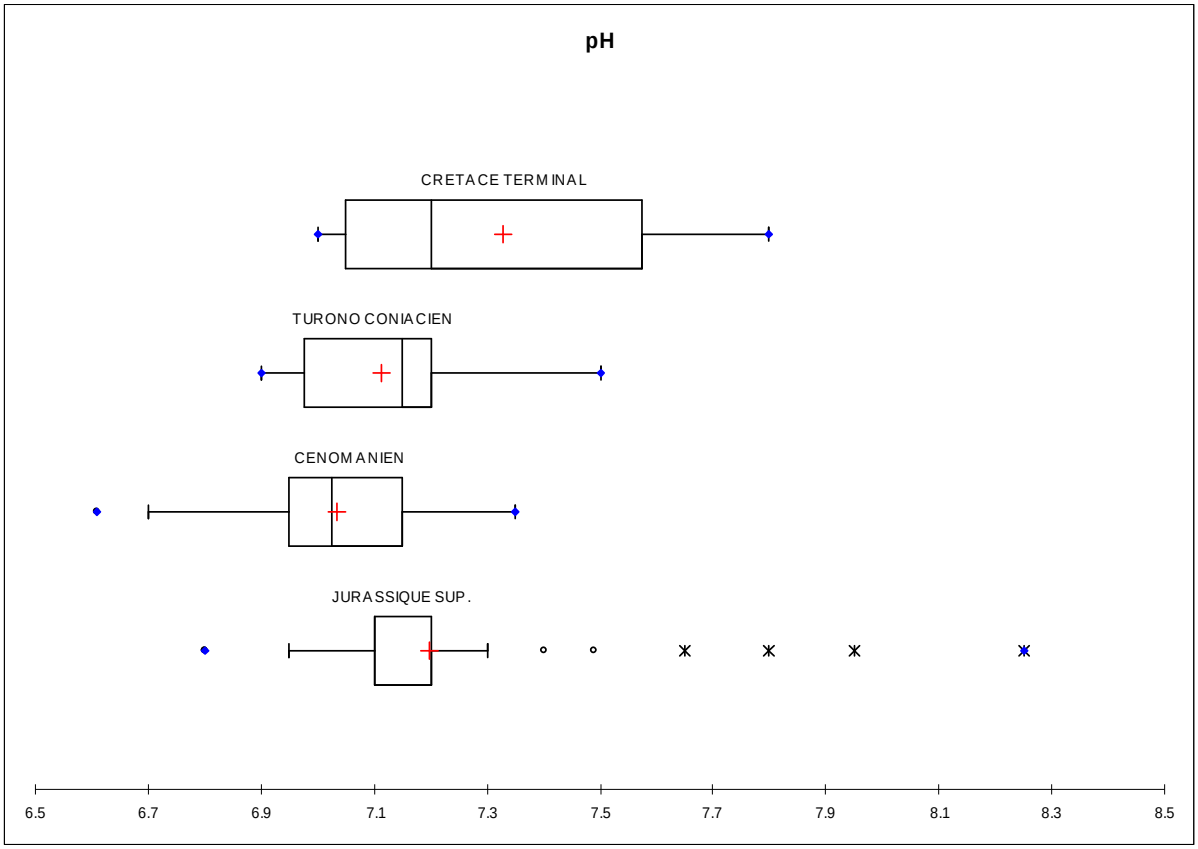


Illustration 19 : Représentation du pH en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey.

4.5. 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 supérieur à 150 mg/l (valeur guide limite à ne pas dépasser).

Une étude cartographique des teneurs en chlorure montre que les valeurs sont relativement disparates. Les zones des aquifères à l'Ouest du département, proches

du littoral, présentent des valeurs extrêmes avec des teneurs supérieures à la valeur guide de 150 mg/l. Les valeurs les plus importantes sont rencontrées dans l'aquifère du Cénomanien, au niveau du littoral, à l'Est de l'Ile d'Oléron.

Il est donc nécessaire de prévoir des traitements contre la corrosion pour les systèmes de PAC qui exploitent les eaux dans les zones littorales.

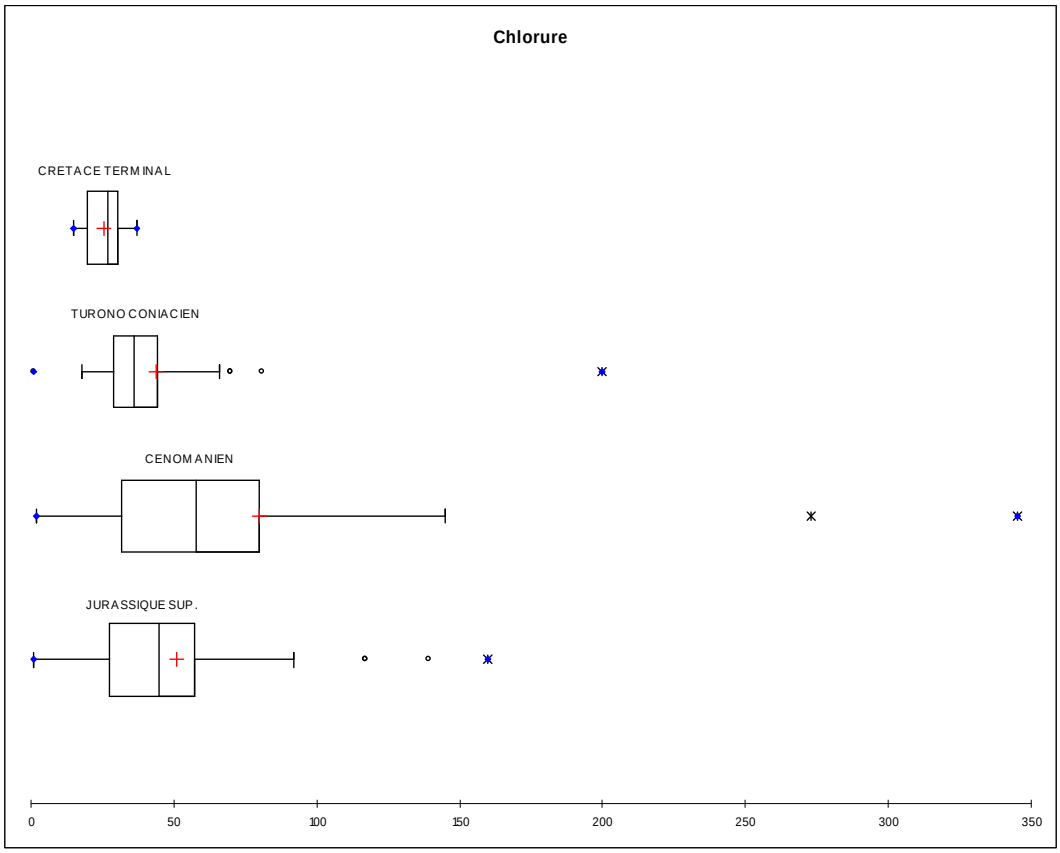


Illustration 20 : Représentation des teneurs en Chlorure en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey.

4.6. STATISTIQUES SUR LES TENEURS EN FER

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 µg/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.

Dans le département, les valeurs de fer sont globalement inférieures à 1 mg/l dans les nappes. Les plus fortes valeurs sont mesurées sous les couches « sidérolithiques » de l'Eocène, et au niveau des zones de marais. Cependant, étant donné la complexité de la chimie du fer, le faible nombre de données, et les pollutions diverses (altération du tubage, intrusions d'eau de mer, pollution de surface) aucune tendance particulière n'a put être dégagée.

4.7. CHOIX D'UN INDICE DE STABILITE DES EAUX

Le gaz carbonique joue un rôle essentiel dans l'équilibre des bicarbonates de calcium en solution dans l'eau, selon l'équation :

$$Ca^{++} + 2HCO^{-}_{3} \leftrightarrow Ca\,CO_3 + CO_2 + H_2O$$

La réaction précédente montre que le départ d'une certaine quantité de CO_2 déplace l'équilibre et conduit à la formation de carbonate de calcium très peu soluble. Les travaux de nombreux auteurs (HOOVER, LANGELIER, LARSON & DUSWELL, etc...) ont permis d'établir que d'autres facteurs 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 l'agressivité.

Afin d'étudier et surtout de prévoir le comportement d'une eau donnée, on a introduit la notion théorique du pH d'équilibre ou pH de saturation, appelé pHs, 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 :

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

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

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

De nombreux abaques, diagrammes permettent un calcul rapide du pHs à partir de cette formule. Cependant, la formule de LANGELIER a été modifiée et simplifiée par LARSON et BUSWELL comme suit :

pHs = 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, les tables suivantes permettent le calcul du pH de saturation :

VALEUR DE A facteur de totalité des sels dissous en ppm	
TDS en ppm	A
85 à 425	0.1
425 à 10 000	0.2

Tableau 7 : valeurs du paramètre A en fonction du TDS

Etant donné que l'on se trouve dans un contexte sédimentaire avec de fortes interactions de l'eau avec la matrice, il a été admis une minéralisation assez élevée conduisant à utiliser la valeur 0.2.

VALEUR DE B facteur de température		VALEUR DE C facteur de dureté du calcium		VALEUR DE D facteur de l'alcalinité totale	
℃	B	TH en °f	C	TAC en °f	D
0 à 1	2,6	1 à 1,1	0,6	1 à 1,1	1,0
2 à 5,5	2,5	1,2 à 1,3	0,7	1,2 à 1,3	1,1
6,5 à 9	2,4	1,4 à 1,7	0,8	1,4 à 1,7	1,2
10 à 13,5	2,3	1,8 à 2,2	0,9	1,8 à 2,2	1,3
14,5 à 16,5	2,2	2,3 à 2,7	1	2,3 à 2,7	1,4
17,5 à 21	2,1	2,8 à 3,4	1,1	2,8 à 3,5	1,5
22 à 26,5	2	3,5 à 4,3	1,2	3,5 à 4,4	1,6
27,5 à 31	1,9	4,4 à 5,5	1,3	4,5 à 5,5	1,7
32 à 36,5	1,8	5,6 à 6,9	1,4	5,6 à 6,9	1,8
37,5 à 43,5	1,7	7,0 à 8,7	1,5	7 à 8,8	1,9
44,5 à 50	1,6	8,8 à 11	1,6	8,9 à 11	2
51 à 56	1,5	11,1 à 13,8	1,7	11,1 à 13,9	2,1
56,5 à 63,5	1,4	13,9 à 17,4	1,8	14 à 17,6	2,2
64,5 à 71	1,3	17,5 à 22	1,9	17,7 à 22,2	2,3
72 à 81	1,2	23 à 27	2	23 à 27	2,4
82 à 89	1,1	28 à 34	2,1	28 à 35	2,5
90 à 96	1	35 à 43	2,2	36 à 44	2,6
96 à 100	0,9	44 à 55	2,3	45 à 55	2,7
		56 à 69	2,4	56 à 69	2,8
		70 à 87	2,5	70 à 88	2,9
		88 à 100	2,6	89 à 100	3

Tableau 8 : Valeurs des paramètres B, C et D en fonction de la température, du TH ou de la TAC

Une fois le pH d'équilibre calculé, la comparaison entre ce dernier et le pH réel de l'eau permet d'établir un index dit de saturation :

I = pH réel - pHs

Cette différence algébrique permet d'estimer le degré de saturation d'une eau en carbonate de calcium. Ainsi l'index de saturation, ou 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)

Mais cet index ne donne qu'une indication relative 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 et fiables, on utilise de plus en plus une notation différente, appelée index de RYZNAR :

IR = 2 pHs - pH réel

Cet index permet non seulement de différencier 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

Tableau 9 : Agressivité d'une eau en fonction de l'indice de Ryznar

4.8. VALEURS DE L'INDICE DE RYZNAR POUR LES DIFFERENTS AQUIFERES

L'application de l'index de Ryznar sur 32 analyses d'eau collectées dans le département de la Charente Maritime montre que les eaux sont agressives dans les conditions de température du gisement géothermique.

	Nb de points	Minimum	1er Quartile	Médiane	3ème Quartile	Maximum	Moyenne
JURASSIQUE SUP.	11	6.459	7.007	7.162	7.387	7.951	7.176
TURONO CONIACIEN	8	6.726	6.936	7.085	7.286	7.490	7.112
CRETACE TERMINAL	4	7.100	7.113	7.278	7.624	8.180	7.459
CENOMANIEN	9	6.357	6.824	7.116	7.393	7.500	7.061

Tableau 10 : Statistiques des valeurs d'index de l'indice de Ryznar en fonction de l'aquifère capté.

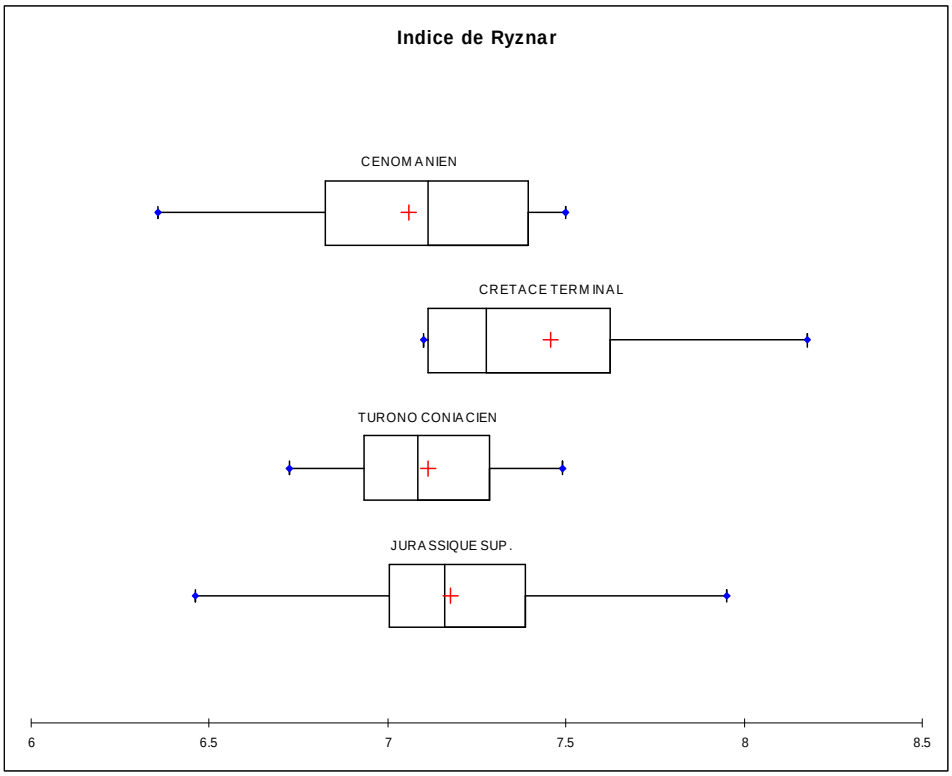


Illustration 21 : Représentation de l'indice de Ryznar en fonction des aquifères captés par la méthode des boîtes à moustaches de Tukey.

Afin de quantifier l'effet de la température sur la stabilité chimique des eaux souterraines, l'indice de Ryznar a été calculé 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). Le calcul de l'indice pour la température de 6℃ montre une augmentation générale de l'agressivité des eaux. Inversement, une augmentation de la température entraîne une tendance à l'entartrage, qui se matérialise par une diminution globale de l'indice de Ryznar.

4.9. TRAITEMENTS A PREVOIR

4.9.1. Corrosion chimique

La corrosion vient du contact des tubages métalliques avec la ressource géothermale, milieu de type électrolyte chargé en chlorure de sodium (NaCl). L'eau salée libère des ions ferreux (Fe2+), mis en suspension. Or l'eau géothermale contient aussi des ions HS (sulfures) ; la combinaison du fer et des sulfures provoque une précipitation de sulfure de fer (FeS), qui se dépose sur les parois internes des tuyaux.

Pour les tubages en acier, un premier traitement consiste à l'ajout d'une membrane en résines époxy. Ce procédé consiste à installer, à l'intérieur de la canalisation en acier, un second tube en matériau composite (époxy armé de fibres de verre) dont la face interne est recouverte d'une fine couche d'époxy ("liner") qui offre une grande résistance à la corrosion et un faible coefficient de frottement.

Aujourd'hui, les tubes en matériau composite (PVC) sont de plus en plus répandus. Ces derniers sont très utilisés en raison de leur résistance à la corrosion, de leur coût plus faible que celui de l'acier, et de la facilité de manipulation et d'assemblage des éléments de tubage. Cependant, leur utilisation devient complexe pour les forages profonds.

Certains forages sont également réalisés en inox (qui présente l'avantage d'être très peu sensible aux phénomènes de corrosion). Cependant leur coût élevé par rapport aux autres matériaux reste une barrière à leur utilisation pour les forages géothermiques. L'inox constitue tout de même la solution la mieux adaptée pour les systèmes de pompes à chaleur.

Afin de prévenir ces phénomènes, il existe des technologies permettant d'injecter au fond du puits de production des inhibiteurs limitant les effets de corrosion/dépôt. L'inhibiteur est diffusé de façon permanente dans le puits, durant l'exploitation. Leurs effets sont très efficaces sur la majorité des opérations. Ces dérivés d'amines quaternaires, déposés en film sur les parois grâce au passage de l'eau, réduisent la corrosion d'un facteur 10 (inhibiteurs film-forming)

4.9.2. Corrosion bactérienne

La corrosion ne découle pas uniquement de la réaction du métal avec l'oxygène de l'environnement ; elle découle également de la présence de bactéries dans l'eau en

particulier les bactéries sulfato réductrices qui utilisent le soufre des ions SO4, lesquels sont transformés en ions sulfures ou en soufre (que l'on retrouve dans les résidus de corrosion).

Les contacts de l'eau avec des milieux risquant d'être pollués biologiquement conduisent aussi à la présence de germes qui sont à l'origine de processus de corrosion. Ces corrosions sont généralement très actives dans les circuits de refroidissement.

L'encrassement biologique est constitué par un film d'épaisseur variable sur des points à température relativement constante et proche de la température la plus favorable à la reproduction des micro-organismes (35 à 40 °C). Ce "dép ôt" est très peu conducteur de chaleur et constitue une barrière isolante entre l'eau et le fluide frigorigène ; le rendement des échanges en est donc fortement affecté (réduction du coefficient global de transfert de chaleur).

Un autre inconvénient lié à l'encrassement biologique provient de la surchauffe locale des surfaces des échangeurs qui réduit la solubilité de certaines compositions salines et favorise la formation d'insolubles alcalinoterreux, notamment quand la température de la lame d'eau léchant le métal augmente. Ainsi un encrassement biologique peut conduire à un entartrage, et l'effet de synergisme "fouling + tartre" est très préjudiciable aux échanges thermiques.

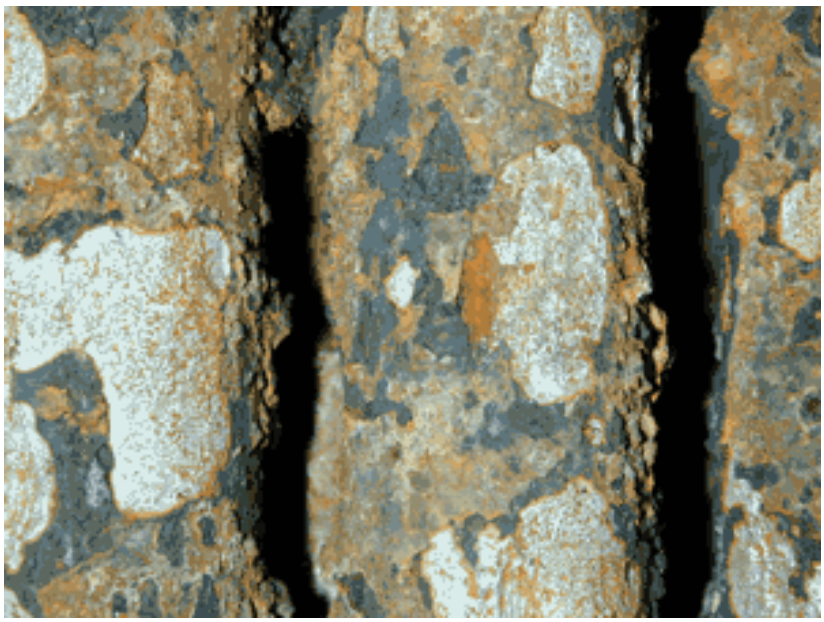


Illustration 22 : Photographie d'un tubage victime de corrosion bactérienne (www. sidec-services.com)

La chimie "bactéricide" permet de lutter contre ces phénomènes. Cette chimie comprend des molécules qui ont des spectres d'action bien définis. Il est donc indispensable de réaliser un bactériogramme afin de bien cibler chaque traitement.

4.9.3. Entartrage

L'eau contenant des sels de calcium et de magnésium peut dans certaines conditions provoquer la formation de tartre sur les parois des tuyaux, des échangeurs et éléments chauffants des pompes à chaleur. L'entartrage est accéléré en cas d'oxygénation de l'eau et d'élévation de sa température. Les facteurs à prendre en compte sont la dureté de l'eau, la présence d'acide carbonique et de bicarbonate, ainsi que l'alcalinité de l'eau.

Les traitements contre les phénomènes d'entartrage sont généralement des méthodes lourdes à mettre en œuvre, telle que la stérilisation thermique et le traitement chimique avec l'emploi de mélanges d'agents stabilisants et de dispersants organiques

Pour les pompes à chaleur, l'emploi d'échangeurs spéciaux permet la limitation de l'entartrage. Ces échangeurs sont constitués d'une seule plaque pliée et enroulée en spirale, puis soudée pour fermer le circuit sans joint ni brasure. Dans ces échangeurs, l'eau circule uniformément dans un circuit monocanal générant de fortes turbulences qui s'opposent à l'entartrage sur ses parois. En plus d'assurer un coefficient thermique élevé, les fortes turbulences créées par le profil des plaques réduisent le risque d'entartrage dans les zones où l'eau est dure.

Une méthode également couramment employées pour contrôler le tartre est l'utilisation d'antitartres. Ce sont des produits tensio-actifs assez peu couteux qui interfèrent avec les réactions de précipitation.

5. Conclusion

Pour répondre à une demande de plus en plus importante d'une part et aux orientations des politiques nationales et européennes d'autre part, le Conseil Général de Charente-Maritime et le BRGM se sont associés pour valoriser le potentiel géothermique du département.

Ce travail, qui débouche sur cette synthèse, un atlas départemental de 16 planches, un CD-ROM interactif, une base de données des potentialités au droit des collèges et l'édition de documents de communication (plaquettes et 5 panneaux), s'est appuyé sur la collecte et l'analyse des données disponibles : forages, bibliographie, modèles hydrodynamiques…

Le potentiel du département de la Charente-Maritime en matière de géothermie très basse à basse température sur nappe est important. Il est de plus présent pratiquement partout.

Cette ressource souterraine est exploitable par pompe à chaleur sur nappe. On a toutefois dans le Sud du département des ressources profondes utilisables directement par échangeur thermique.

Ce document et ses annexes font donc la synthèse de ce potentiel en distinguant les 5 principaux aquifères. Le CDROM est notamment un outil qui doit permettre d'apporter une aide à la décision pour les collectivités qui envisagent un projet basé sur les énergies renouvelables. Il permet d'avoir en chaque point du territoire départemental la profondeur des ressources, le potentiel, et de chiffrer également l'ordre de grandeur du coût d'un projet réalisé dans les règles de l'art et intégrant un puits de réinjection de l'eau dans la nappe après utilisation des calories. Toutefois, ce travail à l'échelle départemental ne se substitue pas à une étude détaillée du projet par un bureau d'études.

6. Bibliographie

- **ADEME**, (2004), Guide Géothermie: *Editions BRGM, ADEME, 44 pg ISBN : 2-7159-0952-7*

- **Arnaud M, Emery X** (2000), Estimation et interpolation spatial. *209 p, Hermes science.*

- **Bichot F et al**, (2005), Synthèse hydrogéologique par bassins versants de la Région Poitou-Charentes-Relations nappes-rivières. *Rapport BRGM RP-53767-FR.*

- **Bichot F., Lavie J., Pinault J.L., Thinon-Larminach M.**, (2008), Analyse des chroniques piézométriques et hydrologiques avec le logiciel TEMPO pour la gestion des prélèvements, Phase 2 : bassin versant de la Charente, *Rapport BRGM RP-55485-FR.*

- **BRGM,** (2005) Guide d'aide à la décision pour la réalisation de pompes à chaleur sur nappe aquifère en région Ile-de-France - Partie 2 - Guide technique, administratif et méthodologique. *Rapport BRGM/RP-53306FR.*

- **Chamayou et al**; (1972), Evaluation des ressource en eau du département de la Charente-Maritime. *BRGM Aquitaine, 72SGN 154 AQI.*

- **Curnelle R, Dubois P.**, (1986), Evolution mésozoïque des grands bassins sédimentaitres francais : bassins de Paris, d'Aquitaine et du sud-est. *BSGF, 8° serie, T. 2, n°4, p 529 à 843.*

- **DDA Charente-Maritime et Université de Bordeaux 1**, 1979, Synthèse des recherches hydrogéologiques en Charente-Maritime.

- **Lemordant Y.** (1999), Gestion des eaux souterraines en Poitou-Charentes, année 2, Piézométrie de l'aquifère du Jurassique supérieur en Aunis. *Rapport BRGM R-40901*

- **Marchais E., Bichot F., Chaussebourg C., Gras E., Nay K.M.**, CPER 2000-2006, Phase 2 Référentiels piézométriques : piézométrie sur le bassin de al Boutonne. *Rapport BRGM RP-52454-FR.*

- **Marionnaud JM, Platel JP, Moreaux P**, (1976) Carte géologique de la France à 1/50000, feuille de jonzac (731) et notice explicative*, 45p, BRGM.*

- **Martin J.C., Printemps J., Remaud S.** (2006) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. Étude cartographique et statistique des débits spécifiques des forages d'eau. *Rapport BRGM/RP-54542-FR*

- **Martin J.C., Printemps J., Remaud S.** (2007) - Atlas sur la géothermie très basse énergie en région Centre. *Rapport final. BRGM/RP-55088-FR*

- **Mouragues N**, (2000), Caractérisation et vulnérabilité d'un hydrosystèmes complexe sub-profond associé à la structure anticlinale de Jonzac, *Thèse Bordeaux I.*

- **Orsingher M.**, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Jurassique supérieur, Région nord de St-Jean-D'Angély. *Thèse de l'Université de Bordeaux 1*

- **Platel J.P**., (1989), Le Crétacé supérieur de la plateforme septentrionale du bassin aquitaine-stratigraphie et évolution géodynamique. *Thèse de 3ieme cycle, Université de Bordeaux III.*

- **Renault O., G Karnay, E. Lay**, (2003), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le department de la Charente-Maritime, *Rapport BRGM/RP 52408 FR.*

- **Vincent M., Baudouin V.** (2000), Gestion quantitative des eaux souterraines en Poitou-Charentes, phase 3 Piézométrie de l'aquifère tithonien en Charente et Charente-Maritime, *Rapport BRGM RP-50172-FR*

Différents sites INTERNET ont aussi été consultés :

- www.afpac.org/marche-pac.php

- **www.energie-edessa.com**

- **www.geothermal- energy.ch**

- **www.geothermie-perspectives.fr**

- www.novenergie.com

- www. sidec-services.com

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Poitou-Charentes
5 rue de la Goélette

86280 – Saint-Benoit - France
Tél. : 05 49 38 15 38