

Document public

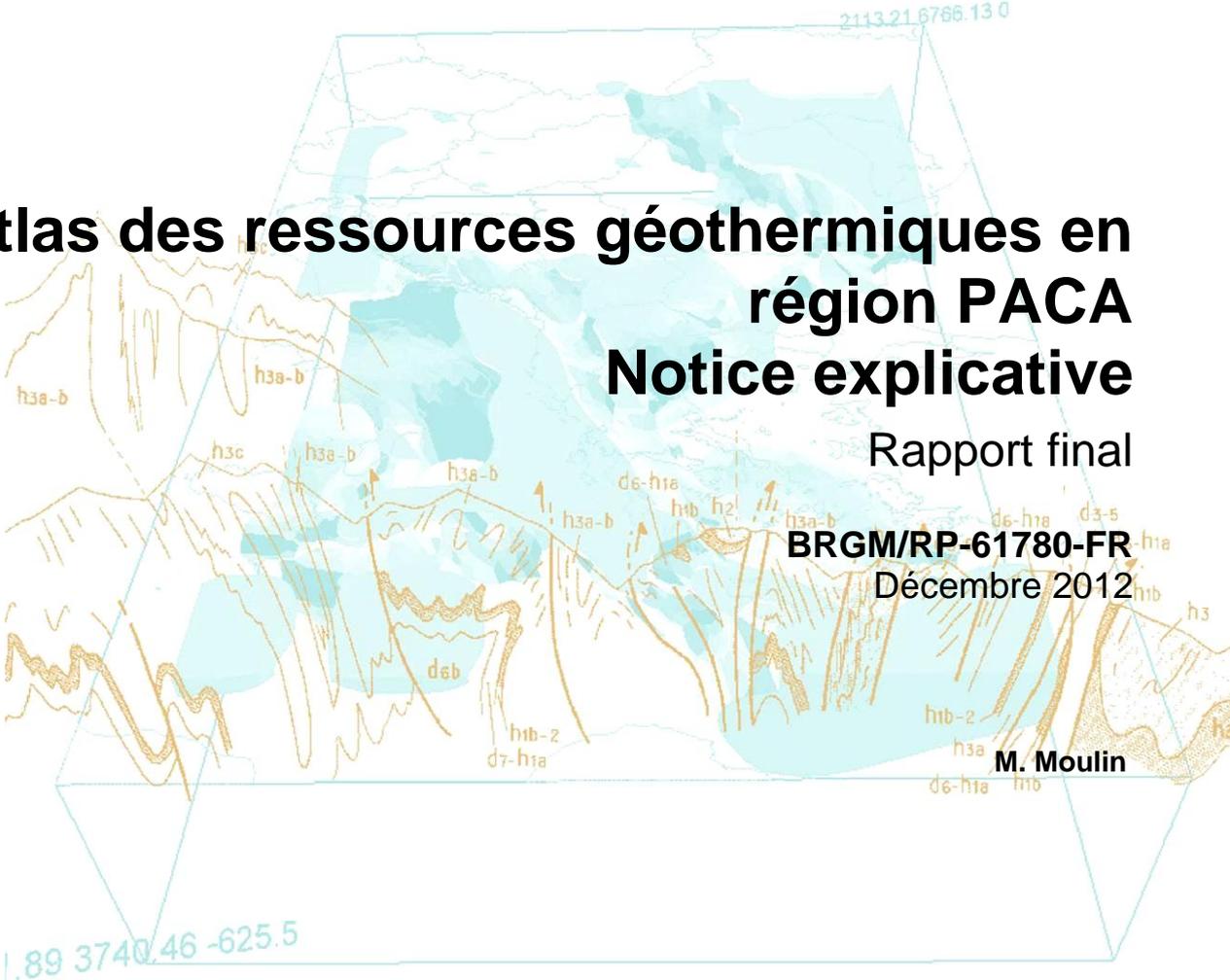


# Atlas des ressources géothermiques en région PACA Notice explicative

Rapport final

BRGM/RP-61780-FR  
Décembre 2012

M. Moulin



Accord-cadre Etat-Région-ADEME 2007-2013



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

Ce document a été vérifié par : (Martin, Jean-Claude)      date : 04/01/2013

**Approbateur : Nom :** Martin Jean-Claude (DGR/REG)

Date : 04/01/2013      Signature :

J. Martin

**Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.**

**Mots clés :** atlas, géothermie, pompe à chaleur, sonde géothermique, géothermie très basse énergie, piézométrie, température, débit, géologie régionale, aquifère, région PACA

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

**MOULIN M.** (2012) - Atlas des ressources géothermiques en région PACA - Notice explicative. Rapport BRGM/RP-61780-FR, 46 p., 23 ill.

© BRGM, 2012, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

La carte de l'atlas des ressources géothermiques de la région PACA, réalisée par le BRGM dans le cadre d'une convention passée avec l'ADEME PACA en décembre 2008, regroupe les informations relatives à la géothermie dite « en nappe » (échanges de chaleur à partir d'eau prélevée et rejetée par forages en doublet) et à la géothermie dite « hors nappe » (échanges de chaleur à partir de sondes géothermiques verticales).

Cet atlas doit être vu avant tout comme un outil d'information destiné à aider et orienter les prises de décisions concernant l'adoption de la géothermie comme source de chauffage et/ou de rafraîchissement de bâtiments.

***IL NE PEUT ET NE DOIT PAS ÊTRE UTILISÉ COMME SEULE SOURCE D'INFORMATION. Il n'a notamment pas vocation à se substituer à une étude préalable à un projet.***

La carte présentée, qui constitue l'ossature de l'atlas, permet de visualiser rapidement la « susceptibilité » du milieu, c'est-à-dire son état plus ou moins favorable à l'utilisation de la géothermie très basse énergie. Quatre classes ont été définies, selon des critères énoncés dans la présente note : défavorable – peu favorable – favorable – très favorable.

Il faut préciser que cela concerne la ressource potentiellement extractible (en quelques sortes, le gisement) et ne prend pas en compte ni la demande en énergie, ni les enjeux environnementaux ou d'occupation de l'espace qui pourraient exister au droit de cette ressource. Les systèmes de pompes à chaleur étant réversibles, l'énergie géothermique peut être utilisée aussi bien à des fins de chauffage que de rafraîchissement. Dans le premier cas, en nappe, les rejets seront plus froids que les prélèvements, dans le second cas, ils seront plus chauds.

Les informations portées dans cet atlas ont été synthétisées. Le territoire de la région PACA a été découpé en 129 515 cellules de 500 m de côtés, « unité de base » des informations. Les contours servant de base aux calculs sont tirés, soit des cartes géologiques vectorisées et harmonisées à l'échelle de 1/50.000 réalisées par le BRGM, soit des entités hydrogéologiques définies dans le référentiel national BD LISA, définies également à l'échelle de 1/50.000. Les données régionalisées de débits, de profondeurs, de température et de chimie sont issues de données ponctuelles provenant de la Banque des données du Sous-Sol ou d'études ponctuelles, et ne peuvent être considérées que comme des données moyennes.

Par convention, il a été décidé que la susceptibilité des nappes vis-à-vis de la géothermie en nappe apparaîtrait dans les teintes bleutées (du plus clair, le plus défavorable, au plus foncé, le plus favorable), tandis que celle des terrains vis-à-vis de la géothermie hors nappe apparaîtrait dans les teintes marron (du plus clair, le plus défavorable, au plus foncé, le plus favorable).



## Sommaire

<b>1. Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2. Généralités</b>	<b>9</b>
2.1. QU'EST-CE QUE LA GEOTHERMIE ? .....	9
2.2. LES DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE .....	10
2.3. LA TECHNOLOGIE DES POMPES A CHALEUR .....	12
<b>3. L'hydrogéologie en région PACA et la géothermie</b>	<b>15</b>
3.1. LES PRINCIPAUX AQUIFERES EN REGION PACA .....	15
3.1.1. Les aquifères alluviaux.....	17
3.1.2. Les autres principaux aquifères sédimentaires .....	21
3.1.3. Conclusions sur la géothermie en nappe en PACA .....	26
3.2. LA GEOTHERMIE HORS-NAPPE EN PACA .....	26
<b>4. Elaboration de l'atlas régional</b>	<b>29</b>
4.1. MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE SUR NAPPE » .....	31
4.1.1. Principe de la réalisation : l'analyse multicritères.....	31
4.1.2. Les principaux résultats obtenus .....	35
4.2. MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE HORS NAPPE » .....	38
4.2.1. Principe retenu .....	38
4.2.2. Les principaux résultats obtenus .....	40
4.3. LE FONCTIONNEMENT DU SITE .....	41
<b>5. Conclusion</b>	<b>44</b>
<b>6. Bibliographie</b>	<b>45</b>

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte de températures des grands aquifères profonds en France ( <a href="http://www.geothermie-perspectives.fr">www.geothermie-perspectives.fr</a> ) .....	10
Illustration 2 : Evolution du nombre de PAC en France ( <a href="http://www.afpac.org/marche-pac.php">www.afpac.org/marche-pac.php</a> ).....	10
Illustration 3 : Différentes applications de la Géothermie (version « francisée » de B. Lindal, 1973). .....	12
Illustration 4 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC ( <a href="http://www.energie-edessa.com">www.energie-edessa.com</a> ).....	13

Illustration 5 : Les grands types de formations constituant les entités hydrogéologiques dans la région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).	16
Illustration 6 : Localisation des principales nappes susceptibles de délivrer des débits importants en région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).	17
Illustration 7 : Coupe schématique en 3D des ruptures de terrasses.	19
Illustration 8 : Liste des entités sédimentaires et alluviales concernées par la géothermie en nappe et débits moyens potentiellement prélevables en un point (entités BD LISA 2012).	20
Illustration 9 : Carte et coupes de l'aquifère de la molasse miocène du Comtat (in Lalbat, 2006).	21
Illustration 10 : coupe NE – SO à travers la plaine de la Crau.	25
Illustration 11 : Découpage de la région PACA en cellules de 500 m de côtés : grille Géothermie sur nappe en bleu, Géothermie hors nappe en marron.	30
Illustration 12 : Données de débits spécifiques recueillies en BSS, soit directement, soit par reconstitution à partir des débits portés dans les dossiers.	32
Illustration 13 : Notions de nappes libres et captives (images ©2009 Energie Service).	32
Illustration 14 : Données portant sur les profondeurs d'accès à la nappe, recueillies en BSS.	33
Illustration 15 : Données de température de l'eau recueillies en BSS.	33
Illustration 16 : Répartition des classes et des susceptibilités utilisées dans l'analyse multi-critères concernant la géothermie en nappe.	35
Illustration 17 : Carte de la susceptibilité de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.	36
Illustration 18 : Répartition des susceptibilités de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.	37
Illustration 19 : Principe du regroupement des formations de la carte géologique vectorisée et harmonisée en 16 types lithologiques (voir tableau in texte).	39
Illustration 20 : Liens entre les puissances spécifiques et les notes appliquées dans chaque cellule, et affectation de notes à différents types de roches, d'après les puissances spécifiques qui leur sont attribuées dans la littérature.	40
Illustration 21 : Carte de représentation des puissances spécifiques moyennes affectées à chaque cellule de la maille régionale.	41
Illustration 22 : Accès aux données de l'atlas PACA sur le site Géothermie Perspectives	42
Illustration 23 : Nature des informations obtenues par un clic sur une cellule concernée par la géothermie sur nappe et par la géothermie hors nappe.	43

# 1. Introduction

La carte de l'atlas des ressources géothermiques de la région PACA, réalisée par le BRGM dans le cadre d'une convention passée avec l'ADEME PACA en décembre 2008, regroupe les informations relatives à la géothermie dite « en nappe » (échanges de chaleur à partir d'eau prélevée et rejetée par forages en doublet) et à la géothermie dite « hors nappe » (échanges de chaleur à partir de sondes géothermiques verticales)<sup>1</sup>.

L'énergie tirée de la géothermie très basse énergie ne peut se transporter. Avant même d'initier un projet impliquant des énergies non renouvelables, il peut donc paraître important aux décideurs de pouvoir estimer les ressources extractibles en tout point de la région. Cet atlas doit être vu avant tout comme un outil d'information destiné à aider et orienter les prises de décisions concernant l'adoption de la géothermie comme source de chauffage et/ou de rafraîchissement de bâtiments. A ce titre,

***Avertissement : IL NE PEUT ET NE DOIT PAS ÊTRE UTILISÉ COMME SEULE SOURCE D'INFORMATION ET NOTAMMENT NE DOIT PAS SE SUBSTITUER A UNE ETUDE PREALABLE DU PROJET.***

La carte présentée, qui constitue l'ossature de l'atlas, permet de visualiser rapidement la « susceptibilité » du milieu, c'est-à-dire son état plus ou moins favorable à l'utilisation de la géothermie très basse énergie. Quatre classes ont été définies, selon des critères énoncés dans la présente note : défavorable – peu favorable – favorable – très favorable.

Il faut préciser que cela concerne la ressource potentiellement extractible (en quelques sortes, le gisement) et ne prend pas en compte ni la demande en énergie, ni les enjeux environnementaux ou d'occupation de l'espace qui pourraient exister au droit de cette ressource. Les systèmes de pompes à chaleur étant réversibles, l'énergie géothermique peut être utilisée aussi bien à des fins de chauffage que de rafraîchissement. Dans le premier cas, en nappe, les rejets seront plus froids que les prélèvements, dans le second cas, ils seront plus chauds.

Les informations portées dans cet atlas ont été synthétisées, le territoire de la région PACA a été découpé en 129 515 cellules de 500 m de côtés, « unité de base » des informations. Les contours servant de base aux calculs sont tirés, soit des cartes géologiques vectorisés et harmonisés à l'échelle de 1/50.000 réalisées par le BRGM, soit des entités hydrogéologiques définies dans le référentiel national BD LISA, définies également à l'échelle de 1/50.000. Les données régionalisées de débits, de profondeurs, de température et de chimie sont issues de données ponctuelles provenant de la Banque des données du Sous-Sol ou d'études ponctuelles, et ne peuvent être considérées que comme des données moyennes.

Par convention, il a été décidé que la susceptibilité des nappes vis-à-vis de la géothermie en nappe apparaîtrait dans les teintes bleutées (du plus clair, le plus défavorable, au plus foncé, le plus favorable), tandis que celle des terrains vis-à-vis de

---

<sup>1</sup> : Dans les deux cas, il s'agit de « géothermie très basse énergie », selon la classification exprimée dans le chapitre « qu'est-ce que la géothermie ? ».

la géothermie hors nappe apparaîtrait dans les teintes marron (du plus clair, le plus défavorable, au plus foncé, le plus favorable).

Outre la susceptibilité, chaque cellule comporte des informations relatives :

- au débit extractible, à la profondeur et à la température de l'eau, données moyennes qu'on peut s'attendre à extraire dans la maille pour la géothermie en nappe ;
- à la puissance spécifique moyenne pressentie (telle que définie plus avant dans la présente notice) pour la géothermie hors nappe.

*Avertissement : Il a par ailleurs été retenu comme principe de ne faire figurer les informations relatives à la géothermie hors nappe que dans les zones NON concernées par la géothermie en nappe. Autrement dit, les informations portées dans une cellule portent SOIT sur la géothermie en nappe, SOIT sur la géothermie hors nappe (dans les secteurs non concernés par la géothermie en nappe).*

## 2. Généralités

### 2.1. QU'EST-CE QUE LA GEOTHERMIE ?

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 : un volume de roche correspondant à une superficie de 1 km<sup>2</sup> sur une profondeur de 10 km, renferme en moyenne une quantité d'énergie équivalant à 15 millions de TEP (Tonne Equivalent Pétrole : 1 TEP  $\cong$  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<sup>2</sup>. 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 (c'est le cas des 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. L'illustration 1 représente une carte des températures de l'eau dans les grands aquifères profonds en France, situés dans les bassins d'effondrement ou les grands bassins sédimentaires (la région PACA n'est pas concernée).

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 qu'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 affleurerait naturellement, ici ou là, à la surface du globe. Mais à partir du XIX<sup>ème</sup> 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 géothermie fait son entrée dans le Code minier français le 16 juin 1977, loi n° 77-620. 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). L'illustration 2 montre l'évolution sur cinq ans du nombre d'installations géothermiques en France, qui ont plus que doublé.

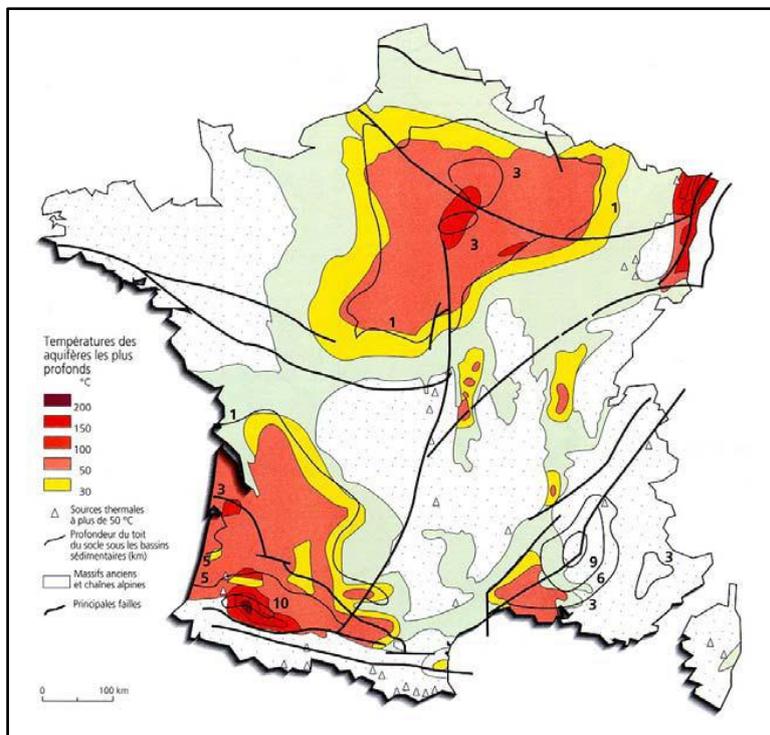


Illustration 1 : Carte de températures des grands aquifères profonds en France ([www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr)).

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Sol / Sol et Sol / Eau</b>	7 700	5 400	6 800	7 800	9 600	9 600
<b>Eau / Eau</b>		3 600	4 900	5 400	8 850	9 000
<b>Total</b>	7 700	9 000	11 700	13 200	18 450	18 600

Illustration 2 : Evolution du nombre de PAC en France ([www.afpac.org/marche-pac.php](http://www.afpac.org/marche-pac.php)).

## 2.2. LES DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE

On distingue plusieurs types de géothermie, en fonction des caractéristiques de la ressource et de l'usage final (Illustration 3) :

*La géothermie de haute énergie ( $T^{\circ}\text{C} > 150^{\circ}\text{C}$ )*

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à  $150^{\circ}\text{C}$ . Les réservoirs, généralement localisés au-delà de 1500 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.

#### *La géothermie de moyenne énergie (T°C : 90 à 150°C)*

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°C. Elle se retrouve dans les zones propices à la géothermie haute énergie, mais à une profondeur inférieure à 1000 m. Elle se situe également dans les bassins sédimentaires, à des profondeurs allant de 2000 à 4000 mètres. Pour produire de l'électricité, une technologie nécessitant l'utilisation d'un fluide intermédiaire est nécessaire.

#### *La géothermie de basse énergie (T°C : 30 à 90°C)*

Elle consiste en l'utilisation de la chaleur, par extraction d'eau chaude contenue dans les aquifères profonds (1500 – 2000 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. Cette réinjection dans le même aquifère permet de maintenir la pression dans le réservoir d'origine. 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.

#### *La géothermie de très basse énergie (T°C < 30 °C)*

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°C (généralement comprise entre 9 et 15 °C). Pour exploiter cette gamme de températures, il est nécessaire de recourir à l'utilisation de pompes à chaleur (PAC). Les PAC peuvent fonctionner sur des dispositifs d'échange et d'extraction d'énergie avec le sous-sol (capteurs verticaux, profondeur généralement inférieure à 100 m) ou l'eau souterraine des aquifères peu profonds (puits de pompage). 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.

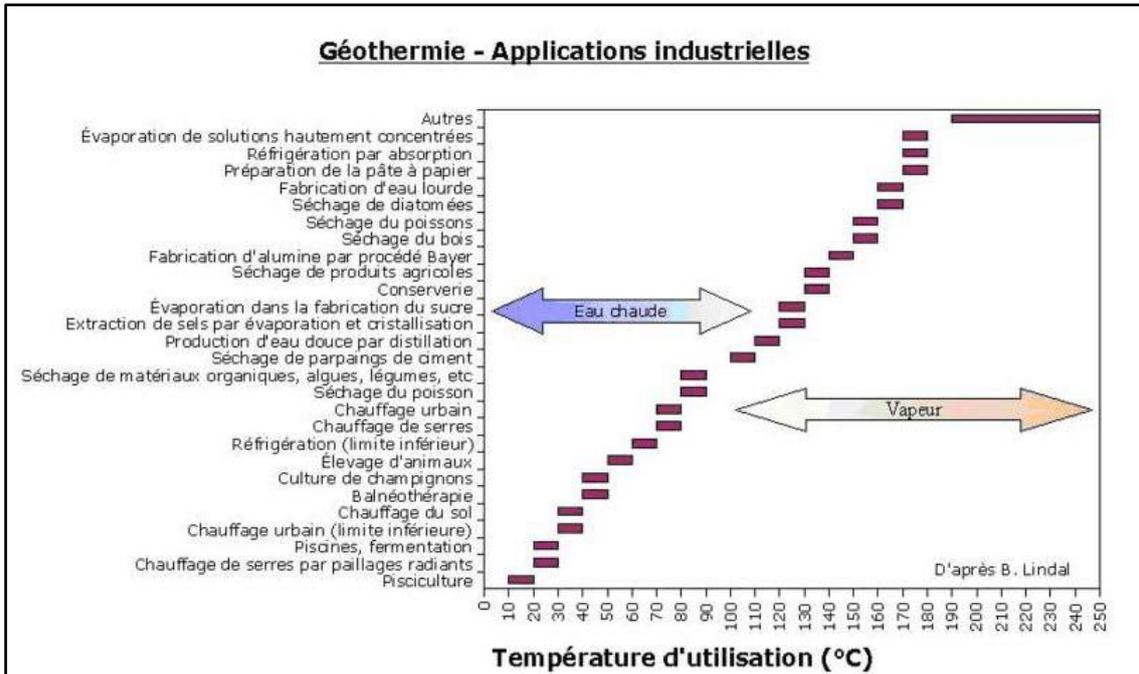


Illustration 3 : Différentes applications de la Géothermie (version « francisée » de B. Lindal, 1973).

### 2.3. LA TECHNOLOGIE DES POMPES 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 (Illustration 4) 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.

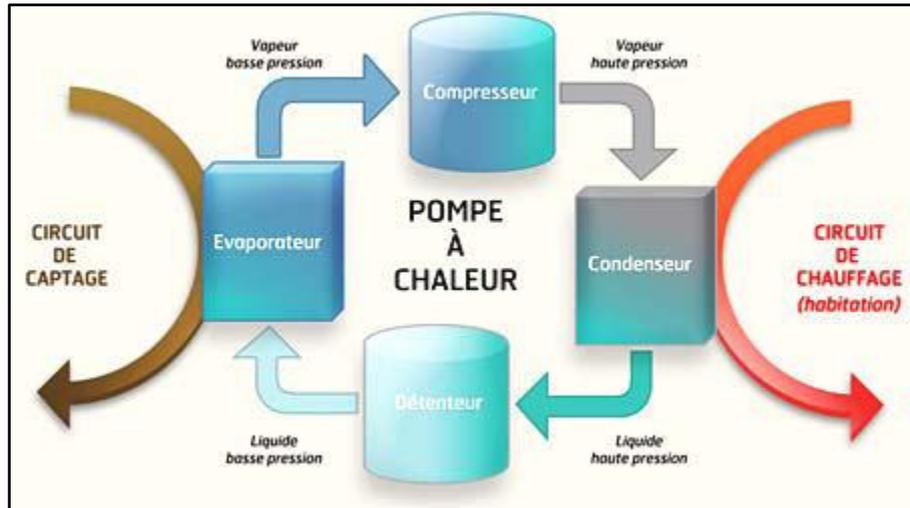


Illustration 4 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC ([www.energie-edessa.com](http://www.energie-edessa.com)).



### **3. L'hydrogéologie en région PACA et la géothermie**

De par son histoire géologique riche et mouvementée, la région PACA possède une grande diversité de terrains, qui ont imprimé aux paysages la grandeur et la beauté qu'on leur connaît. Le corollaire à cet état de fait est une complexité géologique du sous-sol, et singulièrement une grande compartimentation des terrains aquifères. Les grands réservoirs naturels que constituent les bassins sédimentaires français à l'image des bassins parisien ou aquitain sont donc absents de la région.

Il sera difficile de trouver des secteurs dans lesquels les structures géologiques visibles depuis la surface pourront être suivies sur de grandes profondeurs. De plus, l'absence, mis à part dans la vallée du Rhône et dans quelques secteurs des Préalpes, de grands bassins d'effondrement rend peu probable la présence de gisements géothermique de haute ou de moyenne énergie.

Les besoins couverts par le gisement géothermique dans la région relèveront pour l'essentiel du domaine de la géothermie très basse énergie décrit précédemment, et concernera, pour ce qui concerne la géothermie en nappes pour l'essentiel les nappes alluviales et les quelques nappes sédimentaires d'extension significative.

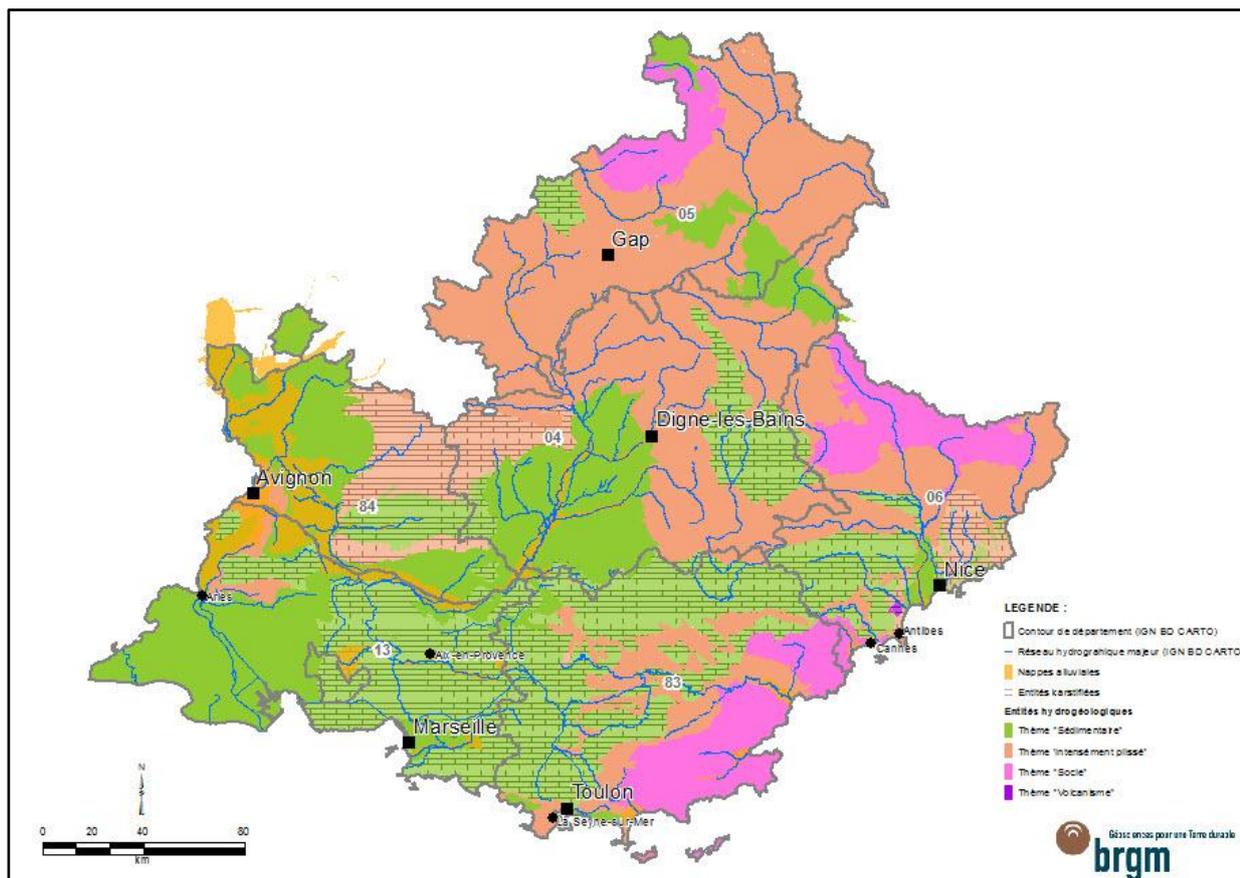
Les paragraphes ci-dessous s'attachent donc à décrire sommairement les principaux aquifères alluviaux et sédimentaires présents sur le territoire régional. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter aux fiches de la synthèse hydrogéologique régionale publiées par le BRGM et l'Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée et Corse.

#### **3.1. LES PRINCIPAUX AQUIFERES EN REGION PACA**

La carte de l'illustration 5 permet d'en visualiser la répartition dans la région.

Les roches dans lesquels circulent les eaux souterraines sont dites « aquifères », et relèvent, en première approximation, soit des « milieux continus », soit des « milieux discontinus ». Dans les premiers, parmi lesquels se rangent les aquifères sédimentaires des plaines de Provence - et notamment les aquifères alluviaux. L'eau circule en nappes, à travers des pores de dimensions variables, à raison de quelques cm/j. Les débits peuvent y être importants, mais, même s'il existe des hétérogénéités, il est souvent possible de « régionaliser » la productivité des nappes. Le renouvellement de la ressource s'effectue soit par infiltration directe de précipitations, soit par alimentation provenant d'autres aquifères (sous-jacents et/ou latéraux). Dans les seconds, dans lesquels sont classés les roches massives (dites « de socle » et les roches calcaires (karsts), l'eau circule pour l'essentiel à travers des fissures, des fractures, voire des conduits, parfois structurés et hiérarchisés, entre lesquels la roche n'est pas (ou peu) aquifères. Les débits sont très contrastés, à la fois spatialement - selon ou non la présence de réseaux connectés) – mais aussi dans le temps : les sources karstiques par exemple connaissent des variations de débits très importantes selon la période de l'année (hautes eaux / basses eaux).

Les paragraphes ci-dessous donnent un aperçu des différents types d'aquifères rencontrés dans la région PACA retenus dans l'atlas régional comme relevant de la « géothermie en nappe ».



*Illustration 5 : Les grands types de formations constituant les entités hydrogéologiques dans la région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).*

Dans la suite de ce chapitre, on distinguera successivement :

- les aquifères alluviaux
- la nappe de la molasse du Miocène du Comtat
- la nappe de la Crau

La carte de l'illustration 6 présente l'extension cartographique des aquifères alluviaux ou sédimentaires non alluviaux rencontrés dans la région PACA, et permet de constater que les surfaces couvertes ne sont pas très importantes au regard de la surface de la région entière. Il n'en demeure pas moins que ces aquifères sont d'une importance primordiale, car ils constituent une ressource en eau potable facilement accessible et de bonne qualité.

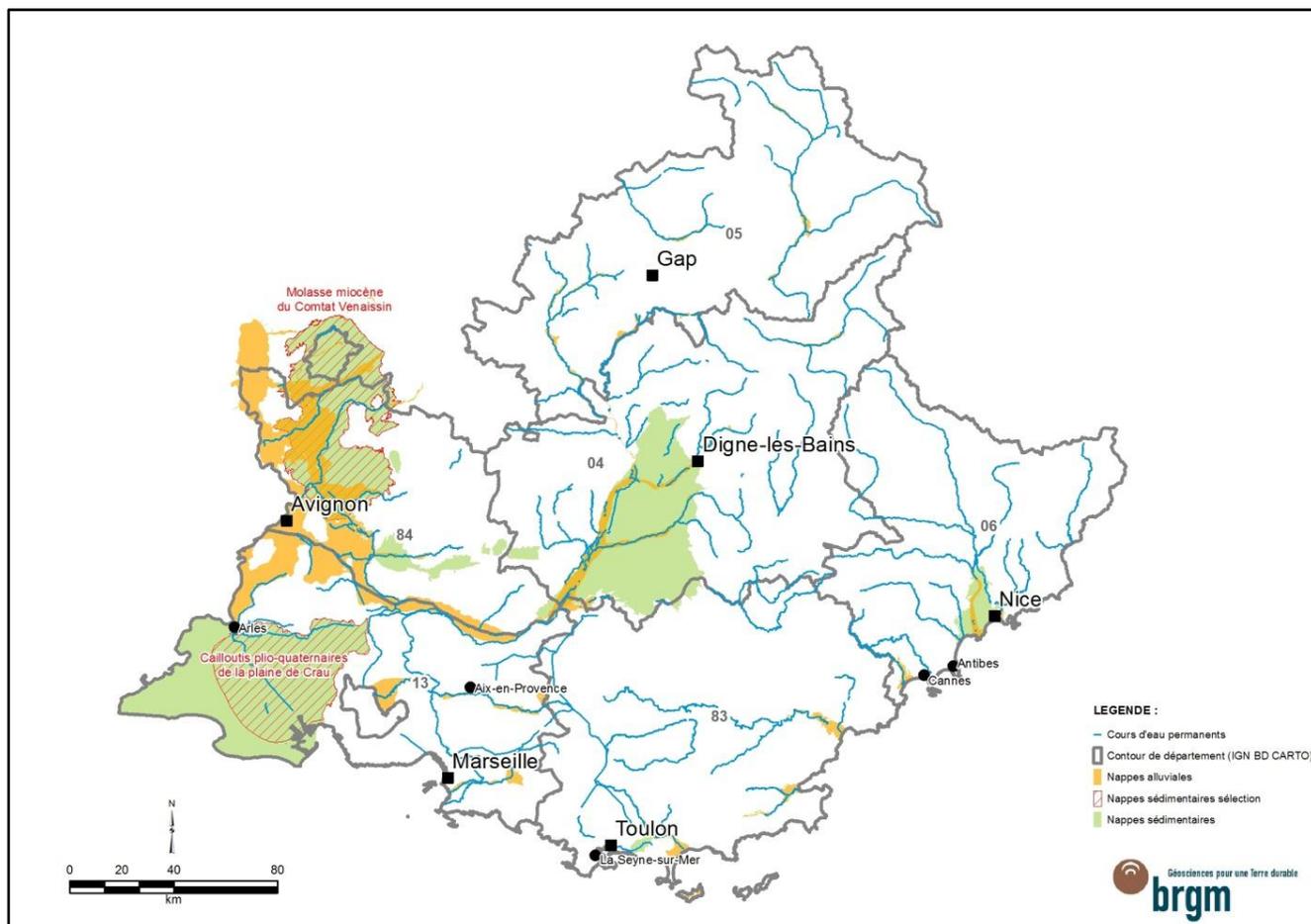


Illustration 6 : Localisation des principales nappes susceptibles de délivrer des débits importants en région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).

Ces formations occupent les vallées des grands axes hydrologiques structurant la région : vallées du Rhône, de la Durance et des principaux fleuves côtiers (Huveaune, Arc, Gapeau, Argens, Giscle-Môle, Var) pour les aquifères alluviaux, ou des grandes plaines anciennement fluviales (Crau, Camargue, Comtat, plaines de Vaucluse). A cela s'ajoutent des entités comme le plateau de Valensole, les poudingues entourant la plaine du Var, ou, dans une moindre mesure, les formations des flyschs à Helminthoïdes dans les Alpes.

### 3.1.1. Les aquifères alluviaux

Parmi les nappes alluviales principales de la région, il faut citer :

- les nappes alluviales des grands cours d'eau structurants (Rhône, Durance et leurs principaux affluents : Drac, Bléone, Asse, Calavon, Sorgues, Aigues, Touloubre...)
- les nappes alluviales des principaux cours d'eau côtiers (Var et ses affluents, Môle – Giscle, Argens, Gapeau, Huveaune, Arc de Berre...)

Les formations fluviales sont généralement constituées par un niveau grossier, à la base, correspondant à des graviers et des galets entremêlés de sable plus ou moins argileux et par un horizon superficiel à granulométrie plus fine, venant recouvrir le

précédent et caractérisé par des argiles et/ou des limons. Toutefois, le degré d'altération de ces dépôts fluviatiles conditionne la perméabilité de ces réservoirs, les plus anciennes terrasses contenant des nappes souvent peu développées et d'extension réduite (Illustration 7).

Les relations nappes-rivières peuvent dans certains cas se produire dans un même sens : drainage de la nappe par le cours d'eau (cas de figure où la rivière repose directement sur un substratum imperméable). Toutefois, lorsque les conditions géologiques sont favorables (cours d'eau n'ayant pas entaillé le substratum imperméable), la rivière peut drainer et être drainée directement par la nappe en fonction des saisons.

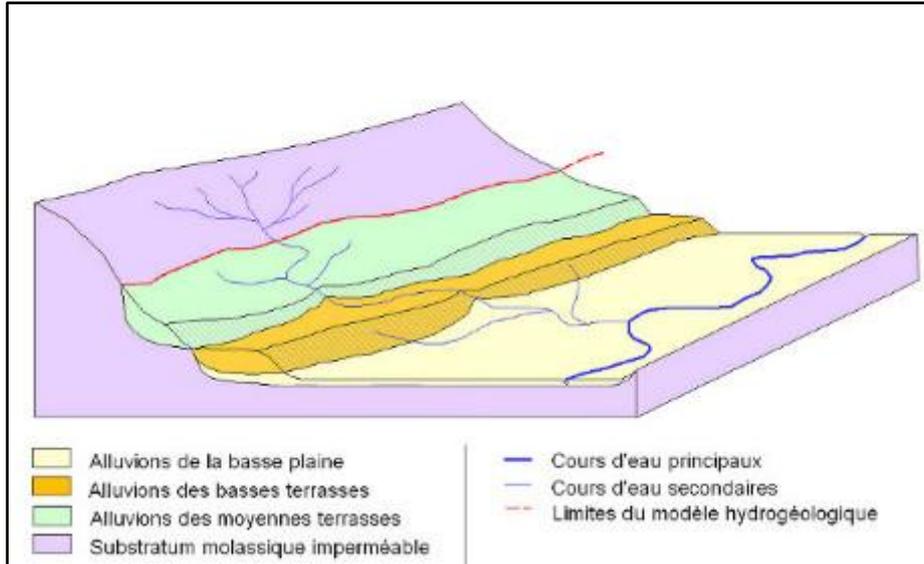
Les niveaux de terrasses rencontrés dans les alluvions sont en général les suivants : hautes terrasses, moyennes terrasses, basses terrasses, basses plaines et alluvions récentes. La composition de ces niveaux de terrasse est généralement très proche, et se distinguent essentiellement par le degré d'évolution de l'altération des galets et l'évolution pédologique des limons. Les faciès lithologiques généraux des différents niveaux de terrasse sont détaillés ci-après. Il convient cependant de noter que la composition des alluvions varie fortement sur des distances très courtes. Cela peut s'expliquer par la présence de paléo chenaux des cours d'eau. Ces descriptions doivent donc être considérées avec prudence.

Le contexte de mise en place des différentes terrasses alluviales détermine le schéma hydrogéologique de la zone étudiée. Les alluvions peuvent en effet être agencées de trois manières :

- en terrasses étagées, séparées par des affleurements de substratum,
- en terrasses étagées, avec connexion hydraulique entre elles,
- en terrasses emboîtées.

Ces nappes soutiennent le débit des cours d'eau et permettent un soutien d'étiage en période estivale. Selon les endroits et en fonction du degré d'encaissement des cours d'eau dans la molasse, les rivières peuvent temporairement recharger la nappe en période de crue. L'alimentation de la nappe est assujettie aux apports pluviométriques et dans une moindre mesure au déversement des nappes des terrasses sus-jacentes. De ce fait, le potentiel de recharge du système est particulièrement sensible aux variations climatiques annuelles.

Les oscillations de cette nappe sont importantes et les basses eaux très marquées en fin d'été et en automne. Les nappes situées en bordure du littoral doivent en outre faire face à une problématique spécifique : l'intrusion d'eau marine, phénomène complexe, naturel mais bien souvent amplifié par une gestion des ressources en eau qui doit répondre à une demande très variable au cours de l'année.



*Illustration 7 : Coupe schématique en 3D des ruptures de terrasses.*

La liste des entités alluviales retenues dans le cadre de ce travail sont portées dans l'illustration 8.

Intitulé	Type de nappe	Superficie (km <sup>2</sup> )	Département(s)	Débit moy. (m <sup>3</sup> /h)
Alluvions récentes de l'Aigues et du Lez	Alluviale	233	26 84	195
Alluvions récentes de l'Ouvèze	Alluviale	99	26 84	590
Alluvions récentes des Sorgues et de la Nesque	Alluviale	193	84	35
Alluvions récentes du Rhône de Viviers à Mornas	Alluviale	84	26 30 84	1500
Alluvions récentes du Rhône entre Roquemaure et Avignon	Alluviale	33	30 84	1500
Alluvions récentes du Rhône d'Avignon à Tarascon	Alluviale	32	13 30 84	1 400
Alluvions récentes du Rhône de Tarascon à Arles	Alluviale	47	13	1250
Alluvions récentes de la Haute Durance et cônes de déjection d'affluents	Alluviale	58	04 05	60
Alluvions récentes de la Moyenne Durance	Alluviale	124	04 05 83 84	75
Alluvions récentes de la basse Durance	Alluviale	454	13 84	60
Alluvions récentes du couloir de Graveson - Maillane	Alluviale	65	13	60
Alluvions récentes de l'Ubaye	Alluviale	14	4	30
Alluvions récentes du Buëch	Alluviale	46	04 05	60
Alluvions récentes de la Bléone	Alluviale	33	4	153
Alluvions récentes de l'Asse	Alluviale	34	4	60
Alluvions récentes du Coulon-Calavon	Alluviale	43	84	50
Alluvions de la Guisane	Alluviale	10	5	60
Alluvions récentes de l'Arc	Alluviale	97	13 83	400
Alluvions récentes du Gapeau	Alluviale	32	83	75
Alluvions récentes de la Gisle et de la Môle	Alluviale	23	83	75
Alluvions récentes de l'Argens	Alluviale	34	83	1000
Alluvions quaternaires de la basse vallée du Var	Alluviale	29	6	1500
Alluvions récentes de l'Huveaune	Alluviale	32	13	50
Alluvions des îles d'Hyères - Porquerolles	Alluviale	4	83	75
Alluvions récentes de la Siagne (secteur de Pégomas)	Alluviale	16	6	280
Alluvions récentes du Loup	Alluviale	3	6	780
Alluvions récentes des Paillons	Alluviale	10	6	225
Alluvions récentes du Haut Drac	Alluviale	16	5	100
Poudingues pliocènes de la basse vallée du Var	Alluviale	131	6	1450
Alluvions de la plaine de l'Eygoutier	Alluviale	19	83	100
Molasse miocène des bassins d'Apt et d'Encreme	Sédimentaire	119	84	10
Formations détritiques mio-pliocènes du bassin de Digne – Valensole	Sédimentaire	1 287	04 83 84	20
Formations deltaïques quaternaires de Camargue	Sédimentaire	1 097	13 30	15
Sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron	Sédimentaire	14	84	60
Cailloutis plio-quaternaires de la plaine de Crau	Sédimentaire	985	13	1600
Molasse miocène du Comtat Venaissin	Sédimentaire	892	26 84	500

Illustration 8 : Liste des entités sédimentaires et alluviales concernées par la géothermie en nappe et débits moyens potentiellement prélevables en un point (entités BD LISA 2012).

### 3.1.2. Les autres principaux aquifères sédimentaires

Les entités retenues sont portées dans l'illustration 8.

Sont présentées ci-dessous les caractéristiques des principales nappes : la nappe du Miocène du Comtat et celle de la plaine de la Crau (voir Illustration 6 en page 17).

#### **La nappe de la molasse du Miocène du Comtat**

La molasse miocène du Comtat s'inscrit dans l'histoire géologique de la vallée du Rhône, bassin sédimentaire orienté selon un axe nord-sud, qui a fait l'objet tour à tour de phases marines, lacustres ou fluviatiles. Au cours du Miocène, la mer recouvre des régions qui, depuis le Santonien (Crétacé supérieur), n'avaient connu que des régimes continentaux. La transgression marine recouvre toute la plaine rhodanienne jusqu'au bassin de Crest. Par la suite, la partie ouest du bassin est recouverte par des formations à dominante argileuse lors de la transgression pliocène. Enfin, au Quaternaire se sont succédées des phases de creusement et d'alluvionnement par les rivières descendant des reliefs orientaux, donnant ainsi naissance aux plaines alluviales, dont celles de l'Aigues, de l'Ouvèze et des Sorgues. Les figures de l'illustration 9 permettent de visualiser la structure de cet aquifère.

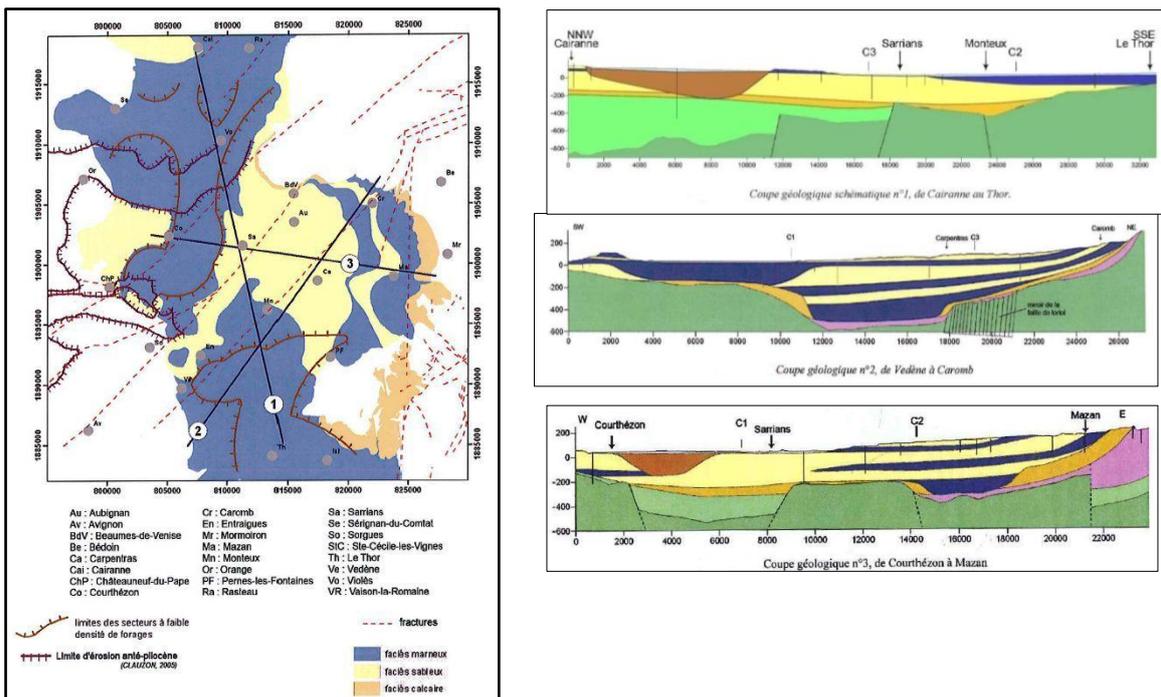


Illustration 9 : Carte et coupes de l'aquifère de la molasse miocène du Comtat (in Lalbat, 2006).

L'aquifère miocène regroupe les safres helvétiques, ainsi que la molasse burdigalienne sous-jacente (formations du Miocène). Les formations helvétiques, dites « safres », sont constituées par une molasse sablo-gréseuse dans laquelle sont intercalés des bancs de marnes sableuses. De nombreuses et rapides variations latérales de faciès caractérisent cette formation. Une particularité du réservoir miocène est la très bonne cohésion des sables qui sont plus ou moins indurés, et qui facilitent la réalisation de forages.

Selon les derniers travaux de recherche menés dans le bassin de Carpentras, et qui ont donné lieu notamment à une campagne de géophysique par tomographie de résistivité électrique, les strates à dominante sableuse, intercalées avec des niveaux argileux, semblent constituer des ensembles relativement homogènes à l'échelle du bassin.

Sur sa majeure partie, l'aquifère des molasses miocènes est recouvert par des formations quaternaires se composant de placages d'alluvions anciennes déconnectées des cours d'eau, et d'alluvions récentes en liaison avec les principaux cours d'eau. Leurs épaisseurs sont variables et peuvent atteindre dans le meilleur des cas environ 30 m. En bordure ouest, le Miocène est souvent recouvert par les marnes pliocènes peu perméables.

Le réservoir miocène présente une structure d'aquifère multicouche, ou lenticulaire (variations latérales de faciès). La perméabilité de l'aquifère dépend essentiellement de la porosité efficace des passées sableuses, et de la fissuration éventuelle des formations. La molasse présente des caractéristiques hydrodynamiques plutôt modestes ( $1.10^{-5}$  à  $1.10^{-6}$  m/s), toutefois, le réservoir présente par endroits des transmissivités plus importantes grâce à son épaisseur ( $10^{-4}$  voire  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s).

D'une manière générale, la nappe s'écoule selon une direction nord-est/sud-ouest. Dans la partie nord, l'écoulement se fait parallèlement aux rivières Aigues et Ouvèze. Dans le bassin de Carpentras, les écoulements sont concentriques et se dirigent vers Bédarrides. D'une manière générale, la présence de barrières argileuses, dans les paléo-vallées (parfois comblées sur plus de 200 m), constituent des obstacles à l'écoulement des eaux, d'où les mises en charge importantes dans certains secteurs, notamment au nord-ouest de Carpentras et au sud-ouest de Valréas, avec localement des phénomènes d'artésianisme.

En ce qui concerne l'évolution globale du niveau de la nappe miocène, les auteurs s'accordent pour considérer qu'elle aurait subi un abaissement. L'estimation de la baisse générale des niveaux piézométriques reste approximative en l'absence de suivi régulier effectué. L'estimation est variable selon les auteurs, généralement comprise entre 5 et 10 m au cours des 50 dernières années. Cette baisse s'est notamment traduite par une perte d'artésianisme dans différents secteurs.

La recharge de l'aquifère miocène est assurée essentiellement dans la partie orientale de l'entité, par l'infiltration des eaux de pluie et par drainance descendante depuis les nappes alluviales (dans les secteurs où la nappe miocène n'est pas captive). Par ailleurs, des phénomènes de drainance ascendante venant du substratum, en particulier du karst urgonien dans le bassin Carpentras), ont été signalées par des anomalies hydrochimiques.

Vers l'ouest, dans la plaine alluviale, la nappe miocène soutient la nappe superficielle, sauf dans des secteurs de pompage intense de la nappe miocène. On constate par ailleurs que les piézométries de la nappe miocène et des nappes alluviales sont très proches, aussi bien en ce qui concerne le sens d'écoulement est-ouest que les charges.

La majorité des forages exploite la nappe à des débits avoisinant les 5 m<sup>3</sup>/h, mais certains ouvrages atteignent 40 à 60 m<sup>3</sup>/h. Des débits spécifiques supérieurs à 2 m<sup>3</sup>/h/m se rencontrent dans la zone comprise entre Sainte-Cécile et l'ouest de Valréas et dans le bassin de Carpentras à l'aplomb de Sarriens, Loriol-du-Comtat et Montoux.

Ces débits spécifiques plus intéressants sont sans doute à mettre en relation avec des faciès plus grossiers des matériaux et/ou une drainance depuis les formations calcaires sous-jacentes.

Dans la partie ouest de l'entité, la nappe est faiblement vulnérable aux pollutions, du fait de sa couverture pliocène et/ou alluviale et de son caractère captif. Par contre, la nappe est vulnérable dans les zones de recharge, dans les secteurs de Valréas et de Carpentras. De plus, de nombreux forages non réalisés selon les règles de l'art (insuffisamment ou non tubés) mettent en communication la nappe miocène et les eaux des nappes superficielles, avec un risque d'infiltration d'eaux potentiellement polluées (nitrates).

### **La nappe de la Crau**

La plaine de la Crau se trouve dans la partie ouest du département des Bouches-du-Rhône. Elle est limitée au nord par les Alpilles et les marais des Baux, à l'est par le massif de Vernègues et de Lançon-de-Provence et l'étang de Berre, et au sud-ouest par la Camargue. La présence de zones de dépression donne lieu à quelques étangs, notamment l'étang des Aulnes et l'étang d'Entressen. De nombreux canaux d'irrigation et de drainage la parcourent, constituant un réseau enchevêtré de canaux secondaires et tertiaires.

Mis à part les zones naturelles présentes sur l'entité, les sols sont principalement occupés par l'agriculture, et sont consacrés à la production de fourrage (zones irriguées) et au pâturage. Sont également présents des arbres fruitiers et des cultures céréalières. En plaine de Crau, la végétation est de type méditerranéen, rare et dispersée. L'habitat et l'industrie (cimenterie, raffinerie, sidérurgie..) sont essentiellement localisés sur la bordure orientale (zone portuaire de Fos-sur-Mer, Miramas/Saint-Chamas).

Durant la fin du Jurassique et la plus grande partie du Crétacé, se déposent sur toute la Provence des sédiments calcaires sur une grande épaisseur. Au Miocène, la mer recouvre la partie nord-est de la Crau, déposant des sédiments molassiques. Après une dernière incursion au début du Pliocène, la mer se retire au Villafranchien tandis que la Durance dépose au sud du seuil d'Eyguières un abondant matériel détritique correspondant à la Crau d'Arles.

Au Quaternaire, la Durance emprunte le seuil de Lamanon et coule vers le sillon de Salon-Miramas, formant la Crau quaternaire ou Crau de Miramas. Au début de la régression pré-flandrienne, la Durance abandonne le couloir de Lamanon pour rejoindre le Rhône. Lors de la transgression flandrienne, la mer remonte et envahit la dépression de Berre mais ne pénètre pas dans la vallée du Rhône au-delà du delta d'Arles. Les matériaux fins entraînés par le fleuve édifient progressivement la Camargue.

Les cailloutis de Crau affleurent sur l'ensemble de l'entité. Ils sont parfois cimentés en poudingues compacts, localement discontinus et fissurés. L'épaisseur des formations de Crau est en moyenne de 15 à 20 m mais peut atteindre plus de 50 m localement, en fonction de la topographie du substratum. Les épaisseurs les plus importantes se trouvent dans les couloirs de Miramas à Fos et d'Arles.

La coupe à travers la nappe de la Crau de l'illustration 10 permet d'en visualiser la structure.

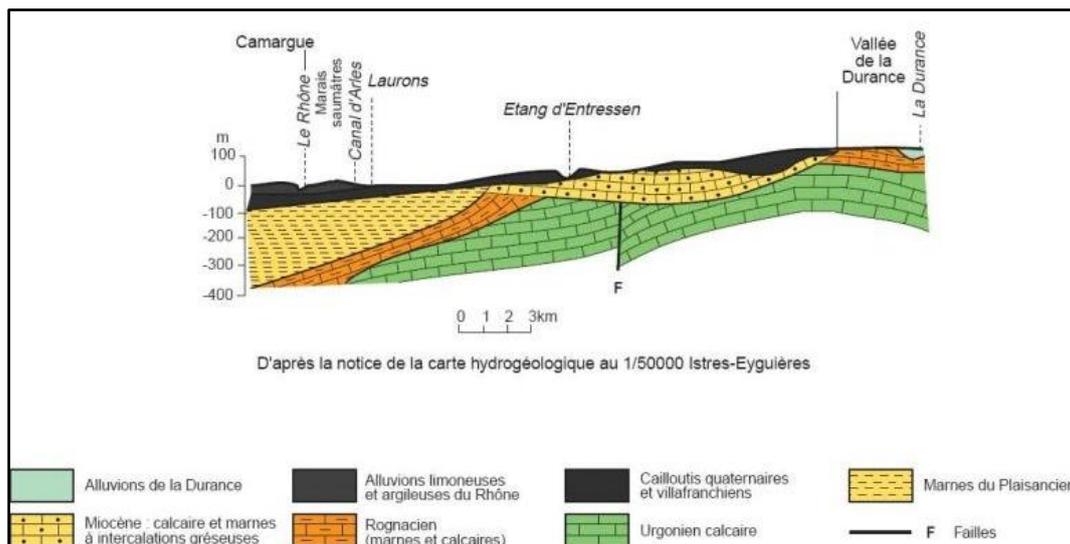


Illustration 10 : coupe NE – SO à travers la plaine de la Crau.

Les cailloutis de la plaine de Crau sont des formations perméables contenant une nappe importante, notamment dans les couloirs constitués par les paléo-vallées de la Durance, où la perméabilité peut atteindre  $10^{-2}$  m/s.

L'écoulement se fait globalement du seuil de Lamanon au nord-est vers les émergences des marais de Meyranne et Fos-sur-mer au sud et à l'ouest. La nappe est libre jusqu'à cette zone de marais, marquant la limite sud-ouest de l'entité. Elle devient captive et saumâtre au-delà.

La profondeur du niveau piézométrique est variable (de 0,5 à 20 m de profondeur). D'après les cartes piézométriques disponibles, les zones les plus profondes sont situées à l'aval immédiat de Lamanon (20 m/sol), dans le sillon est-ouest d'Arles et au centre de la Crau de Miramas (10 m/sol). La nappe est sub-affleurante au niveau des exutoires sur les bordures ouest et sud de l'entité (1 m/sol près de Fos-sur-mer). On constate également que le niveau piézométrique est très proche de la surface le long de la ligne de partage des eaux entre la Crau d'Arles et la Crau du Luquier (1 à 2 m/sol).

Les exutoires principaux de la nappe libre sont les zones de marais : ligne de source en bordure des marais des Baux au nord (Santa Fe, Joyeuse garde, étang de Conte), de Meyranne à l'ouest, et les laurons du Vigueirat (résurgences naturelles au sud).

L'alimentation de la nappe se fait essentiellement par les eaux d'irrigation, qui constituent environ 2/3 des apports à la nappe, et par les précipitations. L'apport d'eau par l'irrigation joue un rôle important dans l'équilibre hydraulique de la nappe, empêchant l'avancée du « biseau salé », présent dans le secteur de la Camargue et du Bas-Rhône.

Sous l'influence des irrigations, on observe une remontée du niveau piézométrique en été. Dans les secteurs irrigués, le régime de hautes et basses eaux est donc inversé. L'amplitude des variations varie de 0,5 m (à proximité des exutoires) à 6 m dans les zones soumises à irrigation (ouest de Salon-de-Provence, nord de Meyranne...).

Compte-tenu de la forte perméabilité des cailloutis, induisant une grande vitesse de circulation (environ 5 à 10 m/jour), et de la faible profondeur de la nappe, celle-ci est fortement vulnérable aux éventuelles pollutions de surface.

Cette nappe, très sollicitée par les nombreux captages, s'avère donc fragile : vulnérabilité aux pollutions et équilibre hydraulique artificiel soutenu par les apports d'eau d'irrigation.

### **3.1.3. Conclusions sur la géothermie en nappe en PACA**

Les principales nappes alluviales de la région (voir Illustration 6, page 17) sont concernées au premier chef par la géothermie en nappe.

Les débits, tels qu'on les connaît, sont en général suffisants pour que les prélèvements à des fins géothermiques puissent être intéressants.

Dans les nappes les plus puissantes de la région PACA (nappes du Rhône, de la Durance, du Var, de l'Argens, de la Crau), les débits potentiels ponctuels pourraient dépasser les 500 m<sup>3</sup>/h et souvent les 1000 m<sup>3</sup>/h (à condition de bien dimensionner les ouvrages et éviter les interactions).

## **3.2. LA GEOTHERMIE HORS-NAPPE EN PACA**

Comme on l'a vu sur la carte de l'illustration 6 en page 17, les aquifères dits « continus » au sein desquels l'eau s'écoule en nappe sont loin de couvrir la totalité de la superficie de la région. Pour essayer de renseigner le maximum de territoire régional, il a donc été décidé de réaliser une première approche des gisements liés à la géothermie hors nappe. Ce type de géothermie, où la ressource est issue du sous-sol directement, que celui-ci contienne de l'eau circulante ou non, concerne tous les types de formations géologiques rencontrées : les formations sédimentaires, déjà traitées dans le cadre de la géothermie en nappe – et pour lesquelles les estimations de ressources issues de la géothermie hors nappe n'apparaissent pas sur la carte de l'atlas, mais aussi les formations, aquifères ou non, qui relèvent de ce que les hydrogéologues appellent les « milieux discontinus ».

Les grands aquifères karstiques libres et sous couverture n'entrent en effet pas dans la catégorie « géothermie en nappe » car on considère que la recherche d'eau à des débits et avec une pérennité suffisante est soumise à trop d'aléas. En revanche, ils peuvent être employés en géothermie très basse énergie en tant qu'échangeurs directs avec des sondes géothermiques verticales, même si le milieu fortement fracturé propre aux roches karstifiées peut rendre risquée la réalisation de forages destinés à des sondes (risques d'effondrements ou de présence de discontinuités de contact des sondes avec la roche due à la présence de cavités). Il en va de même pour les aquifères dits « de socle » (granites, roches métamorphiques...), comme le montre l'illustration 5 de la page 16).

Outre les domaines alluviaux déjà cités, les grands domaines qui occupent la région sont les suivants :

- Le domaine alpin, issu de l'orogénèse alpine, qui couvre le nord et l'est de la région : région de montagne, les formations géologiques sont constituées de

roches carbonatées, de marnes, d'argiles, de grès, de roches métamorphiques et/ou plutoniques, le tout morcelé en domaines et unités structuraux complexes.

- Le domaine provençal, issu de la mise en place des Pyrénées, antérieur au domaine alpin, constitué pour l'essentiel de roches sédimentaires (carbonates, grès, argiles, marnes), roches métamorphiques et plutoniques, formant des massifs et des plateaux.

Ces deux grands domaines sont parcourus par des entités karstiques qui couvrent environ 30 % du territoire régional et qui structurent bien souvent les paysages, notamment dans le Vaucluse, les Bouches-du-Rhône les Alpes-de-Haute-Provence et les Alpes-Maritimes.

Sur un plan lithologique et structural, une très grande diversité de terrains se rencontre dans les formations concernées par la géothermie hors nappe : Roches sédimentaires carbonatées et silicatées, plutoniques, volcaniques et métamorphiques...

De cette diversité, ainsi que de la complexité de l'histoire géologique qui a présidé à leur mise en place naissent bien évidemment des propriétés mécaniques et structurales diverses qui ont un impact sur les propriétés calorifiques exploitées en géothermie très basse énergie. Ainsi, les roches plutoniques ou métamorphiques, de par leur aspect massif sont-elles de bons réservoirs, à même de restituer une puissance calorifique importante, alors que les roches sédimentaires meubles, au contraire, ne constituent pas des magasins très intéressants pour cette thématique.

Sur la carte de l'illustration 5 en page 16, ces domaines, qui sont représentés dans les tons roses et oranges sont donc concernés au premier chef par la géothermie hors nappe.

Sont concernés, à titre d'illustration, d'ouest en est :

- Les massifs calcaires des départements du Vaucluse et des Bouches-du-Rhône (les Monts du Vaucluse, les Alpilles, les collines de l'arrière-pays provençal, les Calanques, les massifs du Beausset, de la Sainte-Victoire et de la Sainte-Baume, le bassin de Marseille) ;
- Les plateaux calcaires du Centre Var (le Plan de Canjuers), les massifs carbonatés de la région de Brignoles, la dépression permienne de Cuers – Vidauban, les massifs des Maures et de l'Esterel ;
- Le plateau de Valensole (poudingues pliocènes), les Préalpes dignoises ainsi que les massifs alpins des départements des Alpes de Haute-Provence et des Hautes-Alpes et des Alpes-Maritimes (à l'exclusion des vallées alpines majeures) ;
- Les arcs alpins de Nice et de Castellane, ainsi que les écailles secondaires qui surplombent la Côte d'Azur.

Cette liste permet de comprendre que la majorité de la région est concernée par la thématique de la géothermie hors nappe, même si les gisements sont d'importance variable : pour des raisons qui tiennent à la nature même des milieux karstifiés (présence de réseaux souterrains de failles et de conduits parfois de taille plurimétrique), les capacités calorifiques sont limitées. Cela étant quand la roche est

compacte (calcaires massifs non karstifiés, roches silicatées plutoniques non altérées...), ces capacités peuvent être importantes.

## 4. Elaboration de l'atlas régional

L'atlas se compose pour l'essentiel d'une carte, présentée dans le site <http://www.geothermie-perspectives.fr>, qui comprend les informations relatives à la « **susceptibilité des nappes et du sous-sol à l'utilisation de la géothermie très basse énergie** ».

Cette susceptibilité s'énonce clairement par rapport au **gisement disponible**<sup>2</sup>, que ce soit *via* les nappes ou *via* le sous-sol directement.

La restitution de cette susceptibilité s'opère *via* des teintes de couleur, qui vont du plus clair (zones les moins favorables) au plus foncé (zones les plus favorables). Les classes de susceptibilités sont au nombre de quatre :

- Très favorable
- Favorable
- Peu favorable
- Défavorable

Les critères d'appartenance à telle ou telle classe, ainsi que la teinte de couleurs dépend de l'origine de la ressource considérée (géothermie « en nappe », c'est à dire issue d'échange avec les eaux souterraines, *via* des prélèvements / rejets par forages ou géothermie « hors nappe » c'est-à-dire issue d'échanges avec les roches *via* des sondes géothermiques verticales).

Outre les teintes de couleurs indiquant la susceptibilité du milieu, il est possible à l'utilisateur d'obtenir des informations « ponctuelles » sur un certain nombre de paramètres :

- Débit de pompage<sup>3</sup> (en m<sup>3</sup>/h), profondeur d'accès (en m / surface), température de l'eau souterraine (en °C) pour la géothermie en nappe ;
- Puissance spécifique restituable par le milieu (c. à d. puissance récupérable par un mètre de sonde) (en W/m).

Ceci a été rendu possible en découpant le territoire régional en *129 515 cellules carrées de 500 m de côté*, à l'intérieur desquelles ont été réalisés les calculs de

---

<sup>2</sup> Et non par rapport au **potentiel mobilisable**, qui implique la connaissance de la demande en tout point, et la mise en place de scénarios quant aux limitations d'utilisations, voire aux projections dans le futur.

<sup>3</sup> : Le débit est en effet relié à la puissance géothermique disponible par la formule :

$$P_{GD} = 1,16 \cdot Q_{POT} \cdot \Delta T$$

Où :  $P_{GD}$  : Puissance Géothermique Disponible (kW)  
 $Q_{POT}$  : Débit de pompage dans un ouvrage (m<sup>3</sup>/h)  
 $\Delta T$  : Différentiel thermique de l'eau entre les sources chaude et froide

moyennes relatives aux paramètres énoncés. Chaque cellule est repérée par des coordonnées (AB00, où "AB" représente la position en ligne et "00" celle en colonne).

L'information recueillie dans chacune des cellules est donc unique, et résulte d'une moyenne portant sur les informations ponctuelles rencontrées à l'intérieur.

**Il a en outre été convenu que les informations relatives à la géothermie en nappe seraient prépondérantes sur celles issues de la géothermie hors nappe. Autrement dit, si une cellule est concernée par les deux thématiques, ne sera reportée dans l'atlas que la thématique relative à la géothermie en nappe.**

Les chapitres ci-dessous décrivent les modalités d'obtention de ces classes en distinguant la géothermie en nappe et hors-nappe.

La carte de l'illustration 11 montre la répartition des 24 403 cellules (19 % du total) dédiées à la géothermie en nappe (contours bleus) et les 105 112 (81 % du total) dédiées à la géothermie hors nappe (contours bruns, distinction cartographique effectuée sur la base des contours des entités hydrogéologiques BD LISA de 2012).

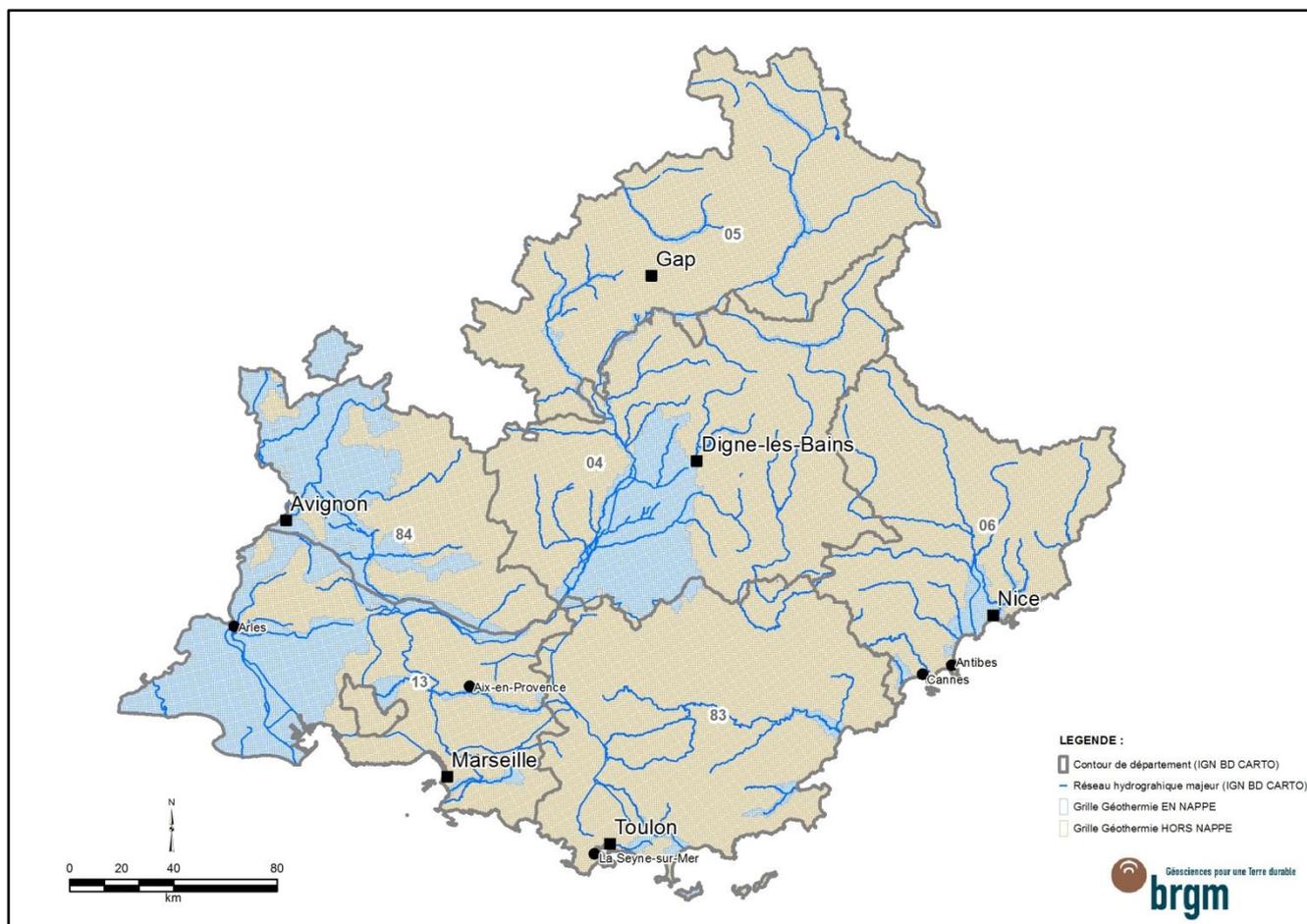


Illustration 11 : Découpage de la région PACA en cellules de 500 m de côtés : grille Géothermie sur nappe en bleu, Géothermie hors nappe en marron.

## 4.1. MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE SUR NAPPE »

### 4.1.1. Principe de la réalisation : l'analyse multicritères

#### *Principe de l'Analyse Multi-Critères (AMC)*

Dans chaque cellule concernée par les entités hydrogéologiques retenues, a été calculée une note globale qui traduit la susceptibilité du milieu par rapport au gisement géothermique, à partir de notes individuelles relatives à chacun des critères de l'analyse.

#### *Les critères de base*

- Les débits extractibles : mode d'obtention et incertitudes

Ce paramètre est pour l'essentiel issu d'une extraction depuis la Banque des Données du Sous-Sol (BSS).

Le débit prélevable par un captage fictif situé au centre de chaque cellule de 500 m de côtés a été estimé de la façon suivante :

- Soit à partir d'un débit spécifique<sup>4</sup> connu dans la nappe concernée, en estimant qu'on l'appliquait à 5 m de rabattement dans les captages (ou, quand les disponibilités n'étaient pas suffisantes, on l'appliquait à un rabattement égal au tiers du rabattement maximal). Autrement dit,

$$Q = \Delta \cdot Q_s \text{ et } \Delta \leq 5 \text{ m,}$$

Où :

Q : débit extractible (m<sup>3</sup>/h),

Δ : rabattement mesuré dans l'ouvrage (m)

Q<sub>s</sub> : débit spécifique (m<sup>3</sup>/(h.m))

Le problème, c'est que les données de débits spécifiques (issues de pompages d'essai) sont très rares : on dispose que de 35 valeurs dans la Banque de Données du Sous-Sol (sur 12 688 dossiers !).

On a donc procédé à une « reconstitution » des débits spécifiques, partout où on disposait simultanément de débits de prélèvement et de rabattements. Les résultats sont portés dans le tableau de l'illustration 12.

---

<sup>4</sup> : Le débit spécifique (Q<sub>s</sub>) est le débit extractible par mètre de rabattement dans un ouvrage. Il a pour unités M<sup>3</sup>.T<sup>-1</sup>.L<sup>-1</sup>, et dans l'étude a été exprimé en m<sup>3</sup>/(h.m).

DEPT	Nb dossiers	Données Q	%
04	852	7	0,8
05	282	6	2,1
06	1 504	73	4,9
13	5 326	78	1,5
83	1 259	33	2,6
84	3 465	107	3,1
<b>PACA</b>	<b>12 688</b>	<b>304</b>	<b>2,4</b>

Illustration 12 : Données de débits spécifiques recueillies en BSS, soit directement, soit par reconstitution à partir des débits portés dans les dossiers.

- Soit à partir des données ponctuelles de production des nappes, qui ont pu être obtenues dans les études hydrogéologiques menées à l'échelle locale : nappe de la Crau, nappes côtières du Var (Argens, Giscle-Môle, Gapeau), nappes côtières des Alpes-Maritimes (Plaine du Var, Paillons, Loup, Siagne), nappes alluviales majeures (Durance et Rhône). Ces données, difficiles à régionaliser, ont cependant permis d'affiner les résultats issus de la précédente méthode d'obtention.
- Les profondeurs d'accès : mode d'obtention et incertitudes

Les profondeurs d'accès à la nappe constituent un paramètre important dans la discrimination de la susceptibilité géothermique. Deux cas se présentent :

- Soit la nappe est libre, c'est-à-dire que sa surface piézométrique correspond à celle du toit de la nappe, auquel cas la profondeur d'accès correspond à celle qu'il faut atteindre par forage pour capter la nappe ;

Soit la nappe est captive, c'est-à-dire que sa surface piézométrique, une fois la nappe atteinte, se stabilise à une altitude supérieure à celle du toit de la nappe avant percement. Dans ce cas La profondeur d'accès correspond, non pas à la celle de l'eau dans le forage une fois la foration réalisée (le forage peut même être artésien), mais à celle qu'il faut atteindre pour atteindre le toit de l'aquifère (Illustration 13).

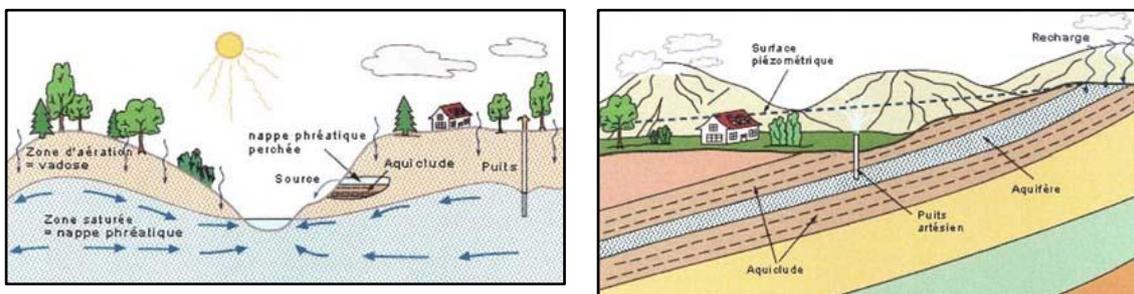


Illustration 13 : Notions de nappes libres et captives (images ©2009 Energie Service).

Les données de profondeurs d'accès sont issues de la Banque des Données du Sous-Sol, et sont relativement nombreuses et bien réparties (Illustration 14).

DEPT	Nb dossiers	Données Prof	%
04	852	602	70,7
05	282	186	66,0
06	1 504	1 001	66,6
13	5 326	4 208	79,0
83	1 259	1 074	85,3
84	3 465	2 780	80,2
<b>PACA</b>	<b>12 688</b>	<b>9 851</b>	<b>77,6</b>

Illustration 14 : Données portant sur les profondeurs d'accès à la nappe, recueillies en BSS.

- La température de l'eau : mode d'obtention et incertitudes

Les données ponctuelles concernant les températures des eaux souterraines sont extraites dans la très grande majorité des cas de la Banque des Données du Sous-Sol (BSS) et d'ADES (Accès aux Données sur les Eaux Souterraines), deux bases gérées par le BRGM. Les données ne sont pas très abondantes, et elles ont été complétées par des données acquises dans le cadre d'études spécifiques, comme celles menées dans la Plaine de la Crau, du Gapeau ou de l'Arc de Berre, les vallées de l'Argens ou du Var, le Bassin de l'Arc... Il faut noter que la faible dispersion de ces données autour de la valeur moyenne de 14,4°C ne rend pas ce paramètre très discriminant (Illustration 15).

DEPT	Nb dossiers	Données T°C	%	T°C moy	σ°C
04	852	133	15,6	13,5	3,9
05	282	35	12,4	13,6	2,2
06	1504	77	5,1	15,2	2,3
13	5326	194	3,6	16,2	2,6
83	1259	41	3,3	12,5	1,5
84	3465	30	0,9	15,7	5,0
<b>PACA</b>	<b>12688</b>	<b>510</b>	<b>4,0</b>	<b>14,4</b>	<b>2,9</b>

Illustration 15 : Données de température de l'eau recueillies en BSS.

À la suite du recueil des données de base, portant sur les trois paramètres que sont le débit, la profondeur d'accès et la température de l'eau, l'analyse multicritère a pu être lancée dans chacune des 24 403 cellules couvrant la région et concernée par la géothermie en nappes.

### ***L'attribution des classes à chaque critère***

Le tableau de l'illustration 16, en page 35, synthétise les classes attribuées à chaque critère et la susceptibilité (colonne potentialité) qui a été attribuée à la classe. La sommation des susceptibilités dans chaque cellule permet d'attribuer une classe, qui aura une teinte différente sur la carte de l'Atlas : du gris pour la classe « défavorable » au bleu foncé pour la classe « très favorable ».

1. Notes de productivité des nappes :

Une hypothèse de départ a été formulée :

**Un forage au centre de chaque cellule est censé concentrer les prélèvements, sans impact dans les cellules adjacentes.**

Les classes s'articulent autour de valeurs de débits et sont traduites dans les notes suivantes :

- Note 1 (cl. défavorable) : *Débits soutirables inférieurs ou égaux à 5 m<sup>3</sup>/h ;*
- Note 2 (cl. peu favorable) : *Débits soutirables compris entre 5 et 10 m<sup>3</sup>/h ;*
- Note 3 (cl. favorable) : *Débits soutirables compris entre 10 et 50 m<sup>3</sup>/h ;*
- Note 4 (cl. très favorable) : *Débits soutirables supérieurs à 50 m<sup>3</sup>/h.*

2. Notes de température de la ressource :

Une hypothèse de départ a été formulée :

**Il n'y a pas, au moment de l'étude, d'impact thermique de la géothermie sur la température des nappes**

Les classes s'articulent autour de valeurs de températures et sont traduites dans les notes suivantes :

- Note 1 (cl. peu favorable) : *Températures de l'eau inférieures ou égales à 10 °C ;*
- Note 2 (cl. favorable) : *Températures de l'eau comprises entre 10 et 15 °C ;*
- Note 3 (cl. très favorable) : *Températures de l'eau supérieures à 15 °C.*

Remarques : il n'y a pas de classe « défavorable » concernant la température de l'eau. De plus, selon les objectifs recherchés (chauffage ou rafraîchissement), les classes 1 et 3 peuvent s'inverser. Dans cette étude, c'est le chauffage qui a été privilégié.

3. Notes de profondeurs d'accès à la ressource :

Les classes déterminées pour les profondeurs d'accès traduisent l'impact de la profondeur d'accès sur la susceptibilité de la ressource : de valeur trop faible ou trop forte, ce paramètre joue un rôle négatif, faible à moyenne, il joue un rôle positif. Trop faible, il est négatif car il y a alors des risques de remontée de nappe, trop fort, il engendre des coûts très élevés de foration et d'équipement des ouvrages.

Les classes s'articulent autour de valeurs de profondeurs et sont traduites dans les notes suivantes :

- Note 1 (cl. défavorable) : *Profondeurs d'accès inférieures ou égales à 5 m ou strictement supérieures à 100 m ;*
- Note 2 (cl. peu favorable) : *Profondeurs d'accès comprises entre 30 et 100 m ;*
- Note 3 (cl. favorable) : *Profondeurs d'accès comprises entre 15 et 30 m ;*
- Note 4 (cl. très favorable) : *Profondeurs d'accès comprises entre 5 et 15 m.*

4. Calcul de la note globale (susceptibilité de la ressource) :

La formule de calcul utilisée pour attribuer une note globale à une cellule est la suivante :

**NOTE GLOBALE = 2 \* NOTE DEBIT + NOTE PROFONDEUR + NOTE TEMPERATURE**

- Une zone **défavorable** sera une zone dans laquelle la note globale sera **inférieure ou égale à 5** ;
- Une zone **peu favorable** sera une zone dans laquelle la note globale sera **strictement supérieure à 5 et inférieure ou égale à 9** ;
- Une zone **favorable** sera une zone dans laquelle la note globale sera **strictement supérieure à 9 et inférieure ou égale à 14** ;
- Une zone **très favorable** sera une zone dans laquelle la note globale sera **strictement supérieure à 14** ;

A noter que le coefficient 2 attribué à la note de débit rend compte de la prépondérance de ce facteur par rapport aux deux autres.

Les calculs sont effectués seulement sur la première nappe rencontrée (ce qui est le cas dans plus de 90% des cas), par manque de données régionalisables sur les nappes plus profondes.

Le paramètre chimique n'a pas été pris en compte par manque de données.

Critère de potentialité géothermique	Classification des critères	Indexation des classes	Potentialité
Productivité de la nappe : Débit Potentiel pour 5 m de rabattement (m <sup>3</sup> /h)*	Q≤5	1	Défavorable
	5<Q≤10	2	Peu favorable
	10<Q≤50	3	Favorable
	50<Q	4	Très favorable
Température de la ressource (°C)	T≤10	2	Peu favorable
	10<T≤15	4	Très favorable
	15<T	3	Favorable
Profondeur d'accès à la ressource (m)	Prof≤5	1	Défavorable
	5<Prof≤15	4	Très favorable
	15<Prof≤30	3	Favorable
	30<Prof≤100	2	Peu favorable
	100<Prof	1	Défavorable
<b>Analyse multicritères (AMC = 2*Q+T+Prof)</b>		AMC≤5	Défavorable
		5<AMC≤9	Peu favorable
		9<AMC≤14	Favorable
		14<AMC	Très favorable

\* : quand l'épaisseur mouillée de la nappe ne permet pas un rabattement de 5 m (< 15 m), la valeur du rabattement tolérable est fixée à 1/3 de cette épaisseur.

*Illustration 16 : Répartition des classes et des susceptibilités utilisées dans l'analyse multicritères concernant la géothermie en nappe.*

#### 4.1.2. Les principaux résultats obtenus

Sur la carte de l'illustration 17 et dans le tableau de l'illustration 18, ont été reportées les différentes classes de susceptibilité de la ressource pour la géothermie en nappe, et ce, pour chacune des entités hydrogéologiques concernées.

Premier constat : la classe « Défavorable » n'est pas représentée pour ce type de géothermie en région PACA. Qui plus est, au sein des seules nappes alluviales, la classe « Peu favorable » n'est pas non plus représentée. La très grande majorité des cellules relève de la classe « Très favorable ». Néanmoins, au sein des entités alluviales de la Bléone, du Buëch, de l'Asse et de la haute Durance, les cellules « Favorables » sont largement plus nombreuses que les cellules « Très favorable », du fait pour l'essentiel des débits ou des profondeurs d'accès.

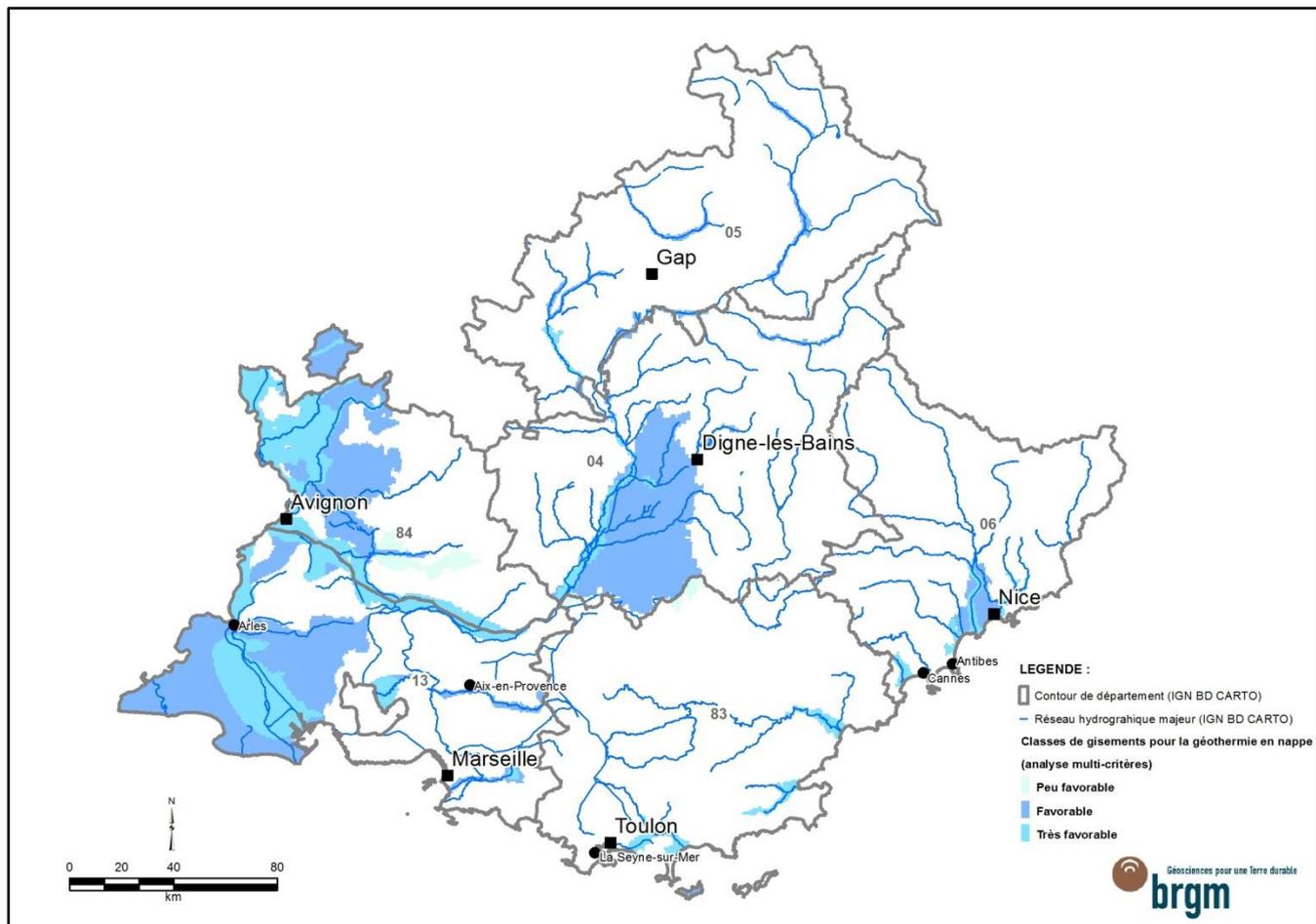


Illustration 17 : Carte de la susceptibilité de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.

Notice explicative de l'atlas des ressources géothermiques en région PACA

Entité	Libellé	Nombre de cellules avec susceptibilité						Total général
		Peu favorable		Favorable		Très favorable		
		Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	
PAC01A1	Alluvions de l'Aigues et du Lez					1 203	100,0	1 203
PAC01A2	Alluvions de l'Ouvèze					488	100,0	488
PAC01A3	Alluvions des Sorgues et de la Nesque			884	100,0			884
PAC01B	Alluvions récentes du Rhône de Viviers à Mornas					361	100,0	361
PAC01C	Alluvions récentes du Rhône entre Roquemaure et Avignon					149	100,0	149
PAC01F	Alluvions récentes du Rhône d'Avignon à Tarascon (secteur Tarascon)					138	100,0	138
PAC01G	Alluvions récentes du Rhône d'Avignon à Tarascon (secteur Avignon)					55	100,0	55
PAC01H	Alluvions récentes du Rhône de Tarascon à Arles					244	100,0	244
PAC02A	Alluvions récentes de la Haute-Durance et cônes de déjection d'affluents			507	97,9	11	2,1	518
PAC02C	Alluvions récentes de la Moyenne Durance					483	100,0	483
PAC02E	Alluvions récentes de la Basse Durance			334	16,0	1 755	84,0	2 089
PAC02F1	Alluvions récentes de l'Ubaye			90	100,0			90
PAC02G	Alluvions récentes du Buëch			241	65,5	127	34,5	368
PAC02H	Alluvions récentes de la Bléone			148	77,1	44	22,9	192
PAC02I	Alluvions récentes de l'Asse			164	99,4	1	0,6	165
PAC02J1	Alluvions récentes du Calavon			161	100,0			161
PAC02K1	Alluvions récentes de la Guisane			80	100,0			80
PAC03A	Alluvions récentes de l'Arc			316	100,0			316
PAC03A1	Alluvions récentes de l'Arc (plaine de Berre)					237	100,0	237
PAC03B	Alluvions récentes du Gapeau					192	100,0	192
PAC03C	Alluvions récentes de la Giscle et de la Môle					175	100,0	175
PAC03D	Alluvions récentes de l'Argens					204	100,0	204
PAC03E	Alluvions quaternaires de la basse vallée du Var					200	100,0	200
PAC03F2	Alluvions récentes de l'Huveaune			168	82,0	37	18,0	205
PAC03F3	Alluvions des îles d'Hyères - Porquerolles			46	100,0			46
PAC03F5	Alluvions récentes de la Siagne (secteur de Pégomas)					105	100,0	105
PAC03F6	Alluvions récentes du Loup					131	100,0	131
PAC03F8	Alluvions récentes des Paillons					129	100,0	129
PAC04A	Molasse miocène du Comtat Venaissin			2 146	100,0			2 146
PAC04B1	Molasse miocène des bassins d'Apt et de l'Encreme	532	100,0					532
PAC04C	Formations détritiques mio-pliocènes du plateau de Valensole	210	4,6	4 328	95,3	2	0,0	4 540
PAC04F	Cailloutis plio-quaternaires de la plaine de Crau			2 176	100,0			2 176
PAC04F1	Cailloutis plio-quaternaires de la plaine de Crau (sous couverture)					1 815	100,0	1 815
PAC04G	Formations deltaïques quaternaires de Camargue			2 853	100,0			2 853
PAC04H1	Sables blancs cénomaniens de Bédouin-Mormoiron			78	100,0			78
PAC05E	Poudingues pliocènes de la basse vallée du Var			389	100,0			389
PAC05F	Alluvions de la plaine de l'Eygoutier					98	100,0	98
PAC14A1	Alluvions récentes du Haut Drac			168	100,0			168
<b>Total général</b>		<b>742</b>		<b>15 277</b>		<b>8 384</b>		<b>24 403</b>

Illustration 18 : Répartition des susceptibilités de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.

## 4.2. MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE HORS NAPPE »

### 4.2.1. Principe retenu

Pour pallier l'absence d'information hors des zones de GTH en nappe (secteurs de karsts et des grands domaines hydrogéologiques), il a été décidé d'estimer la susceptibilité des terrains par rapport au gisement géothermique en dehors des prélèvements en nappe, la technologie pressentie étant celle des sondes géothermiques verticales. Le travail est réalisé sur la base d'un découpage spatial en cellules de 500 m de côtés, similaire et concordant avec le découpage ayant prévalu dans le cadre de la géothermie en nappe.

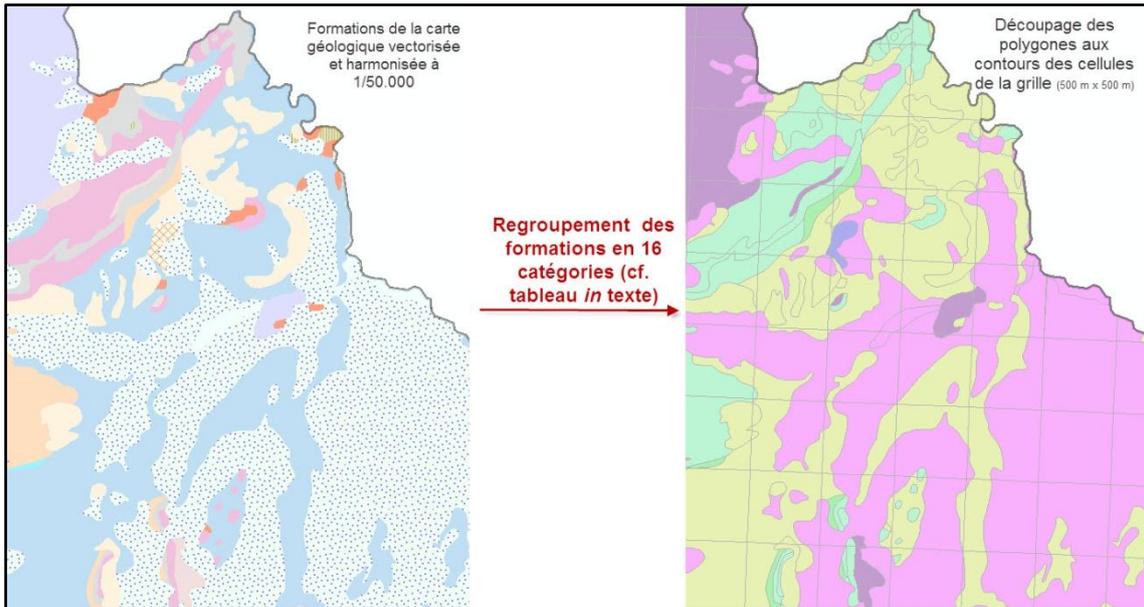
Le principe de l'approche est le suivant :

**Pour estimer la puissance extractible au sein d'une cellule de la maille, on considère que chaque maille sera « porteuse » d'une « puissance spécifique » ( $P_{SP}$ , exprimée en W/m), correspondant à la puissance moyenne restituable par un mètre de terrain traversé par une sonde verticale d'échange calorifique avec le sous-sol.**

L'attribution de la valeur unique de  $P_{SP}$  dans une cellule se fonde sur la nature **des terrains affleurants**, du fait d'une fréquente méconnaissance de la géologie et des structures sous-jacentes dans les 100 premiers mètres. Une modulation peut toutefois être faite à dire d'expert là où la nature et l'agencement des terrains sous-jacents sont connus.

Le travail a été mené de la façon suivante :

- À partir de la carte géologique vectorisée et harmonisée à 1/50.000 du BRGM, les items portant sur la lithologie des formations (en fait sur la litho-stratigraphie, mais avec une analyse pour se rapprocher de la lithologie) sont regroupés en catégories : les **types de roches**, eux-mêmes ressortissant de **familles**.
- Les polygones issus de ces regroupements sont ensuite découpés aux contours des cellules de 500 m de côtés (Illustration 19).



*Illustration 19 : Principe du regroupement des formations de la carte géologique vectorisée et harmonisée en 16 types lithologiques (voir tableau in texte).*

- À chaque type de roche a été affectée une valeur moyenne de  $P_{SP}$ , issue de la moyenne des données empiriques trouvée dans la littérature<sup>5</sup>. Quatre classes de puissances spécifiques ont conduit à **quatre  $P_{SP}$  moyennes**. Elles sont synthétisées dans les tableaux de l'illustration 20.

Le territoire de la région a été découpé en cellules de 500 m de côtés selon la grille générale présentée en introduction du chapitre 4.

---

<sup>5</sup> : Parmi les sources utilisées dans ce travail, on peut citer les abaques et tableaux issus de Pahud, 2002 et publiés dans la note d'Albouy *et al*, 2005.

Classe (= note)	1	2	3	4
Critère	défavorable	peu favorable	favorable	très favorable
Gamme Puiss. spec.	<= 25 W/m	25 à 55 W/m	55 à 70 W/m	> 70 W/m
Puiss. Spec. Moy.	12 W/m	40 W/m	62 W/m	75 W/m

CODE	TYPE ROCHES	NOTE	FAMILLE
1	Calcaires massifs ; Calcaires ; Calcaires et dolomies	3	Roches sédimentaires carbonatées
2	Calcaires marneux ; Calcaires et marnes ; Calcaires argileux, Calcaires gréseux, Calcaires quartzeux, Calcaires siliceux, Calcaires finement lités, Travertins	2	
3	Marnes ; Marno-calcaire ; Calcaire et marno-calcaire	2	
4	Dolomies	3	
5	Sables ; Galets ; Dunes marines ; alluvions	1	Roches sédimentaires détritiques non consolidées
6	Grès ; Molasses ; Löss ; Pérites ; Argilites, Calcarénites, Calcaires sableux	3	Roches sédimentaires détritiques consolidées
7	Conglomérats ; Poudingues ; Brèche ; Moraines ; scories et tufs volcaniques ; Cargneules, formations volcano-détritiques ou volcano-sédimentaires	3	
8	Flyschs	3	
9	Granite ; Microgranite ; Aplites ; Pegmatites ; Lamprophyre ; Gabbros ; Diorites	4	Roches magmatiques plutoniques
10	Basalte ; Rhyolite ; coulée de rhyolite et filon de rhyolite ; Laves dacitiques ; Andésites	3	Roches magmatiques volcaniques
11	Gneiss ; Cipolins ; Marbre ; Eclogites, Dolérites, Ophiolites ; Leptynites	4	Roches métamorphiques
12	Schistes ; Micaschistes ; calcschiste ; Quartzites (car souvent intercalés dans schistes et micaschistes) ; Houiller	4	
13	Migmatites ; anatexites ; agmatites	4	
14	Amphibolites	4	
15	Alluvions ; Formations anthropiques ; Eboulis ; Terres noires ; Tourbes récentes ; Gypse ; Moraines	2	Autres
16	Argiles ; Limons	2	

Illustration 20 : Liens entre les puissances spécifiques et les notes appliquées dans chaque cellule, et affectation de notes à différents types de roches, d'après les puissances spécifiques qui leur sont attribuées dans la littérature.

#### 4.2.2. Les principaux résultats obtenus

Les valeurs les plus fortes de  $P_{SP}$  se retrouvent sans surprise au sein des massifs cristallins présents dans la région : massif de l'Esterel et massifs alpins (Queyras, Mercantour...). De fortes valeurs de  $P_{SP}$  se rencontrent aussi au sein des formations primaires des Maures et dans la dépression permienne qui borde ce massif. Des valeurs moindres, mais non négligeables se rencontrent également dans les roches carbonatées massives et peu karstifiées (comme on peut en rencontrer dans le nord-est des Bouches-du-Rhône ou au sein du massif alpin).

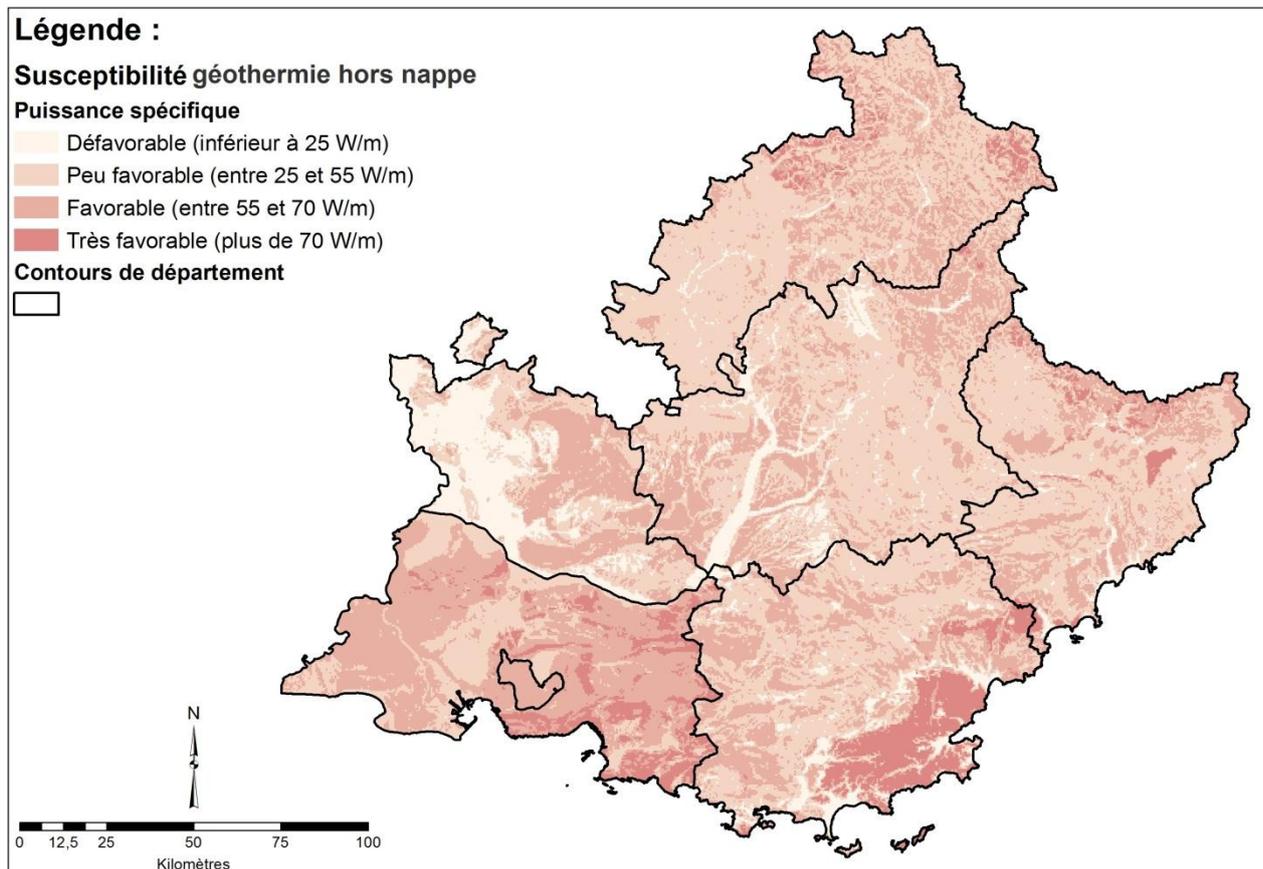
A *contrario*, les valeurs les plus faibles de  $P_{SP}$  se retrouvent dans les formations meubles ou peu consolidées, ou dans une moindre mesure, au sein des formations ayant la plus forte porosité. Se dessinent ainsi le tracé des vallées et des plaines alluviales.

Dans tous les cas, il est important de préciser :

- d'une part qu'on a affaire à des **ordres de grandeurs** de  $P_{SP}$  (ce qui explique le choix de classes de large extension) ;

- d'autre part, en particulier dans les régions de moindre connaissance de la géologie des 100 m premiers mètres, les résultats *in situ* pourront s'avérer différents des résultats attendus.

**Dans tous les cas, il faut également répéter que ce travail, réalisé à petite échelle, n'exonère en rien d'études locales menées à l'échelle d'un site.**



*Illustration 21 : Carte de représentation des puissances spécifiques moyennes affectées à chaque cellule de la maille régionale.*

### 4.3. LE FONCTIONNEMENT DU SITE

L'atlas des ressources géothermiques de très basse énergie est accessible sur le site :

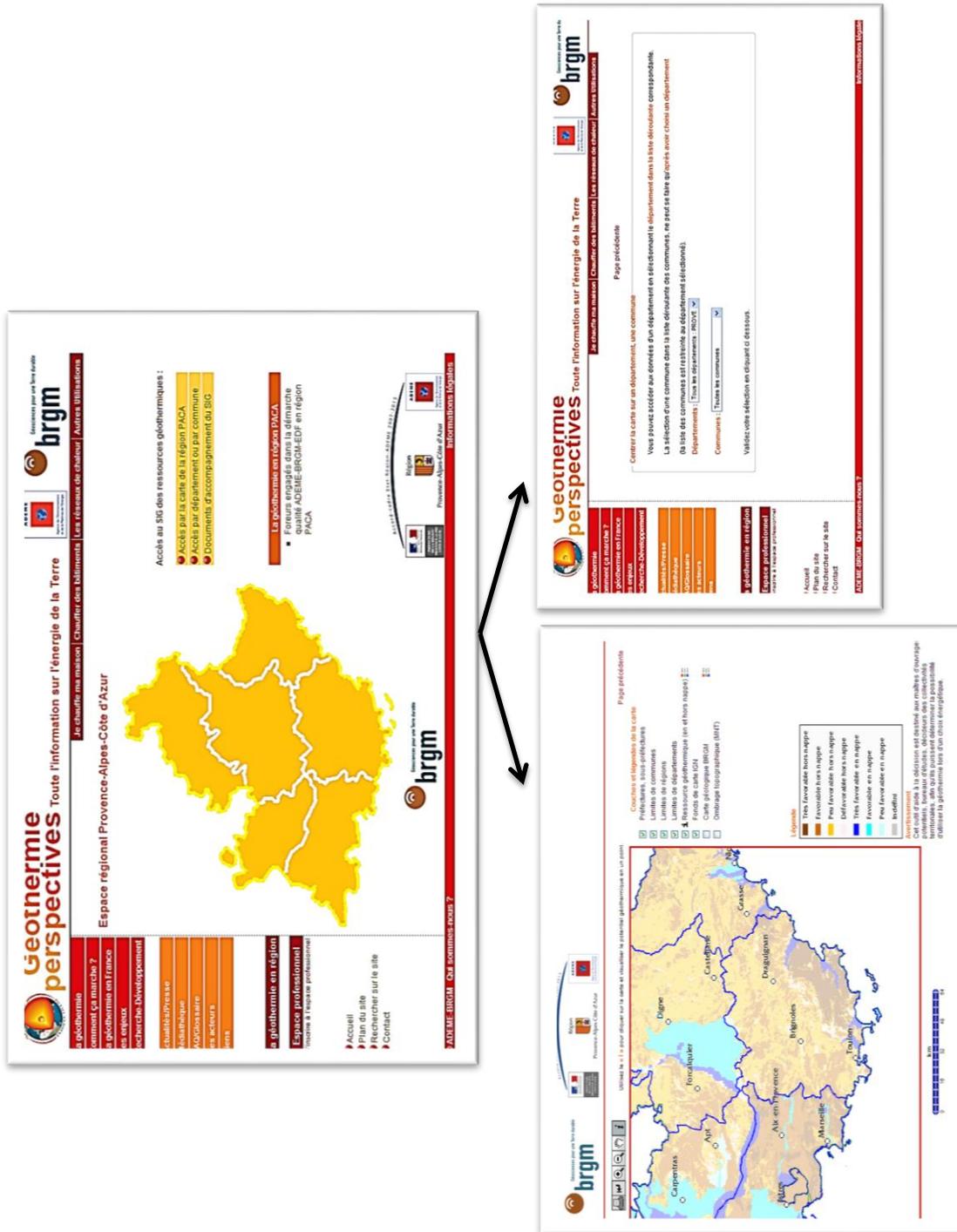
<http://www.geothermie-perspectives.fr>

Ce site, cofinancé par l'ADEME et le BRGM, héberge de nombreuses informations relative à cette thématique, tant sur le plan technique que sur le plan réglementaire. Il abrite également les atlas géothermiques de plusieurs régions, établis selon des critères similaires, même s'ils sont le reflet des contextes locaux.

Le site de la région PACA est donc accessible *via* le bouton « la géothermie en région », puis, en cliquant sur la région PACA qui apparaît sur la carte de France.

Une fois sur la région, il est possible d'accéder à la carte soit par département ou par commune grâce à des listes déroulantes, soit directement par la carte et des zooms successifs (Illustration 22). Le choix des fonds de carte se fait en cliquant sur les boutons correspondant.

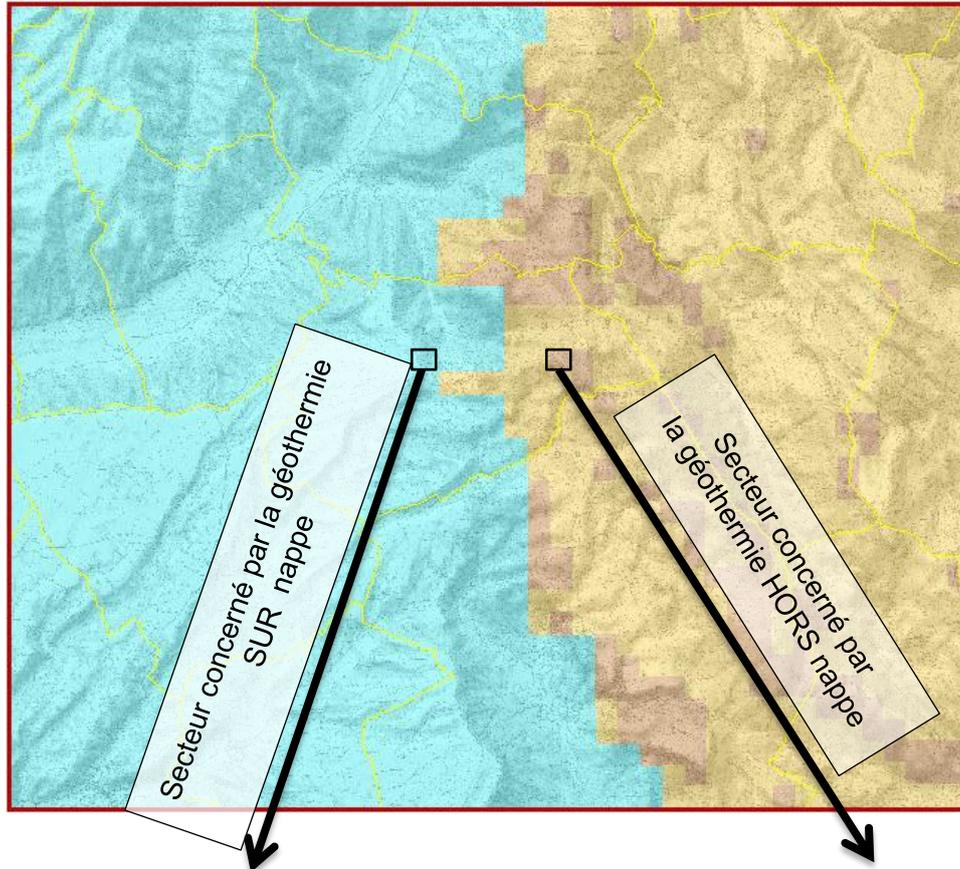
Un clic sur un point de la carte produira l'apparition d'une fiche (valable pour l'ensemble de la cellule concernée) correspondant soit à une ressource de géothermie en nappe, soit à une ressource de géothermie hors nappe (Illustration 23).



Accès par la liste de départements  
ou de communes de la région

Accès par la carte

Illustration 22 : Accès aux données de l'atlas PACA sur le site Géothermie Perspectives



**brgm** Ressource pour un Territoire

**AVERTISSEMENTS :**  
Cet outil d'aide à la décision est destiné aux maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Les renseignements publiés dans la carte et sur les fiches n'exonèrent pas les utilisateurs d'une étude préalable. Pour plus de détail sur la signification des chiffres, couleurs et termes et sur la manière dont ils ont été obtenus on se référera à la NOTICE DE l'ATLAS

**Ressource Géothermique calculée dans la maille LY287 située sur la commune de : SAINT-JURS (04184)**

**Ressource géothermique en nappe**  
Ressource : Favorable

Libellé de la nappe	Débit moyen (m <sup>3</sup> /h)	Profondeur moyenne (m)	Température moyenne (°C)	Ressource
Formations détritiques mio-pliocènes du bassin de Digne - Valensole	30	40	14	Favorable

(\*) Valeur moyenne du débit à priori extractible dans la maille à partir de la nappe de 500 m de côté.

**Coupe schématique**

**Positionnement du point sélectionné**  
X (Lambert 93) : 011010 m

**brgm** Ressource pour un Territoire

**AVERTISSEMENTS :**  
Cet outil d'aide à la décision est destiné aux maîtres d'ouvrages potentiels, bureaux d'études, décideurs des collectivités territoriales, afin qu'ils puissent déterminer la possibilité d'utiliser la géothermie lors d'un choix énergétique. Les renseignements publiés dans la carte et sur les fiches n'exonèrent pas les utilisateurs d'une étude préalable. Pour plus de détail sur la signification des chiffres, couleurs et termes et sur la manière dont ils ont été obtenus on se référera à la NOTICE DE l'ATLAS

**Ressource Géothermique calculée dans la maille LY287 située sur la commune de : SAINT-JURS (04184)**

**Ressource géothermique hors nappe**  
Ressource géothermique offerte par des sondes géothermiques : Favorable  
Puissance spécifique pressurée\* (W/m) : 56  
\* Puissance moyenne extractible dans la maille de 500 m de côté par 1 m de sonde

**Pompe à chaleur**

**Positionnement du point sélectionné**  
X (Lambert 93) : 912893 m  
Y (Lambert 93) : 1885453 m

\*d'après www.ADER.ch

Illustration 23 : Nature des informations obtenues par un clic sur une cellule concernée par la géothermie sur nappe et par la géothermie hors nappe.

## 5. Conclusion

La détermination des ressources géothermiques très basse énergie dans la région PACA a été effectuée en distinguant la géothermie « en nappe » (énergie thermique issue des eaux souterraines et un circuit de surface) et la géothermie « hors nappe » (énergie tirée des échanges entre une sonde géothermique verticale et les roches du sous-sol).

Cette distinction repose sur les propriétés aquifères des entités hydrogéologiques qui ont servi de base à ce travail. Un atlas du gisement des ressources géothermiques a ainsi été établi, avec, comme hypothèse de base que les informations relatives à la géothermie en nappe seraient prépondérantes sur celles issues de la géothermie hors nappe. Autrement dit, si une zone est concernée par les deux thématiques, ne sera reportée dans l'atlas que la thématique relative à la géothermie en nappe.

La région a ainsi été découpée en 129 515 cellules carrées de 500 m de côtés à l'intérieur desquelles un paramètre traduisant la susceptibilité du milieu à la géothermie hors nappe, et, le cas échéant (dans le cas d'aquifères régionaux reconnus), à la géothermie en nappe.

Les données sont disponibles sur le site [www.geothermie-perspectives.fr](http://www.geothermie-perspectives.fr).

Les données régionalisées de débits, de profondeurs, de température et de chimie sont issues de données ponctuelles provenant de la Banque des données du Sous-Sol ou d'études ponctuelles, et ne peuvent être considérées que comme des données moyennes.

Par convention, il a été décidé que la susceptibilité des nappes vis-à-vis de la géothermie en nappe apparaîtrait dans les teintes bleutées (du plus clair, le plus défavorable, au plus foncé, le plus favorable), tandis que celle des terrains vis-à-vis de la géothermie hors nappe apparaîtrait dans les teintes marron (du plus clair, le plus défavorable, au plus foncé, le plus favorable).

Il faut préciser seule est concernée la ressource potentiellement extractible (en quelques sortes, le gisement) et ne prend pas en compte ni la demande en énergie, ni les enjeux environnementaux ou d'occupation de l'espace qui pourraient exister au droit de cette ressource. Les systèmes de pompes à chaleur étant réversibles, l'énergie géothermique peut être utilisée aussi bien à des fins de chauffage que de rafraîchissement. Dans le premier cas, en nappe, les rejets seront plus froids que les prélèvements, dans le second cas, ils seront plus chauds.

L'analyse des hypothèses et scénarios permettant d'aborder la problématique du « potentiel géothermique mobilisable », qui résulte entre autres d'une confrontation entre le gisement défini ici et la demande énergétique est menée dans le cadre d'un comité de réflexion, constitué de l'ADEME PACA, de la DREAL PACA et du BRGM, et fera l'objet d'un rapport spécifique.

## 6. Bibliographie

La liste ci-dessous est orientée sur les études relatives à la géothermie dans la région PACA, en plus des quelques documents ayant permis la réalisation de l'atlas.

**Albouy L., Foucher J.C., Goyeneche O.** (2005) – Capteurs géothermiques verticaux pour pompes à chaleur. Aspects réglementaires, règles de l'art et qualification des entreprises de forage. Note BRGM – CITEG.

**Barbut J., Garnier J.L.**, (1990) – Hôpital Lenval, Nice (06). Étude d'une préfaisabilité thermique d'un doublet sur les eaux souterraines pour la climatisation du nouvel hôpital. Rapport BRGM R31328 PAC 4S 90, 11 p., 4 fig.

**Bergeron G., Gounon A., Garnier J.L.**, (1993) – Hôpital Lenval, Nice (06). Utilisation des eaux souterraines pour la climatisation de l'hôpital Lenval à Nice (06). Réalisation d'un second forage, compte-rendu de résultats. Rapport BRGM R36825, 34 p., 5 fig., 4 ann.

**Dellery B., Garnier J.L.** (1982) – Étude de faisabilité pour le chauffage par pompe à chaleur de la C.P.A.M. à Digne (04). Rapport BRGM 82 SGN 188 PAC, 12 p., 3 fig., 1 ann.

**Durozoy G.** (1972) – Évaluation des ressources hydrauliques sur les sites des stations de sport d'hiver prévus dans les Alpes Méridionales. Rapport BRGM 72 SGN 092 PRC, 57 p., 8 fig., 3 ann.

**Garnier J.L. Sauty J.P. et coll.** (1982) – Terre-plein de Fontvieille (Monaco). Installation de pompes à chaleur pour le chauffage et la climatisation des locaux. Rapport de faisabilité BRGM – Phase 1. 82 SGN 328 PAC, 23 p., 3 fig., 3 pl.

**Garnier J.L.**, (1988) – Projet de climatisation du musée Calvet à Avignon (84) par l'utilisation des eaux souterraines. Préfaisabilité et incidence hydrodynamique sur les niveaux de la nappe. Rapport BRGM 88 SGN 851 PAC, 16 p., 7 fig.

**Garnier J.L.**, (1990) – Musée Trémois, Nice (06). Étude d'une préfaisabilité thermique d'une pompe à chaleur sur les eaux souterraines – résultats des simulations complémentaires. Rapport BRGM R31749 PAC 4S 90, 21 p., 4 fig.

**Garnier J.L., Gounon A.** (1981) – Utilisation des eaux souterraines pour le chauffage et la climatisation de l'usine TELEMECANIQUE sur la zone industrielle de Carros (06). Rapport de fin d'étude BRGM 81 SGN 519 PAC, 46 p., 7 fig., 2 ann.

**Garnier J.L., Gounon A.** (1981) – Ville de Nice (06). Palais des Congrès et de la Musique. Utilisation des eaux souterraines pour le chauffage et la climatisation. Rapport d'étude BRGM 81 SGN 621 PAC, 58 p., 10 fig., 3 ann.

**Garnier J.L., Gounon A. et coll.** (1983) – Aéroport International de Nice – Côte d'Azur (06). Chauffage et climatisation par pompe à chaleur. Étude de faisabilité de captage de la source froide. Rapport BRGM 83 SGN 306 PAC, 112 p., 26 pl., 5 ann.

**Garnier J.L., Gounon A., Vadon J.** (1989) – Forum Nice - Lingostière (06). Climatisation et chauffage par pompe à chaleur. Réalisation des ouvrages de pompage et de réinjection. Rapport BRGM de fin de travaux 89SGN 576 PAC, 51 p., 4 fig., 8 pl.

**Garnier J.L., Sedan O., avec la collaboration de Gounon A. et de Vadon J.** (1989) – SIEVI, Carros (06). Champ de captage de Carros (06). Étude des possibilités d'accroissement des débits prélevés. Simulation sur modèle mathématique. Rapport de fin d'étude BRGM 89 SGN 119 PAC, 30 p., 10 fig., 2 ann.

**Garnier J.L., Silvestre J.P., avec la collaboration de Vadon J.** (1988) – Établissement thermal de Berthemont-les-Bains, commune de Roquebillière (06). Amélioration des conditions d'alimentation en eau thermale. Identification des ressources et perspectives de développement. Rapport d'étude BRGM 88 SGN 723 PAC, 44 p., 10 fig., 5 ann.

**Glantzboeckel C.** (1980) – Étude des ressources géothermiques basse énergie dans le couloir rhodanien et en Provence littorale. Rapport BRGM 80 SGN 088 PAC, 40 p., 3 fig., 2 ann.

**Lalbat F.** (2006) - Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France). Mémoire de thèse de Doctorat en Sciences de la Terre - Hydrogéologie de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. 234 p., 116 fig., 2 ann.

**Lindal B.** (1973) – Industrial and other Applications of Geothermal Energy. *In* Geothermal Energy (ed. HCH Armstead), Earth Science, v. 12, UNESCO, Paris, p. 135-148.

**Moulin M., Salquèbre D., Sany F.** (2013) – Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse. Actualisation de la synthèse hydrogéologique de la région PACA. Rapport final BRGM, RP-61846-FR, à paraître.

**Ouvrage collectif** (1980) – Le gisement de charbon du bassin de l'Arc – Provence occidentale. Mémoire BRGM n° 22.

**Pahud D.** (2002) - Énergie géothermique et stockage de chaleur. Publication du Département Constructions et Territoire du Laboratoire d'Énergie, d'Écologie et d'Économie de l'École Universitaire Professionnelle de Suisse italienne.

**Syssau A., Dellery B., avec la collaboration de Chaballier P.** (1982) – Société Hôtelière Martinez-Concorde – Banque Worms, Nice (06). Utilisation des eaux souterraines pour la climatisation de l'hôtel Martinez à Cannes. Recherche d'un complément de débit par la réalisation d'un second captage. Rapport BRGM 82 SGN 553 PAC, 24 p., 5 fig.



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France  
Tél. : 02 38 64 34 34

**Service géologique régional Provence-Alpes-Côte d'Azur**

117 avenue de Luminy  
BP 168

13276 Marseille cedex  
Tél. : 04 91 17 74 77