

Document public

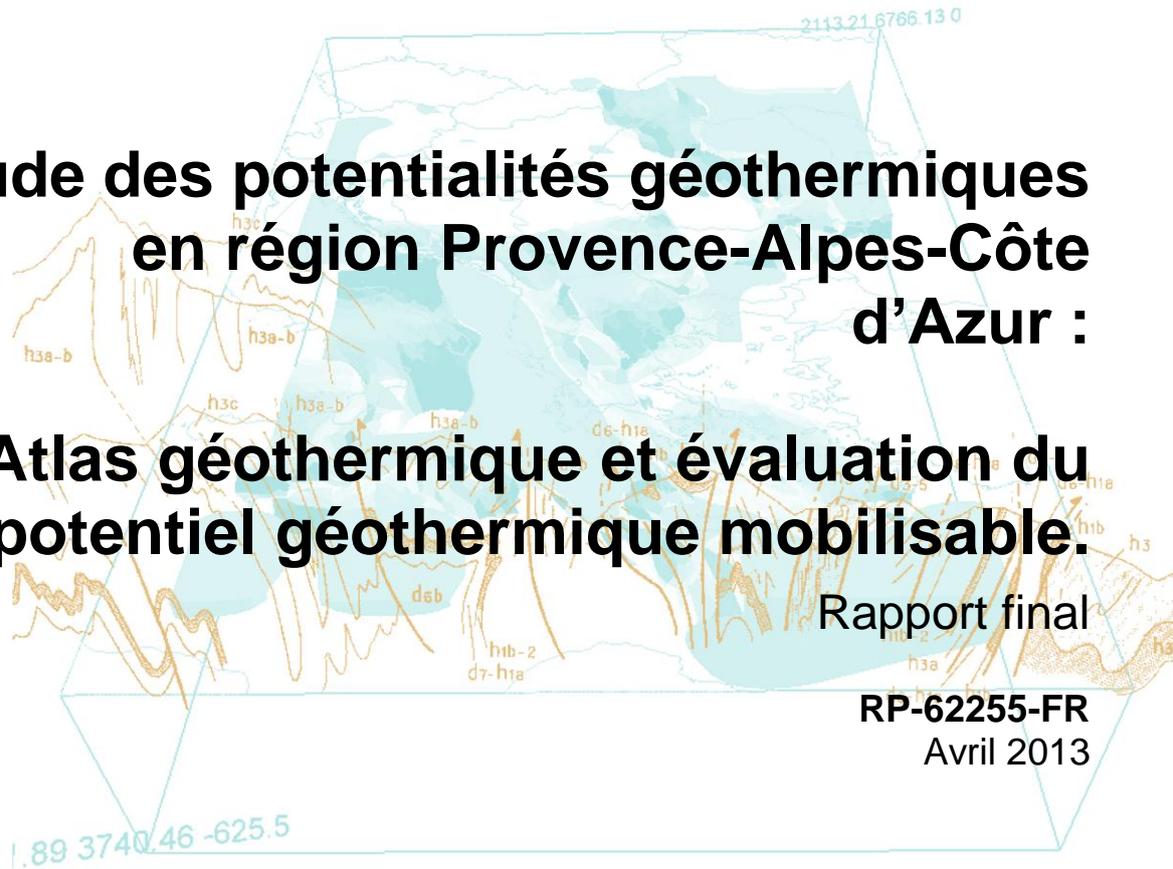


Etude des potentialités géothermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur :

Atlas géothermique et évaluation du potentiel géothermique mobilisable.

Rapport final

RP-62255-FR
Avril 2013



Accord-cadre Etat-Région-ADEME 2007-2013



Etude des potentialités géothermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur :

Atlas géothermique et évaluation du potentiel géothermique mobilisable.

Rapport final

RP-62255-FR

Avril 2013

Étude réalisée dans le cadre du projet de Service public du BRGM 08GTHB16

M. Moulin

Avec la collaboration de

H. Bauer-Cauneille, M. Faure, J. Percheval & V. Lyant

Vérificateur :

Original signé par J.C. Martin

Date : 19 avril 2013

Approbateur :

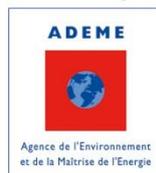
Original signé par C. Arnal

Date : 23 avril 2013

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

Accord-cadre Etat-Région-ADEME 2007-2013



Mots-clés : Géothermie en nappe, Géothermie Hors Nappe, gisement géothermique, Potentiel mobilisable, Atlas géothermique.

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

Moulin M., avec la coll. de Bauer-Cauneille H., Faure M., Percheval J. & Lyant V. (2013) – Etude des potentialités géothermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Atlas Géothermique et évaluation du potentiel géothermique mobilisable. Rapport final. BRGM/RP- 62255 -FR, 96 p., 43 ill., 5 ann., 1 CD.

Synthèse

Le projet d'évaluation des potentiels mobilisables en géothermie de faible profondeur, que ce soit à partir de la géothermie issue de l'exploitation de forages d'eau (géothermie sur nappe) ou des échanges entre des sondes géothermiques verticales et le sous-sol (géothermie sur sondes) est né du désir de l'ADEME – qui a cofinancé ce projet avec le BRGM – de la DREAL PACA et de la Région PACA de comparer cette filière aux autres filières d'Energies Non Renouvelables dans la région.

Ce travail a été suivi et piloté par un Comité de Pilotage, constitué de l'ADEME, de la DREAL PACA, de la Région et du BRGM, maître d'œuvre principal pour la partie « atlas ». La rédaction de la partie « potentiel mobilisable » est le fruit d'une collaboration étroite au sein du Comité de Pilotage.

Le présent rapport se décompose en deux parties, qui correspondent à deux étapes du projet : la mise en ligne d'un atlas des ressources géothermiques en région PACA, puis les évaluations de potentiel mobilisable.

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.

CES DONNEES NE PEUVENT ET NE DOIVENT PAS ÊTRE UTILISEES COMME SEULE SOURCE D'INFORMATION. elles n'ont notamment pas vocation à se substituer à une étude préalable à un projet.

La représentation cartographique, présentée en ligne sur le site <http://www.geothermie-perspectives.fr>, 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 uniquement 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).

Les calculs de potentiel mobilisable ont été effectués sur la base d'une méthodologie qui a permis, en tout point de la région, de confronter la demande énergétique des bâtiments (en s'appuyant sur la BD TOPO® de l'IGN) et l'énergie disponible issue de la géothermie, que ce soit la géothermie sur nappes ou sur sondes. La grille de calcul est identique à celle qui a servi à l'établissement de l'atlas, les données « de base » étant contenues dans des cellules de 500 m de côtés.

Les principaux résultats de ce travail montrent que, même si le potentiel mobilisable est bien inférieur au potentiel disponible, il n'en demeure pas moins que, mis à part dans les deux départements strictement alpins, il est élevé. Il existe des disparités d'un département à l'autre, en fonction non seulement de l'(hydro)géologie, mais aussi de la densité et de la nature des contraintes de l'occupation de l'espace et de la demande énergétique.

Ainsi, le potentiel mobilisable issu de la géothermie en nappe est du même ordre de grandeur que celui de la géothermie sur sondes (respectivement : 15 600 000 MWh/an et 22 400 000 MWh/an), avec cependant de fortes disparités entre les départements, qui tiennent aux contextes (hydro)géologiques différents, mais aussi à l'existence de contrastes en termes d'occupation de l'espace : ce potentiel varie de 19 000 000 MWh/an dans les Alpes-Maritimes à 500 000 MWh/an (pour les deux types de géothermie).

Les secteurs les plus « prometteurs » vis-à-vis de la géothermie en nappe sont les Alpes-Maritimes, les Bouches-du-Rhône et le Vaucluse, pour la géothermie sur sondes il s'agit plutôt des Bouches-du-Rhône, le Var ou les Alpes-Maritimes.

Les départements des Bouches-du-Rhône ou du Var ont un potentiel mobilisable sensiblement plus fort (plus de 3 fois plus fort) en géothermie sur sondes qu'en géothermie sur nappe, alors que la situation est inversée dans les Alpes-Maritimes ou le Vaucluse.

Les départements des Alpes-de-Haute-Provence et des Hautes-Alpes ont des potentialités moindres que les autres départements, du fait en grande partie de la faible densité de population existante, ou qui est prévue dans les vingt prochaines années.

Il convient de tempérer la précision de ces projections en rappelant notamment un certain nombre de points de vigilance, qui portent sur les aspects économiques, mais aussi sur l'impact des sondes géothermiques verticales sur le sous-sol et sur la fiabilité des PAC dans leur utilisation sur le long terme. Il conviendra de répondre à ces questions avant d'envisager le développement à grande échelle, notamment de la géothermie sur sondes.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Généralités	13
2.1 QU'EST-CE QUE LA GEOTHERMIE ?	13
2.2 LES DIFFERENTS TYPES DE GEOTHERMIE.....	14
2.2.1 La géothermie de haute énergie (T°C > 150 °C)	14
2.2.2 La géothermie de moyenne énergie (T°C : 90 à 150°C).....	15
2.2.3 La géothermie de basse énergie (T°C : 30 à 90°C).....	15
2.2.4 La géothermie de très basse énergie (T°C < 30 °C).....	15
2.3 LA TECHNOLOGIE DES POMPES A CHALEUR	16
3. L'hydrogéologie en région PACA et la géothermie	19
3.1 LES PRINCIPAUX AQUIFERES EN REGION PACA.....	19
3.2 LES AQUIFERES ALLUVIAUX	21
3.3 LES AUTRES PRINCIPAUX AQUIFERES SEDIMENTAIRES.....	25
3.3.1 La nappe de la molasse du Miocène du Comtat	25
3.3.2 La nappe de la Crau	27
3.3.3 Conclusions sur la géothermie en nappe en PACA.....	29
3.4 LA GEOTHERMIE HORS-NAPPE EN PACA.....	29
4. Elaboration de l'atlas régional	31
4.1 MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE SUR NAPPE »	33
4.1.1 Principe de la réalisation: l'analyse multicritères	33
4.2 L'ATTRIBUTION DES CLASSES A CHAQUE CRITERE	35
4.2.1 Les principaux résultats obtenus.....	37
4.3 MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE HORS NAPPE »	40
4.3.1 Principe retenu.....	40
4.3.2 Les principaux résultats obtenus.....	42
4.4 LE FONCTIONNEMENT DU SITE	43
5. Conclusion concernant l'atlas régional	47

6. Acquisition des termes du bilan.....	51
6.1 LA GEOTHERMIE, UNE RESSOURCE CONSOMMEE LOCALEMENT	51
6.2 EVALUATION DE LA DEMANDE	51
6.2.1 Type de bâti retenu.....	51
6.2.2 Principe du calcul de la demande énergétique des bâtiments	51
6.2.3 Récapitulation concernant la demande et représentation cartographique.....	54
6.3 CALCUL DE L'ENERGIE DISPONIBLE ISSUE DE LA GEOTHERMIE	56
6.3.1 Les hypothèses retenues	56
6.3.2 L'évaluation du « gisement » (énergie disponible)	59
7. Evaluation du potentiel mobilisable.....	63
7.1 DEFINITION	63
7.2 INTEGRATION DU TAUX D'EQUIPEMENT EN PAC GEOTHERMIQUES	63
7.3 SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE RETENUE	65
7.4 LE CONTEXTE "GRENELLE"	67
7.4.1 Objectifs "Grenelle" nationaux	67
7.4.2 Régionalisation des objectifs "Grenelle"	67
7.5 LES RESULTATS.....	68
7.5.1 Calcul sur l'ensemble des cellules	68
7.5.2 Calcul sur les cellules éligibles uniquement.....	68
7.5.3 Calcul du potentiel mobilisable par type de géothermie	68
7.6 LES SCENARIOS FUTURS	69
7.7 CALCUL DU POTENTIEL NET SUR LES TROIS SCENARIOS TEMPORELS	69
7.8 POINTS DE VIGILANCE	70
7.8.1 L'aspect économique.....	70
7.8.2 Les sondes géothermiques, quel impact environnemental ?.....	70
7.8.3 Les PAC sur nappes, quels effets sur la nappe ?	71
8. Conclusions.....	73
9. Bibliographie	75

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte de températures des grands aquifères profonds en France (www.geothermie-perspectives.fr).....	14
Illustration 2 : Evolution du nombre de PAC en France (www.afpac.org/marche-pac.php).....	14
Illustration 3 : Différentes applications de la Géothermie (version « francisée » de B. Lindal, 1973).....	16
Illustration 4 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC (www.energie-edessa.com).....	17
Illustration 5 : Les grands types de formations constituant les entités hydrogéologiques dans la région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).....	20
Illustration 6 : Localisation des principales nappes susceptibles de délivrer des débits importants en région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).	21
Illustration 7 : Coupe schématique en 3D des ruptures de terrasses.	23
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).....	24
Illustration 9 : Carte et coupes de l'aquifère de la molasse miocène du Comtat (in Lalbat, 2006).	25
Illustration 10 : coupe NE – SO à travers la plaine de la Crau.....	28
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.....	32
Illustration 12 : Données de débits spécifiques recueillies en BSS, soit directement, soit par reconstitution à partir des débits portés dans les dossiers.....	34
Illustration 13 : Notions de nappes libres et captives (images ©2009 Energie Service).....	34
Illustration 14 : Données portant sur les profondeurs d'accès à la nappe, recueillies en BSS.....	35
Illustration 15 : Données de température de l'eau recueillies en BSS.....	35
Illustration 16 : Répartition des classes et des susceptibilités utilisées dans l'analyse multi-critères concernant la géothermie en nappe.	37
Illustration 17 : Carte de la susceptibilité de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.	38
Illustration 18 : Répartition des susceptibilités de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.	38
Illustration 19 : Principe du regroupement des formations de la carte géologique vectorisée et harmonisée en 16 types lithologiques (voir tableau in texte).	41
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.....	42
Illustration 21 : Carte de représentation des puissances spécifiques moyennes affectées à chaque cellule de la maille régionale.....	43
Illustration 22 : Accès aux données de l'atlas PACA sur le site Géothermie Perspectives	44
Illustration 23 : Nature des informations obtenues par un clic sur une cellule concernée par la géothermie sur nappe et par la géothermie hors nappe.....	45
Illustration 24 : Calcul de la demande en énergie du bâti fondé sur la typologie BD TOPO de l'IGN.	53
Illustration 25 : Récapitulatif du calcul de la demande énergétique par département (hypothèse consommation : 150 kWh/(m ² .an)).	54

Illustration 26 : Application des données issues du bâti sur la grille à mailles de 500 m de côtés	55
Illustration 27 : les enjeux environnementaux et leurs coefficients d'abattement	58
Illustration 28 : Tableau indiquant la relation entre débit soutirable et puissance thermique extractible. ...	59
Illustration 29 : Exemple de calcul de la Puissance spécifique équivalente dans une cellule (P_{SP} : puissance spécifique moyenne d'une classe) et de la puissance extractible P_{TE}	60
Illustration 30 : Sommation de la puissance extractible en géothermie par département.....	60
Illustration 31 : Sommation de l'énergie disponible issue de la géothermie par département.	61
Illustration 32 : Marché français des PAC inférieures à 50 kW, livrées et facturées (AFPAC).	64
Illustration 33 : Nombre de logements (Source INSEE) et estimation du nombre de bâtiments totaux et équipés en PAC, en France (Comm. ADEME PACA).	65
Illustration 34 : Synoptique de la méthodologie de détermination du potentiel géothermique mobilisable.	67
Illustration 35 : Résumé des objectifs "Grenelle" nationaux pour la géothermie.....	67
Illustration 36 : Estimation des objectifs "Grenelle" régionalisés à PACA.	67
Illustration 37 : Calcul du potentiel mobilisable en PACA mené sur l'ensemble des cellules de la grille de calcul.	68
Illustration 38 : Calcul du potentiel mobilisable en PACA mené sur les cellules éligibles de la grille de calcul.	68
Illustration 39 : Calcul du potentiel mobilisable en PACA pour chacun des types de géothermie.	68
Illustration 40 : Estimation des taux d'équipement dans le futur en PACA.	69
Illustration 41 : Potentiel mobilisable en fonction des prévisions de taux d'équipement en PACA.....	69
Illustration 42 : Evaluation du potentiel mobilisable régional en introduisant un coefficient réducteur d'utilisation de 10 % sur les deux types de géothermie.....	71
Illustration 43 : Evaluation du potentiel mobilisable régional en introduisant un coefficient réducteur d'utilisation de la géothermie sur nappes de 30 %, et et de 90 % pour la géothermie sur sondes.....	71

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartes des puissances extractibles par la géothermie sur nappes et par la géothermie sur sondes.....	77
Annexe 2 : Cartes des coefficients d'abattement liés enjeux environnementaux ou aux contraintes d'occupation de l'espace.....	81
Annexe 3 : Carte de la demande en énergie.....	85
Annexe 4 : Carte du potentiel mobilisable, calculé au sein des cellules éligibles	89
Annexe 5 : Evaluation de la sensibilité aux différentes valeurs du coefficient d'abattement lié aux contraintes d'occupation de l'espace dans les zones à faible enjeu	93

PREMIERE PARTIE :

**ÉLABORATION DE L'ATLAS DES
RESSOURCES GÉOTHERMIQUES
EN RÉGION PROVENCE-ALPES-
CÔTE D'AZUR**

1. Introduction

L'évaluation des potentiels mobilisables en géothermie de faible profondeur, que ce soit à partir de la géothermie issue de l'exploitation de forages d'eau (géothermie sur nappe) ou des échanges entre des sondes géothermiques verticales et le sous-sol (géothermie sur sondes) est né du désir de l'ADEME – qui a cofinancé ce projet avec le BRGM – de la DREAL PACA et de la Région PACA de comparer cette filière aux autres filières EnR dans la région.

Ce travail a été suivi et piloté par un Comité, constitué de l'ADEME, de la DREAL PACA, de la Région et du BRGM, maître d'œuvre principal pour la partie « atlas ». La rédaction de la partie « potentiel mobilisable » est le fruit d'une collaboration étroite au sein du Comité de Pilotage.

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)¹.

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 représentation cartographique, présentée en ligne sur le site <http://www.geothermie-perspectives.fr>, 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

¹ : 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 ? ».

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).

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 km² 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/m². Ces valeurs peuvent être cependant nettement supérieures dans certaines zones instables du globe, et même varier de façon importante dans les zones continentales stables. 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^{ème} 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.

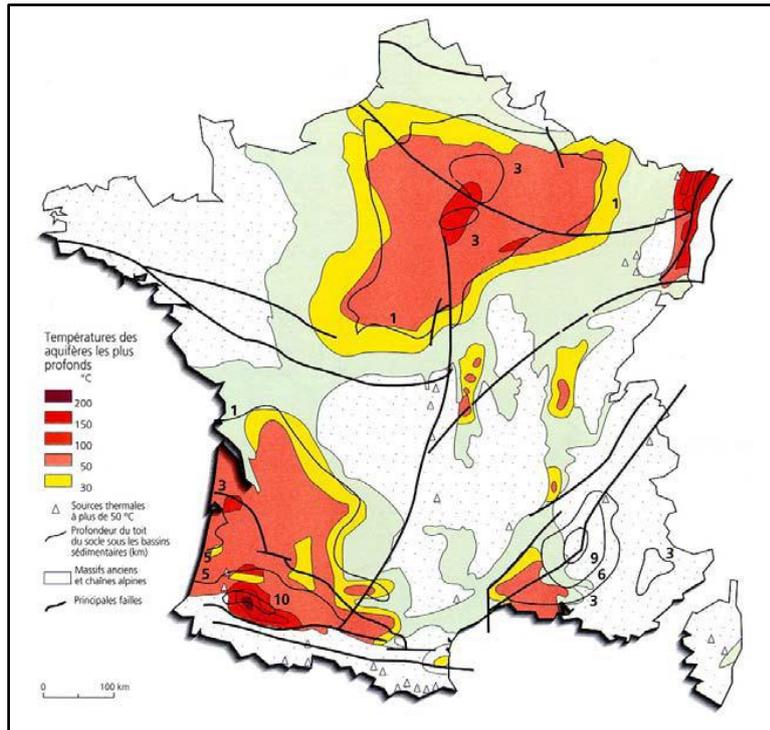


Illustration 1 : Carte de températures des grands aquifères profonds en France (www.geothermie-perspectives.fr).

	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Sol / Sol et Sol / Eau	7 700	5 400	6 800	7800	9 600	9600
Eau / Eau		3 600	4 900	5 400	8 850	9 000
Total	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).

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) :

2.2.1 La géothermie de haute énergie (T°C > 150 °C)

La géothermie haute enthalpie ou haute température concerne les fluides qui atteignent des températures supérieures à 150°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.

2.2.2 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.

2.2.3 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.

2.2.4 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.

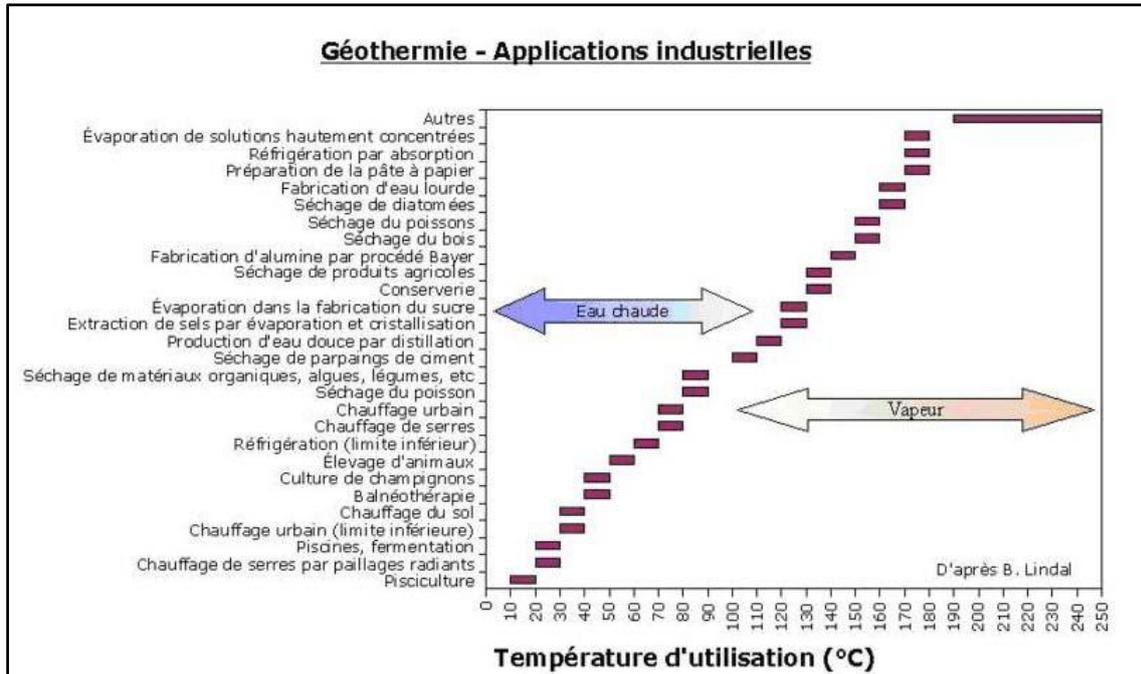


Illustration 3 : Différentes applications de la Géothermie (version « francisée » de B. Lindal, 1973).

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) abaisse 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.

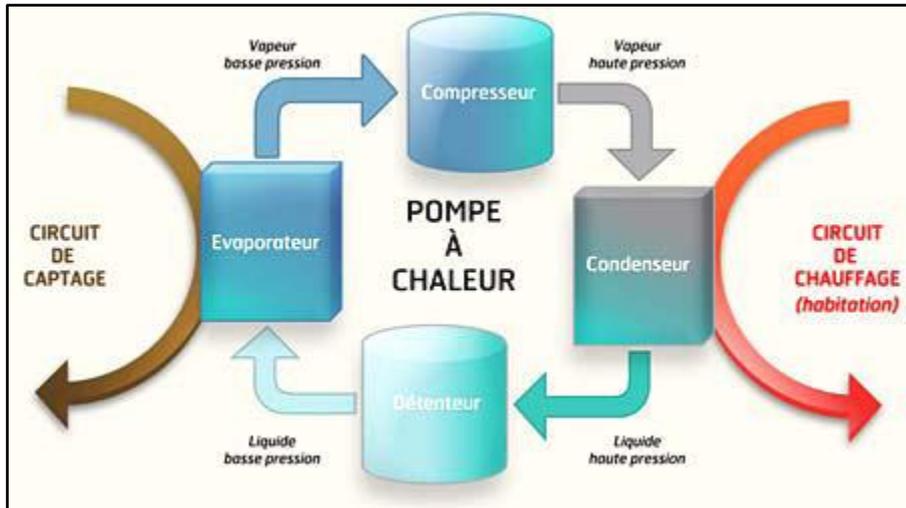


Illustration 4 : Schéma de fonctionnement général d'une PAC (www.energie-edessa.com).

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 géothermiques 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 ».

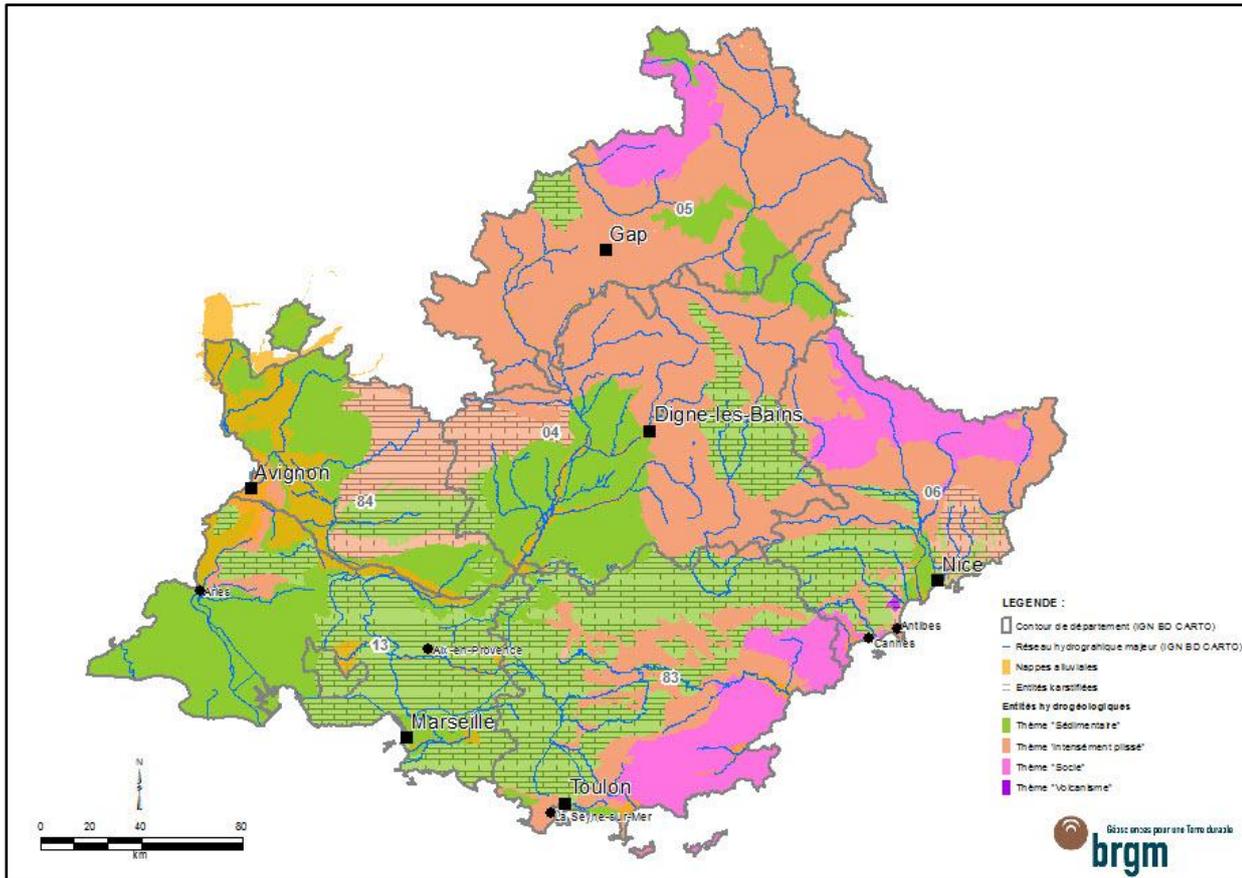


Illustration 5 : Les grands types de formations constituant les entités hydrogéologiques dans la région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).

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.

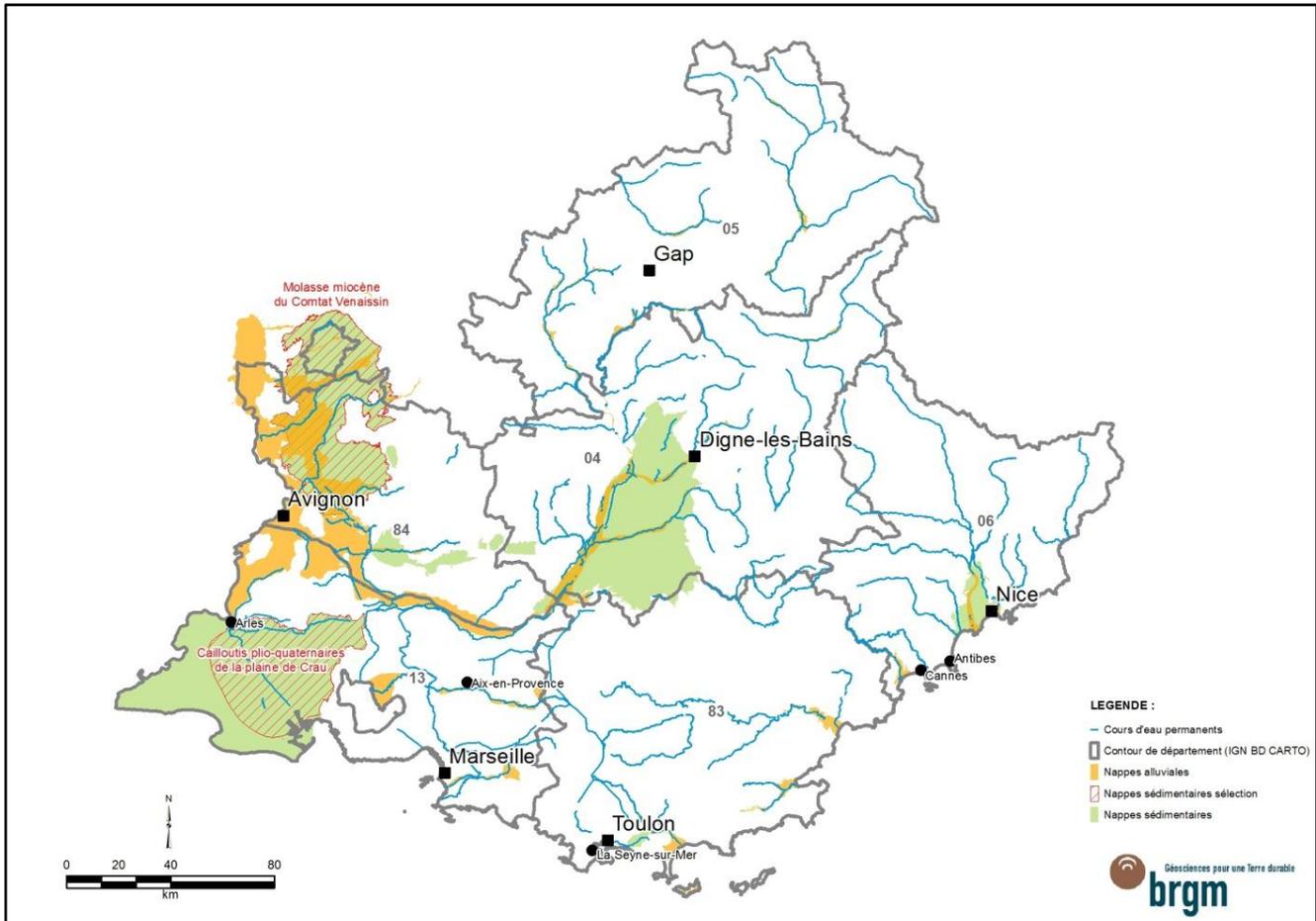


Illustration 6 : Localisation des principales nappes susceptibles de délivrer des débits importants en région PACA (données issues de la synthèse hydrogéologique PACA, 2012).

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 fluviatiles (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.

3.2 LES AQUIFERES 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 fluviatiles 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.

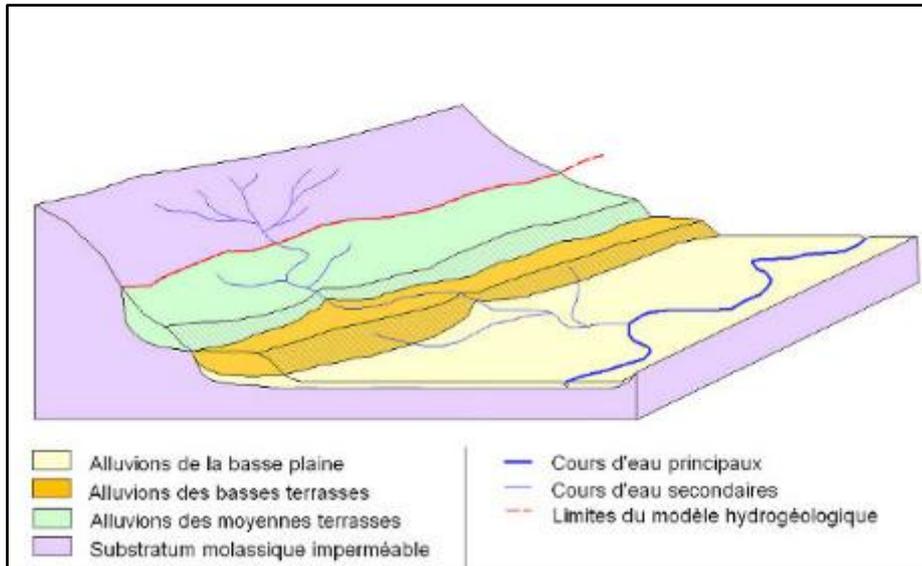


Illustration 7 : Coupe schématique en 3D des ruptures de terrasses.

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

Intitulé	Type de nappe	Superficie (km ²)	Département(s)	Débit moy. (m ³ /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 Giscle 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).

3.3 LES AUTRES PRINCIPAUX AQUIFERES SEDIMENTAIRES

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 21).

3.3.1 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 fluviales. 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.

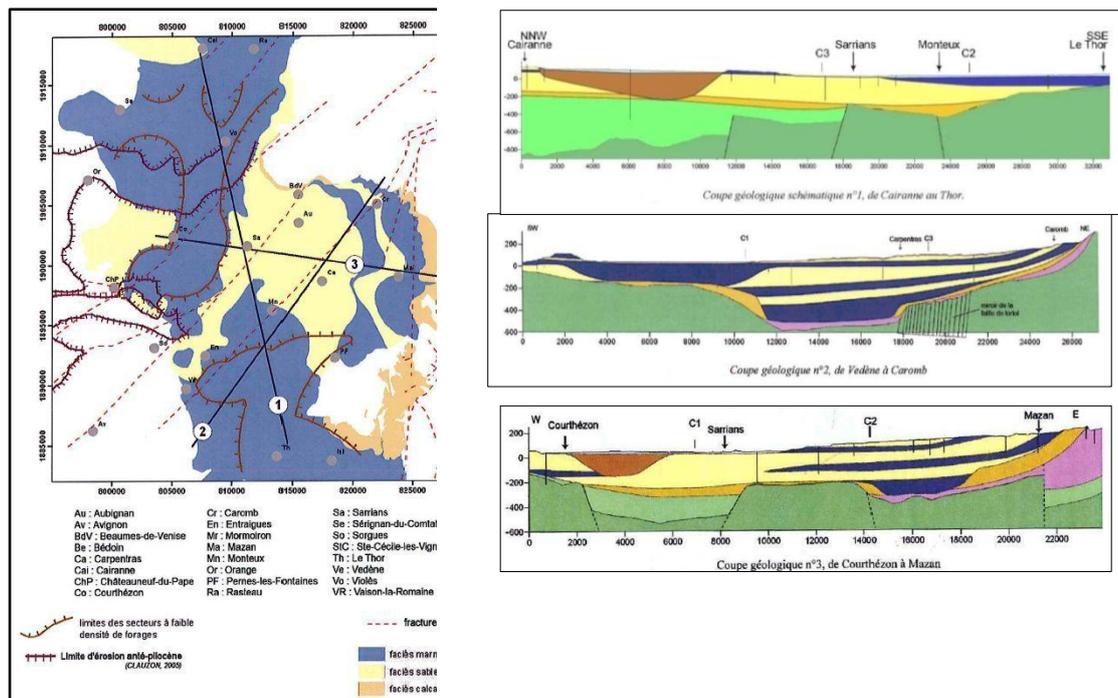


Illustration 9 : Carte et coupes de l'aquifère de la molasse miocène du Comtat (in Lalbat, 2006).

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} m²/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 m³/h, mais certains ouvrages atteignent 40 à 60 m³/h. Des débits spécifiques supérieurs à 2 m³/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 Sarrians, Loriol-du-Comtat et Monteux. 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).

3.3.2 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.

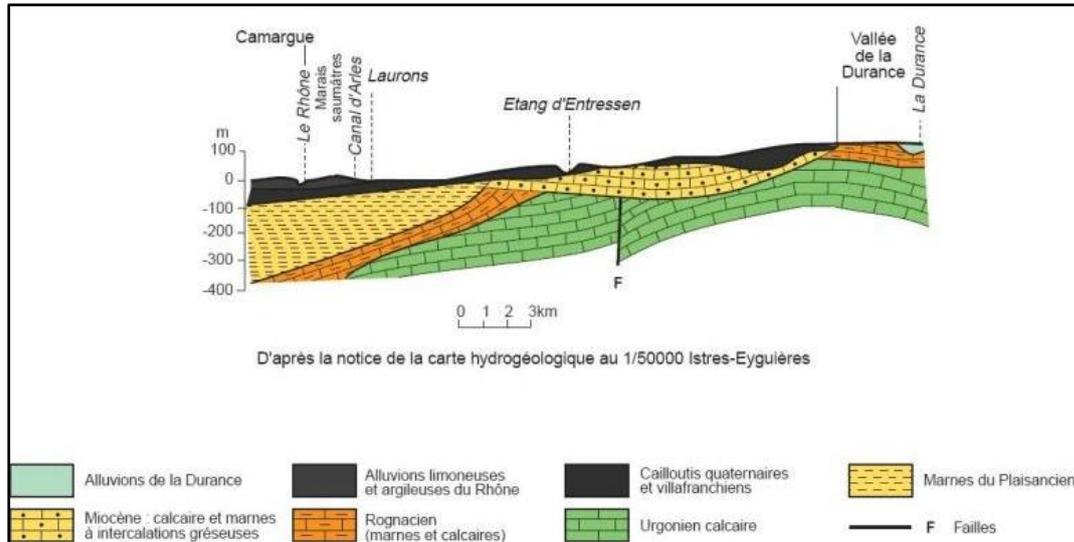


Illustration 10 : coupe NE – SO à travers la plaine de la Crau.

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.

3.3.3 Conclusions sur la géothermie en nappe en PACA

Les principales nappes alluviales de la région (voir Illustration 6, page 21) 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 m³/h et souvent les 1000 m³/h (à condition de bien dimensionner les ouvrages et éviter les interactions).

3.4 LA GEOTHERMIE HORS-NAPPE EN PACA

Comme on l'a vu sur la carte de l'illustration 6 en page 21, 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 20.

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 20, 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 massif 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**², 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 pompage³ (en m³/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 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.

² 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.

³ : 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 (m³/h)

ΔT : Différentiel thermique de l'eau entre les sources chaude et froide

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).

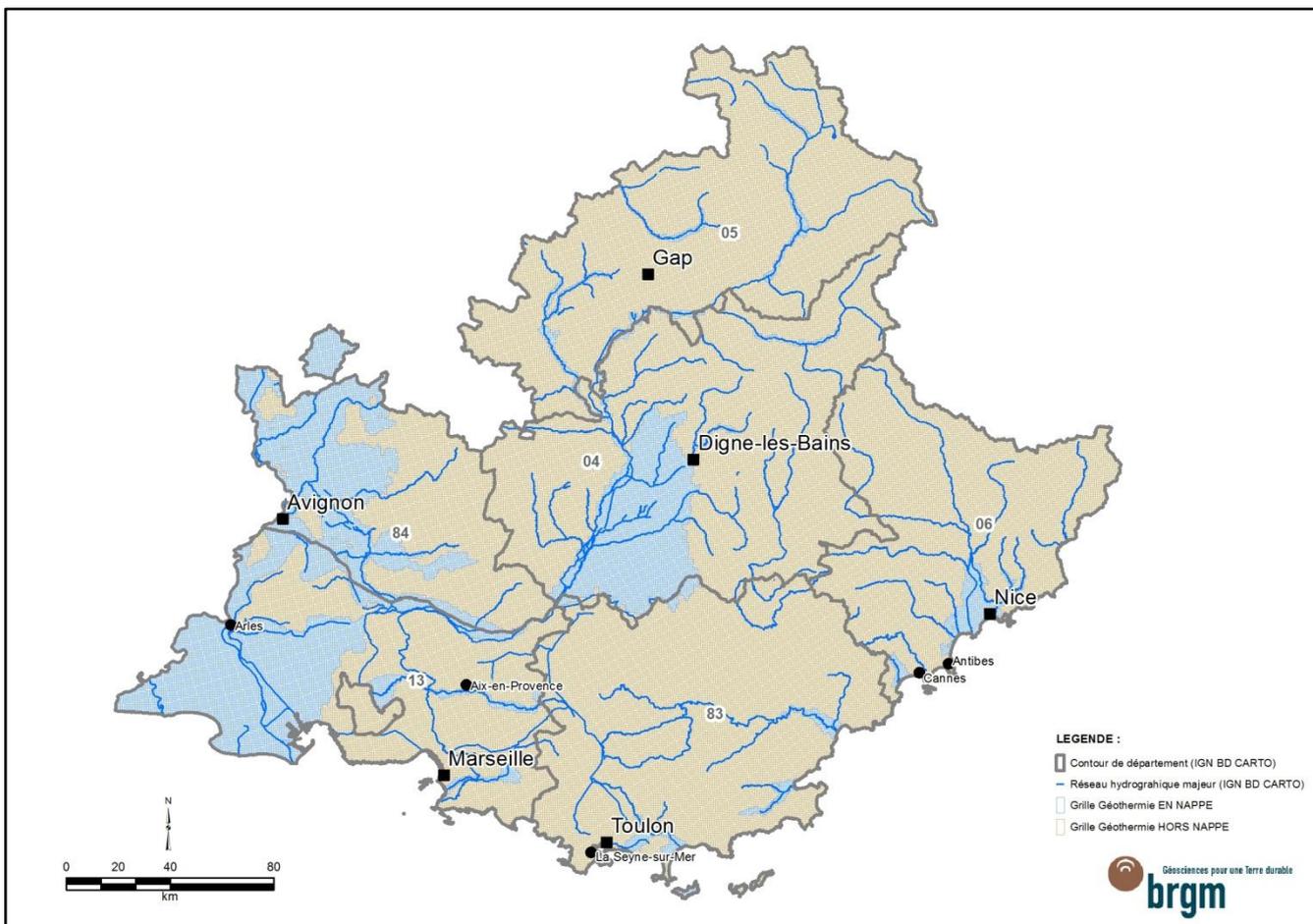


Illustration 11 : Découpage de la région PACA en cellules de 500 m de côtés : grille Géothermie sur nappe en bleu, Géothermie hors nappe en marron.

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

4.1.1 Principe de la réalisation: l'analyse multicritères

4.1.1.1 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.

4.1.1.2 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 spécifique⁴ 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 (m³/h),

Δ : rabattement mesuré dans l'ouvrage (m)

Q_s : débit spécifique (m³/(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.

⁴ : Le débit spécifique (Q_s) est le débit extractible par mètre de rabattement dans un ouvrage. Il a pour unités M³.T⁻¹.L⁻¹, et dans l'étude a été exprimé en m³/(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
PACA	12 688	304	2,4

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).

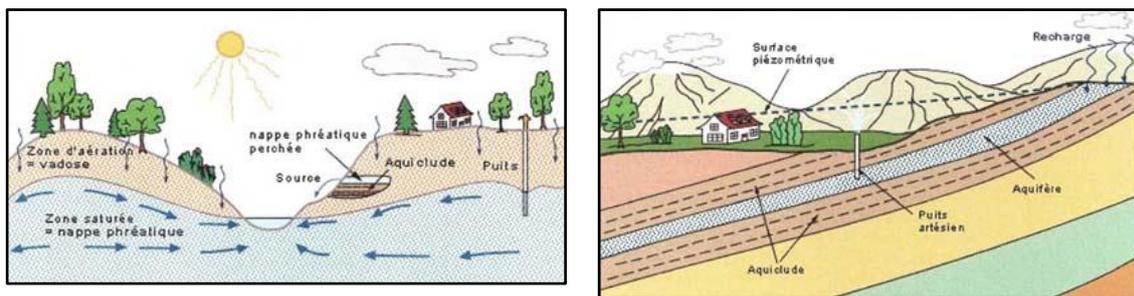


Illustration 13 : Notions de nappes libres et captives (images ©2009 Energie Service).

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
PACA	12 688	9 851	77,6

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 menés 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
PACA	12688	510	4,0	14,4	2,9

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.

4.2 L'ATTRIBUTION DES CLASSES A CHAQUE CRITERE

Le tableau de l'illustration 16, en page 37, 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 m³/h ;*
- Note 2 (cl. peu favorable) : *Débits soutirables compris entre 5 et 10 m³/h ;*
- Note 3 (cl. favorable) : *Débits soutirables compris entre 10 et 50 m³/h ;*
- Note 4 (cl. très favorable) : *Débits soutirables supérieurs à 50 m³/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 rafraichissement), 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 ³ /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
Analyse multicritères (AMC = 2*Q+T+Prof)		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 multi-critères concernant la géothermie en nappe.

4.2.1 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.

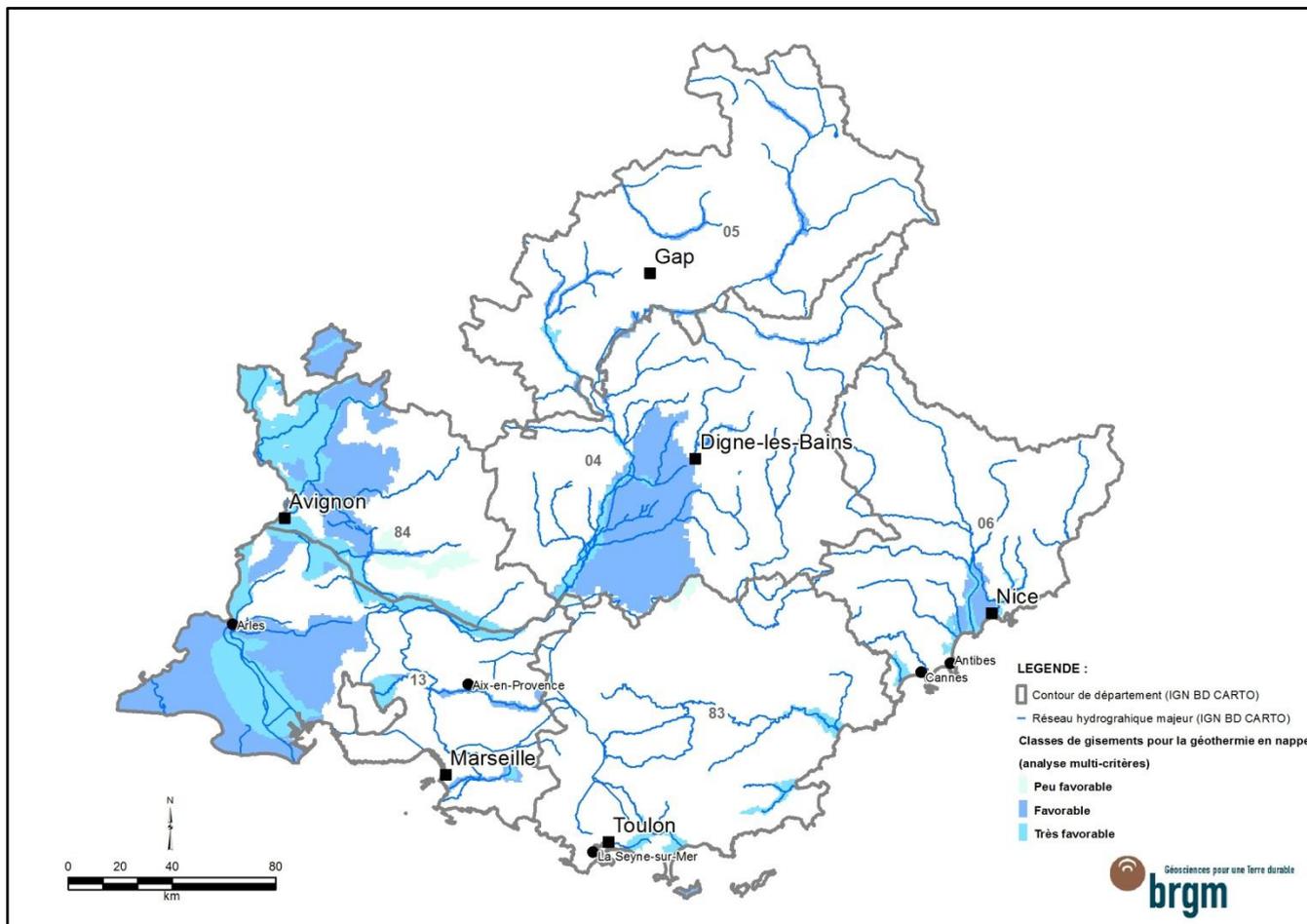


Illustration 17 : Carte de la susceptibilité de la ressource à la géothermie en nappe en région PACA.

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 Gisclé 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'Encrême	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
Total général		742		15 277		8 384		24 403

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

4.3 MODALITES DE REALISATION DE LA CARTE POUR LA PARTIE « GEOTHERMIE HORS NAPPE »

4.3.1 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).

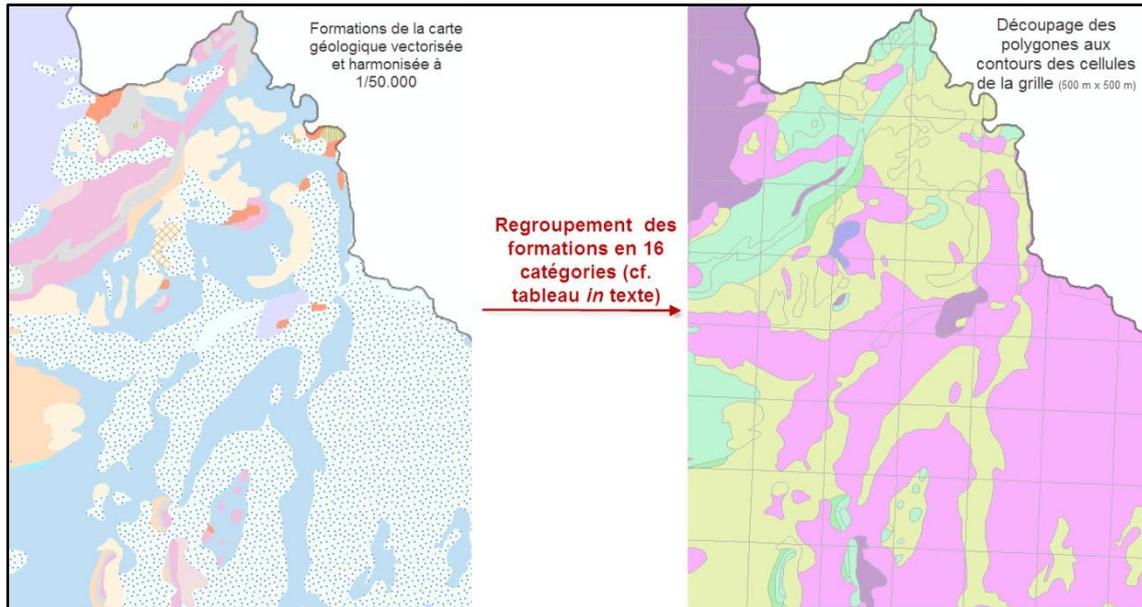


Illustration 19 : Principe du regroupement des formations de la carte géologique vectorisée et harmonisée en 16 types lithologiques (voir tableau in texte).

- À chaque type de roche a été affectée une valeur moyenne de P_{SP} , issue de la moyenne des données empiriques trouvée dans la littérature⁵. 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.

⁵ : 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 ; Loess ; 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 ; anateixites ; 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.

4.3.2 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'Estérel 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.

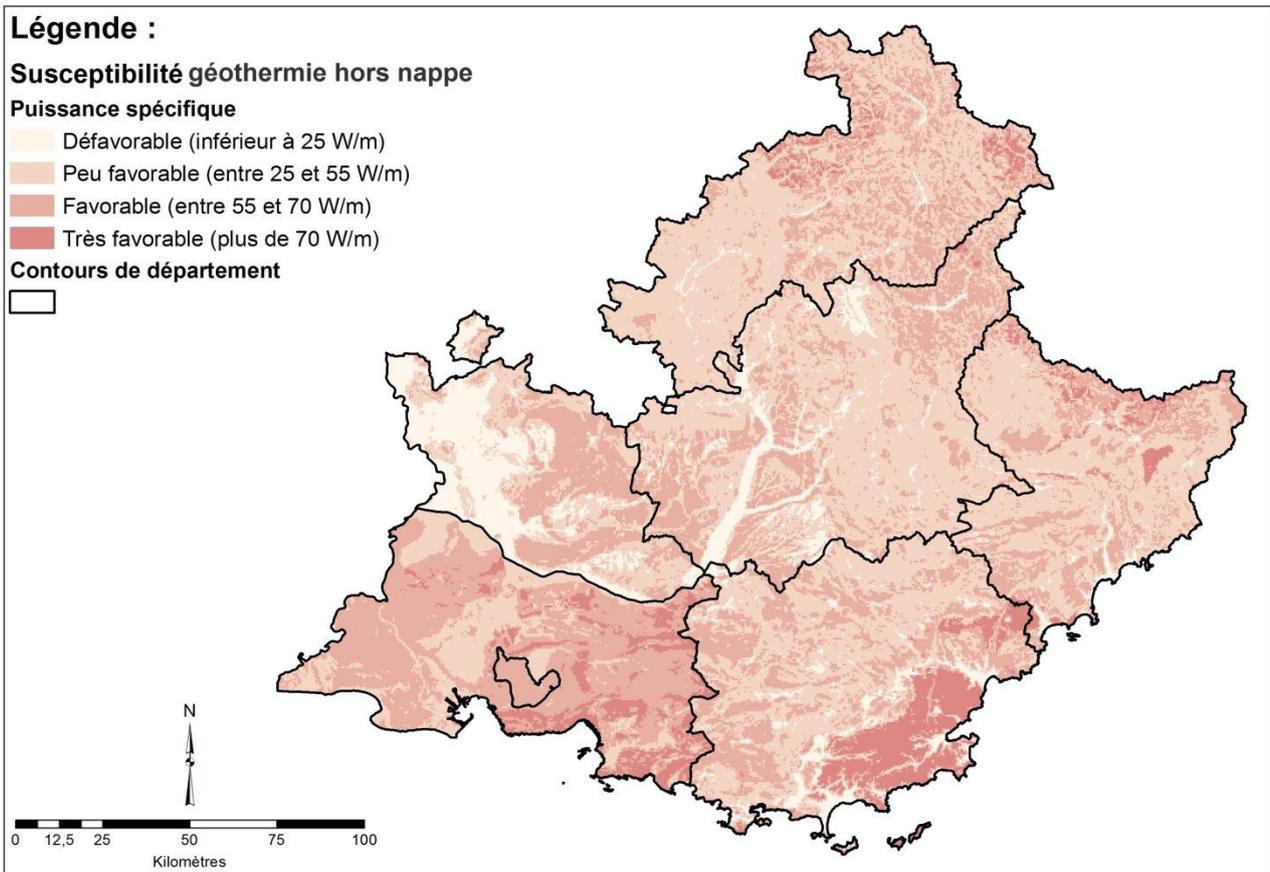


Illustration 21 : Carte de représentation des puissances spécifiques moyennes affectées à chaque cellule de la maille régionale.

4.4 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.

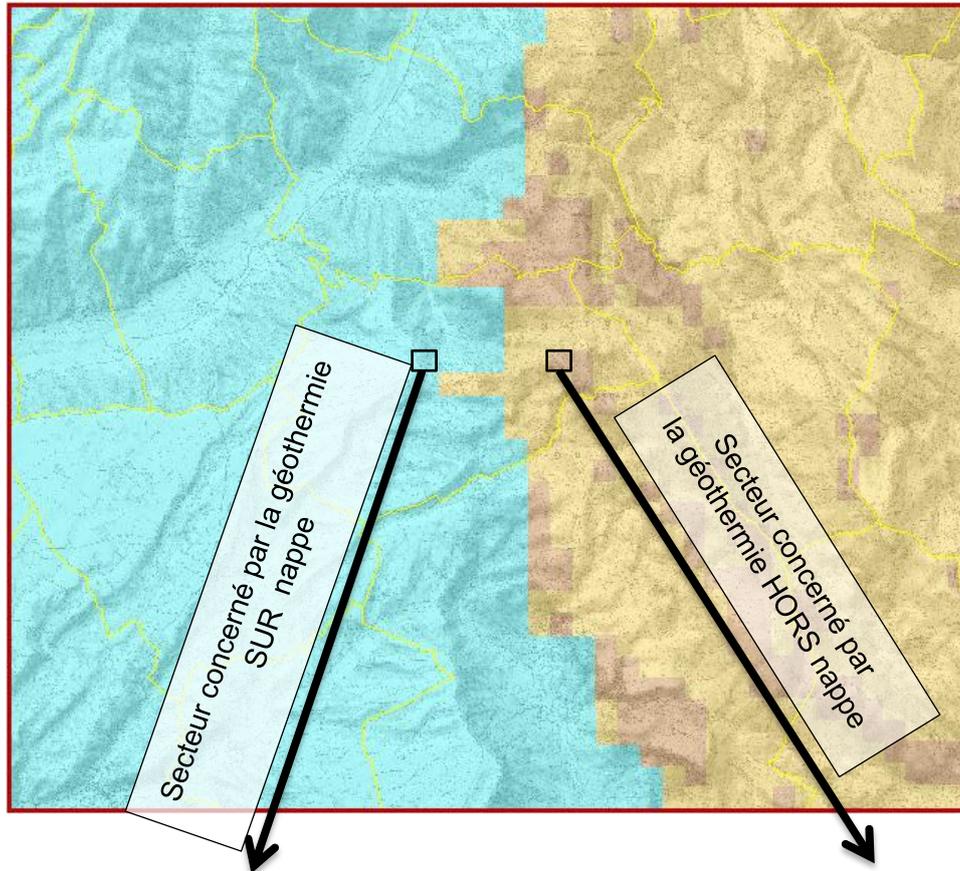
Le site de la région PACA est donc accessible *via* le bouton « la géothermie en région », puis, en cliquant sur la région PACA qui apparaît sur la carte de France.

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 page 45).

The image shows two screenshots of the 'Géothermie Perspectives' website. The left screenshot is the main homepage, featuring a map of the Provence-Alpes-Côte d'Azur region with a yellow highlighted area. The right screenshot is a detailed data sheet for a specific location, titled 'Géothermie perspectives' and 'Toute l'information sur l'énergie de la Terre'. It includes a legend with categories like 'Très favorable hors nappe', 'Favorable hors nappe', and 'Favorable en nappe'. It also contains a search filter section with dropdown menus for 'Départements' and 'Communes', and a 'Page précédente' link.

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



brgm Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

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 FATLAS

Ressource Géothermique calculée dans la maille LV287 située sur la commune de : SAINT-JURS (04184)

Ressource géothermique en nappe
Ressource : favorable

Libellé de la nappe	Débit moyen* (m ³ /h)	Profondeur moyenne (m)	Température moyenne (°C)	Ressource
Formations détritiques mic. placées 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) : 911516 m

brgm Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

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 FATLAS

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 présentée* (W/m) : 56
* puissance moyenne extractible dans la maille de 500 m de côté par 1 m de sonde)

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

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 concernant l'atlas régional

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.

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.

**SECONDE PARTIE :
ÉVALUATION DU POTENTIEL
GÉOTHERMIQUE MOBILISABLE
EN RÉGION
PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR**

6. Acquisition des termes du bilan

6.1 LA GEOTHERMIE, UNE RESSOURCE CONSOMMEE LOCALEMENT

Contrairement à l'énergie électrique, l'énergie géothermique basse ou très basse énergie ne se transporte pas : comme toute ressource de chaleur, elle est consommée sur son lieu de production. Autrement dit, le contexte qui préside à son extraction détermine directement la puissance extractible.

Evaluer un potentiel mobilisable de la ressource géothermique revient à bâtir un (ou des) scénario(s) concernant la **demande** (autrement dit les besoins énergétiques) en l'état actuel, mais aussi d'une manière prospective pour les 10, 20 ou 30 ans à venir, et de comparer cette demande au **gisement** disponible en tout point de la région.

Le travail présenté en première partie de ce rapport, qui concerne l'élaboration de l'atlas des ressources géothermiques disponibles, a servi de base à l'évaluation du potentiel mobilisable.

Afin d'évaluer le potentiel géothermique il s'agit donc de comparer en chaque lieu la ressource géothermique et les besoins thermique des bâtiments en surface dont les besoins auront été évalué sur la base d'hypothèses explicites.

6.2 EVALUATION DE LA DEMANDE

Le principe consiste à évaluer le besoin énergétique des bâtiments **de manière géolocalisée**.

Pour cela, on utilisera la base de base de données BD TOPO de l'IGN, qui permet de localiser l'emprise au sol de l'ensemble du bâti de la région.

6.2.1 Type de bâti retenu

Parmi l'ensemble des différents bâtiments recensés en BD TOPO, seuls les bâtiments consommateurs de chaleur sont considérés (Illustration 24). Sont ainsi exclus les bâtiments industriels qui ne sont pas des bureaux, les bâtiments particuliers tels que péages, monuments...

6.2.2 Principe du calcul de la demande énergétique des bâtiments

Le calcul de la demande repose sur le principe suivant :

- 1) *Sommation des surfaces au sol de chaque type de bâti, et calcul de la SHON (Surface Hors Œuvre Nette), sur la base de la formule :*

$$(1) SHON = C \times S \times H$$

où

- C (s. u.) : le coefficient de passage de la SHOB (Surface Hors Œuvre Brute) à la SHON, pris égal à 0,8 (pour tenir compte de l'épaisseur des murs, de la hauteur de plafond...);
 S (m²) : Emprise au sol ;
 H (s. u.) : Nombre d'étages équivalents du bâti (hauteur divisée par 3, arrondie à l'entier supérieur, la hauteur d'un étage étant prise à 3 m).

2) *Estimation des besoins énergétiques des divers types de bâtiments :*

Dans un premier temps, il avait été envisagé de moduler les besoins (E_B) en fonction du type de bâtiments, d'après des données bibliographiques de consommations (de 50 kWh/(m².an) à 300 kWh/(m².an)).

Après discussion au sein du COPIL du projet, et une série de tests, il été décidé de retenir une **unique valeur unitaire de besoins énergétiques, 150 kWh/(m².an)**, et ce, quel que soit le type de bâti.

3) *Calcul du besoin énergétique par bâtiment :*

On applique la formule :

$$(2) E_B = 150 \times SHON$$

où E_B est exprimée en kWh/an.

BÂTI PACA	TYPE	CRITERES	S sol (m ²)	SHON (m ²)	CONSO UNITAIRE (kWh/m ² .an)	CONSO ENERGIE (kWh/an)	PART CONSO ENERGIE
Bâti indifférencié	total	objet	249 680 746	567 263 591	150	85 089 538 649	77,11%
	habitat/bureau	h=0					
	habitat/bureau	h>40	672 095	11 669 925	150	1 750 488 745	1,59%
	habitat/bureau	40>h>1	249 008 651	555 593 666	150	83 339 049 904	75,52%
Bâti industriel	total	objet	89 962 705	157 126 819	150	23 569 022 765	21,35%
	Bâtiments agricoles		296 061	688 332	150	103 249 817	0,09%
	Bâtiments commerciaux		3 168 258	8 405 932	150	1 260 889 840	1,14%
	Bâtiments industriels		45 115 140	96 012 840	150	14 401 925 995	13,05%
	Serre		37 733 785	51 583 613	150	7 737 541 886	7,01%
	Silo		100 210	436 102	150	65 415 227	0,06%
		h=0	3 286 241	0		0	0,00%
		h>40	263 010	0		0	0,00%
Bâti remarquable	total	objet	3 396 003	11 288 251	150	1 693 237 665	1,54%
	Aérogare		65 222	326 112	150	48 916 831	0,04%
	Arc de triomphe		219	1 021	150	153 160	0,00%
	Arène ou théâtre antique		127 052	262 126	150	39 318 899	0,04%
	Bâtiment religieux divers		32 995	107 670	150	16 150 485	0,01%
	Bâtiment sportif		1 060 353	3 126 868	150	469 030 220	0,43%
	Chapelle		88 264	190 077	150	28 511 591	0,03%
	Château		119 759	663 261	150	99 489 199	0,09%
	Eglise		892 310	3 488 015	150	523 202 180	0,47%
	Fort, blockhaus, casemate		161 331	342 210	150	51 331 560	0,05%
	Gare		138 746	467 365	150	70 104 676	0,06%
	Mairie		378 284	1 393 753	150	209 062 942	0,19%
	Monument		3 260	8 549	150	1 282 368	0,00%
	Péages		827	1 793	150	268 901	0,00%
	Préfecture		37 165	205 385	150	30 807 744	0,03%
	Sous-préfecture		10 846	48 291	150	7 243 674	0,01%
	Tour, donjon, moulin		36 325	144 022	150	21 603 277	0,02%
	Tribune		206 721	511 733	150	76 759 958	0,07%
		h=0	12 928	0		0	0,00%
		h>40	23 396	0		0	0,00%
Total			343 039 454	735 678 661	150	110 351 799 079	100,00%

Illustration 24 : Calcul de la demande en énergie du bâti fondé sur la typologie BD TOPO de l'IGN.

Seules les catégories principales ont été retenues.

Il s'agit des :

- Catégorie : Bâti indifférencié (77,1%)
- Sous-catégorie : Bâti commercial (1,1%)
- Sous-catégorie : Serres (7,0%)

La sous-catégorie bâtiments industriels représentant tout de même 13,1 % de la consommation énergétique des bâtiments est négligée. En effet, dans ces bâtiments seuls les bureaux sont chauffés, et ne représentent qu'une faible part de ces bâtiments.

Les autres catégories étant inférieures à 1 % et ne représentant que 1,7 % du total peuvent être négligées.

6.2.3 Récapitulation concernant la demande et représentation cartographique

La formule permettant le calcul de la demande D en énergie d'un bâtiment étant :

$$D = P_s \times 0,8 \times S \times H$$

La sommation des données issues de la BD TOPO suivant la méthode énoncée ci-dessus est présentée dans le tableau de l'illustration 25. Il s'agit de l'ensemble des données sur PACA. La carte régionale est présentée en annexe 3.

DEPT	S TOTALE BATI (m ²)	V TOTAL BATI (m ²)	SHON TOTALE (m ²)	DEMANDE (MWh/an)
04	14 070 904	98 661 361	33 252 718	3 921 471
05	12 217 434	109 588 474	36 207 366	4 400 081
06	45 555 512	517 117 196	172 372 397	20 669 464
13	117 758 114	961 778 230	320 592 741	38 434 947
83	69 101 872	559 535 299	186 511 765	22 417 855
84	49 161 629	320 106 956	106 702 318	12 755 934
REGION	307 865 463	2 566 787 516	855 639 306	102 599 752

Illustration 25 : Récapitulatif du calcul de la demande énergétique par département (hypothèse consommation : 150 kWh/(m².an)).

Les données de surface sont par ailleurs intégrées dans un logiciel de SIG permettant de spatialiser la demande énergétique des bâtiments, ramenée à l'échelle d'une maille de 500 mètres de côtés, comme présenté sur l'illustration 26, présentant une carte de SHON).

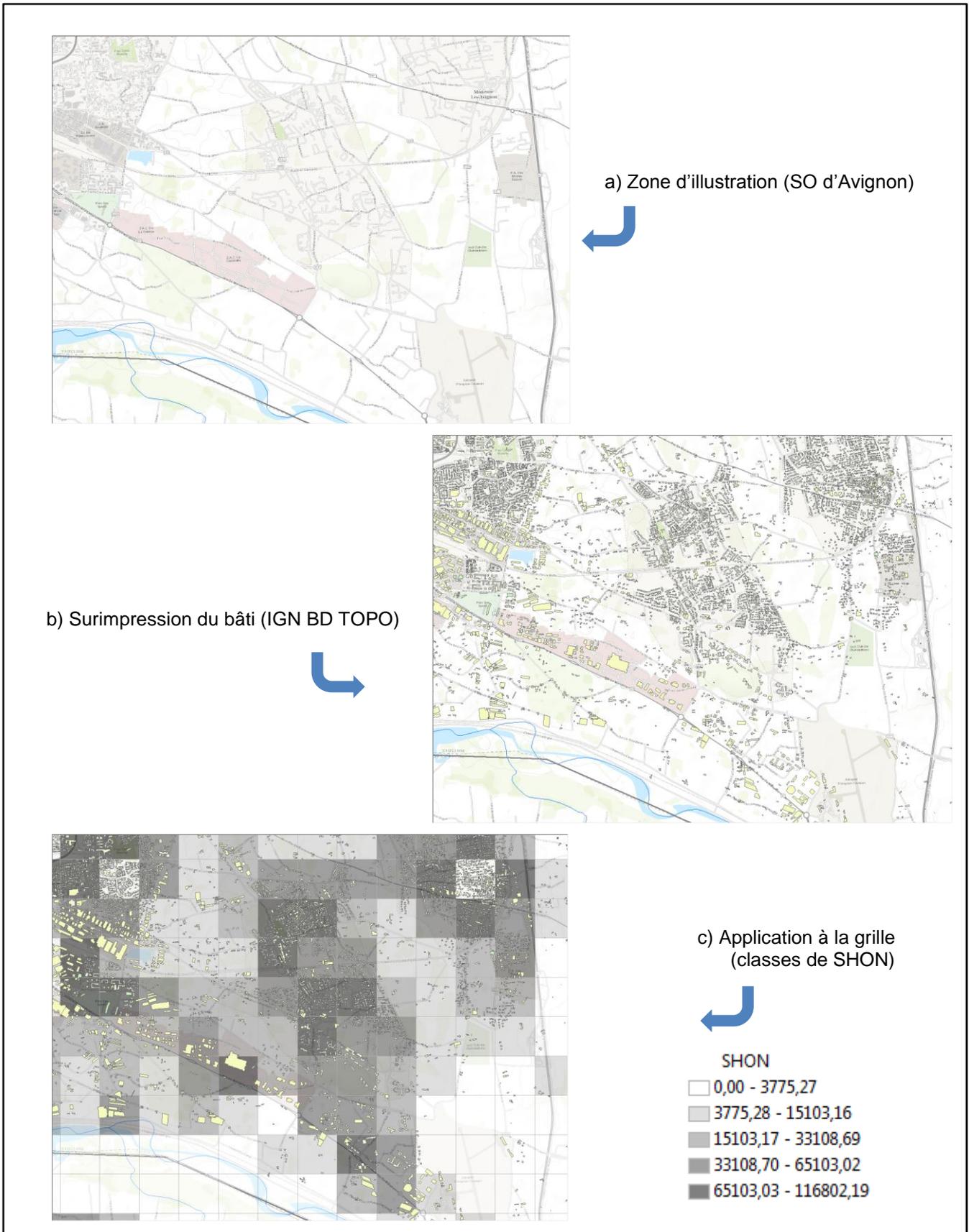


Illustration 26 : Application des données issues du bâti sur la grille à mailles de 500 m de côtés

6.3 CALCUL DE L'ENERGIE DISPONIBLE ISSUE DE LA GEOTHERMIE

6.3.1 Les hypothèses retenues

Les 2 types de géothermie considérées sont donc la *géothermie sur nappe* et la *géothermie sur sonde* (appelée aussi dans cette étude géothermie hors nappe). Le calcul du gisement est évalué à l'échelle de chaque maille.

L'évaluation de la puissance – donc de l'énergie – extractible passe par l'établissement d'hypothèses de travail portant sur :

1. la densité de forages pour la géothermie en nappe ;
2. la densité de sonde pour la géothermie sur sonde.

a) Hypothèse concernant la géothermie sur nappe

Il a été décidé de considérer les prélèvements comme issus d'un unique forage centré sur chaque cellule de la grille.

Etant donné que le nombre de forages sur une même nappe est limité par les caractéristiques de celle-ci, il aurait été nécessaire de réaliser une simulation hydrodynamique afin de déterminer la densité maximale de forage pour chaque nappe, ce qui sortait des limites de la présente étude. Il a donc été choisi arbitrairement de ne pas dépasser un forage par maille de 500 m de côté (0,25 km²).

Cette hypothèse est **plutôt majorante** par rapport à la réalité : on surestime ainsi en général le nombre de forages présents dans une cellule par rapport à la réalité.

b) Hypothèse concernant la géothermie sur sonde

Dans les secteurs sans nappe exploitable, il a été décidé de simuler la présence d'une sonde géothermique verticale de 100 m de profondeur tous les dix mètres.

Dans chaque cellule de 500 m de côté de la grille, cela correspond à simuler l'énergie tirée de 2500 sondes.

Lors de la création d'un champ de sondes, il convient d'espacer chaque sonde d'une certaine distance qui dépend à la fois de la nature du sous-sol et de la demande énergétique. Dans un cas favorable, il faut espacer ces sondes d'au moins 7 mètres et dans un cas plus général d'au moins 10m. En considérant cette hypothèse, cela permet à un bâtiment souhaitant créer un champ de sonde d'approcher grossièrement le potentiel existant au lieu du projet. A l'échelle de la région, cette hypothèse est bien trop élevée. Un forage de 100 mètres de profondeur tous les 10 mètres n'est pas envisageable sur une surface à l'échelle d'un quartier.

De plus, ces forages équipés de sondes ont une durée de vie de l'ordre de 20 à 50 ans maximum. Qu'en sera-t-il après cette durée ?

Cette hypothèse est donc sans équivoque **très majorante** par rapport à la réalité : des champs de sondes de quelques dizaines de sondes sont déjà considérés comme étendus.

De plus, faute de connaissance précise du sous-sol au droit de chaque point du territoire régional, la puissance extractible est déterminée principalement à partir des types de roches à

l'affleurement en général sans préjuger des éventuelles superpositions de de faciès entre 0 et 100 m.

c) *Hypothèse sur le COP des pompes à chaleur*

Il a été décidé de prendre un COP de 3,5

Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur (PAC) est le rapport entre :

L'énergie thermique fournie par la PAC

et

L'énergie consommée pour la faire fonctionner.

La plupart des PAC fonctionnent aujourd'hui à l'électricité, les PAC au gaz commencent à peine à voir le jour.

Un COP de 3,5 apparaît être un COP minimum pour qu'une PAC fonctionne de façon efficace (dans ce cas, pour une unité d'énergie fournie, on en retire 3,5).

Par ailleurs, d'un point de vue technique, il convient d'analyser les performances de la PAC en termes *d'énergie primaire*.

Le coefficient de conversion de l'électricité en énergie primaire est de 2,58 dans la Réglementation Thermique Française de 2005. Pour le gaz, ce coefficient est de 1.

Cela signifie que pour être plus performant qu'une chaudière gaz, la PAC électrique doit avoir un COP annuel en énergie finale supérieur à 2,58. Au niveau européen, cette valeur est portée à 3,1.

Ainsi, plus la valeur du COP est élevée, plus l'économie annuelle par rapport à une installation classique au gaz ou au fioul est grande et permet de rentabiliser l'investissement.

Un COP de 3,5 considéré pour cette étude permet donc de s'affranchir largement de ces considérations, même si, à ce jour, cette valeur reste souvent supérieure à celle des PAC en place.

Cette hypothèse est donc une **hypothèse majorante** par rapport à la réalité, **mais indispensable** pour la qualité de la filière.

d) *Hypothèse sur le temps de fonctionnement d'une PAC*

On considèrera dans cette étude que la durée annuelle d'utilisation des PAC à pleine puissance est de 1400 h.

Une PAC utilisée pour chauffer une piscine fonctionnera à pleine puissance environ 7400 heures. Une PAC utilisée pour chauffer des logements à Marseille et produire l'ECS⁶ fonctionnera à pleine puissance environ 3000 heures lorsque le projet est optimisé et fonctionnera avec un appoint qui couvrira les besoins en période de pointe. Cette même PAC fonctionnera environ 900 à 1000 heures lorsque le projet n'est pas optimisé. Une moyenne de

⁶ : Eau Chaude Sanitaire

1400 heures a semblé être un compromis plutôt moyen mais majorant par rapport à la réalité du terrain.

Cette hypothèse est donc **légèrement majorante** par rapport à la réalité.

e) **Hypothèse sur le choix du type de géothermie**

Selon l'ADEME, la technologie PAC sur nappe est moins chère et plus performante dans la plupart des cas que la géothermie sur sonde. Pour cette raison :

Il a été décidé dans cette étude que la technologie de géothermie sur nappe constituerait un premier choix là où les deux types de géothermie étaient utilisables.

En outre, le potentiel mobilisable ne sera évalué que sur les mailles dites *éligibles*, c'est-à-dire sur les mailles en classes *favorables* ou *très favorables* uniquement (au sens défini dans l'Atlas géothermique, voir partie 1 de ce rapport) et là où les enjeux environnementaux le permettent.

f) **Hypothèse sur l'intégration des enjeux environnementaux**

Les enjeux environnementaux liés à l'occupation des sols sont intégrés à l'aide d'un *coefficient d'abattement du gisement géothermique*. Un coefficient de 1 implique que l'enjeu présent dans la cellule n'a pas d'effet sur l'exploitabilité du gisement, alors qu'un coefficient de 0 rend le gisement inexploitable.

Le tableau de l'illustration 27 reprend les coefficients qui ont été appliqués aux enjeux environnementaux, dont les données cartographiques étaient utilisables dans le cadre de ce travail.

Enjeu environnemental ou d'occupation des sols	Coefficient abattement
AEP	0
Zone rouge PPR	0
Arrêté Préfectoral de Protection de Biotope	0,75
Atlas des Zones Inondables	1
Cœur de réserve de Biosphère	0,75
Inventaire ZICO de 1994	1
Natura 2000 : Directive habitat (Zones Spéciales de Conservation)	0,75
Parc National - Réserve Intégrale et cœur	0
Parc National - Zone d'adhésion	0,75
Parc Naturel Régional	0,75
Périmètre de Protection de la Réserve Naturelle Géologique	1
Réserve Biologique Spéciale	0,75
Réserve Naturelle Nationale	0,75
Réserve Naturelle Régionale	0,75
Réserves Biologique de l'ONF	0,75
Sites NATURA 2000	0,75
ZNIEFF	0,75
Zone RAMSAR	0,75

Illustration 27 : les enjeux environnementaux et leurs coefficients d'abattement

Après plusieurs essais, la valeur de 0,75 a été choisie arbitrairement pour traduire le fait que sur ces zones, certains projets ne pourront pas se faire en fonction de contraintes localisées. La carte de représentation des cellules en fonction des valeurs du coefficient est présentée en annexe 2, le tableau de répartition en annexe 5.

6.3.2 L'évaluation du « gisement » (énergie disponible)

La grille de calcul permet le calcul du gisement géothermie dans chaque cellule par application des formules reliant – selon les cas (GTH en nappe et hors nappe) et séquentiellement :

- 1.a. **La puissance extractible au débit soutirable, à partir d'un forage situé au centre de la cellule**, selon les hypothèses énoncées dans le paragraphe ci-dessus, pour ce qui concerne la géothermie sur nappe, voir Illustration 28.

$$P_{TE} = 1,16 \cdot Q_P \cdot |\Delta T| \quad (1a)$$

Où P_{TE} : Puissance thermique extractible en nappe, en kW

Q_P : Débit prélevé, en m³/h

$|\Delta T|$: valeur absolue du différentiel entre les températures de prélèvement et d'injection, en °C
1,16 étant un facteur de conversion tenant compte des unités

Q (m ³ /h)	ΔT (°C)	P _{TE} (kW)
1	4	4,64
2	4	9,28
3	4	13,92
4	4	18,56
5	4	23,20
6	4	27,84
7	4	32,48
8	4	37,12
9	4	41,76
10	4	46,40
11	4	51,04
12	4	55,68
13	4	60,32
14	4	64,96
15	4	69,60

Les valeurs de limites de classes de débits utilisés dans l'atlas sont indiquées en rouge.

Illustration 28 : Tableau indiquant la relation entre débit soutirable et puissance thermique extractible.

- 1.b. **La puissance extractible de 2500 sondes géothermiques verticales de 100 m de profondeur** (1 sonde tous les 10 m dans une cellule de 500 m de côtés, Illustration 29) :

$$P_{TE} = 2,5 \cdot 10^5 \cdot \sum P_{SP} \quad (1b)$$

Où P_{TES} : Puissance thermique extractible à partir de sondes, en kW

$\sum P_{SP}$: Somme pondérée par la surface de chaque moyenne de classes de puissance spécifique P_{SP} présente dans une cellule, en W/m (voir illustration 20 en partie 1 de ce rapport et l'illustration 29 ci-après).

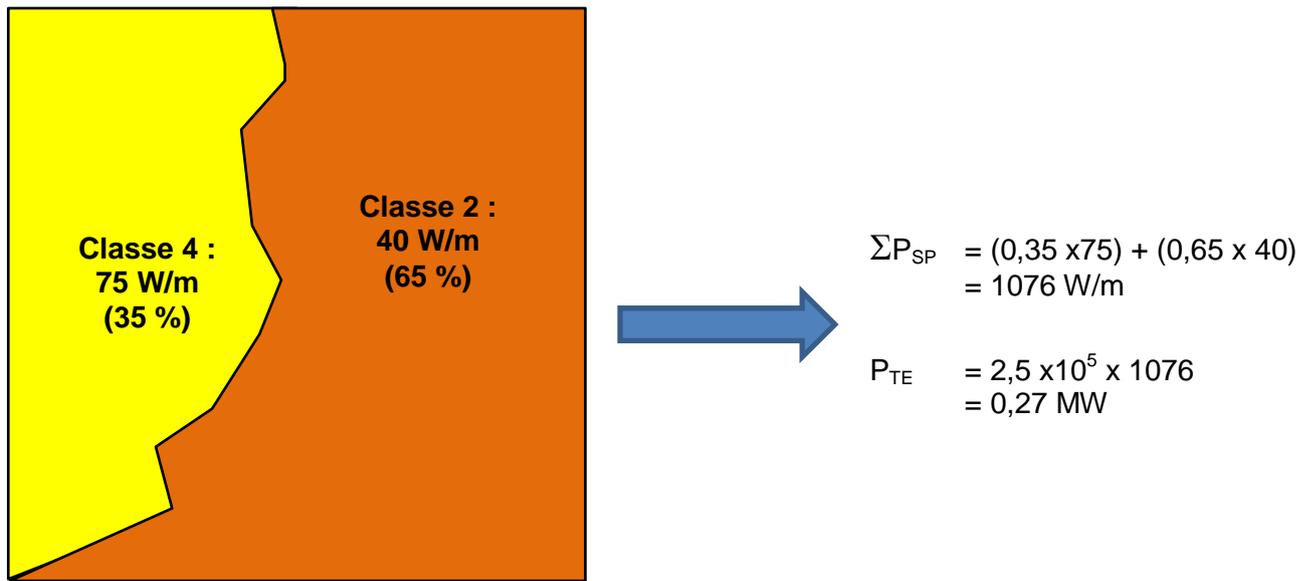


Illustration 29 : Exemple de calcul de la Puissance spécifique équivalente dans une cellule (P_{SP} : puissance spécifique moyenne d'une classe) et de la puissance extractible P_{TE} .

Quelle que soit l'origine de la puissance extractible (par forage ou par sonde) pour avoir la puissance fournie aux bâtiments, il faut ensuite, dans chaque cellule, intégrer le COP (pris par hypothèse à 3,5), selon la formule :

$$P_F = \frac{P_{TE}}{\left(1 - \frac{1}{COP}\right)} \quad (2)$$

Où P_F : Puissance fournie aux bâtiments (en MW).

Le calcul sur l'ensemble des cellules permet dans un second temps la sommation des valeurs de puissance fournies aux bâtiments par département, sans tenir compte de contraintes éventuelles d'occupation des sols, ni de la susceptibilité des secteurs, tels que définis dans la première partie de ce rapport. Les résultats sont présentés dans le tableau de l'illustration 30, la carte est présentée en annexe 1.

Département	Puissance fournie (MW)
04	295 084
05	291 660
06	14 790
13	236 407
83	16 009
84	11 658
PACA	865 609

Illustration 30 : Sommation de la puissance extractible en géothermie par département

2. **L'énergie disponible pour chaque cellule** est alors calculée uniquement sur les cellules situées dans les zones favorables ou très favorables de l'atlas. Elle est le produit de la puissance extractible par le nombre d'heures annuelles d'utilisation des systèmes, pris, par hypothèse égale à 1400.

La valeur dans chaque cellule peut ensuite être sommée pour estimer l'énergie disponible issue de la géothermie dans chaque département (tableau de l'illustration 31)

Département	Energie disponible (MWh/an)
04	413 117 676
05	408 323 393
06	20 706 474
13	330 970 194
83	22 413 092
84	16 321 692
PACA	1 211 852 521

Illustration 31 : Sommation de l'énergie disponible issue de la géothermie par département.

7. Evaluation du potentiel mobilisable

7.1 DEFINITION

Le potentiel mobilisable pour ce qui concerne la géothermie peut être défini ainsi :

Il s'agit de la part d'énergie potentiellement exploitable en un lieu de l'espace, résultant de la différence entre la demande en climatisation (chauffage ou rafraîchissement) et le gisement pondéré par l'ensemble des contraintes liées à l'occupation de l'espace.

Ce type de géothermie procure en effet une énergie non transportable. Un bilan par cellule est donc réalisé, le minimum entre la demande et le gisement pondéré étant retenu comme étant le potentiel mobilisable.

Les valeurs sont sommées à l'échelle du département puis de la région pour estimer le potentiel mobilisable globale.

La carte régionale est présentée en annexe 4.

Point important : le calcul du potentiel ne se fait que dans les secteurs reconnus comme très favorables ou favorables dans l'atlas des potentialités géothermiques. Les cellules concernées sont donc affectées d'un caractère d'"éligibilité" vis-à-vis de ce potentiel, en fonction leur appartenance à ces classes. Ce terme revient dans la suite sous le terme de « cellules éligibles ».

7.2 INTEGRATION DU TAUX D'EQUIPEMENT EN PAC GEOTHERMIQUES

Un coefficient réducteur est appliqué *in fine* aux résultats afin de prendre en compte le taux d'équipement en PAC. Ce taux est estimé à l'aide des chiffres de l'AFPAC (Association Française des Pompes A Chaleur).

Le marché français des pompes à chaleur de 5 à 50 kW livrées et facturées est porté dans l'illustration 32 ci-dessous.

Etude des potentialités géothermiques en région PACA

		2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Cumulé
sol/sol		5 100	5 400	6 800	5800	7000	9 600	4700	3188	454		
sol/eau					2000	2600		3200	1219	1845		
total		5 100	5 400	6 800	7 800	9 600	9 600	7 900	4 407	2 299		58 906
							98% neuf et 2% existant	95% neuf et 5% existant	90% neuf et 10% existant	98% neuf et 2% existant		
eau glycolé/eau		2 900	3 600	4 900	3700	6350	9 000	7030	6969	5031		
eau/eau					1700	2500		4500	2973	1627		
total		2 900	3 600	4 900	5 400	8 850	9 000	11 530	9 942	6 658		62 780
Total géothermie		8 000	9 000	11 700	13 200	18 450	18 600	19 430	14 349	8 957		121 686
			13%	30%	13%	40%	1%	4%	-26%	-38%		
air extérieur/eau	monobloc	4 400	4 700	5 600	12 000	35 060	26 000	48 520	36 730	13 548		
	bibloc						25 000	84 560	69 813	40 306		
air extérieur/air		NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC		
air extrait/air		NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC		
Total aérothermie		4 400	4 700	5 600	12 000	35 060	51 000	133 080	106 543	53 854		406 237
Total PAC		12 400	13 700	17 300	25 200	53 510	69 600	152 510	120 892	62 811		527 923
ECS seule								5 400	4 795	15 000		

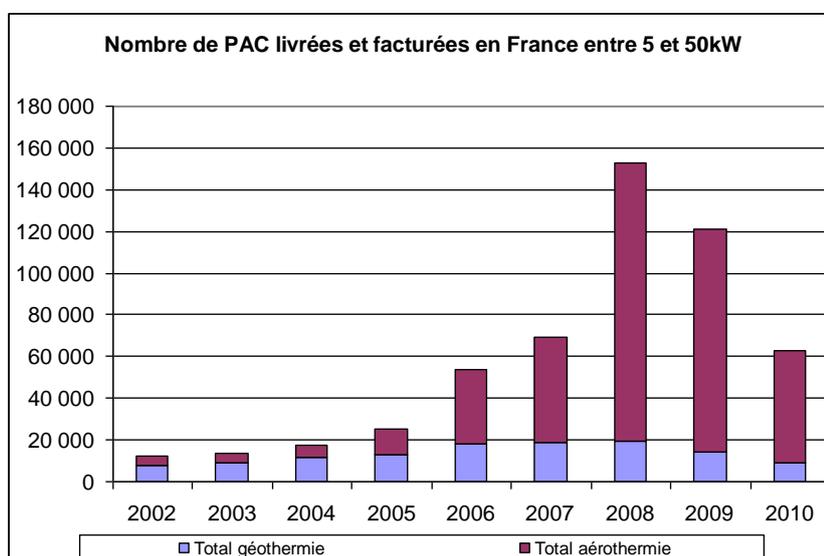


Illustration 32 : Marché français des PAC inférieures à 50 kW, livrées et facturées (AFPAC).

Le marché des pompes à chaleur de puissance supérieure n'est pas du tout aussi conséquent et est négligé dans notre approche.

Si on prend comme hypothèses les données présentées dans le tableau de l'illustration 33, on peut on peut considérer un taux d'équipement en PAC géothermique de 0,30 % en 2012.

Typologie	2006	2012
Nombre de logements en France	27 680 000	27 680 000
Nombre de bureaux en France (équivalent logement 70m ²)	13 142 857	13 142 857
Total	40 822 857	40 822 857
Nombre de bâtiments équipés en PAC (aérothermiques et géothermiques)	122 110	527 923
Taux d'équipement en PAC tous type (%)	0,30	1,29
Nombre de logements équipés en PAC géothermiques	60 350	121 686
Taux d'équipement en PAC géothermique (%)	0,15	0,30

Illustration 33

Typologie	2006	2012
Nombre de logements en France	27 680 000	27 680 000
Nombre de bureaux en France (équivalent logement 70m ²)	13 142 857	13 142 857
Total	40 822 857	40 822 857
Nombre de bâtiments équipés en PAC (aérothermiques et géothermiques)	122 110	527 923
Taux d'équipement en PAC tous type (%)	0,30	1,29
Nombre de logements équipés en PAC géothermiques	60 350	121 686
Taux d'équipement en PAC géothermique (%)	0,15	0,30

Illustration 33 : Nombre de logements (Source INSEE) et estimation du nombre de bâtiments totaux et équipés en PAC, en France (Comm. ADEME PACA).

7.3 SYNTHÈSE DE LA METHODOLOGIE RETENUE

La méthodologie énoncée dans les paragraphes précédents est présentée dans l'illustration 34.

DEMANDE / BESOINS

Bâtiments considérés

Seuls les bâtiments suivants sont considérés (voir tableau Sélection des bâti) :

- Bâti indifférencié
- Bâti commercial
- Serres

Tous ces bâtiments sont géolocalisés à partir de la BD TOPO.

Demande annuelle « brute » (calculée par bâtiment)

$$D_B = S \times (H / h) \times Ps \times c \text{ [kWh/m}^2\text{.an]}$$

S : emprise au sol [m²] : BT TOPO
 H : hauteur totale du bâtiment [m] : BD TOPO
 h : hauteur moyenne d'un étage : 3m
 Ps : Energie annuelle à fournir pour chauffer 1 m² : 150 kWh/m²/an
 c : coefficient SHON / SHOB [sans unité] : 0,8

« GISEMENT » GEOTHERMIQUE

Production moyenne extractible par maille

En nappe :

$$P_{TE \text{ nappe}} = 1,16 \times Q_P \times |\Delta T|$$

avec P_{TE} (puissance therm. extractible) en kW
 Q_P (débit prélevé) en m³/h

ΔT (écart entre T prélevée et injectée) en °C.

→ 1 forage /maille

→ |ΔT| = 4°C

→ Q_P = débit moyen de chaque classe

En sondes :

$$P_{TE \text{ sonde}} = \sum C_P \times 100$$

→ C_P = moyenne de chaque classe entre 25 et 100W/m

→ Chaque sonde fait 100m de profondeur

→ 1 sonde tous les 10 mètres (soit 50x50 sondes par cellule)

« Energie Fournie par maille »

$$E_{Fournie} = P_{Fournie} \times \text{heures [kWh.an.maille]}$$

Seules les zones favorable et très favorable seront considérées à partir de cette étape.

Pour les 2 techniques : intégration du COP pour avoir la puissance fournie au bâtiment

→ P_{FOURNIE} = P_{TE} / (1-1/COP))

COP moyen annuel considéré : 3,5

→ le nombre d'heures de fonctionnement à pleine charge considéré : 1400h/an

Découpage par maille :
Demande annuelle par maille

**Energie Fournie annuelle
 « nette »
 (calculée par maille)**

$$E_{Fournie \text{ Nette}} = E_{Fournie} \times \text{Coef Env}$$

Coef Env : Coef. d'abattement

Bilan par maille (à l'instant t) afin de définir le potentiel de la maille :

- Si E_{Fournie} ≥ D_N alors Potentiel de la maille = D_N

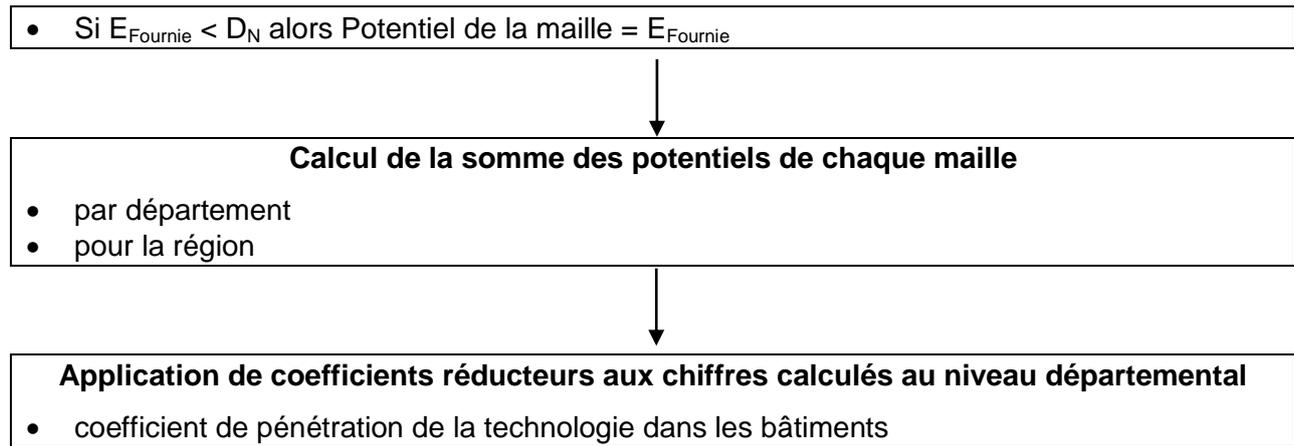


Illustration 34 : Synoptique de la méthodologie de détermination du potentiel géothermique mobilisable.

7.4 LE CONTEXTE "GRENELLE"

7.4.1 Objectifs "Grenelle" nationaux

Ils peuvent être résumés, pour ce qui concerne la géothermie, dans le tableau de l'illustration 35.

Objectifs "Grenelle (kTEP)	2006	2020	2006/2020
Géothermie totale	400	2 300	1 900
Géothermie profonde	130	500	370
Géothermie intermédiaire	50	250	200
PAC individuelle	200	1 600	1 400

Illustration 35 : Résumé des objectifs "Grenelle" nationaux pour la géothermie.

L'approche de cette étude concerne principalement la géothermie intermédiaire (les PAC individuelles n'ont pas été prises en compte puisqu'elles correspondent principalement à de l'aérothermie et non à de la géothermie).

7.4.2 Régionalisation des objectifs "Grenelle"

La régionalisation des chiffres Grenelle sur la base d'un ratio simple correspondant à la part de la population française résidant en PACA donne les résultats suivants (Illustration 36).

Objectif	En France		En PACA	
	TEP/an	MWh/an	TEP/an	MWh/an
2006	50 000	581 400	5 000	58 140
2020	250 000	2 907 000	25 000	290 700

Illustration 36 : Estimation des objectifs "Grenelle" régionalisés à PACA.

7.5 LES RESULTATS

Les résultats ci-dessous sont présentés pour l'ensemble des cellules de la maille régionale (Illustration 37), mais aussi pour les cellules éligibles (Illustration 38 et Illustration 39). C'est cette dernière valeur qu'il faudra retenir *in fine*.

L'énergie disponible intègre les contraintes environnementales, à travers les coefficients d'abattement appliqués à chaque cellule.

7.5.1 Calcul sur l'ensemble des cellules

Dépt.	Energie disponible (MWh/an)	Demande (MWh/an)	Potentiel mobilisable (MWh/an)	Part / région
04	413 117 676	2 876 902	1 737 596	3%
05	408 323 393	3 229 518	2 500 852	4%
06	20 706 474	15 150 185	15 146 465	23%
13	330 970 194	28 101 284	22 062 236	33%
83	22 413 092	16 396 705	16 391 046	25%
84	16 321 692	9 406 808	8 886 250	13%
PACA	1 211 852 521	75 161 402	66 724 446	100%

Illustration 37 : Calcul du potentiel mobilisable en PACA mené sur l'ensemble des cellules de la grille de calcul.

7.5.2 Calcul sur les cellules éligibles uniquement

Dépt	Energie disponible (MWh/an)	Demande (MWh/an)	Potentiel mobilisable (MWh/an)	Part / région	Part éligible / total
04	141 023 626	1 328 733	550 184	1%	32%
05	139 940 437	979 089	564 591	1%	23%
06	9 193 541	6 829 138	8 896 112	23%	59%
13	204 356 430	19 831 600	19 015 342	50%	86%
83	7 279 504	5 699 567	5 695 765	15%	35%
84	13 434 042	7 313 795	3 277 231	9%	37%
PACA	515 227 581	41 981 922	37 999 225	100%	57%

Illustration 38 : Calcul du potentiel mobilisable en PACA mené sur les cellules éligibles de la grille de calcul.

7.5.3 Calcul du potentiel mobilisable par type de géothermie

Dépt	GTH sur nappe (MWh/an)	GTH hors nappe (MWh/an)	Tous types de géothermie (MWh/an)
04	263 842	286 342	550 184
05	105 854	458 737	564 591
06	6 305 215	2 590 897	8 896 112
13	4 306 320	14 709 022	19 015 342
83	1 583 557	4 112 208	5 695 765
84	3 028 262	248 970	3 277 231
PACA	15 593 049	22 406 176	37 999 225

Illustration 39 : Calcul du potentiel mobilisable en PACA pour chacun des types de géothermie.

7.6 LES SCENARIOS FUTURS

Les scénarios actuels et futurs sont évalués en modifiant uniquement le paramètre du taux d'équipement.

En effet, le gisement du sous-sol ne change pas, les consommations des bâtiments évolueront certainement, mais ce point est considéré négligeable dans notre approche au regard des autres hypothèses considérées (notamment la densité de forage et de sondes par maille).

Ainsi, les chiffres du "Grenelle" permettent d'estimer des taux d'équipement de la manière suivante :

L'état des lieux "Grenelle 2006" indique une production d'énergie renouvelable de 58 1400 MWh/an en 2006 en PACA (voir plus haut). Le ratio de ce chiffre sur le potentiel géothermique en PACA établi au paragraphe précédent (près de 38 000 000 MWh/an) montre un taux d'équipement de 0,15%. Ce chiffre, obtenu par une méthode différente confirme celui donné dans l', issu du marché des PAC en France. Nous considérons donc dans notre étude, la valeur Grenelle, soit 0,15%.

De la même manière le taux d'équipement en considérant l'objectif Grenelle serait de 0,76% en 2020, ce qui permet de synthétiser les résultats dans le tableau de l'illustration 40.

Scénario	Taux d'équipement	Sources
Etat 2006	0,15%	Grenelle
Etat 2010	0,30%	Extrapolation du Grenelle en tenant des ventes de PAC
Horizon 2020	0,76%	Grenelle
Horizon 2030 ⁷	1,50 %	COPIL de l'étude

Illustration 40 : Estimation des taux d'équipement dans le futur en PACA.

7.7 CALCUL DU POTENTIEL NET SUR LES TROIS SCENARIOS TEMPORELS

En reprenant les tableaux du potentiel mobilisable et en leur appliquant les taux d'équipement, on obtient le tableau de l'illustration 41.

ANNEE	Taux de logements équipés	GTH sur nappe (MWh/an)	GTH hors nappe (MWh/an)	Total (MWh/an)
2006	0,15%	23 390	33 609	56 999
2010	0,30%	46 779	67 219	113 998
2020	0,76%	118 507	170 287	288 794
2030	1,50%	233 896	336 093	569 988

Illustration 41 : Potentiel mobilisable en fonction des prévisions de taux d'équipement en PACA

⁷ Estimation du COPIL, non produit dans le « Grenelle ».

7.8 POINTS DE VIGILANCE

A l'issue de ce travail, un certain nombre de points attirent l'attention et méritent d'être soulignés.

7.8.1 L'aspect économique

Il n'a pas été pris en compte dans cette étude.

L'investissement dans ces technologies est encore assez élevé (notamment pour les sondes géothermiques).

Le coût de fonctionnement permet de générer une économie annuelle qui va inciter le maître d'ouvrage à mettre en place de tels systèmes. Cette incitation est variable puisqu'elle dépend :

- du coût de l'énergie classique
- des subventions publiques (dans le Fonds Chaleur Renouvelable, en 2013, à hauteur de 2000 € max/tep EnR pour la géothermie sur nappes et 6500 € max/tep EnR pour les sondes).

7.8.2 Les sondes géothermiques, quel impact environnemental ?

Le potentiel mobilisable concernant la géothermie hors nappe (= géothermie sur sondes), est important, il convient néanmoins de mentionner que cette technologie soulève les interrogations suivantes :

- qu'en est-il du "démantèlement" des forages après leur fin de vie (de 20 à 50 ans environ) ? A quels coûts ? Pour information, le coût d'installation de la sonde se situe aux alentours de 70€/ml forés posé hors coût de la PAC (coûts 2011).
- quel est le risque de fuite de liquide caloporteur (eau glycolée) dans une sonde de 100 mètres de profondeur, tout au long de la durée de vie de l'installation ?

Les réponses à ces questions sont nécessaires pour qu'une politique de développement massif de cette technologie puisse être initiée dans de bonnes conditions.

Ces questions ne se posent pas pour la géothermie en nappe puisque le forage ne dépasse que très rarement les 25 mètres de profondeur et le liquide qui circule est l'eau de la nappe.

Le potentiel mobilisable lié à la géothermie sur sonde serait donc à revoir à la baisse dans un premier temps. Il semblerait plus opportun d'un point de vue environnemental de développer la filière géothermie sur nappe.

En prenant des hypothèses de développement de géothermie hors nappe plus faibles, afin d'intégrer l'incertitude liée à ces questions, le tableau de l'illustration 42 peut être proposé.

ANNEE	Taux de logements équipés	GTH sur nappe (MWh/an)	GTH hors nappe (MWh/an)	Total (MWh/an)
2010	0,30%	46 779	6 722 -	46 779
2020	0,76%	118 507	17 029 -	118 507
2030	1,50%	233 896	33 609 -	233 896

Illustration 42 : Evaluation du potentiel mobilisable régional en introduisant un coefficient réducteur d'utilisation de 10 % sur les deux types de géothermie.

7.8.3 Les PAC sur nappes, quels effets sur la nappe ?

L'impact d'un forage d'eau (captage – rejet) pour un usage géothermique est limité lorsqu'il n'y a pas concurrence de plusieurs forages sur une même nappe. Si une nappe est très sollicitée, ses caractéristiques peuvent dévier en termes de température ou de débit extractible.

A Lyon, plusieurs immeubles de bureaux (nombre et surface inconnus) climatisent leurs locaux à l'aide de PAC sur nappes. L'eau qu'ils réinjectent est plus chaude que l'eau prélevée. Au fur et à mesure de la saison et des années, l'eau de la nappe se réchauffe. Les performances des pompes à chaleur diminuent ainsi que la rentabilité des projets.

A Monaco, une quarantaine de PAC sur eau de mer ont été installés sur des grands bâtiments. Ces dernières années une augmentation de la température de l'eau dans la rade de Monaco est observée, néanmoins rien aujourd'hui ne prouve que ces faits soient liés.

Ainsi, une nappe d'eau superficielle peut fournir de l'énergie mais de façon limitée.

Ces éléments n'ont pas pu être appréhendés dans notre étude puisqu'il faudrait réaliser des simulations hydrodynamiques par nappe. Cependant, la mise en place d'un organisme régulateur à l'échelle au moins départementale, sinon de chaque nappe sollicitée, afin d'anticiper les problèmes voire de stopper la mise en place de PAC lorsque la nappe est au maximum de ses capacités.

En termes de potentiel géothermique régional, il pourrait être envisagé d'ajouter un coefficient prenant en compte ces éléments non pris en compte dans les cartes.

Ci-dessous, le tableau du potentiel régional en intégrant ce coefficient d'abattement, pris arbitrairement à 30 % de la valeur actuelle pour la géothermie sur nappe, et à 10 % de la valeur actuelle pour la géothermie sur sondes (Illustration 43).

	taux en % de logements équipés	GTH EN nappe (MWh/an)	GTH HORS nappe (MWh/an)	Total (MWh/an)
2010	0,30%	32 745	6 722	39 467
2020	0,76%	82 955	17 029	99 984
2030	1,50%	163 727	33 609	197 336

Illustration 43 : Evaluation du potentiel mobilisable régional en introduisant un coefficient réducteur d'utilisation de la géothermie sur nappes de 30 %, et de 90 % pour la géothermie sur sondes.

8. Conclusions

L'étude menée en région PACA concernant la géothermie de faible profondeur (très basse enthalpie) a porté sur la géothermie sur nappes (acquisition de la puissance à partir de forages d'eau souterraine) et sur la géothermie sur sondes géothermiques verticales (puissance tirée des échanges thermiques directs entre la sonde et le sous-sol).

Un atlas des potentialités géothermique a été dressé, sur la base de données hydrogéologiques et géologiques, embrassant ces deux types de géothermie. Il a permis de définir des zones de susceptibilités à la géothermie de faible profondeur, c'est-à-dire des zones plus ou moins favorable à l'implantation de projets (ce qui n'oblitére en rien le demandeur d'un projet d'une étude préalable sur le site envisagé). Ce site est en ligne sur www.geothermie-perspectives.fr.

En outre, le potentiel mobilisable de ce type de géothermie a pu être calculé en mettant en chaque point du territoire (découpé en maille dont les cellules mesurent 500 m de côtés) le gisement (pondéré par les contraintes spatiales liées à l'environnement ou à l'occupation de l'espace) et la demande du bâti, telle qu'elle ressort de l'exploitation des données issues de la BD CARTO® de l'IGN et d'un certain nombres d'hypothèses de travail.

Il apparaît au final que le potentiel mobilisable (fort différent du gisement) issu de la géothermie en nappe est du même ordre de grandeur que celui de la géothermie sur sondes (respectivement : 15 600 000 MWh/an et 22 400 000 MWh/an), avec cependant de fortes disparités entre les départements, qui tiennent aux contextes (hydro)géologiques différents, mais aussi à l'existence de contrastes en termes d'occupation de l'espace : ce potentiel varie de 19 000 000 MWh/an dans les Alpes-Maritimes à 500 000 MWh/an (pour les deux types de géothermie).

Les secteurs les plus « prometteurs » vis-à-vis de la géothermie en nappe sont les Alpes-Maritimes, les Bouches-du-Rhône et le Vaucluse, pour la géothermie sur sondes il s'agit plutôt des Bouches-du-Rhône, le Var ou les Alpes-Maritimes.

Les départements des Bouches-du-Rhône ou du Var ont un potentiel mobilisable sensiblement plus fort (plus de 3 fois plus fort) en géothermie sur sondes qu'en géothermie sur nappe, alors que la situation est inversée dans les Alpes-Maritimes ou le Vaucluse.

Les départements des Alpes-de-Haute-Provence et des Hautes-Alpes ont des potentialités moindres que les autres départements, du fait en grande partie de la faible densité de population existante, ou qui est prévue dans les vingt prochaines années.

Il convient de tempérer la précision de ces projections en rappelant notamment un certain nombre de points de vigilance, qui portent sur les aspects économiques, mais aussi sur l'impact des sondes géothermiques verticales sur le sous-sol et sur la fiabilité des PAC dans leur utilisation sur le long terme. Il conviendra de répondre à ces questions avant d'envisager le développement à grande échelle, notamment de la géothermie sur sondes.

9. 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.

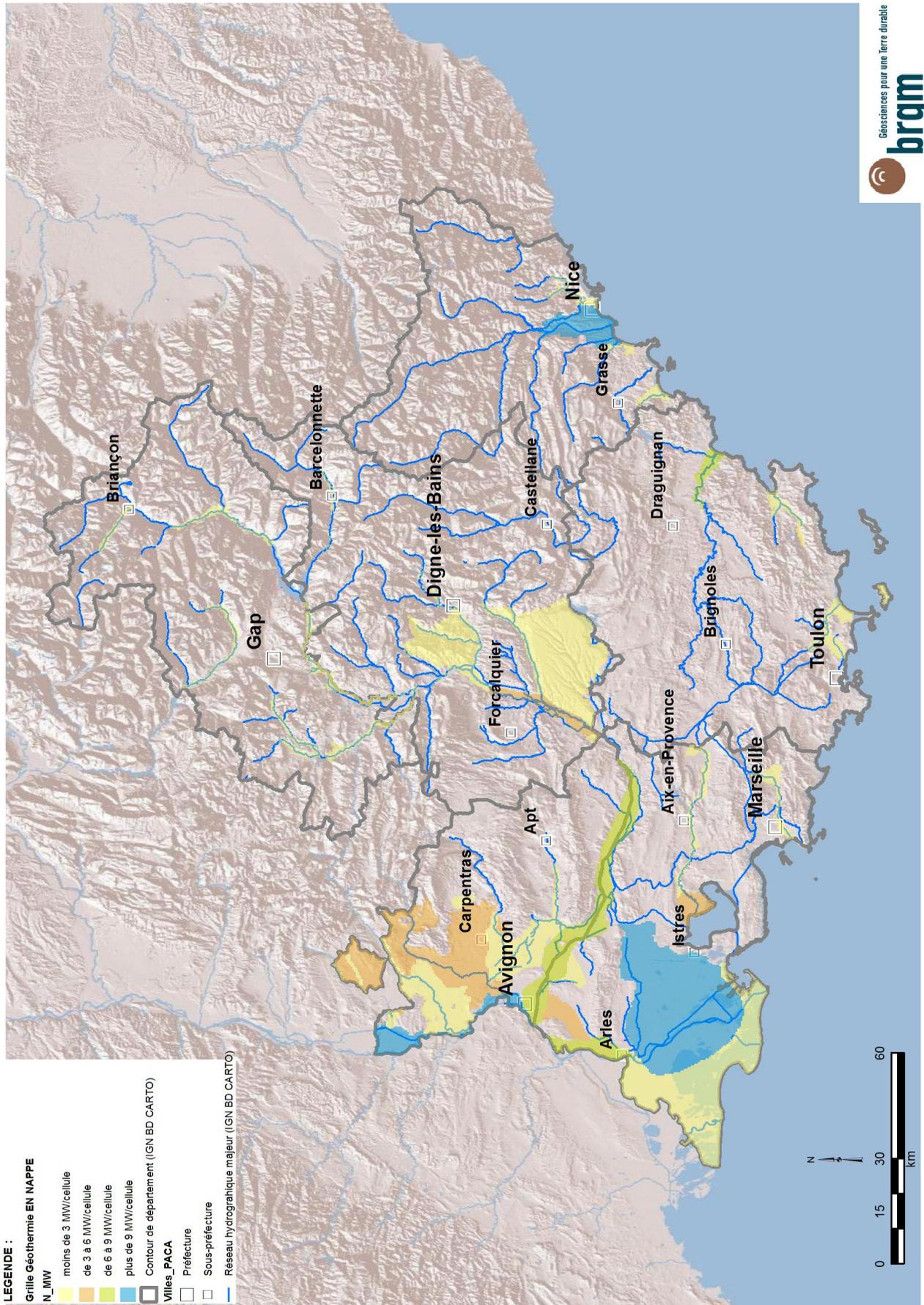
Moulin M., Salquère D, Sany F. (2013) – Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse. Actualisation de la synthèse hydrogéologique de la région PACA. Rapport final BRGM, RP-61846-FR, à paraître.

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

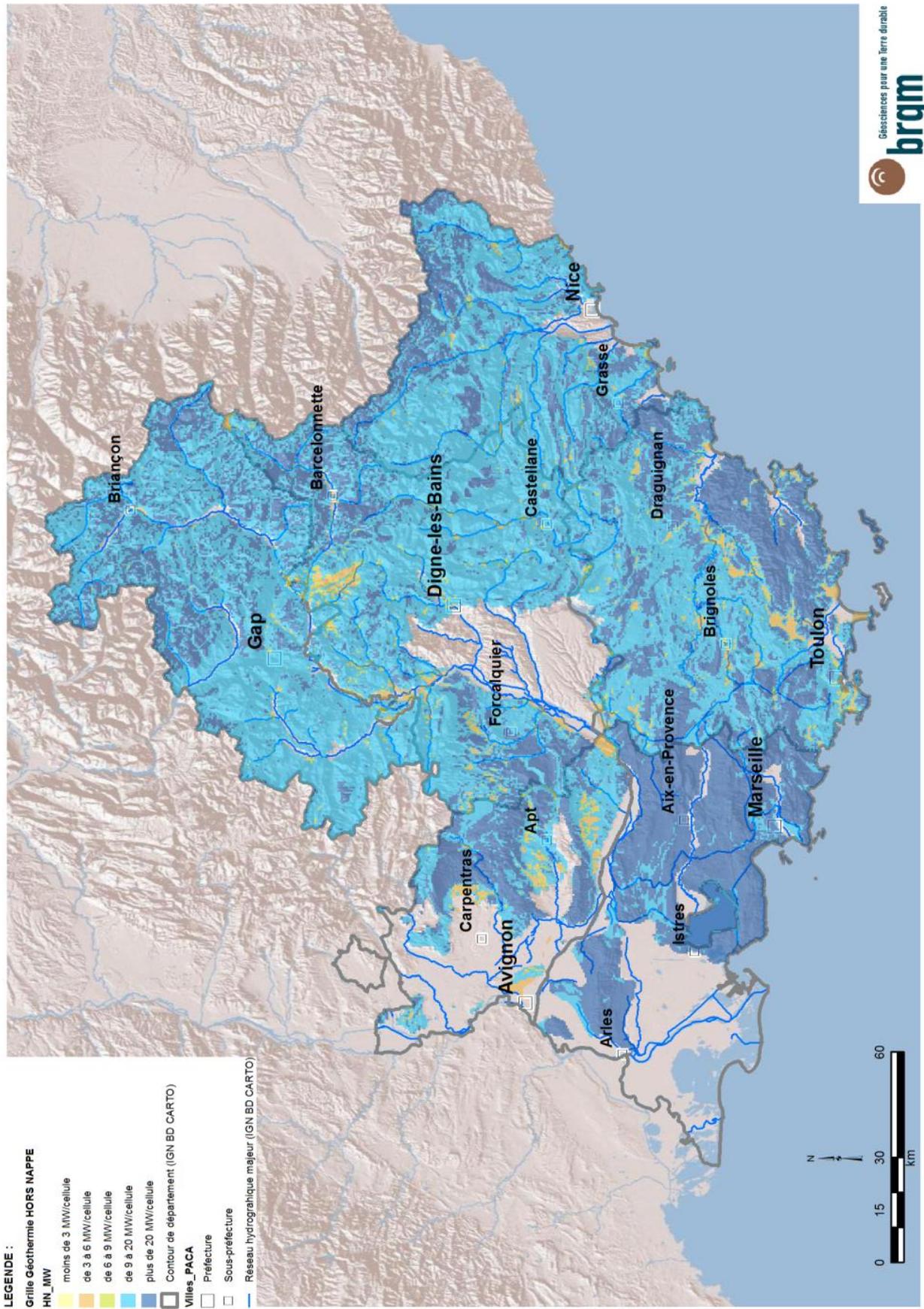
Pahud D. (2002) - Énergie géothermique et stockage de chaleur. Publication du Département Constructions et Territoire du Laboratoire d'Énergie, d'Écologie et d'Économie de l'École Universitaire Professionnelle de Suisse italienne.

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.

Annexe 1 : Cartes des puissances extractibles par la géothermie sur nappes et par la géothermie sur sondes

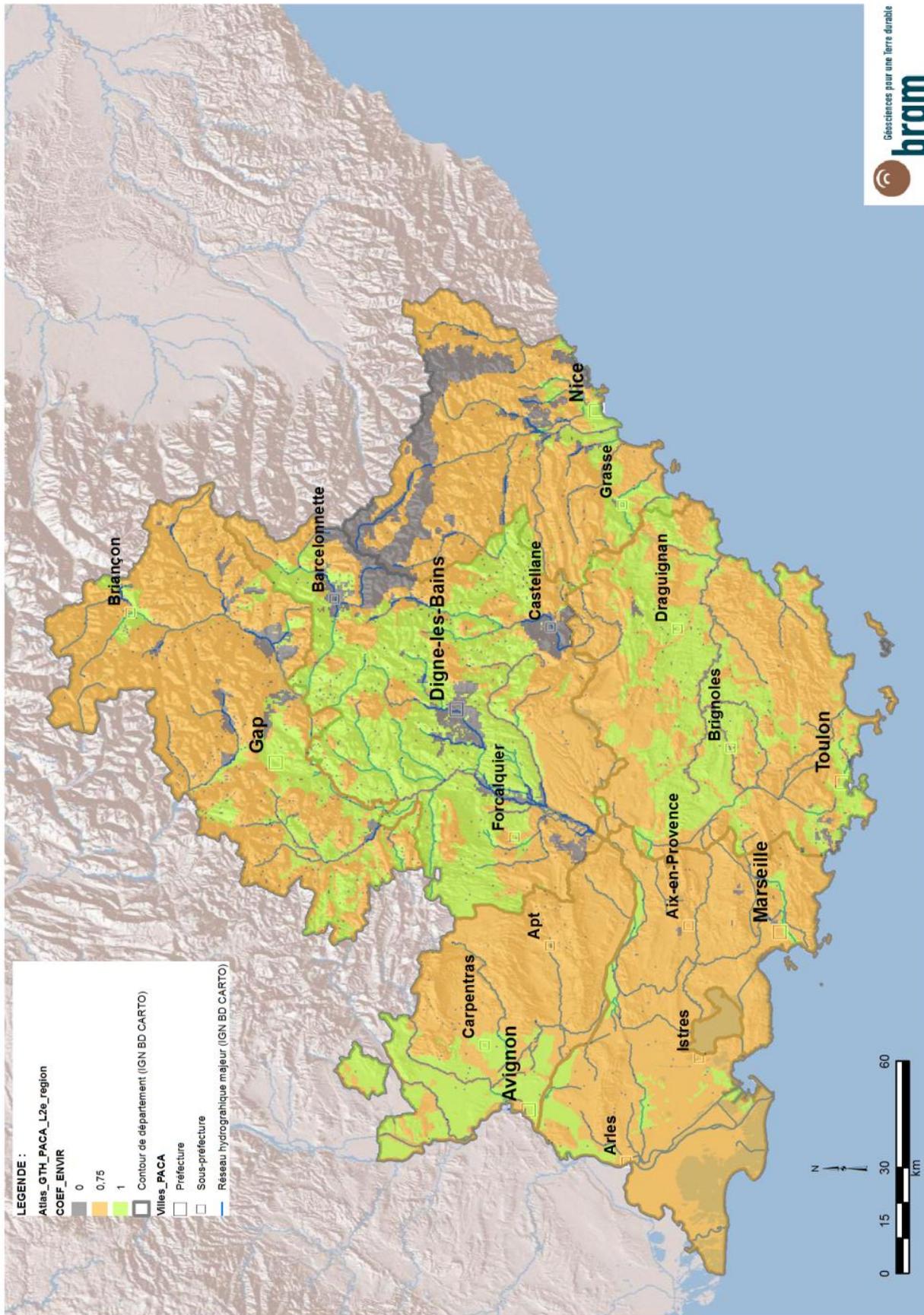


Carte des puissances extractibles par cellule concernant la géothermie sur nappes.



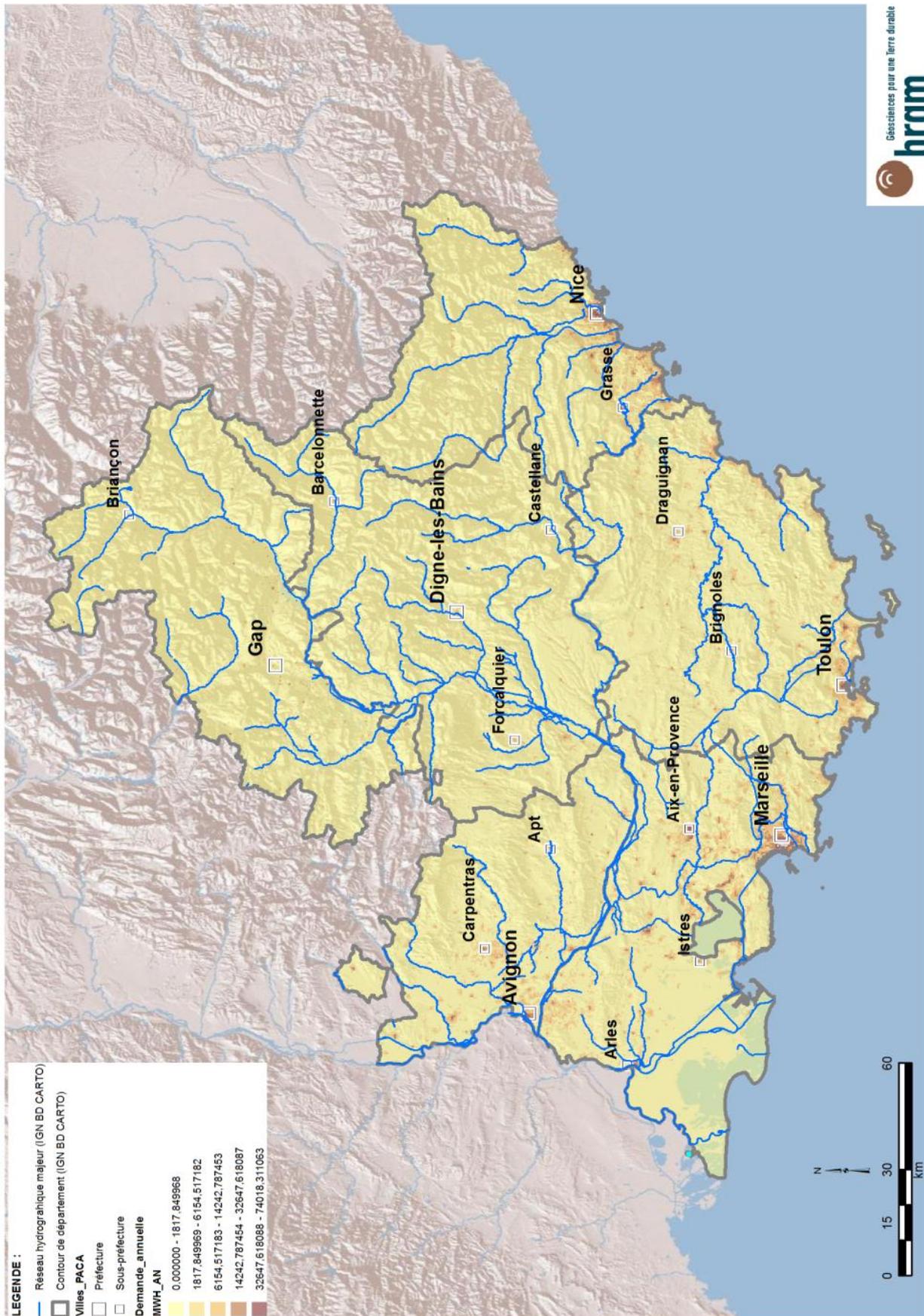
Carte des puissances extractibles par cellule concernant la géothermie sur sondes.

Annexe 2 : Cartes des coefficients d'abattement liés enjeux environnementaux ou aux contraintes d'occupation de l'espace



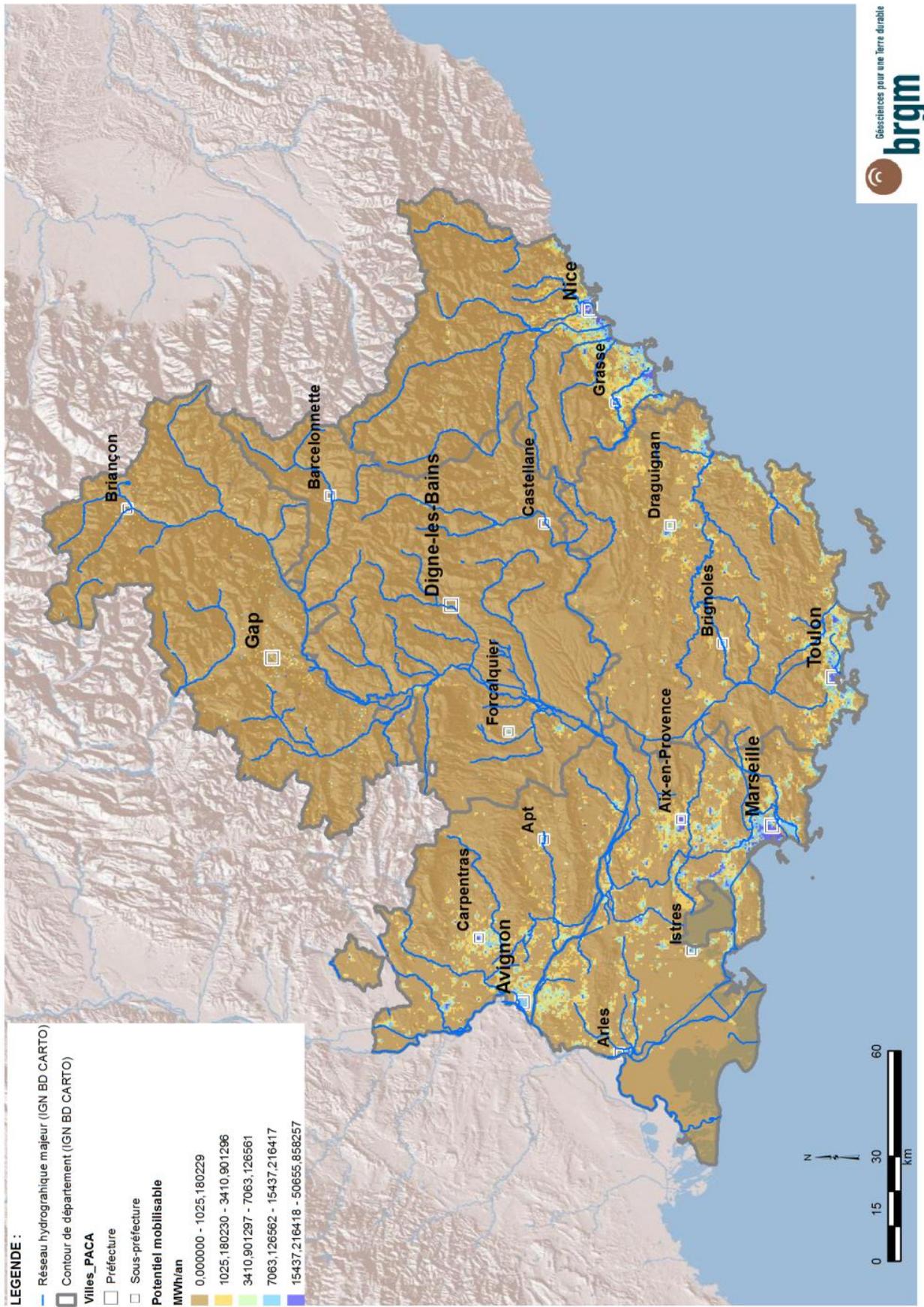
Carte des zones à coefficients d'abattement des valeurs du gisement géothermique.

Annexe 3 : Carte de la demande en énergie



Carte de la demande en énergie des bâtiments (données BD CARTO® IGN).

Annexe 4 : Carte du potentiel mobilisable, calculé au sein des cellules éligibles



Carte du potentiel mobilisable en géothermie pour la région PACA.

Annexe 5 : Evaluation de la sensibilité aux différentes valeurs du coefficient d'abattement lié aux contraintes d'occupation de l'espace dans les zones à faible enjeu

Cellules éligibles	Coef. abattement	Energie nette (MWh/an)	Demande (MWh/an)	Potentiel (MWh/an)	Nombre de cellules
Non	0,75	293 307 477	13 141 712	12 429 338	36 672
Oui	0,75	531 374 733	29 655 192	25 606 487	49 934
Total 0,75		824 682 210	42 796 903	38 035 825	86 606
Non	1	265 161 452	11 841 177	11 820 721	19 251
Oui	1	136 348 678	17 729 676	15 657 595	15 233
Total 1		401 510 130	29 570 853	27 478 315	34 484
Non	0	1 361 618	1 517 177	998 520	4 561
Oui	0	472 697	1 411 872	346 888	3 864
Total 0		1 834 316	2 929 049	1 345 408	8 425

Etude de sensibilité au facteur 0,75 utilisé pour les zones de contraintes environnementales à faible enjeu.



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 - www.brgm.fr

**Direction régionale Provence-Alpes-Côte d'Azur du
BRGM**
117, avenue de Luminy – BP 168
13276 Marseille cedex 09
Tél. : 04.91.17.74.77. Fax : 04.91.17.20.40.