

Éléments de développement de la géothermie dans le secteur du Grand Arénas Rapport final

hib-2 d7-hia BRGM/RP-64401-FR Avril 2015

de-hia

hit



.89 3740,46 -625.5





Éléments de développement de la géothermie dans le secteur du Grand Arénas

Rapport final

BRGM/RP-64401-FR

Avril 2015

Étude réalisée dans le cadre du projet d'Appui aux politiques publiques du BRGM PSP14PAC23

J.-C. Martin, P. Durst, S. Caritg, P. Calcagno, M. Moulin, C. Maragna

Vér	ificateur :	
Nom : Virginie HAMM		
Fonction : Hydrogéologue		
Date :	1210412015	
Signature :	Ray	

Approbateur :
Nom : Claire ARNAL
Fonction : Directrice BRGM/PAC
Date : 20/04/2015

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.





Mots-clés : Géothermie, Grand Arénas, Très basse énergie, Pompe à chaleur, Aquifère, Modélisation, Biseau salé, Aménagement.

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

Martin J.-C., Durst P., Caritg S., Calcagno Ph., Moulin M., Maragna C. (2015) - Élément de développement de la géothermie dans le secteur du Grand Arénas. Rapport final. BRGM/RP-64401-FR, 129 p., 67 ill., 32 tabl., 7 ann.

© BRGM, 2015, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce rapport présente les résultats des travaux de la Convention de recherche et développement à coûts partagés EPA Plaine du Var et BRGM visant « l'évaluation du potentiel géothermique du secteur du Grand Arénas », l'EPA étant maître d'ouvrage de l'opération.

Une étude précédente avait été menée par le BRGM en 2013 sur le secteur de Nice Méridia. Celle-ci avait permis de mettre en évidence le fort potentiel géothermique de la nappe des alluvions du Var (rapport BRGM/RP-62578-FR). Encouragé par ces résultats, l'EPA a souhaité étudier la possibilité d'une utilisation de la ressource géothermale pour couvrir les besoins énergétiques (chaud et/ou froid) des bâtiments du secteur en développement du Grand Arénas.

L'objectif est de couvrir les besoins de chauffage et de rafraîchissement des équipements programmés qui représentent environ 750 000 m² couverts, répartis en 20 % de logement, 55 % de tertiaire et 25 % d'équipement et service.

Le rapport présente tout d'abord les besoins énergétiques du Grand Arénas, qui ont été répartis en 5 macro-îlots, et pour lesquels la puissance nette maximale totale de chaleur est estimée à 17,4 MW et la puissance nette maximale totale de rafraîchissement à 37,5 MW. Pour couvrir ces besoins, il serait nécessaire de pouvoir disposer d'un débit d'eau souterraine de 440 m³/h pour les besoins de chaleur et de 3 800 m³/h pour les besoins de froid. On entend par puissance nette la puissance de chaud ou de froid utilisée dans les bâtiments. Celle-ci est différente des puissances échangées avec le sous-sol.

Le potentiel géothermique du secteur du Grand Arénas a été évalué en considérant d'une part les possibilités offertes par les nappes d'eau souterraines, d'autre part par une solution alternative présentée par un champ de sondes géothermiques verticales.

Le potentiel géothermique sur nappe

L'évaluation du potentiel géothermique sur nappe a été faite au moyen d'une modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains, réalisée à l'aide du logiciel MARTHE. Cette modélisation a été précédée d'une modélisation géologique qui a montré la complexité de la nappe des alluvions du Var à proximité du site du Grand Arénas. En aval de la basse vallée du Var, les couches superficielles à faciès sableux et graveleux disparaissent au profit de deux couches à faciès argileux dominant. Celles-ci séparent les alluvions du Var en 3 niveaux aquifères. On distingue ainsi un aquifère superficiel, un aquifère intermédiaire et un aquifère profond. Les formations argileuses forment, à l'aplomb des remblais de l'aéroport, une puissante barrière imperméable d'environ 50 à 70 m d'épaisseur qui empêchent tout accès des niveaux aquifères superficiels à la mer dans la direction nord-sud. L'ensemble multicouche, formations aquifères et formations imperméables, représente une épaisseur totale de 80 m qui repose sur un substratum constitué des poudingues pliocènes, eux-mêmes aquifères mais beaucoup moins perméables que les alluvions sus-jacents.

Le modèle hydrodynamique s'est appuyé d'une part sur une géométrie des formations géologiques définie par GeoModeller, d'autre part sur l'ensemble des données existantes et qui constituent les données du modèle, à savoir la piézométrie observée de la nappe, les perméabilités mesurées des formations aquifères, les caractéristiques du fleuve Var, les débits de prélèvement et de réinjection des forages en exploitation.

Cette modélisation hydrodynamique a permis d'évaluer le débit d'écoulement naturel de la nappe au droit du Grand Arénas pour chacun des aquifères identifiés, comme suit :

- aquifère superficiel : 493 m³/h ;
- aquifère intermédiaire : 315 m³/h ;
- aquifère profond : 555 m³/h.

Afin d'éviter le recyclage des eaux réinjectées, il est nécessaire de ne pas dépasser en prélèvement ces débits. Les simulations d'exploitation de la nappe ont été faites avec l'hypothèse d'un débit de pointe de 800 m³/h, ce qui correspond à un débit moyen en continu égal à 431 m³/h (débit maximum d'exploitation en juillet), du même ordre de grandeur que les débits d'écoulement calculés par modélisation. Ce débit a été réparti sur 5 doublets, un doublet par macro-îlot. Il a été supposé, lors de 3 scénarios d'exploitation, qu'un seul niveau aquifère serait exploité à la fois. Il n'a pas été envisagé une exploitation simultanée des 3 aquifères.

Les calculs thermiques, réalisés par Egis Conseils, montrent qu'une puissance de chauffage de 6 MW, à comparer au maximum demandé de 17,4 MW, nécessitant un débit de 430 m³/h, permettrait de couvrir 97 % des besoins de CHAUD, et qu'une puissance de rafraîchissement de 6,4 MW, à comparer au maximum demandé de 37,5 MW, nécessitant un débit de 800 m³/h, permettrait de couvrir 26 % des besoins de FROID (voir Tableau 23). Ces débits d'exploitation sont envisageables sur le site du Grand Arénas.

La modélisation de l'exploitation de la nappe par 5 doublets montre l'importance du positionnement des forages de réinjection par rapport aux forages de production. Ainsi les forages P3 et P4, situés en aval de forage de réinjection, verraient leurs températures d'exploitation influencées par les réinjections amont.

Des travaux de reconnaissance sont à réaliser au droit du Grand Arénas afin de vérifier les communications entre les différents niveaux aquifères. Selon les résultats qui seront obtenus, il pourrait être envisagé des débits d'exploitation plus importants, et même, afin de limiter les influences réciproques des doublets entre eux, de positionner les doublets dans différents niveaux aquifères.

Dans les conditions d'exploitation de l'étude, il s'avère que l'impact hydrothermique des doublets géothermiques sur la nappe serait faible. Celui-ci a été estimé à moins de 7 cm sur la piézométrie du captage AEP des Sagnes le plus proche, et à moins de 0,1 °C sur la température des eaux prélevées.

Le potentiel géothermique sur sondes géothermiques verticales

Une solution alternative, constituée d'un champ de Sondes Géothermiques Verticales, a été étudiée pour la couverture des besoins en énergie thermique du macro-ilot n° 2 uniquement, sous différentes configurations comportant de 20 km à 60 km de forage. Le coefficient de performance saisonnier de la PAC géothermique hors fonctionnement des auxiliaires (circulateurs et régulations) est estimé, suivant la configuration, entre 5,2 et 6,0. La production de froid constitue le facteur limitant de la production d'énergie thermique par le champ de sondes. L'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid) ramenée au mètre de forage diminue avec la longueur totale de forage.

Pour une longueur de forage de 20 km, une configuration à 200 sondes de 100 m est plus efficace qu'une configuration à 100 sondes de 200 m ; l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 185 kWh.m⁻¹.

30,4 % de la puissance crête en froid du macro-îlot n° 2 peuvent être couverts (soit 1 605 kW), ce qui correspond à une couverture de 44,1 % des besoins annuels de froid (soit 1 270 MWh). 29,6 % de la puissance crête en chaud du macro-îlot n° 2 peuvent être couverts (soit 731 kW), ce qui correspond à 89,3 % de la demande annuelle en chaud (soit 2 437 MWh).

Pour une longueur de forage de 60 km, l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 89 kWh.m⁻¹. 76,0 % de la puissance crête en froid peuvent être couverts (soit 4 003 kW), ce qui correspond à une couverture de 90,4 % des besoins annuels de froid (soit 2 601 MWh). La totalité de la demande en chaud peut être couverte.

Du point de vue investissement, une telle opération nécessiterait, selon les options retenues, les investissements suivants :

Aquifère	Profondeur (m)	Coût (HT)
Superficiel	20	800 000
Intermédiaire	50	1 100 000
Profond	80	1 400 000

- pour une géothermie sur nappe à partir de 5 doublets (10 forages) :

- pour une géothermie sur champ de sondes géothermiques :

sur la base des données du chantier du nouveau siège d'AIRBUS GROUP à Toulouse, l'estimation d'un champ de sondes, pour plusieurs hypothèses de nombre de sondes et de profondeurs, est indiquée ci-après.

Hypothèses	Linéaire (m)	Coût (HT)
100 SGV de 100 m	10 000	860 000
100 SGV de 200 m	20 000	1 720 000
200 SGV de 100 m	20 000	1 720 000
200 SGV de 200 m	40 000	3 440 000
300 SGV de 200 m	60 000	5 160 000

Coût d'un champ de SGV, selon différentes hypothèses.

Du point de vue réglementaire, à cause des puissances thermiques et des débits en jeu (plus de 500 kW et plus de 80 m³/h), une telle opération de géothermie serait soumise à demande d'autorisation au titre du Code minier pour sa partie chauffage, et à autorisation au titre du Code de l'environnement pour sa partie rafraîchissement.

Par ailleurs, le SAGE Nappe et Basse Vallée du Var édicte des règles particulières d'utilisation de la ressource en eau dans le secteur aval de la nappe du Var. L'Article 2 (Réservation de la nappe alluviale profonde pour l'usage eau potable) précise que « tout sondage, forage, puits ou ouvrage souterrain exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire d'eau

permanent dans les eaux souterraines, situé sur le périmètre de l'espace nappe, ne pourra être autorisée au titre du § 1.1.1.0 de l'article R214-1, au-delà d'une profondeur de :

- 30 mètres sous le terrain naturel sur le secteur aval de la nappe compris entre la mer et le prolongement de la digue des Français ;
- 50 mètres sous le terrain naturel dans le secteur amont de la nappe compris entre le prolongement de la digue des Français et les zones de confluence avec l'Estéron et la Vésubie ».

Une dérogation à cette limite est prévue, si la nécessité technique est dûment justifiée, pour les ouvrages destinés aux prélèvements publics pour l'alimentation en eau potable, à l'amélioration des connaissances, à la surveillance des eaux, et à la géothermie dans les conditions prévues à l'Article 4 (Utilisation des eaux souterraines pour la protection d'énergie géothermique) qui précise que « les prélèvements destinés à la production d'énergie géothermique ne peuvent être autorisés que s'ils n'impactent pas les usages et prélèvements des eaux souterraines existants. Les prélèvements destinés à la production d'énergie géothermiques doivent systématiquement prévoir une réinjection des eaux prélevées dans le même aquifère. » Il est précisé dans cet également que l'exploitation de la nappe pour un usage géothermique ne doit pas modifier les caractéristiques des écoulements.

À ce titre, il sera nécessaire d'obtenir une dérogation de la part du SAGE Nappe et Basse Vallée du Var pour pouvoir réaliser des forages géothermiques dans ce secteur de la nappe.

D'autre part, le champ captant Les Sagnes interdit tout forage géothermique dans son périmètre de protection rapprochée (PPR1 et PPR2). Le macro-îlot n° 1, entièrement compris dans les limites du périmètre de protection rapprochée PPR2, devra avoir son doublet à l'extérieur de ce périmètre de protection.

Sommaire

1. Introduction1	7		
2. Évaluation des besoins énergétiques du Grand Arénas1	9		
2.1. LES SUPERFICIES ET LES TYPES DE BÂTIMENTS DU GRAND ARÉNAS1	9		
2.2. CALCUL DES BESOINS ENERGÉTIQUES (ÉTUDE EGIS CONSEILS)	20		
2.2.1. Les hypothèses de calcul	. i 21		
2.2.3. Résultats des besoins énergétiques2	22		
2.3. ESTIMATION DES BESOINS EN EAU POUR LE CHAUFFAGE ET LES BESOINS EN FROID DES BÂTIMENTS2	<u>2</u> 4		
3. Les études géologiques et hydrogéologiques antérieures2	25		
4. Caractérisation hydrogéologique du milieu visé2	27		
4.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE LOCAL2	27		
4.1.1. Géologie de la basse vallée du Var2	27		
4.1.2. Hydrodynamique de la basse vallée du Var2	27		
4.2. RÉALISATION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE	30		
4.2.1. Introduction	30		
4.2.2. Synthese des donnees geologiques disponibles dans la bibliographie	51 25		
4.2.3. Interpretation des données	,5 12		
4.2.5. Résultats et conclusion4	16		
5. Les paramètres hydrodynamiques des aquifères49			
5.1. CALAGE DU MODÈLE HYDRATEC4	19		
5.2. RÉSULTATS DES POMPAGES D'ESSAI SUR LE SITE DE NICE MERIDIA5	50		
5.3. LES DONNÉES DU DOUBLET DE LA BANQUE POPULAIRE CÔTE D'AZUR5	50		
5.4. LES DONNÉES DES FORAGES DU MUSÉE DES ARTS ASIATIQUES5	51		
5.5. RÉSULTATS DES INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES DE LA TRANCHÉE COUVERTE GRINDA (ÉTUDE NCA)5	52		
6. Piézométrie de la nappe des alluvions du Var5	5 5		
6.1. LES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES DANS LA VALLÉE DU VAR	55		
6.2. LES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES SUR LE SITE DU GRAND ARÉNAS5	58		
6.3. LES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES SUR LE DOMAINE DE L'AÉROPORT5	59		
7. Les débits du Var à Nice6	51		
8. Les prélèvements en nappe63			

8.1. LES PRÉLÈVEMENTS AEP	63
8.2. LES PRÉLÈVEMENTS DE L'AÉROPORT	65
8.3. AUTRES PRÉLÈVEMENTS	66
8.3.1. Le forage du Musée des Arts Asiatiques	66
8.3.2. Le doublet de rafraîchissement de la Banque Populaire	67
8.3.3. Le forage du Marché d'Intérêt National Nice Côte d'Azur (MIN)	67
8.4. BILAN DES PRÉLÈVEMENTS ET DES RÉINJECTIONS DANS LA ZONE DU GRAND ARENAS	68
9. Modélisation hydrodynamique multicouche	69
9.1. LES LIMITES D'EXTENSION, LE MAILLAGE ET LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE MULTICOUCHE	69
9.2. LES DONNÉES DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE MULTICOUCHE	70
9.3. LES RÉSULTATS DU CALAGE EN RÉGIME PERMANENT	71
9.3.1. Les perméabilités des terrains résultant du calage du modèle	71
9.3.2. Les piézométries observées et calculées	71
9.3.3. Le bilan des débits du modèle MARTHE en régime permanent	73
10. Simulation de l'exploitation de la nappe pour un usage géothermique	77
10.1.CRITÈRES DE DÉFINITION DES DÉBITS D'EXPLOITATION DE LA NAPPE	77
10.2. PROTOCOLE DE SIMULATION DE L'EXPLOITATION PAR DOUBLETS DE LA NAPPE DES ALLUVIONS	77
10.3.RÉSULTATS DES SIMULATIONS DE L'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE DE LA NAPPE DES ALLUVIONS	84
10.3.1.Évolution comparative des températures aux puits de production sur une période d'exploitation de dix ans pour les 3 scénarios	84
10.3.2.Évolution comparative des niveaux piézométriques aux puits de production et de réinjection sur une période d'exploitation de dix ans pour les 3 scénarios	า 89
10.4. SEUILS D'EXPLOITATION DE LA NAPPE VIS-À-VIS DU BISEAU SALÉ	92
CAPTANT DES SAGNES	92
10.6. CONCLUSION SUR L'USAGE D'UNE GÉOTHERMIE SUR NAPPE	92
11. Évaluation d'une solution alternative : champ de sondes verticales géothermiques assisté par pompe à chaleur	95
11.1. DÉFINITION D'UN CHAMP DE SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES	95
11.2. MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTERMINATION DES TAUX DE COUVERTURE OPTIMAUX EN CHAUD ET EN FROID	96
11.3. CONSTRUCTION DU MODÈLE DYNAMIQUE DU CHAMP DE SONDES ASSISTÉ PAR POMPE A CHALEUR	97

11.3.1. Étude comparée des besoins énergétiques des 5 macro-ilots et sélection du macro-îlot 2	97
11.3.2. Pompe à chaleur (PAC), performances et températures de condensation	
et d'évaporation	101
11.3.3. Propriétés thermophysiques des terrains traversés	103
11.3.4. Choix des configurations de champs de sondes	104
11.4. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS	107
11.5. SOLUTION A 200 SONDES PROFONDES DE 200 M : RÉSULTATS DES SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES	109
11.6. DONNÉES COMPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES POUR AFFINER LES MODÈLES	111
11.7. CONCLUSION SUR L'USAGE D'UN CHAMP DE SONDES VERTICALES GÉOTHERMIQUES ASSISTÉ PAR POMPE A CHALEUR	112
12. Évaluation du coût des ouvrages à réaliser pour les solutions étudiées	115
12.1. ÉVALUATION DU COÛT DES OUVRAGES POUR UNE GÉOTHERMIE SUR NAPPE	115
12.2. ÉVALUATION DU COÛT DES OUVRAGES POUR UNE GÉOTHERMIE SUR SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES	115
13. Rappel sur la législation en matière de géothermie	119
13.1. LE CODE MINIER	119
13.2. LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT	120
13.3. RÉGLEMENTATION APPLIQUÉE AU PROJET DU GRAND ARÉNAS EN MATIÈRE D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES	121
13.4. RÉGLEMENT DU SAGE DE LA NAPPE ET DE LA BASSE VALLÉE DU VAR	122
13.5. RÉGLEMENTATION DANS LE PÉRIMÈTRE DE PROTECTION DES CAPTAGES DES SAGNES	123
14. Conclusions	125
15 Pibliographia	107
	121

Liste des illustrations

Figure 1 -	Vue de l'aéroport Nice Côte d'Azur. Localisation du Grand Arénas	.17
Figure 2 -	Plan du Grand Arénas et localisation des 5 macro-îlots	.19
Figure 3 -	Superficie de plancher par type de bâtiment (m ²).	.20
Figure 4 -	Demande de chaleur et de froid totale (MW)	.23
Figure 5 -	Courbe monotone chaleur et froid totale, puissance appelée (MW) sur 365 jours (axe des abscisses).	.23
Figure 6 -	Estimation des besoins en eau pour le chauffage et la climatisation des bâtiments par pompe à chaleur sur nappe, pour 6 MW de besoins nets en chaud et 30 MW de besoins nets en froid	.24
Figure 7 -	Chronologie des études réalisées et consultées lors de cette étude.	.25
Figure 8 -	Carte synthétique des données géologiques disponibles sur la basse vallée du Var et retenues pour le projet Grand Arenas. (Carte géoréférencée sous ArcGis. Système de coordonnées NTF/ Lambert 2 étendu)	.34
Figure 9 -	Traduction du log lithologique des coupes de H2HA et Mangan (2010) en log de faciès plus ou moins perméables pour le modèle géologique	.35
Figure 10 -	Interprétation des données du forage PZ3 selon les couches de faciès +/- perméables définies pour le modèle géologique.	.38
Figure 11 -	Calage des limites de couches en profondeur à partir des forages interprétés et harmonisés	.40
Figure 12 -	Coupes interprétées en 7 couches de faciès plus ou moins perméables et calées en profondeur par 27 forages (modifiées d'après H2EA et Mangan 2010)	.41
Figure 13 -	Les niveaux géologiques du modèle géologique (Pile Géologique)	.43
Figure 14 -	Vue en perspective cavalière du modèle géologique observé depuis le sud-est	.43
Figure 15 -	Substratum constitué des poudingues pliocènes, observé depuis le sud-est	.43
Figure 16 -	Aquifère profond n° 3 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.	.44
Figure 17 -	Niveau argileux n° 2 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.	.44
Figure 18 -	Aquifère superficiel n° 2 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est	.44
Figure 19 -	Niveau argileux n° 1 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est	.45
Figure 20 -	Aquifère superficiel n° 1 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est	.45
Figure 21 -	Remblais enthropiques de l'aéroport.	.45
Figure 22 -	Profil moyen au droit du site du Grand Arénas	.47
Figure 23 -	Données du forage des Arts asiatiques	.51
Figure 24 -	Localisation des sondages géotechniques.	.54
Figure 25 -	Piézométrie de la nappe alluviale (octobre 1999). Emplacement des piézomètres P35 et P36, ainsi que les piézomètres SC1 à SC6 du site du Grand Arénas.	.56
Figure 26 -	Historique piézométrique sur le forage P35	.57
Figure 27 -	Historique piézométrique sur le forage P36	.57
Figure 28 -	Localisation des piézomètres SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 et SC6	.58

Figure 29 -	Localisation des piézomètres de l'aéroport. Mesures réalisées sur les nappes superficielles et profondes le 20 février 20135	59
Figure 30 -	Débit du Var à Nice - Station Pont Napoléon6	51
Figure 31 -	Localisation des forages de pompage et de réinjection sur la zone de l'aéroport de Nice	6
Figure 32 -	Localisation des forages de pompage et de réinjection dans la zone du Grand Arénas6	58
Figure 33 -	Les couches du modèles hydrodynamique MARTHE6	;9
Figure 34 -	Emplacement des piézomètres dans la partie basse de la plaine du Var, utilisés pour le calage du modèle MARTHE7	'2
Figure 35 -	Graphique comparatif des valeurs piézométriques observées et calculées par le modèle MARTHE7	'2
Figure 36 -	Bilan des flux du modèle MARTHE en régime permanent (données en litre/seconde)7	'3
Figure 37 -	Estimation du débit de la nappe profonde vers la mer - Y. Guglielmi et L. Prieur dans Journal of Hydrology (1997)7	'4
Figure 38 -	Schéma du fonctionnement d'un doublet géothermique et incidence du débit d'exploitation sur son fonctionnement	7
Figure 39 -	Emplacement des 5 doublets géothermiques dans le périmètre du Grand Arénas (le projet de doublet EDF est représenté mais non simulé)	'8
Figure 40 -	Piézométrie et sens des écoulements des 3 niveaux aquifères en régime permanent (hors exploitation géothermique des doublets du Grand Arénas)	30
Figure 41 -	Volume d'eau réinjectée en mode CHAUD (réinjection d'eau froide) et en mode FROID (réinjection d'eau chaude) en m ³ /an8	33
Figure 42 -	Températures de l'aquifère superficiel après dix ans d'exploitation, situation à fin mai, fin de la période de chauffage (la zone grisée est hors niveau nappe superficielle)8	35
Figure 43 -	Températures de l'aquifère superficiel après dix ans d'exploitation, situation à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement (la zone grisée est hors niveau nappe superficielle)	35
Figure 44 -	Températures de l'aquifère intermédiaire après dix ans d'exploitation, situation à fin mai, fin de la période de chauffage (la zone grisée est hors niveau nappe intermédiaire)	86
Figure 45 -	Températures de l'aquifère intermédiaire après dix ans d'exploitation, situation à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement (la zone grisée est hors niveau nappe intermédiaire)	36
Figure 46 -	Températures de l'aquifère profond après dix ans d'exploitation, situation à fin mai, fin de la période de chauffage (la zone grisée est hors niveau nappe profonde)	37
Figure 47 -	Températures de l'aquifère profond après dix ans d'exploitation, situation à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement (la zone grisée est hors niveau nappe profonde)	37
Figure 48 -	Évolution des températures sur les puits de production (durée 10 ans) (unité de l'axe des abscisses : mois)8	38
Figure 49 -	Évolution des niveaux piézométiques sur les forages de production (durée 10 ans) (unité de l'axe des abscisses : mois)9	90
Figure 50 -	Évolution des niveaux piézométiques sur les forages de réinjection (durée 10 ans) (unité de l'axe des abscisses : mois)9)1
Figure 51 -	Impact sur les niveaux piézométiques des captages AEP Les Sagnes (durée 10 ans)9)2
Figure 52 -	Vue en coupe d'une sonde géothermique verticale (SGV) équipée d'un échangeur double-U (© BRGM)9	95

Figure 53 -	Fond topographique du projet Nice Grand Arénas à proximité de l'îlot n° 2. La limite de la zone d'étude des SGV est représentée par un trait continu mauve
Figure 54 -	Évolution sur 1 an de la puissance thermique appelée par l'îlot n° 2. Les besoins nets de chaud sont comptés en positif, ceux de froid sont comptés en négatif (données EGIS Conseil)
Figure 55 -	Consommation énergétique couverte en fonction de la puissance en chaud (à gauche) et en froid (à droite) du macro-îlot n° 2100
Figure 56 -	Courbe monotone en chaud et en froid de l'îlot n° 2 (données EGIS Conseil)100
Figure 57 -	Carte d'iso-valeurs de COP de la pompe à chaleur 700V de la gamme DYNACIAT série LG-LGP en fonction des températures de sortie d'eau de condenseur et d'évaporateur
Figure 58 -	Fonctionnement de la pompe à chaleur géothermique pour la production de chaud (chauffage + ECS)
Figure 59 -	Fonctionnement de la pompe à chaleur géothermique pour la production de froid103
Figure 60 -	Disposition retenue des sondes géothermiques verticales (SGV) pour les cas à 100, 200 et 300 SGV. Croix : 1 SGV. Polygones rouges : limite de la zone d'étude. Flèche bleue : direction de l'écoulement
Figure 61 -	Cas n° 1 (200 sondes profondes de 200 m). Évolution sur la 1 ^{ère} année de la puissance couverte par la solution PAC sur champ de sondes, pour les taux de couverture optimaux pour le (100 % de la puissance crête demandée en chaud et 51,2 % de la puissance crête demandée en froid). La puissance positive correspond à une demande de chaud, tandis que la puissance négative correspond à une demande de froid109
Figure 62 -	Cas n° 1 (200 sondes profondes de 200 m). Évolution sur 7 ans de la température du fluide en entrée et en sortie du Champ de Sondes Géothermiques Verticales pour les taux de couverture optimaux
Figure 63 -	Cas n° 1 (200 sondes profondes de 200 m). Évolution sur 7 ans de la puissance échangée par mètre de forage pour les taux de couverture optimaux111
Figure 64 -	Extrait de la carte carte réglementaire géothermie de minime importance pour échangeurs ouverts, carte en cours de concertation-consultation au 25/02/2015, non mise en application
Figure 65 -	Secteur aval de la nappe du Var (copie carte n° 2)122
Figure 66 -	Emprise des 2 périmètres de protection immédiate : PPR1 et PPR2. Chevauchement avec la ZAC du Grand Arénas124
Figure 67 -	Localisation prévisionnelle des 5 doublets et emprise du périmètre de protection immédiate PPR1 (PPR2 est non représenté)124

Liste des tableaux

Tableau 1 -	Surface de plancher par secteur et par type de bâtiment (m ²)20
Tableau 2 -	Besoins énergétiques par macro-îlot22
Tableau 3 -	Couches de faciès plus ou moins perméables définies pour le modèle gologique36
Tableau 4 -	Forages sélectionnés pour consolider le modèle géologique 3D
Tableau 5 -	Mise en forme des données du forage de Réinjection T1 pour intégration dans le GeoModeller42
Tableau 6 -	Épaisseurs des formations géologiques au droit du site du Grand Arénas47
Tableau 7 -	Coefficient de perméabilité in situ mesurées par ERG GEOTECHNIQUE53
Tableau 8 -	Épaisseur des formations mesurées par CEBTP GINGER53
Tableau 9 -	Coefficient de perméabilités mesurées par CEBTP GINGER
Tableau 10 -	Piézomètres de suivi de la nappe55
Tableau 11 -	Coordonnées, profondeurs, niveaux piézométriques des piézomètres SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 et SC6 mesurés le 31 octobre 2013
Tableau 12 -	Prélèvements annuels (m ³) sur les champs captant AEP les Prairies et les Sagnes63
Tableau 13 -	Les forages des champs captant et leur débit d'exploitation retenu pour la modélisation
Tableau 14 -	Données des volumes prélevés et réinjectés sur la zone de l'aéroport de Nice65
Tableau 15 -	Bilan des prélèvements et des réinjections dans la zone du Grand Arénas68
Tableau 16 -	Coefficients de perméabilité K et transmissivités T moyens des couches du modèle hydrodynamique. Résultat du calage71
Tableau 17 -	Bilan entrée/sortie de la nappe alluviale
Tableau 18 -	Bilan des échanges nappe-rivière et des débordement de la nappe (l/s)75
Tableau 19 -	Coordonnées géographiques des 10 forages géothermiques (5 forages de production et 5 forages de réinjection)78
Tableau 20 -	Débits dans la zone entre les forages de production et de réinjection
Tableau 21 -	Besoins énergétiques mensuels (MWh) de chauffage de chaque macro-îlot et taux de couverture par la géothermie81
Tableau 22 -	Besoins énergétiques mensuels (MWh) de rafraîchissement de chaque macro-îlot et taux de couverture par la géothermie81
Tableau 23 -	Puissances appelées, débits des doublets et taux de couverture de la géothermie82
Tableau 24 -	Débits de pompage et températures de rejet simulés82
Tableau 25 -	Volume d'eau réinjectée en mode CHAUD (réinjection d'eau refroidie) et en mode FROID (réinjection d'eau réchauffée) en m ³ /an et en pourcentage par macro-îlot82
Tableau 26 -	Principales caractéristiques énergétiques des 5 macro-îlots (données EGIS Conseil)97
Tableau 27 -	Répartition des besoins en chaleur de l'îlot n°2 entre chauffage et ECS et entre répartition des besoins en froid de l'îlot n°2 entre logement et bâtiments tertiaires (données EGIS Conseil)
Tableau 28 -	Caractéristiques des terrains traversés, moyennées sur la superficie de la zone d'étude des SGV104
Tableau 29 -	Configuration des dix champs de sondes étudiés105
Tableau 30 -	Configuration des dix champs de sondes étudiés et résultats des simulations thermiques dynamiques

Tableau 30 -	Estimation du coût d'un forage d'eau en fonction de la profondeur	115
Tableau 31 -	Coût des travaux liés (source des données ADEME Midi-Pyrénées)	116
Tableau 32 -	Coût d'un champ de SGV, selon différentes hypothèses.	117

Liste des annexes (volume séparé)

- Annexe 1 : Log des 27 forages interprétés en couches de faciès plus ou moins perméables.
- Annexe 2 : Tableau des forages interprétés pour intégration dans Géomodeler.
- Annexe 3 : Coupes lithologiques des forages réalisés sur Nice Méridia.
- Annexe 4 : Données du modèle MARTHE.
- Annexe 5 : Bilan des débits du modèle MARTHE en régime permanent.
- Annexe 6 : Données thermiques des bâtiments (données Egis Conseil).
- Annexe 7 : Modèle de Simulation Thermique Dynamique du Champ de Sondes Géothermiques Verticales.

1. Introduction

Ce rapport présente les résultats de la Convention de recherche et développement à coûts partagés EPA Plaine du Var et BRGM visant « l'évaluation du potentiel géothermique du secteur du Grand Arénas » (Figure 1), l'EPA étant maître d'ouvrage de l'opération.

Une première étude a été menée par le BRGM en 2013 sur le secteur de Nice Méridia. Celle-ci a permis l'évaluation précise du potentiel géothermique de ce secteur qui est représenté par la ressource en eau de la nappe alluviale du Var (rapport BRGM/RP-62578-FR). Encouragé par ces résultats, l'EPA a souhaité étudier la possibilité d'une utilisation de cette ressource géothermale pour couvrir les besoins thermiques (chaud et/ou froid) des bâtiments du secteur en développement du Grand Arénas dans le but de couvrir les besoins de chauffage et de rafraîchissement des équipements programmés qui représentent environ 750 000 m² couverts, répartis en 25 % de logement, 50 % de tertiaire et 25 % d'équipement et service.

Cette nappe des alluvions de Var, dont les débits souterrains sont importants, est exploitée par les forages d'alimentation en eau potable des champs captants Sagnes et Prairies, tous deux situés à proximité du Grand Arénas. Le secteur aval de la nappe du Var, où sont situés à la fois ces champs captants et le site du Grand Arénas, est inclus dans le SAGE de la Nappe et Basse Vallée du Var qui édicte des règles particulières d'utilisation de la ressource en eau. Les réalisations qui pourraient être faites à l'issue de cette étude des ressources géothermales devront tenir compte de cette réglementation particulière.

L'étude présente tout d'abord les besoins énergétiques du Grand Arénas, aussi bien pour des besoins de chaud (chauffage et eau chaude sanitaire) que de froid (rafraîchissement/climatisation). On vérifie dans cette étude que la couverture de ces besoins énergétiques peut être assurée soit par une exploitation de la ressource en eau de la nappe de la plaine alluviale du Var, soit par l'utilisation de sondes géothermiques verticales qui elles ne consomment pas d'eau. Le contexte hydrogéologique de la basse vallée du Var se complique à proximité de la mer, où la nappe alluviale se divise en plusieurs niveaux aquifères qualifiés de « superficiels » ou « profonds » selon leur profondeur. Afin d'apporter une plus grand précision dans l'estimation du potentiel géothermique de cet aquifère, il a été nécessaire, dans un premier temps, de préciser l'extension en surface et la géométrie en profondeur de ces niveaux aquifères par une modélisation géologique 3D faite à l'aide du logiciel GeoModeller. Une fois ce modèle établi, les écoulements souterrains ont été simulés par le logiciel MARTHE qui a permis d'évaluer les débits exploitables de la nappe.



Figure 1 - Vue de l'aéroport Nice Côte d'Azur. Localisation du Grand Arénas.

2. Évaluation des besoins énergétiques du Grand Arénas

2.1. LES SUPERFICIES ET LES TYPES DE BÂTIMENTS DU GRAND ARÉNAS

Les bâtiments du Grand Arénas (ZAC et pôle déchanges multimodal) ont été regroupés en 5 macro-îlots. La suface totale de plancher de ces bâtiments représente une superficie de 748 000 m² qui se répartissent en Logements, Bureaux, Commerces, Service-Hôtel, Locaux activité et Équipement. La localisation des 5 macro-îlots figure sur le schéma de la Figure 2. L'opération Grand Arénas couvre une superficie d'environ 49 ha qui s'inscrit dans un rectangle de 1,1 km d'est en ouest, et de 0,7 km du nord au sud.



Figure 2 - Plan du Grand Arénas et localisation des 5 macro-îlots.

Les superficies de plancher sont indiquées pour chaque macro-îlot par typologie de bâtiment dans le Tableau 1 et la Figure 3. Les Bureaux représentent plus de la moitié de la superficie de plancher, viennent ensuite les Logements avec 20 % de la superficie totale. Le reste, Commerces, Service-Hôtel, Locaux activité et Équipement représentent un peu moins de 30 % de la superficie totale.

	Surface de plancher par secteur et par type de bâtiment (m ²)						
Macro îlot	Logement	Bureaux	Commerce	Service / Hôtel	Locaux activité	Equipement	TOTAL
1 - Centre d'exposition		33 358	51 710	20 003	5 000	69 930	180 001
2 - Grand Arénas Nord	60 520	42 590	3 452				106 562
3 - Pôle d'échange multimodal		76 333	2 506	10 000		17 626	106 465
4 - Zone Nord Aéroport	3 350	121 953	3 792	10 350			139 445
5 - Quartier	86 480	108 304	5 139		15 250		215 173
TOTAL	150 350	382 538	66 599	40 353	20 250	87 556	747 646
	20%	51%	9%	5%	3%	12%	

Tableau 1 - Surface de plancher par secteur et par type de bâtiment (m^2) .



Figure 3 - Superficie de plancher par type de bâtiment (m^2) .

2.2. CALCUL DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES (ÉTUDE EGIS CONSEILS)

Les besoins énergétiques du Grand Arénas, pris en compte dans l'évaluation faite par Egis Conseil (janvier 2015), correspondent aux usages suivants :

- chauffage et eau chaude sanitaire ;
- rafraîchissement.

Pour chaque macro-îlot, on présente les besoins énergétiques exprimés suivants :

- les puissances maximum appelées (exprimées en MW) ;
- les besoins énergétiques annuels (exprimés en kWh utiles) ;
- la courbe monotone des besoins.

2.2.1. Les hypothèses de calcul

- objectifs de consommation : RT 2012 20 % ;
- rafraîchissement des logements, des bureaux, des équipements et plus particulièrement du parc des expositions ;
- températures de consigne :
 - température consigne chaud : 21 °C,
 - température consigne froid activité bureaux : 24 °C,
 - température consigne froid équipements/services/logements : 25 °C,
 - température consigne froid commerce : 22 °C.

2.2.2. La méthode de calcul

Pour chaque typologie de bâtiment (Logements / Bureaux / Commerces / Service / Hôtel / Locaux activité / Équipement) :

- utilisation d'une courbe type de besoins chaud et froid au m² ;
- adaptation des courbes en fonction des températures de consigne choisies (cf. hypothèses) ;
- extrapolation des besoins au m² par rapport aux surfaces de la ZAC ;
- obtention d'une courbe globale de besoins chaud/froid sur la ZAC ;
- extraction de monotones ;
- le travail effectué ici a été fait en besoins nets et non en consommation d'énergie primaire ou finale ;
- → Le besoin net en énergie pour le chauffage est la quantité de chaleur que doit fournir le système de chauffage pour maintenir le bâtiment à une température constante (exemple 21 °C);
- les besoins calculés correspondent à une température de consigne de 21 °C pour le chauffage. Ces besoins sont donc supérieurs à ce qui aurait pu être obtenu via une simulation RT.

2.2.3. Résultats des besoins énergétiques

Besoins énergétiques exprimés en MWh et kWh/m²/an, et puissances maximales exprimées en MW (Tableau 2, Figure 4 et Figure 5):

- les valeurs de chaque îlot étant une moyenne de chaque îlot, le total donné est une valeur correspondant à la moyenne pondérée de l'ensemble des besoins ;
- le total donné ne correspond donc pas à la somme des besoins au m² par macro-îlot.

	Chaleur			Froid			
	Besoins MWh	Besoins kWh/m²/an	Puissance max MW	Besoins MWh	Besoins kWh/m²/an	Puissance max MW	
Macro-îlot 1	1 800	10,1	2,1	5 900	32,7	8,5	
Macro-îlot 2	2 900	26,8	2,5	1 700	15,9	5,3	
Macro-îlot 3	1400	13,3	2,9	3 400	32,4	5,5	
Macro-îlot 4	2000	14,4	4,5	4 800	34,6	7,4	
Macro-îlot 5	4700	21,9	5,4	6 500	30,4	10,9	
TOTAL	12 800	17,2	17,4	23 700	31,7	37,5	

Tableau 2 - Besoins énergétiques par macro-îlot.





Figure 4 - Demande de chaleur et de froid totale (MW).





Figure 5 - Courbe monotone chaleur et froid totale, puissance appelée (MW) sur 365 jours (axe des abscisses).

2.3. ESTIMATION DES BESOINS EN EAU POUR LE CHAUFFAGE ET LES BESOINS EN FROID DES BÂTIMENTS.

On présente sur la Figure 6 les schémas de fonctionnement d'une installation de pompe à chaleur pour le chauffage et la climatisation de bâtiments pour des besoins en chaud de 6 MW et en froid de 30 MW. On a retenu l'hypothèse d'un coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur (PAC) égal à 4, et un écart de température de 9 °C entre la température de l'eau prélevée et la température de réinjection.

Ces deux valeurs correspondent à des puissances qui permettraient de couvrir environ 90 % des besoins énergétiques totaux.

Les besoins en eau souterraine correspondants seraient égaux à 430 m³/h pour une puissance nette de chauffage de 6 MW, et à 3 800 m³/h pour une puissance nette de climatisation de 30 MW.



Hypothèses : COP = 4 et DELTA T = 9°C

Figure 6 - Estimation des besoins en eau pour le chauffage et la climatisation des bâtiments par pompe à chaleur sur nappe, pour 6 MW de besoins nets en chaud et 30 MW de besoins nets en froid.

3. Les études géologiques et hydrogéologiques antérieures

La géologie et l'hydrogéologie de la plaine du Var a fait l'objet de nombreuses études qui ont débuté en 1964 avec l'étude du BRGM réalisée par Françoise Ménard. On présente sur la Figure 7 la chronologie des études qui se sont succédé sur ce thème depuis cette date.

Entre 1964 et 2011, les thèses d'Yves Guglielmi (1993), de Magalie Hochard (2003) et de Cécile Potot (2011) ont permis de faire avancer les connaissances sur la géologie et l'hydrogéologie de la basse vallée du Var.

Depuis 2009, plusieurs études se sont succèdées. Celles-ci ont été accompagnées de travaux d'investigation de terrains et de modélisations qui ont permis de préciser les connaissances antérieures.

Du point de vue de l'exploitation géothermique locale, il faut signaler le doublet géothermique de la Banque Populaire, réalisé en 2006, dont les résultats et les données constituent une référence pour le secteur.

Si les données sont nombreuses et de bonne qualité, il serait utile de pouvoir toutes les rassembler dans une base de données commune et publique. Pour cela, il serait nécessaire, en particulier, de regrouper l'ensemble des rapports de fin de travaux des forages réalisés et d'en assurer le dépouillement, l'archivage et la mise à disposition. À défaut, de nombreuses données utiles ne sont pas exploitées lors des études réalisées sur le secteur.



Commanditaires principaux des études : CG06, Communauté Nice Côte d'Azur, Région PACA, AERMC, EPA Plaine du Var

Figure 7 - Chronologie des études réalisées et consultées lors de cette étude.

4. Caractérisation hydrogéologique du milieu visé

4.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE LOCAL

4.1.1. Géologie de la basse vallée du Var

Trois domaines géographiquement distincts caractérisent la complexité géologique de la basse vallée du Var :

- en rive droite du Var, entre la Baronne au sud et le château de la Gaude au nord : la terminaison orientale des formations antépliocènes doit l'essentiel de sa structure à une tectonique distensive d'âge oligocène à miocène caractérisée par des failles normales subméridiennes;
- en rive droite du Var, depuis les Vallières, jusqu'au village de Saint-Jeannet au sud-ouest : il s'agit d'une épaisse formation tertiaire chevauchée par le domaine allochtone ;
- la zone des poudingues du Var : pendage général vers le sud, avec une fracturation qui est mal connue, mais qui présente des indices de tectonisation intense.

La géologie du milieu traduit une activité tectonique intense représentée par une fracturation post-oligocène dans les calcaires du jurassique ainsi qu'une distension oligocène qui a favorisé une activité volcanique andésitique.

4.1.2. Hydrodynamique de la basse vallée du Var

Le sous-sol de la basse vallée du Var est composé de trois entités hydrogéologiques principales, avec, depuis la surface :

- la nappe des alluvions quaternaires composée de plusieurs niveaux aquifères, dont deux dits « superficiels » et un « profond » (cf. § 4.2.2 a) ;
- l'aquifère profond des poudingues pliocènes ;
- l'aquifère profond des calcaires jurassiques.

La nappe des alluvions du Var

Il s'agit d'un remplissage alluvial en plaine datant de l'Holocène lors de la remontée eustatique. La granulométrie est assez homogène et plutôt grossière. En effet, des galets de taille supérieure à 2 cm occupent plus de la moitié du volume, le reste étant composé de graviers (30 %) et d'un mélange fin de sable et de limons (20 %).

La nappe alluviale dispose d'une forte perméabilité permettant le transit d'un débit souterrain important. Les calculs réalisés dans cette étude (cf. § 9.3.3) aboutissent à des débits de l'ordre de 1 à 2 m³/s pour un coefficient de perméabilité moyen 10⁻³ m/s sur toute la hauteur des alluvions.

¹ Rapport BRGM/RP-60742-FR

Des chroniques piézométriques réalisées sur plusieurs décennies à différents points de la nappe montrent que cette dernière réagit selon différents régimes vis-à-vis de la variation de l'apport fluvial :

- dans le secteur amont de la nappe où les variations saisonnières du niveau piézométrique dépassent 10 m, la communication hydrodynamique entre le fleuve et la nappe est très marquée. Cette communication s'atténue en se dirigeant vers le secteur aval de la basse vallée du Var. En effet, au niveau de Nice-Arboras, non loin de Nice Méridia, l'amplitude des variations piézométrique est d'environ 1 m, et le Var ne semble pas impacter significativement la nappe. Cela pourrait s'expliquer par une prédominance des apports latéraux sur l'alimentation fluviale;
- dans la partie aval de la basse vallée du Var, les études hydrogéologiques ont montré que la nappe alluviale est divisée en deux niveaux principaux : une nappe libre peu épaisse située dans les alluvions superficielle du delta, et une nappe captive profonde qui circule sous le delta dans les alluvions fluviatiles. La nappe devient totalement captive vers l'embouchure du fleuve.

L'alimentation de la nappe profonde ne peut pas provenir localement des eaux superficielles du Var, du fait de l'écran supérieur constitué par les formations de moindre perméabilité. Elle serait par contre assurée par les apports amont de la nappe libre mais probablement aussi par des échanges depuis la nappe des poudingues qui constitue un soubassement exclusif aussi bien latéralement qu'à la base du gisement aquifère.

Concernant l'aspect qualitatif de la nappe, l'eau présente des caractéristiques compatibles avec différents usages dont l'AEP. Les principales caractéristiques sont les suivantes :

- nitrates : la teneur en nitrates a augmenté dans la zone aval du secteur, en passant de 20 à 40 mg/l sur la période 1975-1990. Cela s'explique par une pollution due aux arrivées d'eaux depuis les poudingues voisins, contaminés par l'infiltration d'eaux usées. Les dernières mesures réalisées en 2009 montrent une baisse de la teneur en nitrates qui est passée sous la barre des 10 mg/l;
- sulfates : les mesures réalisées montrent que les teneurs en sulfates peuvent localement légèrement dépasser la limite de la norme de potabilité, fixée à 250 mg/l. Cela s'observe en période d'étiage, quand la part d'eaux souterraine est prépondérante sur celle des eaux de surface, et conduit à ce dépassement de seuil (des interactions avec des niveaux gypsifères en amont du bassin sont reconnues responsables des teneurs en sulfates des eaux souterraines). En crue, les eaux du fleuve sont très peu minéralisées et elles pénètrent massivement dans la nappe produisant une forte baisse de la minéralisation totale de l'eau, liées aux teneurs en sulfates ;
- contaminations bactériologiques : les analyses effectuées en 2008 sur les eaux brutes dans les champs captants montrent que les contaminations bactériologies sont très limitées et ponctuelles (entérocoques, E. Coli). Il est à noter également la présence de quelques molécules organiques en aval des zones industrielles ;
- la conductivité des eaux de la nappe est généralement comprise entre 600 et 700 μS/cm, ce qui correspond à des valeurs typiques pour ce genre de milieu. Par ailleurs, le réseau de surveillance mis en place au niveau de l'aéroport a permis de révéler quelques intrusions salines avec des valeurs pouvant dépasser 3 000 μS/cm.

L'aquifère des poudingues pliocènes

Il s'agit d'une formation aquifère composée principalement de galets et de débris arrondis consolidés et cimentés. Le coefficient de perméabilité est relativement faible, de l'ordre de 10⁻⁶ m/s, et peut devenir localement fort dans les zones fracturées.

Cette formation dont l'épaisseur varie entre 100 et 200 m, constitue un réservoir d'eau important estimé à 320.10⁶ m³ (Guglielmi, 1993 ; Moulin, 2012), ce qui permet un soutien fort en alimentation de la nappe alluviale. En effet, au niveau du surcreusement wurmien dans la zone centrale du gisement pliocène, le contact direct entre les poudingues et les alluvions est quasi-continu sur une surface cumulée de 20 km².

La nappe des poudingues est sollicitée au niveau des collines par des ouvrages de particuliers, d'une profondeur oscillant entre 70 à 200 m et produisant entre 5 et 30 m³/h.

L'alimentation de cette nappe est assurée principalement par les arrivées d'eaux de la bordure orientale, et dans une moindre mesure, par les apports en provenance des calcaires jurassiques.

D'un point de vue qualitatif, les résultats de Guglielmi (1993), repris par Moulin (2012), montrent qu'il s'agit là d'une eau bicarbonatées-calcique d'un pH de l'ordre de 7,5, d'une température située entre 14 et 17 °C, et d'une conductivité comprise entre 350 et 500 μ S/cm. Ce dernier paramètre peut atteindre des valeurs supérieures dans la zone médiane (500 à 700 μ S/cm) et près du littoral (plus de 1 000 μ S/cm)

La minéralisation des eaux est largement dominée par les éléments $CO_3^{2^-}$ et Ca^{2^+} , dont la concentration cumulée dépasse 70 %. Il est à noter également que cette eau est riche en silice (20 à 30 mg/l).

L'aquifère des calcaires jurassiques

Les calcaires jurassiques constituent une ressources en eau importante à l'ouest de la vallée du Var au sein des plateaux karstiques de Valbonne – La Gaude, et à l'est dans les crêtes de Saint-Blaise au Mont Chauve d'Aspremont.

Les eaux de cet aquifère circulent vers la vallée du Var et permettent d'alimenter les formations supérieures via un système de failles verticales. Des études récentes menées dans la vallée du Var (Mangan *et al*, 2012²) ont cependant montré qu'il était fort peu probable que les calcaires jurassiques jouent un rôle direct dans l'alimentation des nappes alluviales, du fait de leur profondeur et des écrans peu à pas perméables constitués pas les argiles et marnes pliocènes situés entre les deux formations.

La caractérisation géométrique et structurale de cette formation demeure incertaine car les données issues de sondages ayant atteint le toit de la couche sont très limitées.

² Mangan C., Emily A. & Tennevin G. (2012) – Synthèse géologique de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). Données nouvelles dur la structure profonde. Ann. Mus. Hist. Nat, Nice, XXVII : 21-33, 2012.

Mangan C., Emily A. & Tennevin G. (2012) – Hydrogéologie de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). Nappes alluviales et nappes profondes. Ann. Mus. Hist. Nat, Nice, XXVII : 55-69, 2012.

Concernant l'aspect qualitatif, les investigations réalisées sur des échantillons issues des sources Mont Chauve, vallée du Loup et Cheiron, indiquent une conductivité comprises en 350 et 450 μ S/cm. Les eaux sont bicarbonatées calciques, avec un teneur en HCO₃ de 200 à 350 mg/l et en SO₄ de 40 à 100 mg/l.

4.2. RÉALISATION DU MODÈLE GÉOLOGIQUE

4.2.1. Introduction

Pour évaluer le potentiel géothermique des nappes d'eau douce présentes à l'aplomb du secteur en développement du Grand Arénas, un modèle géologique en 3 dimensions a été réalisé en prérequis à la modélisation hydrodynamique. En effet, ce modèle, construit à l'aide du logiciel GeoModeller, est destiné à définir la géométrie des formations géologiques qui sera utilisée pour la modélisation hydrogéologique. Pour prendre en compte toutes les formations et structures géologiques impliquées dans la circulation des eaux souterraines, depuis l'amont du secteur du Grand Arénas jusqu'à la mer (incluant la zone du biseau salé), le modèle géologique a été prolongé de deux kilomètres au-delà du trait de côte. De plus, seuls les cent premiers mètres d'épaisseur ont été considérés dans ce projet.

Le modèle géologique vise à préciser, dans l'état actuel des connaissances :

- la géométrie (extension latérale, profondeur, épaisseur) des formations géologiques présentes jusqu'à une centaine de mètres de profondeur ;
- la lithologie et la perméabilité relative³ de ces formations.

Pour ce faire, trois étapes successives ont été nécessaires préalablement à la modélisation 3D :

- dans un premier temps, l'ensemble des documents, cartes, coupes et forages géologiques disponibles dans la bibliographie et les bases de données du BRGM ont été analysés. Les données géologiques présentant un intérêt pour la réalisation du modèle géologique ont alors été recueillies et synthétisées ;
- dans un deuxième temps, les données géologiques recueillies ont été interprétées en termes de géométrie et de faciès lithologique plus ou moins perméables ;
- enfin, une mise en forme et une harmonisation des données géologiques (sous forme de cartes, coupes et forages) a été nécessaire avant d'être intégrées dans le logiciel GeoModeller.

Le modèle géologique obtenu est le résultat de l'intégration des données géologiques recueillies, analysées, synthétisées, interprétées et harmonisées durant ces 3 étapes. Elles sont détaillées ci-dessous.

³ On entend par perméabilité « relative », la tendance de chaque formation à être plus ou moins perméable par rapport aux formations qui l'encadrent (faciès plutôt perméable versus faciès plutôt imperméable)

4.2.2. Synthèse des données géologiques disponibles dans la bibliographie

a) Formations lithologiques

Cinq grandes formations géologiques, décrites ci-après, sont observées sur les cents premiers mètres d'épaisseur de la basse vallée du Var, avec de la plus ancienne à la plus récente :

- les poudingues pliocènes : essentiellement constitués de marnes graveleuses à la base et de cailloutis et poudingues au sommet, ils correspondent aux roches déposées par progradation sous-marine dans l'ancien delta du Var qui s'installe dans les rias et canyons creusés lors de la baisse du niveau marin du Messinien (fin du Miocène). Ce dynamisme de dépôt explique leur pendage de 10 à 25° vers le sud, observé à l'affleurement ainsi qu'une cimentation très variable aussi bien en termes de nature que de cohésion (H2EA et Mangan, 2010; Dubar 2012). Cette formation constitue la limite inférieure du modèle géologique et le sous-bassement des formations sus-jacentes;
- les alluvions quaternaires anciennes : essentiellement constitués de cailloutis, graviers et sables, elles correspondent aux roches charriées par le Var au cours des deux dernières périodes de glaciations (Riss et Würm). Erodées ou remaniées depuis par le fleuve, elles n'affleurent aujourd'hui qu'au niveau des terrasses alluviales qui bordent la basse vallée du Var (H2EA et Mangan, 2010, Gonzalez 2008). De ce fait, il n'a pas été jugé nécessaire de les prendre en compte dans la construction du modèle géologique ;
- les alluvions quaternaires récentes : essentiellement constituées de galets, graviers, sables et limons, elles correspondent aux derniers sédiments charriés par le fleuve du Var, déposés depuis la fin de la dernière glaciation (Würm). Associées à la remontée post glaciaire du niveau marin, ces dépôts fluviatiles comblent l'ensemble de la basse vallée du Var avec un net granoclassement d'amont en aval (H2EA et Mangan, 2010). Ils affleurent sur une bande de 1 200 à 1 300 m de large le long du lit du Var puis s'étendent sur les bordures littorales de la Baie des Anges, sur une bande d'environ 300 m de large. Cette formation alluviale contient les niveaux aquifères ciblés par le modèle géologique ;
- le cordon littoral quaternaire : Constitué de sables, galets et grès, les sédiments essentiellement fluviomarins du cordon littoral forment une bande fragile (Antony et al, 1998) d'une centaine de mètres le long du trait de côte de la Baie des Anges. Bien qu'aujourd'hui occulté et remobilisé par les remblais, la largeur de ce cordon littoral pouvait atteindre 500 m à l'emplacement de l'actuel aéroport de Nice. De ce fait, il n'a pas été jugé nécessaire de le prendre en compte dans la construction du modèle géologique ;
- les remblais de l'aéroport : La nature des remblais utilisés pour construire la plateforme de l'aéroport de Nice diffère selon les différentes périodes d'aménagement du site (Hochart, 2003). Les premiers remblais étaient composés par des galets et graviers du Var. Puis, des Poudingues remaniés ont été utilisés pour réaliser l'extension de la plateforme vers le Sud et l'enrochement de sa Digue. Enfin, des éléments de décharge publique sélective ont été utilisés pour mettre en place la bordure sud de l'aéroport. La répartition exacte de ces différents remblais étant difficile à estimer, aussi bien en extension qu'en profondeur, seule l'extension globale de ces remblais a été retenue pour ce projet, à partir des données de la carte harmonisée (Gonzalez, 2008).

Parmi l'ensemble de ces formations, seules deux sont reconnues dans la basse vallée du Var pour renfermer les niveaux aquifères suivants :

- les aquifères superficiels des alluvions quaternaires récentes : 3 aquifères alluviaux dont 2 superficiels et 1 profond (HYDRATEC, 2009 ; H2EA, 2013) sont associés à la formation des alluvions quaternaires récentes qui comblent le fond de la basse vallée du Var. Cette formation est en effet connue pour renfermer des niveaux de faciès lithologiques perméables (perméabilité de matrice) que nous utiliserons pour construire le modèle géologique ;
- l'aquifère profond des Poudingues pliocènes : associé à la formation des poudingues pliocènes, il constitue le sous-bassement de cette vallée. La formation des poudingues est reconnue pour sa perméabilité de type matricielle très variable. En effet, elle montre une grande hétérogénéité quant à la nature de la matrice qui entoure les éléments en termes de consolidation de la roche. La perméabilité de cette formation est d'autant plus difficile à estimer qu'une perméabilité de fracture aléatoire s'ajoute à la perméabilité matricielle déjà très variable. Cette formation sera considérée dans notre modèle géologique comme substratum de la formation des alluvions récentes qui contiennent les niveaux aquifères.

b) Cartes

Parmi différentes cartes disponibles dans la bibliographie (Guglielmi, 1994, H2EA et Mangan, 2010), nous avons retenu la carte harmonisée du département des Alpes-Maritimes réalisée par le BRGM (Gonzalez, 2008). Cette carte présente l'avantage de synthétiser l'ensemble des données cartographiques à l'échelle 1 : 50 000 et d'être disponible sous forme de fichiers SIG.

Parmi les coupes géologiques ou schémas géologiques trouvées dans la littérature (Horn *et al*, 1980; Guglielmi, 1994; HYDRATEC, 2009; H2EA, 2013), les coupes réalisées récemment lors de l'étude hydrogéologique des nappes profondes de la basse vallée du Var (H2EA et Mangan, 2010) apparaissent les plus adaptées à la construction de notre modèle géologique. En dehors du fait d'être les plus récentes, elles présentent en effet les avantages suivants :

- d'imager l'ensemble de la zone d'étude par des coupes aussi bien transversales (coupes B-B, C-C, D-D et E-E) que longitudinales (coupe A-A) ;
- d'être ciblées sur les formations aquifères des alluvions récentes quaternaires et des poudingues pliocènes qui nous intéressent jusqu'à 100 m de profondeur ;
- d'être calées en profondeur par des forages de reconnaissance profonds.

c) Forages

Trois bases de données de forages ont été utilisées pour caler le modèle géologique en profondeur :

- la Banque de données du Sous-Sol (BSS) gérée par le BRGM (*Site Infoterre*), qui recense et regroupe l'ensemble des documents associés aux forages géologiques et hydrogéologiques réalisés sur le territoire français ;
- la Banque de données Géologiques Marines (BGM) gérée par le BRGM (*Site InfoTerre*), qui fournit une description lithologique détaillée des sondages réalisés en mer ;
- les données des forages et piézomètres réalisés dans la basse vallée du Var disponibles dans le rapport H2EA et Mangan (2010).

27 forages répartis sur l'ensemble de la zone d'étude ont été sélectionnés pour consolider et valider l'interprétation des modèles géologiques (2D et 3D).

d) Localisation des données retenues sur une cartes synthétique

Une carte synthétique rassemblant l'ensemble des données géologiques à disposition sous un seul et même référentiel (SIG ArcGis) a été réalisée (Figure 8). Y sont notamment reportés :

- les contours géologiques issus de la carte harmonisée (Gonzalez, 2008) ;
- la trace des coupes géologiques issues du rapport H2EA et Mangan (2010) ;
- la position des forages issus de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), de la Banque de données Géologiques Marines (BGM) et du rapport H2EA et Mangan (2010).



Figure 8 - Carte synthétique des données géologiques disponibles sur la basse vallée du Var et retenues pour le projet Grand Arenas. (Carte géoréférencée sous ArcGis. Système de coordonnées NTF/ Lambert 2 étendu).

4.2.3. Interprétation des données

a) Traduction du log lithologique en log de faciès plus ou moins perméables

Pour répondre à l'enjeu hydrogéologique du projet, le log de faciès lithologiques décrits dans les coupes géologiques de H2EA et Mangan (2010) a été traduit en log de faciès plus ou moins perméables (Figure 9).

Les faciès des remblais de l'aéroport et les poudingues pliocènes n'ont pas été modifiés. En revanche, les faciès lithologiques des alluvions récentes ont été regroupés de la manière suivante :

- les faciès limono-sableux et argilo-vaseux ont été regroupés sous le terme de « faciès argileux dominant », à tendance imperméable ;
- les faciès sableux et graveleux ont été regroupés sous le terme de faciès sableux dominant », à tendance perméable.



Figure 9 - Traduction du log lithologique des coupes de H2HA et Mangan (2010) en log de faciès plus ou moins perméables pour le modèle géologique.

b) Découpage des coupes lithologiques en une succession de couches de faciès plus ou moins perméables

À partir du log de faciès élaboré précédemment et pour s'adapter au logiciel de modélisation hydrodynamique MARTHE, les coupes géologiques de H2EA et Mangan (2010) ont été découpées et interprétées en une succession de couches plus ou moins perméables. À noter que cette succession de couches subhorizontales n'est basée que sur une construction géométrique sans pour autant correspondre à une réalité géologique. À titre d'exemple, lorsque deux ou trois couches de même perméabilité se succèdent, la limite entre ces couches n'est définie que de façon arbitraire pour les besoins du modèle. Elle ne correspond en aucun cas à une limite de dépôt/séquence interprétée dans l'espace et dans le temps (stratigraphie séquentielle).

Sept couches se sont avérées nécessaires pour interpréter l'ensemble des coupes. Elles sont présentées, de la plus superficielle à la plus profonde, dans le Tableau 3 ci-dessous.

CODE COULEU R	NOM DE LA COUCHE	FACIES +/- PERMEABLES	FORMATION	AGE STRATIGRAPHIQUE	
	Couche A1_R	Remblais de l'aéroport de Nice	Entropique	Actuel	
•••	Couche A2_S&G	Sables et graves dominants			
	Couche A3_A	Argiles dominantes		Quaternaire	
•••	Couche A4_S&G	Sables et graves dominants	Alluvions récentes		
	Couche A5_A	Argiles dominantes			
• • •	Couche A6_S&G	Sables et graves dominants			
	Couche A7_P	Poudingues	Poudingues	Pliocène	

Tableau 3 - Couches de faciès plus ou moins perméables définies pour le modèle gologique.

c) Calage et validation des limites de couches en profondeur à l'aide des forages

• Sélection des forages

27 forages ont été sélectionnés sur la zone d'étude à partir des trois bases de données disponibles (cf. § 4.2.2 d), 8 forages proviennent du rapport H2EA et Mangan (2010), 14 sont issus de la BSS, et 5 de la BGM (Tableau 4). Pour répondre au mieux à la construction du modèle géologique 3D de ce projet, les critères retenus pour la sélection ont été les suivants :

- i) homogénéité de répartition des forages sur la zone d'étude (basse vallée du Var et Baie des Anges);
- ii) qualité de la documentation mise à disposition, notamment pour les forages de la BSS dont seuls ceux ayant des documents numérisés et un log validé ont été retenus ;
- iii) profondeur atteinte si possible importante pour avoir un maximum d'informations (100 m espérée).
| Ref. | Num_ref | Nom_puits | Alt/NM | Prof/Zsol | X_L2E | Y_L2E |
|-----------------|-----------------|--------------------|--------|-----------|---------|-----------|
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | F_Profond_Prairies | 15 | 220 | 991810 | 1865698 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | Point_du_Jour | 12 | 70 | 992004 | 1864361 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | Reinject_T1 | 6 | 77 | 993983 | 1863929 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | Reinject_T2 | 7 | 81 | 992849 | 1863016 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | PZ45 | 6 | 76 | 994497 | 1864402 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | PZ46 | 6 | 55 | 993874 | 1863877 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | PZ47 | 7 | 56 | 993074 | 1863526 |
| H2EA&Mangan2010 | Annexe_6 | PZ48 | 9 | 55 | 992736 | 1863290 |
| BSS (BRGM) | 10001X0801/PZ1 | PZ1 | 3,38 | 101 | 993629 | 1861848 |
| BSS (BRGM) | 10001X803/PZ3 | PZ3 | 2,72 | 101 | 994934 | 1863872 |
| BSS (BRGM) | 10001X804/PZ4 | PZ4 | 2,44 | 80 | 994172 | 1862875 |
| BSS (BRGM) | 10001X0805/PZ5 | PZ5 | 1,66 | 101 | 993165 | 1861570 |
| BSS (BRGM) | 10001C0689/F1 | F1 | 2,27 | 80 | 993084 | 1862182 |
| BSS (BRGM) | 10001C0687/F1P1 | F1P1 | 2 | 62 | 993545 | 1862728 |
| BSS (BRGM) | 09994X0210/S6 | S6 | 2,3 | 24 | 991 912 | 1 862 934 |
| BSS (BRGM) | 10001X0432/S8 | S8 | -13 | 22 | 993939 | 1861608 |
| BSS (BRGM) | 10001X0433/S9 | S9 | -12 | 20 | 994018 | 1861938 |
| BSS (BRGM) | 10001X0437/S13 | S13 | -16 | 21 | 994258 | 1862179 |
| BSS (BRGM) | 10001X0157/S | S157 | 3 | 10 | 993595 | 1862859 |
| BSS (BRGM) | 10001X0160/S | S160 | 3 | 10 | 993593 | 1863409 |
| BSS (BRGM) | 10001X0206/S | S206 | 6 | 15 | 994 759 | 1 865 556 |
| BSS (BRGM) | 10001X0222/S | S222 | 2 | 75 | 992473 | 1862855 |
| BGM (BRGM) | _ | S10 | -63 | 3 | 994175 | 1861260 |
| BGM (BRGM) | _ | S12 | -172 | 3 | 993775 | 1860750 |
| BGM (BRGM) | _ | S14 | -104 | 2 | 995089 | 1861540 |
| BGM (BRGM) | _ | S15 | -213 | 3.5 | 995650 | 1861630 |
| BGM (BRGM) | _ | S16 | -59 | 3 | 995439 | 1862860 |

Tableau 4 - Forages sélectionnés pour consolider le modèle géologique 3D.

Légende : Ref. : référence de la base de données dont sont ici les données de forage ; Num_ref : numéro ou indice de référence ; Nom_Puits : Nom du forage géologique ;Alt/NM : Altitude du forage par rapport au niveau marin ; Prof/Zsol : Profondeur atteinte par le forage par rapport au sol, X_L2E et Y_L2E : coordonnées X et Y dans le système Lambert 2 étendu.

Interprétation des données de forages en termes de couches de faciès plus ou moins perméables

Un découpage identique à celui appliqué pour les coupes lithologiques de H2EA et Mangan (2010), a été réalisé sur les 27 forages sélectionnés. Ainsi, bien que parfois très détaillés dans les bases de données, leur log lithologique a été synthétisé et interprété selon la succession de couches de faciès plus ou moins perméables précédemment définie. Un exemple d'interprétation est donné dans la Figure 10.



Figure 10 - Interprétation des données du forage PZ3 selon les couches de faciès +/- perméables définies pour le modèle géologique.

• Harmonisation des données de forages

Chacune des 3 bases de données à partir desquelles ont été recueillies les données de forages comporte des informations et/ou documents divers et variés, mis à disposition sous formes différentes :

- les données de forages issues de la Banque de données du Sous-Sol « BSS » (BRGM, site InfoTerre), sont constituées : d'une fiche d'identification (numéro de référence, commune, coordonnées, altitude, profondeur atteinte), de documents originaux numérisés, d'un log géologique synthétique numérisé et d'un log détaillé validé. Ces forages peuvent atteindre jusqu'à 101 m de profondeur ;
- les données de forages issues de la Banque de données géologique Marine « BGM » (BRGM, site InfoTerre), se présentent sous forme de tableaux Excel détaillant la lithologie des formations rencontrées à l'échelle centimétrique. Ces sondages du fond marin étant généralement ciblés sur l'intérêt des formations pour l'exploitation des granulats, ne dépassent que très rarement 3 m de profondeur. Les altitudes du fond marin à laquelle se trouvent les sondages n'étant pas fournies dans cette base de donnée, elles ont été estimées à l'aide du logiciel GeoModeller (à partir du MNT qui intègre la bathymétrie pour la partie méridionale de la zone);
- les données de forages recueillies dans le rapport de H2EA et Mangan (2010) rassemblent différents forages ou piézomètres suivis ou réinterprétés par la société H2EA et/ou le Cabinet Mangan entre 2006 et 2009. Leur coupe technique et leur log géologique interprétés sont disponibles dans l'Annexe 1 du rapport. Les coordonnées et les altitudes de la tête de ces forages n'étant pas fournies dans le rapport, elles ont été estimées à l'aide des logiciels ArcGis (pour la localisation) et GeoModeller (pour l'altitude à partir du MNT).

Une fois extraites et interprétées, les données de forages ont donc été harmonisées et regroupées dans des fiches synthétiques afin de pouvoir être intégrées dans le modèle géologique (Figure 11).

Calage et validation des limites de couches en profondeur

Chaque forage interprété en couches de faciès plus moins perméable a été confronté à la coupe elle aussi interprétée la plus proche (Figure 11). En fonction du résultat obtenu, les limites interprétées des 7 couches de faciès ont été validées ou ajustées si nécessaires sur les 5 coupes (Figure 12).



Figure 11 - Calage des limites de couches en profondeur à partir des forages interprétés et harmonisés.



Figure 12 - Coupes interprétées en 7 couches de faciès plus ou moins perméables et calées en profondeur par 27 forages (modifiées d'après H2EA et Mangan 2010).

4.2.4. Construction du modèle géologique 3D à l'aide du logiciel GeoModeller

Un modèle géologique en 3 dimensions est réalisé à partir des données définies ci-dessus. Il sera ensuite utilisé pour contraindre la géométrie nécessaire à la modélisation hydrogéologique. Les données utilisées sont les 5 coupes interprétées (Figure 12), les 27 forages du Tableau 4, ainsi que les informations issues de la carte géologique harmonisée des Alpes-Maritimes (Gonzalez, 2008). L'ensemble des données est positionné sur la Figure 8. Ces données sont rassemblées dans le même espace 3D afin de réaliser une interprétation cohérente de la géologie. Ainsi, elles sont interpolées (modélisées) pour aboutir à une représentation de la géométrie des corps argileux et sableux dans tout l'espace 3D de la zone d'étude. La liste des forages utilisés est indiquée en Annexe 2.

Le modèle est construit à l'aide du logiciel GeoModeller, un outil de modélisation géologique 3D créé par le BRGM (Lajaunie *et al*, 1997 ; Calcagno *et al*, 2008) et commercialisé par Intrepid Geophysics. Il permet de réaliser des modèles volumiques à partir des observations et/ou interprétations (i) de positions d'interfaces géologiques, et (ii) de pendages. Il utilise également une Pile Géologique qui contient la connaissance *a priori* sur la structuration géométrique de la géologie.

L'ensemble des données d'entrée doit être géoréférencé avec une attention particulière pour les données de forages. En effet, le fichier d'entrée pour ces données se présente sous forme d'un tableau dans lequel chaque ligne correspond à une couche de faciès et renseigne sur la profondeur de son mur, tout en répétant les données propres au forage (Tableau 5).

Nom_puits	Alt/NM	Prof/Zsol	X_L2E	Y_L2E	Couche_Form	Mur_Form/Zsol
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A1_Remblais	6
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A2_Graves_Sables	12
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A3_Argiles	18
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A4_Graves_Sables	23
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A5_Argiles	43
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A6_Graves_Sables	75

Tableau 5 - Mise en forme des données du forage de Réinjection T1 pour intégration dans le GeoModeller.

Légende : Nom_Puits : Nom du forage géologique ; Alt/NM : Altitude du forage par rapport au niveau marin ; Prof/Zsol : Profondeur atteinte par le forage par rapport au sol ; X_L2E et Y_L2E : coordonnées X et Y dans le système Lambert 2 étendu ; Couche_Form : Couches de faciès ; Mur_Form/Zsol : Mur de la couche de faciès par rapport au sol.

On présente ci-après (Figure 13) un récapitulatif des niveaux géologiques issu du modèle géologique 3D. Celui-ci comprend les 3 niveaux aquifères reconnus pour la formation des alluvions quaternaires récente de la plaine du Var (essentiellement constitués de sables et de graves), séparés par 2 niveaux argileux imperméables. Cet ensemble repose sur un substratum considéré ici comme peu perméable, constitué de poudingues pliocènes. Les remblais de l'aéroport Nice Côte d'Azur ont été identifiés par une couche particulière.

Les figures suivantes, 13 à 21, représentent des vues en perspective du modèle géologique, observées depuis le sud-est. Cette succession de vues présente l'empilement progressif des couches géologiques depuis le substratum des poudingues jusqu'aux remblais de l'aéroport.

Un modèle géologique à 7 couches :

- o des remblais,
- o 3 niveaux aquifères séparés par 2 niveaux peu perméables,
- 1 substratum constitué de poudingues.



Figure 13 - Les niveaux géologiques du modèle géologique (Pile Géologique).



Figure 14 - Vue en perspective cavalière du modèle géologique observé depuis le sud-est.



Figure 15 - Substratum constitué des poudingues pliocènes, observé depuis le sud-est.



Figure 16 - Aquifère profond n° 3 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.



Figure 17 - Niveau argileux n° 2 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.



Figure 18 - Aquifère superficiel n° 2 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.



Figure 19 - Niveau argileux n°1 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.



Figure 20 - Aquifère superficiel n°1 de la formation des alluvions quaternaires récentes de la plaine du Var, observé depuis le sud-est.



Figure 21 - Remblais enthropiques de l'aéroport.

4.2.5. Résultats et conclusion

Le modèle géologique 3D montre que les niveaux susceptibles d'être aquifères dans la formation des alluvions fluviatiles récentes (Quaternaire) se répartissent différemment selon que l'on se trouve en amont, au milieu, ou en aval de la section de la basse vallée du Var située entre les captages des Prairies et l'embouchure du Var. Les coupes citées ci-après sont présentes sur les Figures 8 et Figure 12.

En amont (Coupe E), l'ensemble de la formation des alluvions récentes est constitué par des faciès à tendance perméable (faciès sableux et graveleux et dominants) qui comblent le fond de la vallée. Cet ensemble aquifère regroupe les couches A2_S&G, A4-S&G et A6_S&G sur une épaisseur totale d'environ 60 à 80 m (coupes A et E).

Au milieu (Coupes D et C), les trois couches de faciès à tendance perméable A2_S&G, A4-S&G et A6_S&G se séparent du fait de l'intercalation de deux couches, A3_A et A5_A, de faciès plutôt imperméable (faciès argileux dominant) (coupes A, D et C).

En aval, au niveau de l'aéroport de Nice (Coupes B), les deux couches superficielles A2_S&G et A4_S&G à faciès sableux et graveleux dominants disparaissent au profit des deux couches à faciès argileux dominant A3_A et A5A (coupes A et B. Ces deux dernières forment, à l'aplomb des remblais de l'aéroport, une puissante barrière imperméable d'environ 50 à 70 m d'épaisseur qui empêche tout accès des niveaux aquifères superficiels A2_S&G et A4_S&G à la mer (coupes A et B). En revanche, le niveau aquifère le plus profond (A6_S&G) s'enfonce avec un pendage de 10 à 25° vers la mer et s'épaissit jusqu'à atteindre au moins 60 m d'épaisseur sous l'aéroport (coupe B).

Ces résultats confirment la présence de trois niveaux aquifères dans la formation des alluvions récentes qui comble la basse vallée du Var. Tout comme dans les deux études HYDRATEC (2009) et H2EA (2012), l'aquifère le plus profond tapisse le fond de la vallée du Var sur toute la longueur du fleuve jusqu'à se jeter, en aval, dans la mer et se prolonge vers le littoral. En revanche, dans le cas de notre étude, le modèle géologique 3D montre que l'épaisseur des deux aquifères superficiels diminue jusqu'à se terminer en biseau à l'aplomb de l'aéroport de Nice au profit d'une puissante série argilo-vaseuse. Cette barrière imperméable empêcherait dans ce cas que les eaux contenues dans ces aquifères soient mélangées à celles de l'eau de mer (absence de biseau salé). Ces résultats restent cependant à nuancer car une zone de mélange d'une dizaine de mètre d'épaisseur est tout à fait envisageable au niveau des remblais de l'aéroport de Nice. En effet, cette formation anthropique qui peut être constituée de faciès plutôt perméables selon les endroits (graves, sables, galets, poudingues), se trouve à la fois en contact avec l'aguifère le plus superficiel (couche de faciès A2_S&G) au nord, et la mer (au sud). Elle est donc susceptible de constituer une zone de mélange entre les eaux douces de l'aquifère superficiel des alluvions récentes et les eaux salées de la baie des Anges (mer méditerranée).

On présente sur le Tableau 6 et la Figure 22 , les épaisseurs moyennes des différents niveaux géologiques au droit de la ZAC du Grand Arénas issues du modèle géologique 3D.

COLICUE	Natura	Epais	Cumul		
COOCHE	Nature	Mini	Moyenne	Maxi	épaisseur moyenne (m)
2	AQUIFERE 1	8,4	14,5	18,3	14,5
3	Argiles	5,8	11,6	14,0	26,0
4	AQUIFERE 2	11,2	19,9	26,8	45,9
5	Argiles	3,5	7,9	12,4	53,8
6	AQUIFERE 3	18,0	26,4	35,8	80,2

Tableau 6 - Épaisseurs des formations géologiques au droit du site du Grand Arénas.



Figure 22 - Profil moyen au droit du site du Grand Arénas.

5. Les paramètres hydrodynamiques des aquifères

Les études et essais hydrauliques réalisés dans le secteur aval de la plaine du Var sont présentés ci-après. Ils permettent d'avoir un point de départ et de référence pour le calage du modèle hydrodynamique du Grand Arénas, en particulier les valeurs mesurées des coefficients de perméabilité des niveaux aquifères.

5.1. CALAGE DU MODÈLE HYDRATEC

Dans l'étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale de Var aux aléas climatiques secs (septembre 2009) la Société HYDRATEC a réalisé une modélisation des écoulements de l'aquifère de la plaine du Var. On présente ci-après les principaux résultats du calage hydrodynamique HYDRATEC.

Coefficient de perméabilité des formations géologiques :

- calcaires du Jurassique : 5 x 10⁻⁵ m/s ;
- marnes : 1x10⁻⁸ m/s ;
- terrains éocènes : 1x10⁻⁶ m/s ;
- brèche de Carros : 1x10⁻⁴ m/s ;
- poudingues : 5x10⁻⁶ m/s ;
- alluvions (voir ci-après).

Les alluvions de la plaine du Var ont été modélisées par 6 couches différenciées :

- couche 1 : Alluvions sablo-graveleuses ;
 - $K = 9x10^{-3}$ m/s en amont et $5x10^{-4}$ m/s en aval,
- couche 2 : Sables vaseux-argile plastique sables limoneux ;
 - de la mer au champ captant des Sagnes, en rive gauche du Var, $K = 8 \times 10^{-4}$ m/s,
- couche 3 : Alluvions ;
 - Couche perméable, 9x10⁻³ m/s, moins perméable près de l'aéroport avec K = 6x10⁻⁴ m/s,
- couche 4 : Argile noire plastique ;
 - Argiles imperméables K = 1x10⁻⁹ m/s,
- couche 5 : Alluvions graveleuses ;
 - $K = 6x10^{-4}$ m/s au niveau de l'aéroport, et $3x10^{-3}$ m/s ailleurs,
- couche 6 : Argile de fond de dépôt alluvionnaire ;
 - Niveau argileux jusqu'au champ captant des Sagnes avec K = 10⁻⁶ m/s, plus en amont K compris entre 3x10⁻³ et 5x10⁻³ m/s.

Les remblais de l'aéroport ont un coefficient de perméabilité estimée à 10⁻⁶ m/s.

Coefficients d'emmagasinement calés

Niveau	Nappe libre	Nappe captive
Alluvions	10 ⁻²	10 ⁻⁵
Poudingues	10 ⁻²	10 ⁻⁵

5.2. RÉSULTATS DES POMPAGES D'ESSAI SUR LE SITE DE NICE MÉRIDIA

Lors de l'étude du potentiel géothermique de Nice Méridia, 1 forage de production et 3 piézomètres ont été réalisés pour des essais de débit (Annexe 3). On présente ci-après les résultats de ces essais.

- profondeur du forage : 30 m ;
- profondeur des piézomètres : 15 m ;
- aquifère capté : partie superficielle des alluvions du Var.

L'interprétation des essais de débit a été faite avec 2 hypothèses de calcul qui aboutit à fournir une fourchette de la transmissivité de la nappe superficielle au droit de Nice Méridia :

- hypothèse 1, pas de limite étanche, T = 0,038 m²/s ;
- hypothèse 2, limite étanche, T = 0,150 m²/s.

La seconde hypothèse, avec une limite étanche, constituée des bords de l'aquifère au contact avec les poudingues, est la plus vraisemblable. Pour un aquifère d'une épaisseur de 30 m, cela correspondrait à un coefficient de perméabilité de l'aquifère de 5 x 10^{-3} m/s.

Les forages réalisés lors de cette étude ont été déclarés à la BSS du BRGM et portent les indices suivants : 10001X1161/F1, 10001X1162/PZ1, 10001X1163/PZ2, 10001X1164/PZ3.

5.3. LES DONNÉES DU DOUBLET DE LA BANQUE POPULAIRE CÔTE D'AZUR

Le siège de la Banque Populaire Côte d'Azur, situé dans le quartier de l'Arénas, est équipé d'un doublet de forages pour le rafraîchissement de ses locaux.

Les 2 forages ont été réalisés en 2005. L'aquifère visé par ces ouvrages est celui des alluvions de la nappe profonde. On indique ci-après les données de ces forages :

- profondeur des ouvrages : 71 et 76 m ;
- niveaux aquifères captés : alluvions du Var, galets, graviers et sables entre 45 et 70 m de profondeur ;
- débit d'exploitation-réinjection : 75 m³/h ;
- transmissivité de l'aquifère (résultats des essais de débit) : 0,150 m²/s ;
- pour une épaisseur d'aquifère de 25 m (de 45 à 70 m de profondeur), cela correspond à un coefficient de perméabilité de 6 x 10⁻³ m/s ;

- niveau statique : l'aquifère est artésien au droit des 2 forages.

La perméabilité des alluvions des niveaux profonds serait du même ordre de grandeur que les alluvions des niveaux superficiels.

La valeur de la transmissivité et l'état artésien des forages hors exploitation sont des éléments importants pour le calage du modèle hydrodynamique.

Ces forages ont été déclarés à la BSS du BRGM et portent les indices suivants : 10001X1156/BP01 et 10001X1157/BP02.

5.4. LES DONNÉES DES FORAGES DU MUSÉE DES ARTS ASIATIQUES

Les mesures réalisées sur le forage du Musée des Arts asiatiques sont indiquées sur la Figure 23 :

- conductivité : comprise entre 0,4 et 0,8 (µS/cm²) ;
- niveau piézométrique : environ 3 m de profondeur par rapport au sol ;
- température : environ 17,2 °C.



Figure 23 - Données du forage des Arts asiatiques.

5.5. RÉSULTATS DES INVESTIGATIONS GÉOTECHNIQUES DE LA TRANCHÉE COUVERTE GRINDA (ETUDE NCA)

a) Investigations in situ ERG GEOTECHNIQUE, rapport d'étude en date du 20 janvier 2014

Des investigations géotechniques ont été réalisées en 2013 sur le futur site du Grand Arénas. Les résultats de ces investigations figurent dans le rapport ERG GEOTECHNIQUE en date du 20 janvier 2014. On présente ci-après les résultats qui intéressent plus particulièrement la partie géologique et hydrogéologique de l'étude en cours :

- quatre sondages de reconnaissance géologique carottés SC1 à SC4, descendus à 10 m de profondeur ;
- deux sondages de reconnaissance géologique carottés SC5 et SC6, descendus respectivement à 35 et 30 m de profondeur ;
- trois sondages de reconnaissance géologique carottés SC7 à SC9, descendus à 2 m de profondeur ;
- la réalisation de huit essais de perméabilité cd type Nasberg et Lefranc au droit des sondages SC1, SC2, SC3, SC5 et SC6 ;
- la mise en place de piézomètres et bouches à clé au droit de six de ces sondages (SC1 à SC6).

Les sondages SC1 à SC9 ont mis en évidence, sous une épaisseur de 0,1 à 2 m de remblais gravelo-sableux et/ou d'enrobé, un horizon alluvionnaire composé de galets, graves et sables à matrice limoneuse ou argileuse jusqu'à des profondeurs comprises entre 2 et 12,6 m. Puis ce sont des argiles et limons plus ou moins sableux à passages de matière organique qui sont rencontrés jusqu'à 10,2 m (terme du sondage SC1) à 27,5 m de profondeur, au doit des sondages SC1, SC5 et SC6, surmontant des alluvions de graves ; galets et sables rencontrées jusqu'au terme des sondages SC5 et SC6. Le rapport ERG GEOTECHNIQUE cite les résultats d'autres sondages faits au droit de la zone Grand Arénas par les sociétés BACHY, FONDASOL, SOLETACHE et SOL ESSAIS qui mettent en évidence la présence, sous une épaisseur de remblais et/ou de terre végétale, d'une alternance d'horizons alluvionnaires composés de sables et galets de bonne à très bonne compacité, et d'horizons limoneux et/ou argileux à passages de matière organique mécaniquement médiocre. De façon générale, ces études indiquent la présence de terrains lithologiquement hétérogènes.

Piézométrie

Les mesures de niveaux d'eau, faites sur les sondages SC1 SC6, mettent en évidence une piézométrie de la nappe superficielle, comprise entre 2,5 et 5,15 m de profondeur (mesures réalisées le 17/12/2013).

Perméabilités des sols

Une première approche de la perméabilité des terrains a été évaluée *in situ* par des essais ponctuel de type Lefranc et Nasberg au droit des sondages SC1, SC2, SC3, SC5 et SC6 (Tableau 7). Les valeurs obtenues sont caractéristiques de formations alluvionnaires de sables et galets. Pour trois d'entre elles, elles sont reportées dans le tableau ci-dessous.

Sondage [profondeur de l'essai (m)]	Lithologie de la couche de sol	Coefficient de perméabilité K (m/s)
SC1 [2,0 - 2,7]	Sables fins à grossiers et graves	1,7 x 10 ⁻⁵
SC2 [2,8 - 3,8]	Sables grossiers et galets	1,9 x 10 ⁻⁵
SC3 [1,2 - 2,4]	Galets et graves à matrice sableuse	4,2 x 10 ⁻⁴

Tableau 7 - Coefficient de perméabilité in situ mesurées par ERG GEOTECHNIQUE.

b) Investigations in situ CEBTP GINGER, rapport d'étude en date de mars 2014

La société CEBTP GINGER a réalisé des investigations *in situ* à partir de 29 forages (Figure 24) dont la plupart ont été faits jusqu'à 20 m de profondeur.

Les investigations menées sur ces forages sont indiquées ci-après :

- 7 sondages carottés permettant d'avoir une coupe lithologique détaillée du sol ;
- 7 essais Lefranc donnant accès à la perméabilité des terrains ;
- 24 mesures piézométriques.

Lithologie des terrains

L'ensemble des forages a permis de mettre en évidence 5 types de formations géologiques, Tableau 8 :

Formation	Nature du sol	Epaisseur (m) (*)
1	Remblais	0,5 à 2,8
2	Limons argileux à tourbeux, voire tourbe, gris à noir	11,5 à 17
3	Sables et galets gris bleuté (alluvions)	> 4
4	Sables et galets ocre/beige/gris peu compacts (poudingues altérés supposés)	3 à 11,6
5	Sables et galets ocre/beige/gris compacts (poudingues supposés)	> 2,75 à > 18

(*) Les épaisseurs indiquées sont les épaisseurs le plus souvent rencontrées. Pour plus de détails, le lecteur devra se reporter au rapport CEBTP GINGER.

Tableau 8 - Épaisseur des formations mesurées par CEBTP GINGER.

Ces investigations confirment la description des formations alluvionnaires de sables et galets faite par ERG GEOTECHNIQUE.

Piézométrie

Les niveaux d'eau mesurés, entre 1 et 7 m de profondeur, présentent des hétérogénéités témoignant d'un écoulement dont l'orientation n'a pas été déterminée dans cette première approche.

Perméabilités des sols

Les essais Lefranc, réalisés sur 7 forages à des profondeurs comprises entre 1,3 à 15,5 m, ont permis d'approcher la perméabilité des terrains selon la nature des sols (Tableau 9).

Nature du sol	Coefficient de perméabilité K (m/s)
limon sableux	1x10 ⁻⁷ à 1,3x10 ⁻⁶
sables limoneux	9x10 ⁻⁷ à 2,8x10 ⁻⁶
limon	de 1,2x10 ⁻⁸ à 8x10 ⁻⁸

Tableau 9 - Coefficient de perméabilités mesurées par CEBTP GINGER.

Les essais Lefranc réalisés par ERG GEOTECHNIQUE ont concerné des terrains constitués de sables, de graviers et de galets dont les coefficients de perméabilité sont compris entre $1,7x10^{-5}$ et $4,2x10^{-4}$ m/s, tandis que les essais de ERG GEOTECHNIQUE concernent des terrains constitué de limon et de sables avec des coefficients de perméabilité compris entre $1,2x10^{-8}$ et $1,3x10^{-6}$ m/s. Ces résultats montrent le caractère très hétérogène des 20 premiers mètres de terrain dont les coefficients de perméabilité sont globalement compris entre $1,2x10^{-8}$ et $4,2x10^{-4}$ m/s selon que les matériaux rencontrés localement sont des galets, des graviers, des sables ou des limons. Pour une épaisseur d'aquifère de 20 m, cela correspond à des transmissivités comprises entre $2,4x10^{-7}$ et $8,4x10^{-3}$ m²/s.



Figure 24 - Localisation des sondages géotechniques.

6. Piézométrie de la nappe des alluvions du Var

6.1. LES MESURES PIÉZOMETRIQUES DANS LA VALLÉE DU VAR

La piézométrie de la nappe des alluvions du Var est connue grâce aux mesures faites en octobre 1999. Celle-ci a permis de tracer une piézométrie de l'ensemble de la nappe, ainsi qu'à plusieurs piézomètres dont les niveaux sont régulièrement mesurés (Figure 25Figure 25).

La piézométrie de 1999 permet d'avoir une estimation des débits souterrains dans la vallée du Var, grâce à la formule de Darcy :

$$\mathsf{Q}=\mathsf{K}.\mathsf{S}.\Delta\mathsf{H}/\mathsf{L}$$

où Q : débit $(L^{3}T^{-1})$,

K : coefficient de perméabilité (L.T⁻¹),

S : Surface mouillée perpendiculaire aux écoulements (L²),

 Δ H/L : gradient hydraulique (variation de charge hydraulique Δ H par unité de longueur L, sans dimension).

Dans le cas de la nappe du Var :

- gradient hydraulique de la nappe : 4 / 1 000 m/m,

- coefficient de perméabilité moyenne des alluvions : 4 x 10⁻³ m/s,

- épaisseur des alluvions (partie amont) : 80 m,

- largeur de la vallée (partie mouillée) : 1 000 m.

Débit souterrain = $4 \times 10^{-3} \times 0,004 \times 80 \times 1000 = 1,3 \text{ m}^3/\text{s}.$

Les calculs hydrauliques du modèle confirment cet ordre de grandeur des débits souterrains dans la nappe (cf. § 9.3.3).

Les variations piézométriques, connues à partir des piézomètres P35 (forage 09994X0399) et P36 (forage 09994X0400), indiquent des fluctuations de l'ordre de 1 à 2 m sur la partie amont de la zone d'étude selon les saisons hautes eaux et basses eaux (Tableau 10, Figure 26 et Figure 27).

Commune	Lieu-dit	Code BSS	Désignation		
SAINT LAURENT DU VAR	Les Pugets	09994X0399	P35		
SAINT LAURENT DU VAR	ZI des Iscles	09994X0400	P36		

Tableau 10 - Piézomètres de suivi de la nappe.



Carte géologique harmonisée

- Quaternaire : alluvions fluviatiles récentes (sables, limons, graviers, galets)
- Eboulis récents Pliocène : poudingues du delta du Var
- Quaternaire : cordon littoral (sables, galets et grès)
- Réseau hydrologique
- Riss :alluvions de la moyenne terrasse (cailloutis et graviers)
- Würm : alluvions (cailloutis, graviers, sables)

Figure 25 - Piézométrie de la nappe alluviale (octobre 1999). Emplacement des piézomètres P35 et P36, ainsi que les piézomètres SC1 à SC6 du site du Grand Arénas.



P. 35 : SAINT-LAURENT-DU-VAR - CHAMP CAPTANT DES PUGETS

Figure 27 - Historique piézométrique sur le forage P36.

6.2. LES MESURES PIÉZOMETRIQUES SUR LE SITE DU GRAND ARÉNAS

Dans le cadre de l'étude géotechnique préliminaire de site G₁₁, réalisée par la Société Études et Recherches Géotechniques (ERG), il a été réalisé 6 piézomètres de 10 à 35 mètres de profondeur. Les caractéristiques et la localisation de ces piézomètres sont indiquées dans le Tableau 11 et sur la Figure 28.

Les niveaux piézométriques mesurés sont compris entre 1,60 et 5,50 m par rapport au sol, ce qui correspond à des altitudes comprises entre -0.3 et 5,20 m NGF.

NOM	X_Lamb93	Y_Lamb93	SOL_m_NGF	Profondeur_m	Date	PIEZO_m_SOL	PIEZO_m_NGF
SC 1	1 039 131	6 294 765	7,40	10,2	31/10/2013	2,90	4,50
SC 2	1 038 817	6 294 507	6,20	10,0	31/10/2013	3,85	2,35
SC 3	1 038 758	6 294 301	6,60	10,0	31/10/2013	3,30	3,30
SC 4	1 039 293	6 294 293	5,20	10,0	31/10/2013	5,50	-0,30
SC 5	1 039 168	6 294 477	6,80	35,0	31/10/2013	1,60	5,20
SC 6	1 038 919	6 294 429	6,20	30,0	31/10/2013	2,70	3,50

Tableau 11 - Coordonnées, profondeurs, niveaux piézométriques des piézomètres SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 et SC6 mesurés le 31 octobre 2013.



Figure 28 - Localisation des piézomètres SC1, SC2, SC3, SC4, SC5 et SC6 dans le site du Grand Arénas.

Ces forages ont été déclarés à la BSS du BRGM et portent les indices suivants : 10001X1165/SC1, 10001X1166/SC2, 10001X1167/SC3, 10001X1168/SC4, 10001X1169/SC5, 10001X1170/SC6.

6.3. LES MESURES PIÉZOMÉTRIQUES SUR LE DOMAINE DE L'AÉROPORT

Les services techniques de l'aéroport disposent d'un réseau de surveillance piézométrique sur lequel sont réalisées mensuellement des mesures de niveau.

Les mesures distinguent la nappe superficielle et la nappe profonde. On présente sur la Figure 29 les mesures réalisées le 20 février 2013. Ces données montrent que la nappe profonde est artésienne et dépasse le sol de près de 3 m.



Figure 29 - Localisation des piézomètres de l'aéroport. Mesures réalisées sur les nappes superficielles et profondes le 20 février 2013.

7. Les débits du Var à Nice

Le débit moyen mensuel du Var, au Pont Napoléon à Nice, ne descend pas en dessous de 25 m³/s (Figure 30). Ce débit d'étiage permet de soutenir, tout au long de l'année, les prélèvements des captages des Prairies et des Sagnes dont le débit total d'exploitation autorisé est égal à 1,650 m³/s.

SYNTHESE : données hydrologiques de synthèse (1974 - 2014)

LE VAR à NICE [PONT NAPOLEON III]

code station : Y6442010 producteur : DREAL PACA bassin versant : 2820 km² e-mail : laurence-m.durand@developpement-durable.gouv.fr

écoulements mensuels (naturels) - données calculées sur 41 ans													
			mars	avr.		juin	juil.			oct.	nov.		année
débits (m3/s)	49.70 #	43.80 #	48.50 #	65.20 #	79.90 #	63.70 #	36.30 #	25.60 #	31.10 #	55.90 #	67.20 #	47.90 #	51.20
<u>Qsp (l/s/km2)</u>	17.6 #	15.5 #	17.2 #	23.1 #	28.3 #	22.6 #	12.9 #	9.1 #	11.0 #	19.8 #	23.8 #	17.0 #	18.2
lame d'eau (mm)	47 #	38 #	46 #	59 #	75 #	58 #	34 #	24 #	28 #	53 #	61 #	45 #	574
Qsp : débits spécifiques													
Les codes de validité affichés sont : . (ospace) : valeur bonne . ! valeur reconstituée par le gestionnaire et jugée bonne . # : valeur' astimée (mesurée ou reconstituée) que le gestionnaire juge incertaine						Fév. Mars. Av	r. Mai. Juin.	Jui. Aou. S	ept. Oct. Nov	. Déc.			

Figure 30 - Débit du Var à Nice - Station Pont Napoléon.

8. Les prélèvements en nappe

8.1. LES PRÉLÈVEMENTS AEP

Il existe plusieurs captages AEP à proximité de la zone d'étude du Grand Arénas. Ceux-ci se situent en rive gauche du Var, sur la commune de Nice.

Ces captages sont groupés en deux champs captant :

- le champ captant des Sagnes avec 13 puits, notés PA, P1 à P4, P6 à P12 et PB ;
- le champ captant des Prairies avec 2 puits et 1 forage, notés P1, F2 et F4.

Une autorisation de prélèvement a été donnée en juillet 2011 pour un débit maximum instantané de 1 650 l/s, soit 143 000 m³/j ou 52 Mm³/an, réparti comme suit :

- champ captant des Sagnes : 1 000 l/s ;
- champ captant des Prairies : 650 l/s.

Les prélèvements réels de ces deux champs captant évoluent en fonction des prélèvements effectués sur la prise de la Vésubie qui alimente elle aussi la ville de Nice.

Les données des prélèvements relevées par la Métropole Nice Côte d'Azur pour ces deux dernières années sont indiquées dans le Tableau 12.

Champ captant	Année 2013	Année 2014 (de janvier à septembre)
Les Prairies	67 140	80 701
Les Sagnes	4 990 638	5 896 910

Tableau 12 - Prélèvements annuels (m^3) sur les champs captant AEP les Prairies et les Sagnes.

Les prélèvements annuels sont relativement faibles sur les Prairies, moins de 100 000 m³/an, et sont comprises entre 5 et 8 Mm³/an sur les Sagnes.

Dans la modélisation hydrodynamique de cette étude, on retiendra un débit d'exploitation moyen sur chaque forage des deux champs captant correspondant à un volume de prélèvement égal à 200 000 m³/an pour les Prairies et à 10 Mm³/an pour les Sagnes. Ces volumes de prélèvements simulés sont volontairement supérieurs aux données de 2013 et de 2014 pour tenir compte d'une possible augmentation des prélèvements, autorisée par les arrêtés préfectoraux.

On présente dans le Tableau 13 les captages AEP et les débits retenus dans la simulation hydrodynamique pour chacun d'eux. Les deux champs captant et les captages AEP sont indiqués sur la Figure 32.

Champ captant	Captage	Indice BRGM du point d'eau	Profondeur (m)	Volume prélevés (l/s)
	P1	09994X0520	26	2
Les Prairies	F2	09994X0517	32	2
	F4	09994X0518	31	2
	PA	10001X0057/S	80	Non exploité
	P1	10001X0059/F	51	32
	P2	10001X0058/P	27	32
	P3	10001X0054/P	7	32
	P4	10001X0055/F	11	32
	P6	10001X0480/P6	12	32
Les Sagnes	P7	10001X0481/P7	12	32
	P8	10001X0482/P8	15	32
	P9	10001X0056/F	15	32
	P10	10001X0333/F	38	32
	P11	10001X0151/S	41	32
	P12	10001X1059/F	51	Non exploité
	PB	Non référencé	-	Non exploité

Tableau 13 - Les forages des champs captant et leur débit d'exploitation retenu pour la modélisation.

8.2. LES PRÉLÈVEMENTS DE L'AÉROPORT

L'aéroport de Nice Côte d'Azur possède des forages destinés à l'alimentation en eau potable, à la climatisation et à l'arrosage de la plateforme. Les données des prélèvements et les forages concernés sont indiqués ci-après Tableau 14.

Eau potable 212 573 m³ en 2013 sur 2 forages captifs : FCP12 et FCP35,

Eau industrielle 1 542 000 m³ en 2013 : sur 7 forages FC13, FC34, FC24, FC25, FC26, FC27 et FS36,

Forage	Usage	Profondeur (m)	Nappe	Année de réalisation	Volume (m ³ /an) Année 2013
FCP12	AEP	61	captive	1973	212 572
FCP35	AEP	53	captive	1995	212 57 5
FC13	industriel	51	captive	1973	601.000
FC34	industriel	-	captive	-	001 000
FCR49	industriel réinjection	77	captive	2009	480 000
FC24	industriel	57	captive	1986	
FC25	industriel	57	captive	1986	E01.000
FC26	industriel	57	captive	1986	501 000
FC27	industriel	57	captive	1986	
FCR51	industriel réinjection	81	captive	2009	400 000
FS36	industriel	-	superficielle	-	440 000
FSR52	industriel réinjection	35	superficielle	2009	352 000

Réinjection 1 232 000 m³ en 2013 sur 3 forages : FCR49, FCR51 et FSR52.

Prélèvements AEP (m ³ /an)	212 573
Prélèvements industriels (m³/an)	1 542 000
Total prélèvements (m ³ /an)	1 754 573
Total réinjection (m ³ /an)	1 232 000
Solde prélèvements - réinjection (m ³ /an)	522 573

Tableau 14 - Données des volumes prélevés et réinjectés sur la zone de l'aéroport de Nice.

La localisation des captages de l'aéroport de Nice est indiquée sur la Figure 31.

La profondeur des forages n'est pas connue avec exactitude pour tous les ouvrages. Néanmoins, on dispose des informations sur le type de nappe captée, « superficielle » ou « captive », ce qui permet de situer les prélèvements dans les couches du modèle hydrodynamique. La position du forage FS36 n'est pas connue avec précision.



Figure 31 - Localisation des forages de pompage et de réinjection sur la zone de l'aéroport de Nice.

8.3. AUTRES PRÉLÈVEMENTS

8.3.1. Le forage du Musée des Arts Asiatiques

Le musée des Arts Asiatiques, dit aussi musée Trémois, est construit sur le lac du parc floral Phoenix à Nice. Il est équipé de deux forages pour le rafraîchissement des bâtiments. Nous disposons de peu d'information sur ces ouvrages. On estime toutefois la profondeur de ces ouvrages à environ 12 à 13 m. Chaque forage est équipé d'une pompe immergée de 2 à 4 m³/h. Il n'existe pas de comptage des débits de pompage. Aucune réinjection ne semble être faite après l'usage de l'eau pour le rafraîchissement.

On évalue le volume prélevé en nappe à un peu moins de 150 000 m³/an, soit un débit moyen annuel en continu égal à 17 m³/h.

8.3.2. Le doublet de rafraîchissement de la banque Populaire

Les bâtiments de la Banque Populaire sont équipés d'un système de rafraîchissement par pompe à chaleur relié à un doublet sur nappe.

Caractéristiques du doublet :

- profondeur des ouvrages : 72 et 76 m ;
- date de réalisation : septembre et octobre 2005 ;
- la nappe est artésienne avec un niveau statique non connu mais vraisemblablement 3 à 5 m au dessus du sol ;
- indices BSS des forages : 10001X1156/BP01 et 10001X1157/BP02 ;
- débit critique : au-delà de 120 m³/h ;
- débit d'explopitation : 75 m³/h ;
- transmissivité estimée de l'aquifère : 0,15 m²/s.

8.3.3. Le forage du Marché d'Intérêt National Nice Côte d'Azur (MIN)

Le forage du Marché d'Intérêt National sert à l'alimentation en eau de l'activité du marché.

Caractéristiques du forage :

- indice BSS : 10001X1041/FO-MIN ;
- profondeur de l'ouvrage : 31 m ;
- production annuelle estimée : 80 000 m³/an.

8.4. BILAN DES PRÉLÈVEMENTS ET DES RÉINJECTIONS DANS LA ZONE DU GRAND ARÉNAS

On présente dans le Tableau 15 et sur la Figure 32 le bilan des prélèvements en nappe.

Prélèvements AEP	TOTAL m ³ /an	NB. Forages	m³/an/forage	m ³ /jour/forage	m ³ /h/forage	m ³ /s/forage
les SAGNES	10 000 000	10	1 000 000	2 740	114	0,032
les PRAIRIES	200 000	3	66 667	183	8	0,002
			10 200 000			0,323
Prélèvements aéroport						
FCP12			106 287	291	12	0,003
FCP35			106 287	291	12	0,003
FC13			300 500	823	34	0,010
FC34			300 500	823	34	0,010
FC24			125 250	343	14	0,004
FC25			125 250	343	14	0,004
FC26			125 250	343	14	0,004
FC27			125 250	343	14	0,004
FS36			440 000	1 205	50	0,014
			1 754 573			0,056
Autres prélèvements						
MIN			80 000	219	9	0,003
Banque Populaire			657 000	1 800	75	0,021
Musée Trémois			150 000	411	17	0,005
			4 396 146			0,139
Réinjection						
FCR49	REINJEC	TION	480 000	1 315	55	0,015
FCR51	REINJEC	TION	400 000	1 096	46	0,013
FSR52	REINJEC	TION	352 000	964	40	0,011
Banque Populaire	REINJEC	TION	657 000	1 800	75	0,021
			1 889 000			0.060

Tableau 15 - Bilan des prélèvements et des réinjections dans la zone du Grand Arénas.



Figure 32 - Localisation des forages de pompage et de réinjection dans la zone du Grand Arénas.

9. Modélisation hydrodynamique multicouche

9.1. LES LIMITES D'EXTENSION, LE MAILLAGE ET LES CONDITIONS AUX LIMITES DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE MULTICOUCHE

La modélisation des écoulements souterrains a été réalisée avec le logiciel MARTHE (BRGM) en régime permanent. Ce modèle permet, après calage des perméabilités des différentes couches, de calculer la piézométrie des couches et le bilan des écoulements souterrains.

Les limites d'extension du modèle

Le modèle couvre l'ensemble de la zone indiquée sur la Figure 25.

Le maillage du modèle

Le maillage comprend les 7 couches identifiées dans le modèle géologie, auxquelles on a rajouté une couche qui représente la mer (Figure 33).

Compte tenu du rajout de la couche qui représente la mer, il existe un décalage entre la numérotation des couches du modèle géologique GeoModeller (de 1 à 7 couches géologiques) et le modèle hydrodynamique MARTHE qui comprend 8 couches de calcul. Le Var est simulé par une couche particulière dans laquelle on impose la ligne d'eau du fleuve. Celui-ci permet le calcul des flux d'échange entre le Var et la nappe :

- dimension des mailles de calcul : 25 m x 25 m ;
- nombre de lignes et de colonnes : 274 x 215 = 58 910 ;
- longueur et largeur du modèle : 274 x 25 et 215 x 25 = 6 850 m x 5 375 m ;
- superficie total du modèle : 6 850 m x 5 375 m / 1 000 000 = 36,82 km².



Figure 33 - Les couches du modèles hydrodynamique MARTHE.

Les conditions aux limites hydrauliques du modèle

Pour la partie aquifère, le modèle comprend 2 types de maille à potentiel imposé :

 sur la limite nord du modèle : on impose, pour les couches aquifères 3, 5 et 7, le potentiel observé dans la nappe alluviale en octobre 1999, c'est-à-dire une cote comprise entre 13 et 14 m NGF, pour la couche 8 des poudingues, et en absence de données plus précises, un potentiel légèrement supérieur pour représenter l'écoulement des poudingues vers la vallée ; - pour toute la couche 1 qui représente la mer : un potentiel imposé égal à 0 m NGF.

Le Var est représenté par une couche à part dont les mailles sont à potentiel imposé (ligne d'eau du fleuve).

Les côtés latéraux du modèle sont à flux nul, ce qui correspond à un écoulement nord-sud de la nappe en direction de la mer, parallèle aux limites du modèle, donc sans échange avec lui.

Les conditions aux limites thermiques du modèle

La température de la nappe est fixée initialement pour toutes les couches à 14 °C, la température des fluides entrant (recharge, cours d'eau) est également imposée à 14 °C.

9.2. LES DONNÉES DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE MULTICOUCHE

Les données du modèle comprennent :

- la géométrie des couches géologiques (l'altitude topographique, ainsi que les toits et murs des formations géologiques modélisées) ;
- la perméabilité initiale des couches de calcul ;
- les potentiels imposés aux limites du modèle ;
- les débits de pompage et d'injection imposés ;
- les alimentations par les pluies efficaces ;
- la ligne d'eau du Var ;

ainsi que les données thermiques suivantes :

- conductivité thermique de l'encaissant : 1,5 W.m⁻¹.K⁻¹;
- conductivité thermique de l'eau : 0,6 W.m⁻¹.K⁻¹;
- chaleur spécifique massique de l'eau : 4185 J.kg⁻¹.K⁻¹ ;
- chaleur spécifique volumique de l'encaissant : 2x10⁶ J.m⁻³.K⁻¹.

La géométrie du modèle provient des données du modèle géologique GeoModeller.

Les débits imposés des prélèvements et des réinjections dans le modèle sont indiqués dans le Tableau 15.

Apports par les pluies efficaces : les pluies efficaces correspondent, en première approximation, à l'écart entre les précipitations observées et l'évapotranspiration potentielle calculée. Celles-ci sont estimées à une lame d'eau de 344 mm par an.

Pour l'ensemble du domaine étudié (36,82 km²), cette lame d'eau annuelle correspond à :

- un volume annuel égal à 0,344 (m³/m²) x 36,82 (km²) = 12,67 Mm³/an ;
- un débit égal à $12,67 \times 10^6$ / ($365 \times 24 \times 3600$) = 0,401 m³/s.

Les données du modèle MARTHE sont décrites dans l'Annexe 4 du rapport.

9.3. LES RÉSULTATS DU CALAGE EN RÉGIME PERMANENT

Le calage du modèle consiste à ajuster les perméabilités des différentes couches de calcul jusqu'à arriver à retrouver, par calcul, les piézométries observées, décrites au paragraphe 9.3.2. Le résultat obtenu permet ainsi de disposer d'un outil de calcul qui a pour but, tout d'abord de vérifier la cohérence des données rassemblées, ensuite de permettre des simulations d'exploitation de l'aquifère et d'en estimer les résultats d'un point de vue hydraulique et thermique.

9.3.1. Les perméabilités des terrains résultant du calage du modèle

Le calage du modèle a permis d'aboutir aux coefficients de perméabilité moyens indiqués dans le Tableau 16 pour chaque couche.

Couche	Nature	K moyen m/s	T moyen m²/s
C2	Remblais	10 ⁻⁴	8,5 x 10 ⁻⁴
C3	Aquifère 1 superficiel	4,3 x 10 ⁻³	1,0 x 10 ⁻¹
C4	Niveau argileux 1	10 ⁻⁸	1,7 x 10 ⁻⁷
C5	Aquifère 2 intermédiaire	2,7 x 10 ⁻³	5,2 x 10 ⁻²
C6	Niveau argileux 2	10 ⁻⁸	3,8 x 10 ⁻⁷
C7	Aquifère 3 profond	2,2 x 10 ⁻³	8,3 x 10 ⁻²
C8	Poudingues	10 ⁻⁵	-

Tableau 16 - Coefficients de perméabilité K et transmissivités T moyens des couches du modèle hydrodynamique. Résultat du calage.

Définition de la transmissivité :

Transmissivité (m²/s) = Épaisseur saturée de l'aquifère (m) x Coefficient de perméabilité (m/s)

9.3.2. Les piézométries observées et calculées

On présente sur la Figure 34 la carte de localisation des piézomètres qui ont été utilisés pour le calage du modèle. Ces données montrent bien une différence piézométrique entre les niveaux de la nappe superficielle, compris entre 1 et 3 m NGF, et ceux de la nappe profonde, compris entre 4 et 6 m NGF. La Figure 35 montre l'ajustement des niveaux calculés sur les valeurs observées pour chacun des niveaux aquifères simulés. Les écarts sont inférieurs à 1 m. Il existe une imprécision dans ces valeurs piézométriques dans la mesure où les données ne sont pas synchrones et les repères des mesures pas toujours précisés.



Figure 34 - Emplacement des piézomètres dans la partie basse de la plaine du Var, utilisés pour le calage du modèle MARTHE.



Figure 35 - Graphique comparatif des valeurs piézométriques observées et calculées par le modèle MARTHE.
9.3.3. Le bilan des débits du modèle MARTHE en régime permanent

Le bilan des flux est présenté sur la Figure 36 et le Tableau 17.

Le détail du bilan des débits du modèle MARTHE figure dans l'Annexe 5.

Les calculs du modèle hydrodynamique permettent de connaître les débits d'échange de chaque couche avec toutes les autres couches du modèle, ainsi qu'avec la mer et le Var.



Figure 36 - Bilan des flux du modèle MARTHE en régime permanent (données en litre/seconde).

	Entrée			Sortie					
	l/s	m³/h	%		l/s	m³/h	%		
Apport amont	938	3 377	67%	Drainage Var	541	1 948	39%		
Pluie efficace	135	486	10%	Pompage	411	1 480	30%		
Réinjection	60	216	4%	Sortie en mer SUP.	169	608	12%		
Poudingues	258	929	19%	Sortie en mer INF.	270	972	19%		
TOTAL	1 391	5 008	100%	TOTAL	1 391	5 008	100%		

Tableau 17 - Bilan entrée/sortie de la nappe alluviale.

• Les débits d'échange entre l'aquifère et la mer

Le débit qui transite par l'aquifère superficiel (COUCHE 3) vers la mer est égal à 136 l/s, soit environ 490 m³/h. L'ensemble REMBLAIS + COUCHE 3 + COUCHE 4 représente un débit de 170 l/s qui aboutit en mer, soit environ 612 m³/h.

Les résultats du modèle, en régime permanent, indique que le débit qui transite par les aquifères profonds (ensemble des COUCHES 5, 6 et 7) vers la mer est égal à 270 l/s, soit environ 972 m³/h.

Le total des écoulements souterrains en mer (aquifère superficiel et aquifère profond) est estimé à 1 584 m³/h.

Les débits de l'ensemble des aquifères profonds vers la mer (972 m³/h) entrent dans la fourchette des écoulements souterrains estimés par Y. Guglielmi et L. Prieur dans Journal of Hydrology (1997) (Figure 37). Celle-ci était comprise entre 648 et 1 440 m³/h. Ces derniers résultats proviennent d'une campagne de mesure basée sur des mesures de concentration de la salinité et de la température de l'eau de mer, faites sur 42 stations en mer, au large de la zone aéroportuaire, avec des prélèvements réalisés entre 0 et 100 m de profondeur.

On signale, par ailleurs dans la littérature, des estimations de ces débits d'eau douce souterrains profonds de l'ordre de 1 000 m³/h pour le BRGM (1979) et 1 100 m³/h pour ARLAB (1975).



Fig. 1. (a) Carte hydrogéologique de l'embouchure de la basse vallée alluviale du Var. (b) Coupe géologique nord-sud des faciès deltaïques holocènes du Var.



• Les débits d'échange entre l'aquifère et le Var

Le bilan des débits d'échange entre le Var et l'aquifère alluviale concerne la couche C3 (AQUIFÈRE 1) du modèle, mais aussi les débits notés « Débordement » du modèle qui concernent les couches C2 (REMBLAIS) et C3 (AQUIFÈRE 1), qui sont en contact avec la topographie du modèle, et qui correspondent à un drainage de surface par un réseau de cours d'eau affluents du Var.

	RIVI	ÈRE	Débordomont	
COUCHE	Débits entrant Débits sortant		Debordement	
C2 REMBLAIS	-	-	- 7	
C3 AQUIFÈRE 1	274	- 266	- 542	
TOTAL	4	- 549		

Tableau 18 - Bilan des échanges nappe-rivière et des débordement de la nappe (l/s).

Le bilan de ces échanges (- 541 l/s) correspond à un débit d'alimentation de la nappe en amont et à proximité des captages AEP, et à un débit de drainage en aval par le Var et ses petits affluents.

10. Simulation de l'exploitation de la nappe pour un usage géothermique

10.1. CRITÈRES DE DÉFINITION DES DÉBITS D'EXPLOITATION DE LA NAPPE

Les débits d'exploitation par doublets de la nappe doivent respecter deux conditions. Tout d'abord, il est nécessaire d'éviter le recyclage de l'eau entre les forages de production et de réinjection et de ne pas exploiter les forages au-delà de leur débit critique, estimé lors des pompages d'essai. Le recyclage des eaux de la nappe aurait pour conséquence une augmentation ou une diminution progressive de la température de la nappe selon le type d'exploitation, chauffage ou rafraîchissement des bâtiments, et en conséquence une diminution du rendement énergétique des installations. Dans le cas d'une exploitation mixte, le résultat pourrait être intermédiaire. L'exploitation d'un forage au-delà de son débit critique pourrait avoir pour conséquence une réduction de sa durée de vie.

• **Recyclage** : éviter le recyclage de l'eau entre les forages de production et de réinjection.

La Figure 38 montre qu'à partir d'un certain débit l'exploitation, fonction du débit naturel de la nappe, on peut engendrer un recyclage de l'eau entre les 2 puits du doublet.



Figure 38 - Schéma du fonctionnement d'un doublet géothermique et incidence du débit d'exploitation sur son fonctionnement.

• Débit critique : ne pas exploiter les forages au-delà de leur débit critique.

Les pompages d'essai du forage géothermique de la Banque Populaire ont montré que le débit critique d'un forage dans les alluvions du Var peut être supérieur à 120 m³/h. On peut imaginer des débits d'exploitation compris entre 120 et 230 m³/h dans nos simulations, mais ces débits critiques devront être vérifiés par des essais de débit avant de prendre une décision sur les débits d'exploitation des forages.

10.2. PROTOCOLE DE SIMULATION DE L'EXPLOITATION PAR DOUBLETS DE LA NAPPE DES ALLUVIONS

Le dispositif d'exploitation simulé comprend 5 doublets. Les coordonnées et la localisation de ces doublets (forages de production et forages de réinjection) sont indiquées sur le Tableau 19 et la Figure 39. L'emplacement des doublets a été décidé par l'EPA afin de rapprocher les doublets géothermiques des macro-îlots que ceux-ci desserviront. Le forage de production le plus proche d'un forage de réinjection est le forage P3 qui est situé à 148 m en aval du forage de réinjection l2.

NOM	X_93	Y_93	NOM	X_93	Y_93
P_ILOT_1	1 038 959	6 294 566	I_ILOT_1	1 039 037	6 294 404
P_ILOT_2	1 039 166	6 294 797	I_ILOT_2	1 039 252	6 294 692
P_ILOT_3	1 039 391	6 294 640	I_ILOT_3	1 039 543	6 294 644
P_ILOT_4	1 039 573	6 294 345	I_ILOT_4	1 039 202	6 294 280
P_ILOT_5	1 038 972	6 294 816	I_ILOT_5	1 039 084	6 294 471

Tableau 19 - Coordonnées géographiques des 10 forages géothermiques (5 forages de production
et 5 forages de réinjection).



Figure 39 - Emplacement des 5 doublets géothermiques dans le périmètre du Grand Arénas (le projet de doublet EDF est représenté mais non simulé).

Les écoulements et les débits souterrains dans la zone du Grand Arénas

Les débits souterrains qui transitent sous la zone du Grand Arénas, calculés par le modèle MARTHE en régime permanent, sont indiqués dans le Tableau 20. Pour l'ensemble des 3 niveaux aquifères, ces débits atteignent près de 1400 m³/h. Les débits des aquifères 1 et 3 (niveaux superficiel et profond) sont les plus élevés avec des débits d'environ 500 à 550 m³/h, tandis que pour l'aquifère 2 (niveau intermédiaire) les débits ne dépassent à peine 300 m³/h.

Niveau aquifère	Débit entrant (m ³ /h)	Débit sortant (m ³ /h)	Recharge (m ³ /h)	Pompages (m ³ /h)
Superficiel	493	512	19	0
Intermédiaire	315	304	0	11
Profond	555	555	0	0
TOTAL	1363	1371	19	11

Tableau 20 - Débits dans la zone entre les forages de production et de réinjection.

La Figure 40 montre la piézométrie et le sens d'écoulement de la nappe pour les 3 niveaux aquifères considérés. On a représenté sur ces schémas les trajectoires principales des fluides réinjectés. Ces résultats montrent que les forages de production P1, P2 et P5, situés en amont du dispositif géothermique, seront peu touchés par les panaches de réinjection. Le forage de production P3, situé en aval du forage de réinjection I2, pourra être influencé. Pour parer à cet inconvénient, on pourrait envisager de positionner le doublet 2 dans un niveau aquifère différent de celui du doublet 3. Il en est de même, mais dans une moindre mesure, du forage de production P4 vis-à-vis des injections amont. Le regroupement de 3 forages de réinjection (I1, I4 et I5) permet de positionner dans un même endroit une bonne partie des eaux réinjectées, ce qui a pour effet de diminuer leur impact sur les forages de production. Il est à noter que le doublet 3 (P3 et I3) se trouve sur la bordure de l'aquifère profond (niveau 3). Il pourrait en résulter une diminution de productivité de cet aquifère vis-à-vis de ce doublet. Dans ce cas, une position de ce doublet dans les niveaux supérieur 1 ou 2 serait préférable.

Pour éviter le recyclage des eaux réinjectées, il faut éviter de prélever un débit supérieur au débit d'écoulement naturel de la nappe. Comme il est montré dans le Tableau 23 et le Tableau 24 un débit de pointe de 800 m³/h correspond à un débit moyen continu de 431 m³/h (situation en juillet) qui est sensiblement le débit naturel de chaque niveau aquifère. Aussi, dans les simulations qui suivent, on a supposé que les prélèvements seraient réalisés à un débit de pointe de 800 m³/h avec des forages qui ne capteraient qu'un seul niveau aquifère à la fois.

Les besoins de chauffage et de rafraîchissement, exprimés en puissances appelées par les bâtiments, sont indiqués sur les courbes des Figure 4 et Figure 5, le détail de ces puissances appelées par macro-îlot figure dans l'Annexe 6. On présente dans les Tableau 21 et Tableau 22 les besoins énergétiques mensuels de chauffage et de rafraîchissement de chaque macro-îlot. Dans ces tableaux, on a fixé, pour chaque macro-îlot, une puissance maximale couverte par la géothermie afin de respecter un débit maximal d'exploitation de 800 m³/h sur l'ensemble du Grand Arénas. Les calculs donnent le taux de couverture apporté par la géothermie pour chaque mois. Ces calculs permettent de connaître les débits horaires moyens continus de chaque doublet qui seront utilisés dans les simulations d'exploitation de la nappe.







Figure 40 - Piézométrie et sens des écoulements des 3 niveaux aquifères en régime permanent (hors exploitation géothermique des doublets du Grand Arénas).

	P MAX	Déhit MAX						Demande	de CHAUD e	et couverture	e géotherm	ique (MWh)				
Macro-îlot	CHAUD GTH (MW)	(m ³ /h)	Mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	TOTAL
			NB. jours	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
			Demande	294	260	219	179	100	51	36	37	59	113	192	277	1 817
			Couverture GTH	283	253	219	179	100	51	36	37	59	113	191	269	1 789
1	0,9	65	Taux de couverture	96%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	97%	98%
			NB. heures (*)	314	281	243	199	111	57	40	41	66	125	213	299	1 988
			Débit moyen (**)	27	27	21	18	10	5	3	4	6	11	19	26	-
			Demande	403	348	308	253	182	126	105	108	136	198	297	393	2 858
			Couverture GTH	366	323	299	246	180	125	105	108	135	195	285	359	2 725
2	1	72	Taux de couverture	91%	93%	97%	97%	99%	99%	100%	100%	99%	99%	96%	91%	95%
			NB. heures (*)	366	323	299	246	180	125	105	108	135	195	285	359	2 725
			Débit moyen (**)	35	35	29	25	17	12	10	10	14	19	28	35	-
			Demande	252	223	167	135	69	29	18	19	37	84	148	237	1 420
			Couverture GTH	230	206	166	132	68	29	18	19	37	84	147	214	1 352
3	0,7	50	Taux de couverture	91%	92%	99%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	91%	95%
			NB. heures (*)	328	294	237	188	98	42	26	28	53	120	210	306	1 931
			Débit moyen (**)	22	22	16	13	7	3	2	2	4	8	15	21	-
			Deamnde	363	320	233	187	96	40	25	27	52	119	209	342	2 012
			Couverture GTH	343	307	233	186	95	40	25	27	52	119	209	323	1 959
4	1,4	100	Taux de couverture	95%	96%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	94%	97%
			NB. heures (*)	245	219	166	133	68	29	18	19	37	85	149	230	1 399
			Débit moyen (**)	33	33	22	18	9	4	2	3	5	11	21	31	-
			Demande	702	609	516	421	286	185	151	155	205	317	491	678	4 717
			Couverture GTH	669	590	516	420	285	185	151	155	205	317	490	649	4 632
5	2	143	Taux de couverture	95%	97%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	96%	98%
			NB. heures (*)	335	295	258	210	143	93	75	78	102	158	245	324	2 316
			Débit moyen (**)	64	63	50	42	27	18	14	15	20	30	49	62	-
			Demande	2 015	1 759	1 444	1 175	733	432	335	346	490	830	1 337	1 927	12 823
TOTAL	6	429,5	Couverture GTH	1 891	1 678	1 432	1 163	729	431	335	346	489	827	1 322	1 813	12 456
			Taux de couverture	94%	95%	99%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	100%	99%	94%	97%

(*) Nombre d'heures de fonctionnement à P MAX par mois

(**) Débit horaire moyen continu en m^3/h

Tableau 21 - Besoins énergétiques mensuels (MWh) de chauffage de chaque macro-îlot et taux de couverture par la géothermie.

PAX PAR PAR PAR PARA PARA PARA PARA PARA																	
Macro-ilot GTH (MW) (m ² /n) Mois (m ² /n) janvier fevrier mars avril mai juin juillet août septembre octore novembre décompre 1 NB. jours 31 28 31 302 303 30 30 30 30 30 30 30 30		P MAX	Débit MAX						Demande	de FROID e	et couverture	géothermi	que (MWh)				
NB. jours 31 28 31 30	Macro-îlot	FOID GTH (MW)	(m ³ /h)	Mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	TOTAL
1 1.4 1.80 Demande - - - 73 642 2.359 2.111 6.39 70 - - 5.894 1 1.4 180 Taux de couverture - - - 75% 44% 22% 32% 38% 66% - - 1994 1 1.4 180 Taux de couverture - - - 75% 44% 22% 32% 66% - - 394 1 1.0 Taux de couverture - - 9 50 110 111 - - 842 2 1 120 Taux de couverture - - 67% 33% 26% 22% 57% - - 28% 2 1 Demande - - 11 15 55 50 14 2 - 28% 2 1 Demande - - 17 <td></td> <td></td> <td></td> <td>NB. jours</td> <td>31</td> <td>28</td> <td>31</td> <td>30</td> <td>31</td> <td>30</td> <td>31</td> <td>31</td> <td>30</td> <td>31</td> <td>30</td> <td>31</td> <td>365</td>				NB. jours	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365
1 1,4 180 Taxx de couverture - - 55 281 696 675 241 466 - - 194 1 1,4 180 Taxx de couverture - - - 75% 44% 29% 32% 38% 66% - - 34% 2 1 10bit moyen(**) - - - 9 50 120 117 43 8 - - 482 2 1 120 Taxx de couverture - - 8 89 338 308 87 11 - - 842 2 1 120 Tax de couverture - - 8 89 338 308 87 11 - - 28% 2 1 Demande - - 17 355 50 14 2 - - 445 120 134% 120 120				Demande	-	-	-	-	73	642	2 359	2 111	639	70	-	-	5 894
1 1,4 180 Taux de couverture NB. heures (*) Débit moyen (**) - - - 75% 44% 29% 32% 38% 66% - - 34% 1 1424 110 482 172 33 - - 1424 1 1424 1112 303 19 - - - 304 2 1 120 Taux de couverture GTH - - 88 338 308 87 11 - - 842 2 1 120 Taux de couverture - - 8 89 338 308 87 11 - - 842 2 1 120 Taux de couverture - - 17 326 144 1279 335 30 - 3445 3 1 Demande - - 7 85 333 302 84 10 - 821 120 Taux de couverture - - 7 85 333 302				Couverture GTH	-	-	-	-	55	281	696	675	241	46	-	-	1 994
NB. heures (*) - - - 39 201 497 482 172 33 - - 1 12 Debit moyen (**) - - - 9 50 120 117 43 8 - - 3004 Demande - - - 12 274 124 1112 303 19 - 482 2 1 120 Taw de cowerture - - - 8 89 338 308 87 111 - - 842 2 1 120 Taw de cowerture - - - 1 15 55 50 14 2 - - 821 3 1 Demande - - - 17 35 333 302 84 10 - 821 3 1 Demande - - - 7 85 333 302 84 10 - 821 3 120 Taw de cowerture <t< td=""><td>1</td><td>1,4</td><td>180</td><td>Taux de couverture</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>75%</td><td>44%</td><td>29%</td><td>32%</td><td>38%</td><td>66%</td><td>-</td><td>-</td><td>34%</td></t<>	1	1,4	180	Taux de couverture	-	-	-	-	75%	44%	29%	32%	38%	66%	-	-	34%
Débit moyen (**) - - - 9 50 120 117 43 8 - - Demande - - - 12 274 1284 1112 303 19 - - 8004 2 1 120 Taux de couverture - - 88 89 338 308 87 11 - - 842 2 1 120 Taux de couverture - - 8 89 338 308 87 11 - - 842 2 1 Demande - - - 117 326 1448 1279 345 300 - - 3445 30 Taux de couverture GTH - - - 7 85 333 302 84 100 - - 821 120 Taux de couverture - - 11 14 54 49 </td <td></td> <td></td> <td></td> <td>NB. heures (*)</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>39</td> <td>201</td> <td>497</td> <td>482</td> <td>172</td> <td>33</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>1 424</td>				NB. heures (*)	-	-	-	-	39	201	497	482	172	33	-	-	1 424
2 1 120 - - - 12 274 1284 1112 303 19 - - 3004 2 1 120 Taux de couverture GTH - - - 8 89 338 308 87 11 - - 842 2 1 120 Taux de couverture - - - 88 89 338 308 87 11 - - 842 3 1 Demote - - - 1 15 55 50 14 2 - - 842 120 Taux de couverture - - 7 85 333 302 84 10 - - 842 120 Taux de couverture - - 7 85 333 302 84 10 - - 24% 120 Taux de couverture - - <				Débit moyen (**)	-	-	-	-	9	50	120	117	43	8	-	-	
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $				Demande	-	-	-	-	12	274	1 284	1 112	303	19	-	-	3 004
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $				Couverture GTH	-	-	-	-	8	89	338	308	87	11	-	-	842
NB. heures (*) - - - 8 89 338 308 87 11 - - 842 2 Débit moyen (**) - - - 1 15 55 50 14 2 - - 3 3445 3 1 Demande - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 120 Taux de couverture - - - 41% 26% 23% 24% 24% 34% - - 821 120 Taux de couverture - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 120 Taux de couverture - - - 1 14 54 49 14 2 - - 4832 120 Taux de couverture - - 26 467 2014 1794 484 47 - - 1002 14 1,2 <td< td=""><td>2</td><td>1</td><td>120</td><td>Taux de couverture</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>67%</td><td>33%</td><td>26%</td><td>28%</td><td>29%</td><td>57%</td><td>-</td><td>-</td><td>28%</td></td<>	2	1	120	Taux de couverture					67%	33%	26%	28%	29%	57%	-	-	28%
Debit moyen (**) - - - 1 15 55 50 14 2 - - 3 3 1 Demande - - - 17 326 1448 1279 345 30 - - 8345 120 Taux de couverture GTH - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 120 Taux de couverture - - - 7 85 333 302 84 10 - - 24% 120 Taux de couverture - - - 7 85 333 302 84 10 - - 24% 4 1,2 150 Taux de couverture - - - 26 467 2014 1794 484 47 - - 4832 4 1,2 150 Taux de couverture -				NB. heures (*)	-	-	-	-	8	89	338	308	87	11	-	-	842
3 1 Demande - - - 17 326 1448 1279 345 30 - - 3445 Couverture GTH - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 120 Taux de couverture - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 120 Taux de couverture - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 Debit moyen (**) - - - 1 14 54 49 14 2 - - 4832 4 1,2 Deamnde - - - 9 106 404 368 103 13 - - 1002 4 1,2 150 Taux de couverture - - 2 18 837 306 86 11 - - 2 1002 5				Débit moyen (**)	-	-	-	-	1	15	55	50	14	2	-	-	
Couverture GTH - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 120 Taux de couverture - - - 41% 26% 23% 24% 34% - - 821 NB. heures (*) - - - 7 85 333 302 84 10 - - 24% Débit moyen (**) - - - 7 85 333 302 84 10 - - 24% Débit moyen (**) - - - 7 85 433 302 84 10 - - 24% 4 1,2 Débit moyen (**) - - - 9 106 404 368 103 13 - - 4832 4 1,2 150 Taux de couverture - - 2 18 88 337 306 86 111 - - 21% NB. heures (*) - - -<	3	1		Demande	-	-	-	-	17	326	1 448	1 279	345	30	-	-	3 445
120 Taux de couverture NB. heures (*) - - - 41% 26% 23% 24% 24% 34% - - 24% NB. heures (*) - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 Debit moyen (*) - - - 1 14 54 49 14 2 - - 821 Lag Deamnde - - - 266 467 2014 1794 484 47 - - 4832 Couverture GTH - - - 9 106 404 368 103 13 - - 1002 4 1,2 150 Taux de couverture - - - 88 337 306 86 11 - - 835 Debit moyen (**) - - - 28 608 2771 2425 656 49 - - 6537 Debit moyen (**) - - -<				Couverture GTH	-	-	-	-	7	85	333	302	84	10	-	-	821
NB. heures (*) - - - 7 85 333 302 84 10 - - 821 Débit moyen (**) - - - 1 14 54 49 14 2 - - 4832 A 1,2 Deamnde - - - 9 106 404 368 103 13 - - 4832 4 1,2 150 Taux de couverture - - - 9 106 404 368 103 13 - - 4832 5 150 Taux de couverture - - - 88 337 306 86 11 - 4832 0 Debit moyen (**) - - 2 18 68 62 18 2 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture GTH - - - 13 156 <td></td> <td></td> <td>120</td> <td>Taux de couverture</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>41%</td> <td>26%</td> <td>23%</td> <td>24%</td> <td>24%</td> <td>34%</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>24%</td>			120	Taux de couverture	-	-	-	-	41%	26%	23%	24%	24%	34%	-	-	24%
Débit moyen (**) - - - 1 14 54 49 14 2 - - - - - 1 14 54 49 14 2 - - - - 26 467 2014 1794 484 47 - - 4832 4 1,2 150 Taux de couverture - - - 9 106 404 368 103 13 - - 1002 4 1,2 150 Taux de couverture - - - 9 106 404 368 103 13 - - 1002 5 1,8 heures (*) - - - 2 8 88 337 306 86 11 - - 85 6 Débit moyen (**) - - - 28 608 2771 245 656 49 - -				NB. heures (*)	-	-	-	-	7	85	333	302	84	10	-	-	821
Deamnde - - - 26 467 2014 1794 484 47 - - 4 832 Couverture GTH - - - 9 106 404 368 103 13 - - 4 832 4 1,2 150 Taux dc couverture - - - 9 106 404 368 103 13 - - 1002 4 1,2 150 Taux dc couverture - - - 8 23% 23% 20% 21% 27% - - 21% B. NB. heures (*) - - - 2 18 68 62 18 2 - - 6537 5 1,8 230 Taux dc couverture - - - 2 46% 26% 22% 23% 38% - - 23% 5 1,8 230 Taux dc				Débit moyen (**)	-	-	-	-	1	14	54	49	14	2	-	-	
Couverture GTH - - - 9 106 404 368 103 13 - - 1002 4 1,2 150 Taux de couverture - - - 35% 23% 20% 20% 21% 27% - - 21% 1002 NB. heures (*) - - - 8 88 837 306 86 111 - - 21% Débit moyen (**) - - - 2 18 68 62 18 2 - - 6537 Demande - - - 13 156 603 548 153 19 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 13 156 603 548 153 19 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 7 87 335 304 85 10 - - 23%				Deamnde	-	-	-	-	26	467	2 014	1 794	484	47	-	-	4 832
4 1,2 150 Taux de couverture NB. heures (*) - - - 35% 23% 20% 20% 21% 27% - - 21% 21% 10				Couverture GTH	-	-	-	-	9	106	404	368	103	13	-	-	1 002
NB. heures (*) - - - 8 88 337 306 86 11 - - 835 Débit moyen (**) - - - 2 18 68 62 18 2 - - 6537 Demande - - - 2 13 156 603 548 153 19 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 46% 26% 22% 23% 38% - - 23% 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 46% 26% 22% 23% 38% - - 23% NB. heures (*) - - - 7 87 335 304 85 10 - 829 Demande - - - 2 28 104 94 27 3 - - 2371 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH -	4	1,2	150	Taux de couverture	-	-	-	-	35%	23%	20%	20%	21%	27%	-	-	21%
Debit moyen (**) - - - 2 18 68 62 18 2 - - - - - - - - - 2 18 68 62 18 2 - - - - - - - - - - 6537 Demande - - - - 13 156 603 548 153 19 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 46% 26% 22% 23% 38% - - 23% 38% - - 23% 38% - - 23% 304 85 10 - - 829 Débit moyen (**) - - - 2 28 104 94 27 3 - - - - 2317 9876 8702 2428 <td< td=""><td></td><td></td><td></td><td>NB. heures (*)</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>8</td><td>88</td><td>337</td><td>306</td><td>86</td><td>11</td><td>-</td><td>-</td><td>835</td></td<>				NB. heures (*)	-	-	-	-	8	88	337	306	86	11	-	-	835
Demande - - - 28 608 2.771 2.425 656 49 - - 6537 Couverture GTH - - - 13 156 603 548 153 19 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 46% 26% 22% 23% 38% - - 23% 10 Débit moyen (**) - - - 7 87 335 304 85 10 - - 23% Débit moyen (**) - - - 2 28 104 94 27 3 - - TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - - 92 718 2374 201 668 98 - - 6151 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - 92 718				Débit moyen (**)	-	-	-	-	2	18	68	62	18	2	-	-	
Couverture GTH - - - 13 156 603 548 153 19 - - 1492 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 46% 26% 22% 23% 38% - - 23% 5 1,8 230 Taux de couverture - - - 7 87 335 304 85 10 - - 829 Débit moyen (**) - - - 2 28 104 94 27 3 - - Demande - - - 156 2 317 9 876 8 720 2 428 215 - 23711 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - 92 718 2 374 2 201 668 98 - - 6151 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - 92				Demande	-	-	-	-	28	608	2 771	2 425	656	49	-	-	6 537
5 1,8 230 Taux de couverture NB. heures (*) - - - 46% 26% 22% 23% 23% 38% - - 23% Debit moyen (**) - - - 7 87 335 304 85 10 - - 829 Debit moyen (**) - - - 2 28 104 94 27 3 - - Demande - - - 156 2 317 9 876 8 720 2 428 215 - 23711 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - - 92 718 2 374 2 201 668 98 - - 6151 Taux de couverture - - 59% 31% 24% 25% 28% 46% 26%				Couverture GTH	-	-	-	-	13	156	603	548	153	19	-	-	1 492
NB. heures (*) - - - 7 87 335 304 85 10 - - 829 Débit moyen (**) - - - 2 28 104 94 27 3 - - - - - 2 28 104 94 27 3 - 23711 100 - - 23711 - - - 23711 - - - 23711 - - 23711 - - - 23711 - - 23711 - - 23711 - - - 23711 - - -	5	1,8	230	Taux de couverture	-	-	-	-	46%	26%	22%	23%	23%	38%	-	-	23%
Débit moyen (**) - - - 2 28 104 94 27 3 - - Demande - - - 156 2317 9876 8720 2428 215 - 23711 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - - 92 718 2374 2201 668 98 - - 6151 Tax de couverture - 59% 31% 24% 25% 28% 46% 26%				NB. heures (*)	-	-	-	-	7	87	335	304	85	10	-	-	829
Demande - - 156 2 317 9 876 8 720 2 428 215 - 23 711 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - - 92 718 2 374 2 201 668 98 - - 6 151 TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - - 92 718 2 374 2 201 668 98 - - 6 151 Total 6,4 800 Couverture 59% 31% 2 42% 2 5% 2 8% 4 6% 2 5%				Débit moyen (**)	-	-	-	-	2	28	104	94	27	3	-	-	
TOTAL 6,4 800 Couverture GTH - - - 92 718 2 374 2 201 668 98 - 6 151 Taux de couverture 59% 31% 24% 25% 28% 46% 26%				Demande	-	-	-	-	156	2 317	9 876	8 720	2 428	215	-	-	23 711
Taux de converture 59% 31% 24% 25% 28% 46% 26%	TOTAL	6,4	800	Couverture GTH	-	-	-	-	92	718	2 374	2 201	668	98	-	-	6 151
				Taux de couverture					59%	31%	24%	25%	28%	46%			26%

(*) Nombre d'heures de fonctionnement à P MAX par mois (**) Débit horaire moyen continu en m³/h

Tableau 22 - Besoins énergétiques mensuels (MWh) de rafraîchissement de chaque macro-îlot et taux de couverture par la géothermie.

Le Tableau 23 montre qu'avec une puissance installée en chauffage de 6 MW, nécessitant un débit de 430 m³/h, la géothermie permettrait de couvrir 97 % des besoins de chauffage. Par contre, avec un débit de 800 m³/h, la géothermie ne pourrait pas couvrir plus de 26 % des besoins de rafraîchissement.

On présente dans le Tableau 24 les valeurs des débits horaires moyens continus mensuels de chaque doublet. La période de chauffage s'étend sur 8 mois, d'octobre à mai, tandis que la période de rafraîchissement s'étend sur 4 mois, de juin à septembre. On suppose que, pour les périodes où il existe à la fois des besoins de chaud et de froid, le système chauffage/rafraîchissement des installations ferait une récupération des calories d'un circuit sur l'autre.

		CHA	AUD		FROID				
Macro-îlot	P MAX BESOINS (MW)	DEBIT MAX (m³/h)	P MAX GTH (MW)	TAUX DE COUVERTURE GTH (%)	P MAX BESOINS (MW)	DEBIT MAX (m³/h)	P MAX GTH (MW)	TAUX DE COUVERTURE GTH (%)	
1	2,1	65	0,9	98	8,5	180	1,4	34	
2	2,5	72	1,0	95	5,3	120	1,0	28	
3	2,9	50	0,7	95	5,5	120	1,0	24	
4	4,5	100	1,4	97	7,4	150	1,2	21	
5	5,4	143	2,0	98	10,9	230	1,8	23	
TOTAL	17,4	430	6,0	97	37,5	800	6,4	26	

Tableau 23 - Puissances appelées, débits des doublets et taux de couverture de la géothermie.

			Débit horaire moyen continu (m ³ /h)										
	Mois	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
	NB. jours	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
	1	27	27	21	18	10	50	120	117	43	11	19	26
	2	35	35	29	25	17	15	55	50	14	19	28	35
Macro-îlot	3	22	22	16	13	7	14	54	49	14	8	15	21
	4	33	33	22	18	9	18	68	62	18	11	21	31
	5	64	63	50	42	27	28	104	94	27	30	49	62
	TOTAL	213	207	169	146	101	155	431	402	147	111	161	205

mode CHAUFFAGE, prélèvement de chaleur et réinjection de froid - Température de rejet 5°C 27 50

mode RAFRAICHISSEMENT, prélèvement de froid et réinjection de chaleur - Température de rejet 23°C

Tableau 24 - Débits de pompage et températures de rejet simulés.

On présente dans le Tableau 25 et la Figure 41 les volumes d'eau réinjectés en mode CHAUD (réinjection d'eau refroidie) et en mode FROID (réinjection d'eau réchauffée) en m³/an et en pourcentage par macro-îlot. Ce tableau permet de voir que les macro-îlots ne fonctionnent pas tous de la même facon et que l'impact de chacun pourra être différent sur les températures de la nappe.

	CHAUD	FROID	TOTAL	% CHAUD	% FROID
Macro-îlot 1	115 145	243 360	358 505	32%	68%
Macro-îlot 2	162 110	98 750	260 859	62%	38%
Macro-îlot 3	89 095	96 516	185 611	48%	52%
Macro-îlot 4	129 604	122 575	252 179	51%	49%
Macro-îlot 5	281 386	186 569	467 955	60%	40%
	777 340	747 769	1 525 109		

Tableau 25 - Volume d'eau réinjectée en mode CHAUD (réinjection d'eau refroidie) et en mode FROID (réinjection d'eau réchauffée) en m^3/an et en pourcentage par macro-îlot.



Figure 41 - Volume d'eau réinjectée en mode CHAUD (réinjection d'eau froide) et en mode FROID (réinjection d'eau chaude) en m³/an.

Hypothèses de calcul :

- COP = 4 ;
- température de la nappe : 14 °C ;
- écart de température entre prélèvement et rejet : +/- 9 °C.

Volumes réinjectés annuellement et températures de réinjection :

- en mode chauffage : 777 340 m³ (51 %) d'eau à 5 °C ;
- en mode rafraîchissement : 747 769 m³ (49 %) d'eau à 23 °C.

Le bilan de température vis-à-vis de la nappe, initialement à 14 °C, sera faible dans la mesure où les volumes d'eau froide et d'eau chaude réinjectés seraient sensiblement les mêmes. Le débit total pompé et réinjecté dans la nappe serait de l'ordre de 1,5 Mm³ par an.

Puissance maximale échangée avec le sous-sol avec les 5 doublets :

- 800 (m³/h) x 9 (°C) x 1,163 = 8 374 kW, **environ 8,4 MW**.

Énergie totale échangée avec le sous-sol (CHAUD et FROID confondus) :

- $(777\ 340\ m^3 + 747\ 769\ m^3) \ge 9$ (°C) $\ge 1,163 \ge 0,001 = 16\ 000\ MWh$.

10.3. RÉSULTATS DES SIMULATIONS DE L'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE DE LA NAPPE DES ALLUVIONS

On présente ci-après les résultats d'une exploitation de la nappe des alluvions sur une période de 10 ans pour 3 scénarios (aquifère superficiel, aquifère intermédiaire, aquifère profond) selon le schéma des besoins énergétiques présenté au chapitre 10.2.

Les calculs ont été réalisés à un pas de temps mensuel (120 pas de 1 mois pour une durée de 10 ans d'exploitation).

Les coefficients d'emmagasinement retenus sont indiqués ci-après :

- nappe libre : alluvions (8 %), poudingues et remblais (5 %), argiles (1 %) ;
- nappe captive : 10^{-6} m⁻¹.

10.3.1. Évolution comparative des températures aux puits de production sur une période d'exploitation de dix ans pour les 3 scénarios

Pour chacun des 3 scénarios, on présente les cartes des températures à fin mai, fin de la période de chauffage, et à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement, au bout de 10 ans d'exploitation. Pour chaque scénario, on suppose qu'un seul niveau aquifère est exploité.

À fin mai, à la fin de la période de chauffage, la température de la nappe, dans le voisinage immédiat des forages de réinjection, est proche de 5 °C (température de réinjection). Les cartes des Figure 42, Figure 44 et Figure 46 montrent l'évolution du panache de température d'eau froide autour des forages de réinjection.

À fin septembre, à la fin de la période de rafraîchissement, la température de la nappe, dans le voisinage immédiat des forages de réinjection, est proche de 23 °C (température de réinjection). Les cartes des Figure 43, Figure 45 et Figure 47 montrent l'évolution du panache de température d'eau chaude autour des forages de réinjection.

L'évolution des panaches d'eau chaude et d'eau froide autour des forages de réinjection dépendent du type de besoin énergétique de chaque macro-îlot. Ainsi le puits de réinjection n° 1 va générer un panache de température chaud plus important à cause d'un usage plus important de rafraîchissement pour ses bâtiments.

De façon générale, les différents panaches d'eau chaude et d'eau froide ne s'étendent pas sur un grand secteur grâce à la réinjection successive d'eau chaude puis d'eau froide dans les puits de réinjection.

La Figure 48 montre l'évolution des températures aux différents puits de production. Au bout de 8 à 10 ans, on constate une stabilisation de l'évolution des températures de la nappe. Pour les 3 scénarios, les puits P3 et P4 subissent des influences significatives de température à cause de leur position en aval des puits de réinjection. Le puits P3, situé à 148 m en aval du forage de réinjection l2, voit sa température fluctuer entre 11 et 14 °C. Le puits P4 voit sa température diminuer progressivement et se stabiliser, selon le niveau aquifère considéré, entre 13,4 et 13,6 °C. Ces deux forages (P3 et P4), subissent l'influence d'une plus grande quantité d'eau froide réinjectée par le doublet du macro-îlot 2 où le mode chauffage (réinjection d'eau froide) représente 62 % des volumes réinjectés (voir Tableau 25).



Figure 42 - Températures de l'aquifère superficiel après dix ans d'exploitation, situation à fin mai, fin de la période de chauffage (la zone grisée est hors niveau nappe superficielle).



Figure 43 - Températures de l'aquifère superficiel après dix ans d'exploitation, situation à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement (la zone grisée est hors niveau nappe superficielle).



Figure 44 - Températures de l'aquifère intermédiaire après dix ans d'exploitation, situation à fin mai, fin de la période de chauffage (la zone grisée est hors niveau nappe intermédiaire).



Figure 45 - Températures de l'aquifère intermédiaire après dix ans d'exploitation, situation à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement (la zone grisée est hors niveau nappe intermédiaire).



Figure 46 - Températures de l'aquifère profond après dix ans d'exploitation, situation à fin mai, fin de la période de chauffage (la zone grisée est hors niveau nappe profonde).



Figure 47 - Températures de l'aquifère profond après dix ans d'exploitation, situation à fin septembre, fin de la période de rafraîchissement (la zone grisée est hors niveau nappe profonde).



Figure 48 - Évolution des températures sur les puits de production (durée 10 ans) (unité de l'axe des abscisses : mois).

10.3.2. Évolution comparative des niveaux piézométriques aux puits de production et de réinjection sur une période d'exploitation de dix ans pour les 3 scénarios

La Figure 49 montre l'évolution des niveaux piézométriques des forages de production sur une durée de 10 ans. On y voit l'alternance des baisses de niveau sur les puits de production en fonction des débits d'exploitation variables. Par rapport à un niveau piézométrique moyen initial, compris entre 4 et 7 m NGF pour les 3 aquifères, on observe un baisse de niveau de l'ordre 1 m pour l'aquifère superficiel, et de 0,5 m pour les 2 autres niveaux aquifères. Dans tous les cas les niveaux piézométriques des forages de production sont supérieurs au niveau de la mer (pas de niveaux piézométriques négatifs). Les niveaux en exploitation de l'aquifère superficiel sont toujours supérieurs à 2 m NGF, tandis que les niveaux en exploitation des aquifères intermédiaire et profond sont toujours supérieurs à 4 m NGF.

La Figure 50 montre l'évolution des niveaux piézométriques des forages de réinjection sur une durée de 10 ans. On y voit l'alternance des remontées de niveau sur les puits de réinjection en fonction des débits d'exploitation variables. Par rapport à un niveau piézométrique moyen initial, compris entre 4 et 7 m NGF pour les 3 aquifères, on observe un augmentation de niveau de l'ordre 1 m pour l'aquifère superficiel, et de 0,5 m pour les 2 autres niveaux aquifères. Dans tous les cas les niveaux piézométriques des forages de production sont supérieurs au niveau de la mer (pas de niveaux piézométriques négatifs). Les niveaux en exploitation de l'aquifère superficiel sont toujours supérieurs à 4 m NGF, tandis que les niveaux en exploitation des aquifères intermédiaire et profond sont toujours supérieurs à 5 m NGF.



Figure 49 - Évolution des niveaux piézométiques sur les forages de production (durée 10 ans) (unité de l'axe des abscisses : mois).



Figure 50 - Évolution des niveaux piézométiques sur les forages de réinjection (durée 10 ans) (unité de l'axe des abscisses : mois).

10.4. SEUILS D'EXPLOITATION DE LA NAPPE VIS-À-VIS DU BISEAU SALÉ

Les simulations montrent que l'exploitation géothermique de la nappe par doublets avec des forages de production placés en amont et des forages de réinjection placés en aval n'entrainerait pas de risque de venue d'eau de mer dans l'aquifère. Il serait cependant nécessaire d'être vigilent sur le forage de production P4 situé en aval.

En effet, la réinjection créerait une surpression des niveaux de la nappe de l'ordre de 1 m en aval des doublets avec des niveaux piézométriques de l'ordre de 5 à 6 m NGF pour l'aquifère superficiel, et de l'ordre de 6 à 7 m pour les aquifères intermédiaire et profond. De plus, la présence de niveaux argileux au droit de la zone de l'aéroport limite très fortement les possibilités de venues d'eau de mer dans cette zone.

10.5. IMPACT DE L'EXPLOITATION GÉOTHERMIQUE SUR LE CHAMP CAPTANT DES SAGNES

La Figure 51 montre l'évolution des niveaux piézométriques sur les captages P3, P4, P6, P7 et P8 du champ captant Les Sagnes, captages les plus proches des doublets géothermiques. L'impact le plus important, calculé sur le captage P3, serait de l'ordre de 7 cm. L'impact serait de l'ordre de 3 cm sur P6, P7 et P8, et inférieur à 2 cm sur P4. Pour les autres niveaux aquifères, l'impact sur la piézométrie serait de l'ordre de 1 cm.



Figure 51 - Impact sur les niveaux piézométiques des captages AEP Les Sagnes (durée 10 ans).

L'impact thermique, calculé sur les températures des captages du champ captant Les Sagnes, serait de l'ordre de 0,2 °C.

10.6. CONCLUSION SUR L'USAGE D'UNE GÉOTHERMIE SUR NAPPE

L'étude géologique montre que la ressource en eau souterraine, au droit du Grand Arénas, est répartie sur 3 niveaux géologiques aquifères composés d'alluvions de la plaine du Var, séparés eux-mêmes par 2 niveaux argileux imperméables. On distingue ainsi un aquifère superficiel, un aquifère intermédiaire et un aquifère profond. Cet ensemble multicouche représente une épaisseur totale de 80 m qui repose sur un substratum constitué des poudingues pliocènes, eux-mêmes aquifères mais beaucoup moins perméables que les alluvions sus-jacents. Les niveaux argileux forment une barrière hydraulique pour les 2

niveaux aquifères supérieurs dans la direction sud, entre le Grand Arénas et le site de l'aéroport, modifiant localement les écoulements.

La modélisation hydrodynamique montre que les alluvions peuvent être exploitées pour un usage géothermique assisté par pompe à chaleur. Les simulations d'exploitation de la nappe réalisées dans l'étude ont porté sur 5 doublets pour un débit de pointe de 800 m³/h chacun. Avec l'hypothèse d'un écart de température de 9 °C entre les prélèvements et les réinjections, la puissance maximale échangée avec le sous-sol est d'environ 8,4 MW, ce qui permet de couvrir 90 % des besoins de CHAUD (chauffage et ECS), mais seulement 20 % des besoins de FROID.

La puissance maximale de CHAUD demandée de 17,4 MW correspond à un pic d'hiver de quelques heures qui n'est pas représentative pour le dimensionnement d'un doublet géothermique. Une puissance de chauffage de 6 MW (débit de 430 m³/h) permettrait de couvrir 97 % des besoins de CHAUD.

La puissance de FROID est stable sur les 4 mois d'utilisation du rafraîchissement entre juin et septembre. La puissance maximale de FROID demandée est égale à 37,5 MW. Les 800 m³/h prélevés sur la nappe ne pourraient fournir que 6,4 MW de puissance utile de FROID, soit environ 26 % des besoins exprimés.

La modélisation de l'exploitation de la nappe par 5 doublets montre l'importance du positionnement des forages de réinjection par rapport aux forages de production. Ainsi les forages P3 et P4 subiraient une forte influence des forages de réinjection situés en amont.

Il pourrait être envisagé, selon les résultats qui seront obtenus à partir des forages de reconnaissance, des débits d'exploitation plus importants, en envisageant, si cela s'avérait nécessaire, de positionner les différents captages dans les différents niveaux aquifères 1, 2 et 3, afin de limiter les influences réciproques des doublets entre eux.

L'impact de l'exploitation géothermique serait très faible sur les forages du champ captant les SAGNES : de 1 à 7 cm au maximum sur leurs niveaux piézométriques, et de l'ordre de 0,2 °C sur les températures de la nappe au droit de ces forages.

11. Évaluation d'une solution alternative : champ de sondes verticales géothermiques assisté par pompe à chaleur

11.1. DÉFINITION D'UN CHAMP DE SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES

Ce chapitre présente les travaux de modélisations pour le dimensionnement, à un niveau avant-projet, d'un champ de sondes géothermiques verticales (SGV) pour la couverture des besoins en chaud et en froid des bâtiments de Nice Grand Arénas. Cette solution constitue une alternative possible à l'exploitation de l'aquifère de la nappe alluviale du Var par pompage. Les SGV sont des échangeurs en boucle fermée constitués de forages de 100 m à 200 m de profondeur (typiquement) dans lesquels sont disposés des tubes. Un liquide caloporteur (eau ou mélange d'eau et d'antigel) circule dans les tubes en échangeant de la chaleur avec le milieu (cf. Figure 52). La disposition des tubes la plus courante en France et en Europe est dite « double-U » : dans le forage sont disposées deux boucles en « U » alimentées en parallèle. Le forage est scellé par un coulis à haute conductivité thermique qui favorise l'échange de chaleur.



Figure 52 - Vue en coupe d'une sonde géothermique verticale (SGV) équipée d'un échangeur double-U (© BRGM).

Un champ de SGV (ou échangeur géothermique vertical) est un système en « boucle fermée » constitué de quelques dizaines à plusieurs centaines de SGV. Dans le cas d'échangeurs en boucle fermée, la température du fluide caloporteur évolue sur de très courtes durées en suivant l'évolution de la puissance prélevée en surface. Le dimensionnement d'un système de géothermie par pompe à chaleur (PAC) nécessite donc une modélisation dynamique couplée de la PAC et de l'échangeur géothermique avec un pas de temps court (typiquement l'heure) prenant en compte l'évolution des besoins en énergie thermique du bâtiment. Le recours à un modèle dynamique permet de calculer

l'évolution sur plusieurs années de la température du fluide caloporteur et du coefficient de performance de la PAC, et *in fine* les consommations électriques de la PAC.

11.2. MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTERMINATION DES TAUX DE COUVERTURE OPTIMAUX EN CHAUD ET EN FROID

Dans ses grandes lignes, la méthodologie suivie consiste à réaliser des simulations thermiques dynamiques (ou STD) afin d'établir la consommation électrique annuelle du compresseur de la pompe à chaleur et le coefficient de performance saisonnier de l'installation, hors consommations des circulateurs et auxiliaires. À partir de la puissance appelée chaque heure par le bâtiment, la STD permet de calculer l'évolution horaire :

- de la température du fluide caloporteur dans les sondes géothermiques verticales ;
- de la consommation électrique du compresseur de la pompe à chaleur.

La STD du champ de sondes repose sur :

- les besoins en chaud et froid du bâtiment, déterminés au pas de temps horaire ;
- les caractéristiques de la pompe à chaleur (courbes de performances en fonction des températures en sorties de condenseur et d'évaporateur);
- un modèle permettant de calculer l'évolution de la température dans les sondes géothermiques verticales et le milieu souterrain.

Pour un fonctionnement optimal de la PAC et ainsi une optimisation des coûts d'exploitation du champ de sondes, nous avons fixé deux critères de température extrême acceptable en sortie de PAC ainsi que du côté du champ de sondes géothermiques verticales. Ces critères sont :

- en mode chauffage du bâtiment : température minimale acceptable en sortie d'évaporateur de pompe à chaleur (PAC) : +3 °C. Cette condition autorise la circulation d'eau claire dans les SGV. L'eau claire est moins visqueuse que le mélange eau / monopropylène-glycol qui serait nécessaire à un fonctionnement à des températures inférieures à +3 °C, ce qui permet de limiter les pertes de charge, et donc les consommations électriques des circulateurs ;
- en mode climatisation du bâtiment : température maximale acceptable en sortie de condenseur de pompe à chaleur (PAC) : +35 °C. Cette condition vise à garder une performance acceptable de la pompe à chaleur en mode rafraichissement.

La superficie disponible pour l'implantation de sondes géothermiques verticales étant contrainte, nous avons commencé par identifier une parcelle libre de bâtiments pour implanter le champ de SGV. Nous avons ensuite fixé le nombre de sondes géothermiques verticales ainsi que leurs profondeurs, puis nous avons cherché à maximiser la quantité d'énergie annuelle produite par la PAC géothermique en faisant varier les taux de couvertures en chaud et en froid, tout en respectant les deux critères précédemment indiqués.

Les taux de couvertures en chaud et en froid maximaux sont déterminés par une procédure itérative : On réalise une première simulation dynamique dans laquelle 100 % des besoins en chaud et en froid sont couverts. Si pendant une heure de la simulation la température de sortie du champ de sondes dépasse les critères énoncés, la simulation dynamique stoppe et les critères d'arrêt sont examinés. S'il s'avère que la simulation s'est arrêtée car la température en entrée de champ de sonde est inférieure à la température minimale acceptable en sortie d'évaporateur de pompe à chaleur, alors on tente une nouvelle simulation s'est arrêtée car la température de couverture en chauffage (de 3 %). *A contrario*, s'il s'avère que la simulation s'est arrêtée car la température maximale acceptable en sortie de champ de sonde est supérieure à la température maximale acceptable en sortie de condenseur de pompe à chaleur, alors on tente une nouvelle simulation s'est arrêtée car la température maximale acceptable en sortie de condenseur de pompe à chaleur, alors on tente une nouvelle simulation s'est arrêtée car la température maximale acceptable en sortie de condenseur de pompe à chaleur, alors on tente une nouvelle simulation en réduisant le taux de couverture en rafraichissement (de 3 %). Les taux de couvertures

maximaux en chauffage et en rafraichissement retenus seront ceux correspondant à la première simulation qui permettra d'atteindre une durée de modélisation de 7 ans sans violer une des contraintes.

11.3. CONSTRUCTION DU MODÈLE DYNAMIQUE DU CHAMP DE SONDES ASSISTÉ PAR POMPE A CHALEUR

11.3.1. Étude comparée des besoins énergétiques des 5 macro-îlots et sélection du macro-îlot 2

Les besoins énergétiques nets en chaud (comprenant chauffage et en eau chaude sanitaire (ECS)) et en rafraîchissement des 5 macro-îlots de Nice Grand Arénas ont été calculés par la Société EGIS Conseil. Nous avons retenu, pour étudier une solution champ des sondes géothermique verticales, le macro-îlot n° 2 car celui-ci présente des particularités qui le rendent plus favorable à l'usage de solutions géothermiques (cf. Tableau 26).

Sur le plan thermique, le macro-îlot n° 2 offre les avantages suivants :

- 1) le plus petit écart entre la consommation annuelle en chaud et celle de froid parmi les 5 micro-ilots,
- 2) des temps de fonctionnement équivalent en chaud plus élevés⁴.

	Consommati	on annuelle	Puiss	ance	Temps é	quivalent	
	Chaud	Froid Chaud		Froid	Temps équivalent Chaud	Temps équivalent Froid	Rapport Consommation de froid / Consommation de chaud
	MWh	MWh	kW	kW	h	h	
Macro-ilot 1	1817	5894	2143	8469	848	696	3.24
Macro-ilot 2	2858	3004	2473	5265	1155	571	1.05
Macro-ilot 3	1420	3445	2861	5504	496	626	2.43
Macro-ilot 4	2012	4832	14426	7363	139	656	2.40
Macro-ilot 5	4717	6537	5378	10905	877	599	1.39
Total	12823	23711	17389	37505	737	632	1.85

Tableau 26 - Principales caractéristiques énergétiques des 5 macro-îlots (données EGIS Conseil).

Le champ de sondes pourrait être installé dans deux zones disjointes. Le première zone, d'une superficie de 3 345 m², est située sous l'îlot 2.2 tandis que la seconde, d'une superficie de 8 772 m², est située sous l'îlot 2.4 et l'espace non-bati attenant au nord. La surface totale disponible est de 12 117 m², ce qui permettrait d'accueillir jusqu'à 300 sondes espacés de 7,5 m. On présente sur la Figure 53 la parcelle et l'emplacement possible du champ de sondes modélisé.

⁴ Pour un usage donné (chauffage ou rafraichissement), le temps de fonctionnement équivalent est le rapport entre la consommation annuelle (kWh) et la puissance appelée (kW). Un temps de fonctionnement équivalent élevé signifie une utilisation plus longue et plus courante du système PAC + champ de SGV.



Figure 53 - Fond topographique du projet Nice Grand Arénas à proximité de l'îlot n° 2. La limite de la zone d'étude des SGV est représentée par un trait continu mauve.

Les puissances appelées en rafraîchissement et en chaud par l'îlot n° 2 sont représentées en Figure 54. La puissance nette, ou utile, maximale appelée en rafraîchissement est égale à 5 265 kW ; la puissance crête appelée en chaud est égale à 2 473 kW. Les besoins en froid sont 2,1 fois supérieurs à ceux en chaud. En mode chauffage, la puissance prélevée au terrain (puissance frigorifique) est égale à la puissance appelée par le bâtiment (puissance calorifique) moins la puissance électrique consommée par le compresseur. En revanche, en mode froid, la puissance injectée au terrain (puissance calorifique) est égale à la puissance appelée par le bâtiment (puissance frigorifique) à laquelle s'ajoute la puissance électrique consommée par le compresseur. Par conséquent, la puissance échangée par mètre de SGV sera bien plus importante en mode froid du bâtiment qu'en mode chauffage. À ce stade de l'étude, on peut déjà pressentir que la fourniture de froid sera le facteur limitant du dimensionnement.



Figure 54 - Évolution sur 1 an de la puissance thermique appelée par l'îlot n° 2. Les besoins nets de chaud sont comptés en positif, ceux de froid sont comptés en négatif (données EGIS Conseil).

À la différence de la consommation en chaud, la consommation en froid varie de manière quasi-linéaire avec la puissance installée (cf. Figure 55). La puissance appelée en froid est une grande partie du temps une puissance de pointe, comme on peut le constater sur la courbe monotone (cf. Figure 56). Par conséquent, on ne peut recourir à un appoint pour couvrir uniquement les pointes de froid. Nous avons par ailleurs vérifié que les données fournies par EGIS Conseil ne comportent pas simultanément d'appel de chaud et d'appel de froid.



Figure 55 - Consommation énergétique couverte en fonction de la puissance en chaud (à gauche) et en froid (à droite) du macro-îlot n° 2.



Figure 56 - Courbe monotone en chaud et en froid de l'îlot n° 2 (données EGIS Conseil).

11.3.2. Pompe à chaleur (PAC), performances et températures de condensation et d'évaporation

La prise en compte de l'évolution du COP au cours de l'exploitation permet de calculer la consommation électrique du compresseur de la PAC.

On considère que les sondes géothermiques verticales sont raccordées à une pompe à chaleur dont les caractéristiques, en particulier le COP, sont celles d'une PAC de la gamme DYNACIAT série LG-LGP commercialisée par CIAT. Les puissances calorifiques des PAC de cette gamme sont comprises entre 250 kW et 820 kW. Ces puissances sont inférieures aux puissances calorifiques appelées par le bâtiment en fourniture de chaud (2 473 kW) ou de froid. Il serait donc nécessaire de combiner plusieurs de ces PAC pour couvrir le besoin.

La Figure 57 présente le COP du modèle 700 V en fonction des températures de source froide et chaude. Sur cette figure, on a aussi représenté le fonctionnement en « usage direct » de la PAC. L'usage direct correspond au cas où la température en sortie d'évaporateur est supérieure à la température en sortie de condenseur. Le compresseur de la PAC ne fonctionne pas (et ne consomme donc pas d'électricité) et la PAC est « bypassée ». Le coefficient de performance de la PAC tend vers l'infini (ici on l'a pris égal à 30). En fourniture de froid pour le bâtiment, le fonctionnement en usage direct est aussi connu sous le nom de « free-cooling » ou « geo-cooling ».



Figure 57 – Carte d'iso-valeurs de COP de la pompe à chaleur 700V de la gamme DYNACIAT série LG-LGP en fonction des températures de sortie d'eau de condenseur et d'évaporateur.

Les données complémentaires fournies par EGIS Conseil nous ont permis d'estimer :

- les températures de départ dans le circuit de chauffage du bâtiment, c'est-à-dire la température de sortie de condenseur en mode production de chaud (chauffage + ECS) ;
- les températures de départ dans le circuit de raffraîchissement du bâtiment, c'est-à-dire la température de sortie d'évaporateur en mode raffraîchissement du bâtiment.

Les besoins en chaud sont de deux natures :

- chauffage : température de condensation : 35 °C ;
- eau Chaude Sanitaire (ECS) : température de condensation : 55 °C.

Les besoins en chauffage et en ECS sont respectivement de 1 206 MWh et 1 652 MWh (cf. Tableau 27). En mode de production de chauffage et d'ECS, la température de condensation est estimée à la température moyenne de condensation pour le chauffage et la production d'ECS, soit 45 °C.

Demande chaleur totale îlot 2	Demande ECS îlot 2	Demande chauffage îlot 2	Demande froid total îlot 2	Demande froid logements îlot 2	Demande froid autres bâtiments îlot 3
MWh	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
2 858	1 206	1 652	3 004	1 315	1 689

Tableau 27 - Répartition des besoins en chaleur de l'îlot n° 2 entre chauffage et ECS et entre répartition des besoins en froid de l'îlot n° 2 entre logement et bâtiments tertiaires (données EGIS Conseil).

La demande de froid, quant à elle, se répartit entre des logements (1 315 MWh) et des bureaux et locaux commerciaux (1 689 MWh). La température de départ dans les émetteurs de froid est prise égale à 12 °C, que ce soit pour les logements ou les bureaux commerciaux. D'après les informations fournies par EGIS Conseil, il est possible de refroidir les logements avec une température de départ de 17 °C, ce qui permettrait d'augmenter les performances de la PAC, voire de fonctionner en geo-cooling.

Les Figure 58 et Figure 59 représentent le fonctionnement de la PAC géothermique respectivement en mode production de chaud et en mode production de froid. Les températures de départ du circuit de chauffage du bâtiment ainsi que les températures extrêmes acceptables en entrée du champ de sondes sont aussi indiquées.



Figure 58 - Fonctionnement de la pompe à chaleur géothermique pour la production de chaud (chauffage + ECS).



Figure 59 - Fonctionnement de la pompe à chaleur géothermique pour la production de froid.

11.3.3. Propriétés thermophysiques des terrains traversés

Les propriétés thermophysiques (conductivité thermique et capacité calorifique volumique) des terrains traversés sont estimées à partir du calcul de l'épaisseur des cinq formations superficielles (aquifère superficiel, argiles, aquifère intermédiaire, argiles, aquifère profond) moyennée sur la superficie de la zone d'étude (cf.Tableau 28). Au-delà de la base de la

formation aquifère profond (mur de l'aquifère) (85,2 m), on considère que les poudingues se prolongent indéfiniment.

Niveaux géologiques traversés	Epaisseur (m)	Profondeur du mur (m)	Vitesse de Darcy (m/an)	Sens d'écoulement	Conductivité thermique Estimation basse (W.K-1.m-1)	Conductivité thermique Estimation haute (W.K-1.m-1)	Conductivité thermique Estimation moyenne (W.K-1.m-1)	Capacité calorifique volumique Estimation moyenne (J.K-1.m-3)
Aquifère superficiel	16,0	16,0	80,73	Sud-Est	1,5	2,5	2,00	2,20 x 10 ⁶
Argiles	12,5	28,5	0,02	Est-Sud-Est	1,0	1,5	1,25	2,20 x 106
Aquifère intermédiaire	15,6	44,1	83,26	Est-Sud-Est	1,5	2,5	2,00	2,20 x 106
Argiles	8,6	52,7	0,01	Est-Sud-Est	1,0	1,5	1,25	2,20 x 106
Aquifère profond	22,5	75,2	85,78	Est-Sud-Est	1,5	2,5	2,00	2,20 x 106
Poudingue	300,0	300,0	0,88	Sud-Est	1,5	2,5	2,00	2,20 x 106

Tableau 28 - Caractéristiques des terrains traversés, moyennées sur la superficie de la zone d'étude des SGV.

Globalement, le sens d'écoulement dans les aquifères est orienté vers l'est-sud-est ou le sud-est. Nous avons retenu un angle entre l'axe ouest-est et la direction de l'écoulement de - 30°.

En l'absence de données sur les propriétés thermophysiques des terrains traversées, nous avons estimé la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique des terrains en nous basant en partie sur les valeurs disponibles dans la norme suisse pour les sondes géothermiques verticales SIA-384/6 (SIA, 2010). Le Tableau 28 donne une estimation basse et haute de la conductivité thermique de chaque terrain traversé, ainsi qu'une valeur moyenne. Sauf mention contraire, les calculs présentés dans le rapport sont calculés en se basant sur l'estimation moyenne de conductivité thermique. La température moyenne à la surface est estimée à 14 °C et le flux géothermique à 0,06 W.m⁻².

La réalisation d'un test de réponse thermique (TRT) permettrait de déterminer *in situ* les propriétés thermiques moyennes (conductivité thermique et température) des terrains traversés.

11.3.4. Choix des configurations de champs de sondes

Dix configurations ou « cas » de champs de sondes ont été étudiés (cf. Tableau 29 - configuration des dix champs de sondes étudiés). Chacun de ces cas se caractérise par :

- un pas de la grille (i.e. un espacement entre les deux sondes voisines immédiates alignées dans un même rangée) : 6,5 m ou 7,5 m ;
- un nombre total de sondes : 100, 200 ou 300 ;
- une profondeur des échangeurs : 100 m ou 200 m ;
- une estimation de la conductivité thermique des terrains : basse, haute ou moyenne ;
- au final la longueur totale de forage prend 4 valeurs : 20 km, 30 km, 40 km, 60 km. Les cas 1 à 8 correspondent à différents plans d'implantation, longueur et espacement des sondes avec des propriétés thermiques du terrain qui sont identiques (basée sur la valeur moyenne

des estimations de la conductivité thermique des couches). Les cas 9 et 10 permettent d'estimer l'influence de la conductivité thermique sur le dimensionnement du champ de sondes, l'implantation, la longueur et l'espacement des sondes étant similaires au cas n° 3.

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pas Grille (m)	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	7.5
Nombre de SGV	200	100	200	200	100	200	300	300	200	200
Profondeur des SGV (m)	200	200	100	200	200	100	200	100	100	100
Estimation de la conductivité thermique des couches	moyen	haut	bas							
Conductivité thermique moyenne du milieu (W.K ⁻¹ .m ⁻¹)	1.921	1.921	1.842	1.921	1.921	1.842	1.921	1.842	2.289	1.394
Vitesse de Darcy (m.an ⁻¹)	23.16	23.16	45.43	23.16	23.16	45.43	23.16	45.43	45.43	45.43
Longueur totale de forage (m)	40000	20000	20000	40000	20000	20000	60000	30000	20000	20000
Température moyenne du milieu (°C)	17.12	17.12	15.63	17.12	17.12	15.63	17.12	15.63	15.31	16.15

Tableau 29 - Configuration des dix champs de sondes étudiés.

La disposition des sondes au sein des champs à 100, 200 et 300 SGV est représentée en Figure 60.

La conductivité thermique du milieu est obtenue en faisant une moyenne des conductivités thermiques de chaque couche, pondérée par leur épaisseur respective.

Les propriétés moyennes du milieu (conductivité thermique, vitesse de Darcy et capacité calorifique) sont calculées en moyennant sur la hauteur de la SGV les propriétés de chaque couche, pondérée par leur épaisseur respective. Pour les sondes de 200 m on obtient les valeurs suivantes :

- conductivité thermique : $\lambda_m = 1,92 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (à partir des estimations moyennes) ;
- vitesse de Darcy : $v_D = 23,2 \text{ m.a}^{-1}$;
- capacité calorifique : $(\rho C_p)_m = 2,20 \text{ MJ.K}^{-1}.\text{m}^{-3}.$

Toujours pour les sondes de 200 m, la température initiale du milieu est $T_0 = 17,1$ °C. Elle a été estimée en considérant une température de surface de 14,0 °C, ce qui est cohérent avec les modélisations d'exploitations directes des aquifère superficiels. La température du milieu augmente avec la profondeur de 3,1 °C / 100 m, c'est-à-dire du rapport entre flux géothermique (0,06 W.m⁻²) et conductivité thermique du milieu (1,92 W.K⁻¹.m⁻¹). Le modèle utilisé pour la description du champ de sondes considère une température initiale homogène sur toute la hauteur des sondes géothermiques verticales qui est égale à la température à mi-profondeur des sondes (i.e. 100 m), soit 14,0 + 3,1 = 17,1 °C.

Dans le cas de sondes de 100 m, les valeurs des propriétés moyennes du terrain sont estimées par la même méthode et sont consignées dans le Tableau 29.

La résistance thermique des forages notée R_f est prise égale à 0,07 K.m.W⁻¹. La réalisation d'un test de réponse thermique (TRT) permettrait de déterminer *in situ* la valeur de la résistance thermique réelle de l'échangeur.



Figure 60 - Disposition retenue des sondes géothermiques verticales (SGV) pour les cas à 100, 200 et 300 SGV. Croix : 1 SGV. Polygones rouges : limite de la zone d'étude. Flèche bleue : direction de l'écoulement.

Dans le modèle du champ de SGV, la puissance prélevée est répartie de manière homogène sur toutes les SGV. L'Annexe 7 donne une vue d'ensemble du modèle de simulation thermique dynamique du champ de sondes géothermiques verticales utilisé.

11.4. RÉSULTATS DES MODÉLISATIONS

La procédure itérative décrite en 11.2 a permis de déterminer les taux de couverture optimaux en chauffage et en froid pour chacun des 10 cas. On a introduit un ratio « d'énergie couverte par la PAC géothermique ramenée au mètre de forage » (exprimé en kWh.m⁻¹). Un ratio plus élevé correspond à une plus grande utilisation de la PAC géothermique. On commence par comparer l'influence de la géométrie du champ de sondes pour des estimations identiques de la conductivité thermique de chaque couche (cas 1 à 8). On observe les phénomènes suivants :

- (i) Le **coefficient de performance saisonnier** est compris entre 5,2 (cas 2) et 6,0 (cas 7).
- (ii) Le taux de couverture en puissance chaud est compris entre 32,4 % (cas 3 et 6 : a = 7,5 m ou 6,5 m, N = 200, H = 100 m) et 100 % (cas 1, 4 et 7), avec un taux de couverture énergie en chaud compris entre 83,4 % (cas 5) et 100 %.
- (iii) Le taux de couverture en puissance froid est compris entre 27,8 % (cas 2 : a = 7,5 m, N = 100, H = 200 m) et 76,0 % (cas 7 : a = 6,5 m, N = 300, H = 200 m), avec un taux de couverture en énergie en froid compris entre 40,6 % (cas 2) et 90,4 % (cas 7).
- (iv) L'énergie couverte par la PAC GTH ramenée au mètre de forage est comprise entre 88,3 kWh.m⁻¹ (cas 7 : a = 6,5 m, N = 300, H = 200 m) et 185,4 kWh.m⁻¹ (cas 3 et 6 : a = 7,5 m ou 6,5 m, N = 200, H = 100 m). Il est intéressant de remarquer que dans le cas 7, qui permet de couvrir 90 % de la consommation annuelle en froid du macro-ilot n° 2, la PAC GTH est peu exploitée, ce qui conduit aux ratios d'énergie couverte ramenée au mètre de forage les plus faibles.
- (v) Les cas 2 et 3 sont caractérisés par la même longueur totale de forage, mais avec des dispositions de sondes différentes : Le cas 2 est caractérisé par 100 SGV de 200 m ; le cas 3 par 200 SGV de 100 m. Dans le cas 3, l'énergie couverte par la PAC GTH ramenée au mètre de forage est plus importante (185,4 kWh.m⁻¹.an⁻¹) qu'avec le cas 2 (176,4 kWh.m⁻¹.an⁻¹). Deux explications peuvent être avancées : dans le cas 3, l'écoulement dans le terrain est plus rapide (en vitesse moyennée sur la hauteur des sondes) que dans le cas 2, du fait qu'une portion plus importante des sondes se trouvent dans les aquifères superficiels. De plus, dans le cas n° 3 la température initiale moyenne du terrain est plus faible que dans le cas n° 2, ce qui est plutôt favorable à la production de froid qui constitue le facteur limitant du dimensionnement.

Les cas 3, 9 et 10 peuvent être comparés pour estimer l'influence des propriétés thermiques du terrain. Le taux de couverture en puissance froid augmente avec la conductivité thermique du terrain. Il est de 26,2 % pour l'estimation basse de conductivité thermique (cas n° 10), de 30,5 % pour le cas n° 3 (estimation moyenne), de 33,5 % pour l'estimation haute. Les taux de couverture de la demande annuelle en froid correspondant sont respectivement de 38,4 %, 44,2 %, 48,0 %.

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pas Grille a (m)	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	7.5	7.5
Nombre de SGV N	200	100	200	200	100	200	300	300	200	200
Profondeur des SGV H (m)	200	200	100	200	200	100	200	100	100	100
Estimation de la conductivité thermique des couches	moy.	haut	bas							
Conductivité thermique moyenne du milieu (W.K-1.m-1)	1.921	1.921	1.842	1.921	1.921	1.842	1.921	1.842	2.289	1.394
Vitesse de Darcy (m.an-1)	23.16	23.16	45.43	23.16	23.16	45.43	23.16	45.43	45.43	45.43
Longueur totale de forage (m)	40000	20000	20000	40000	20000	20000	60000	30000	20000	20000
Température moyenne du milieu (°C)	17.12	17.12	15.63	17.12	17.12	15.63	17.12	15.63	15.31	16.15
Taux de couverture Puissance chaud (%)	100	29.57	32.4	100	26.99	32.4	100	69.38	36.6	27.82
Taux de couverture Puissance froid (%)	51.17	27.82	30.49	52.75	28.68	30.49	76.02	43.94	33.4	26.18
Puissance chaud crête (kW)	2473	731.4	801.4	2473	667.5	801.4	2473	1716	905.2	688.2
Puissance froid crête (kW)	-2694	-1465	-1605	-2777	-1510	-1605	-4003	-2313	-1759	-1378
Energie couverte en chaud (MWh)	2729	2360	2437	2729	2277	2437	2729	2723	2532	2305
Energie couverte en froid (MWh)	-1917	-1168	-1270	-1961	-1201	-1270	-2601	-1716	-1381	-1104
Taux de couverture en Energie chaud (%)	100	86.47	89.31	100	83.44	89.31	100	99.79	92.78	84.46
Taux de couverture en Energie froid (%)	66.67	40.62	44.16	68.2	41.77	44.16	90.43	59.68	48.02	38.41
Taux de couverture en Energie chaud et froid (%)	82.9	62.95	66.15	83.68	62.06	66.15	95.09	79.21	69.82	60.83
Energie couverte par la PAC GTH ramenée au mètre de forage (kWh.m ⁻¹)	116.2	176.4	185.4	117.3	173.9	185.4	88.83	148	195.6	170.5
Consommation électrique (MWh)	805.2	673.7	711.3	814	660.8	712.6	880.5	810.9	746.8	658.1
SPF	5.77	5.237	5.212	5.762	5.264	5.202	6.053	5.475	5.24	5.181

Tableau 30 - Configuration des dix champs de sondes étudiés et résultats des simulations thermiques dynamiques.
11.5. SOLUTION A 200 SONDES PROFONDES DE 200 M : RÉSULTATS DES SIMULATIONS THERMIQUES DYNAMIQUES.

Dans ce paragraphe on présente les résultats de la STD du cas n° 1, caractérisé par 200 SGV de 200 m. Dans cette configuration, la solution « pompe à chaleur sur champ de sondes géothermiques verticales » permet de couvrir :

- en mode chauffage : 100 % de la puissance crête demandée en chaud (2 473 kW), ce qui correspond à 100 % de la consommation annuelle en chaud (2 730 MWh) ;
- en mode rafraichissement : 51,2 % de la puissance crête demandée en froid (2 775 kW), ce qui correspond à 66,7 % de la consommation annuelle en froid (1 961 MWh).

La Figure 61 permet d'apprécier l'évolution de la puissance pouvant être couverte par la solution PAC sur champ de sondes pour les taux de couverture de 100 % de la puissance crête demandée en chaud et 51,2 % de la puissance crête demandée en froid.



Figure 61 – Cas n° 1 (200 sondes profondes de 200 m). Évolution sur la 1^{ère} année de la puissance couverte par la solution PAC sur champ de sondes, pour les taux de couverture optimaux pour le (100 % de la puissance crête demandée en chaud et 51,2 % de la puissance crête demandée en froid). La puissance positive correspond à une demande de chaud, tandis que la puissance négative correspond à une demande de froid.

Pour ces taux de couverture, les contraintes en termes de températures de fluide extrêmes acceptables sont respectées ; la température en entrée de champ de sondes est comprise

entre 3 °C et 35 °C (cf. Figure 62). La température maximale en entrée de champ de sondes est atteinte la première année et est égale à 34,95 °C.



Figure 62 - Cas n° 1 (200 sondes profondes de 200 m). Évolution sur 7 ans de la température du fluide en entrée et en sortie du Champ de Sondes Géothermiques Verticales pour les taux de couverture optimaux.

On observe que la dérive de la température de fluide sur les 7 années de fonctionnement est faible. Ceci s'explique par le fait que le bilan d'énergie sur le champ de sondes est presque équilibré : L'énergie annuelle extraite est de 2 191 MWh, tandis que l'énergie apportée est de 2 185 MWh, soit un déséquilibre de 44 MWh (2 %). La consommation électrique du compresseur de la PAC en mode production de chaud est égale à 538 MWh (2 729 MWh - 2 191 MWh) ; en mode production de froid elle est égale à 267 MWh (-1 961 MWh + 2 185 MWh).

Le coefficient de performance saisonnier (noté SPF pour « seasonnal performance factor ») est défini comme le rapport entre l'énergie valorisée (i.e. l'énergie consommée par le bâtiment qui peut être couverte par la PAC géothermique), ici 4690 MWh (2 730 MWh + 1961 MWh), et l'énergie électrique consommée par le compresseur de la PAC, ici 805 MWh (= 538 MWh + 267 MWh). Le coefficient de performance saisonnier (ou SPF pour « seasonnal performance factor ») est estimé à 5,8 (= 4690/805). Ce SPF n'inclut cependant pas les consommations électriques des auxiliaires (circulateurs du côté champ de sondes et émetteur de chaleur et de froid du côté du bâtiment), dont la prise en compte conduirait à une diminution du SPF de l'installation.

Les puissances échangées entre la pompe à chaleur et le fluide du champ de sondes sont plus importantes en mode production de froid (77,8 W.m forage⁻¹) qu'en mode production de chaud (47,6 W.m forage⁻¹) (cf. Figure 63).



Figure 63 - Cas n° 1 (200 sondes profondes de 200 m). Évolution sur 7 ans de la puissance échangée par mètre de forage pour les taux de couverture optimaux.

11.6. DONNÉES COMPLÉMENTAIRES NÉCESSAIRES POUR AFFINER LES MODÈLES

Les résultats des simulations thermiques dynamiques sont fortement dépendant des valeurs retenues pour les propriétés thermiques des terrains traversés et des courbes de besoin thermique des bâtiments.

Pour affiner les prédictions des modèles, deux actions sont nécessaires et prioritaires :

- réaliser un test de réponse thermique (TRT). L'interprétation du TRT permettrait d'estimer in situ la conductivité thermique moyenne du terrain et la résistance thermique des sondes géothermiques verticales. Ce test est l'équivalent des pompages d'essai réalisés sur les forages d'eau pour déterminer la transmissivité des aquifères ;
- affiner les estimations des besoins en énergie thermique des bâtiments. En particulier, on a vu que le besoin en froid est le facteur limitant de l'utilisation du champ de sondes géothermiques verticales. Si une estimation précise des besoins en froid venait à restreindre ceux-ci, le taux de couverture de besoins en froid par la PAC géothermique s'en verrait augmenter.

Une amélioration des performances d'un tel champ des sondes pourrait être obtenue en complétant l'étude par :

- une modélisation du champ de sondes géothermiques vertical incluant une gestion par zones différenciées du champ, afin d'optimiser la quantité d'énergie extraite de chaque zone;
- une optimisation de la géométrie des échangeurs géothermiques.

11.7. CONCLUSION SUR L'USAGE D'UN CHAMP DE SONDES VERTICALES GÉOTHERMIQUES ASSISTÉ PAR POMPE A CHALEUR

Un modèle dynamique de pompe à chaleur sur champ de sondes géothermiques verticales a été utilisé pour déterminer des taux de couvertures optimaux des besoins en chaud et en froid du macro-îlot n° 2. Plusieurs longueurs totales de forages ont été envisagées : 20 km, 40 km, 60 km. Des contraintes de température de fluide minimale et maximale ont été imposées en entrée de champ de sondes de +3 °C et +35 °C. Ces contraintes ont été fixées afin de limiter la dégradation des performances de la PAC aux températures extrêmes en entrée de champ de sondes. La production de froid constitue le facteur limitant de la production d'énergie thermique par le champ de sondes. L'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid) ramenée au mètre de forage diminue avec la longueur totale de forage :

- pour une longueur de forage de 20 km, une configuration à 200 sondes de 100 m est plus efficace qu'une configuration à 100 sondes de 200 m. Pour la configuration à 200 sondes de 100 m, l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 185 kWh.m⁻¹. 30,4 % de la puissance crête en froid du macro-îlot n° 2 peut être couverte (soit 1 605 kW), ce qui correspond à une couverture de 44,1 % des besoins annuels de froid (soit 1 270 MWh). 29,6 % de la puissance crête en chaud du macro-ilot n° 2 peut être couverte (soit 731 kW), ce qui correspond à 89,3 % de la demande annuelle en chaud (soit 2 437 MWh). Le coefficient de performance saisonnier de la PAC géothermique est estimé à 5,2 hors fonctionnement des auxiliaires (circulateurs et régulations) ;
- pour une longueur de forage de 40 km, l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 116 kWh.m⁻¹. 51,7 % de la puissance crête en froid du macro-îlot n° 2 peut être couverte (soit 2 694 kW), ce qui correspond à une couverture de 44,1 % des besoins annuels de froid (soit 1 917 MWh). Le coefficient de performance saisonnier de la PAC géothermique est estimé à 5,8 hors fonctionnement des auxiliaires (circulateurs et régulations). La totalité de la demande en chaud peut être couverte ;
- pour une longueur de forage de 60 km, l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 89 kWh.m⁻¹. 76,0 % de la puissance crête en froid peut être couverte (soit 4 003 kW), ce qui correspond à une couverture de 90,4 % des besoins annuels de froid (soit 2 601 MWh). Le coefficient de performance saisonnier de la PAC géothermique est estimé à 6,1 hors fonctionnement des auxiliaires (circulateurs et régulations). La totalité de la demande en chaud peut être couverte.

Toutes choses étant égales par ailleurs, la quantité d'énergie couverte par la PAC GTH ramenée au mètre de forage est d'autant plus élevé que la conductivité thermique des terrains traversés est élevée. Pour une configuration à 20 km de forage (200 sondes de 100 m de profondeur), la quantité d'énergie couverte par la PAC GTH ramenée au mètre de forage est respectivement de 171 kWh.m⁻¹, 176 kWh.m⁻¹, 196 kWh.m⁻¹ pour des estimations basses, moyennes et hautes de la conductivité thermiques des niveaux géologiques traversés. Par conséquent, il serait nécessaire de réaliser un test de réponse thermique afin d'estimer *in situ* la valeur de la conductivité thermique moyenne du terrain.

12. Évaluation du coût des ouvrages à réaliser pour les solutions étudiées

12.1. ÉVALUATION DU COUT DES OUVRAGES POUR UNE GÉOTHERMIE SUR NAPPE

Au niveau avant-projet, il est envisagé la réalisation de 5 doublets, soit 10 forages à différentes profondeurs pour un débit compris entre 120 à 230 m³/h selon les doublets.

L'évaluation des coûts des ouvrages nécessaires pour couvrir les besoins énergétiques est basée sur les références d'AQUAPAC qui est un système de garantie financière de la ressource et de la pérennité des opérations de géothermie de moins de 100 m de profondeur et d'une puissance thermique supérieure à 30 kW. Plus de 300 dossiers de géothermie ont été examinés par le Comité AQUAPAC depuis 1985.

Les coûts indiqués comprennent, pour chaque forage, les coûts de foration, d'équipements du forage (tubage, crépine, etc.), des essais hydrauliques (pompage d'essai), des analyses d'eau et de maîtrise d'œuvre des travaux. Le diamètre de ces forages permettra d'avoir un débit d'exploitation compris entre 120 à 230 m³/h.

Aquifère	Profondeur (m)	Coût (HT)
Superficiel	20	80 000
Intermédiaire	50	110 000
Profond	80	140 000

Tableau 31 - Estimation du coût d'un forage d'eau en fonction de la profondeur.

Pour les 10 forages cela représenterait un coût total estimé à 800 000, 1 100 000 et 1 400 000 € HT selon l'aquifère visé.

12.2. ÉVALUATION DU COUT DES OUVRAGES POUR UNE GÉOTHERMIE SUR SONDES GÉOTHERMIQUES VERTICALES

Il existe une réalisation récente qui est le champ de sondes géothermiques réalisé dans le cadre du programme d'aménagement « Blagnac Campus Urbanisation » pour le nouveau siège d'AIRBUS GROUP à Toulouse, et qui peut servir de référence pour l'évaluation du coût d'un projet de champ de sondes sur le site du GRAND ARENAS.

Le programme de travaux « Blagnac Campus Urbanisation » comprend trois bâtiments d'une surface utile cumulée annoncée à 33 580 m².

Ce projet prévoit le forage et l'exploitation d'un champ de sondes géothermiques dont les caractéristiques sont :

- 140 forages de 152 mm de diamètre et de 205 m de profondeur ;
- des pompes à chaleur présentant :
 - une puissance calorifique (thermique) cumulée de 1 845 kW,
 - une puissance calorifique (eau chaude sanitaires) cumulée de 128 kW,
 - une puissance frigorifique (climatisation) cumulée de 1 078 kW.
- une sous station par bâtiment ;
- un réseau collecteur / distributeur de calories.

Le coût de ces travaux est indiqué dans le Tableau 32. La réalisation du champ de 140 sondes géothermiques de 205 m de profondeur représente à lui seul un montant de 2 439 000 €.

Détail des coûts	Total des dépenses pour l'opération	
PAC géothermie + ballons tampons	700 000	
Groupe froid	340 000	
Forages SGV	2 439 000	
Ingénierie	310 000	
Sous Total FC	3 789 000	
Nouvelle Technologie Emergente		
Boucle d'eau	528 000	
Monitoring	30 000	
Sous total NTE	558 000	
TOTAL GÉNÉRAL en € HT	4 347 000	

Tableau 32 - Coût des travaux liés (source des données ADEME Midi-Pyrénées).

Pour une telle opération, le choix de l'entreprise et les coûts de réalisation dépendent de la géologie, surtout pour des profondeurs de 200 m. Au-delà de cette profondeur, aucune entreprise en France ne peut se lancer seule sur un chantier de ce type à cause du nombre de machines à faire tourner simultanément. Pour une telle opération, il faudrait imaginer un consortium à l'identique de ce qui s'est fait pour le chantier AIRBUS à Toulouse.

Sur la base des données du chantier du nouveau siège d'AIRBUS GROUP à Toulouse, le Tableau 33 donne l'estimation d'un champ de sondes, pour plusieurs hypothèses de nombre de sondes et de profondeurs.

Hypothèses	Linéaire (m)	Coût (HT)
100 SGV de 100 m	10 000	860 000
100 SGV de 200 m	20 000	1 720 000
200 SGV de 100 m	20 000	1 720 000
200 SGV de 200 m	40 000	3 440 000
300 SGV de 200 m	60 000	5 160 000

Tableau 33 - Coût d'un champ de SGV, selon différentes hypothèses.

13. Rappel sur la législation en matière de géothermie

Les gîtes géothermiques sont définis comme étant des « gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent » (Article L112-1 du Code minier). L'exclusivité du droit d'effectuer la recherche puis l'exploitation de ces gîtes dans un périmètre défini nécessitent donc des autorisations délivrées par l'État dans le cadre du Code minier et de ses décrets d'application.

13.1. LE CODE MINIER

Les procédures relatives à l'octroi des droits de recherches et d'exploitation des gîtes géothermiques (ou « titres miniers ») et à leur gestion sont décrits dans les décrets n° 78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie précise et n° 2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain.

Le Code minier distingue :

- les gîtes géothermiques à haute température (plus de 150 °C) ;
- les gîtes géothermiques à basse température (moins de 150 °C).

Au sein de la catégorie « géothermie à basse température », les activités de géothermie de minime importance ne relèvent pas du régime légal des mines mais d'une procédure de déclaration simplifiée.

Le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 modifie les décrets n° 78-498 du 28 mars 1978 et n° 2006-649 du 2 juin 2006 ainsi que l'annexe des articles R. 122-2 et R. 414-27 du Code de l'environnement. Celui-ci sera mis en application au 1^{er} juillet 2015.

Les principales modifications apportées par le décret n°2015-15, et qui concernent les activités recourant à un échangeur géothermique ouvert (géothermie sur nappe), sont les suivantes :

- a) La température de l'eau prélevée en sortie des ouvrages est inférieure à 25 °C ;
- b) La profondeur du forage est inférieure à 200 mètres ;
- c) La puissance thermique maximale prélevée du sous-sol et utilisée pour l'ensemble de l'installation est inférieure à 500 kW ;
- d) Les eaux prélevées sont réinjectées dans le même aquifère et la différence entre les volumes d'eaux prélevées et réinjectées sont nulles ;
- e) Les débits prélevés ou réinjectés sont inférieurs au seuil d'autorisation fixés à la rubrique 5.1.1.0 de l'article R. 214-1 du Code de l'environnement.

Ces activités ne relèvent pas de la minime importance lorsqu'elles sont situées dans des zones rouges, où les activités géothermiques présentent des dangers ou inconvénients graves, définies à l'article 22-6 du décret n° 2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux

miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains (cf. Figure 64).



Figure 64 - Extrait de la carte carte réglementaire géothermie de minime importance pour échangeurs ouverts, carte en cours de concertation-consultation au 25/02/2015, non mise en application.

La maille orange dans la zone du Grand Arénas provient d'une source pollution répertoriée dans BASOL. Dans le cadre d'une géothermie de minime importance, pour une opération de géothermie avec une simple déclaration dans cette maille, il serait nécessaire de faire intervenir un expert pour obtenir une attestation de conformité.

13.2. LE CODE DE L'ENVIRONNEMENT

Les prélèvements en eau et réinjection sont soumis à **autorisation** ou à **déclaration** selon différents seuils qui sont précisés par la loi sur l'eau, codifiée dans l'article R 214-1 du Code de l'environnement, rappelés ci-après :

1.1.2.0 - Prélèvements permanents ou temporaires issus d'un forage, puits ou ouvrage souterrain dans un système aquifère, à l'exclusion de nappes d'accompagnement de cours d'eau, par pompage, drainage, dérivation ou tout autre procédé, le volume total prélevé étant :

1° supérieur ou égal à 200 000 m³/anAutorisation

2° supérieur à 10 000 m³/an mais inférieur à 200 000 m³/an.....**Déclaration**

1.2.1.0 - À l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L.214-9 du Code de l'environnement, prélèvements et installations et ouvrages permettant le prélèvement, y compris par dérivation, dans un cours d'eau, dans sa nappe d'accompagnement ou dans un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe :

1° d'une capacité totale maximale supérieure à 1 000 m³/h ou à 5 % du débit du cours d'eau ou, à défaut, du débit global d'alimentation du canal ou du plan d'eau......**Autorisation** 2° d'une capacité totale maximale comprise entre 400 et 1 000 m³/h ou entre 2 et 5 % du débit du cours d'eau ou, à défaut, du débit global d'alimentation du plan d'eau......**Déclaration**

1.2.2.0- À l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L214-9 du Code de l'environnement, prélèvements et installations et ouvrages permettant le prélèvement, y compris par dérivation, dans un cours d'eau, sa nappe d'accompagnement ou un plan d'eau ou canal alimenté par ce cours d'eau ou cette nappe, lorsque le débit du cours d'eau en période d'étiage résulte, pour plus de moitié, d'une réalimentation artificielle......**Autorisation**

1.3.1.0 - À l'exception des prélèvements faisant l'objet d'une convention avec l'attributaire du débit affecté prévu par l'article L214-9 du Code de l'environnement, ouvrages, installations, travaux permettant un prélèvement total d'eau dans une zone où des mesures permanentes de répartitions quantitatives instituées, notamment au titre de l'article L.211-2 du Code de l'environnement, ont prévu l'abaissement des seuils :

1° Supérieure ou égale à 8 m³/h.....Autorisation

2° Dans les autres cas.....**Déclaration**

5.1.1.0 - Réinjection dans une même nappe des eaux prélevées pour la géothermie, l'exhaure des mines et carrières ou lors des travaux de génie civil, la capacité totale de réinjection étant :

1° Supérieure à 80 m³/h.....Autorisation

2° Supérieure à 8 m³/h, mais inférieure à 80m³/h.....**Déclaration**

13.3. RÉGLEMENTATION APPLIQUÉE AU PROJET DU GRAND ARÉNAS EN MATIÈRE D'EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

Seule la partie « chauffage » du projet géothermique du Grand Arénas relève du droit minier. La partie « rafraîchissement » du projet relève du Code de l'environnement.

Rappel des débits et des puissances en jeux du projet géothermique du Grand Arénas.

- en matière de chauffage (Code minier) :

- débits prélevés et réinjectés en nappe : environ 400 m³/h,
- puissances prélevées en nappe : environ 4,5 mW.
- en matière de rafraîchissement (Code de l'environnement) :
 - débits prélevés et réinjectés en nappe : environ de 800 m³/h sur une période de 3 mois, soit un volume d'envion 1,7 Mm³/an.

Dans les deux cas, ce projet est soumis à autorisation au titre du Code minier pour la partie chauffage et à autorisation au titre du Code de l'environnement pour la partie rafraichissement.

Pour la partie chauffage, le régime d'autorisation du Code minier prévoit l'obtention préalable d'un permis de recherches et d'une autorisation d'ouverture de travaux miniers (AOTM), puis l'obtention d'un permis d'exploitation. La demande de permis de recherches doit préciser en particulier les caractéristiques principales du projet, l'étendue et les limites de la zone de recherches ou l'implantation géographique des puits de recherches.

13.4. RÈGLEMENT DU SAGE DE LA NAPPE ET DE LA BASSE VALLÉE DU VAR

Le SAGE de la Nappe et Basse Vallée du Var édicte des règles particulières d'utilisation de la ressource en eau dans le secteur aval de la nappe du Var (voir Figure 65).





Figure 65 - Secteur aval de la nappe du Var (copie carte n° 2).

L'Article 2 : (Réservation de la nappe alluviale profonde pour l'usage eau potable) précise que « Tout sondage, forage, puits ou ouvrage souterrain exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire eau permanent dans les eaux souterraines, situé sur le périmètre de l'espace nappe (carte n° 1), ne pourra être autorisée au titre du 1.1.1.0 de l'article R214-1, au-delà d'une profondeur de :

- 30 mètres sous le terrain naturel sur le secteur aval de la nappe compris entre la mer et le prolongement de la digue des Français tel que défini sur la carte n° 2 ;
- 50 mètres sous le terrain naturel dans le secteur amont de la nappe compris entre le prolongement de la digue des Français et les zones de confluence avec l'Estéron et la Vésubie.

Une dérogation à cette limite est prévue, si la nécessité technique est dûment justifiée, pour les ouvrages destinés aux prélèvements publics pour l'alimentation en eau potable, à l'amélioration des connaissances, à la surveillance des eaux, et à la géothermie dans les conditions prévues à l'article 4 ».

L'Article 3 (Protection de la nappe alluviale contre l'intrusion du biseau salé) indique que « ... les nouveaux prélèvements permanents ... sont interdits dans le secteur aval de la nappe (carte n° 2), à l'exception des usages suivants :

- les prélèvements destinés à la production d'énergie géothermique dans la mesure où les conditions prévues à l'article 4 sont respectées ».

L'Article 4 (Utilisation des eaux souterraines pour la protection d'énergie géothermique) indique que « les prélèvements destinés à la production d'énergie géothermique ne peuvent être autorisés que s'ils n'impactent pas les usages et prélèvements des eaux souterraines existants. Les prélèvements destinés à la production d'énergie géothermiques doivent systématiquement prévoir une réinjection des eaux prélevées dans le même aquifère. » Il est précisé dans cet Article 4 en particulier que l'exploitation de la nappe pour un usage géothermique ne doit pas modifier les caractéristiques des écoulements.

Moyennant des contraintes liées à l'exploitation des installations et au suivi des ouvrages, une dérogation à la limite maximale de forage instaurée par l'article 2 peut être autorisée.

13.5. RÉGLEMENTATION DANS LE PÉRIMÈTRE DE PROTECTION DES CAPTAGES DES SAGNES

Les périmètres de protection des captages des Sagnes ont été définis par l'Arrêté préfectoral 2001-501 en date du 1^{er} juillet 2011.

Le périmètre de protection rapprochée du champ captant des Sagnes est composé d'un périmètre de protection rapprochée proximale (PPR1) et d'un périmètre de protection rapprochée distale (PPR2). Il est précisé dans cet arrêté que « les forages destinés à l'hydro géothermie par aspiration et rejet dans la nappe sont interdits ». On présente sur la Figure 66 l'emprise des 2 périmètres de protection immédiate : PPR1 et PPR2, ainsi que leur chevauchement sur le périmètre de la ZAC du Grand Arénas. Le macro-îlot 1 est situé dans l'emprise du périmètre PPR2. La Figure 67 montre la localisation prévisionnelle des 5 doublets géothermiques. On a provisoirement placé les forages du doublet 1 à la limite de ce périmètre de protection, entre les limites du PPR2 et de la voie rapide M6202. Il sera nécessaire de bien positionner ce doublet à l'extérieur du périmètre de protection du champ captant des Sagnes.



Figure 66 - Emprise des 2 périmètres de protection immédiate : PPR1 et PPR2. Chevauchement avec la ZAC du Grand Arénas.



Figure 67 - Localisation prévisionnelle des 5 doublets et emprise du périmètre de protection immédiate PPR1 (PPR2 est non représenté).

14. Conclusions

L'opération Grand Arénas couvre une superficie d'environ 49 ha. La suface totale de plancher des bâtiments prévus représente une superficie de 748 000 m² qui se répartissent en Logements, Bureaux, Commerces, Service-Hôtel, Locaux activité et Équipement. Les Bureaux représentent plus de la moitié de la superficie de plancher, viennent ensuite les Logements avec 20 % de la superficie totale. Le reste, Commerces, Service-Hôtel, Locaux activité et Équipement représentent un peu moins de 30 % de la superficie totale. Les besoins énergétiques de ces bâtiments représentent une puisance de pointe en chauffage de 17,4 MW, et une puissance de pointe en FROID égale à 37,5 MW.

Du point de vue géologique, l'étude montre la complexité de la géologie de la nappe des alluvions du Var à proximité du site du Grand Arénas. En aval de la basse vallée du Var, les couches superficielles à faciès sableux et graveleux disparaissent au profit de deux couches à faciès argileux dominant. Celles-ci séparent les alluvions du Var en 3 niveaux aquifères. On distingue ainsi un aquifère superficiel, un aquifère intermédiaire et un aquifère profond. Les formations argileuses forment, à l'aplomb des remblais de l'aéroport, une puissante barrière imperméable d'environ 50 à 70 m d'épaisseur qui empêchent tout accès des niveaux aquifères superficiels à la mer dans la direction nord-sud. L'ensemble multicouche, formations aquifères et formations imperméables, représente une épaisseur totale de 80 m qui repose sur un substratum constitué des poudingues pliocènes, eux-mêmes aquifères mais beaucoup moins perméables que les alluvions sus-jacents.

Les écoulements dans les formations aquifères ont été réalisés à l'aide de l'outil de calcul MARTHE. Le modèle hydrodynamique s'est appuyé d'une part sur une géométrie des formations géologiques définies par GeoModeller, d'autre part sur l'ensemble des données existantes et qui constituent les données du modèle, à savoir la piézométrie observée de la nappe, les perméabilités mesurées des formations aquifères, les caractéristiques du fleuve Var, les débits de prélèvement et de réinjection dans les forages en exploitation. Une fois calé en régime permanent, ce modèle hydrodynamique a permis l'étude, par simulation, de l'exploitation de la nappe des alluvions à partir de doublets géothermiques.

Le bilan des débits de la nappe, calculé par le modèle MARTHE, montre que les débits d'exploitation de la nappe, pour un usage géothermique, peuvent atteindre 800 m³/h. Ce débit pourrait être réparti sur 5 doublets répartis sur le site du Grand Arénas. Les simulations réalisées supposent l'exploitation d'un seul des 3 niveaux aquifères à chaque fois. Il n'a pas été envisagé une exploitation simultanée des 3 aquifères.

La modélisation hydrodynamique montre que les alluvions peuvent être exploitées pour un usage géothermique assisté par pompe à chaleur.

La puissance maximale de pointe en chauffage correspond à un pic d'hiver de quelques heures qui n'est pas représentative pour le dimensionnement d'un doublet géothermique. Une puissance de chauffage de 6 MW (débit de 430 m³/h) permettrait de couvrir 97 % des besoins de CHAUD.

La puissance de FROID est stable sur les 4 mois d'utilisation du rafraîchissement entre juin et septembre. Les 800 m³/h prélevés sur la nappe ne pourraient fournir que 6,4 MW de puissance utile de FROID, soit environ 26 % des besoins exprimés.

La modélisation de l'exploitation de la nappe par 5 doublets montre l'importance du positionnement des forages de réinjection par rapport aux forages de production. Ainsi les forages P3 et P4 subiraient une forte influence des forages de réinjection situés en amont. Les simulations ont montré que l'impact des doublets géothermiques sur les forages du

champ captant des SAGNES reste faible, avec moins de 7 cm sur la piézométrie et moins de 0,1 °C sur la température des eaux prélevées.

Il pourrait être envisagé, selon les résultats qui seront obtenus à partir des forages de reconnaissance, des débits d'exploitation plus importants, en envisageant, si cela s'avérait nécessaire, de positionner les différents captages dans les différents niveaux aquifères 1, 2 et 3, afin de limiter les influences réciproques des doublets entre eux.

L'impact de l'exploitation géothermique serait très faible sur les forages du champ captant les SAGNES : de 1 à 7 cm au maximum sur leurs niveaux piézométriques, et de l'ordre de 0,2 °C sur les températures de la nappe au droit de ces forages.

Une solution alternative, constituée d'un champ de Sondes Géothermiques Verticales, a été étudiée pour la couverture des besoins en énergie thermique du macro-îlot n° 2 uniquement sous différentes configurations comportant de 20 km à 60 km de linéaire forage. Le coefficient de performance saisonnier de la PAC géothermique hors fonctionnement des auxiliaires (circulateurs et régulations) est estimé, suivant la configuration, entre 5,2 et 6,0. La production de froid constitue le facteur limitant de la production d'énergie thermique par le champ de sondes. L'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid) ramenée au mètre de forage diminue avec la longueur totale de forage.

Pour une longueur de forage de 20 km, une configuration à 200 sondes de 100 m est plus efficace qu'une configuration à 100 sondes de 200 m ; l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 185 kWh.m⁻¹. 30,4 % de la puissance crête en froid du macro-îlot n° 2 peuvent être couverts (soit 1 605 kW), ce qui correspond à une couverture de 44,1 % des besoins annuels de froid (soit 1 270 MWh). 29,6 % de la puissance crête en chaud du macro-îlot n° 2 peuvent être couvert être couverts (soit 731 kW), ce qui correspond à 89,3 % de la demande annuelle en chaud (soit 2 437 MWh).

Pour une longueur de forage de 60 km, l'énergie totale couverte par la PAC géothermique (en chaud et en froid), ramenée au mètre de forage, est de 89 kWh.m⁻¹. 76,0 % de la puissance crête en froid peuvent être couverts (soit 4 003 kW), ce qui correspond à une couverture de 90,4 % des besoins annuels de froid (soit 2 601 MWh). La totalité de la demande en chaud peut être couverte.

Ces résultats s'appuient sur des hypothèses de conductivité thermique des terrains. Avant toute réalisation, il serait nécessaire de préciser, à partir d'au moins un test de réponse thermique (TRT), les caractéristiques thermiques exactes des terrains traversés.

Les investissements nécessaires pour la réalisation des 5 doublets envisagés sont compris entre 0,8 et 1,4 M€ selon le niveau aquifère visé. Le coût d'un champ de sondes (de 100 à 300 SGV) est compris entre environ 0,9 et 5,2 M€ selon le nombre de sondes et la profondeur choisie (uniquement sur le macro-îlot 2).

Du point de vue réglementaire, une telle opération de géothermie serait soumise à demande d'autorisation au titre du Code minier pour sa partie chauffage, et au titre du Code de l'environnement pour sa partie rafraîchissement. Il serait nécessaire d'obtenir une dérogation au regard du projet de règlement du SAGE Nappe et Basse Vallée du Var pour pouvoir réaliser des forages géothermiques dans ce secteur de la nappe, au-delà de la profondeur de 30 m et selon les conditions énoncées à l'article 4. Le champ captant Les Sagnes interdit tout forage géothermique dans son périmètre de protection rapprochée (PPR1 et PPR2). Le macro-îlot n° 1 est entièrement compris dans les limites du périmètre de protection rapprochée PPR2. L'emplacement du doublet 1 devra se faire à la limite de ce macro-îlot, bien à l'extérieur du PPR2.

15. Bibliographie

ANALY M., Giuglaris E., Lesueur H., Bouzit M, Desplan A. (2013) - Évaluation du potentiel géothermique du secteur de Nice Méridia - Rapport BRGM/RP-62578-FR.

Analy M., Bel A., Bouzit M., Le Brun M. avec la collaboration de A. Poux, N. Amraoui, V. Hamm, S. Noel, E. Vanoudheusden (2012) - Évaluation des possibilités de développement de la géothermie sur le territoire de l'opération d'intérêt national de l'EPADESA. Rapport final. BRGM/RP-61365-FR, 140 p., 58 ill., 10 tabl., 6 ann.,1 CD.

Analy M., avec la collaboration de **Y. Husson** (2013) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères de la région Picardie. Tome 3 : Étude du potentiel de développement de la géothermie en région Picardie. Rapport final. BRGM/RP-61365-FR, p., 79 ill., 23 ill., 6 tabl., 3 ann.,1 CD.

Anthony E.-J., Dubar M., Cohen O. (1998) - Les cordons de galets de la Baie des Anges : histoire environnementale et stratigraphique ; évolution morphodynamique récente en réponse à des aménagements/The gravel barriers of the Baie des Anges (French Riviera): environmental and stratigraphie history ; recent morphodynamic responses to coastal management. *In : Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Vol. 4 ; n°2 ; pp. 167-187.

Bel A., Poux A., Goyeneche O., Allier D., Darricau G., Lemale J. (2013) - Étude préalable à l'élaboration du schéma de développement de la géothermie en Île-de-France. Rapport final. BRGM/RP-61325-FR. 165 p., 56 ill., 16 tab., 4 ann.

BRGM, Site InfoTerre - Banque de données du sous-sol. <u>http://infoterre.brgm.fr/dossiers-</u> <u>sur-le-sous-sol-bss</u>.

Calcagno, P., Courrioux, G., Guillen, A., Chilès, J.P. (2008) - Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I – Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 171, 147–157.

Chapuis R. (2007) - Guide des essais de pompage et leur interprétation.

Dubar M. (2012) - Les dépôts pliocènes et pléistocènes de la basse vallée du Var (Nice, Alpes-Maritimes) : variations du niveau marin et néotectonique depuis 5 millions d'années. *Ann. Mus. Hist. Nat. Nice, XXVI : p. 35-54.*

Gonzalès G. (2008) - Carte géologique harmonisée du département des Alpes-Maritimes – Notice géologique. *Rapport BRGM/RP-56161-FR. 3 ill. 1 ann. 393 pp.*

Guglielmi Y. (1994) - Hydrogéologie des aquifères plio-quaternaires de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). *Thèse de Doctorat, Université d'Avignon.*

Gugliemi Y., et Prieur L. (1997) - Essai de localisation et de quantification des résurgences sous-marines d'un aquifère captif à porosité d'interstices : exemple de la nappe alluviale de la basse vallée du Var (méditerranée, France). *Journal of Hydrogeology Vol.190 p111-122*.

H2EA (2006) - Coupe des piézomètres réalisés sur la plateforme aéroportuaire de Nice : PZS42, PZS43, PZS44, PZC45, PZC46, PZC47, PZC48. *Dossier H2EA (SACA)*.

H2EA (2013) - Suivi de la nappe alluviale du Var au niveau de l'aéroport Nice Cote-d'Azur. Rapport. 44 p.

H2EA et Mangan (2010) - Étude hydrogéologique des nappes profondes de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes). 99 p., 10 fig., 3 planches, 6 ann..

HYDRATEC (2009) - Étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale du var aux aléas climatiques secs sévères. Rapport final 23180 MCR/NVC/hrv. 138 p., 49 fig., 18 tab., 16 graph., 27 ann..

Hochart M. (2003 - Synthèse hydrogéologique de la plateforme aéroportuaire Nice Cote d'Azur. *Thèse de doctorat es Scienses de la Terre* – Mention Hydrogéologie. Université de Franche Comté. Académie de Besançon. 190 p., 35 fig., 6 tab., 14 pl., 13 ann..

Horn R., Mercier F., Moal J., Valentin J. (1980) - Reconnaissance des fonds marins dans la zone du Delta du Var par sismique réflexion continue. Rapport BRGM 80 SGN 360 GPH. 12 p., 8 fig ; 5pl..

Lajaunie, C., Courrioux, G., Manuel, L., (1997) - Foliation fields and 3D cartography in geology; principles of a method based on potential interpolation. Mathematical Geology 29, 571-584.

Mangan C., Emily A. & Tennevin G. (2012) - Synthèse géologique de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). Données nouvelles dur la structure profonde. Ann. Mus. Hist. Nat, Nice, XXVII : 21-33, 2012.

Mangan C., Emily A. & Tennevin G. (2012) - Hydrogéologie de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes, France). Nappes alluviales et nappes profondes. Ann. Mus. Hist. Nat, Nice, XXVII : 55-69, 2012.

Maton D., Analy M., Durst P., Goyeneche O., Herniot Ph., Zammit C. avec la collaboration de **R. Pissy** (2012) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères de la région Picardie. Tome 1 : Méthodologie et conception de l'Atlas. Rapport final. BRGM/RP-61365-FR, 210 p., 96 fig., 16 tabl., 7 ann., 1 Dvd.

Maton D., Analy M., Durst P., Goyeneche O., Zammit C. avec la collaboration de Pissy R. (2012) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères de la région Picardie. Tome 2 : État des lieux et perspectives de développement de la filière géothermie. Rapport final. BRGM/RP-61365-FR, 247 p., 54 fig., 19 tabl., 13 annexes, 1 DVD.

Marsily de G. (2004) - Cours d'hydrogéologie. (sur la base de : Quantitative Hydrogeology, Groundwater Hydrology for Engineers, Academic Press, New York, (1986))

Moulin M., Salquèbre D., Rivet F. (2012) - Contribution à la connaissance des ressources géothermiques dans les nappes de la basse vallée du Var (Alpes-Maritimes) : Rapport final BRGM/RP-60742-FR. 134 p., 3 ann., 1CD.

Moulin M., Salquèbre D., avec la collaboration de **Rivet F.** (2012) - Contribution à la connaissance des ressources géothermiques dans les nappes de la basse vallée du Var. BRGM/RP-60742-FR, 134 p., 3 ann., 1CD.

Moulin M., avec la collaboration de **Bauer-Cauneille H.**, **Faure M.**, **Percheval J. & Lyant V.** (2013) - Étude 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.

Poux A., Goyénèche O., Le Brun M., Martin J.C., Noel S., Zammit C., Salquebre D. (2012) – Prospectives de développement de la géothermie en région Centre (GEOPOREC). Rapport final BRGM/RP-60336-F, 97 p., 4 ann.



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 117, avenue de Luminy 13276 – Marseille cedex 09 – France Tél. : 04.91.17.74.17







SOMMAIRE

Annexe 1 - I I	Log des 27 forages interprétés en couches de faciès plus ou moins perméables
Annexe 2 - 1	Tableau des forages interprétés pour intégration dans Géomodeler 27
Annexe 3 - (Coupes lithologiques des forages réalisés sur Nice Méridia
Annexe 4 - I	Données du modèle MARTHE 37
Annexe 5 - I	Bilan des débits du modèle MARTHE en régime permanent
Annexe 6 - I	Données thermiques des bâtiments (données Egis Conseil) 41
Annexe 7 - I	Modèle de Simulation Thermique Dynamique du Champ de Sondes Géothermiques Verticales43

Volume annexe au rapport BRGM/RP-64401-FR Rapport final : 47 p.

Annexe 1

Log des 27 forages interprétés en couches de faciès plus ou moins perméables



Carte synthétique des données géologiques disponibles sur la basse vallée du Var et retenues pour le projet Grand Arenas. Emplacement des forages étudiés (Carte géoréférencée sous ArcGis. Système de coordonnées NTF/ Lambert 2 étendu)


























Forage F1P1 Légende du modèle géologique Référence : Base de données BSS A1_R Indice de réf. : 10001C0687/F1P1 A2_S&G Coordonnées Lambert2 étendu : A3_A X_L2E:993545 A4_S&G Y_L2E:1 862 728 **A5**_A Altitude : + 2 m A6_S&G Profondeur atteinte : 62 m A7_P Prof/Zsol Remblais 0 m (Sables + Graviers B + Galets + Marnes) Sables fins + Graviers Sables argileux + Graviers 10 m Argiles silteuses grises A3 A Sables fins argileux 20 m micassés gris sombres 30 m Graviers + Sables argileux Niveau argileux noir 40 m Sables + Graviers Argiles micassées A5 A gris sombre 50 m Sables argileux + Graviers 60 m Sables + Graviers + Galets 70 m







Forage S13 Légende du modèle géologique Référence : Base de données BSS A1_R Indice de réf. : 10001X0437/S13 A2_S&G Coordonnées Lambert2 étendu : A3_A X L2E:994 258 A4 S&G Y L2E:1862179 **A5** A Altitude : -16 m A6_S&G Profondeur atteinte : 21 m A7_P Prof/Zsol 0 m Eau Eau 10 m prof eau imprécise Marnes sableuses A3_A Marnes plastiques 20 m noires à débrits de végétaux

30 m



















Tableau des forages interprétés pour intégration dans Géomodeler

Nom_puits	Alt/NM	Prof/Zsol	X_L2E	Y_L2E	Couche_Form	Mur	_Form/Zsol
F_Profond_Prairies	15	220	991810	1865698	A2_Graves_Sable	es	31
F_Profond_Prairies	15	220	991810	1865698	A4_Graves_Sable	es	50
F_Profond_Prairies	15	220	991810	1865698	A6_Graves_Sable	es	78
F_Profond_Prairies	15	220	991810	1865698	A7_Poudingues		220
Point_du_Jour	12	70	992004	1864361	A2_Graves_Sable	es	24
Point_du_Jour	12	70	992004	1864361	A3_Argiles		33
Point_du_Jour	12	70	992004	1864361	A4_Graves_Sable	es	54
Point_du_Jour	12	70	992004	1864361	A5_Argiles		57
Point_du_Jour	12	70	992004	1864361	A6_Graves_Sable	es	70
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A1_Remblais		6
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A2_Graves_Sable	es	12
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A3_Argiles		18
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A4_Graves_Sable	es	23
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A5_Argiles		43
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A6_Graves_Sable	es	75
Reinject_T1	6	77	993983	1863929	A7_Poudingues		77
Reinject_T2	7	81	992849	1863016	A1_Remblais		6
Reinject_T2	7	81	992849	1863016	A2_Graves_Sable	es	17
Reinject_T2	7	81	992849	1863016	A3_Argiles		23
Reinject_T2	7	81	992849	1863016	A4_Graves_Sable	es	39
Reinject_T2	7	81	992849	1863016	A5_Argiles		64
Reinject_T2	7	81	992849	1863016	A6_Graves_Sable	es	81
PZ45	6	76	994497	1864402	A1_Remblais		4
PZ45	6	76	994497	1864402	A2_Graves_Sable	es	12
PZ45	6	76	994497	1864402	A3_Argiles		25
PZ45	6	76	994497	1864402	A4_Graves_Sable	es	44
PZ45	6	76	994497	1864402	A5_Argiles		69
PZ45	6	76	994497	1864402	A6_Graves_Sable	es	76
PZ46	6	55	993874	1863877	A1_Remblais		6
PZ46	6	55	993874	1863877	A2_Graves_Sable	es	12
PZ46	6	55	993874	1863877	A3_Argiles		18
PZ46	6	55	993874	1863877	A4_Graves_Sable	es	26
PZ46	6	55	993874	1863877	A5_Argiles		48
PZ46	6	55	993874	1863877	A6_Graves_Sable	es	55
PZ47	7	56	993074	1863526	A1_Remblais		2
PZ47	7	56	993074	1863526	A2_Graves_Sable	es	12
PZ47	7	56	993074	1863526	A3_Argiles		27
PZ47	7	56	993074	1863526	A4_Graves_Sable	es	43
PZ47	7	56	993074	1863526	A5_Argiles		46
PZ47	7	56	993074	1863526	A6_Graves_Sable	es	56
PZ48	9	55	992736	1863290	A1_Remblais		4
PZ48	9	55	992736	1863290	A2_Graves_Sable	es	12
PZ48	9	55	992736	1863290	A3_Argiles		18
PZ48	9	55	992736	1863290	A4_Graves_Sable	es	30
PZ48	9	55	992736	1863290	A5_Argiles		53
PZ48	9	55	992736	1863290	A6_Graves_Sable	es	55

Nom_puits	Alt/NM	Prof/Zsol	X_L2E	Y_L2E	Couche_Form	Mur_Form/Zsol
PZ1	3.38	101	993629	1861848	A1_Remblais	6
PZ1	3.38	101	993629	1861848	A3_Argiles	41
PZ1	3.38	101	993629	1861848	A5_Argiles	77
PZ1	3.38	101	993629	1861848	A6_Graves_Sables	101
PZ3	2.72	101	994934	1863872	A1_Remblais	24
PZ3	2.72	101	994934	1863872	A3_Argiles	50
PZ3	2.72	101	994934	1863872	A5_Argiles	80
PZ3	2.72	101	994934	1863872	A6_Graves_Sables	101
PZ4	2.44	80	994172	1862875	A1_Remblais	14
PZ4	2.44	80	994172	1862875	A3_Argiles	30
PZ4	2.44	80	994172	1862875	A4_Graves_Sables	32
PZ4	2.44	80	994172	1862875	A5_Argiles	50
PZ4	2.44	80	994172	1862875	A6_Graves_Sables	80
PZ5	1.66	101	993165	1861570	A1_Remblais	17
PZ5	1.66	101	993165	1861570	A3_Argiles	50
PZ5	1.66	101	993165	1861570	A5_Argiles	77
PZ5	1.66	101	993165	1861570	A6_Graves_Sables	101
F1	2.27	80	993084	1862182	A1_Remblais	8
F1	2.27	80	993084	1862182	A3_Argiles	42
F1	2.27	80	993084	1862182	A5_Argiles	71
F1	2.27	80	993084	1862182	A6_Graves_Sables	80
F1P1	2	62	993545	1862728	A1_Remblais	3
F1P1	2	62	993545	1862728	A2_Graves_Sables	6
F1P1	2	62	993545	1862728	A3_Argiles	37
F1P1	2	62	993545	1862728	A4_Graves_Sables	45
F1P1	2	62	993545	1862728	A5_Argiles	56
F1P1	2	62	993545	1862728	A6_Graves_Sables	62
S6	2.3	24	991 912	1 862 934	A1_Remblais	2
S6	2.3	24	991 912	1 862 934	A2_Graves_Sables	24
S8	-13	22	993939	1861608	A3_Argiles	22
S9	-12	20	994018	1861938	A3_Argiles	20
S13	-16	21	994258	1862179	A3_Argiles	21
S157	3	10	993595	1862859	A1_Remblais	2
S157	3	10	993595	1862859	A2_Graves_Sables	10
\$160	3	10	993593	1863409	A1_Remblais	2
\$160	3	10	993593	1863409	A2_Graves_Sables	10
S206	6	15	994 759	1 865 556	A2_Graves_Sables	7
\$206	6	15	994 759	1 865 556	A3_Argiles	12
\$206	6	15	994 759	1 865 556	A4_Graves_Sables	15
\$222	2	/5	992473	1862855	A2_Graves_Sables	18
S222	2	/5	992473	1862855	A3_Argiles	42
<u>\$222</u>	2	/5	992473	1862855	A4_Graves_Sables	53
5222	2	75	992473	1862855	A5_Argiles	75
510	-63	3	994175	1861260	A5_Argiles	3
512	-172	3	993775	1860750	Ab_Graves_Sables	3
514	-104	2	995089	1861540	Ab_Graves_Sables	2
515	-213	3.5	995650	1861630	Ab_Graves_Sables	3.5
516	-59	3	995439	1862860	A5_Argiles	3

Coupes lithologiques des forages réalisés sur Nice Méridia









Annexe 4 Données du modèle MARTHE

Les données du modèle MARTHE sont enregistrées au format ASCII

Nom du fichier : Grille_MARTHE_GRAND_ARENAS.txt

Le modèle comprend 8 couches avec des mailles régulières de 25 m de côté

Nombre de lignes : 274

Nombre de colonnes : 215

Nombre de mailles : 59 910

Dimension du modèle : 6 850 x 5 374 m

Description : identifiant des mailles, de A1 à HG274

X_LAMB93 et Y_LAMB93 : coordonnées des centres des mailles en Lambert 93

TOPO : altitude topographique (m NGF)

ALTI_VAR : altitude de la ligne d'eau du Var (m NGF)

K1 à K8 : Coefficient de perméabilité des 8 couches (m/s)

SUB1 à SUB8 : Altitude des substratums des 8 couches (m NGF)

H1 à H8 : Piézométrie des 8 couches (m NGF)

DEB3 : Débits imposés (m³/s) (pompage ou réinjection) couche 3

DEB5 : Débits imposés (m³/s) (pompage ou réinjection) couche 3

DEB7 : Débits imposés (m³/s) (pompage ou réinjection) couche 3

Le substratum de la couche 1 correspond à la bathymétrie .

- Bilan des débits du modèle MARTHE en régime permanent

	COUCHE 1	COUCHE 2	COUCHE 3	COUCHE 4	COUCHE 5	COUCHE 6	COUCHE 7	COUCHE 8
NUM COUCHE	MER	REMBLAIS	AQUIFERE 1	ARGILE 1	AQUIFERE 2	ARGILE 2	AQUIFERE 3	POUDINGUES
de C1 MER avec		0,032	0,136	0,001	0,120	0,002	0,148	0,002
de C2 REMBLAIS avec	-0,032		-0,009	0,002	0,000	-0,000	0,000	0,000
de C3 AQUIFERE 1 avec	-0,136	0,009		0,007	0,630	0,000	0,015	0,060
de C4 ARGILE 1 avec	-0,001	-0,002	-0,007		0,007	0,002	0,000	0,000
de C5 AQUIFERE 2 avec	-0,120	0,000	-0,630	-0,007		0,001	0,730	0,130
de C6 ARGILE 2 avec	-0,002	-0,000	-0,000	-0,002	-0,001		0,004	0,001
de C7 AQUIFERE 3 avec	-0,148	0,000	-0,015	0,000	-0,730	-0,004		0,065
de C8 POUDINGUES avec	-0,002	0,000	-0,060	-0,000	-0,130	-0,001	-0,065	
TOTAL	-0,441	0,007	-0,721	-0,001	-0,225	-0,002	0,684	0,257

TOTAL PLUIE		Dompago	Injustion	DEBITS AUX LIMITES		RIVIERE			BILAN
COUCHE	COUCHE EFFICACE	Pollipage	injection	ENTRANT	SORTANT	ENTRANT	SORTANT	Débordement	COUCHE
0,441	0,107			0,000	-0,547				0,000
-0,040	0,046			0,000	0,000			-0,007	-0,000
0,585	0,088	-0,232		0,097	-0,004	0,274	-0,266	-0,542	-0,000
-0,000	0,000			0,000	0,000			-0,000	0,000
0,104	0,001	-0,142	0,011	0,045	-0,020				-0,000
-0,000	0,000			0,000	0,000				-0,000
-0,832	0,000	-0,037	0,049	0,911	-0,091				0,000
-0,259	0,160			0,188	-0,088				0,000
-0,000	0,401	-0,411	0,060	1,241	-0,750	0,274	-0,266	-0,549	-0,000

Données thermiques des bâtiments (données Egis Conseil)



Modèle de Simulation Thermique Dynamique du Champ de Sondes Géothermiques Verticales

Cette annexe présente le modèle du champ de Sondes Géothermiques Verticales (SGV), c'està-dire les hypothèses sur les mécanismes de transfert thermique en jeu, ainsi que le système d'équations dont la résolution permet de calculer la température du fluide caloporteur dans les SGV et les performances de la pompe à chaleur (PAC).

Le transfert thermique dans les SGV et le terrain alentour est décrit par des « méthodes analytiques ». Les méthodes analytiques s'opposent aux « méthodes numériques » (éléments finis, différences finies, etc.). Les méthodes numériques permettent une représentation détaillée du milieu souterrain, avec prise en compte des hétérogénéités géologiques par exemple. Cependant, elles nécessitent le maillage du milieu souterrain et le calcul de la température en chacune de ces mailles. Elles sont donc assez lourdes à mettre en œuvre et nécessitent des temps de calcul assez élevés (de l'ordre de plusieurs jours pour une simulation thermique dynamique d'un champ de SGV au pas de temps horaires sur quelques années). Les méthodes analytiques reposent quant à elles sur des solutions analytiques à l'équation de la chaleur. Ces solutions décrivent l'évolution de la température à la paroi des forages. Les méthodes semi-analytiques permettent la réalisation de simulations thermiques dynamiques sur plusieurs années, mais obligent à faire certaines hypothèses. En particulier, le milieu est considéré comme homogène.

Pour cette phase d'étude préliminaire, nous avons choisi de recourir aux méthodes analytiques pour les deux raisons suivantes :

- (i) Le développement d'un modèle aux éléments finis prenant en compte les hétérogénéités de milieu semble peu pertinent dans la mesure où on ne dispose d'aucune information sur les propriétés thermiques des terrains traversés.
- (ii) Les méthodes analytiques permettent de réaliser des simulations thermiques dynamiques (STD) au pas de temps horaire assez rapidement (typiquement environ une heure pour une STD d'une dizaine d'années sur un PC de bureau). De manière générale, cette accessibilité permet de réaliser plusieurs STD en faisant varier différents paramètres jusqu'à trouver des optimums en termes de performances de systèmes.

1.1. MODÈLE PHYSIQUE

1.1.1. Transfert thermique dans une SGV

Le transfert thermique dans l'échangeur est modélisé en introduisant une température « moyenne » $T_{fl,m}$ (en °C) du liquide caloporteur dans la SGV prise entre l'entrée $T_{e,SGV}$ (en °C) et la sortie $T_{s,SGV}$ (en °C) de la SGV :

$$T_{fl,m}(t) = \frac{T_{e,SGV}(t) + T_{s,SGV}(t)}{2}$$
(1)

La puissance échangée entre la PAC et une SGV notée $P_{fl,SGV}(t)$ (en kW) est reliée à la température moyenne à la paroi du forage $T_p(t)$ (en °C) par une résistance thermique notée R_f (en K.m.W⁻¹):

$$\frac{P_{fl,SGV}(t)}{H} = \frac{T_{fl,m}(t) - T_p(t)}{R_f}$$

(2)

Avec *H* la profondeur de la SGV (m).

1.1.2. Transfert thermique dans un champ de SGV

Dans les méthodes analytiques, on commence par introduire une « réponse indicielle », notée G, qui décrit l'évolution sur plusieurs années de la température à la paroi des forages sous une puissance échangée constante.

Dans le cas plus réaliste où la puissance évolue au pas de temps horaire, l'évolution de la température moyennée à la paroi de tous les forages du champ de SGV peut être reconstruite à l'aide de la réponse indicielle par la relation suivante :

$$T_p(t) = \frac{1}{N\lambda_m H} P_{CSGV}(t) * \frac{dG}{dt} + T_0$$

Avec :

- N: le nombre de SGV
- λ_m : la conductivité thermique du terrain (W.K⁻¹.m⁻¹),
- *H* : la profondeur d'un forage (m)
- $P_{CSGV}(t)$: La puissance échangée entre la PAC et le champ de SGV (W)
- *: le produit de convolution
- T_0 : la température initiale moyenne du terrain (°C)

Dans l'équation (3), $P_{CSGV}(t)$ est négatif quand la PAC extrait du chaud au champ de SGV, ce qui correspond au chauffage du bâtiment ; au contraire $P_{CSGV}(t)$ est positif quand la PAC cède du chaud au champ de SGV, ce qui correspond au rafraichissement du bâtiment.

Dans cette étude de préfaisabilité, on considère que la puissance est extraite de manière homogène sur toutes les SGV. Un raffinement possible du modèle est une exploitation par zones du champ de SGV.

 T_0 est estimé à la profondeur de H/2 (la moitié de la profondeur d'un forage) à partir du flux géothermique (W.m⁻².K⁻¹) et la conductivité thermique du terrain :

$$T_0 = T_{surf} + \frac{\phi_{GTH}}{\lambda_m} \frac{H}{2}$$
(4)

Si on note $G_{ii}(t)$ la réponse d'une SGV *i*, et $G_{i_{-j}}(t)$ la réponse de la SGV *j* due à l'interaction avec la SGV *i*, la réponse *G* du champ peut se mettre sous la forme :

$$G(t) = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^{N} G_{ii}(t) + \sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{j=1\\j \neq i}}^{N} G_{i \to j}(t) \right)$$

(5)

Toutes les SGV sont supposées identiques. Par conséquent, $G_{11}(t) = G_{ii}(t) = \dots G_{NN}(t)$. La réponse du champ se met sous la forme :

$$G(t) = G_{11}(t) + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \sum_{\substack{j=1\\j \neq i}}^{N} G_{i \to j}(t)$$

(6)

Les fonctions $G_{11}(t)$ et $G_{i \to j}(t)$ sont obtenues par des modèles prenant en compte le transfert thermique dans le terrain **par conduction et par convection** (par écoulements souterrains). On les note $G_{11}^{\infty}(t)$ et $G_{i \to j}^{\infty}(t)$

- la fonction $G_{11}^{\infty}(t)$ est calculée par un modèle de la « Source Cylindrique Infinie en Translation » (SCIT).
- les fonctions $G_{i \rightarrow j}(t)$ sont calculées par le modèle de la « Source Linéique Infinie en Translation » (SLI) (Molina-Giraldo, Blum, Zhu, Bayer, & Fang, 2011) :

$$\begin{aligned} G_{i \to j}(t) &= \frac{1}{2\pi} \exp\left(\frac{v_{th} d_{ij} \cos(\theta_{ij})}{2a_m}\right) \int_0^H \left[\int_0^H f(d_{ij}, z, z', t) \, dz' - \int_{-H}^0 f(d_{ij}, z, z', t) \, dz'\right] dz \\ f(d_{ij}, z, z', t) &= \frac{1}{4r'} \left[\exp\left(-\frac{v_{th} r'}{2a_m}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r' - v_{th} t}{2\sqrt{a_m t}}\right) + \exp\left(\frac{v_{th} r'}{2a_m}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{r' + v_{th} t}{2\sqrt{a_m t}}\right) \right] \\ r'^2 &= d_{ij} + (z - z')^2 \end{aligned}$$

(7)

Avec :

- d_{ij} la distance entre les SGV *i* et *j*,
- θ_{ij} l'angle entre l'écoulement et la droite passant par les SGV *i* et *j*,
- v_{th} : vitesse thermique de l'aquifère circulant (m.s⁻¹) :

$$v_{th} = \frac{\left(\rho C_p\right)_{fl}}{\left(\rho C_p\right)_m} v_D$$

- v_D : vitesse de Darcy (m.s⁻¹)
- $(\rho C_p)_{fl}$: capacité calorifique volumique de l'eau de l'aquifère $(\rho C_p)_m$ (J.K.m⁻³),
- $(\rho C_p)_m$: capacité calorifique volumique du terrain $(\rho C_p)_m$ (J.K.m⁻³).

On introduit une puissance linéaire moyenne échangée par mètre de forage $p_{SGV}(t)$ (W.m⁻¹):

$$p_{SGV}(t) = \frac{P_{CSGV}(t)}{N H}$$
(9)

L'équation (3) peut être discrétisée sous la forme :

$$T_P{}^n - T_0 = \frac{1}{\lambda_m} \left(p_{SGV}{}^1 G^n + \sum_{l=1}^{n-1} (p_{SGV}{}^{l+1} - p_{SGV}{}^l) G^{n-l} \right)$$
(10)

Où T_P^n représente la température à la paroi du forage au pas de temps *n*.

1.1.3. Point de fonctionnement de la pompe à chaleur (PAC)

A chaque pas de temps, le coefficient de performance de la PAC dépend des températures de fluide en sortie d'évaporateur et de condenseur. Une corrélation permettant de relier le COP de la PAC à la température de sortie de l'évaporateur $T_{s,ev}$ et de sortie de l'eau du condenseur $T_{s,cond}$ a été établie à partir des données fournies par le constructeur (températures en °C) :

 $COP(T_{s,ev}, T_{s,cond}) = 1.1 \times 10^{-3} \times T_{s,ev}^{2} + 8.5 \times 10^{-4} \times T_{s,cond}^{2} - 3.5 \times 10^{-3} \times T_{s,ev} \times T_{s,cond} + 0.268 \times T_{s,ev} - 0.17 \times T_{s,cond} + 9.67$

(11)

Cette corrélation sera utilisée dans tout ce qui suit, quelle que soit la puissance installée de la PAC.

La température en entrée du champ de sondes géothermiques verticales dépend de la puissance appelée par la PAC (prélevée au champ de sondes) P_{CSGV} , qui dépend du coefficient de performance de la PAC, qui elle-même dépend de la température en entrée du champ de sondes géothermiques verticales. A chaque pas de temps, il va donc être nécessaire de résoudre un système d'équations de manière itérative jusqu'à ce qu'il y est convergence.

1.1.4. Système d'équations à résoudre

Ce système peut s'écrire sous la forme :

$$F(\{X^n\}) = 0$$
(12)

Avec $\{X^n\}$ un vecteur contenant tous les paramètres que l'on souhaite calculer au pas de temps n:

$$\{X^n\} = \begin{cases} T_{fl,m}^n \\ T_{fl,m}^n \\ T_{s,CSGV}^n \\ P_{CSGV}^n \\ T_P^n \end{cases}$$

Avec :

- $T_{fl,m}^{n}$: la température moyenne du fluide dans les SGV,
- T_{e,CSGV}ⁿ: la température du fluide en entrée des SGV,
 T_{s,CSGV}ⁿ: la température du fluide en sortie des SGV,
- P_{CSGV}^{n} : la puissance échangée entre le champ de sondes et la PAC,
- T_P^n : la température moyenne à la paroi des SGV.

La fonction *F* s'exprime par :

$$F(\{X^{n}\}) = \begin{cases} 2T_{fl,m}^{n} - T_{fl,m}^{n} - T_{s,CSGV}^{n} \\ P_{CSGV}^{n} - \frac{NH}{R_{f}} (T_{fl,m}^{n} - T_{p}^{n}) \\ \left(\lambda_{m} + \frac{G^{1}}{R_{f}}\right) T_{p}^{n} - \lambda_{m}T_{0} - \left(-p_{SGV}^{n-1}G^{1} + \sum_{l=1}^{n-2} (p_{SGV}^{l+1} - p_{SGV}^{l})G^{n-l}\right) \\ \left\{ \begin{pmatrix} P_{bat}^{n} (COP^{n} - 1) + P_{CSGV}^{n} COP^{n} \text{ si } P_{bat}^{n} > 0 \\ P_{CSGV}^{n} (COP^{n} - 1) + P_{bat}^{n} COP^{n} \text{ si } P_{bat}^{n} < 0 \\ 0 \text{ si } P_{bat}^{n} = 0 \\ \Delta T_{PAC} \operatorname{sgn}(P_{bat}^{n}) + T_{e,CSGV}^{n} - T_{s,CSGV}^{n} \end{cases} \right\}$$

(14)

Dans l'équation (14), le coefficient de performance COP^n au pas de temps *n* est estimé à partir de la corrélation (11) et des températures de fluide en entrée du champ de SGV et en départ des émetteurs de chaleur ou de froid dans le bâtiment.

1.2. RÉSOLUTION DU SYSTEME D'ÉQUATION

Le système d'équation est résolu au moyen d'un programme codé dans le logiciel MATLAB®.


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 117, avenue de Luminy 13276 – Marseille cedex 09 – France Tél. : 04.91.17.74.17