

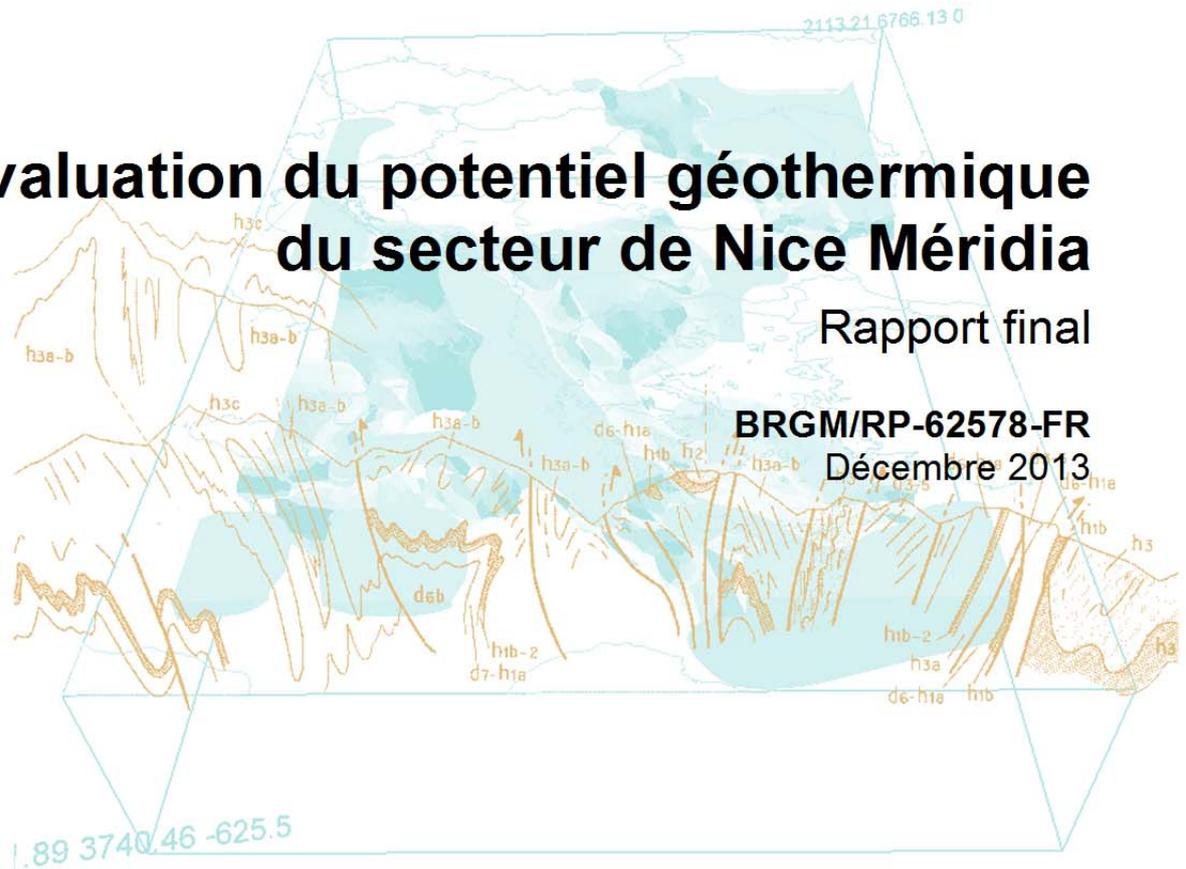


Évaluation du potentiel géothermique du secteur de Nice Méridia

Rapport final

BRGM/RP-62578-FR

Décembre 2013



Évaluation du potentiel géothermique du secteur de Nice Méridia

Rapport final

BRGM/RP-62578-FR

Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre du projet
d'Appui aux politiques publiques du BRGM PSP12PAC10

M. Analy, E. Giuglaris, H. Lesueur, M. Bouzit, A. Desplan

Avec la collaboration de

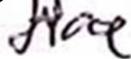
J.-F. Quais¹, M. Cason¹, A. Thomas², N. Roussel³, A. Gutierrez, M. Moulin, J.-C. Martin
(¹EPA de la plaine du Var, ²Artelia Ville et Transport, ³Devilleers et Associés)

Vérificateur :

Nom : V. HAMM

Date : 30/01/2014

Signature :



Approbateur :

Nom : C. ARNAL

Date : 02/02/2014

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, Nice Méridia, Très basse énergie, Pompe à chaleur, Aquifère, Modélisation, Aménagement.

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

Analy M., Giuglaris E., Lesueur H., Bouzit M., Desplan A., avec la collaboration de **Quais J.-F., Cason M., Thomas A., Roussel N., Gutierrez A., Moulin M., Martin J.-C.** (2013) - Évaluation du potentiel géothermique du secteur de Nice Méridia. Rapport final. BRGM/RP-62578-FR, 188 p., 64 ill., 27 tabl., 7 ann., 1 CD.

Synthèse

Ce rapport présente les résultats du programme de recherche et développement visant l'« Évaluation du potentiel géothermique du secteur de Nice Méridia ». Ce programme a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre l'EPA de la Plaine du Var, l'ADEME et le BRGM, l'EPA étant maître d'ouvrage de l'opération.

Le secteur de Nice Méridia localisé à l'ouest de la métropole azurienne, est un futur éco-quartier en cours d'aménagement qui constituera à terme une technopole combinant qualité urbaine et mixité des fonctions en associant des logements pour actifs, des bâtiments pour la Formation-Recherche-Entreprises, ainsi que des commerces et services de proximité, pour une capacité constructible totale de 320 000 m² sur une étendue territoriale de 24 ha (périmètre du premier secteur opérationnel (Illustration 1)).

Une réflexion sera menée par la suite pour un élargissement de l'aménagement urbain sur une zone de 200 ha.



Illustration 1 : Périmètres du secteur de Nice Méridia.

L'opération d'aménagement de Nice Méridia, mise en œuvre par L'EPA Plaine du Var, prend corps dans sa globalité avec l'Opération d'Intérêt National Eco-Vallée (13 OIN en France à ce jour) et s'inscrit également dans la démarche éco-responsable de la métropole Nice Côte d'Azur labélisée ÉcoCité.

En matière de gestion de l'énergie, ces statuts d'Éco-Vallée et d'ÉcoCité se traduisent par des démarches de développement durable et de réduction de l'empreinte écologique en visant, entre autres, une réduction significative de la consommation énergétique ainsi que le recours aux énergies vertes.

De ce point de vue, la géothermie constitue une solution particulièrement bien adaptée pour fournir de l'énergie thermique à l'éco-quartier de Nice Méridia.

En effet, les différentes études^{1,2} visant à identifier le potentiel géothermique du sous-sol sur des territoires plus ou moins élargis autour de Nice Méridia (Illustration 2), ont montré que ce dernier coïncide avec l'une des zones possédant les ressources géothermales régionales les plus favorables pour le développement de la géothermie par doublet³ superficiel, du fait de la présence de la nappe des alluvions qui dispose d'une très bonne productivité avec une possibilité de captage à très faible profondeur.

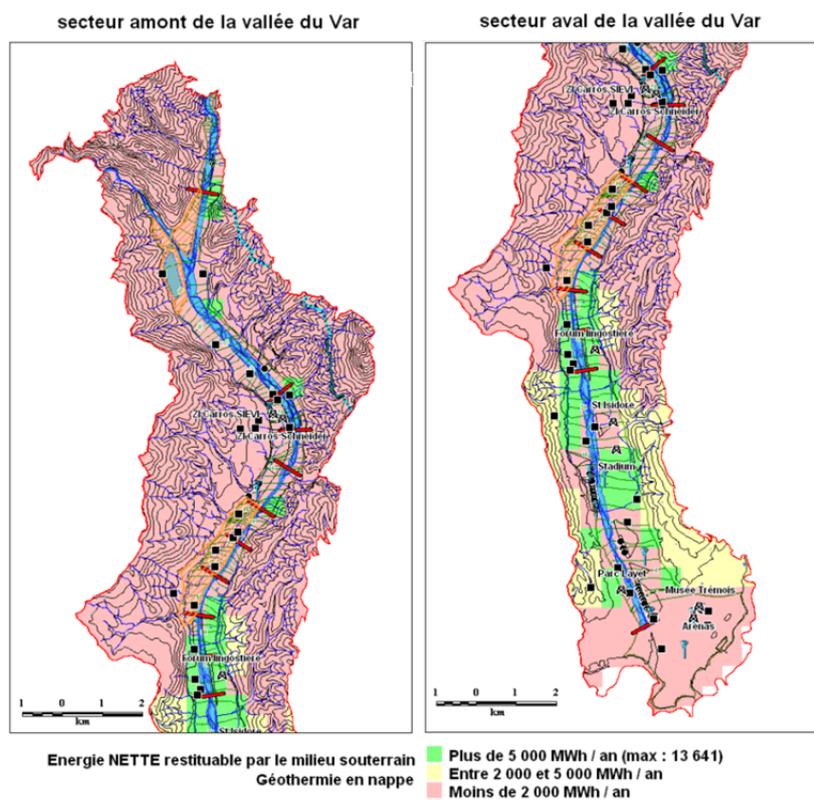


Illustration 2 : Capacités énergétiques des ressources géothermales de la basse vallée du Var évaluées en puissance thermique maximale potentielle (BRGM/RP-60742-FR).

¹ **Moulin M., Salquebre.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., 1 CD.

² **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.

³ Un doublet géothermique est constitué de deux forages : un forage destiné pour le pompage de l'eau, et l'autre forage pour la réinjection de cette eau après le prélèvement d'énergie. Cette notion ainsi que les différentes configurations d'ouvrages sont exposées dans le chapitre 2.

C'est pourquoi l'EPA a souhaité disposer d'éléments de décision sur les possibilités de développement de la géothermie sur ce territoire afin de les mettre à disposition des futurs opérateurs. Cela permettra d'étudier les possibilités d'intégrer la géothermie dans la fourniture énergétique pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire (ECS) et le froid sous forme de rafraîchissement direct (freecooling) et/ou de rafraîchissement assisté par pompes à chaleur réversibles (climatisation).

Dans le cadre du présent programme d'étude, il est donc proposé d'identifier le potentiel de développement de la géothermie sur le périmètre de Nice Méridia.

Ce potentiel traduit l'adéquation entre les besoins thermiques des bâtiments d'un territoire et les caractéristiques de la ressource géothermale locale, avec une prise en compte des contraintes réglementaires et technico-économiques.

Afin de parvenir à cet objectif, la méthodologie appliquée a consisté en trois grandes phases de travail :

- réalisation d'une campagne de reconnaissance hydrogéologique des alluvions du Var au droit du site d'étude ;
- modélisation hydrodynamique et simulation des impacts thermiques des opérations de géothermie sur la nappe ;
- analyse technico-économique de la viabilité d'intégrer la géothermie dans le paysage énergétique de Nice Méridia.

Les résultats de l'étude permettent de confirmer le potentiel géothermique élevé de la nappe des alluvions au droit du secteur de Nice Méridia. En effet, avec des débits d'exploitation pouvant atteindre jusqu'à 300 m³/h⁴ par ouvrage et une température d'eau oscillant en fonction des saisons entre 13 °C et 17 °C, la géothermie pourrait couvrir 100 % des besoins thermiques (chauffage, ECS et froid sous forme de rafraîchissement et/ou de climatisation) des bâtiments de la future technopole.

Les impacts hydrodynamiques et thermiques que pourrait engendrer l'exploitation géothermique sur la nappe, et plus particulièrement sur les captages d'AEP situés dans un périmètre proche à l'ouest de Nice Méridia ont été étudiés via le modèle numérique conceptuel construit dans le cadre de cette étude.

Il en ressort que ces impacts sont limités aux seuls aspects thermiques, mais ces derniers restent négligeables car le faible écart de température constaté au niveau du périmètre rapproché 2 ne dépasse pas 2 °C, ce qui reste dans la gamme normale d'évolution de la température des eaux de la nappe.

Ces faibles impacts se justifient pour ce qui est de l'aspect hydrodynamique par la grande transmissivité de la nappe, mesurée grâce aux essais de pompages réalisés au début de ce programme d'étude. Cette transmissivité très élevée reflète la capacité de la nappe à mobiliser des volumes d'eau importants lors des pompages sans risquer son épuisement localement.

⁴ En réalité, la nappe alluviale étudiée permet de pomper des débits beaucoup plus importants que 300 m³/h. Mais, il sera recommandé à partir des résultats de cette étude de ne pas dépasser ce seuil par doublet, et ce pour des problèmes liés à la réinjection. Ce point sera abordé au chapitre 5.

Concernant l'incidence thermique, la forte circulation des eaux, due à un gradient piézométrique NE-SW élevé et à une bonne perméabilité, permet une régénération thermique du sous-sol par les phénomènes de transport de chaleur (advection et conduction).

Enfin, l'analyse technico-économique réalisée pour l'optimisation de l'intégration de la géothermie dans le paysage énergétique de Nice-Méridia a permis d'évaluer les besoins thermiques du futur bâti, d'étudier leur adéquation avec les capacités de la ressource géothermale et de proposer et d'étudier trois scénarii d'exploitation avec une déclinaison pour chacun en trois sous-scénarios.

L'ensemble des résultats de cette étude est exposé dans le présent rapport et un résumé en est donné en conclusion.

Les analyses et les résultats de cette étude ne peuvent en aucun cas se substituer aux études de faisabilité.

Sommaire

1. Introduction	15
2. La géothermie.....	17
2.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX	17
2.2. DIFFÉRENTES RESSOURCES GÉOTHERMALES.....	17
2.2.1. Différents types de géothermie.....	18
2.2.2. Différentes technologies	18
2.3. TECHNIQUES APPLICABLES SUR LE TERRITOIRE DE NICE MERIDIA	20
2.3.1. Géothermie très basse énergie	20
2.3.2. Géothermie basse énergie	24
2.4. RÉGLEMENTATION	24
2.4.1. Réglementation nationale en vigueur	24
2.4.2. Réglementation sur le territoire de Nice Méridia	25
2.5. LES MÉCANISMES D'ACCOMPAGNEMENT	26
3. Caractérisation hydrogéologique du milieu visé	31
3.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE LOCAL	31
3.1.1. Géologie de la basse vallée du Var	31
3.1.2. Hydrodynamique de la basse vallée du Var	31
3.2. CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE HYDROGÉOLOGIQUE	35
3.2.1. Objectifs de la campagne	35
3.2.2. Nature et localisation des travaux	35
3.2.3. Observations géologiques	37
4. Mise en place des essais de pompage.....	39
4.1. RÉALISATION DES ESSAIS DE POMPAGE ET ACQUISITION DES DONNÉES	39
4.1.1. Historique	39
4.1.2. Mesures des données	39
4.2. REPRÉSENTATION ET ANALYSE DES DONNÉES	40
4.2.1. Représentation des données brutes.....	40
4.2.2. Anomalies et corrections apportées	40
4.3. INTERPRÉTATION DE L'ESSAI LONGUE DURÉE	41
4.3.1. Observation des courbes.....	41
4.3.2. Hypothèse	42
4.3.3. Reproduction du comportement par modèle analytique et calcul des paramètres hydrodynamiques	42

4.3.4. Vérification de l'ordre de grandeur sur Pz3.....	46
4.4. CONCLUSIONS SUR LES CARACTÉRISTIQUES DE LA NAPPE.....	46
4.4.1. Discussion.....	46
4.4.2. Résumé des paramètres hydrodynamiques	46
5. Modélisation hydrothermique.....	49
5.1. CONCEPTION DU MODÈLE DE LA NAPPE	49
5.1.1. Données brutes et extension du modèle.....	49
5.1.2. Construction de la géométrie du modèle	52
5.2. PARAMÉTRAGE HYDROGÉOLOGIQUE ET THERMIQUE DU MODÈLE	54
5.2.1. Paramètres hydrodynamiques	54
5.2.2. Paramètres thermiques.....	55
5.3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DE LA PIÉZOMÉTRIE ET DES ESSAIS DE POMPAGES.....	57
5.4. DISPOSITION DES OUVRAGES GÉOTHERMIQUES.....	62
5.4.1. Emplacement des ouvrages.....	62
5.4.2. Distance entre les ouvrages.....	64
5.5. SIMULATION DES SCÉNARII D'EXPLOITATION	67
5.5.1. Scénarios 1 et 2	67
5.5.2. Scénario 3	73
6. Expression des demandes thermiques	79
6.1. FINALITÉ ET CADRE D'EXÉCUTION	79
6.2. DEMANDES THERMIQUES ANNUALISÉES DES BÂTIMENTS.....	80
6.2.1. Surfaces concernées	80
6.2.2. Demandes énergétiques selon l'usage	83
6.2.3. Météo locale.....	85
6.3. ESTIMATION DES PUISSANCES GÉOTHERMIQUES INSTALLÉES	86
6.3.1. Démarche méthodologique.....	86
6.3.2. Calcul de la puissance géothermique installée et du débit afférent.....	88
7. Solutions techniques, scénarisation et dimensionnement	93
7.1. MACHINERIE.....	93
7.2. RÉSEAU DE DISTRIBUTION	93
7.3. SCÉNARISATION	95
7.4. SOUS-SCENARIOS.....	95
7.5. DIMENSIONNEMENT DES SOLUTIONS TECHNIQUES	97
7.5.1. Doublets	97
7.5.2. Réseaux.....	97

7.5.3. Pompe à chaleur géothermique (PACg) et Chaufferie à gaz naturel (ChG)	99
7.5.4. Autres équipements de surface	100
8. Analyse sommaire de l'intérêt économique et environnemental des scénarios	101
8.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE L'ANALYSE	101
8.2. ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES	101
8.2.1. Analyse économique	101
8.2.2. Analyse environnementale	103
8.3. HYPOTHÈSES RELATIVES À L'ESTIMATION DES COÛTS DES INSTALLATIONS	103
8.3.1. Coûts des investissements (P4)	104
8.3.2. Coûts d'entretien et de renouvellement des installations (P2 et P3)	105
8.3.3. Coûts énergétiques (P1)	106
8.4. RÉSULTAT DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE	107
8.4.1. Bilan des coûts d'investissement de d'exploitation	107
8.4.2. Coût global	108
8.4.3. Coût du kWh produit	110
8.4.4. Rentabilité économique : TdR et VAN	111
8.4.5. Analyse de sensibilité	113
8.5. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE	115
9. Conclusions	117
10. Bibliographie	121

Liste des illustrations

Illustration 1 : Périmètres du secteur de Nice Méridia	5
Illustration 2 : Capacités énergétiques des ressources géothermales de la basse vallée du Var évaluées en puissance thermique maximale potentielle (BRGM/RP-60742-FR)	6
Illustration 3 : Principe de l'échange direct de chaleur - Source : d'après BRGM im@gé	19
Illustration 4 : Dispositif d'exploitation géothermique des eaux souterraines dit « puits unique »	21
Illustration 5 : Dispositif d'exploitation géothermique des eaux souterraines dit « doublet »	22
Illustration 6 : Opération de stockage souterrain	23
Illustration 7 : Régime piézométrique représentatif du secteur amont de la nappe des alluvions du Var (BRGM/RP-60742-FR)	32
Illustration 8 : Régime piézométrique représentatif du secteur médian de la nappe des alluvions du Var (BRGM/RP-60742-FR)	32
Illustration 9 : Régime piézométrique représentatif du secteur aval de la nappe des alluvions du Var (BRGM/RP-60742-FR)	33
Illustration 10 : Localisation des ouvrages sur image satellite	36
Illustration 11 : Tête du forage de test avec des éléments (sable gris et galets) issus du sous-sol	37

Illustration 12 : Coupe lithologique du forage principal F1.	38
Illustration 13 : Modèle de sonde utilisée pour la mesure, l'enregistrement et le stockage des données de température et de niveau piézométrique (mesure toutes les 10 minutes)....	39
Illustration 14 : Données de rabattement sur l'ensemble des ouvrages.	40
Illustration 15 : Données de rabattement corrigées sur le forage, Pz1 et Pz2 lors de l'essai longue durée.	41
Illustration 16 : Courbes de rabattement corrigée des effets de nappe lors de la première descente.....	42
Illustration 17 : Rabattement et interprétation sur Pz2.	43
Illustration 18 : Rabattement et interprétation sur Pz1.	44
Illustration 19 : Rabattement et interprétation sur le forage.	45
Illustration 20 : Les différents périmètres concernés par la modélisation.	50
Illustration 21 : Données de la BSS dans le périmètre de la modélisation.	51
Illustration 22 : Vue d'ensemble de la répartition des ouvrages validés et intégrés à GDM.	52
Illustration 23 : Répartition des faciès géologiques du sous-sol de Nice Méridia le long d'un cylindre représentatif d'un ouvrage existant sous GDM.....	53
Illustration 24 : Représentation schématique de l'équivalence entre transmissivité globale du milieu et transmissivités spécifiques de chaque couche.....	55
Illustration 25 : Suivi de température au fond des trois piézomètres	56
Illustration 26 : Suivi de température corrigé des pics liés aux prises de mesures.....	56
Illustration 27 : Condition initiale et conditions aux limites imposées pour la charge hydrodynamique.....	58
Illustration 28 : Calage du niveau piézométrique de la nappe en régime permanent.	59
Illustration 29 : Paramètres intervenants dans le calcul de la vitesse de Darcy (d'après eduterre.ens-lyon.fr).....	61
Illustration 30 : Calcul du gradient hydraulique de la nappe alluviale au droit de Nice Méridia (les isopièzes sont équirépartis sur l'ensemble de secteur).....	61
Illustration 31 : Température de la nappe et développement du panache thermique.....	63
Illustration 32 : Localisation des ouvrages utilisés.	64
Illustration 33 : Évolution de la température au niveau du puits de production en fonction de la distance entre les puits du doublet – Débit maximal d'exploitation : 25 m³/h.	65
Illustration 34 : Évolution de la température au niveau du puits de production en fonction de la distance entre les puits du doublet – Débit maximal d'exploitation : 300 m³/h.	65
Illustration 35 : Évolution de la distance entre puits de production/puits de réinjection en fonction du débit d'exploitation.	66
Illustration 36 : Scénarii d'exploitation proposés dans le cadre de cette étude.	67
Illustration 37 : Échanges géothermiques mensuels par doublet pour les scénarios 1 et 2.....	68
Illustration 38 : Emplacement des doublets géothermiques - Scénarios 1 et 2.	69
Illustration 39 : Impacts thermiques de la géothermie sur la nappe, 1 ^{re} année d'exploitation – Scénarios 1 et 2.	70
Illustration 40 : Impacts thermiques de la géothermie sur la nappe - 30 ^e année d'exploitation - Scénarios 1 et 2.	71
Illustration 41 : Piézométrie de la nappe et incidence des opérations géothermiques.	72
Illustration 42 : Emplacement des doublets géothermiques et phasage de réalisation - Scénario 3.....	74

Illustration 43 : Plan de phasage de l'urbanisation de Nice Méridia - dates prévisionnelles de livraison (document EPA de la plaine du Var).....	75
Illustration 44 : Impacts thermiques de la géothermie sur la nappe - 30 ^e année d'exploitation - Scénario 3.....	77
Illustration 45 : Graphique météorologique pour la station de Nice-Côte-d'Azur.....	85
Illustration 46 : Courbes des demandes géothermiques pour le chauffage et pour l'ECS.....	89
Illustration 47 : Courbes des demandes géothermiques et des débits pour la climatisation.....	89
Illustration 48 : Courbes des demandes géothermiques et des débits pour le rafraîchissement.....	90
Illustration 49 : Courbes cumulant toutes les demandes géothermiques et les débits afférants.....	91
Illustration 50 : Principe du réseau avec machinerie centralisée.....	94
Illustration 51 : Principe du réseau en boucle tempérée avec plusieurs machineries.....	94
Illustration 52 : Synthèse des scénarios techniques envisageables.....	95
Illustration 53 : Scénario 3 - Distribution des doublets et phasage envisagé en trois périodes.....	97
Illustration 54 : Linéaire schématique du réseau de chaleur de Nice Méridia.....	98
Illustration 55 : Répartition des coûts P4.....	108
Illustration 56 : Coût global sur 30 ans (en k€).....	109
Illustration 57 : Répartition du coût global (en %).....	109
Illustration 58 : Coût de revient par kWh produit.....	110
Illustration 59 : Coût de revient annuel par m ² de surface plancher.....	110
Illustration 60 : Valeur actuelle nette.....	111
Illustration 61 : Temps de retour sur investissement.....	112
Illustration 62 : VAN en fonction du prix de l'électricité (sous-scénarios avec chaud géothermique).....	115
Illustration 63 : VAN en fonction du prix du gaz (sous-scénarios avec chaud gaz).....	115
Illustration 64 : Bilan environnemental des différents sous-scénarios.....	116

Liste des tableaux

Tableau 1 : Localisations cadastrales et géographiques des ouvrages.....	36
Tableau 2 : Résumé des résultats des essais selon des deux hypothèses de travail.....	47
Tableau 3 : Valeurs des paramètres hydrodynamiques considérées pour la modélisation.....	55
Tableau 4 : Valeurs de la capacité calorifique et la conductivité thermique considérées pour la modélisation.....	57
Tableau 5 : Mesures piézométriques réalisées le 28/05/2013.....	58
Tableau 6 : Variations piézométriques calculées au niveau des ouvrages géothermiques.....	73
Tableau 7 : Répartition des doublets en fonction des numéros de lots cessibles.....	76
Tableau 8 : Détail des lots du macro - Lot 1.....	81
Tableau 9 : Détail des lots du macro - Lot 2.....	81

Tableau 10 : Détail des lots du macro - lot 3	82
Tableau 11 : Synthèse de la répartition des lots de Nice Méridia	82
Tableau 12 : Répartition des usages sur l'ensemble des aménagement Nice Méridia	83
Tableau 13 : Données météo relevées par la station de Nice-Côte-d'Azur	86
Tableau 14 : Profils de répartition des demandes thermiques (météo de Nice-Côte-d'Azur).....	87
Tableau 15 : Exemple de demandes thermiques spécifiques des bâtiments	87
Tableau 16 : Demandes géothermiques spécifiques pour les conditions du tableau 11	87
Tableau 17 : Répartitions mensuelles des sollicitations géothermiques spécifiques (COP = 4)	88
Tableau 18 : Synthèse des sous-scénarios techniques envisageables	96
Tableau 19 : Scénario 3 - Phasage envisagé.	96
Tableau 20 : Puissances de dimensionnement des PACg et chaufferie gaz centralisées (scenario 1).....	99
Tableau 21 : Nombre de PACg ou ChG selon les puissances installées (scenario 2)	99
Tableau 22 : Nombre de PACg ou ChG selon les puissances installées et par doublet (scenario 3)	99
Tableau 23 : Coûts unitaires machinerie	105
Tableau 24 : Hypothèses des coûts de maintenance et de renouvellement P2 et P3.....	105
Tableau 25 : Bilan des coûts d'investissement et d'exploitation	107
Tableau 26 : Exemple de calcul de la VAN et du TdR (Sc3 – GTH / Clim).....	113
Tableau 27 : Variation de la VAN et du TdR en fonction du prix de vente de chaud/froid.....	114

Liste des annexes

Annexe 1 : Réglementation en vigueur régissant la géothermie	123
Annexe 2 : Régime juridique applicable à la géothermie sur nappe : Code minier et Code de l'Environnement	133
Annexe 3 : Fiche de déclaration en mairie des prélèvement, puits et forages à usage domestiques...	137
Annexe 4 : Garantie AQUAPAC	141
Annexe 5 : Coupes lithologiques et données des forages réalisés sur Nice Méridia	147
Annexe 6 : Exemples forages BSS et leurs données utilisés pour la modélisation	157
Annexe 7 : Autorisation de rejet dans le réseau des eaux pluviales.....	179

1. Introduction

Dans le cadre du présent programme d'étude, il est proposé d'identifier le potentiel de développement de la géothermie sur le périmètre de Nice Méridia. Ce potentiel est défini comme étant l'adéquation entre les besoins thermiques des bâtiments qui pourront être alimentés par la ressource géothermale locale (la nappe alluviale du Var) et les caractéristiques de cette dernière, le tout dans des conditions techniques et économiques viables.

L'évaluation est faite d'un côté à partir de la caractérisation hydrodynamique de la ressource évoquée ci-avant, réalisée grâce aux travaux de reconnaissance hydrogéologiques menés sur le terrain, et d'un autre côté, à partir des données thermiques des bâtiments de Nice Méridia.

Les paramètres relatifs à la caractérisation de la ressource et les données thermiques traduites en termes de paramètres d'exploitations géothermiques (nombre et disposition des ouvrages, débits et températures de pompage/réinjection...) sont intégrés dans un modèle numérique conçu en se basant sur la géométrie et l'hydrodynamique réelles du sous-sol de Nice Méridia.

Ce modèle permet de réaliser une simulation des opérations de géothermie et d'obtenir une vision sur, par exemple, l'incidence que pourraient induire ces opérations sur les exploitations d'Alimentation en Eau Potable (AEP), ou bien les distances et périmètres à respecter pour éviter l'épuisement hydrodynamique de la nappe, ou encore les phénomènes de recyclages thermiques et les conflits d'usage qui peuvent avoir lieu entre différentes opérations.

Le modèle devrait servir par la suite pour une gestion durable de la ressource géothermale.

Ce programme d'étude permettra de donner des orientations sur les possibilités offertes par la géothermie dans Nice Méridia et ce qu'elle pourrait apporter en termes de fourniture énergétique d'ici la fin de l'aménagement global du territoire, en tenant compte des contraintes et spécificités locales.

L'objectif final est de promouvoir cette énergie auprès des futurs opérateurs et aménageurs, s'il s'avère techniquement et réglementairement possible de la mettre en œuvre en étant performante d'un point de vue environnemental et économique.

Pour cela, l'étude mettra à la disposition des décideurs, institutions publiques, maîtres d'ouvrage, des données et critères de décision leur permettant de privilégier ou non la géothermie lors de choix énergétiques pour leurs opérations d'aménagement.

Les travaux de cette étude ont été menés en trois phases :

- Une première phase destinée à caractériser plus précisément la nappe d'accompagnement du Var qui constitue la ressource géothermale. Cette caractérisation a nécessité la réalisation d'un forage de tests pour effectuer des essais de nappe par pompage, et l'implantation de trois piézomètres qui ont permis de suivre l'évolution de la nappe sous l'effet des pompages, et de fournir des chroniques continues de la température et du niveau piézométrique. L'objectif est d'avoir une idée précise sur le contexte géologique et hydrodynamique local, et une évaluation des paramètres indispensables pour mener à bien cette étude, dont les principaux sont le débit de production exploitable, la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.
- La deuxième phase a consisté en une modélisation numérique depuis la construction géométrique du modèle et son maillage jusqu'à la simulation hydrothermique des différents scénarios possibles. Les résultats sont obtenus par le paramétrage hydrogéologique, la

définition des conditions limites ainsi que le calage entre les calculs du modèle et les mesures réalisées sur le terrain.

La modélisation est réalisée grâce au logiciel MARTHE (outil de modélisation développé au BRGM), en faisant également intervenir d'autres outils tels que GDM 7 pour les géomodélisations et MapInfo pour ce qui relève du SIG (Système d'Information Géographique).

- La dernière phase de l'étude s'attache à l'aspect thermique des bâtiments, à sa traduction en termes d'exploitation géothermique, et s'intéresse à la viabilité économique des trois scénarii d'exploitation proposés.

Avant d'aborder les travaux réalisés au cours de cette étude et ses résultats, ce rapport présente un aperçu général sur la géothermie.

2. La géothermie

2.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX

La géothermie se définit comme l'exploitation de la chaleur stockée dans l'écorce terrestre. Elle a pour origine à la fois le refroidissement du noyau terrestre et surtout la désintégration naturelle des éléments radioactifs contenus dans les roches profondes⁵. L'énergie géothermique est présente partout à la surface du globe ; elle se manifeste par le gradient géothermique (élévation de la température avec la profondeur) qui est en moyenne de 3,3 °C par 100 m de profondeur. Des variations locales de gradient géothermique sont néanmoins observées ; elles sont reliées à l'âge des formations géologiques et à leur composition.

L'énergie géothermique peut être utilisée pour le chauffage, la climatisation, et/ou la production d'électricité par le biais de différentes technologies. La possibilité de mettre en œuvre chacune de ces technologies dépend du contexte géologique et hydrogéologique.

Il existe différents types de géothermie avec deux grands domaines : la production de chaleur et/ou de froid et la production d'électricité. Étant donné le contexte géologique de la basse vallée du Var et du secteur de Nice Méridia, ce second usage de la géothermie ne peut être envisagé au stade actuel des connaissances et ne sera pas abordé dans ce rapport.

2.2. DIFFÉRENTES RESSOURCES GÉOTHERMALES

Dans le cas de l'utilisation de la géothermie pour la production de chaleur, un système géothermal est constitué d'une source de chaleur, associée à un dispositif de prélèvement permettant le transfert de la chaleur pour utilisation. La source de chaleur est le sous-sol ; elle se caractérise, d'une part par son niveau de température (qui dépend de la profondeur considérée et du gradient géothermique local) et par ses caractéristiques physiques et hydrauliques : lithologie, structure (roches perméables ou imperméables, compactes, poreuses ou fissurées), niveau de saturation en eau (formations aquifères susceptibles de renfermer des nappes d'eau souterraines ou pas) et degré d'exploitabilité de la ressource en eau.

Deux grandes sources d'énergie géothermique sont donc à distinguer :

- le sous-sol *sensu stricto* : formations géologiques dépourvues de ressources en eau, mais ayant des caractéristiques thermiques favorables ;
- les eaux souterraines qu'il renferme parfois : formations aquifères rencontrées dans des formations géologiques, sédimentaires (craie, calcaire, sable...), cristallines ou volcaniques. Leurs caractéristiques hydrodynamiques et thermiques varient avec la profondeur et amènent classiquement à faire la distinction entre aquifères superficiels (écoulement souvent rapide, et hétérogène dans l'espace et dans le temps, influence des écoulements de surface et des conditions thermiques de surface), et aquifères profonds (profondeurs dépassant la centaine de mètres et pouvant atteindre des profondeurs supérieures à 2 000 m, écoulement relativement lents, peu influencés par le contexte atmosphérique, captifs et le plus souvent artésiens).

⁵ Varet J., Géothermie basse énergie : usage direct de la chaleur. Masson.

2.2.1. Différents types de géothermie

En ce qui concerne la production de chaud et/ou de froid, on distingue généralement la géothermie très basse énergie et la géothermie basse énergie.

Géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température est comprise entre 30 et 90 °C. Ces ressources sont exploitables de plusieurs manières, en fonction de leur température : soit par échange direct de chaleur, soit par l'intermédiaire d'une Pompe à Chaleur (PAC).

Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie correspond à l'utilisation des ressources thermiques dont la température est inférieure à 30 °C (donc stockées dans le proche sous-sol ou dans les aquifères superficiels). À cette température, la ressource ne peut généralement pas être exploitée par un simple échangeur de chaleur (sauf pour le rafraîchissement), et nécessite donc la mise en place d'une pompe à chaleur (PAC) qui prélève l'énergie de la source de chaleur à basse température (roche, nappe aquifère) pour augmenter la température d'un fluide secondaire jusqu'à une température compatible avec l'usage.

2.2.2. Différentes technologies

Selon la température de la ressource et l'existence ou pas d'un aquifère au droit du site visé, plusieurs technologies d'exploitation sont envisageables : les technologies par échange de chaleur direct ou assistées par PAC, par prélèvement sur nappes ou par échange avec le sous-sol.

Pour les dispositifs équipés de PAC, selon les besoins, il est possible de fournir du chaud, du froid ou les deux alternativement ou simultanément.

Production de chaud

- **Échange direct de la chaleur**

Les installations fonctionnant par échange direct de chaleur utilisent les eaux géothermales et s'intéressent donc aux nappes d'eau souterraine profondes dont la température est naturellement élevée (géothermie basse énergie).

Pour la fourniture de chaud, l'eau géothermale est prélevée dans l'aquifère au niveau d'un forage de prélèvement ou puits de production, puis elle circule jusqu'à un échangeur de chaleur qui permet de transférer la chaleur depuis l'eau prélevée vers le « circuit géothermique ». L'eau géothermale refroidie est ensuite renvoyée dans l'aquifère d'origine par le biais d'un second forage dit puits d'injection.

Le chemin suivi par l'eau géothermale depuis son prélèvement jusqu'à sa réinjection constitue la « boucle géothermale ». Ce fonctionnement comprenant un puits de prélèvement et un puits d'injection est appelé « doublet géothermique ».

Le « circuit géothermique » correspond au réseau de distribution de la chaleur ; il permet l'approvisionnement en chaleur des utilisateurs.

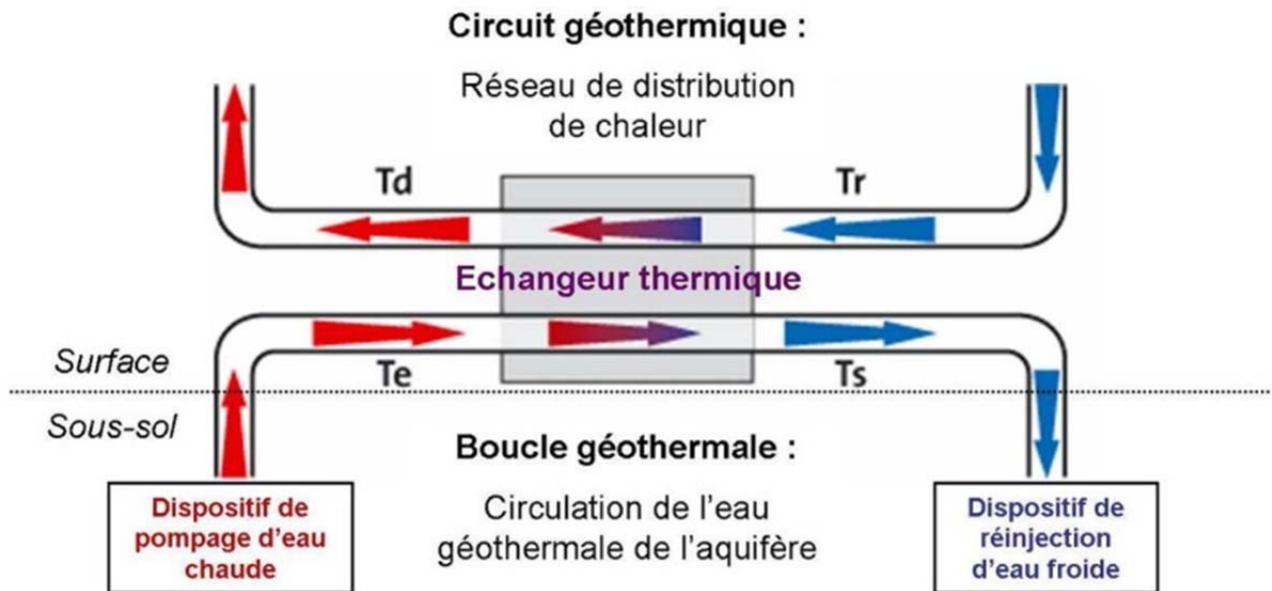


Illustration 3 : Principe de l'échange direct de chaleur - Source : d'après BRGM im@gé.

- **Utilisation de pompe à chaleur (PAC) pour produire de la chaleur**

Si la température naturelle de la ressource en eau souterraine n'est pas suffisamment élevée pour échanger directement de la chaleur, le recours aux pompes à chaleur permet malgré tout de produire de la chaleur.

Une pompe à chaleur est un système thermodynamique qui fonctionne entre deux sources : une source froide et une source chaude. Le principe consiste à prélever des calories à basse température dans un milieu (source froide) et de les transférer à plus haute température dans un autre (source chaude).

Ce transfert se fait via un fluide caloporteur ou fluide frigorigène qui présente un point d'ébullition à basse température. Le fluide circule en circuit fermé, et le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude ne peut se réaliser que s'il y a apport extérieur d'énergie⁶ (compresseur). Dans un fonctionnement classique en mode chauffage, la source froide correspond au milieu extérieur (nappe aquifère, sous-sol) et la source chaude correspond au bâtiment cible à chauffer. Une pompe à chaleur est caractérisée par son coefficient de performance (COP) qui est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie dépensée sous forme mécanique. L'énergie mécanique est généralement apportée par un compresseur entraîné par un moteur électrique. Les autres constituants de la PAC sont un échangeur côté source froide dénommé « évaporateur » et un échangeur côté source chaude nommé « condenseur ». Dans la pratique, du fait de la difficulté d'évoluer selon le cycle théorique de Carnot et des rendements des équipements du système (moteurs, échangeurs, pertes de charges des circuits frigorifiques...), le COP réel est affecté d'un coefficient de 0,4 à 0,7 par rapport au COP théorique de Carnot. Le COP sera d'autant plus élevé que l'écart de température entre la source et le milieu à chauffer sera faible.

⁶ ADEME, ARENE, BRGM, EDF (2008) – Guide technique – Pompe à chaleur géothermique sur aquifère – Conception et mise en œuvre.

La performance du système est fonction à la fois de la température du milieu où sont prélevées les calories (source froide) et du milieu où est transférée la chaleur (source chaude).

Production du froid

Les principes des deux techniques précédentes sont valables pour la production du froid. En effet, il est possible de rafraîchir ou refroidir un milieu en utilisant directement la fraîcheur du sous-sol, notamment celle des aquifères superficiels, ou en faisant appel à des PAC, qui permettent d'avoir des niveaux de températures plus bas.

Dans le cas d'une exploitation directe du sous-sol, on parle de géocooling. Cette technique implique un coût de fonctionnement assez bas, et peut représenter un gain de consommation énergétique trois fois inférieur à une solution de climatisation classique. Le géocooling est adapté pour l'habitat collectif, pour les bâtiments publics et tertiaires, mais également pour les locaux techniques comme les centres de traitement de données via des serveurs.

Si les besoins en froid sont importants en termes de puissances énergétiques, on peut faire appel à des PAC, avec un fonctionnement en circuit inversé (la source chaude correspond au milieu extérieur (nappe aquifère, sous-sol) et la source froide correspond au bâtiment cible à rafraîchir/refroidir).

2.3. TECHNIQUES APPLICABLES SUR LE TERRITOIRE DE NICE MERIDIA

Nous nous intéressons ici aux techniques de production de chaleur et de froid, qui varient en fonction de la ressource utilisée, avec une focalisation sur ce qu'il est possible de mettre en place de façon générale sur le territoire de Nice Méridia.

2.3.1. Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie met en œuvre deux techniques :

- l'extraction de l'énergie du sous-sol par le biais d'échangeurs géothermiques enterrés, système dit en boucle fermée ;
- l'extraction de l'énergie des eaux souterraines superficielles, dit système en boucle ouverte.

Quand ils sont présents, les aquifères superficiels producteurs peuvent être exploités thermiquement (pour le chaud et/ou le froid) et leur utilisation est plus efficace énergétiquement parlant que l'utilisation du sous-sol sensu stricto. Le territoire de Nice Méridia disposant dans son sous-sol d'un réservoir superficiel d'eau souterraine très important, représenté par les alluvions d'accompagnement du Var, la seconde technique est le système envisagé dans cette étude pour l'évaluation du potentiel géothermique.

Du fait de la basse température de l'aquifère concerné (13-17 °C), l'énergie est recueillie par le biais d'une pompe à chaleur pour la fourniture de chaud ou lorsqu'il s'agit de faire de la climatisation.

Différents dispositifs d'exploitation géothermique des eaux souterraines existent ; certains d'entre eux sont décrits ci-après.

Le puits unique

L'eau de la nappe prélevée à sa température naturelle est rejetée dans un réseau de surface après extraction de ses calories (ou frigories). Le dispositif, particulièrement économique sous l'angle des investissements (économie sur le forage), peut se révéler très onéreux à l'exploitation du fait des taxations auxquelles sont fréquemment assujettis de tels rejets.

Il est à noter que le recours à ce genre de dispositif est très limité du fait de la réglementation très stricte pour la préservation de ressources souterraines en eau.

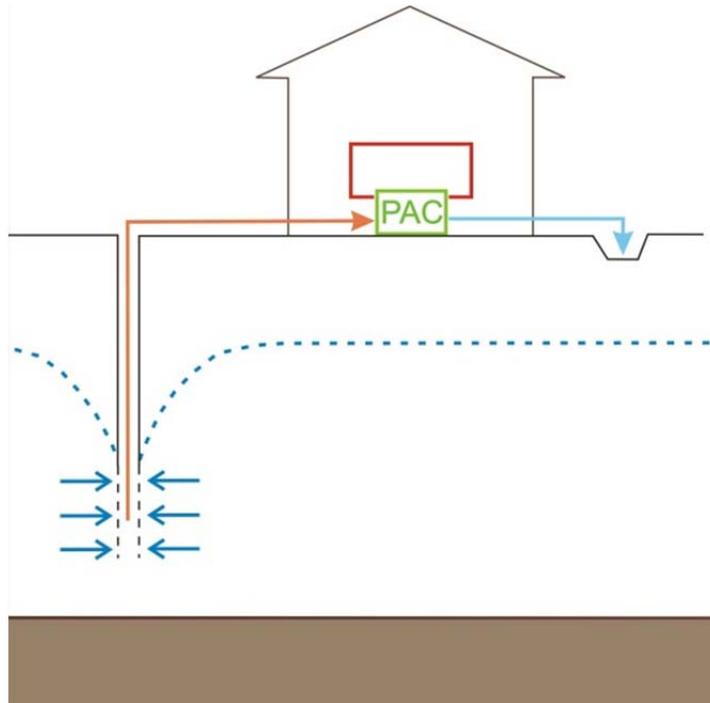


Illustration 4 : Dispositif d'exploitation géothermique des eaux souterraines dit « puits unique ».

Le doublet géothermique de forages

L'eau de la nappe prélevée à sa température naturelle est réinjectée (plus chaude ou plus froide) dans un second forage, après exploitation de ses propriétés thermiques.

Le dimensionnement d'une telle opération nécessite de caractériser la ressource, principalement en terme de débit et de température, pour adapter l'installation de surface, mais également pour déterminer les meilleures dispositions des forages de production et d'injection qui alimenteront les systèmes thermodynamiques. Il est important de noter que dans certains contextes hydrogéologiques, c'est la réinjection qui limite le débit total de l'installation comme c'est le cas des formations sableuses ou lorsque le niveau statique de la nappe est proche de la surface. Le sous-sol de Nice Méridia est plus ou moins représentatif de ce genre de milieu, ce qui nécessite une attention particulière lors du dimensionnement et la mise en place des opérations de géothermie.

La distance entre les forages de production et d'injection d'un doublet géothermique doit être suffisante pour limiter le phénomène de recyclage (atteinte du forage de production par une bulle froide ou chaude créée au niveau du forage d'injection) qui conduirait à une baisse du rendement de l'opération. La variation de température, au puits de prélèvement, si elle devrait

avoir lieu, doit se faire à une échelle de temps supérieure à la durée de vie de l'installation. Ces inconvénients peuvent être limités en utilisant l'installation de façon mixte (chauffage et climatisation).

Dans le cadre de ce projet, des calculs spécifiques au sous-sol de Nice Méridia ont été réalisés pour déterminer l'impact thermique de la réinjection sur le puits de production, en faisant varier le débit de l'opération et la distance entre les deux puits.

Les résultats de ces calculs sont présentés au chapitre 5.

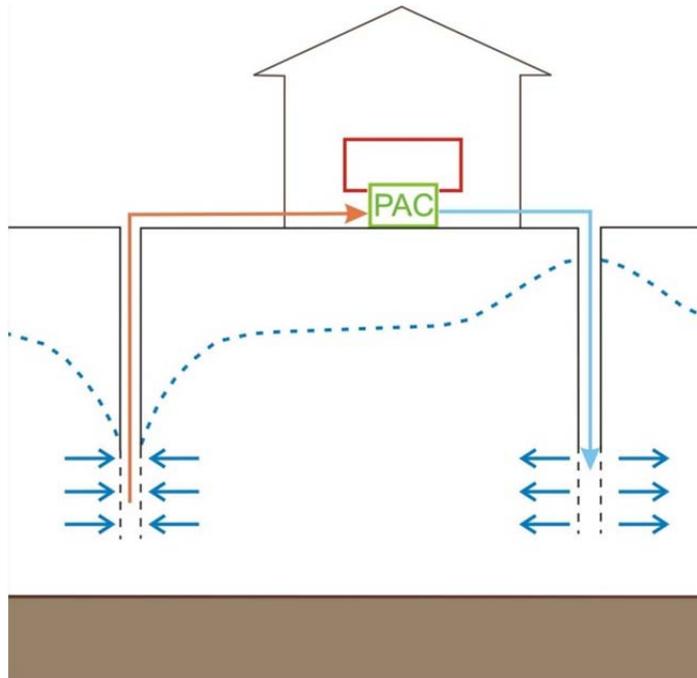


Illustration 5 : Dispositif d'exploitation géothermique des eaux souterraines dit « doublet ».

Doublet à balayage

Le doublet de forage est exploité pour assurer une climatisation en été et un chauffage en hiver. Les eaux sont toujours prélevées par le même forage et réinjectées dans le même forage de réinjection. Des ondes alternativement chaudes et froides balayent la nappe. Ce dispositif permet de maintenir une température moyenne dans le réservoir (régénération de son niveau énergétique).

Exploitation par puits multiples

Certaines installations nécessitant de gros débits peuvent faire appel à des batteries de forages de production et de réinjection. Les sommes des débits pompés et injectés doivent être équilibrées, le principe de fonctionnement est alors similaire à celui des doublets.

Ce cas est représentatif des opérations en triplet géothermique avec un forage de production et deux forages de réinjection. Cela pourrait être une solution à envisager sur le territoire de Nice Méridia, afin d'éviter toute problématique qui serait induite par la présence de sable dans le milieu et par le niveau statique assez proche de la surface (débordement du niveau d'eau en surface).

Les opérations de stockage thermique souterrain

Ce dispositif ne peut être envisagé sur Nice Méridia du fait de la circulation forte de la nappe alluviale visée par la géothermie.

La présentation qui suit est donnée à titre d'information.

Le stockage d'énergie thermique dans le sous-sol consiste à mettre à profit les propriétés des formations géologiques pour emmagasiner une énergie disponible et excédentaire à un instant donné - c'est-à-dire sans utilisation immédiate - et pour l'exploiter ultérieurement en période de demande. Le domaine d'application le plus courant du stockage thermique souterrain est celui de la gestion de l'énergie dans les bâtiments. La chaleur prélevée l'été pour refroidir les bâtiments peut être stockée pour être utilisée l'hiver. Mais d'autres applications existent comme celle du chauffage des serres maraîchères ou horticoles. On distingue deux types de stockage : les stockages diffusifs - c'est-à-dire avec champ de sondes géothermiques - et les stockages sur aquifères.

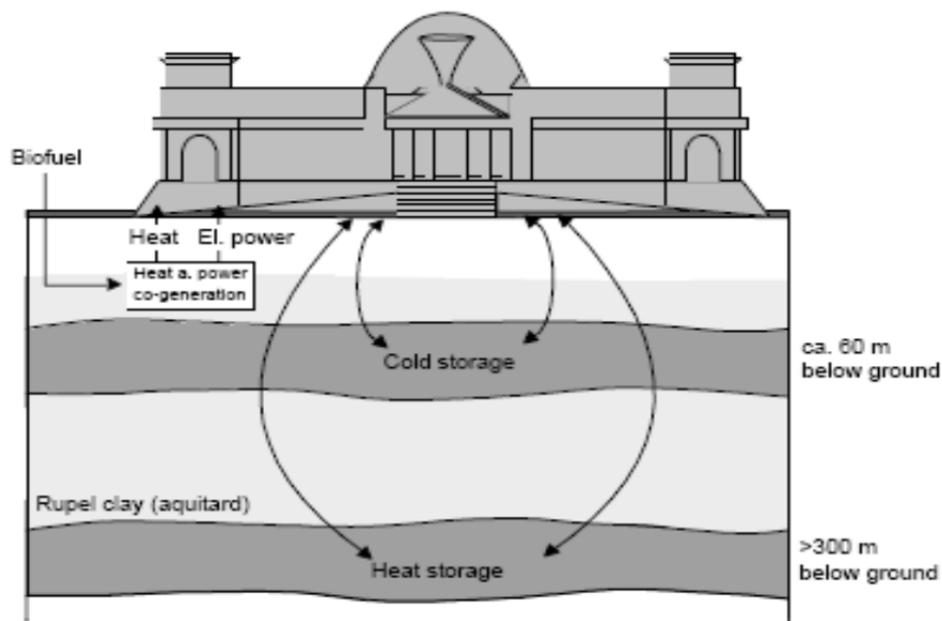


Illustration 6 : Opération de stockage souterrain.

Exemple : Doublet de stockage à puits chaud et puits froid : une zone chaude et une zone froide sont respectivement constituées autour de chacun des deux ouvrages. Ceux-ci font alternativement l'objet d'injections et de pompages suivant les phases d'exploitation. La disjonction des deux stocks permet de mieux protéger leur contenu énergétique ; ce système est envisageable si la vitesse d'écoulement de la nappe est suffisamment faible. Le niveau énergétique d'exploitation d'un forage en saison froide est amélioré par l'injection préalable d'eau chaude en période d'énergie excédentaire (ex : héliogéothermie pour le stockage de calories solaires).

Il est à noter que la mise en place d'un stockage géothermique dans une nappe souterraine s'avère compliquée en présence d'un courant de circulation qui existe notamment sur les nappes les plus superficielles (nappes alluviales). C'est le cas de la nappe concernée par cette étude.

2.3.2. Géothermie basse énergie

La technologie dite « échange direct » permet de valoriser les ressources énergétiques des aquifères profonds dont le niveau de température est suffisant pour assurer le chauffage de bâtiments sans nécessiter l'usage de pompes à chaleur. Elle est généralement associée à la mise en place et à l'exploitation de réseaux de chaleur urbains⁷. Ces réseaux sont aptes à desservir plusieurs milliers de logements par opération (en fonction des capacités de la ressource et des besoins des bâtiments, permettent ainsi de répartir sur un plus grand nombre de postes de consommation la charge des investissements sous-sol de production géothermique).

En France, de tels systèmes sont particulièrement développés dans le bassin parisien où plus de trente réseaux de chaleur urbains sont alimentés par des forages dans l'aquifère du Dogger à une profondeur avoisinant 1 700 m.

Dans cette étude, il est question uniquement de la géothermie TBE sur l'aquifère superficiel des alluvions, dans la mesure où il n'y a pas de ressources géothermales profondes prouvées.

2.4. RÉGLEMENTATION⁸

2.4.1. Réglementation nationale en vigueur

La géothermie est régie par le Code Minier en vertu de son article 3 qui donne une définition de la géothermie et du régime juridique qui lui est applicable. Ainsi, « *les 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* », sont considérés comme des mines. Une substance minière appartient à l'État et non au propriétaire du sol. L'exploitation d'une ressource minière nécessite donc des autorisations accordées par l'État.

En plus du Code Minier, les opérations de géothermie entrent dans le champ d'application de différents codes réglementaires dont le Code de l'Environnement qui concerne les cas les plus fréquents. Le Code de la Santé Publique et le Code Général des Collectivités Territoriales peuvent s'appliquer dans certains cas particuliers.

⁷Un réseau de chaleur, ou chauffage urbain, est un ensemble d'installations qui produisent et distribuent de la chaleur à plusieurs bâtiments pour le chauffage et/ou l'eau chaude sanitaire (ECS). Le réseau de chaleur est constitué d'un réseau primaire de canalisations empruntant le domaine public ou privé, transportant de la chaleur, qui alimente des postes de livraison (appelés sous stations) installés dans les immeubles des utilisateurs. Sur les mêmes principes, il existe des réseaux distribuant du froid, transporté sous forme d'eau glacée et destiné à la climatisation de locaux.

Les collectivités territoriales (communes ou groupement de communes) ont compétence pour créer un service public local de distribution d'énergie calorifique. Il y a actuellement en France près de 450 réseaux de chaleur qui chauffent l'équivalent de plus de 2 millions d'habitants dans leur vie quotidienne, au travail ou dans leurs loisirs, dans plus de 350 villes. Cela représente annuellement près de 25 000 GWh d'énergie distribuée à 24 000 sous-stations. En France, les 2/3 des bâtiments chauffés par des réseaux de chaleur sont des logements ; le tiers restant est constitué essentiellement de bâtiments du secteur tertiaire (dans lesquels on compte les établissements de santé, d'enseignement...)

⁸ Voir Annexes 1, 2 et 3

En fonction de leurs caractéristiques techniques (profondeur, puissance extraite, débit d'exploitation...), les opérations géothermiques peuvent être soumises à différents régimes d'autorisation ou de déclaration qui supposent le montage de dossiers administratifs plus ou moins approfondis selon les cas et des circuits d'approbation administrative plus ou moins long.

Les porteurs des projets de mise en place de la géothermie sur Nice Méridia devront effectuer les démarches administratives au titre du Code Minier et du Code de l'Environnement auprès de la DREAL PACA ou la DDTM 06.

Concernant le Code de l'Environnement, la démarche comprend une déclaration de la réalisation des forages et une demande d'autorisation pour prélèvement d'eau car, au vu des besoins thermiques, le volume prélevé dépassera le seuil de 200 000 m³/an. Il y aura également une demande d'autorisation à effectuer pour pouvoir réinjecter l'eau dans la nappe car les débits instantanés par doublet dépasseront le seuil de 80 m³/h.

Pour ce qui relève du Code Minier, les opérations de géothermie de Nice Méridia relèvent de géothermie basse température (ne pas confondre avec la géothermie basse énergie) car le débit calorifique dépasse 232 kW (global et par doublet). Cela implique deux procédures successives :

- une demande d'autorisation pour la recherche de gîte géothermique :
Il s'agit de conférer une autorisation de recherches par arrêté préfectoral après enquête publique. Celle-ci, désignée également par l'appellation « permis exclusif de recherches », est accordée, en vertu du décret n° 78-498 du 28 mars 1978, après instruction du dossier du demandeur pour une durée maximale de trois ans.
- une demande d'exploitation de gîte géothermique de basse température :
Elle est soumise à l'obtention d'un permis d'exploitation minier accordé par le préfet après enquête publique (article 99 du Code Minier) pour une durée maximale de 30 ans renouvelable par périodes de 15 ans maximum. Le titulaire d'une autorisation de recherches peut seul obtenir, pendant la durée de cette autorisation, un permis d'exploitation aux conditions de l'article 99 du code minier.

Une synthèse de la réglementation en vigueur est proposée en annexe.

Il faut noter que les instances de l'État concernées mènent actuellement une réflexion visant à faire évoluer la réglementation en vigueur de façon à l'adapter aux types d'opérations géothermiques qui se développent actuellement (très basse énergie, souvent faible profondeur et faible puissance).

2.4.2. Règlementation sur le territoire de Nice Méridia

Différentes dispositions sont à prendre en compte à l'échelle locale. Il s'agit notamment :

- des mesures générales de protection de la ressource en eau, liées aux Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE), Zones de Répartition des Eaux (ZRE) et périmètres de protection des captages d'Alimentation en Eau Potable (AEP) et de sources ;
- des compatibilités avec les documents d'urbanisme.

Concernant spécifiquement le territoire de Nice Méridia, il est à noter que :

- les forages d'eau pour la géothermie ou tout autre usage (hors AEP) ne peuvent excéder 50 m de profondeur ;

- tout prélèvement d'eau pour un usage géothermique doit systématiquement impliquer une réinjection de l'eau prélevée dans le même niveau aquifère (prévoir une même profondeur de pompage et de réinjection par exemple) ;
- le point de réinjection doit être situé à proximité du point de production afin de préserver l'équilibre hydrodynamique de l'aquifère⁹.

2.5. LES MÉCANISMES D'ACCOMPAGNEMENT

Les mécanismes d'accompagnement ont été mis en place par l'ADEME afin d'aider au développement de la géothermie. Ils sont de deux ordres :

- les aides financières ;
- les mécanismes de couverture des risques géologiques inhérents aux opérations de géothermie.

Concernant les aides financières, il existe des aides destinées aux particuliers qui ne seront pas développées dans ce chapitre.

Aides destinés aux opérations dans le collectif/tertiaire et pour les réseaux de chaleur

- **Aides pour les études de faisabilité**

L'ADEME a mis en place un dispositif d'aides financières spécifique à la géothermie pour la réalisation d'études (diagnostic ou faisabilité) et pour les missions d'assistance à maîtrise d'ouvrage.

L'aide aux études de faisabilité peut atteindre 25 % de subvention possible (en fonction des projets). Notons que l'aide publique totale est limitée à 50 %.

Le Conseil Régional propose également des aides aux études de faisabilité, destinées uniquement aux maîtres d'ouvrages publics.

- **Aides pour l'Investissement**

La mise en place du **Fonds Chaleur** renouvelable est un des engagements du Grenelle de l'environnement. Il concerne les opérations portées par les entreprises des secteurs primaires, secondaires, tertiaires et par les collectivités locales. L'objectif du Fonds Chaleur est de permettre aux installations produisant de la chaleur à partir d'énergies renouvelables d'être économiquement compétitives par rapport aux installations utilisant une énergie conventionnelle. Le montant exact des aides évalué au cas par cas pour les projets de géothermie, il est défini dans l'objectif d'atteindre un coût de production de l'énergie géothermale inférieur de 5 % à celui qui aurait été produit par le gaz pour la même opération. L'octroi de l'aide est subordonné à l'adhésion de l'opération à la couverture AQUAPAC (présenté ci-dessous).

Le niveau d'aide proposé peut être atteint par le Fonds Chaleur seul ou en combinaison avec :

⁹ Il faut veiller cependant à ce que cette proximité n'induit pas de recyclage entre les deux ouvrages. Ce point est détaillé dans la partie modélisation (chapitre 5).

- les aides du conseil régional de PACA ;
- les aides du Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

- **Les certificats d'économie d'énergie**

Le dispositif des certificats d'économies d'énergie (CEE), créé par les articles 14 à 17 de la [loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique \(loi POPE\)](#), constitue l'un des instruments phare de la politique de maîtrise de la demande énergétique.

Le principe des certificats d'économie d'énergie repose sur une obligation de réalisation d'économies d'énergie imposée par les Pouvoirs publics sur une période donnée aux vendeurs d'énergie (électricité, gaz, chaleur, froid et fioul domestique).

Les certificats sont obtenus à la suite d'actions entreprises en propre par les opérateurs ou par l'achat à d'autres acteurs ayant mené des opérations d'économies d'énergie. En cas de non-respect de leurs obligations, les obligés sont tenus de verser une pénalité libératoire de deux centimes d'euro par kWh manquant.

Suite au succès de la première période (mi 2006 - mi 2009) pour laquelle l'obligation d'économies d'énergie était de 54 TWh, le gouvernement a souhaité proroger le dispositif pour une seconde période triennale. Celle-ci a débuté le 1^{er} janvier 2011 et l'objectif d'économies d'énergies correspondant est de 345 TWh.

Une troisième période d'obligations d'économies d'énergie a été décidée en décembre 2013, avec l'objectif d'économiser 220 TWhcumac par an, réparti équitablement entre les vendeurs d'énergie sur la base du prix TTC des énergies (à hauteur de 75 %) et des volumes de ventes en kWh (à hauteur de 25 %). Le CCE sera actif du 1er janvier 2015 au 31 décembre 2017¹⁰.

Pour la nouvelle période, seuls les obligés, les collectivités sur leur patrimoine, l'ANAH et les bailleurs sociaux peuvent acquérir des CEE.

Un partenariat préalable à la réalisation d'opération doit être conclu avec les éligibles afin d'estimer le bénéfice environnemental et économique

Il existe quelques fiches standardisées concernant les PAC et les réseaux de chaleur (BAT-TH13 ; RES-CH-01 ; RES-CH-04...).

Remarque : Les aides du Fonds Chaleur ne sont pas cumulables avec les Certificats d'Économie d'Énergie (lorsque ceux-ci portent sur le même objet que l'aide du Fonds Chaleur).

- **Les aides spécifiques pour les réseaux de chaleur**

Les aides du Fonds Chaleur concernent la centrale de production de chaleur (doublet géothermique) mais également la construction du réseau de chaleur.

Une mesure incitative a été prise pour le développement de l'utilisation d'énergies renouvelables dans les réseaux de chaleur, en fixant le taux de TVA à 5,5 % pour les réseaux à plus de 50 % d'ENR.

¹⁰ Voir Annexe 4

Ainsi, globalement, la facture énergétique du client (utilisateur final) est composée :

- d'une part fixe (abonnement) dont la TVA est fixée à 5,5 % pour tout type d'alimentation ;
- et d'une part variable, proportionnelle à la consommation d'énergie, dont la TVA est fixée à 19,6 % ou à 5,5 % pour les réseaux utilisant plus de 50 % d'énergies renouvelables (loi du 13 juillet 2006).

Le Grenelle de l'environnement a également mis en place de nouvelles politiques publiques incitatives pour le développement des réseaux de chaleur.

La loi « Grenelle 1 » a notamment rendu obligatoire l'étude d'opportunité de création ou de raccordement à un réseau de chaleur/froid renouvelable pour toute opération d'aménagement soumise à étude d'impact.

La loi « Grenelle 2 » a permis de faciliter l'augmentation de la durée de concession des réseaux de chaleur qui utilisent des sources d'énergies renouvelables et de réviser la procédure de classement d'un réseau. En effet, cette procédure mise en place par le décret n° 81-542 du 13 mai 1981 n'a profité qu'à un seul réseau en raison de sa complexité de mise en œuvre.

Mécanismes de couverture des risques

- **La procédure AquaPac¹¹, pour les opérations de PAC sur aquifère superficiel**

Pour pallier à l'incertitude locale sur la disponibilité et/ou la pérennité de la ressource en eau souterraine, la garantie Aquapac® a été initiée en 1983 sous l'égide de l'ADEME (AFME à l'époque), d'EDF et du BRGM.

Elle offre une double garantie portant sur les ressources pérennes en eau souterraine :

- la garantie « recherche » couvre le risque d'échec consécutif à une ressource en eau souterraine insuffisante pour fournir le débit d'eau nécessaire au projet. Le taux de cotisation pour cette garantie est désormais de 5 %¹² du montant des ouvrages garantis en recherche ;
- la garantie « pérennité » couvre les risques de diminution du débit exploitable à terme et de détérioration de la qualité de l'eau qui seraient liées à une détérioration prouvée de la ressource (non considérées les variations saisonnières du débit et/ou les cycles hydrologiques statistiquement normaux). La durée de cette garantie est de 10 ans¹³, et le taux de cotisation pour cette garantie est de 4 % du montant des ouvrages garantis en pérennité.

Cette garantie est limitée aux installations d'une puissance thermique de 30 kW minimum.

Sa gestion est confiée à la SAF Environnement¹⁴. L'instruction des dossiers de demande de garantie et la décision d'octroi de garantie sont décidées par un comité AquaPac composé de trois représentants de : l'ADEME, de EDF et du BRGM. Ce comité se réunit périodiquement, avec la participation de la SAF Environnement. Il statue également sur la recevabilité des éventuels sinistres.

¹¹ Voir Annexe 5

¹² Le taux initial de 10 % a été abaissé à 5 % depuis le 1^{er} septembre 2005.

¹³ La durée initiale de la garantie était de 5 ans et a été portée à 10 ans en 1997.

¹⁴ SAF Environnement, 195 boulevard Saint-Germain, 75007 Paris – tél. : 01 58 50 76 76

Dans le cadre des projets géothermiques de Nice Méridia, la garantie AquaPac ne paraît pas nécessaire, car cette étude prouve la très bonne productivité de la nappe alluviale. Néanmoins, il pourrait s'avérer utile d'y souscrire pour permettre aux opérations d'être éligibles pour certaines aides financières.

3. Caractérisation hydrogéologique du milieu visé

3.1. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE LOCAL

Cette synthèse concise sur le contexte hydrogéologique local s'appuie principalement sur les travaux réalisés par le BRGM dans le cadre d'anciennes études¹⁵.

3.1.1. Géologie de la basse vallée du Var

Le contexte géologique de la basse vallée du Var est assez complexe et est composé principalement de trois domaines :

- 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.

3.1.2. Hydrodynamique de la basse vallée du Var

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

- la nappe des alluvions, la plus proche de la surface et composée de plusieurs niveaux aquifères ;
- les poudingues pliocènes ;
- l'aquifère profond correspondant aux 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 %).

¹⁵ **Moulin M., Salquebre 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

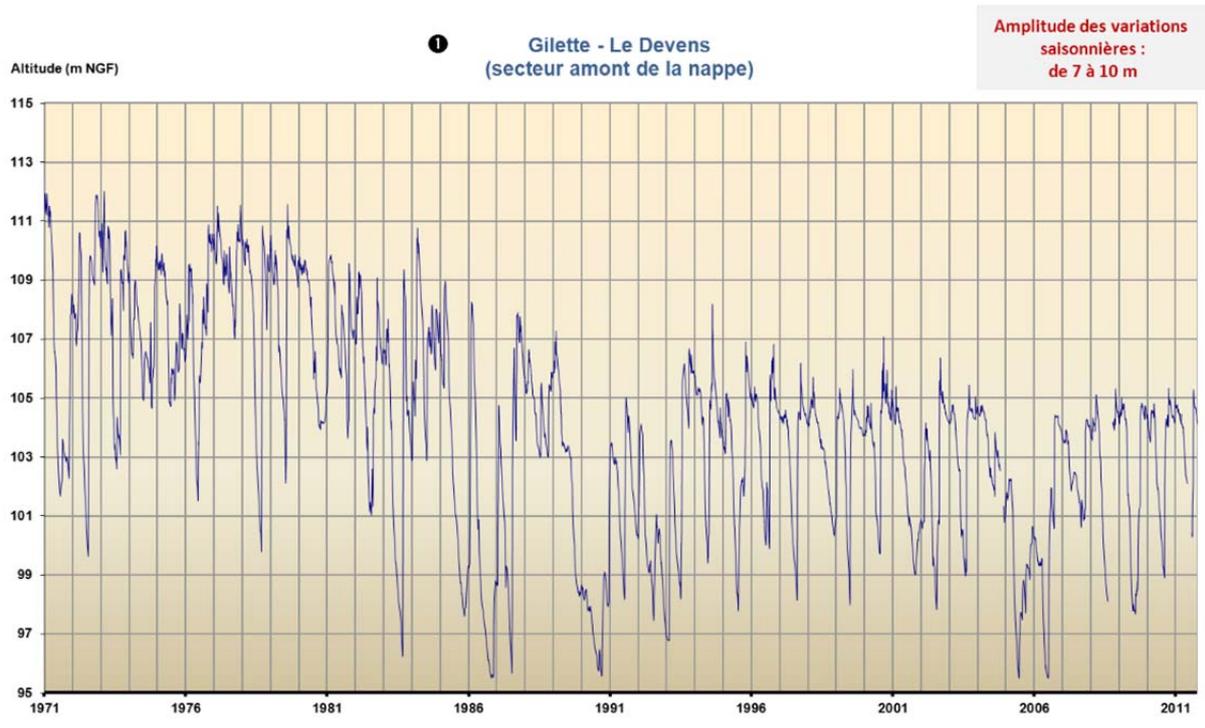


Illustration 7 : Régime piézométrique représentatif du secteur amont de la nappe des alluvions du Var (BRGM/RP-60742-FR).

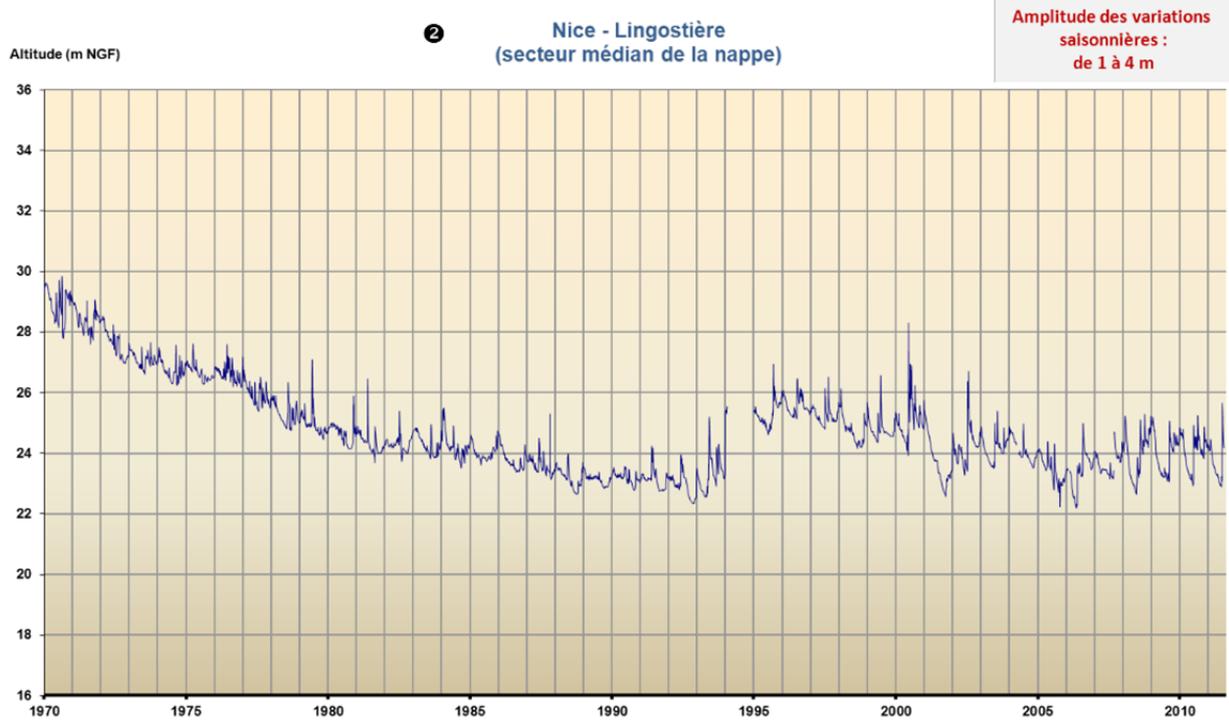


Illustration 8 : Régime piézométrique représentatif du secteur médian de la nappe des alluvions du Var (BRGM/RP-60742-FR).

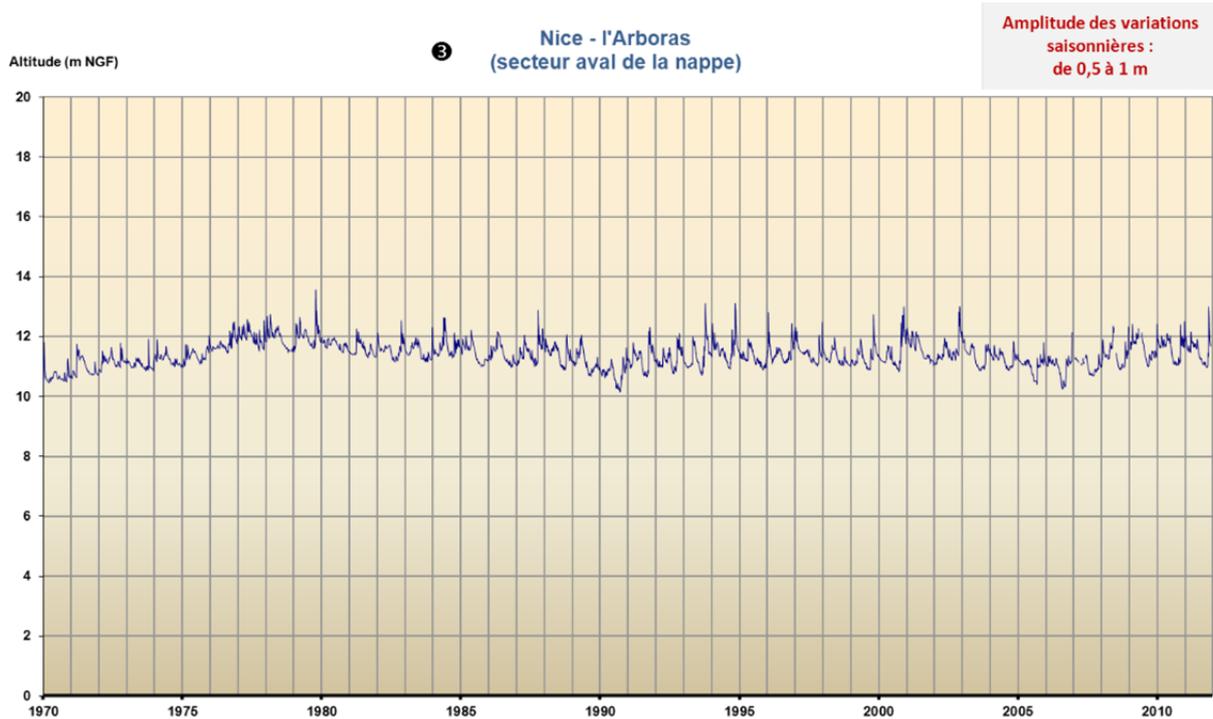


Illustration 9 : Régime piézométrique représentatif du secteur aval de la nappe des alluvions du Var (BRGM/RP-60742-FR).

La nappe alluviale dispose d'une forte perméabilité (10^{-2} à 10^{-3} m/s) permettant le transit d'un débit souterrain important estimé en moyenne à $4 \text{ m}^3/\text{s}$, provenant en grande partie de l'alimentation par infiltration du Var, le reste étant apporté par les poudingues encaissants.

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 de plus en plus 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 en comparaison avec 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 fluviales. 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 où l'infiltration des eaux fluviales conduit à ce dépassement de seuil. En crue, les eaux du fleuve sont très peu minéralisées et elles pénètrent massivement dans la nappe produisant une forte dilution des teneurs en ions ;
- contaminations bactériologiques : les analyses effectuées en 2008 sur les champs captants montrent que les contaminations bactériologiques 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

L'aquifère des poudingues pliocènes

Il s'agit d'une formation aquifère composée principalement de galets et de débris arrondis consolidés et cimentés. La perméabilité est relativement faible, de l'ordre de 10^{-6} m/s, et peut devenir localement forte dans les zones fracturées.

Cette formation dont l'épaisseur varie entre 100 et 200 m, constitue un réservoir d'eau important estimé à $320 \cdot 10^6$ 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ce dernier paramètre peut atteindre des valeurs supérieures dans la zone médiane (500 à 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et près du littoral (plus de 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)

La minéralisation des eaux est largement dominée par les éléments KCO₃ et Ca, 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 calcaire jurassique

Les calcaires jurassiques constituent une ressource 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.

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.

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 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux sont bicarbonatées calcaïques, avec un teneur en HCO_3 de 200 à 350 mg/l et en SO_4 de 40 à 100 mg/l.

3.2. CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE HYDROGÉOLOGIQUE

3.2.1. Objectifs de la campagne

Dans la perspective d'une modélisation hydrothermique du milieu et d'une simulation du comportement de l'aquifère sous l'impact de futures opérations de géothermie, une campagne de reconnaissance a été réalisée pour contribuer à combler les lacunes d'informations disponibles dans les bases documentaires et déterminer au mieux les propriétés pertinentes du sous-sol à l'échelle du site d'étude.

Au stade d'une reconnaissance nécessaire dans un contexte local, somme toute mal connu, la campagne, centrée sur l'aquifère des alluvions du Var, a eu les principaux objectifs suivants :

- meilleure connaissance de la géologie (nature, épaisseur, structure des terrains) : depuis les terrains de la couverture jusqu'à la profondeur maximale de 30 m autorisée par le SAGE¹⁶ ;
- meilleure connaissance de l'hydrogéologie de l'aquifère alluvial (valeurs des paramètres pertinents, piézométrie, sens de l'écoulement) ;
- optionnellement, la possibilité de maintenir l'existence des piézomètres sera discutée à la fin de ce projet afin de créer un observatoire géothermique de la nappe permettant de gérer les risques que peut impliquer la multiplicité d'opérations de géothermie dans la zone étudiée. Ces piézomètres ont permis un suivi continu du niveau de la nappe et de sa température, tout au long de l'étude, à partir de juin 2013.

3.2.2. Nature et localisation des travaux

Sur l'ensemble du site de Nice Méridia, il a été décidé l'exécution d'un forage principal pour réaliser des essais de nappe par pompage ainsi que trois piézomètres pour le suivi du niveau de la nappe sous l'impact des essais et pour un éventuel suivi sur le long terme pour une gestion optimale de la coexistence de plusieurs opérations de géothermie sur le site.

¹⁶ La nouvelle version du SAGE de la basse vallée du Var pourrait autoriser une profondeur de forage allant jusqu'à 50 m.

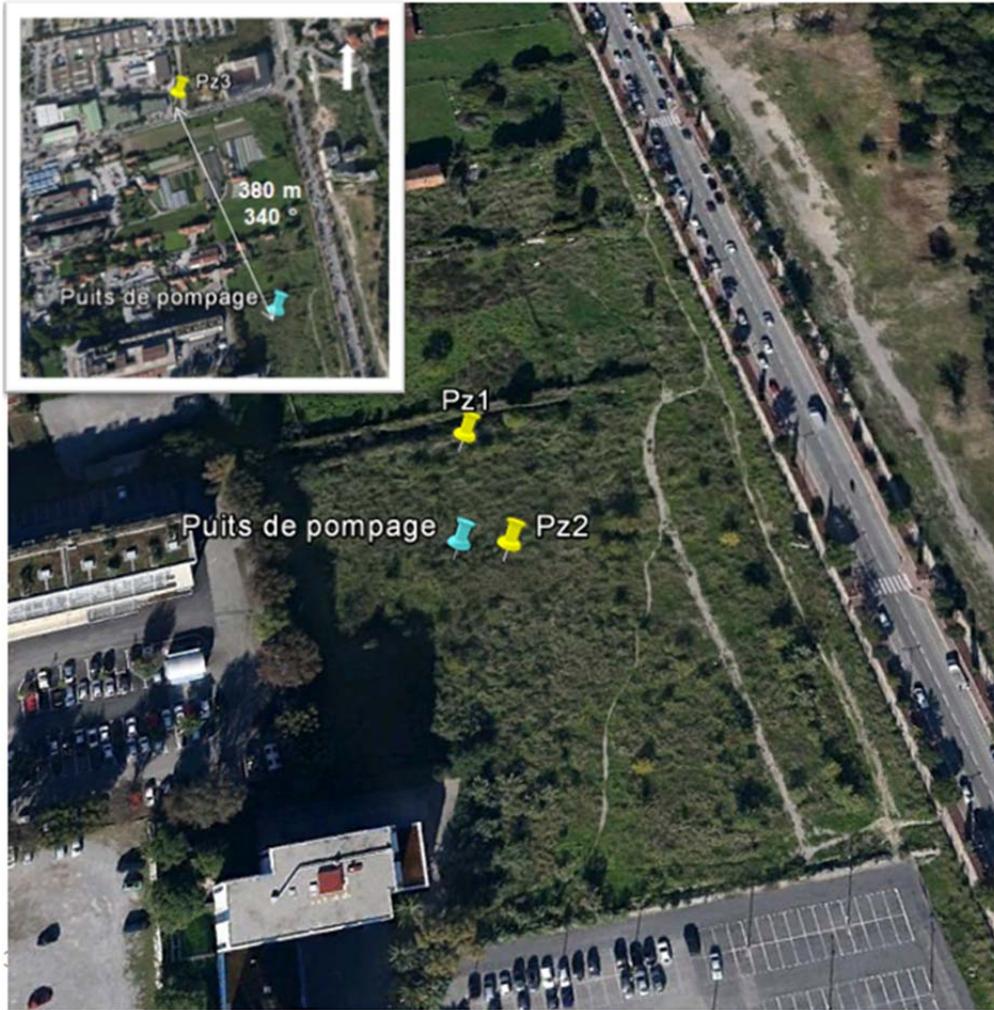


Illustration 10 : Localisation des ouvrages sur image satellite.

La localisation et la disposition des ouvrages F1, Pz1 et Pz2 ont été déterminées de façon à permettre une variation significative (30 cm) du niveau de la nappe dans les deux piézomètres au bout de 24 heures de pompages à 150 m³/h (pompage prévu sur environ 72 h).

À partir des données hydrogéologiques estimées de la nappe (transmissivité et coefficient d'emmagasinement), la distance à respecter entre F1 et le piézomètre le plus éloigné ne devait pas excéder une trentaine de mètres. Le sens de l'écoulement de la nappe, supposé nord-sud, a été pris en compte. Concernant le 3^{ème} piézomètre Pz3, il a été placé à la limite nord du site pour permettre le relevé du niveau de la nappe sur un périmètre étendu.

Les coordonnées des forages en projection RGF93CC44 sont les suivantes :

Forage	Feuille cadastrale	Parcelle	Coordonnées (m)		Altitude (m)
			X	Y	
F1	000 OH 01	340	2 038 775	3 173 080	+16 m NGF
Pz1			2 038 775	3 173 110	+16 m NGF
Pz2			2 038 785	3 173 080	+16 m NGF
Pz3		294	2 038 585	3 173 405	+17 m NGF

Tableau 1 : Localisations cadastrales et géographiques des ouvrages.

3.2.3. Observations géologiques

Les quatre forages réalisés mettent en évidence l'existence d'un premier niveau à faciès alluvial, composé principalement de sables gris fins (60 à 70 % du volume) et de galets petits à moyens dont la taille augmente avec la profondeur. La proportion de ces galets devient plus prépondérante en se dirigeant vers le mur de ce premier horizon alluvial situé à environ 15 mètres de profondeur.

La première transition, située entre 15 et 18 m de la surface, est une couche de vase marneuse grise, plastique à molle, avec quelques intercalations tourbeuses et du liant sablo-marno-limoneux. Il est à noter la présence de végétaux et de morceaux de bois. Ce niveau apparaît comme ayant une perméabilité très faible.

Le troisième niveau rencontré est un faciès alluvial dont les premiers mètres sont composés en très large partie de sables grossiers gris. Les horizons plus bas sont plus typiques des alluvions avec la présence de plus en plus marquée de galets de différentes tailles.

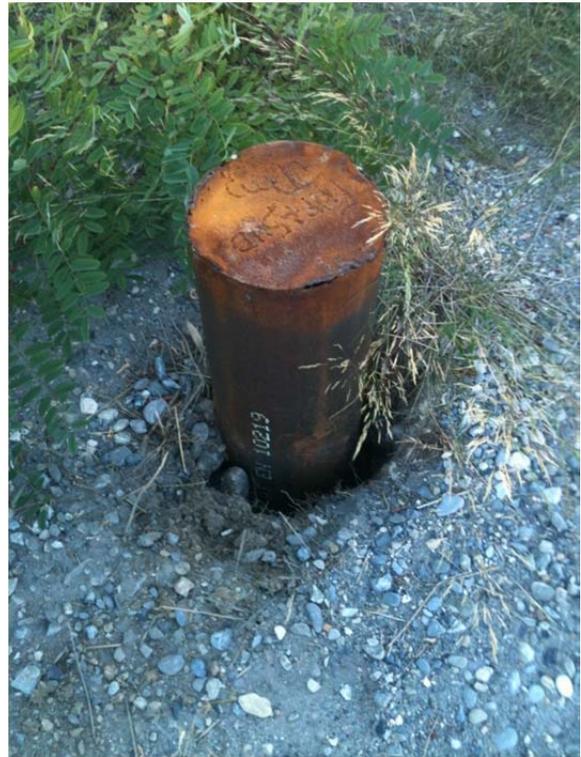


Illustration 11 : Tête du forage de test avec des éléments (sable gris et galets) issus du sous-sol.

Ce niveau est connu pour être le plus productif dans les alluvions supérieures du Var.

La profondeur des forages ayant été limitée à moins de 30 m, suivant les obligations du SAGE en vigueur lors de la réalisation des travaux, il n'a pas été possible d'observer une transition de faciès s'opérant plus en profondeur. Cependant, les connaissances acquises grâce aux études réalisées dans ce secteur indiquent la présence d'une couche argileuse constituant un écran imperméable entre les alluvions décrites ci-avant et les formations plus basses. Cet écran est parsemé localement de fenêtres permettant une communication hydrodynamique entre les niveaux de part et d'autre de la couche. Il est à noter que la présence de « fenêtres » est très limitée dans le secteur de Nice Méridia et les zones environnantes.

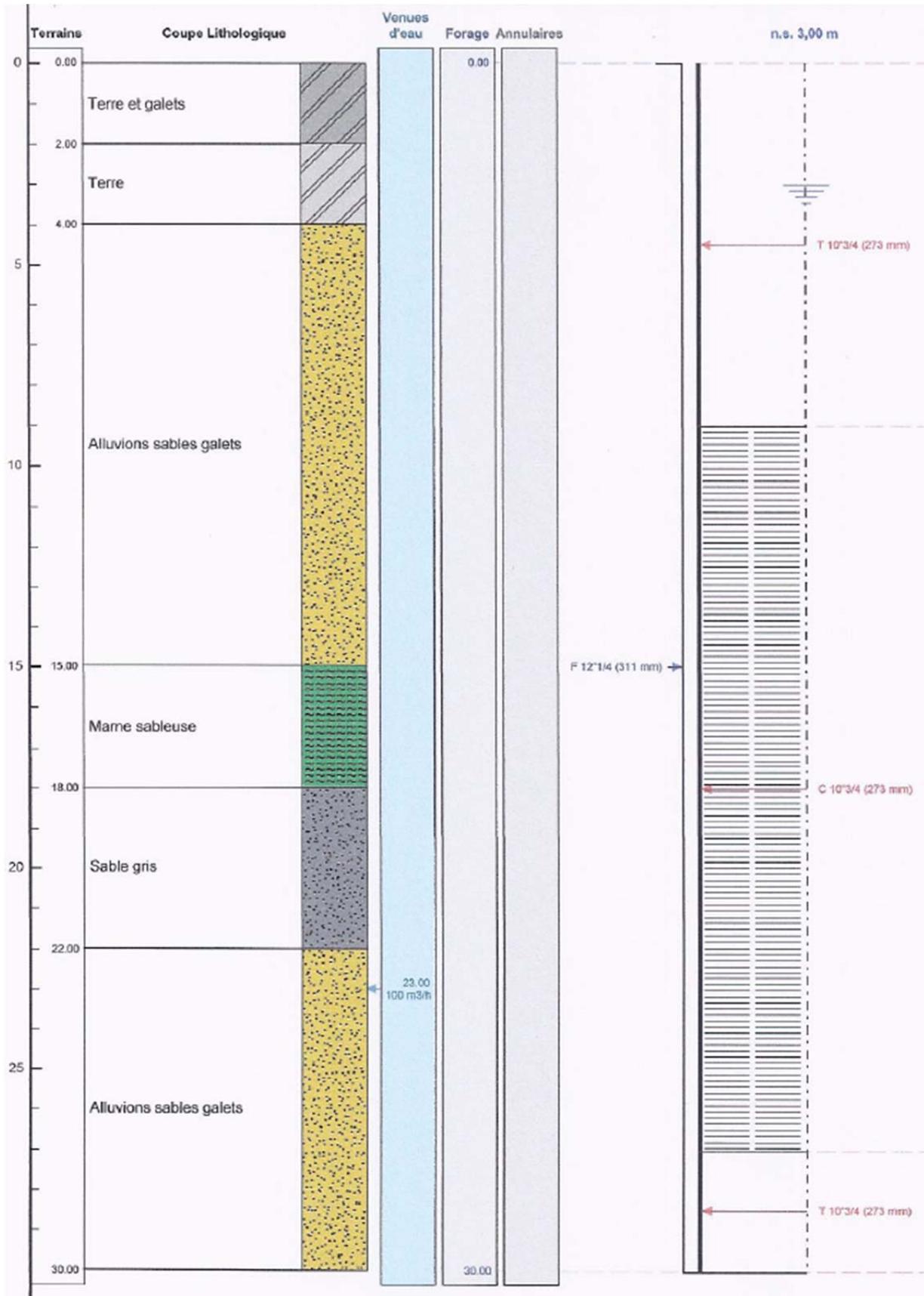


Illustration 12 : Coupe lithologique du forage principal F1.

4. Mise en place des essais de pompage

4.1. RÉALISATION DES ESSAIS DE POMPAGE ET ACQUISITION DES DONNÉES

4.1.1. Historique

Deux types d'essais ont été programmés :

- un essai par paliers d'une heure chacun, à 50, 100 et 150 m³/h avec arrêt d'une heure entre chaque palier ;
- un essai longue durée de 72 heures à 150 m³/h.

Contrairement a ce qui était prévu :

- l'essai par palier a été réalisé par paliers enchainés contrairement aux recommandations du cahier des charges. De plus, le troisième palier ne dure que 40 mn. Ces modifications sont contraires aux règles de réalisation des essais par paliers ;
- l'essai longue durée a été interrompu au bout de 34 heures. Il a été repris après 9 heures d'arrêt. Cette interruption réduit le rayon d'investigation de l'essai.

Néanmoins, après le traitement des résultats et l'interprétation des essais, ces derniers ont pu être validés, la cohérence des mesures n'ayant pas été mise en cause.

4.1.2. Mesures des données

Les niveaux ont été suivis par des appareils d'acquisition automatique sur le forage de pompage (FP) et les trois piézomètres.



Illustration 13 : Modèle de sonde utilisée pour la mesure, l'enregistrement et le stockage des données de température et de niveau piézométrique (mesure toutes les 10 minutes).

4.2. REPRÉSENTATION ET ANALYSE DES DONNÉES

4.2.1. Représentation des données brutes

La représentation des données brutes permet de repérer les éventuelles anomalies.

Le rabattement a été calculé dans un premier temps en prenant un rabattement nul à 15 h 20 le 28/05/2013, soit au début des essais par paliers pour l'ensemble des ouvrages.

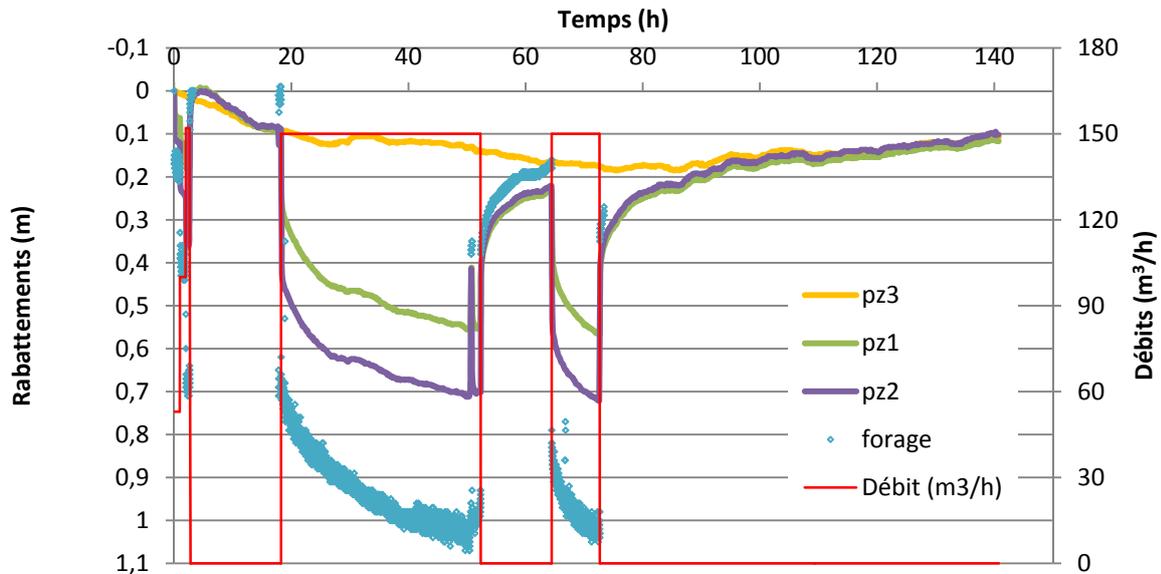


Illustration 14 : Données de rabattement sur l'ensemble des ouvrages.

D'après les comportements des courbes :

- le piézomètre numéro 3 ne semble pas influencé par le pompage. Sa situation en amont par rapport au sens d'écoulement du Var (et par conséquent de la nappe des alluvions) et son éloignement du forage (380 m) rendent probable cette situation ;
- une variation naturelle de la nappe est présente. Cette variation est très probable au vu de l'hydrologie du Var mesurée entre mai et juin 2013 et des relations supposées de réalimentation de la nappe par le Var. Le piézomètre 3 permet de suivre cette variation.

Les données au puits de pompage sont bruitées. On constate de plus que des valeurs négatives de rabattements sont présentes ce qui implique que la nappe n'est potentiellement pas au repos.

4.2.2. Anomalies et corrections apportées

De manière à corriger les essais des variations naturelles de la nappe, les rabattements observés en Pz3 ont été soustraits aux rabattements observés sur les autres ouvrages.

Le rabattement a ensuite été recalé pour obtenir un rabattement nul au début de l'essai « longue durée ».

La figure suivante permet de visualiser les rabattements obtenus après ces modifications.

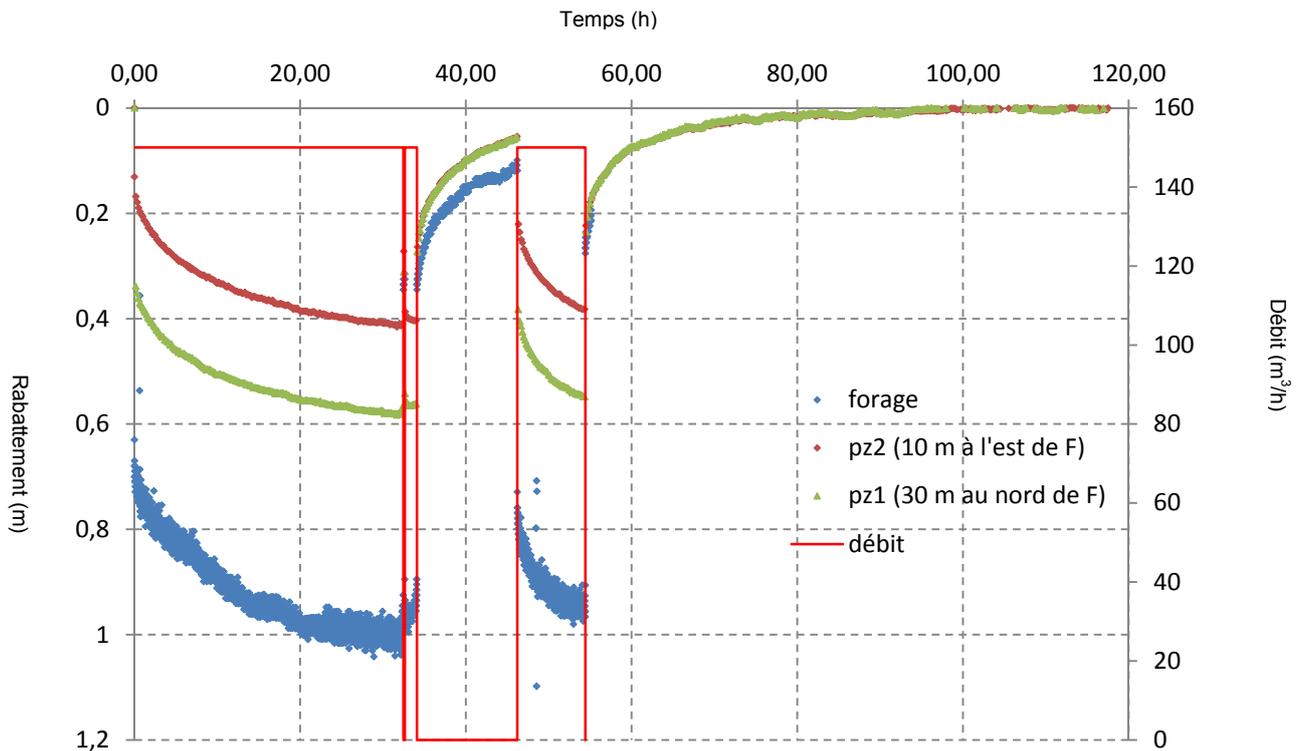


Illustration 15 : Données de rabattement corrigées sur le forage, Pz1 et Pz2 lors de l'essai longue durée.

4.3. INTERPRÉTATION DE L'ESSAI LONGUE DURÉE

4.3.1. Observation des courbes

Lors de la première descente du niveau d'eau, on peut réaliser les observations suivantes sur les courbes des rabattements tracées en échelle logarithmique (Illustration 16) :

- les courbes ont un comportement proche entre le forage et les deux piézomètres ;
- les courbes de descente présentent « trois phases » :
 - les premières minutes : un abaissement rapide de la nappe y compris dans les piézomètres est présent. Le pas de temps ne permet pas de voir précisément l'arrivée du cône de rabattement aux piézomètres hormis le point à 1 mn dans le piézomètre 2 (le plus proche),
 - entre 1 et 100 mn : une première stabilisation des courbes de rabattement est présente dans les piézomètres 1 et 2. Cette stabilisation est aussi visible sur le forage de test,
 - à partir de 300 mn : les courbes de rabattement des piézomètres et du forage s'alignent selon des droites. Les pentes des droites sont identiques sur les deux piézomètres tandis que celle du forage présente une pente légèrement supérieure.

Lors de la remontée, les rabattements des deux piézomètres se rejoignent dès les premières minutes. Les rabattements du forage restent légèrement supérieurs à ceux des piézomètres.

Lors de l'essai, le Var n'a pas été perçu et il n'y a pas eu de stabilisation du rabattement de la nappe.

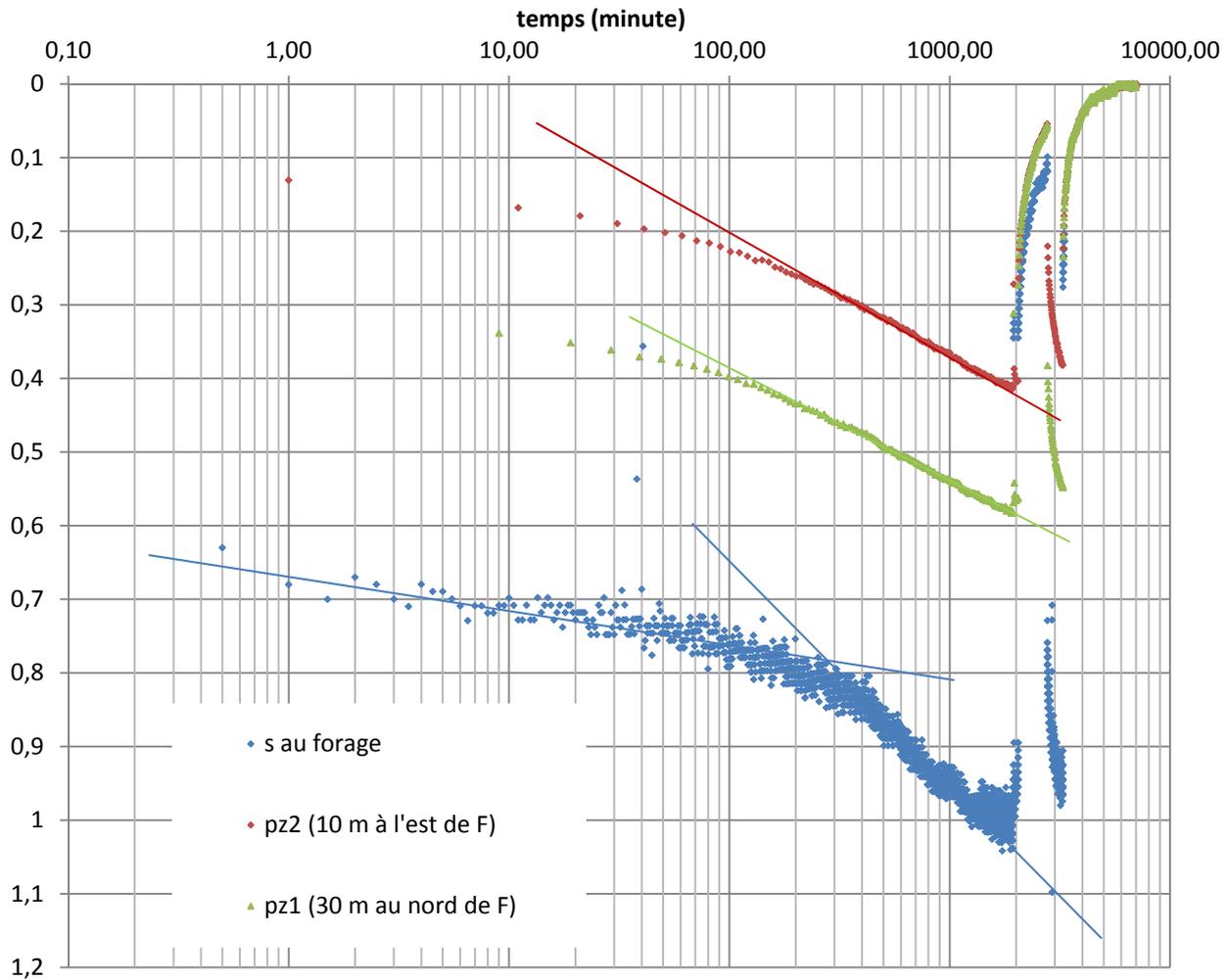


Illustration 16 : Courbes de rabattement corrigée des effets de nappe lors de la première descente.

4.3.2. Hypothèse

Les différentes observations effectuées ci-dessus permettent de formuler les hypothèses suivantes :

- hypothèse 1 : la partie de la courbe comprise entre 1 et 100 mn est influencée par la présence d'un effet de nappe libre et/ou de drainance. À partir de 300 mn, la courbe correspond au rabattement de la nappe dans le cadre de la formule de Theis (écoulement radial dans un aquifère homogène isotrope) et permet d'obtenir la transmissivité et le coefficient d'emmaganement. Les limites de l'aquifère ne sont pas atteintes ni le régime permanent ;
- hypothèse 2 : les ouvrages se situent dans une zone chenalisée (typique de ce type de milieu) et la deuxième partie de la courbe (à partir de 100 mn) correspond à l'influence d'une ou de plusieurs frontières imperméables.

4.3.3. Reproduction du comportement par modèle analytique et calcul des paramètres hydrodynamiques

L'interprétation a été réalisée avec le logiciel OUAIP qui permet d'interpréter un essai au moyen de solutions analytiques. Les paramètres hydrodynamiques ont été évalués dans le cas des

deux hypothèses formulées sur le comportement de l'aquifère au droit des ouvrages. L'interprétation est réalisée sur les deux piézomètres puis au forage.

Piézomètre numéro 2 (Pz2)

L'utilisation de la formule de Theis seule permet de reproduire le rabattement à partir de 200 minutes (cf. Illustration 17). Les paramètres obtenus sont :

- transmissivité : $4,7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$;
- coefficient d'emmagasinement : 3×10^{-2} .

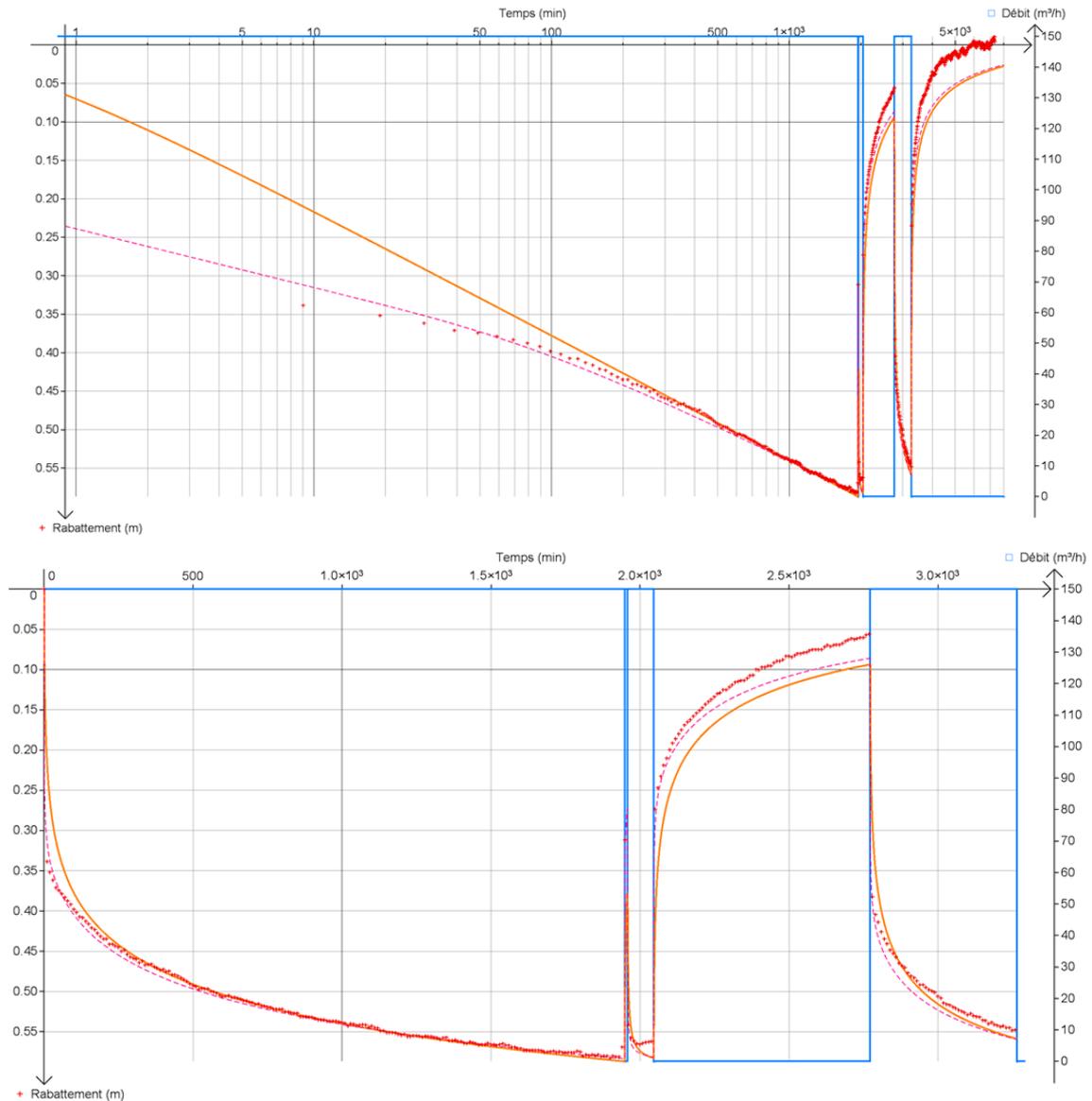


Illustration 17 : Rabattement et interprétation sur Pz2.
(courbe orange : hypothèse 1, courbe en pointillé : hypothèse 2 , points rouges : rabattements mesurés).

L'utilisation de la formule de Theis avec l'effet d'une limite imperméable permet de reproduire le comportement des rabattements sur l'ensemble de la descente. Les paramètres obtenus sont :

- transmissivité : $0,15 \text{ m}^2/\text{s}$;

- coefficient d'emmagasinement : 1×10^{-4} ;
- distance à la limite : 2 000 m.

Piézomètre numéro 1 (Pz1) :

L'utilisation de la formule de Theis seule permet de reproduire le rabattement à partir de 200 mn (cf. Illustration 18). Les paramètres obtenus sont :

- transmissivité : $4,6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$;
- coefficient d'emmagasinement : 3×10^{-2} .

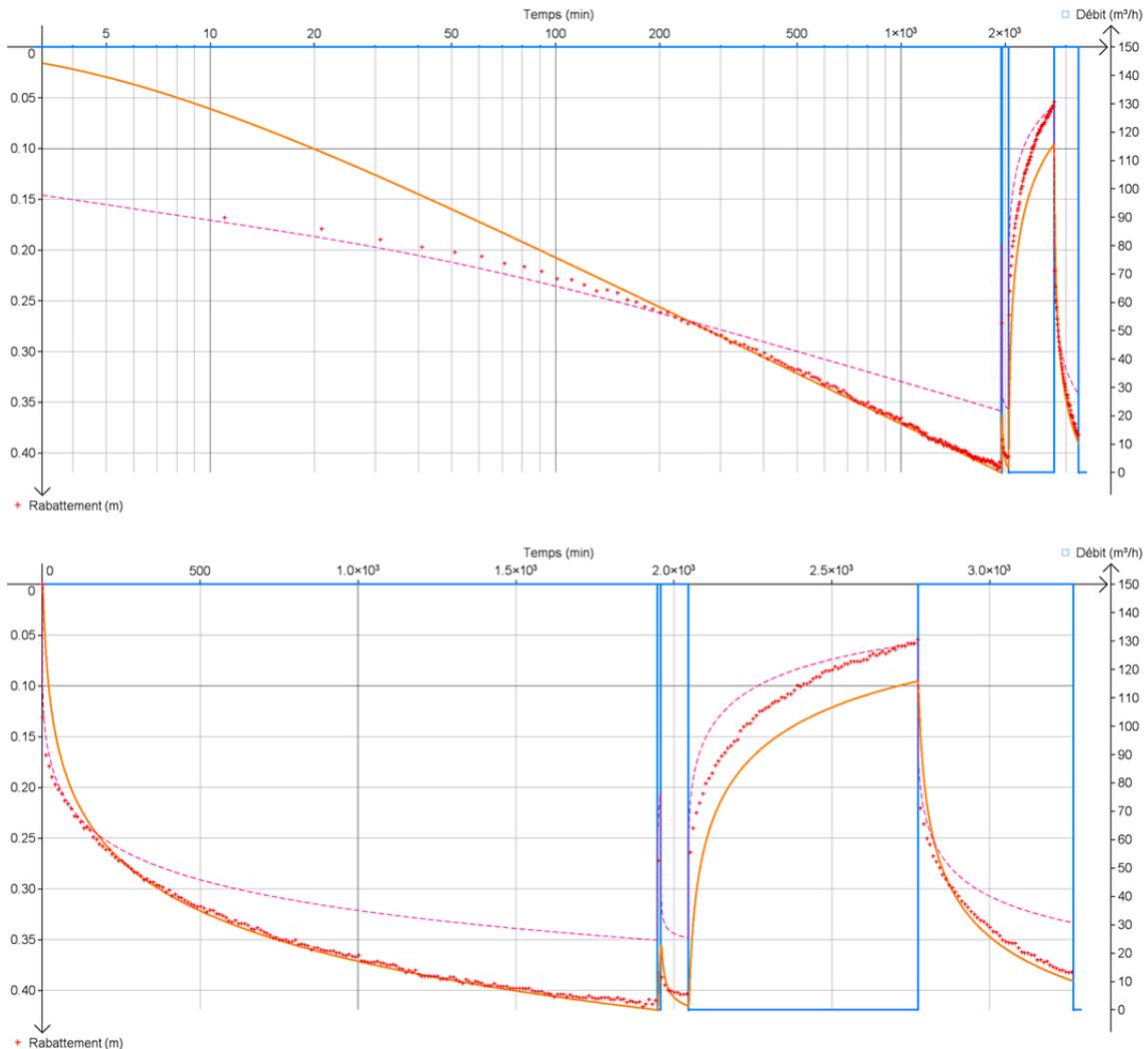


Illustration 18 : Rabattement et interprétation sur Pz1.
(courbe orange : hypothèse 1, courbe en pointillé : hypothèse 2, points rouges : rabattements mesurés).

Contrairement à ce qui est observé sur Pz2, l'utilisation de la formule de Theis avec l'effet d'une limite imperméable ne permet pas de reproduire le comportement des rabattements à partir de 200 mn. Les paramètres utilisés pour cette simulation sont (courbe en pointillé rouge) :

- transmissivité : $0,15 \text{ m}^2/\text{s}$;
- coefficient d'emmagasinement : 1×10^{-4} ;
- distance à la limite : 2 000 m.

Forage

L'utilisation de la formule de Theis seule permet de reproduire le rabattement à partir de 200 mn (cf. Illustration 19). Les paramètres obtenus sont :

- transmissivité : $3,8 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$;
- coefficient d'emmagasinement : 0,14 (attention cette valeur est considérée uniquement comme un paramètre de calage au forage) ;
- facteur de skin : -1,8.

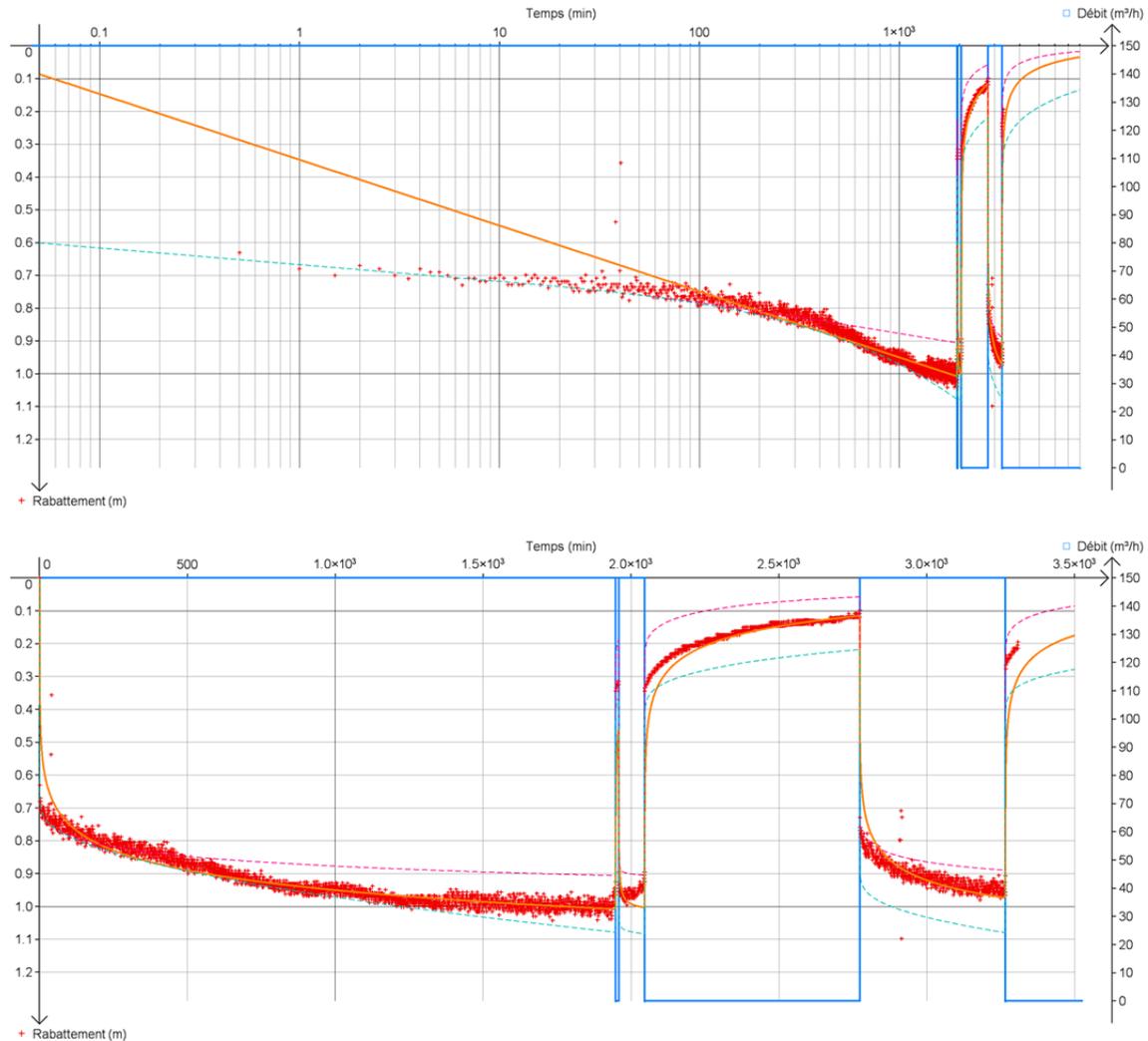


Illustration 19 : Rabattement et interprétation sur le forage.
 (courbe orange : hypothèse 1, courbe en pointillé rouge : hypothèse 2, courbe en pointillé bleu : rajout d'une limite imperméable, points rouges : rabattements mesurés).

L'utilisation de la formule de Theis avec l'effet d'une limite imperméable ne permet pas de reproduire le comportement des rabattements à partir de 200 mn. De manière à vérifier le raisonnement, une deuxième frontière imperméable a été ajoutée (courbe bleu en pointillé). Cette dernière hypothèse surestime les rabattements à partir de 1 500 mn. Les paramètres utilisés pour cette deuxième hypothèse sont :

- transmissivité : $0,15 \text{ m}^2/\text{s}$;
- coefficient d'emmagasinement : 1×10^{-4} ;

- facteur de skin : 7 ;
- distance à la première limite : 2 000 m ;
- distance à la deuxième limite : 3 500 m.

4.3.4. Vérification de l'ordre de grandeur sur Pz3

La simulation des rabattements sur Pz3 des différents comportements observés sur les Pz1, Pz2 et le forage donne un rabattement compris entre 10 et 20 cm.

Ce dernier aurait donc été observée dans le cas d'un aquifère homogène. Il renforce l'hypothèse de frontières imperméables ou semi-imperméables.

4.4. CONCLUSIONS SUR LES CARACTÉRISTIQUES DE LA NAPPE

4.4.1. Discussion

La simulation par la solution analytique de Theis avec l'ajout d'une ou de deux limites imperméables (hypothèse 2) ne permet pas de reproduire le comportement observé sur le piézomètre 2 et le forage. Toutefois, les solutions analytiques utilisées sont construites pour une géométrie simple du milieu. Hors, les écoulements dans les alluvions sont souvent de type chenalisés et relativement inhomogènes. La géométrie réelle dans ce type de milieu serait plus proche d'une forme de biseaux ou encore peuvent présenter une diminution progressive de la transmissivité.

Le temps de l'essai ne permet pas d'être certain de l'atteinte des limites de l'aquifère. Notamment, le Var (moins de 1 000 m, limite de recharge) n'est pas atteint. Les poudingues, formant l'encaissant de la nappe des alluvions peuvent aussi constituer une frontière à moins de 500 m avec un comportement inconnu.

L'hypothèse d'un effet de drainance est probable au vu des deux couches productrices captées par le forage. De plus, la profondeur de la première couche productrice (entre 3 et 4 m) oriente vers la présence d'une nappe libre. En l'absence d'éléments complémentaires et d'un test de plus longue durée, cette hypothèse est privilégiée.

Toutefois, la présence de frontières imperméables n'est pas à exclure. En effet, l'absence d'impact sur le piézomètre 3 et la différence de comportement entre le forage et les piézomètres lors de la remontée pourraient indiquer la présence de limite(s) imperméable(s) et d'hétérogénéité.

Les décalages observés entre les données et les modèles lors des remontées de pression sont probablement liés :

- à la méthode utilisée pour éliminer les variations naturelles de la nappe ;
- à une différence de piézométrie entre les deux piézomètres et le forage (liée à la présence des champs captant et à l'hétérogénéité du milieu).

4.4.2. Résumé des paramètres hydrodynamiques

Le tableau suivant résume les paramètres hydrodynamiques obtenus sur les différents ouvrages :

	Forage de test	Pz1	Pz2
Hyp 1 :	$T : 3,8 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$	$T : 4,6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ $S : 3 \times 10^{-2}$	$T : 4,7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ $S : 3 \times 10^{-2}$
Hyp 2 : (limite imperméable)	$T : 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ Distance aux limites : 2000 et 3500 m	$T : 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ $S : 1 \times 10^{-4}$ Distance à la limite : 2000 m	$T : 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ $S : 1 \times 10^{-4}$ Distance à la limite : 2000 m

Tableau 2 : Résumé des résultats des essais selon des deux hypothèses de travail.

Les résultats de l'essai par paliers n'ont pas été interprétés, car sa réalisation a été un échec.

5. Modélisation hydrothermique

5.1. CONCEPTION DU MODÈLE DE LA NAPPE

Il s'agit dans cette partie de construire un modèle hydrodynamique tridimensionnel représentatif du sous-sol visé par l'exploitation géothermique. Ce modèle constitue une superposition de grilles de mailles issues d'un découpage de l'espace selon les trois dimensions, aboutissant à un assemblage de cellules ordonnées de façon régulière et interconnectées hydrauliquement.

L'objectif de ce travail est d'assurer la préservation de la nappe interceptée tout en optimisant la performance de son exploitation géothermique. Trouver le juste équilibre entre ces deux objectifs antinomiques est un enjeu important et son traitement doit s'effectuer de façon précise via ce type de modélisation hydrodynamique qui permet de simuler le comportement de l'aquifère sous l'impact des opérations de géothermie.

Le rendu final de la modélisation sera d'autant plus juste que le comportement de l'aquifère reproduit par les calculs du modèle est proche de la réalité. L'essai de nappe par pompages au droit du site d'étude ont été réalisés dans ce sens afin d'améliorer la connaissance sur l'état hydrodynamique et thermique réel de la nappe.

Les résultats obtenus grâce aux tests ont ensuite été complétés par des éléments acquis via des bases de données ou des études hydrogéologiques, et qui concernent des périmètres plus ou moins étendus autour du secteur de Nice Méridia.

Les données du sous-sol utilisées pour la modélisation sont de nature géométrique liée à la topographie et la géologie du terrain, hydrodynamique (transmissivité, coefficient d'emmagasinement, piézométrie, etc.) et thermique (température, capacité calorifique, etc.).

5.1.1. Données brutes et extension du modèle

Avant la construction géométrique du modèle, il faut fixer le périmètre de la première zone à modéliser. Il s'agit du périmètre élargi qui permet de concevoir la géométrie globale avant de restreindre le modèle à la zone de Nice Méridia et son périmètre proche.

Il existe un seul cours d'eau s'écoulant à proximité du site (le Var à moins d'un kilomètre) qui pourrait constituer un potentiel de charge imposé en limite. Le Var a donc été inclus dans la première zone de modélisation, et l'extension vers l'est et l'ouest aux zones de monts a été limitée, car il s'agit de terrains dont le comportement géologique et hydrodynamique ne suit pas la même logique qu'en vallée, et qui somme toute est assez mal connu.

La source de données principale pour construire le modèle a été la BSS (Banque du Sous-Sol¹⁷). Comme le montre l'illustration 21, la zone cadre de la modélisation comporte un nombre assez important de forages, répartis principalement sur une diagonale NW-SE. Les zones peu

¹⁷ Il s'agit d'une base de données gérée par le BRGM qui recense les fiches de plus de 700 000 ouvrages sur l'ensemble du territoire français.

Cette base de données est accessible au grand public sur le site internet infoterre.brgm.fr

ou pas explorées (angles NE et SW) correspondent aux monts bordant la vallée du Var dans ce secteur.

Cependant, malgré la multitude d'ouvrages présents, laissant présager d'une très bonne connaissance du sous-sol, il s'est avéré que seuls 22 ouvrages présentaient des données fiables et exploitables.

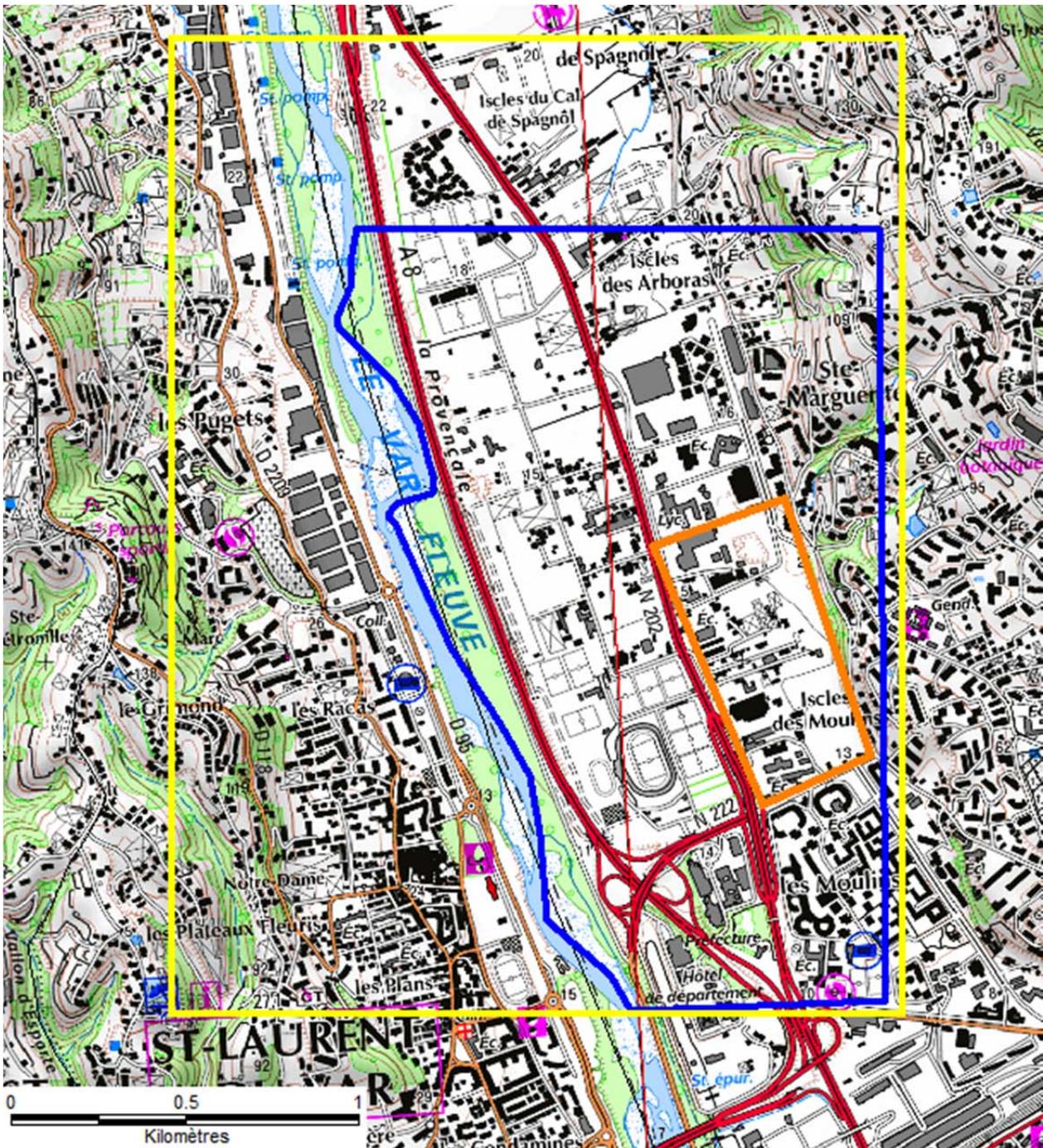
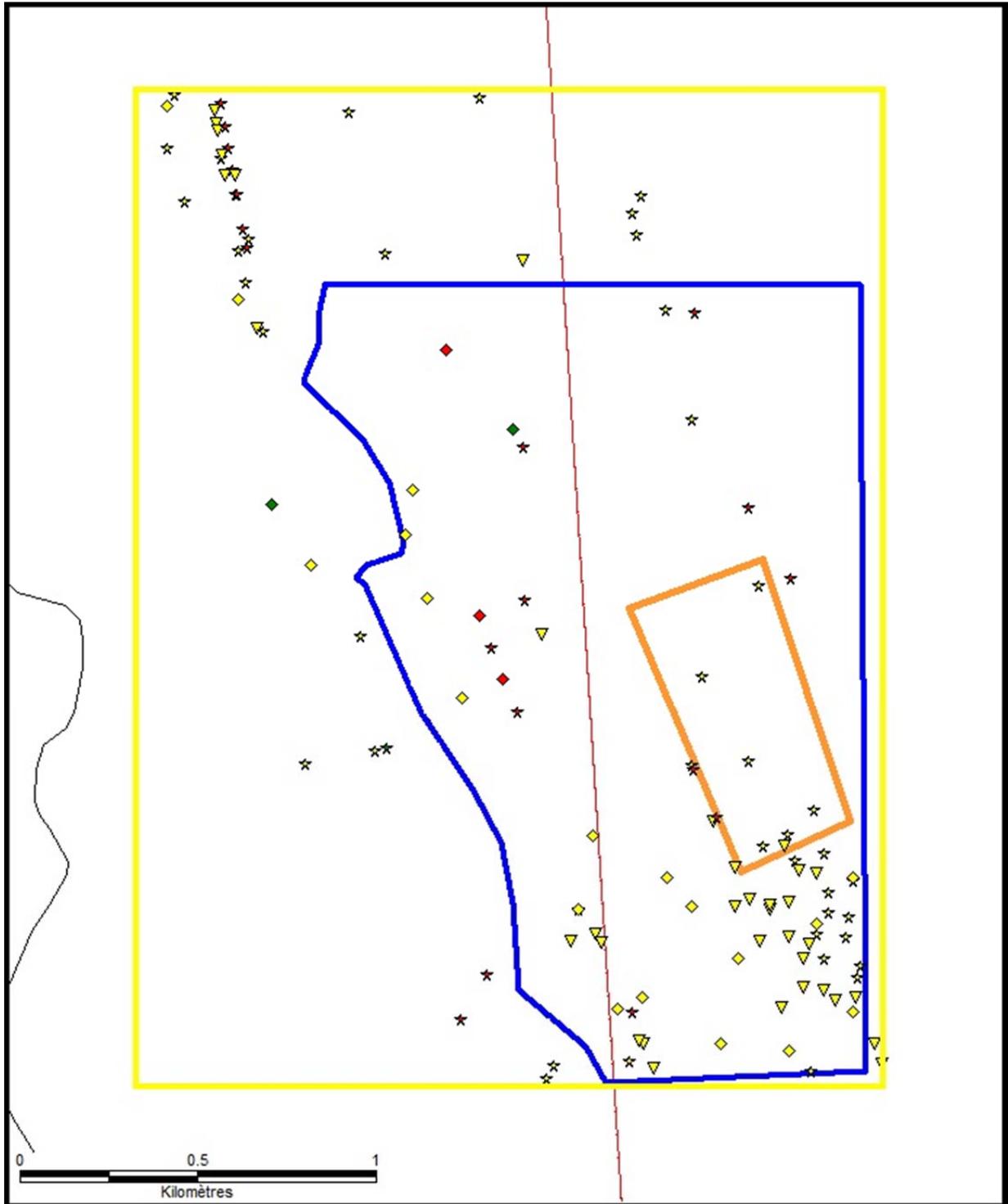


Illustration 20 : Les différents périmètres concernés par la modélisation.
(Périmètre jaune : zone ayant permis de construire la géométrie du modèle – Périmètre bleu : découpage utilisé pour le calage hydrodynamique – Périmètre orange : secteur de Nice Méridia)



Coupes :

- ▼ Présence d'un log vérifié
- ◆ Présence autre coupe
- ★ Pas de coupe

Piézométrie et documents scannés :

- Bleu Piézométrie sans documents
- Vert Piézométrie et documents
- Jaune Documents sans piézométrie
- Rouge Ni document ni piézométrie

Illustration 21 : Données de la BSS dans le périmètre de la modélisation.

Les critères de sélection des ouvrages ont été de retenir :

- les ouvrages disposant d'une coupe lithostratigraphique vérifiée ;
- les ouvrages ayant atteint 20 m ou plus de profondeur ;
- les ouvrages ne présentant pas d'anomalie majeure vis-à-vis de l'état de connaissance.

Le deuxième critère a été introduit afin de pouvoir identifier la position du toit du premier banc argileux sur un changement de faciès.

Au final, après l'homogénéisation et l'harmonisation des données de tous les ouvrages, des compléments d'information importants ont été apportés grâce aux renseignements tirés des études géologiques et hydrogéologiques réalisées sur des territoires englobant Nice Méridia.

5.1.2. Construction de la géométrie du modèle

Les données lithostratigraphiques de l'ensemble des ouvrages retenus ont été intégrées à l'outil de géo-modélisation GDM qui permet la gestion, la représentation et la modélisation des données de géologie. Il permet également de réaliser des vues 3D, des coupes, des cartes et des logs de sondages.

La figure qui suit permet de visualiser les ouvrages validés et retenus pour construire le modèle. Leur nombre paraît assez faible, mais dans la zone de Nice Méridia et de ses environs (en aval), les données sont plus fournies et bien représentatives de l'état du sous-sol.

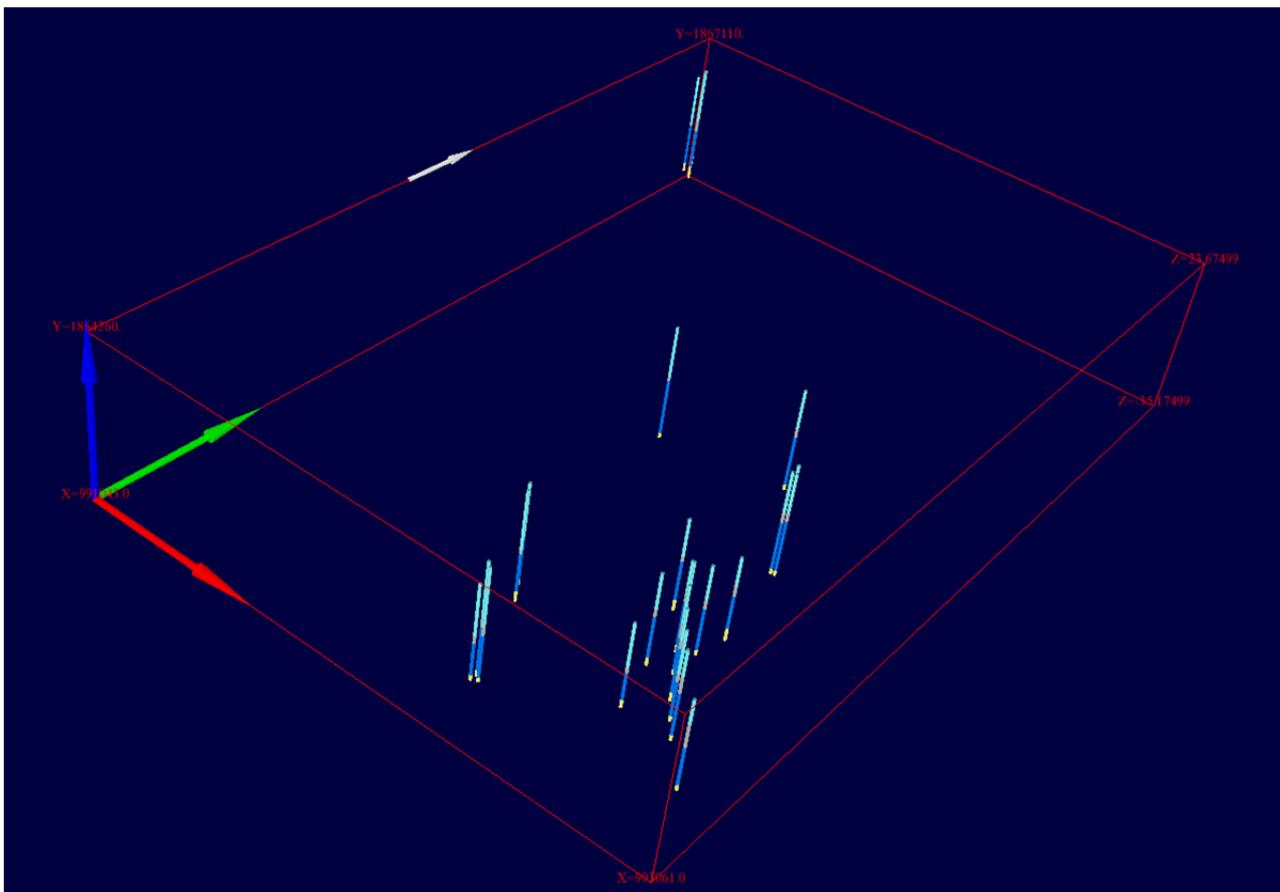


Illustration 22 : Vue d'ensemble de la répartition des ouvrages validés et intégrés à GDM.

Chaque cylindre (Illustration 23) est représentatif d'un ouvrage avec les quatre formations géologiques retenues :

- premier niveau des alluvions ;
- couche marneuse intermédiaire ;
- deuxième niveau des alluvions ;
- couche argilo-marneuse imperméable séparant les alluvions supérieures des niveaux plus profonds.

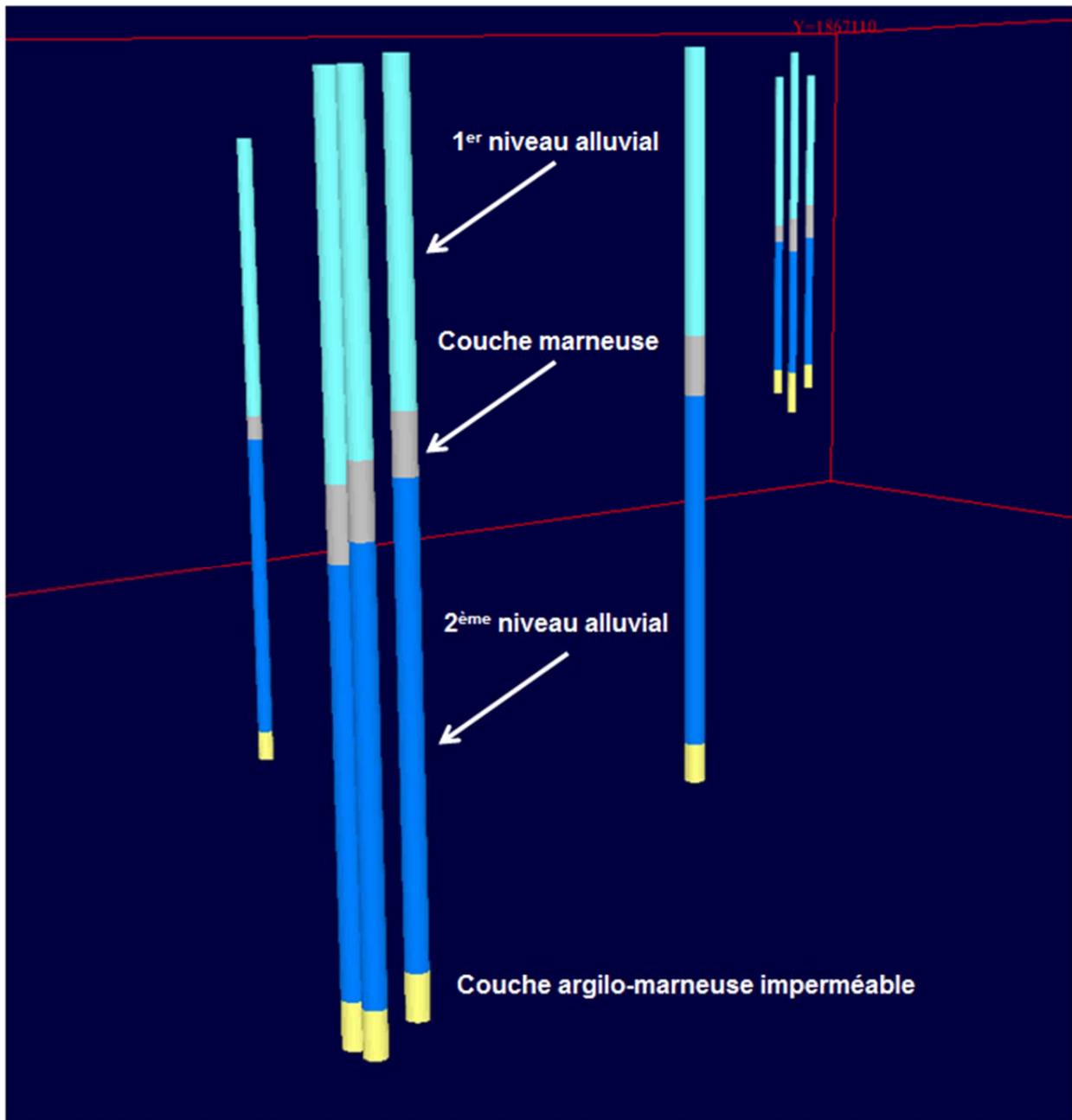


Illustration 23 : Répartition des faciès géologiques du sous-sol de Nice Méridia le long d'un cylindre représentatif d'un ouvrage existant sous GDM.

Par interpolation, l'outil GDM permet de construire les surfaces caractéristiques des différentes couches, qui seront ensuite intégrées au logiciel de modélisation hydrodynamique MARTHE.

5.2. PARAMÉTRAGE HYDROGÉOLOGIQUE ET THERMIQUE DU MODÈLE

Afin de reproduire le comportement de la nappe via le modèle, il est nécessaire d'y intégrer toutes les caractéristiques relatives à l'hydrodynamique et à l'aspect thermique du milieu étudié.

Concernant l'hydrodynamique, elle est caractérisée par la perméabilité (conductivité hydraulique), le coefficient d'emmagasinement et la porosité. Les deux premiers paramètres ont été déterminés avec une bonne précision via l'essai de pompage. Quant au troisième, il est estimé selon la description du milieu et les valeurs de référence.

Pour ce qui est de la thermique, il faudra introduire la température de l'eau, mesurée en continue grâce aux sondes installées sur le terrain, ainsi que la conductivité thermique et la capacité calorifique du sous-sol concerné.

5.2.1. Paramètres hydrodynamiques

Suivant l'hypothèse retenue pour cette étude, les essais de pompage ont permis de fixer la transmissivité à environ $4,4 \cdot 10^{-2}$ m/s² et le coefficient d'emmagasinement à $2 \cdot 10^{-2}$.

La perméabilité K, paramètre indispensable à la modélisation, se déduit de la transmissivité T et l'épaisseur saturée L de l'aquifère selon la formule : $K (m/s) = T (m^2/s) / L (m)$.

La transmissivité obtenue grâce aux essais se rapporte à la perméabilité globale de l'ensemble de l'entité hydrodynamique, qui est représentée ici par l'aquifère **multicouche** des alluvions (Illustration 24), ce qui signifie que la succession des différentes couches est perçue comme une couche unique de perméabilité équivalente fournissant le même débit sous la même charge.

Cette vision d'ensemble ne permet pas de faire ressortir la différence de perméabilité qui existe entre des entités perméables comme les alluvions et celles qui le sont moins comme les couches argileuses ou marneuses.

Pour y remédier, une estimation des valeurs des différentes perméabilités peut s'effectuer suivant la formule :

$$K \underbrace{\sum L_i}_{=L} = \sum K_i L_i$$

Le premier bloc de l'équation KL est égal à la transmissivité T obtenue grâce aux essais de pompages. Quant aux K_i et L_i , ils représentent pour chaque couche i, sa perméabilité et son épaisseur mouillée respectivement.

Dans le cas de l'aquifère étudié, la formule s'écrit (Illustration 24) :

$$KL = T = K_1 L_1 + K_2 L_2 + K_3 L_3$$

Dans cette équation, l'indice 1 renvoie au niveau supérieur des alluvions, le 2 à l'aquitard argileux et le 3 au niveau alluvial inférieur. La deuxième couche des argiles a été considérée comme ne faisant pas partie du système aquifère, du fait qu'elle constitue un écran fortement

impermeable séparant le système étudié du sous-sol plus profond. Cette couche est ponctuée par la présence de « fenêtres » permettant une communication entre les entités hydrogéologiques. Néanmoins, ce phénomène est limité dans la zone d'étude, et quasi-inexistant si on se limite aux données de la BSS.

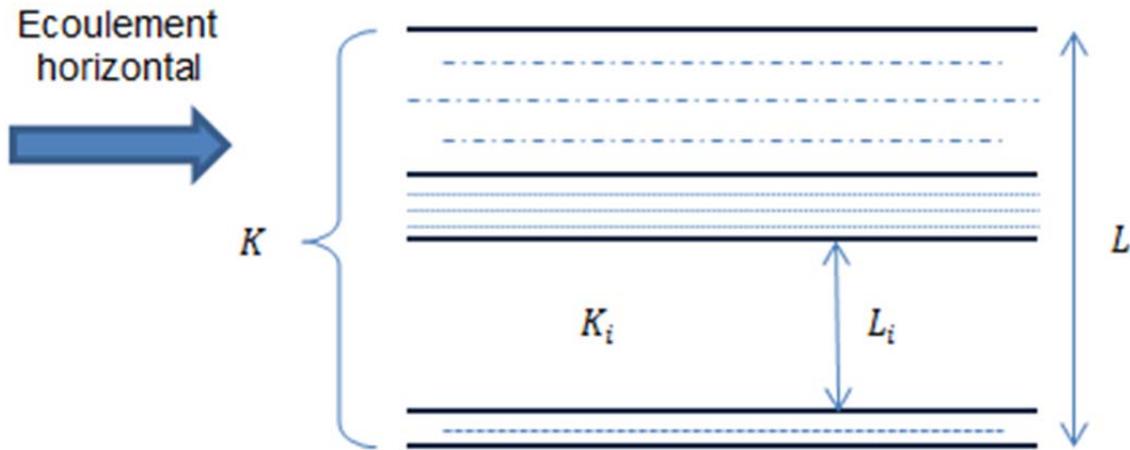


Illustration 24 : Représentation schématique de l'équivalence entre transmissivité globale du milieu et transmissivités spécifiques de chaque couche.

Les perméabilités K_1 et K_3 sont identiques ($= K$) du fait de leur caractérisation du même faciès alluvial. Concernant K_2 , elle a été considérée inférieure de 1 000 à K ($= 10^{-3} K$).

Ainsi
$$T = K (L_1 + 10^{-3}L_2 + L_3)$$

avec les valeurs d'épaisseurs constatées, la perméabilité K est estimée à $1,42 \cdot 10^{-2}$ m/s.

Le tableau suivant résume les valeurs retenues pour les principaux paramètres hydrodynamiques.

	Perméabilité (m/s)	Porosité (%)	Coefficient d'emmagasinement
Alluvions sup.	$1,42 \cdot 10^{-2}$	10	$3 \cdot 10^{-2}$
Argiles sup.	$1,42 \cdot 10^{-5}$		
Alluvions inf.	$1,42 \cdot 10^{-2}$		
Argiles inf.	$1,00 \cdot 10^{-10}$		

Tableau 3 : Valeurs des paramètres hydrodynamiques considérées pour la modélisation.

5.2.2. Paramètres thermiques

Température de la nappe

La température de l'eau (ou du sous-sol en cas de capteur en milieu sec) constitue un paramètre déterminant pour la performance énergétique d'une opération de géothermie. C'est ainsi qu'un suivi de l'évolution saisonnière de cette température est réalisé via des sondes à enregistrement dans les trois piézomètres.

L'illustration 25 présente l'évolution de la température de l'eau de la nappe sur la période juin-octobre 2013.

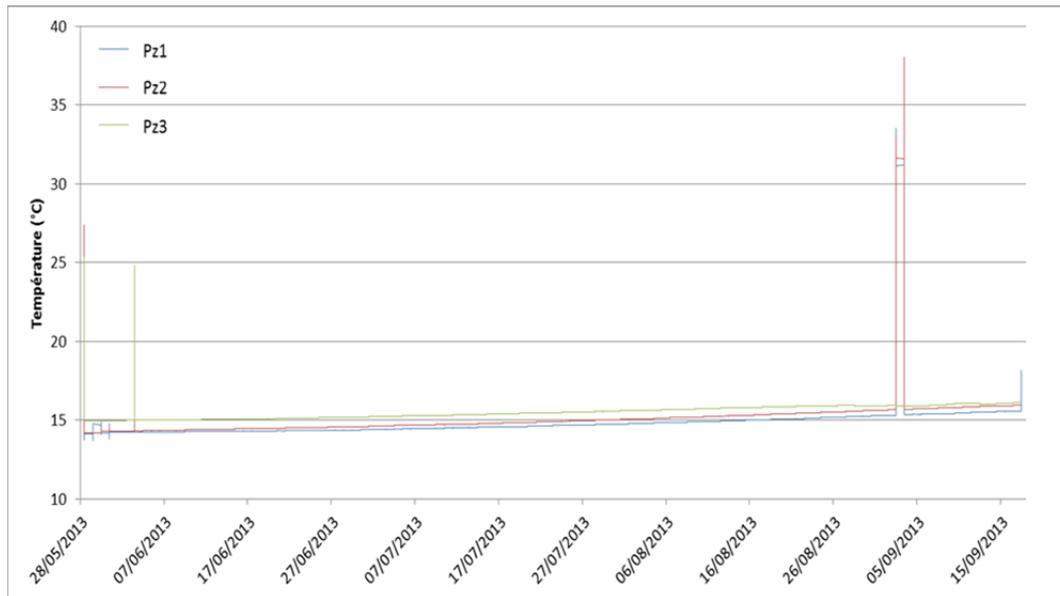


Illustration 25 : Suivi de température au fond des trois piézomètres

Les pics perçus sur les courbes de température sont liés aux interventions opérées sur le terrain pour le relevé des données (elles ne traduisent pas forcément la température atmosphérique). L'illustration 26 reprend ces courbes avec une correction des pics observés.

À partir de la fin du mois de mai, période correspondant au début de la prise de mesures, la température de l'eau au sein de l'aquifère, qui est de 14 °C, ne cesse d'augmenter à raison d'environ 0,5 °C par mois pour le Pz1 et le Pz2 et 0,3 °C par mois pour le Pz3, pour avoisiner 16 °C en fin d'enregistrement.

Cette évolution est à corrélérer avec les variations de la température ambiante en surface.

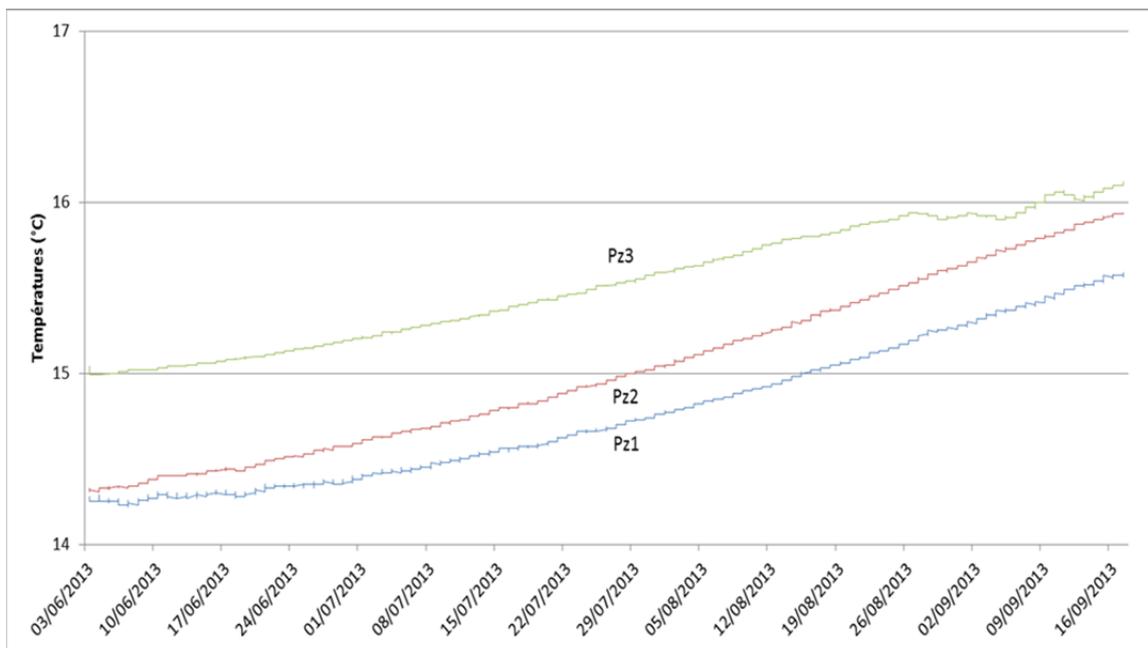


Illustration 26 : Suivi de température corrigé des pics liés aux prises de mesures.

Il est à noter que malgré la proximité du toit de la nappe de la surface du sol, la température d'eau de la nappe n'est impactée par la température en surface que de façon limitée, et la gamme de valeurs ainsi mise en évidence lors de la période estivale témoigne de la possibilité d'une fourniture énergétique pour le froid en mode freecooling, plus efficace énergétiquement, et donc économiquement, qu'un recours à des PACs réversibles pour la production de froid (climatisation), sous réserve que le débit des ouvrages souterrains permettent de couvrir la demande de Rafraîchissement.

Il est recommandé d'effectuer un suivi sur une période plus longue, l'idéal étant une chronique sur plusieurs cycles annuels, que les bureaux d'études devraient considérer pour leurs études de faisabilité.

Pour la suite de la modélisation, la température de la nappe a été fixée à 15 °C.

Capacité calorifique et conductivité thermique

La capacité calorifique (massique ou volumique) d'un milieu, appelée aussi « chaleur spécifique », est une grandeur qui permet de caractériser la capacité à absorber ou à restituer de l'énergie par échange thermique avec un autre milieu à la température différente.

La capacité calorifique s'exprime en $J/(kg \text{ ou } m^3)/K$ et sa valeur traduit l'énergie dont l'apport à un corps (de 1 kg) est nécessaire pour augmenter sa température d'un degré.

La conductivité thermique représente quant à elle la capacité d'un milieu à transmettre la chaleur. Sa dimension est $W/m/K$.

Les valeurs de ces paramètres n'ont pu être mesurées dans le cadre de ce projet, et des valeurs de référence utilisées par l'outil de calcul ont été appliquées.

	Eau de la nappe	Minéral de la matrice poreuse
Chaleur spécifique volumique ($J/m^3/K$)	$4,185 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
Conductivité thermique ($W/m/K$)	0,6	1,5

Tableau 4 : Valeurs de la capacité calorifique et la conductivité thermique considérées pour la modélisation.

5.3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE DE LA PIÉZOMÉTRIE ET DES ESSAIS DE POMPAGES

La délimitation du modèle a été opérée de telle sorte que sa limite ouest coïncide avec le parcours du Var, qui passe à moins d'un kilomètre du site d'étude.

Cela permet de fixer des conditions de charge au niveau de cette limite avec une marge d'erreur assez faible. Pour le reste des limites, un potentiel de charge a été imposé suivant les données qui ont pu être recueillies grâce à la BSS ou via des estimations réalistes (Illustration 27).

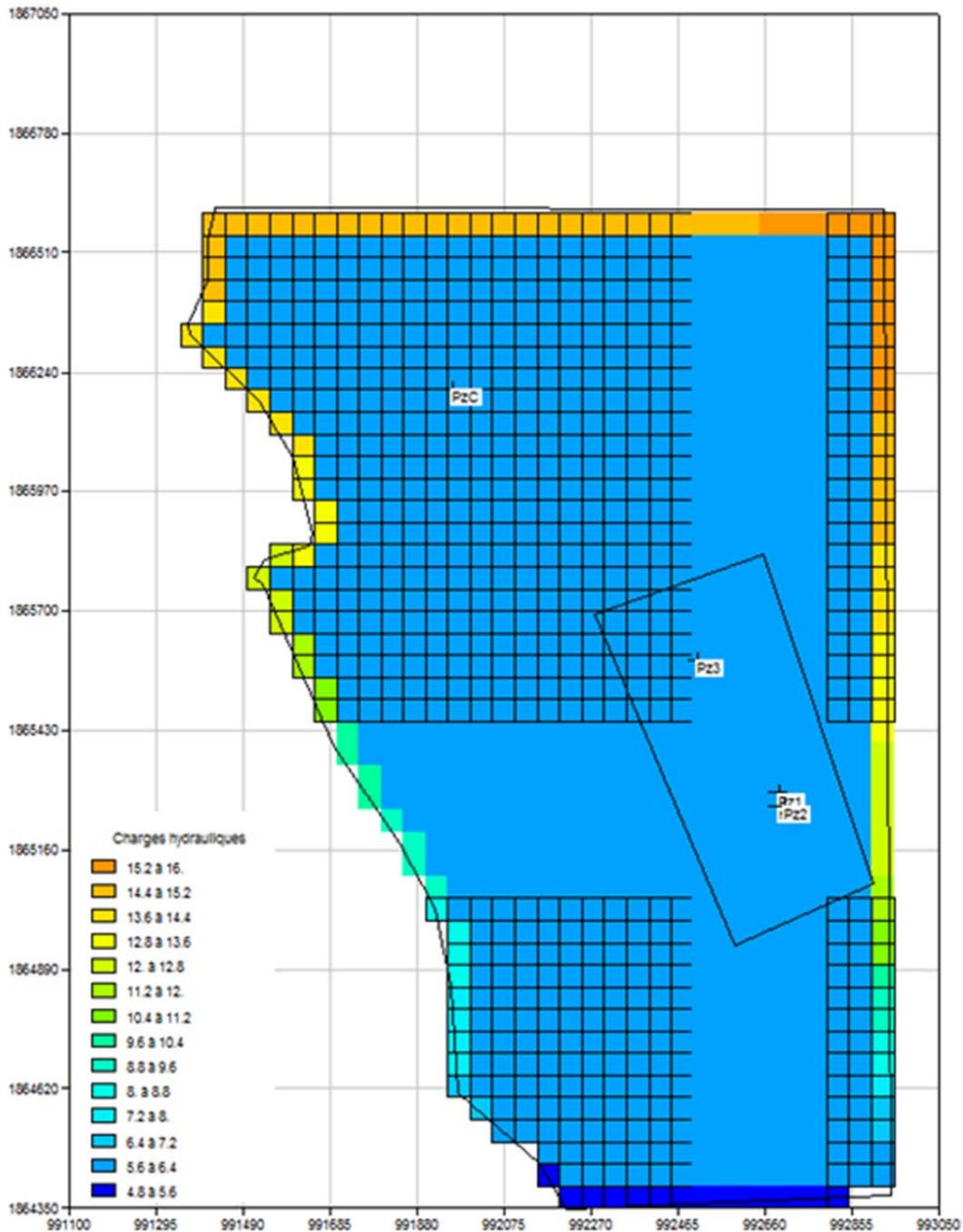


Illustration 27 : Condition initiale et conditions aux limites imposées pour la charge hydrodynamique.

Le calage a été effectué en régime permanent par rapport à une référence correspondant à la date du 28/05/2013, où les premières mesures piézométriques ont été réalisées.

Ces mesures ont donné :

	Forage de test	Pz1	Pz2	Pz3
Niveau piézométrique (en m depuis la surface = profondeur)	3,90	3,90	3,85	4,30

Tableau 5 : Mesures piézométriques réalisées le 28/05/2013.

Les résultats de ce calage sont représentés sur l'illustration suivante.

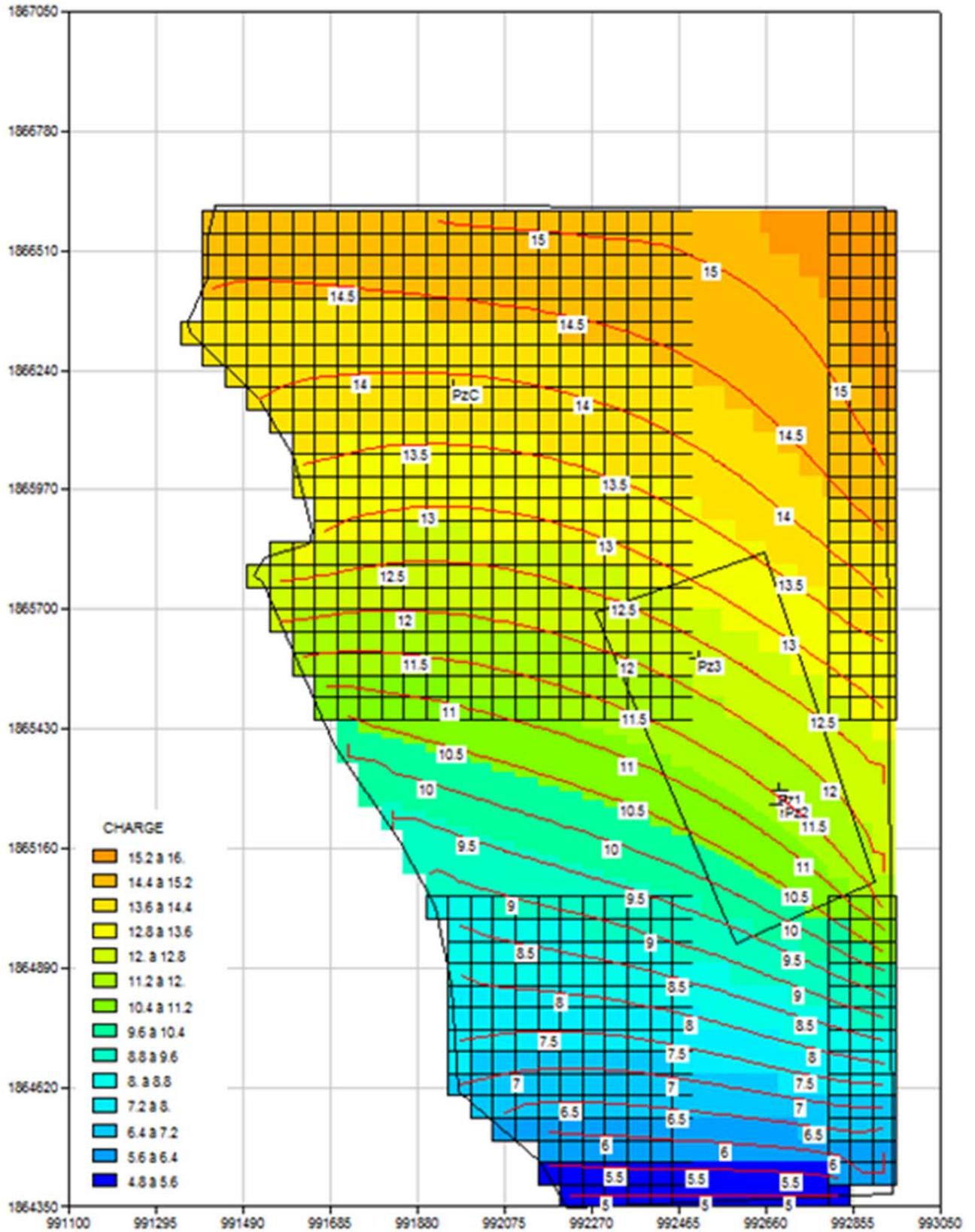


Illustration 28 : Calage du niveau piézométrique de la nappe en régime permanent.

Cette distribution de charge hydrodynamique montre que les isopièzes¹⁸ sont disposés sur un axe décroissant NW-SE au droit de la zone étudiée. Cela signifie que les lignes de courant¹⁹, décrivant la trajectoire de l'écoulement dans cet état considéré comme stationnaire, ont une direction NE-SW.

La variation du niveau de la nappe est d'environ 4 m entre les extrémités nord et sud du site de Nice Méridia

Ne disposant pas d'un suivi complet sur un cycle annuel (voire plusieurs cycles) de l'évolution piézométrique de la nappe, une simulation plus longue dans le temps en régime évolutif pourrait être réalisée dans une suite de cette étude.

Concernant la vitesse réelle de l'écoulement, elle est difficile à déterminer avec précision sans tests de traçage, car elle dépend de certains paramètres hydrodynamiques comme la porosité cinématique du milieu, dont la distribution spatiale est souvent très hétérogène et qui n'a pas fait l'objet d'une détermination spécifique dans ce programme d'étude.

Néanmoins, la Loi de Darcy permet de déterminer une grandeur appelée Vitesse de Darcy qui reflète une vitesse macroscopique du flux d'eau à travers le milieu poreux saturé, sans tenir compte de la variabilité de volume qui peut exister au niveau des interstices et de leur connexion, entraînant ainsi des variations de vitesse localement

Cette vitesse se calcule selon la loi de Darcy (simplifiée) :

$$v_{Darcy} = \frac{Q}{S} = K \frac{\Delta H}{L}$$

Dans cette équation :

- Q (m^3/s) est le débit traversant la section S (m^2) ;
- K est la perméabilité du milieu (m/s), à ne pas confondre avec la perméabilité intrinsèque qui s'exprime en (m^2) ;
- ΔH est la différence de charge (m) qui s'opère sur la distance L (m) dans le sens de l'écoulement.
- D'après les résultats de la modélisation, le gradient hydraulique de la nappe est d'environ (Illustration 30) :
- $i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{12,2-11,6}{120} = 5 \text{ ‰}$
- Cela donne pour la vitesse de Darcy :
- $v_{Darcy} = K \frac{\Delta H}{L} = 1,42 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 7,1 \cdot 10^{-5} m/s = 6 m/jour$
- Grâce à ce calcul, il est possible d'estimer la vitesse réelle de la circulation des eaux dans la nappe en se basant sur la formule $v_{Réelle} = v_{Darcy}/\varphi$, où φ est la porosité du milieu.

¹⁸ Une isopièze est une courbe reliant des points d'égal niveau piézométrique, et leur ensemble représente la surface piézométrique.

¹⁹ Une ligne de courant est une ligne parallèle au vecteur vitesse en chacun de ses points au temps considéré et reflète le sens d'écoulement des eaux de la nappe.

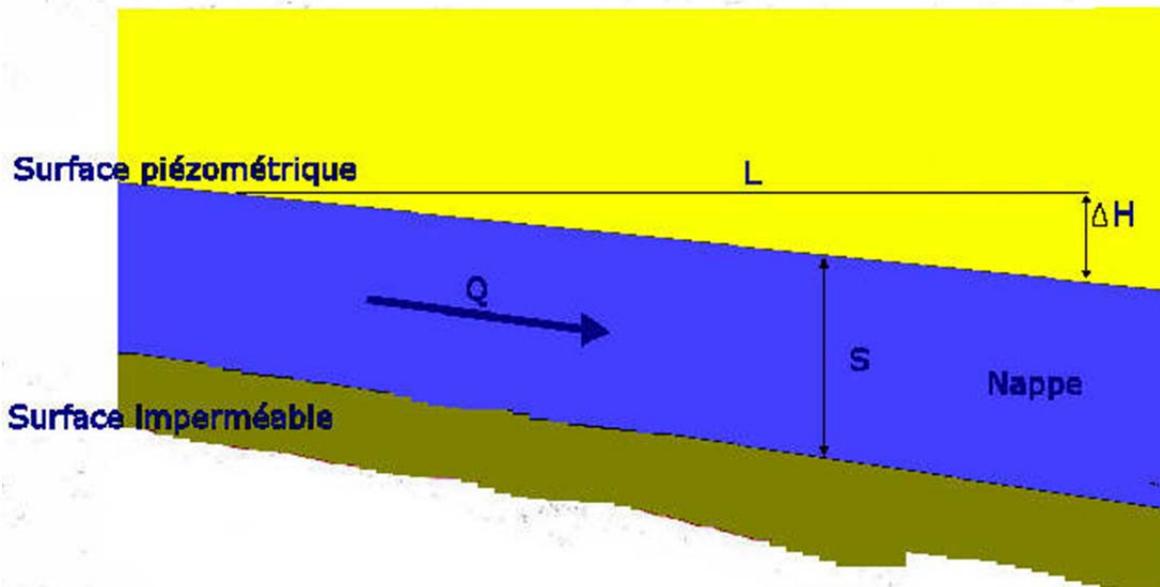


Illustration 29 : Paramètres intervenant dans le calcul de la vitesse de Darcy (d'après eduterre.ens-lyon.fr).

Pour le type de nappe concernée, la valeur de porosité est élevée de l'ordre de 10 à 20 %, ce qui donne une vitesse réelle d'écoulement d'environ 30 à 60 m par jour, témoignant d'une nappe avec un écoulement très rapide.

Ce résultat permet d'ores et déjà de confirmer que :

- Les possibilités de stockage d'énergie thermique dans le sous-sol sont très faibles ;
- Le risque de dérive thermique du sous-sol est également très minime car l'eau est renouvelée constamment et de façon très soutenue.

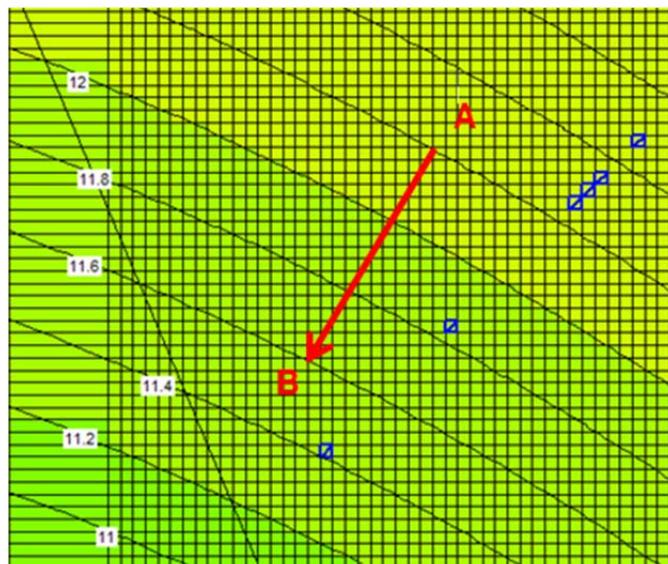


Illustration 30 : Calcul du gradient hydraulique de la nappe alluviale au droit de Nice Méridia (les isopièzes sont équiréparties sur l'ensemble de secteur).

5.4. DISPOSITION DES OUVRAGES GÉOTHERMIQUES

La localisation des ouvrages géothermiques (puits de production / puits de réinjection) devra respecter certaines dispositions notamment par rapport à la direction des doublets et la distance entre ouvrages. Ces éléments sont à déterminer grâce à l'outil de modélisation, suivant les paramètres de chaque opération (débit et température de production / réinjection, durée d'exploitation...).

Le risque en cas de non-respect de ces dispositions est d'impacter négativement la performance énergétique et économique des opérations, sous l'impact des phénomènes de recyclage qui peuvent avoir lieu au niveau des puits de production. En effet, une proximité non maîtrisée entre puits du doublet, peut impliquer le pompage de l'eau réinjectée ayant déjà subi un prélèvement d'énergie. Cette eau dont la température est différente de celle de la nappe entraîne : i) une baisse de la puissance thermique produite, ii) un apport en énergie de fonctionnement (PAC + Auxiliaires) plus important et par conséquent iii) des coûts de fonctionnement plus élevés. Dans certains cas extrêmes, l'opération peut devenir complètement inefficace nécessitant le recours à une autre solution pour assurer la couverture de la demande thermique.

Ainsi pour éviter ce genre de problème, le modèle numérique va permettre de déterminer l'emplacement idéal du puits de production par rapport au puits de réinjection et la distance optimale à respecter entre les deux.

5.4.1. Emplacement des ouvrages

Concernant ce point, il faudra veiller à ce que le puits de production d'une opération soit situé en dehors du champ de propagation du panache thermique développé par la réinjection de la même -ou d'une autre- opération.

La position idéale comme l'illustre la figure suivante, montrant un exemple d'exploitation géothermique, est de placer le puits de production en amont du puits de réinjection, car l'évolution du panache thermique est freinée dans la direction de l'ouvrage producteur par l'écoulement naturel NE-SW.

Sur cet exemple, où la distance entre les deux puits est d'environ 100 m, le panache thermique évolue selon un axe NE-SW entraîné par l'écoulement naturel de la nappe. La partie de ce panache en aval correspond à la bulle froide développée lors de la saison de chauffe où la demande thermique se résume au chauffage et à l'ECS. L'arrivée de la saison chaude (à partir d'avril/mai) se traduit ensuite par une réinjection de plus en plus importante en eau plus chaude que celle de l'aquifère, ce qui donne naissance à la deuxième bulle thermique.

L'ensemble de ces deux bulles, chaude et froide, constitue le panache thermique caractérisant une zone où la température de l'eau de la nappe est différente de l'état initial. Il s'agit d'une zone où tout pompage géothermique est exclu.

Il est à noter sur cet exemple que la bulle thermique atteint le puits de production et ce malgré le choix adéquat de la direction du doublet. Cela s'explique par la proximité entre les deux ouvrages qui rend l'effet du pompage plus dominant que l'écoulement naturel de la nappe, d'où la nécessité de prévoir une distance plus conséquente.

Ce point est traité dans le paragraphe suivant.

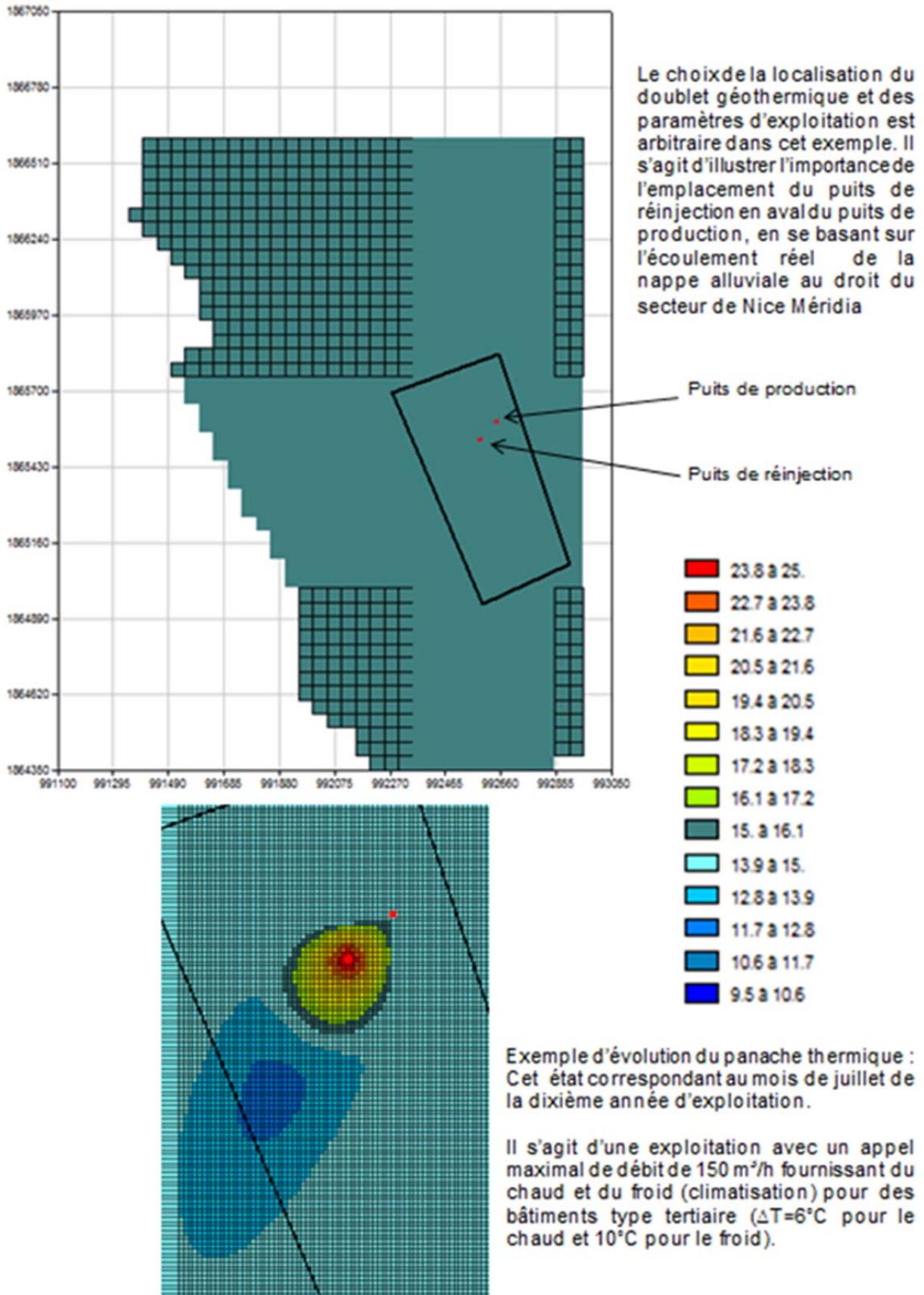


Illustration 31 : Température de la nappe et développement du panache thermique.

5.4.2. Distance entre les ouvrages

Afin d'évaluer la distance à respecter entre les ouvrages d'un doublet géothermique pour assurer une exploitation pérenne, plusieurs modélisations ont été réalisées dans le cadre de cette étude en faisant varier, d'un côté, les débits d'exploitation, et de l'autre, la distance à déterminer, l'objectif étant d'en retenir l'optimum pour éviter le recyclage thermique tout en assurant l'équilibre hydrodynamique de nappe (compensation du pompage par la réinjection).

L'illustration suivante montre la configuration retenue pour les ouvrages dans le cadre de ces modélisations.

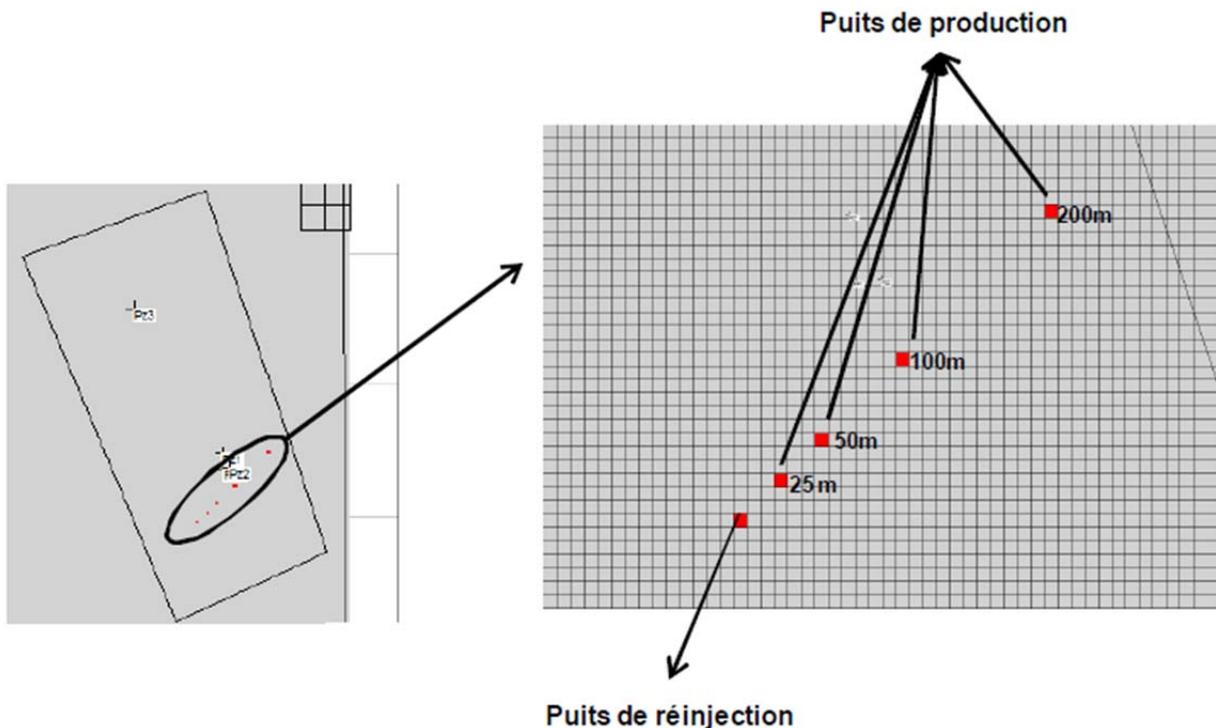


Illustration 32 : Localisation des ouvrages utilisés.

Il est à signaler que pour chaque modélisation, un seul puits de réinjection est en fonctionnement.

Les figures suivantes présentent les résultats des simulations réalisées à 25 et 300 m³/h.

L'évolution de ces courbes indique que, concernant une exploitation géothermique avec un débit maximal de 25 m³/h, aucun recyclage thermique ne serait à noter si le puits de pompage est placé à plus de 50 m du puits de réinjection (en respectant les consignes du paragraphe précédent, à savoir, placer le puits de pompage en amont du puits de réinjection, ou à défaut, ne pas placer le puits de pompage dans la zone où évolue le nuage thermique).

Concernant la deuxième illustration, où le débit atteint 300 m³/h, tout ouvrage de production placé à moins de 100 m sera affecté par le panache thermique, même si le point de pompage est placé en amont de l'écoulement. Par contre, à 200 m de distance, aucun impact thermique n'est à signaler. Le seuil à respecter avec ce débit est d'environ 180 m.

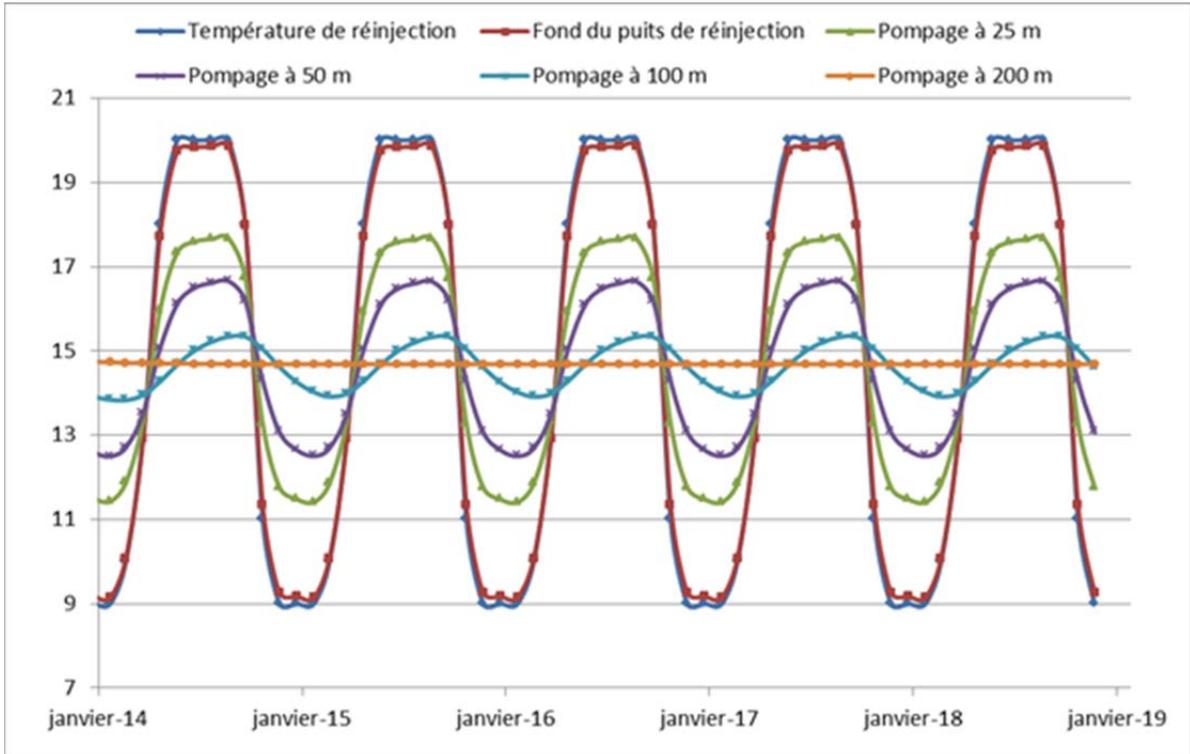


Illustration 33 : Évolution de la température au niveau du puits de production en fonction de la distance entre les puits du doublet – **Débit maximal d'exploitation : 25 m³/h.**

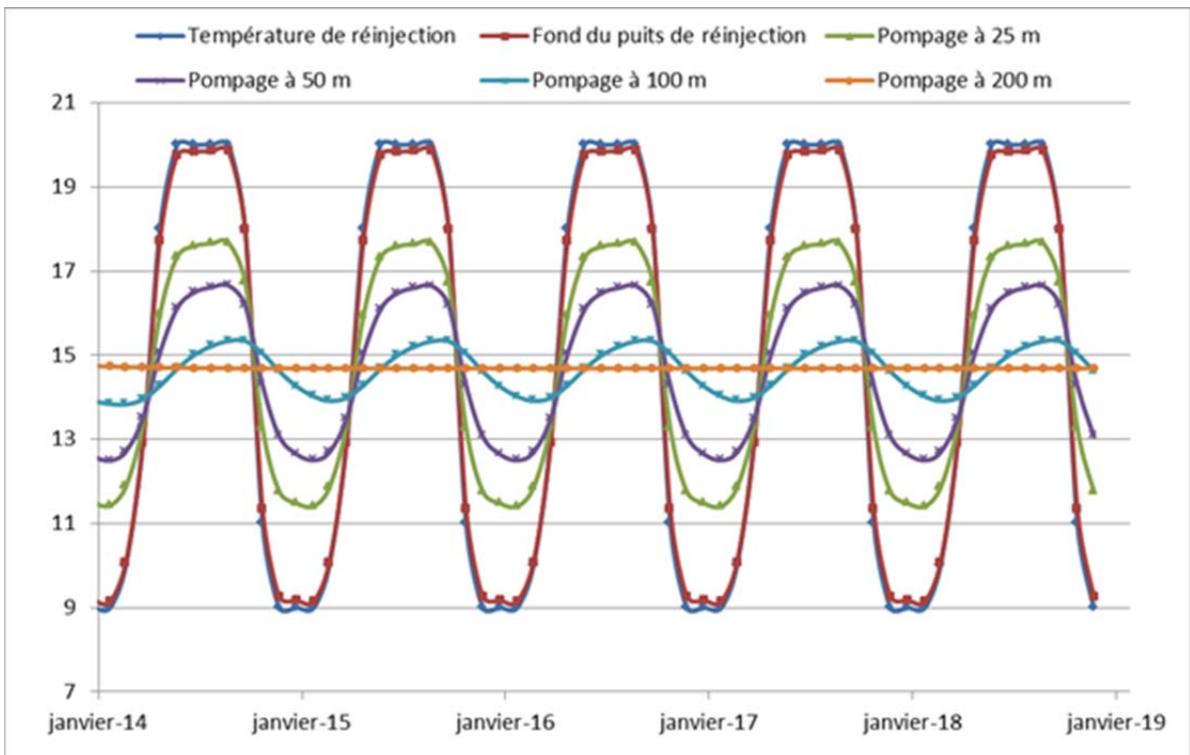


Illustration 34 : Évolution de la température au niveau du puits de production en fonction de la distance entre les puits du doublet – **Débit maximal d'exploitation : 300 m³/h.**

Au final avec les simulations géothermiques opérées via le modèle, il a été possible d'approximer, avec une loi empirique polynomiale du second ordre, la distance à respecter entre puits de production / puits de réinjection, en fonction du débit maximal d'exploitation à ΔT fixe égal à 6 °C, pour le froid et pour le chaud.

Cette loi est la suivante :

$$Distance_{\Delta T=6} = 1,13 Q - 1,60 \cdot 10^{-3} Q^2$$

L'évolution de cette distance est illustrée par la courbe ci-après :

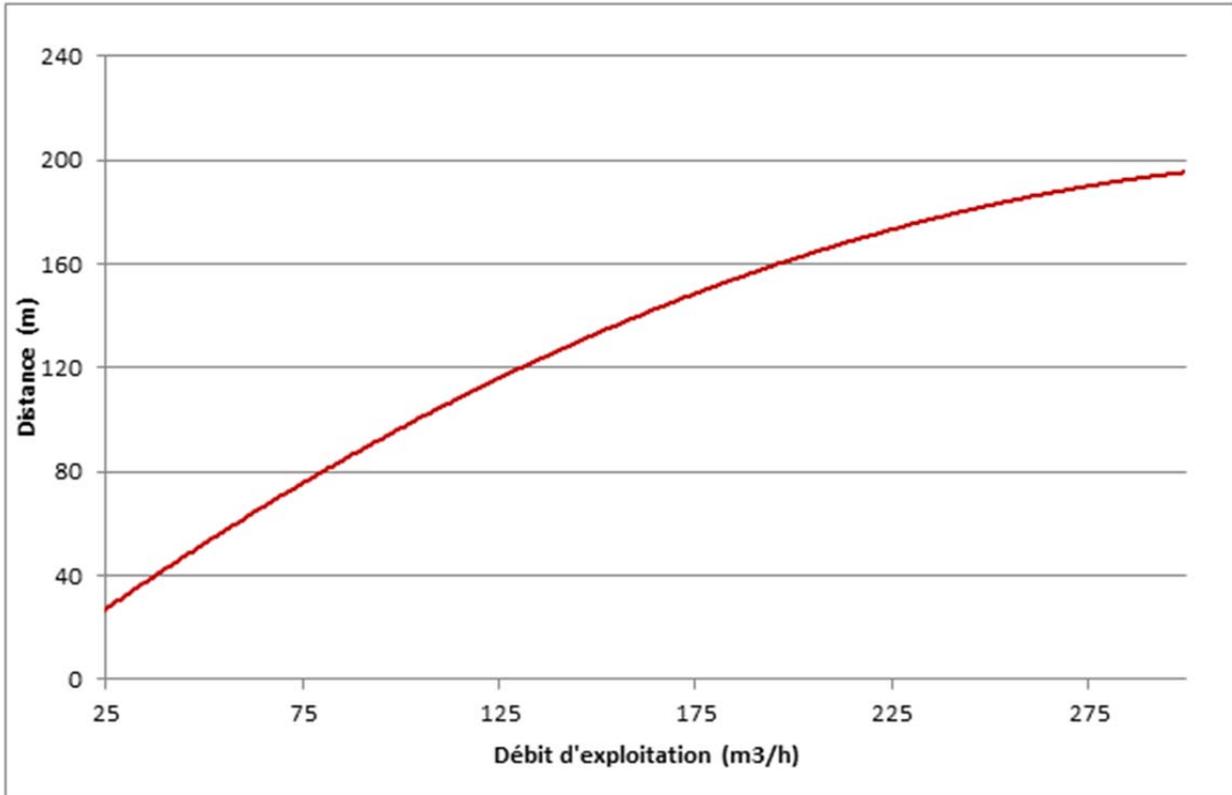


Illustration 35 : Évolution de la distance entre puits de production/puits de réinjection en fonction du débit d'exploitation.

Il est à signaler quelques points importants concernant cette loi :

- elle est valable pour des débits d'exploitation supérieurs à 25 m³/h et ne dépassant pas 300 m³/h (intervalle de test) ;
- cette loi est spécifique à la nappe alluviale au droit du secteur de Nice Méridia. En aucun cas, elle ne pourra être transposée sur un autre contexte hydrodynamique ;
- elle présuppose que le puits de production est placé en dehors de la zone affectée par le panache thermique, et de préférence que le pompage s'effectue en amont de l'écoulement ;
- le ΔT est fixé à 6 °C.

5.5. SIMULATION DES SCÉNARII D'EXPLOITATION

Trois scénarios d'exploitation géothermique ont été proposés et retenus dans le cadre de cette étude.

Le tableau suivant, repris et complété dans les prochains chapitres, présente de façon succincte la description des scénarii retenus.

Ces solutions sont exposées plus détail dans les chapitres 7 et 8.

	Description succincte
Scénario 1 Machinerie centralisée / Réseau chaud/froid	2 doublets qui alimentent en eau de nappe (15 °C) une 'chaufferie' centrale, qui fournit de l'eau chaude et l'eau fraîche ou froide aux bâtiments (=> deux réseaux = réseau 3 ou 4 tubes)
Scénarios 2 Machineries réparties / Réseau tempéré	2 doublets qui alimentent en eau de nappe (15 °C) directement les bâtiments, au niveau desquels des PAC seront installées. (=> un seul réseau 2 tubes)
Scénarios 3 Déploiement en 3 étapes machinerie & réseau	6 doublets qui alimentent les bâtiment selon un réseau en eau tempérée (15°C), avec phasage des investissements pour le réseau et les PACg dans chaque bâtiment (=> un seul réseau 2 tubes)

Illustration 36 : Scénarii d'exploitation proposés dans le cadre de cette étude.

L'objectif de cette partie est de simuler le comportement de la nappe sous l'impact des opérations de géothermie selon les scénarii retenus.

5.5.1. Scénarios 1 et 2

Du point de vue de la sollicitation de la ressource, ces deux scénarios sont quasi-similaires impliquant le recours à deux doublets (deux puits de production et deux puits de réinjection) qui utilisent un débit identique. Autrement dit, le débit global estimé pour couvrir les besoins thermiques de Nice Méridia sera réparti à égalité (50/50) entre les deux ouvrages. Cependant, cette répartition peut parfaitement connaître des ajustements lors de la mise en place des opérations et/ou en cours de l'exploitation.

Le graphique qui suit montre les évolutions mensuelles du débit pompé/réinjecté par doublet et la température de l'eau réinjectée. Ces allures correspondent au cas précis où la géothermie est utilisée pour couvrir les besoins en chauffage et en ECS, ainsi que les besoins en froid en considérant le mode Rafraîchissement pour les logements et le mode climatisation pour le reste du bâti.

Sur le graphique, le débit par doublet culmine à plus de 300 m³/h, ce qui signifie que le débit maximal pompé dépasse 600 m³/h. Ce débit coïncide avec l'été où la demande en froid est prédominante. Durant la saison de chauffe, le débit par doublet est compris entre 150 et 200 m³/h

La possibilité de recourir à des thermo-frigo-pompes durant l'été devrait être abordée dans les études de détail, ce qui permettra de réduire le débit pompé, grâce à la récupération de chaleur pour l'ECS à partir des eaux ayant servi pour la climatisation et qui ont donc subi auparavant un prélèvement de frigories.

De ce fait, le débit global en jeu ne devra pas dépasser 600 m³/h, i.e. 300 m³/h par doublet.

La méthodologie et les calculs pour parvenir à ces résultats sont exposés au chapitre 6.

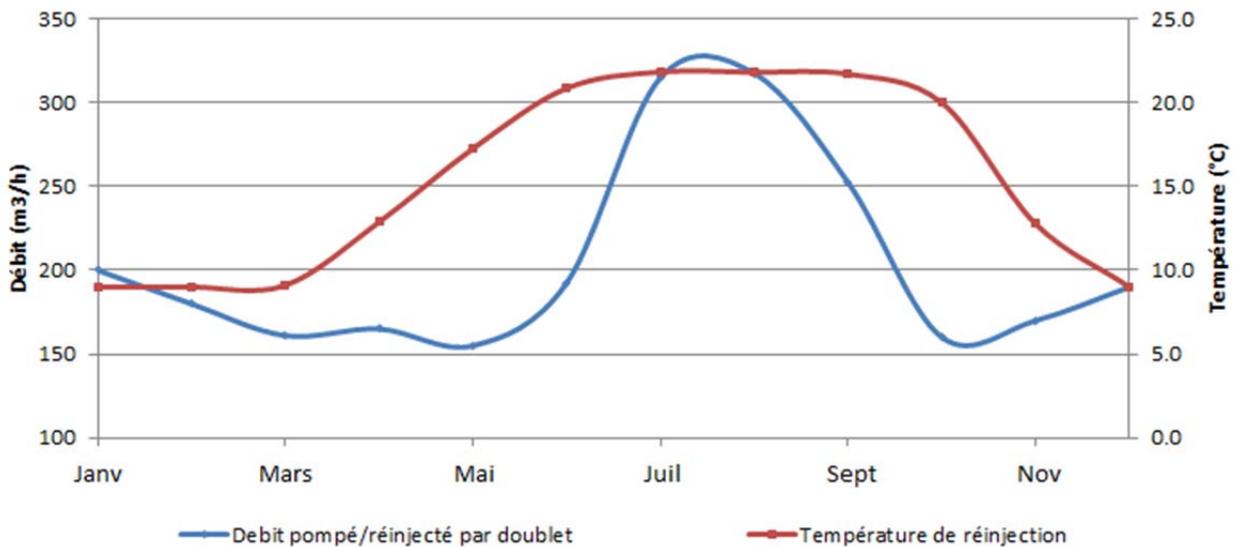


Illustration 37 : Échanges géothermiques mensuels par doublet pour les scénarios 1 et 2.

Pour simuler les impacts thermiques de cette exploitation au cours du temps, un choix arbitraire a été fait pour l'emplacement des ouvrages, en respectant les éléments vus précédemment, notamment par rapport à la distance à respecter entre les ouvrages.

Le débit maximal par doublet étant de 300 m³/h, il faudra considérer une distance d'environ 200 m pour chaque doublet. Il faudra veiller également à éviter les risques d'interférences thermiques qui pourraient avoir lieu entre les deux opérations.

Les résultats de la simulation sont exposés dans les figures suivantes. La première illustration correspond à la configuration de la première année d'exploitation, et la deuxième renvoie à l'état de la nappe après 30 ans d'usage géothermique.

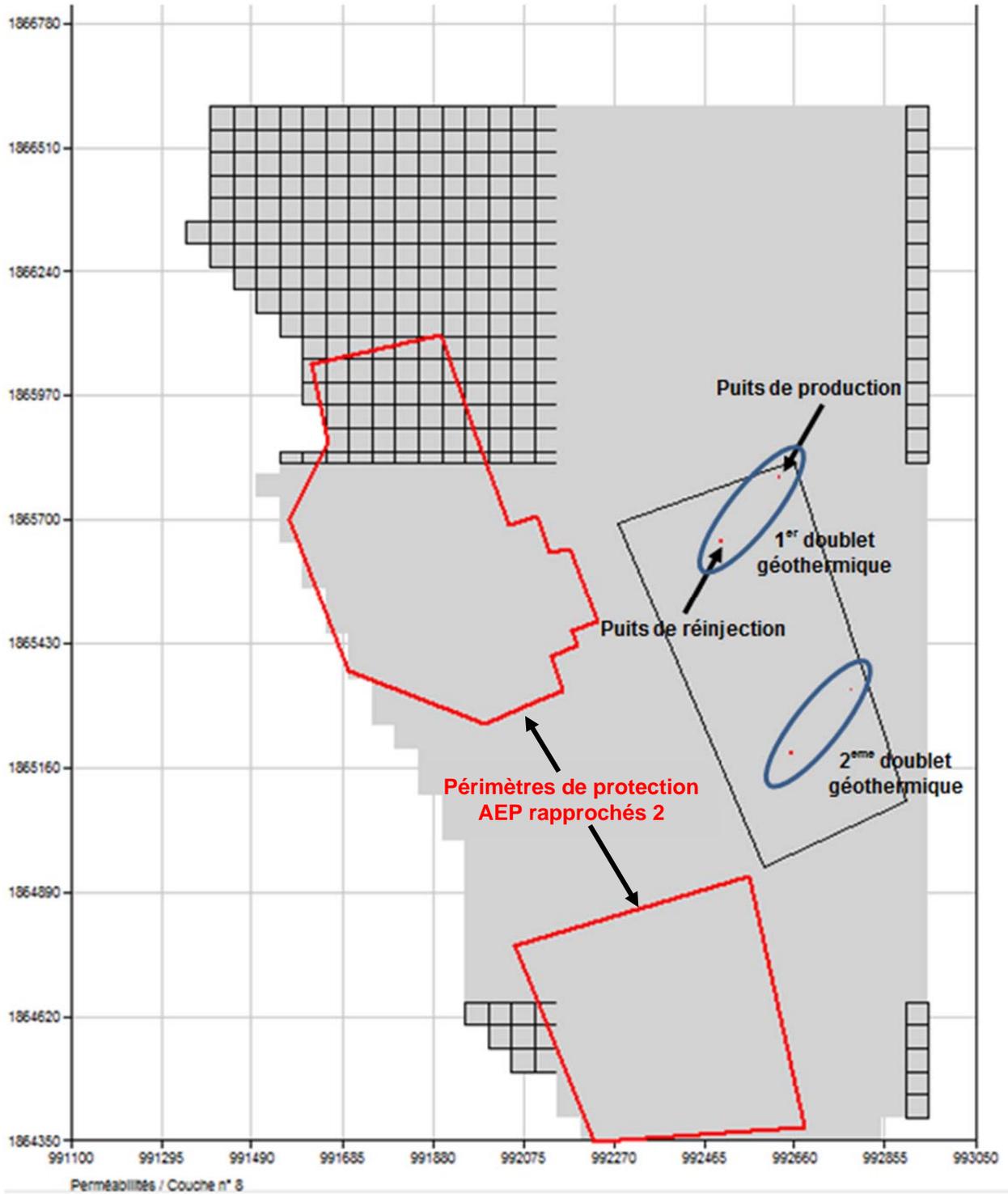


Illustration 38 : Emplacement des doublets géothermiques - Scénarios 1 et 2.

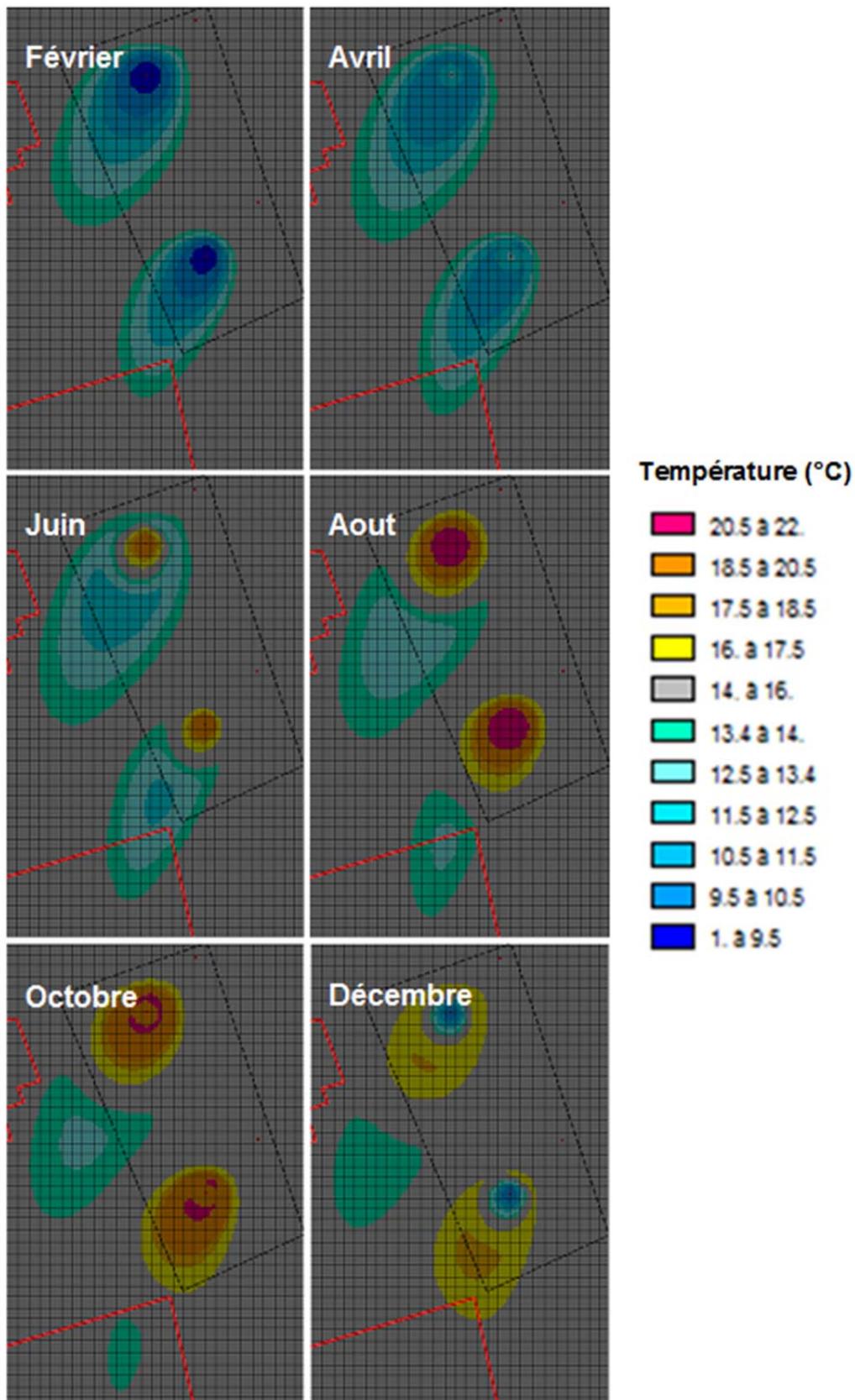


Illustration 39 : Impacts thermiques de la géothermie sur la nappe, 1^{re} année d'exploitation – Scénarios 1 et 2.

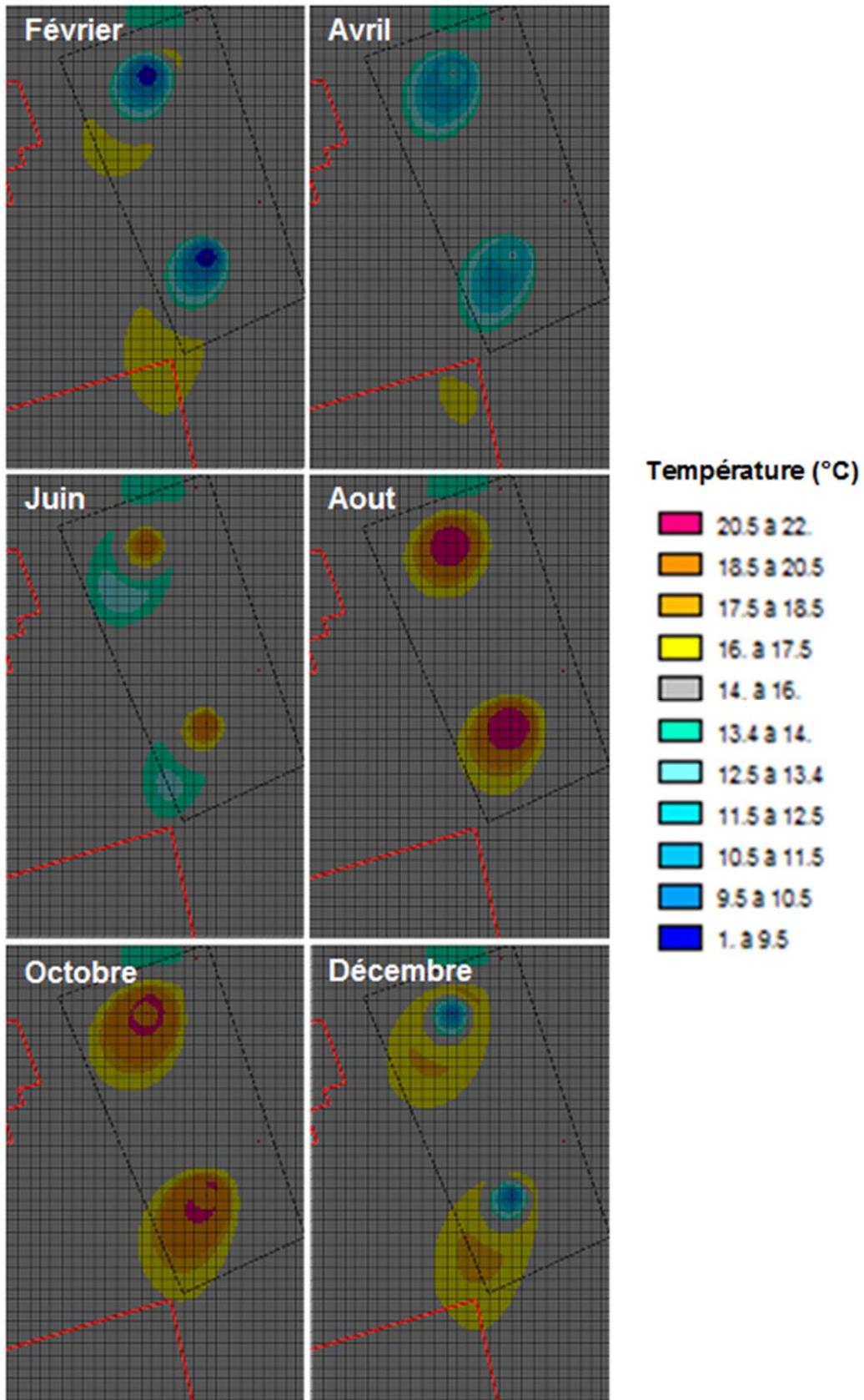


Illustration 40 : Impacts thermiques de la géothermie sur la nappe - 30^e année d'exploitation - Scénarios 1 et 2.

Les résultats de cette modélisation indiquent que les impacts thermiques des opérations selon les scénarii 1 ou 2 sont très limités bien que l'extension des panaches thermiques paraisse importante.

En effet, après trente années l'exploitation, aucune dérive thermique n'est à constater, et cela s'explique par :

- la vitesse de circulation des eaux très élevée, permettant un balayage permanent et rapide de l'eau réinjectée,
- l'usage de la géothermie pour couvrir des besoins en chaud et en froid permet de maintenir un équilibre thermique saisonnier de la nappe grâce à une réinjection alternée froid/chaud.

L'extension maximale des panaches thermiques est constatée au cours des premiers mois d'exploitation, où la bulle froide atteint le périmètre de protection rapproché 2 des captages d'AEP. Cependant, cette intrusion ne pénalise pas la qualité des eaux car l'écart de température entre l'eau de la nappe et la partie concernée de la bulle est de 2 °C au maximum. Considérant la température de la nappe à environ 15 °C, l'intrusion thermique ne devrait pas excéder 17 °C ou passer sous la barre des 13 °C, ce qui reste dans la gamme d'évolution naturelle de la température de la nappe alluviale tel que les chroniques continues de température ont permis de le constater.

Concernant les impacts hydrodynamiques, comme rappelé dans la partie 5.5, leur incidence est moindre que les impacts thermiques en termes d'extension. De ce fait, les captages d'AEP ne sont pas affectés par les pompages géothermiques (Illustration 41).

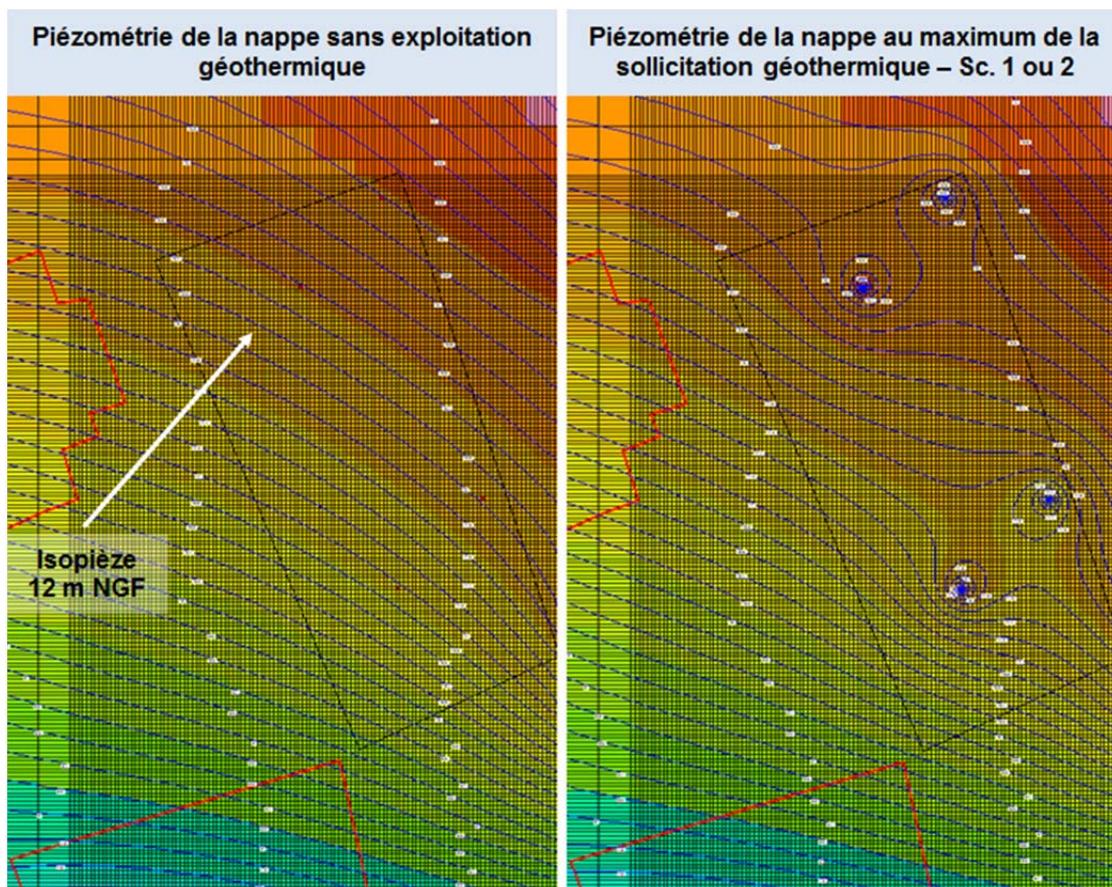


Illustration 41 : Piézométrie de la nappe et incidence des opérations géothermiques.

Il est à rappeler encore le fait important que l'ensemble de la quantité d'eau pompée de la nappe lui sera restituée via les puits de réinjection, ce qui exclut tout risque d'épuisement de son volume d'eau.

Pour ce qui est des rabattements calculés via la modélisation, le niveau de la nappe varie entre 2 et 3 m entre l'état initial et l'état correspondant au maximum de l'exploitation au mois de juillet/août.

Le tableau suivant résume les valeurs piézométriques calculées au niveau des forages d'exploitation.

Forage géothermique	Niveau initial (m NGF)	Niveau au maximum de la demande (m NGF)	Variation piézométrique (m)
Pompage 1	13,4	11,1	-2,3
Réinjection 1	12,6	15,0	+2,4
Pompage 2	12,0	9,8	-2,2
Réinjection 2	10,9	13,7	+2,8

Tableau 6 : Variations piézométriques calculées au niveau des ouvrages géothermiques.

5.5.2. Scénario 3

Ce scénario se différencie des deux premiers par le nombre plus important de doublets qui seront mis en place sur plusieurs séquences. Ce phasage de réalisation offre plus de flexibilité aux opérateurs et maîtres d'ouvrage mais impliquerait un investissement financier plus conséquent (sans prise en compte de l'effet d'actualisation - cf. la partie économique en chapitre 8).

Les aspects technico-économiques sont abordés dans les chapitres suivants.

Le nombre de doublets retenus dans cette étude pour le scénario 3 est de six doublets (douze ouvrages). Néanmoins, lors de l'installation des opérations géothermiques, il sera tout à fait possible de recourir à un nombre différent de doublets en fonction du contexte et des contraintes rencontrées.

La disposition suggérée pour les ouvrages géothermique et le phasage de leur réalisation sont illustrés sur la figure suivante (ill. 42).

Cette distribution spatiale des forages et leur réalisation en plusieurs étapes est effectuée suivant le phasage établi par l'EPA plaine du Var figurant dans l'illustration suivante.

Il est à signaler qu'il s'agit d'un plan provisoire susceptible de subir des modifications au cours de l'urbanisation du secteur.

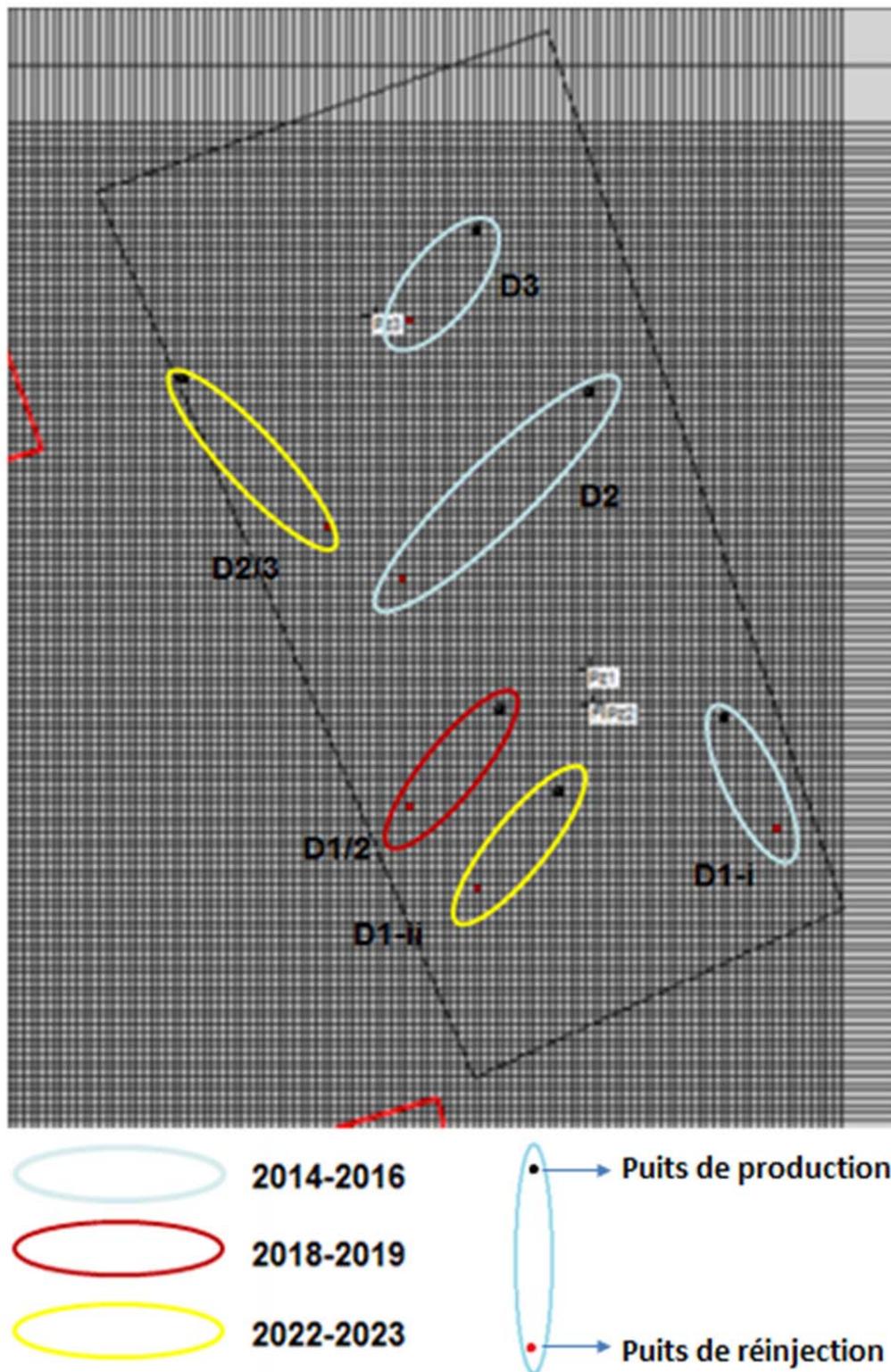


Illustration 42 : Emplacement des doublets géothermiques et phasage de réalisation - Scénario 3.

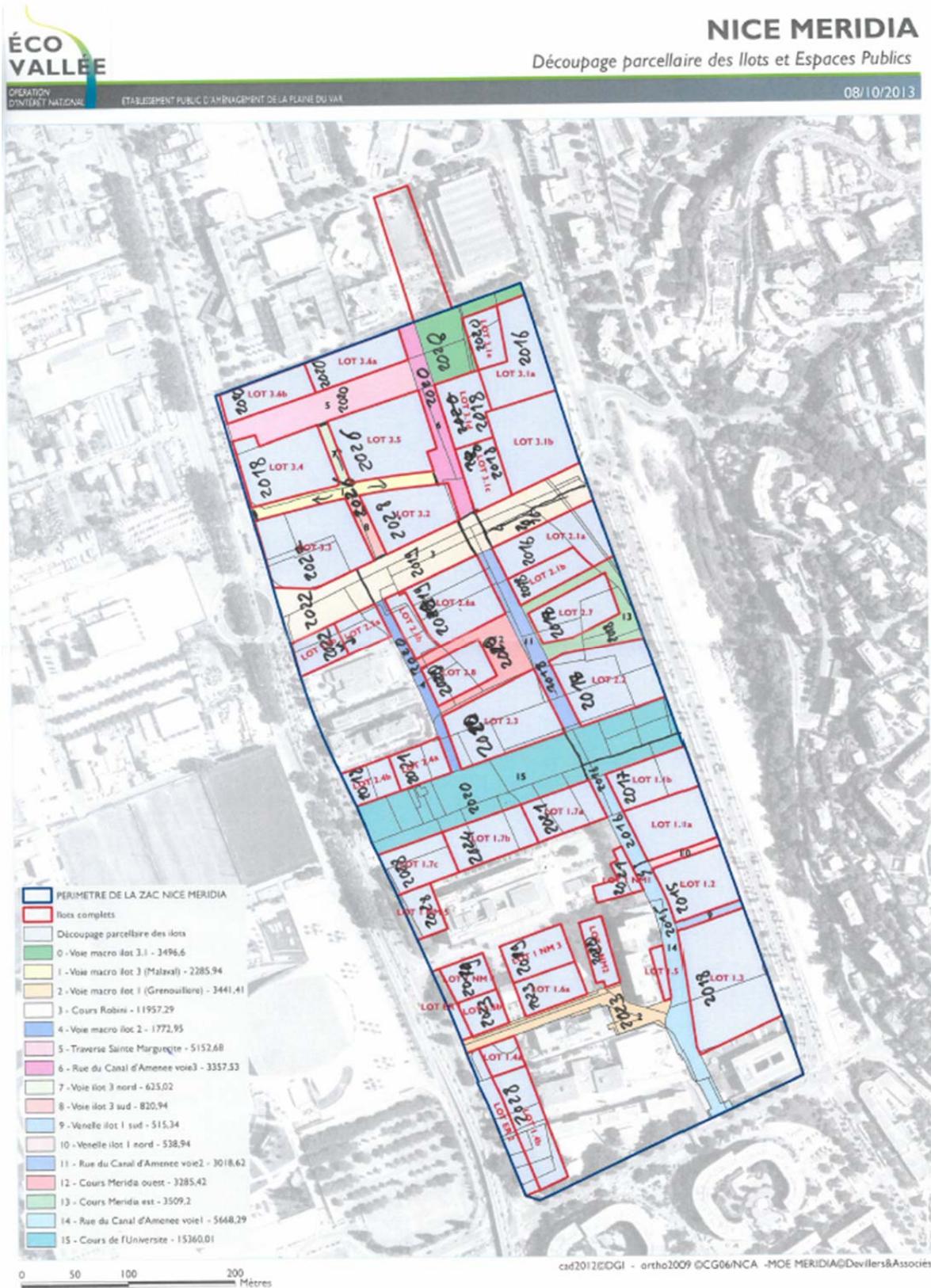


Illustration 43 : Plan de phasage de l'urbanisation de Nice Méridia - dates prévisionnelles de livraison (document EPA de la plaine du Var).

Dans un premier temps, cette réalisation en étapes permettra de couvrir, grâce aux trois doublets D1-i, D2 et D3, l'ensemble des besoins thermiques des bâtiments construits et livrés avant 2018/2019. La mise en place de ces opérations doit s'effectuer de telle sorte que les premiers bâtiments opérationnels puissent recourir à la géothermie une fois livrés.

À l'horizon 2018/2019, il sera nécessaire de réaliser un nouveau doublet D1/2, car les trois premiers ne seront plus en mesure d'assurer la couverture énergétique des futurs bâtiments. La fourniture énergétique de D1/2 sera répartie entre les macro-lots 1 et 2.

Cet état sera maintenu jusqu'à 2022/2023, période après laquelle la demande énergétique dépassera les capacités des quatre doublets déjà en fonction. Il deviendra alors indispensable de rajouter deux doublets qui finiront par compléter l'opération de géothermie à Nice Méridia, et garantir la couverture de la demande thermique de l'ensemble des bâtiments à long terme.

Le tableau qui suit indique les numéros de chaque lot cessible et le doublet géothermique correspondant.

MACRO-LOT 1			MACRO-LOT 2			MACRO-LOT 3		
micro-lot	n° lot cessible	Doublet	micro-lot	n° lot cessible	Doublet	micro-lot	n° lot cessible	Doublet
1.1	1.1a	D1-i	2.1	2.1a	D2-i	3.1	3.1e	D3-i
1.1	1.1b	D1-i	2.1	2.1b	D2-i	3.2	3.2	D2/3-iii
1.2	1.2	D1-i	2.1	2.1b	D2-i	3.2		D2/3-iii
1.3	1.3.a	D1-i	2.2	2.2a	D2-i	3.2		D2/3-iii
1.3	1.3.b	D1-i	2.2	2.2b	D2-i	3.3	3.3	D2/3-iii
1.3	1.3.c	D1-i	2.2	2.2c	D2-i	3.3		D2/3-iii
1.4	1.4a	D1-iii	2.2	2.2d	D2-i	3.4	3.4	D3-i
1.4	1.4b	D1-iii	2.3	2.3	D2-i	3.4		D3-i
1.5	1.5 a	D1-i	2.3		D2-i	3.5	3.5	D2/3-iii
1.5	1.5 b	D1-i	2.4	2.4a	D2-i	3.5		D2/3-iii
1.6	1.6a	D1-iii	2.4	2.4b	D2-i	3.6	3.6a	D3-i
1.6	1.6b	D1-iii	2.5	2.5a	D2/3-iii	3.6	3.6b	D3-i
1.7	1.7a	D1/2-ii	2.5	2.5b	D2/3-iii	3.6		D3-i
1.7	1.7b	D1-iii	2.6	2.6a	D1/2-ii			
1.7	1.7c	D1-iii	2.6		D1/2-ii			
1 NM	1 NM-1a	D1/2-ii	2.6	2.6b	D1/2-ii			
1 NM	1 NM-1b	D1/2-ii	2.7	2.7	D2-i			
1 NM	1 NM-2	D1/2-ii	2.7		D2-i			
1 NM	1 NM-3	D1-i	2.7		D2-i			
1 NM	1 NM-4	D1/2-ii	2.8	2.8	D1/2-ii			
1 NM	1 NM-5	D1-iii	2.8		D1/2-ii			
ER	ER 1							
ER	ER 2							

Tableau 7 : Répartition des doublets en fonction des numéros de lots cessibles.

La modélisation de ce scénario via l'outil MARTHE montre que la mise en place de l'ensemble des opérations s'avère plus compliqué que pour les deux premiers scénarios. Cela est dû à la multiplicité des opérations dans un périmètre restreint, pouvant causer des conflits d'usage

entre les six doublets (phénomènes de recyclage thermique ou de surélévation de la côte piézométrique lors de plusieurs réinjections proches).

Au final, les multiples simulations réalisées pour le scénario 3 ont permis de dégager la configuration de l'illustration 42. Celle-ci permet une exploitation optimale tout en évitant les risques évoqués précédemment.

La figure suivante montre l'évolution des nuages thermiques une fois que tous les doublets soient en fonctionnement. L'exploitation s'opère dans des conditions pérennes, et l'intrusion observée au niveau du périmètre AEP sud n'est pas problématique car l'écart de température ne dépasse pas 2 °C par rapport à celle de l'aquifère.

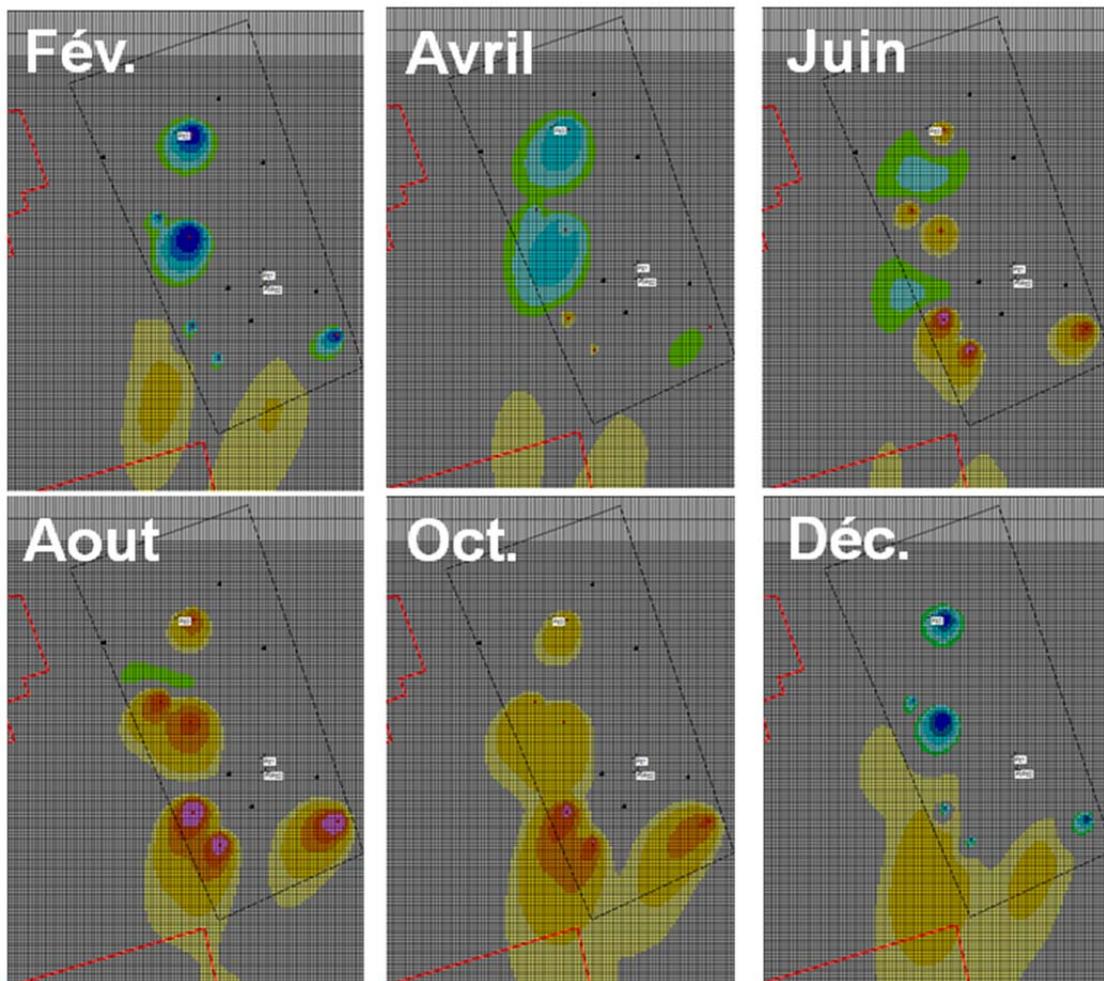


Illustration 44 : Impacts thermiques de la géothermie sur la nappe - 30^e année d'exploitation - Scénario 3.

En conclusion, il faudrait noter que chaque opération géothermique dans le cadre de Nice Méridia aura ses spécificités, et qu'il sera donc nécessaire d'introduire ses paramètres d'exploitation dans ce modèle numérique pour déterminer la configuration optimale de sa mise en place.

6. Expression des demandes thermiques

Ce chapitre décrit la méthode mise en œuvre pour estimer les quantités d'énergie géothermique à fournir, cela en évaluant les demandes énergétiques des bâtiments.

La formulation d'une méthodologie spécifique a été nécessaire, notamment pour pouvoir tester différents scénarios non encore connus à la date d'élaboration des estimations des demandes thermiques. C'est par exemple le cas du Rafraîchissement des locaux d'habitation.

6.1. FINALITÉ ET CADRE D'EXÉCUTION

L'objectif du présent chapitre est d'exposer la démarche qui conduit à la détermination des puissances géothermiques à installer sur le territoire de Nice Méridia ; les principaux paramètres intégrés ayant été les suivants.

Demandes thermiques des bâtiments

- Les demandes thermiques des bâtiments sont exprimées au regard des surfaces bâties prévisionnelles, des usages escomptés pour ces surfaces.
- Les surfaces bâties et les usages figurent dans un fichier EXCEL transmis par ARTELIA.
- Les demandes thermiques de chauffage et de climatisation ont été ramenées à l'unité de surface et exprimées en kWh/m².an ; cela sur la base des consommations annuelles indicatives calculées par ARTELIA et complétées pour le Rafraîchissement.
- La prise en considération des dates des mises en service n'intervient qu'en variation d'un même scénario technique.

Ressource géothermique et technique géothermique afférente

- La ressource géothermique retenue est celle de l'aquifère superficiel dont la productivité ressort comme étant suffisante pour répondre à l'ensemble des besoins thermiques sans déborder des limites foncières de Nice Méridia.
- La technique géothermique prise en considération est celle du doublet géothermique impliquant que la totalité de l'eau pompée est réinjectée dans le même niveau aquifère après être passée dans un échangeur de chaleur.

Système géothermique pour exploiter la ressource sur aquifère

- Le système thermodynamique raccordé aux doublets géothermiques est supposé exploiter des pompes à chaleur à compression mécanique entraînées par des moteurs électriques. Il n'est pas fait de distinction du type de montage. Ces pompes à chaleur géothermiques sont dénommées PACg par la suite.
- Le COP (coefficient de performance) de la PACg est pris égal à 4 ; cette valeur du COP étant réaliste aussi bien pour la production de chaud que pour la production de froid. Ce COP ne s'applique qu'aux équipements géothermiques et ne prend pas en considération la distribution de l'énergie thermique dans les locaux
- Pour le rafraîchissement des locaux, un mode « Rafraîchissement direct » a été introduit. Dans ce cas, il n'y a pas de machine thermodynamique et le COP s'applique donc uniquement aux

équipements de pompage. Il est alors pris égal à 20 ; ce qui correspond à une énergie de pompage égale à 5 % de l'énergie géothermique échangée.

Considérations pratiques

- Localement, pour le projet de Nice Méridia, la technique géothermique du doublet sur aquifère superficiel paraît à même de satisfaire l'intégralité des demandes liées au confort thermique. Cela signifie que l'estimation des puissances géothermiques installées qui sont à prévoir peut être effectuée sans recourir à un appoint.
- Le mode de distribution de l'énergie géothermique n'impacte que marginalement la puissance géothermique installée. De ce fait :
 - la distribution en boucle tempérée ou en réseau de chaleur (Chaud, Frais) n'est pas distinguée. Ce point est néanmoins traité au paragraphe « Discussion »,
 - le ΔT entre la température de production de l'eau géothermale et la température de réinjection de cette eau est considéré comme assez peu variable et se situant entre 6 °C et 10 °C. Ce ΔT permet de convertir directement une énergie thermique échangée en débit d'eau géothermale.

6.2. DEMANDES THERMIQUES ANNUALISÉES DES BÂTIMENTS

6.2.1. Surfaces concernées

Sur la base des données transmises par ARTELIA, les bâtiments sont connus de la façon suivante :

- localisation dans le projet : appartenance à un lot et à un macro-lot ;
- surface : surface au sol et somme des surfaces des plateaux, c'est-à-dire des surfaces chauffées et/ou rafraîchies ;
- usage : ARTELIA distingue les usages suivants qui ont été ramenés à simplement trois usages :

Usages dans les projets ARTELIA	Usages retenus pour la géothermie
Tertiaire/bureaux	(1) Tertiaire/bureaux
Logements	(2) Logements
Hôtellerie	(3) Hôtels
Activités	(1) Tertiaire/bureaux
Commerces / services	(1) Tertiaire/bureaux
Equipements	(1) Tertiaire/bureaux
Université	(1) Tertiaire/bureaux

Les fichiers communiqués au BRGM ont donc distingué trois macro-lots, eux même décomposés en lots numérotés (Tableau 8, Tableau 9, Tableau 10) ; cette nomenclature distinguant, le cas échéant, les surfaces au sol et les surfaces de planchers d'un même Lot en fonction des usages.

Pour tous ces Lots, l'EPA Plaine du Var a communiqué en novembre 2013 une estimation prévisionnelle des années de mise en service. Ces dates sont également reportées dans les tableaux ci-après. On notera toutefois, que ces dates ont un impact assez limité sur les prévisions géothermiques dans la mesure où les puissances qui seront définitivement installées auront une durée d'exploitation grande au regard de l'échelonnement de l'accroissement de la demande thermique. Ce serait surtout le montage financier qui serait concerné mais ce point n'est pas traité par le BRGM.

Lots	Surface au sol (m ²)	Surface de planchers (m ²)	Usage ARTELIA	Usage pour la géothermie	Année
1.1a	3 843	10 181	Logements	(2)	2016
1.1b	2 985	4 694	Tertiaire/bureaux	(1)	2017
1.2	3 400	10 000	Tertiaire/bureaux	(1)	2015
1.3.a	8 500	2 600	Tertiaire/bureaux	(1)	2018
1.3.b		3 465	Logements	(2)	
1.3.c		15 078	Equipements	(1)	
1.4a	1 029	5 552	Tertiaire/bureaux	(1)	2028
1.4b	3 482	12 925	Tertiaire/bureaux	(1)	
1.5 a	536	202	Activités	(1)	2015
1.5 b		394	Commerces / services	(1)	
1.6a	1 965	4 832	Tertiaire/bureaux	(1)	2023
1.6b	1 264	6 462	Tertiaire/bureaux	(1)	2023
1.7a	2 722	8 523	Université	(1)	2021
1.7b	3 175	9 358	Université	(1)	2024
1.7c	2 621	9 302	Université	(1)	2028
1 NM-1a	1 144	5 777	Tertiaire/bureaux	(1)	2021
1 NM-1b		772	Commerces / services	(1)	
1 NM-2	1 444	8 231	Tertiaire/bureaux	(1)	2020
1 NM-3	2 299	11 651	Tertiaire/bureaux	(1)	2019
1 NM-4	1 515	8 267	Tertiaire/bureaux	(1)	2019
1 NM-5	1 457	4 769	Tertiaire/bureaux	(1)	2028

Totaux	43 381	143 035
--------	--------	---------

Tableau 8 : Détail des lots du macro - Lot 1.

Lots	Surface au sol (m ²)	Surface des plateaux (m ²)	Usage ARTELIA	Usage pour la géothermie	Année
2.1a	4 023	13 811	Logements	(2)	2016
2.1a		722	Commerces / services	(1)	
2.1b	1 913	6 441	Logements	(2)	2018
2.2a	5 775	10 230	Logements	(2)	2018
2.2b		1 768	Commerces / services	(1)	
2.2c		4 328	Hôtellerie	(3)	
2.2d		3 383	Tertiaire/bureaux	(1)	
2.3	6 550	24 596	Logements	(2)	2020
		532	Commerces / services	(1)	
2.4a	1 598	6 504	Logements	(2)	2021
2.4b	1 565	6 036	Commerces / services	(1)	2018
2.5a	1 516	4 498	Logements	(2)	2022
2.5b	1 589	7 729	Commerces / services	(1)	2022
2.6a	4 678	15 530	Université	(1)	2019
		15 530	Tertiaire/bureaux	(1)	
2.6b	1 371	6 695	Logements	(2)	2020
2.7	3 104	7 853	Logements	(2)	2018
		2 212	Commerces / services	(1)	
		2 279	Tertiaire/bureaux	(1)	
2.8	2 558	8 913	Logements	(2)	2020
		596	Commerces / services	(1)	

Totaux	36 240	150 183
--------	--------	---------

Tableau 9 : Détail des lots du macro - Lot 2.

Lots	Surface au sol (m ²)	Surface des plateaux (m ²)	Usage ARTELIA	Usage pour la géothermie	Année
3.1a-3.1d	n/a	n/a	n/a	n/a	2018
3.1e	1 930	4 361	Logements	(2)	2020
3.2	4 164	4 825	Logements	(2)	2028
		1 091	Commerces / services	(1)	
		2 808	Tertiaire/bureaux	(1)	
3.3	6 522	5 530	Tertiaire/bureaux	(1)	2027
		10 327	Logements	(2)	
3.4	4 845	7 213	Tertiaire/bureaux	(1)	2018
		8 555	Logements	(2)	
3.5	6 170	14 479	Logements	(2)	2036
		992	Équipements	(1)	
3.6a	2 641	6 337	Logements	(2)	2020
3.6b	2 402	3 093	Tertiaire/bureaux	(1)	2020
		5 638	Logements	(2)	
Totaux	28 674	75 246			

Tableau 10 : Détail des lots du macro - lot 3.

Nota :

- Depuis 2011 (article 25 de la loi Grenelle), la surface de plancher (SP ou SDP) se substitue à la SHON (surface habitable Hors œuvre nette). C'est la donnée SP qui est utilisée pour les estimations des besoins thermiques des lots.
- Les documents transmis par ARTELIA ne renseignent pas certains lots, notamment les lots : 3.1a, 3.1b, 3.1c et 3.1d

Au total, le projet Nice Méridia comprend 57 lots (dont 2 non attribués), réparti en 23, 21 et 13 lots respectivement pour les trois macro-lots 1, 2 et 3. La distribution par type d'usage et par surface de plancher est résumée dans le tableau 11 suivant :

Usage	Nombre de n° lot	Somme de SP totale (m ²)
macro-lot 1	23	143 035
Commerces / services	5	24 969
Logements	2	13 646
Tertiaire/bureaux	14	104 419
macro-lot 2	21	150 183
Commerces / services	7	19 594
Hôtellerie	1	4 328
Logements	9	89 540
Tertiaire/bureaux	2	36 721
macro-lot 3	13	75 246
Commerces / services	2	2 082
Logements	7	54 520
Tertiaire/bureaux	4	18 643
Total	57	368 463

Tableau 11 : Synthèse de la répartition des lots de Nice Méridia.

En terme d'aménagement des lots, les usages « logements » et « tertiaire/bureaux » représentent de manière égale 43 % de la surface de plancher totale, contre 14 % pour l'usage « commerces/services ».

Usage	Nombre Bat.	SP totale (m ²)	Proportion SP
Commerces / services	15	50 974	14 %
Logements	18	157 706	43 %
Tertiaire/bureaux	22	159 784	43 %
Total	55	368 463	100 %

Tableau 12 : Répartition des usages sur l'ensemble des aménagement Nice Méridia.

6.2.2. Demandes énergétiques selon l'usage

La demande énergétique s'apprécie selon les critères de la réglementation thermique en vigueur, à savoir le RT-2012.

Synthétiquement, cette réglementation exprime la performance énergétique en énergie primaire, cela pour le cumul de cinq usages : Éclairage, Chauffage, ECS, refroidissement/ rafraîchissement, et auxiliaires (ventilation et pompes). L'indicateur utilisé pour représenter la demande énergétique étant en l'occurrence le CEPmax qui représente l'exigence de consommation énergétique. Il s'exprime en kWh/m².an et ne s'applique qu'aux énergies primaires. L'énergie géothermique étant théoriquement considérée comme une énergie renouvelable, seule l'électricité serait en principe à prendre en considération.

Or, pour pouvoir faire un calcul de la puissance géothermique installée, c'est l'énergie finale (énergie utilisée) qu'il faut prendre en considération ; seules les énergies pour le chauffage, l'ECS et le rafraîchissement (ou climatisation) étant à considérer. Dans cette étude, il ne sera donc fait référence qu'aux énergies utiles étant bien entendu que les exigences vis-à-vis du RT-2012 restent de toute façon satisfaites.

Dans cette étude, des hypothèses ont donc été construites pour estimer les besoins des bâtiments exprimées en énergie utile / finale. Ces hypothèses utilisent les résultats obtenus par ailleurs par ARTELIA. Elles sont présentées ci-après.

Synthèse des propositions d'ARTELIA - Cas des locaux d'habitation

Les consommations énergétiques ont été regardées par ARTELIA pour les usages de chauffage et de préchauffage à 35 °C de l'ECS.

ARTELIA a réalisé une simulation dynamique pour un bâtiment d'une surface de 9 000 m² ; cela pour un scénario conforme à la RT-2012. Restituée au pas de temps d'une heure, cette simulation a notamment pour objet de faire ressortir les différences entre weekend et semaine pour ce type de bâtiment.

Pour le poste chauffage, l'étude ARTELIA suppose un prélèvement d'énergie géothermique de 161 MWh/an ; **ce qui correspond à une demande de 24 kWh/m².an pour l'habitat en mode chauffage**. Cette demande paraît élevée au regard des performances qui peuvent être obtenues sur le secteur de Nice. Néanmoins, il est proposé de conserver cette valeur.

Pour le poste ECS, l'étude ARTELIA suppose un prélèvement d'énergie géothermique de 60 MWh/an, ce qui correspond à une demande de **9 kWh/m².an pour l'ECS** ; cette demande étant uniquement représentative d'un préchauffage. De fait, cette demande paraît sous-estimée si on considère qu'un système géothermique est à même de fournir l'intégralité de la demande d'ECS. De ce fait, il est plutôt proposé de retenir une valeur de consommation de l'ordre de **20 kWh/m².an**.

L'étude d'ARTELIA n'a pas envisagé de Rafraîchissement des logements. Toutefois, il est proposé de considérer que la demande énergétique pour le Rafraîchissement se situe à environ 5 kWh/m².an pour les locaux d'habitation.

Si les locaux d'habitation devaient être climatisés (et non pas rafraichis), la solution technique recommandée dans le contexte de Nice Méridia consisterait à prioritairement envisager un système thermodynamique combiné avec la production d'ECS. De ce fait, il est raisonnable de considérer que la demande géothermique pour de la climatisation des logements sera réduite, probablement à un niveau inférieur à 10 kWh/m².an.

À retenir : Valeurs indicatives de demandes thermiques pour les logements :

- **Chauffage :** 24 kWh/m².an,
- **ECS :** 20 kWh/m².an,
- **Raфраîchissement :** 5 kWh/m².an (si pas de climatisation),
- **Climatisation :** 10 kWh/m².an (si pas de Raфраîchissement direct).

Synthèse des propositions d'ARTELIA - Cas du tertiaire/bureau

Les consommations énergétiques des bureaux sont regardées pour les usages de chauffage et de climatisation. ARTELIA a réalisé une simulation dynamique pour un bâtiment d'une surface de 9 000 m² ; cela en conformité avec les exigences de réglementation thermique RT-2012.

• **Mode Chauffage**

Selon la simulation d'ARTELIA, avec un COP de 4 pour la PAC, ARTELIA retient une puissance géothermique installée de 191 kW et un prélèvement énergétique de 40 MWh par an. Un tel prélèvement d'énergie géothermique (40 MWh/an) correspond à **une demande de chauffage de seulement 6 kWh/m².an** ce qui est faible sans être totalement impossible.

• **Mode Climatisation (Refroidissement)**

Selon la simulation réalisée par ARTELIA, la valeur pour l'énergie géothermique annuelle échangée pour la climatisation serait de 228 MWh/an. Un tel prélèvement d'énergie géothermique correspond approximativement à **une demande de climatisation de 20 kWh/m².an**.

• **Mode Raфраîchissement direct**

Bien que non pris en considération par l'étude ARTELIA, il est proposé d'envisager un mode Raфраîchissement direct. Pour ce mode il faut admettre que la température de confort sera supérieure à celle d'une climatisation. Par exemple, on pourra considérer que la température dans les locaux pourrait être de l'ordre de 25 °C, soit environ 10 °C au-dessus de la température de l'eau de l'aquifère.

En première approximation, on a tendance à considérer que les quantités d'énergie géothermique nécessaires pour assurer du Raфраîchissement direct se situent approximativement à 50 % des quantités nécessaire à de la climatisation, soit **une demande en mode Raфраîchissement direct de 10 kWh/m².an**.

À retenir : Valeurs indicatives de demandes thermiques pour le Tertiaire :

- **Chauffage :** 6 kWh/m².an,
- **ECS :** 0 kWh/m².an,

- **Rafrâichissement : 10 kWh/m².an (si pas de climatisation),**
- **Climatisation : 20 kWh/m².an (si pas de Rafrâichissement direct).**

Estimations des demandes thermiques pour l'hôtellerie

Les consommations énergétiques pour l'hôtellerie n'ont pas été estimées par ARTELIA. Il est donc proposé de retenir pour ces locaux une combinaison des demandes retenues pour les logements et pour le tertiaire :

- les demandes pour le chauffage et l'ECS sont identiques à celles des logements ;
- les demandes pour le Rafrâichissement ou la climatisation sont identiques à celles du tertiaire

À retenir : Valeurs indicatives de demandes thermiques pour l'Hôtellerie :

- **Chauffage : 24 kWh/m².an,**
- **ECS : 20 kWh/m².an,**
- **Rafrâichissement : 10 kWh/m².an (si pas de climatisation),**
- **Climatisation : 20 kWh/m².an (si pas de Rafrâichissement direct).**

6.2.3. Météo locale

La météo sur le secteur de Nice Méridia est prise identique à celle de l'aéroport Nice-Côte d'Azur où la station relève les demandes de chauffage et de climatisation.

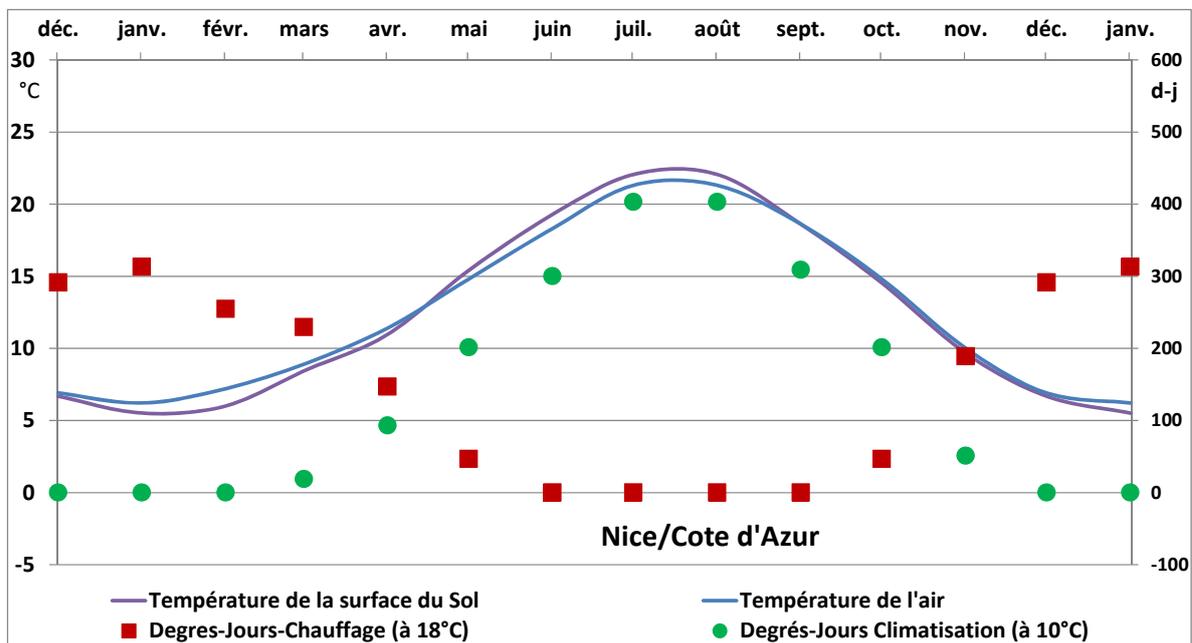


Illustration 45 : Graphique météorologique pour la station de Nice-Côte-d'Azur.

Nice/Cote d'Azur					
Unité					
Latitude	°N	43.65			
Longitude	°E	7.20			
Élévation	m	27.00			
Temp. extérieure de calcul de chauffage	°C	-2.90			
Temp. extérieure de calcul de climatisation	°C	28.50	°C	°C	
Amplitude des températures du sol	°C	12.27	18	10	
Amplitude des moyennes du sol	°C	16.55			
			Température	DJU	DJU
			Température de l'air	du sol	Chauffage
					Climatisation
Mois	Mois	°C	°C	°C-j	°C-j
Janvier	31	6.21	5.51	313.1	0.0
Février	28	7.21	6.01	254.8	0.0
Mars	31	8.91	8.44	229.4	18.6
Avril	30	11.41	10.97	147.0	93.0
Mai	31	14.81	15.41	46.5	201.5
Juin	30	18.31	19.28	0.0	300.0
Juillet	31	21.31	22.06	0.0	403.0
Août	31	21.31	22.06	0.0	403.0
Septembre	30	18.61	18.61	0.0	309.0
Octobre	31	14.81	14.53	46.5	201.5
Novembre	30	10.01	9.67	189.0	51.0
Décembre	31	6.91	6.68	291.4	0.0
Annuel		13.32	13.27	1 517.7	1 980.6

Tableau 13 : Données météo relevées par la station de Nice-Côte-d'Azur.

6.3. ESTIMATION DES PUISSANCES GÉOTHERMIQUES INSTALLÉES

6.3.1. Démarche méthodologique

Principe

La démarche méthodologique pour évaluer la puissance géothermique installée consiste à estimer la puissance géothermique apte à satisfaire la moyenne des demandes pendant la période de sollicitation maximale, à savoir le mois de janvier pour le chauffage et les mois de juillet ou août pour le Rafraîchissement ou la climatisation.

Pour ces périodes, on va considérer en première approche que la géothermie fonctionne, en moyenne, 50 % du temps au régime nominal. Dans la réalité, notamment en réseau de chaleur, il y a modulation de la puissance thermique mais cela revient au même. Ainsi, par exemple, si on raisonne à l'échelle mensuelle, 50 % du temps représente une durée cumulée de 360 heures de fonctionnement. De fait, cela ménage de la disponibilité pour faire face aux situations extrêmes même si le bâti ne dispose pas d'inertie thermique suffisante ou si le système n'est pas équipé de tampons.

Pour illustrer cet exemple, une demande mensuelle de 360 MWh pour un temps de fonctionnement cumulé de 360 heures représente une puissance moyenne de 1 MW (1 MW = 360 MWh / 360 heures).

Application pratique

Dans l'objectif de déterminer la puissance géothermique à installer sur un macro-lot ou un ensemble de lot, il est nécessaire de cumuler les demandes en distinguant bien le type de demande (ECS, Chauffage, Rafraîchissement ou Climatisation).

Pour faire cette distinction, il est indispensable de procéder à une répartition des demandes respective sur l'année. Pour cela, le pas de temps mensuel est suffisamment représentatif.

Dans ces conditions, pour le secteur de Nice Méridia, on aura donc les profils de répartition suivants qui sont déterminés sur la base des DJU :

Profils en %	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
chauffage (18°C)	20.6 %	16.8 %	15.1 %	9.7 %	3.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	3.1 %	12.5 %	19.2 %
ECS	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %	8.3 %
clim (10°C)	0.0 %	0.0 %	0.9 %	4.7 %	10.2 %	15.1 %	20.3 %	20.3 %	15.6 %	10.2 %	2.6 %	0.0 %
frais (18°C)	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %	14.0 %	35.0 %	35.0 %	16.1 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %

Tableau 14 : Profils de répartition des demandes thermiques (météo de Nice-Côte-d'Azur)

Construisons un exemple pour les trois types de demande thermique spécifiques des bâtiments du secteur de Nice Méridia ; les logements étant en Rafraîchissement direct et l'hôtellerie et le tertiaire sur climatisation :

	Demande thermique annuelle du bâti		
	Chauffage (kWh/m ² .an)	ECS (kWh/m ² .an)	Frais/Froid (kWh/m ² .an)
Hôtellerie	24	20	20
Logements	24	20	5
Tertiaire/bureaux	6	0	20

Tableau 15 : Exemple de demandes thermiques spécifiques des bâtiments.

Si le COP des pompes à chaleur est égal à 4 aussi bien en mode chauffage qu'en mode climatisation, alors les énergies géothermiques qui correspondent aux demandes thermiques des bâtiments ci-avant (Tableau 11) seront les suivantes :

	Énergies géothermiques annuelles échangées		
	Chauffage (kWh/m ² .an)	ECS (kWh/m ² .an)	Frais/Froid (kWh/m ² .an)
Hôtellerie	18,0	15,0	25,0
Logements	18,0	15,0	5,0
Tertiaire/bureaux	4,5	0,0	25,0

Tableau 16 : Demandes géothermiques spécifiques pour les conditions du tableau 11.

En croisant les demandes géothermiques spécifiques annuelles du tableau 12 avec les profils de répartition mensuelle pour le chauffage, l'ECS, le frais et le froid, on obtient les répartitions énergétiques mensuelles suivantes (Tableau 17) pour les trois modes d'usage : logement, tertiaire/bureau et hôtellerie :

kWh/m ² /mois	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Hôtellerie	4,96	4,27	3,97	2,99	1,80	2,65	4,75	4,75	2,86	1,80	3,49	4,71
Logements	4,96	4,27	3,97	2,99	1,80	1,95	3,00	3,00	2,05	1,80	3,49	4,71
Tertiaire/bureaux	0,93	0,76	0,68	0,44	0,14	1,40	3,50	3,50	1,61	0,14	0,56	0,86

Tableau 17 : Répartitions mensuelles des sollicitations géothermiques spécifiques (COP = 4).

6.3.2. Calcul de la puissance géothermique installée et du débit afférent

On représentera ici la puissance géothermique installée directement par le débit d'eau géothermale correspondant.

Important : Dans la méthodologie mise en œuvre dans le présent paragraphe, les optimisations qui, par exemple, peuvent résulter d'une production d'eau chaude sanitaire à partir de l'énergie excédentaire des machineries de la climatisation ne sont pas prises en compte. De ce fait, toutes les demandes géothermiques sont additionnées.

Calcul du débit géothermique pour une puissance géothermique donnée

Pour une puissance géothermique donnée, le débit géothermique correspondant est calculé en supposant que le ΔT entre la température de production et la température de réinjection est connu.

Usuellement, on choisit une ΔT nominal entre 6 °C et 10 °C, la valeur de 6 °C étant retenue pour le cas présent. On admettra également que la chaleur spécifique de l'eau est de $C_p = 4\,193 \text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$. On a alors :

$$Q_{gth} = 3\,600 \times P_{gth} / (C_p \times \Delta T)$$

pù :

- Q_{gth} (débit géothermique) est exprimé en m³/h ;
- P_{gth} (puissance géothermique) est exprimé en kW ;
- 3 600 représente le nombre de secondes dans une heure.

Mode chaud (chauffage + ECS)

En mode chaud, la sollicitation maximale est obtenue en janvier. On admettra que la puissance géothermique installée est obtenue en considérant que l'énergie géothermique échangée correspond à un fonctionnement de 360 heures à la puissance géothermique nominale.

Dans les conditions de l'exemple ci-avant, les énergies géothermiques échangées pour les macro-lots et les débits d'eau géothermale correspondants sont récapitulées dans le graphique ci-après :

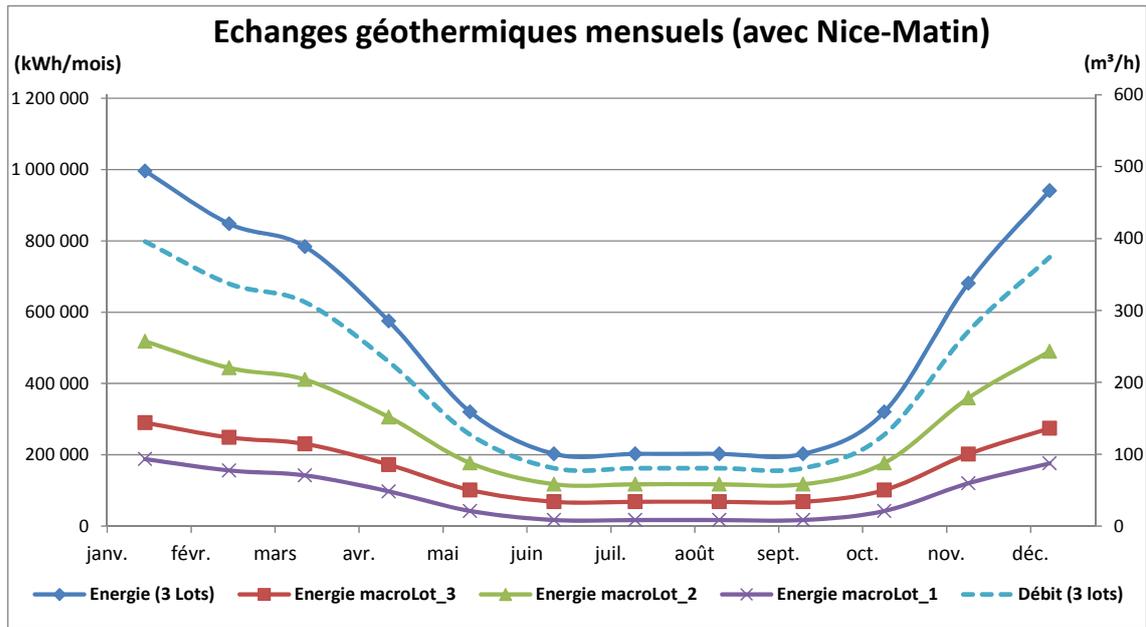


Illustration 46 : Courbes des demandes géothermiques pour le chauffage et pour l'ECS.

Mode climatisation

Ce mode ne concerne que les locaux tertiaires/bureaux et les hôtelleries. En mode climatisation, la sollicitation maximale est obtenue en juillet ou août. On admettra que la puissance géothermique installée est obtenue en considérant que l'énergie géothermique échangée correspond à un fonctionnement de 360 heures à la puissance géothermique nominale. Dans les conditions de l'exemple ci-avant les énergies géothermiques échangées pour les macro-lots et les débits d'eau géothermale afférents sont récapitulées dans le graphique ci-après (Illustration 47) :

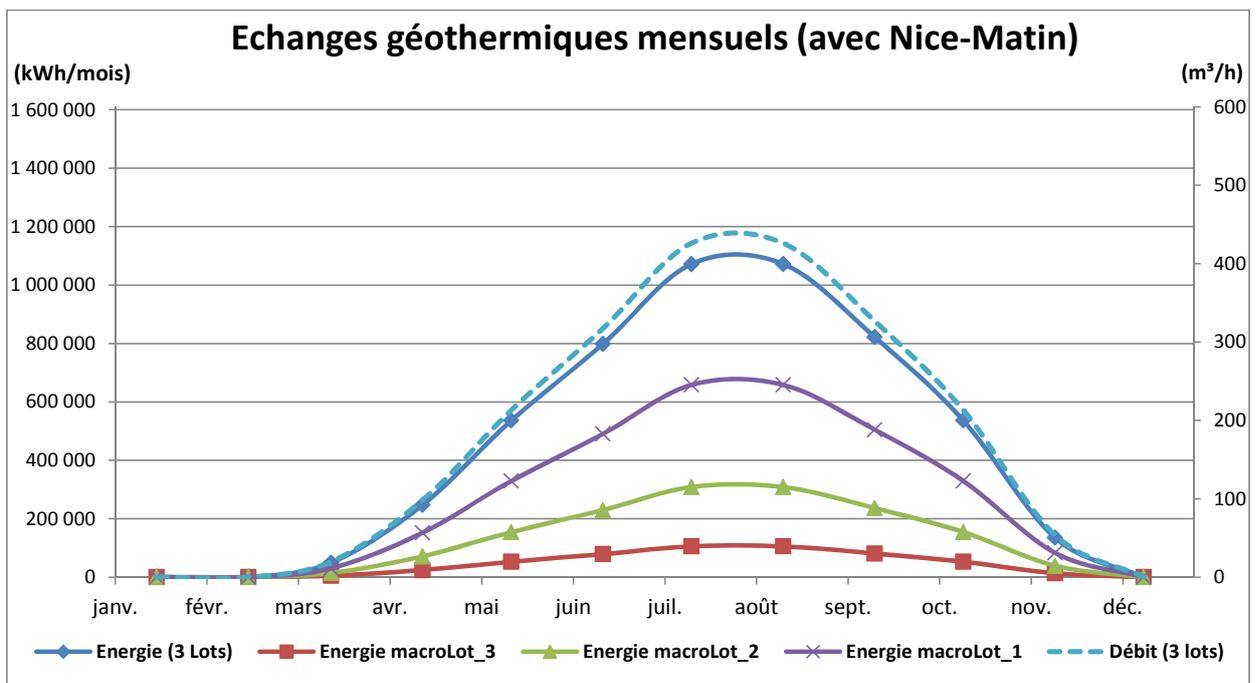


Illustration 47 : Courbes des demandes géothermiques et des débits pour la climatisation.

Mode Rafraîchissement

Ce mode ne concerne que les logements.

En mode Rafraîchissement, la sollicitation maximale est obtenue en juillet ou en août. On admettra que la puissance géothermique installée est obtenue en considérant que l'énergie géothermique échangée correspond à un fonctionnement de 360 heures à la puissance géothermique nominale.

Dans les conditions de l'exemple ci-avant, les énergies géothermiques échangées pour les macro-lots et les débits d'eau géothermale correspondants sont récapitulées dans le graphique ci-après :

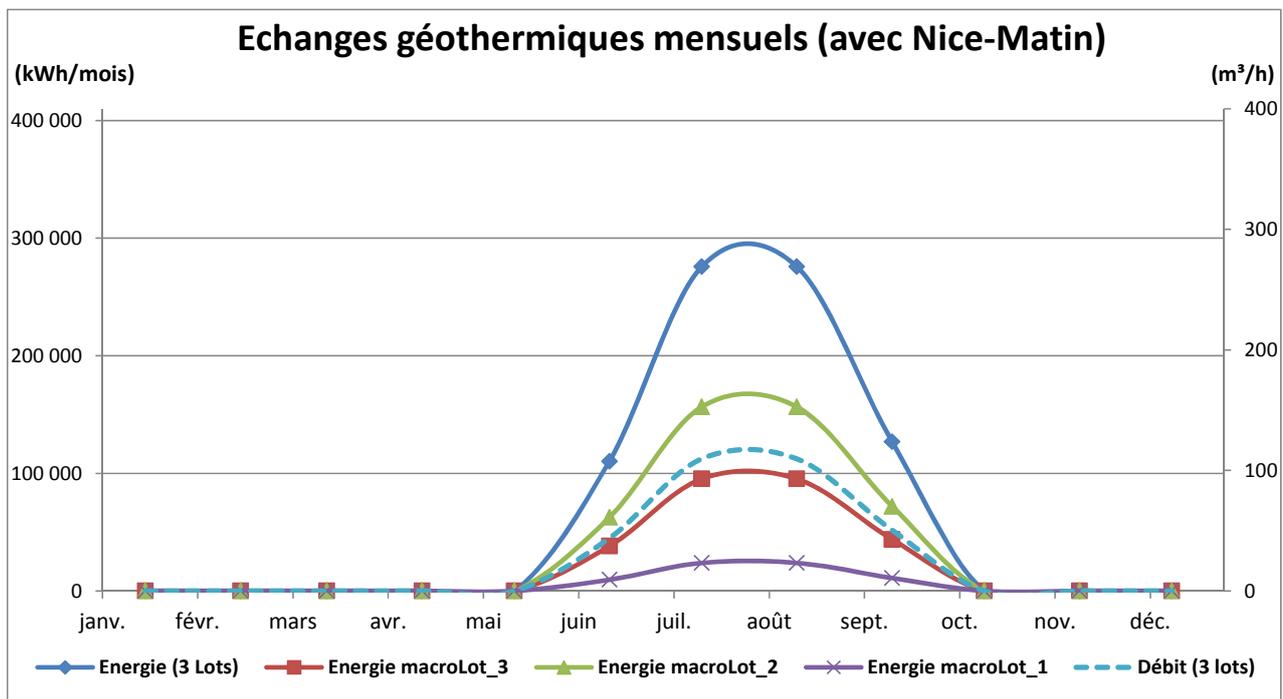


Illustration 48 : Courbes des demandes géothermiques et des débits pour le rafraîchissement.

Synthèses cumulées des demandes géothermiques et des débits

En cumulant toutes les demandes thermiques, on peut représenter les courbes résultantes des demandes géothermiques et des débits d'eau géothermale pour l'ensemble de la zone de Nice Méridia.

Cette représentation peut paraître trompeuse car elle ne distingue pas les puissances installées pour les machineries produisant du chaud et celles fonctionnant pour le Rafraîchissement.

On constate que la demande est plus importante pour produire de la climatisation que pour produire du chaud, chauffage plus ECS cumulés. Il convient donc d'étudier la possibilité de produire l'ECS à partir des excédents de la climatisation ; ce qui aurait pour effet de restreindre la sollicitation géothermique estivale.

La demande géothermique cumulée pour la production de l'ECS de l'ensemble des Lots s'établit vers 200 kWh/mois, ce qui correspond à un débit d'eau géothermale légèrement

inférieur à 100 m³/h. Logiquement, cette demande pourrait être à déduire si des systèmes de type « thermo-frigo-pompe » étaient implantés.

Pour l'exemple traité, le débit cumulé d'eau géothermale en été pourrait alors être abaissé vers 550 m³/h.

En hiver, le débit cumulé resterait vers 350 m³/h.

Toutefois, la présente étude préfère maximiser les demandes afin de vérifier que la géothermie disponible est apte à satisfaire tous les besoins.

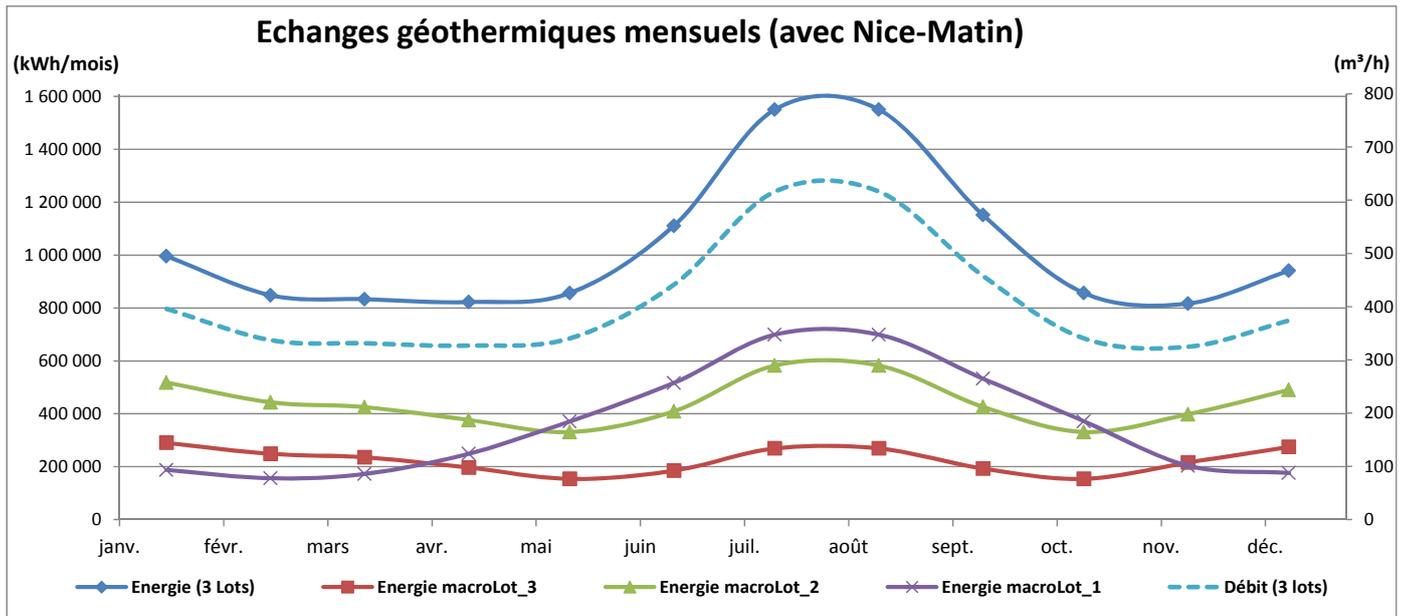


Illustration 49 : Courbes cumulant toutes les demandes géothermiques et les débits afférants.

7. Solutions techniques, scénarisation et dimensionnement

7.1. MACHINERIE

Sur le principe, il est acquis que les solutions géothermiques peuvent satisfaire l'ensemble des besoins thermiques et on admettra que les installations mises en place seront pilotées par des dispositifs recourant à l'énergie électrique :

- le chauffage et l'eau chaude sanitaire s'appuieront sur la technique des pompes à chaleur à compression mécanique entraînée par moteur électrique de même que la climatisation ;
- le rafraîchissement direct ne nécessitera de l'énergie électrique que pour le pompage ;
- le cas échéant, la technique de la thermo-frigo-pompe pourra être mise en œuvre là où la production simultanée de chaud et de frais/froid pourra être constatée. C'est par exemple le cas de la production d'ECS dans des locaux rafraîchis ou climatisés.

7.2. RÉSEAU DE DISTRIBUTION

Quelle que soit la machinerie thermodynamique, il y aura nécessité de transporter en réseau l'énergie qui est échangée avec l'eau géothermale. Pour ce faire, il existe deux grands principes qui cadrent avec le contexte de Nice Méridia :

- le principe de la machinerie centralisée considère que la température de l'énergie distribuée dans le réseau est adaptée aux besoins des bâtiments (Illustration 50). Dans ce cas, le réseau doit pouvoir transporter de l'eau suffisamment chaude pour le chauffage et l'ECS, éventuellement seulement pour un préchauffage, et suffisamment froide pour le Rafraîchissement et/ou la climatisation. De fait, le réseau est probablement constitué d'au moins deux tubes de départ et d'au moins un tube de retour ;
- le principe de la boucle tempérée considère que plusieurs machineries sont réparties le long du réseau (Illustration 51). Dans ce cas, un fluide caloporteur circule dans le réseau à une température assez peu différente de celle de l'eau géothermale. De fait, le réseau peut n'être constitué que de deux tubes, à savoir un tube de départ à la température de l'eau géothermale et un tube de retour.

En première approche, on peut considérer que les deux conceptions du réseau de distribution peuvent ne pas impacter le nombre et la localisation des ouvrages géothermiques. Toutefois, il pourra être judicieux de décomposer le réseau en plusieurs réseaux interconnectés mais cette décision relève des études de détail.

Aussi, dans le présent document, on va se focaliser sur la scénarisation des variantes de principe pour les deux solutions décrites ci-avant.

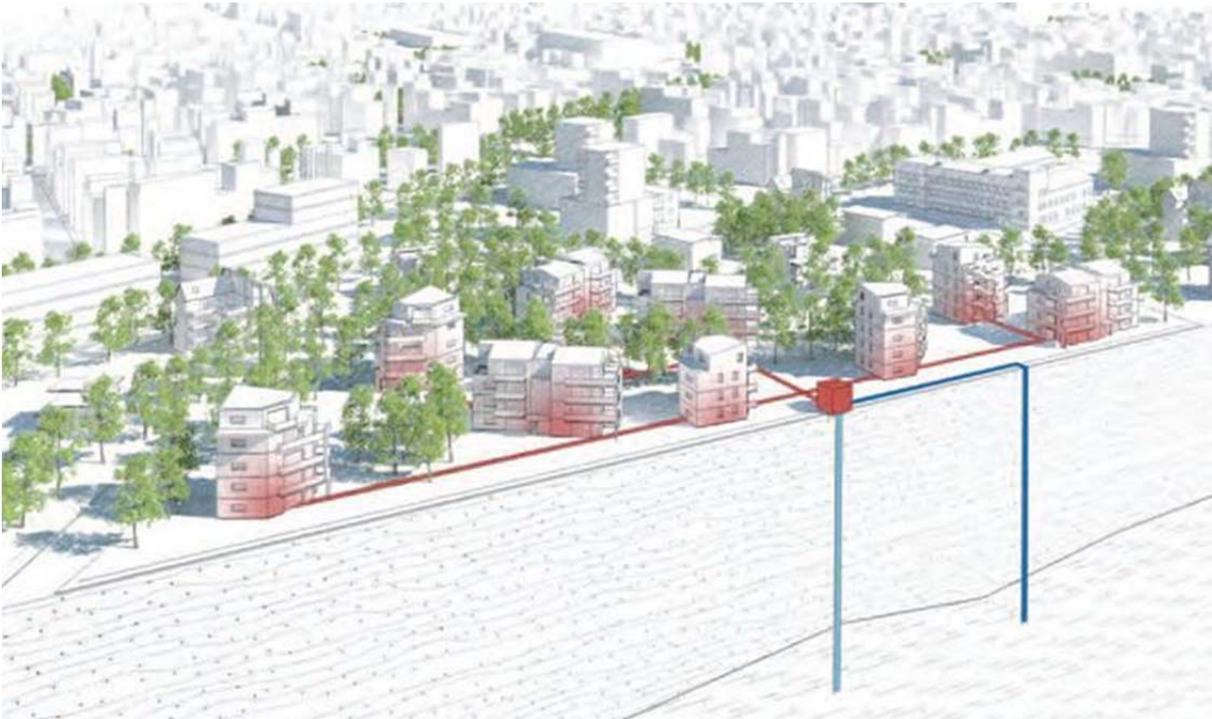


Illustration 50 : Principe du réseau avec machinerie centralisée.

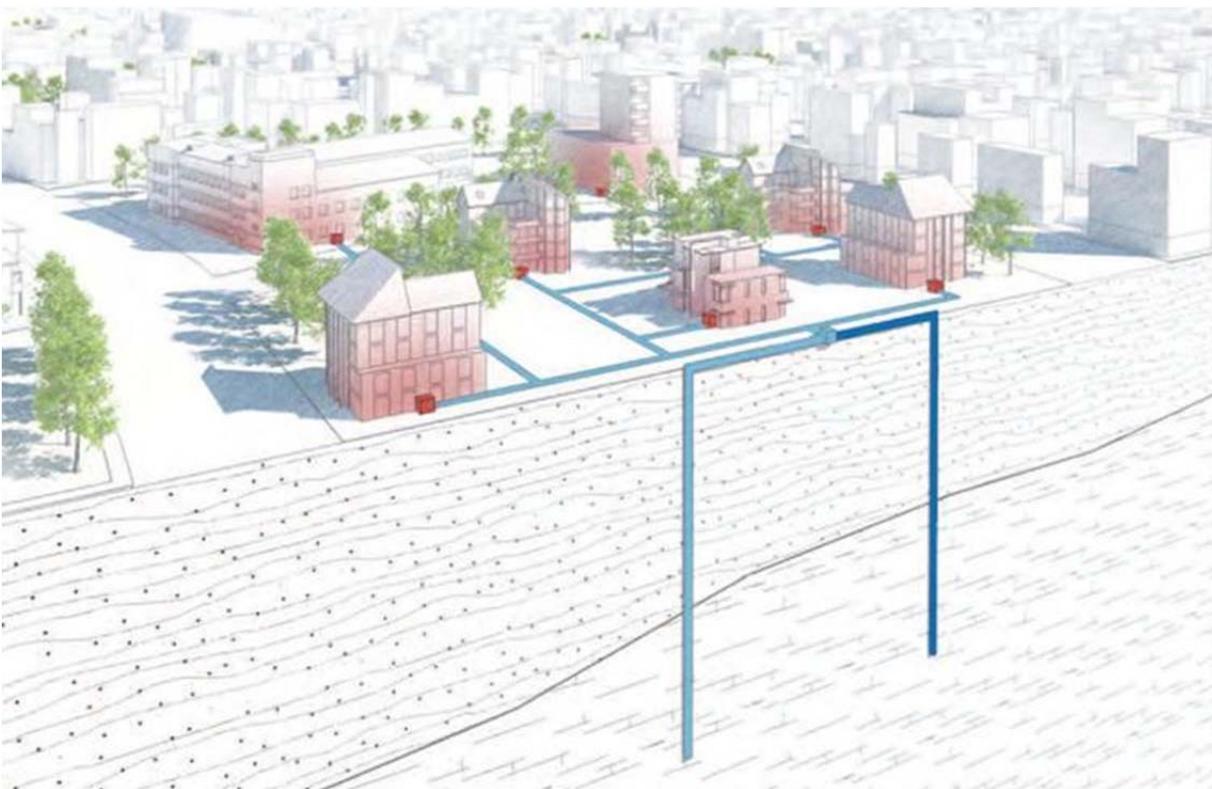


Illustration 51 : Principe du réseau en boucle tempérée avec plusieurs machineries.

7.3. SCÉNARISATION

L'urbanisation de Nice Méridia sera progressive à compter de 2015 jusqu'en 2028. Il en résulte donc une progressivité des demandes thermiques pour le chauffage, l'ECS, le rafraîchissement et la climatisation. De ce fait, il peut être nécessaire de s'interroger sur le système géothermique qui peut le mieux s'adapter aux impératifs économiques et/ou techniques liés à ce phasage des demandes thermiques.

Sur le principe, il est acquis que les solutions géothermiques vont satisfaire l'ensemble des besoins liés au confort thermique des bâtiments et que seules les deux techniques de réseaux présentées ci-avant peuvent être mises en place.

Néanmoins, du fait d'un phasage des mises en service, des variantes de ces deux techniques peuvent être envisagées. Dans la présente étude, on va considérer que la seconde technique (réseau en boucle tempérée) se prête mieux à une progressivité de la montée en puissance de la demande thermique. En définitive, on retiendra les trois scénarii suivants :

- Scénario 1 – Machinerie centralisée pour le chaud et le frais/froid qui sont distribués en un réseau 3 ou 4 tubes. En base, on prévoit deux doublets géothermiques ;
- Scénario 2 – Machineries réparties le long d'un réseau deux tubes en boucle tempérée – les réseaux et les doublets géothermiques sont déployés dès le lancement de l'opération Nice Méridia. En base, on prévoit deux doublets géothermiques ;
- Scénario 3 – Machinerie identiques au Scénario 2 mais le déploiement est progressif avec la montée en puissance – on prévoit trois étapes de déploiement du dispositif géothermique. De fait, ce scénario ménage la possibilité d'adapter le nombre des doublets – on prévoit d'implanter six doublets sur le secteur de Nice Méridia.

<p>Scénario 1 (Sc1) Machinerie centralisée et réseau 4 tubes Une phase d'investissement</p>	<p>Deux doublets alimentent en eau de nappe (15 °C) une 'chaufferie' centrale, qui fournit de l'eau chaude et l'eau fraîche ou froide. Un réseau quatre tubes distribue l'énergie thermique directement aux niveaux des températures requises par les bâtiments.</p>
<p>Scénario 2 (Sc2) Machineries réparties et réseau 2 tubes en boucle tempérée Une phase d'investissement</p>	<p>Deux doublets alimentent un échangeur de chaleur qui permet, via un réseau deux tubes en boucle fermée, de distribuer aux bâtiments une eau (15 °C) permettant à des machineries thermodynamiques réparties sur le réseau de livrer du chaud, de l'ECS, du frais ou du froid.</p>
<p>Scénario 3 (Sc3) Variante du Scénario 2 Déploiement en 3 phases des doublets, des machineries et des réseaux. Trois phases d'investissement</p>	<p>Jusqu'à six doublets alimentent, via des échangeurs de chaleur, un réseau en boucle fermé distribuant de l'eau tempérée (15 °C). Les investissements pour les doublets et les extensions de réseau se font en trois phases accompagnant les constructions des îlots.</p>

Illustration 52 : Synthèse des scénarios techniques envisageables.

7.4. SOUS-SCENARIOS

Chacun des trois scénarios est décliné en deux sous-scénarios selon que le réseau distribue du frais (rafraîchissement) ou du froid (climatisation). Les sous-scénarios géothermiques sont comparés à des sous-scénarios de référence : chauffage au gaz naturel et rafraîchissement par boucle fermée (frais ou froid). Au total, neuf sous-scénarios sont évalués (cf. ci-dessous).

Scenarios	Sous-scénarios	Mode de fourniture de l'énergie			Nombre de Doublet
		Chaud/ECS	Clim	Frais	
Sc1 (Machinerie centralisée)	Sc1-GTH/Clim	GTH	GTH		2 doublets
	Sc1-GTH/Frais	GTH		GTH	2 doublets
	Sc1-GAZ/Clim	GAZ	GTH		2 doublets (clim)
Sc2 (Machinerie distribuée)	Sc2-GTH/Clim	GTH	GTH		2 doublets
	Sc2-GTH/Frais	GTH		GTH	2 doublets
	Sc2-GAZ/Frais	GAZ		GTH	2 doublets (frais)
Sc3 (Variante Sc2 en 3 phases)	Sc3-GTH/Clim	GTH	GTH		6 doublets
	Sc3-GTH/Frais	GTH		GTH	6 doublets
	Sc3-GAZ/Frais	GAZ		GTH	6 doublets (frais)

Tableau 18 : Synthèse des sous-scénarios techniques envisageables.

Pour le scénario 3, trois périodes de réalisation, s'étalent sur 8 ans, sont envisagées : 2014/16, 2018/19 et 2022/23. Suivant la simulation hydrothermique (cf. chapitre 5), trois doublets peuvent être envisagés pour répondre à la demande des aménagements prévus en première phase (i). Ils sont complétés par un doublet quatre années plus tard et deux doublets en 2022/23 (phase iii). La distribution des doublets et leur phasage sont présentés par les illustrations suivantes :

Année de réalisation	N° Doublet	Macro-lots concernés	Nombre de lot	SP totale (m ²)	Demande énergétique en chaud, clim et frais (en kWh)
2014 / 15 (phase i)	D1-i	macro-lot 1	9	58 265	1 834 815
	D2-i	macro-lot 2	14	90 694	3 389 001
	D3-i	macro-lot 3	6	35 195	1 249 826
2018 / 19 (phase ii)	D1/2-ii	macro-lot 1&2	10	78 832	2 458 222
2022 / 23 (phase iii)	D1-iii	macro-lot 1	7	53 200	1 569 404
	D2/3-iii	macro-lot 2&3	9	52 277	1 832 249

Tableau 19 : Scénario 3 - Phasage envisagé.

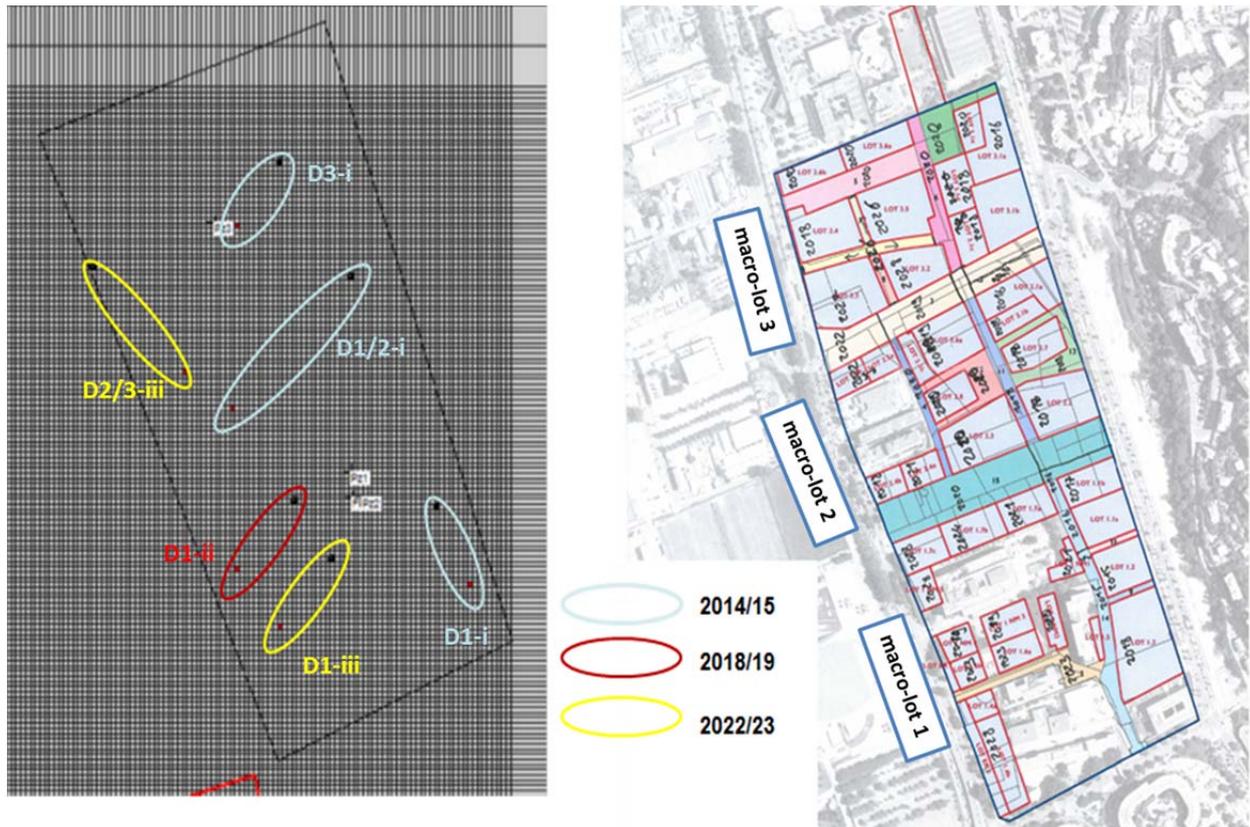


Illustration 53 : Scénario 3 - Distribution des doublets et phasage envisagé en trois périodes.

7.5. DIMENSIONNEMENT DES SOLUTIONS TECHNIQUES

7.5.1. Doublets

Le principe de fonctionnement du doublet géothermique est décrit au chapitre 2. La profondeur moyenne des forages est de 50 m. Elle est supposée identique pour l'ensemble des forages (production / réinjection) quelle que soit la solution technique retenue.

Pour chacun des scénarios, le nombre de doublet et les débits maximums nécessaires sont simulés et estimés pour chaque régime de fonctionnement du doublet (chaud, clim et frais) au chapitre 6.

7.5.2. Réseaux

Pour pré-dimensionner la longueur de réseau de conduite d'eau pour chacun des scénarios, on considère le périmètre de la zone d'aménagement (environ 320 m x 800 m) et un traçage approximative suivant le linéaire des axes des routes et rues principales (Illustration 54). À ce traçage est ajouté une conduite principale de 10 ml par lot pour le piquage du réseau vers les sous-stations, soit 550 ml. Au total, la longueur réseau est arrondie à 3650 ml pour le scénario 1 (machinerie centralisée). Le même linéaire est attribué au scénario 2 (machineries réparties). Pour le scénario 3, on considère un traçage selon six grilles (une par doublet) de 53 m x 267 m, soit respectivement 1/6 de la largeur et 1/3 de la longueur du périmètre.

Pour le scénario 1, on considère une canalisation en quatre tubes (deux tubes pour l'eau chaude et deux tubes froide). Pour les scénarios 2 et 3, on considère une canalisation en deux tubes (cf. Illustration 52).

Linéaire du réseau indicatif :

Scenarios 1 (4 tubes) :

- Linéaire nord-Sud : 1100 ml
- Linéaire ouest-Est : 2000 ml
- Connexion 55 lots : 550 ml

Linéaire réseau : 3 650 ml

Linéaire conduite (x4) : 14 600 ml

Scenarios 2 (2 tubes) :

Linéaire réseau : 3 650 ml

Linéaire conduite (x2) : 7 600 ml

Scénario 3 (2 tubes) :

- Linéaire N-S / doublet : 53 m
- Linéaire N-S / doublet : 267 mm
- Connexion Lot / doublet :

Doublet	Nombre de lot	Réseau ml
D1-i	9	90
D2-i	14	140
D3-i	6	60
D1/2-ii	10	100
D1-iii	7	70
D2/3-iii	9	90
Total		550

Linéaire réseau (6 doublets) : 2 470 ml

Linéaire conduite (x2) : 4 940 ml



Illustration 54 : Linéaire schématique du réseau de chaleur de Nice Méridia.

Il faut préciser que cette représentation du réseau est purement schématique et ne prend pas en compte l'ensemble des conduites, par exemple le piquage de conduites des sous-stations vers les bâtiments n'est pas pris en compte (réseau secondaire). Ce dimensionnement du réseau est destiné à permettre l'estimation de son coût.

7.5.3. Pompe à chaleur géothermique (PACg) et Chaufferie à gaz naturel (ChG)

Les pompes à chaleur géothermique (PACg) ou les chaufferies à gaz naturel (ChG) sont dimensionnées en fonction des puissances utiles nécessaires pour couvrir les besoins avec l'hypothèse d'un rendement à 100 %. Ces puissances sont données dans le chapitre 6.

Pour les solutions géothermiques du premier scénario (Sc1-GTH), le réseau quatre tubes est raccordé à une PACg centralisée. Dans la solution de référence (Sc1-GAZ), il est raccordé à une chaufferie centralisée à gaz naturel pour le chaud et l'ECS (2 tubes) et à une PACg centralisée pour la climatisation (deux tubes). La puissance de dimensionnement de la PACg centralisée est comprise entre 3.7 MW (Sc1-GTH/frais) et 7.2 MW (Sc1-GTH/Clim). La chaufferie de Sc1-GAZ/ Clim est dimensionnée à 2.7 MW (Tableau 20).

Scénario Sc1	Puissances utiles (kW)		
	Sc1-GTH / Clim	Sc1-GTH / Frais	Sc1-GAZ / Clim
PACg centralisée	7 235	6 501	2 766
ChG centralisée			2 660

Tableau 20 : Puissances de dimensionnement²⁰ des PACg et chaufferie gaz centralisées (scénario 1).

Scénario Sc2	Nombre de PACg et ChG				
	Sc2 GTH / Clim		Sc2-GTH / Frais	Sc1-GAZ / Clim	
	Mode chaud	Mode Clim		Mode chaud	Mode Clim
Moins de 50 kW	33	34	33	33	34
Entre 50 – 150 kW	14	18	14	14	18
Plus de 150 kW	8	3	8	8	3
Total	110 PACg		55 PACg	55 ChG	55 PACg

Tableau 21 : Nombre de PACg ou ChG selon les puissances installées (scénario 2).

Scénario Sc2	Nombre de PACg et ChG par doublet					
	Sc3 GTH / Clim					
Doublet Sc3	D1-i	D2-i	D3-i	D1/2-ii	D1-iii	D2/3-iii
Puissances utiles (KW)						
Moins de 50 kW	12	19	7	10	7	12
Entre 50 – 150 kW	4	6	4	7	7	4
Plus de 150 kW	2	3	1	3	0	2
Total (55 PACg Chaud + 55 Pag clim)	18	28	12	20	14	18
Puissances utiles (KW)	Sc3 GTH / Frais					
Moins de 50 kW	6	7	2	6	7	5
Entre 50 – 150 kW	2	4	3	3	0	2
Plus de 150 kW	1	3	1	1	0	2
Total (55 PACg Chaud)	9	14	6	10	7	9
Puissances utiles (KW)	Sc3 GAZ / Frais					
Moins de 50 kW	6	7	2	6	7	5
Entre 50 – 150 kW	2	4	3	3	0	2
Plus de 150 kW	1	3	1	1	0	2
Total (55 ChG)	9	14	6	10	7	9

Tableau 22 : Nombre de PACg ou ChG selon les puissances installées et par doublet (scénario 3).

²⁰ Dans le scénario Sc1-GTH / Frais, la dimension de la PAC sera d'environ 3.7 MW correspondant aux besoins en chaud. La puissance de 6 501 évoquée dans le tableau 22, correspond à la puissance finale utile pour le bâtiment, qui comprend la part de frais qui ne nécessite pas de PAC.

Pour les scénarios 2 et 3, les PACg et les ChG sont individualisées et installées au sein de chaque lot (une installation par lot). Selon les usages des lots, leurs puissances de dimensionnement varient entre 1 et 452 kW en mode chaud et entre 2 et 165 kW en mode froid (clim ou frais). Pour les besoins de l'analyse économique, les PACg et ChG sont regroupées en trois classes de puissances utiles : moins de 150 kW ; entre 50 et 150 kW, et plus de 150 kW. Le nombre de PACg ou de ChG et leurs classes de puissances respectives de dimensionnement sont données les tableaux 21 et 22.

7.5.4. Autres équipements de surface

Pour chacun des scénarios des sous-stations d'échange et des ballons tampons sont considérés dans le dimensionnement des installations. Par simplification et à titre indicatif, sont ajoutés, au sein de chaque lot, les équipements suivants :

- une sous-station d'échange par lot pour tous les scénarios (soit 55 sous-stations) ;
- un ballon tampon par lot pour le réseau en mode chaud ;
- un ballon tampon par lot pour le réseau en mode clim ;
- un local technique par lot (abritant la sous-station et les ballons).

Les ballons tampons sont dimensionnés en fonction des puissances géothermiques (en mode chaud et clim) de chaque lot. La capacité des ballons est de 25 l/kW de puissance géothermique. Dans ce cas, la capacité totale de stockage est comprise entre 20 et 50 m³/lot.

On considère que le scénario 1 requiert une unité de gestion centralisée (ordinateur de contrôle et de gestion automatisé).

8. Analyse sommaire de l'intérêt économique et environnemental des scénarios

8.1. RAPPEL DES OBJECTIFS DE L'ANALYSE

Ce chapitre vise à réaliser une analyse succincte de l'intérêt économique et environnemental des scénarios et sous-scénarios énergétiques pré-identifiés et dimensionnés dans le chapitre précédent.

L'analyse économique a pour objet d'estimer la rentabilité économique des différentes solutions énergétiques. Cette rentabilité est jugée à partir d'indicateurs tels que le coût de revient de production de chaleur/froid, la valeur actuelle nette ou encore le temps de retour sur investissement.

L'intérêt environnemental de la géothermie consiste quant à lui à comparer les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ réduit) des différentes solutions.

Ces analyses visent essentiellement à fournir, au maître d'ouvrage, des ordres de grandeurs pour juger de la préfaisabilité des solutions étudiées. Elles sont conduites à l'échelle de périmètre de l'aménagement Nice Méridia. **Il s'agit donc d'une analyse sommaire et non pas d'une étude de faisabilité technico-économique détaillée qui demeure indispensable avant toute réalisation d'opérations de géothermie.**

8.2. ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES

Cette section présente les éléments méthodologiques mobilisés pour l'analyse de l'intérêt économique et environnemental des différents scénarios retenus.

8.2.1. Analyse économique

Coût global

Dans la terminologie française des projets énergétiques, l'analyse en coût global implique la prise en compte de tous les éléments constitutifs du prix de revient de la chaleur :

- P1 : coûts énergétiques (électricité, gaz, fioul...);
- P2 : coûts de maintenances annuelles ou d'entretiens courants ;
- P3 : coûts de renouvellement et de gros entretien (ex. nettoyage ou réparation d'un forage, renouvellement de la PAC, etc.) ;
- P4 : coûts d'investissement (études préalable, achats fonciers, travaux de génie civil, équipements, etc.).

Dans cette étude, les coûts opérationnels de maintenance (P2) et de renouvellement (P3) sont regroupés dans une même rubrique (P2 et P3). Par simplification, ils sont exprimés en pourcentage du coût d'investissement (P4).

Les coûts de maintenance et de renouvellement et les coûts énergétiques (P1) représentent les coûts de fonctionnement (aussi désignés par coûts d'exploitation).

Prise en compte de l'actualisation

Les coûts d'investissement initial (P4) sont consentis la première année (année 1) et les coûts de fonctionnement sont annuels et surviennent tout au long de la durée de vie du projet. Le concept d'actualisation permet de ramener à une base de temps commune (actuel) les composantes du coût global :

$$\text{Coût global actualisé} = P4 + \sum_{t=1}^T \frac{P2\&3_t + P1_t}{(1 + a)^T}$$

où a est le taux d'actualisation annuel et T la durée de vie de l'investissement.

Dans une analyse économique, le taux d'actualisation correspond au taux d'intérêt monétaire (prix du temps) auquel est ajouté un taux de risque, matérialisé par la prime de risque (ex. problème technique dans la réalisation du projet). Le choix d'un taux d'actualisation suscite de nombreuses controverses et dépend, en partie, de la méthode d'actualisation choisie. Pour les projets énergétiques, il est recommandé d'utiliser un taux faible compris entre 6 et 12 %. Un taux faible permet de favoriser le long terme (choix de développement durable pour les générations futures).

Prise en compte de l'inflation

En général dans une étude technico-économique préliminaire, les coûts sont exprimés en euros constants (hors inflation). Pour prendre en compte l'évolution des coûts et des prix de l'énergie, il est plus convenable d'utiliser des euros courants et prendre en compte le taux d'inflation.

Lorsque le taux d'inflation est faible, le taux d'actualisation réel (a') est corrigé et approximé par la différence entre le taux nominal (a) et le taux d'inflation (p) : $a' = a - p$.

Dans cette étude, le taux d'inflation des coûts (notamment P2 & P3) est supposé faible et égal à 2 %. Au final, un taux d'actualisation déflaté de 4 % est considéré dans cette étude. Les variations des prix du gaz et de l'électricité sont prises en compte dans une analyse de sensibilité.

Critères de rentabilité économique

Dans la pratique d'évaluation de projet, trois critères principaux sont usuellement calculés : la valeur actuelle nette, le taux de rendement interne et le temps de retour sur investissement.

- **Valeur Actuelle Nette (VAN)**

La Valeur Actuelle Nette (VAN) mesure la viabilité absolue d'un projet. Elle consiste à calculer la valeur actualisée des différents flux financiers sur la durée de vie du projet en intégrant l'investissement initial. De façon simplifiée, c'est le gain engendré par le projet sur sa durée de vie.

$$VAN = -P4 + \sum_{t=1}^T \frac{G_t}{(1 + i)^T}$$

où G_t sont les gains annuels (ou cash flows). Dans le cas des réseaux de chaleur, les gains correspondent aux différentielles des coûts d'exploitation annuels (P1, P21 3) et des recettes annuelles de la vente de l'énergie (chaleur et froid).

La VAN suit une fonction décroissante du taux d'actualisation. Pour qu'un projet d'investissement soit acceptable, sa VAN doit être strictement positive. Le projet est d'autant plus rentable que sa VAN est élevée. Entre plusieurs variantes, celle qui possède la plus forte VAN est choisie.

- **Temps de retour sur investissement (TdR)**

C'est le nombre d'années nécessaire pour que le cumul des « cash flows » annuel équilibre l'investissement. Un projet est d'autant plus avantageux que son TdR est faible. Entre plusieurs variantes de projet, celle qui possède la plus faible TdR est préférée.

Le TdR est estimé en développant et en calculant les « cash flows » actualisés sur la durée de vie des investissements.

8.2.2. Analyse environnementale

L'analyse environnementale consiste à comparer les émissions de gaz à effet de serre (carbone ou CO₂) des différents scénarios. Deux composantes de l'effet de serre sont prises en compte dans cette analyse :

Effet de serre direct (ESD)

Pour évaluer les émissions directes de CO₂ dues à la consommation énergétique, les facteurs d'émissions préconisés par l'ADEME 2010 (Base Carbone® V6)²¹ sont appliqués :

- 0,048 kg équivalent CO₂ par kWh d'électricité ;
- 0,231 kg équivalent CO₂ par kWh de gaz.

La combinaison des facteurs d'émission et des consommations d'électricité ou de gaz permet d'estimer les émissions de chaque scénario, exprimées en tonne équivalent de CO₂.

Effet de serre indirect (ESI)

Il est dû aux fuites de fluide frigorigène des PACg. L'impact indirect du fluide sur l'effet de serre dépend du fluide utilisé et de son indice d'impact. L'indice d'impact direct de ce fluide est quantifié de façon qu'un kilogramme de fluide perdu, estimé à 3 %, équivaut environ à 1 600 kg de CO₂. Aux pertes de fluide s'ajoute l'impact de sa récupération en fin de vie de la PACg (75 % de taux de récupération).

L'indice d'impact est estimé à 15,6 kg équivalent CO₂ par kW de puissance PACg.

8.3. HYPOTHÈSES RELATIVES À L'ESTIMATION DES COÛTS DES INSTALLATIONS

Dans cette section sont décrites les différentes hypothèses utilisées pour le calcul du coût global. Les coûts unitaires de références sont établis à dire d'experts ou en se référant à des

²¹ cf. <http://www.basecarbone.fr/>

études récentes conduites ou sous traités par le BRGM²². Ces valeurs références des coûts peuvent être très variables d'une étude à l'autre. Dans ce cas, des valeurs moyennes sont utilisées. Dans tous les cas, ces valeurs représentent des ordres de grandeurs et doivent être prises comme tels.

8.3.1. Coûts des investissements (P4)

Les coûts d'investissement comprennent essentiellement l'investissement en coût d'études et de maîtrise d'ouvrage, le coût des doublets et leurs équipements, le coût du réseau de conduite, les coûts d'acquisition et d'installation des machineries (PACg ou ChG) et le coût des équipements de surface (sous station, ballons, local technique...).

Coûts des études et de maîtrise d'ouvrage

Les opérations de géothermie sur aquifère requièrent des études de faisabilité technique à partir des données existantes. En cas de réalisation, des coûts liés au dossier de déclaration et autorisation, à l'assurance des ouvrages, etc., peuvent venir s'ajouter.

Le coût total de ce poste de dépense est estimé à titre indicatif à 100 k€ (scénario 1) ou à 5 k€/lot (scénarios 2 et 3) pour les solutions géothermiques. Ces coûts sont minorés de 25 % pour les solutions de références avec chaufferies.

Coûts unitaires des doublets

Le coût d'un forage comporte une partie variable (fonction de la profondeur de foration) et une partie fixe (amené/repli du matériel). À cela s'ajoute le coût de l'équipement du forage.

L'estimation des coûts est réalisée à partir des devis établis pour réalisation des forages tests du projet. Les coûts unitaires d'un forage sont :

- coût fixe de foration : 1 000 €/forage (amené/repli de matériel de forage) ;
- coût variable de foration : 380 €/ml ;
- coût d'équipement du forage : 10,5 k€/forage (dont environ 5 k€ pour la pompe).

Le coût de foration est identique pour tous les scénarios (profondeur 50 m). Le coût d'équipement est majoré de 100 % pour les scénarii 1 et 2 (débit de 300 m³/h par doublet) pour prendre en compte la différence des débits avec le scénario 3 (six doublets avec un débit maximum compris entre 53 et 152 m³/h selon le mode de fonctionnement). Cette majoration de coût provient du fait que les doublets fonctionnant à haut débit nécessitent un diamètre de foration plus grand et des pompes à eau plus performantes.

Coûts unitaires machineries (PACg et ChG)

Comme mentionnée précédemment, les PACg et ChG sont dimensionnées en fonction des puissances utiles installées. Leurs coûts unitaires sont variables en fonction du type de machine et des puissances :

²² Par exemple, l'étude BRGM-ALTO (mars 2011) sur les micro-réseaux de chaleur en région parisienne.

Gamme de puissances utiles	Coût unitaire machinerie (€/kW)	
	PACg	ChG
Moins de 50 kW	450	338
Entre 50 – 150 kW	400	300
Plus de 150 kW	300	225
Machinerie centralisée (>500 kW)	200	150

Tableau 23 : Coûts unitaires machinerie.

Les coûts unitaires des chaudières à gaz estimés à 75 % des coûts unitaires des PACg. Ces coûts comprennent l'installation de la machinerie et leurs éléments auxiliaires (pompes de circulation, canalisation, électricité...). La durée de vie moyenne des PACg et des ChG est supposée identique égale à 30 ans.

Coûts unitaires réseau

Le coût d'investissement unitaire du réseau comprend un coût d'achat des conduites et un coût de pose. Le premier est variable en fonction du type de matériaux et du diamètre des conduites. Le second dépend du terrain ou de la zone de réalisation des travaux (zone urbaine, rurale, obstacles...). Dans cette étude, on considère un même diamètre pour le réseau chaud et froid et une zone urbaine peu dense, en cours d'aménagement.

À base de dire d'expert, le coût unitaire moyen est évalué 250 €/ml (pose de conduite comprise).

Coûts unitaires des équipements de surface

- Sous-stations d'échange : 2 k€ par unité.
- Ballons tampons : 35 €/m³.
- Locaux techniques : 1,5 k€ par lot pour les scénarios 2 & 3 et 15 k€ pour l'unité centralisée du scénario 1. Ces coûts sont majorés de 50 % pour les équipements au gaz naturel (surcoût de sécurité).

8.3.2. Coûts d'entretien et de renouvellement des installations (P2 et P3)

Les hypothèses de calcul relatives aux coûts de fonctionnement P2 et P3 sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Équipements	Hypothèses P2 et P3	
	Sc1	Sc2 et 3
Doublets	5 %	5 %
Réseau	8 %	8 %
PACg	3 %	6 %
Chaufferie Gaz	5 %	8 %
Autres équipements de surface	12 %	12 %

Tableau 24 : Hypothèses des coûts de maintenance et de renouvellement P2 et P3.

Les coûts de fonctionnement des scénarios 2 et 3 sont majorés de 3 % pour les PACg et ChG pour tenir compte de répartition de la machinerie (ex. coût de déplacement et d'intervention plus élevé qu'en machinerie centralisée).

À titre indicatif, les coûts de fonctionnement P2 et P3 peuvent comprendre les opérations suivantes :

- doublets : deux visites annuelles de maintenance et des prestations occasionnelles d'examen endoscopique, de dépose des pompes et des colonnes et éventuellement un détartrage. Un renouvellement de la pompe tous les 4-5 ans en fonction du degré d'érosions ;
- réseau : entretien des conduites et changements des pièces défectueuses ;
- machinerie : deux à trois visites de maintenance par an, renouvellement tous les cinq ans : pièces d'usure, recharge en fluide frigorigène des PACg, changement de brûleur des chaufferies à gaz ;
- autres équipements de surface : contrôle de sécurité des ballons tampons, etc.

8.3.3. Coûts énergétiques (P1)

Les coûts de l'énergie concernent l'électricité pour la consommation des PACg ou des pompes de forage et le gaz naturel pour les consommations des chaufferies à gaz (scénario de référence). Étant donné les puissances électriques nécessaires, les options tarifaires proposées par EDF et GDF-Suez (année 2013) et retenues dans cette étude sont les suivantes.

Prix de l'électricité

La tarification annuelle d'électricité est décomposée en deux parties : (i) une partie fixe dépendant de la puissance de l'installation (en €/kW/an) et de la durée du contrat d'abonnement et (ii) une partie variable dépendante de l'électricité effectivement consommée (en c€/kWh). La tarification retenue correspond à un tarif « vert A – option A5 base » en version « longue utilisation ». Par simplification, un prix moyen d'électricité (moyenne été/hiver, heures creuses/pleines) est estimé à :

- partie fixe (abonnement) : 55 €/kW.an HT ;
- partie variable : 4,9 c€/kWh HT.

Gaz naturel

Pour le gaz naturel, la tarification retenue correspond à un tarif enlèvement libre (TEL) avec l'option nuit niveau 1. Cette tarification règlementée est proposée par GDF-Suez aux entreprises et aux collectivités ayant un besoin énergétique annuel supérieur à 2 GWh, avec plus de 70 % de la consommation journalière réalisée la nuit (entre 20 h et 6 h). Le tarif annuel du gaz est aussi décomposé en prime fixe par abonné (variable de 47 à 6 774 €/an) de la puissance souscrite en gaz et d'une partie variable qui est fonction de la consommation effective de la chaufferie à gaz :

- partie fixe (abonnement) : 200 €/lot.an (hypothèse un abonnement par lot) ;
- partie variable : 5,2 c€/kWh HT.

En général, le choix d'une option dépend d'une négociation pour la totalité de l'approvisionnement du site. Les tarifs considérés sont des hypothèses de travail pour l'estimation du coût actuel de l'énergie (année 1 du projet). L'estimation du coût total actualisé de l'énergie ne prend pas en compte les taux d'évolution des tarifs énergétiques sur la durée de vie des installations.

8.4. RÉSULTAT DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE

8.4.1. Bilan des coûts d'investissement de d'exploitation

À partir des hypothèses économiques considérées, les estimations des coûts d'investissement (P4) et des coûts d'exploitation (P1 et P2&P3) sont présentées dans le Tableau 25. Ils sont estimés en valeurs hors taxes et sans tenir compte des aides aux énergies renouvelables.

Il faut noter que pour les deux premiers scénarios, on considère que l'ensemble des coûts d'investissement sont consentis à l'année 0 (2014/15). Alors que pour le scénario 3, ces coûts sont étalés sur 3 périodes d'investissements à intervalle de 4 ans (2014/15, 2018/19, 2022/23). Dans ce cas, la durée de l'analyse est de 38 ans au lieu de 30 ans. Pour permettre la comparaison entre les scénarios sur une même durée d'analyse égale à 30 ans, les parts des investissements du scénario 3 réalisés en année 0+4 (doublet D1/2-ii) en année 0+8 (doublet D1-iii et D2/3-iii) sont respectivement actualisées (4 %) sur une période de 4 ans et 8 ans. Ainsi la somme investie dans quatre ans n'a comme valeur d'aujourd'hui que 85 % de cette valeur (73 % dans 8 ans).

Scénario	Sc1 (Machinerie centralisée)			Sc2 (Machineries réparties)			Sc3 (répartition en 3 phases)		
	Sc1-GTH / Clim	Sc1-GTH / Frais	Sc1-GAZ / Clim	Sc2-GTH / Clim	Sc2-GTH / Frais	Sc2-GAZ / Frais	Sc3-GTH / Clim	Sc3-GTH / Frais	Sc3-GAZ / Frais
P1 - Coût Énergie (k€/an)	155	85	414	254	143	359	271	187	396
P2 et P3 - Coût Maintenance et renouvellement (k€/an)	357	352	350	333	241	266	296	222	229
P2 et P3 + P1 : coût total d'exploitation en k€/an	512	437	764	588	384	625	567	409	625
P4 : coût d'investissement (k€)	5561	5411	5043	4904	3502	3412	4035	3038	2713

Tableau 25 : Bilan des coûts d'investissement et d'exploitation.

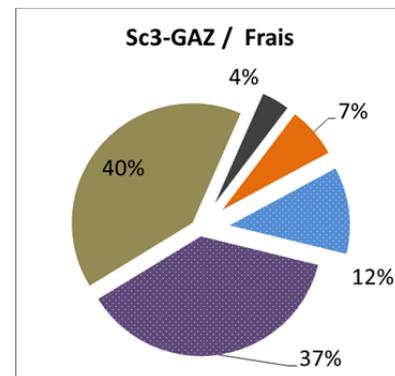
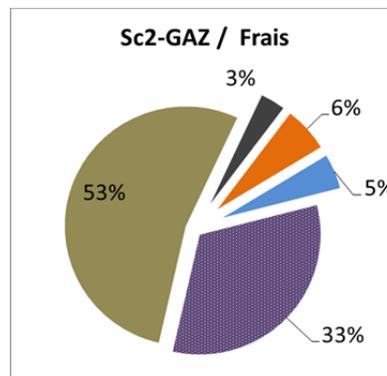
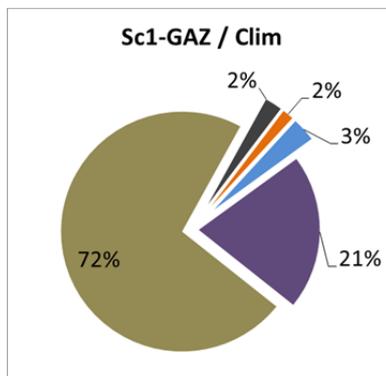
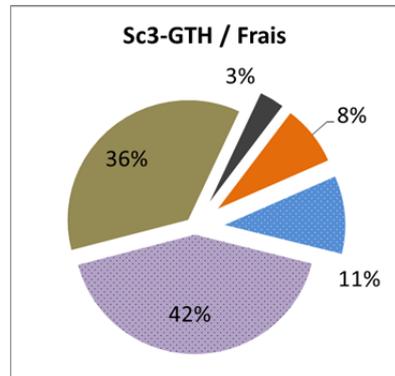
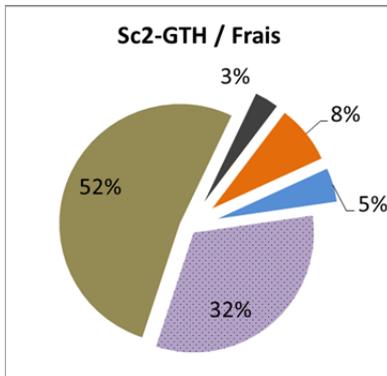
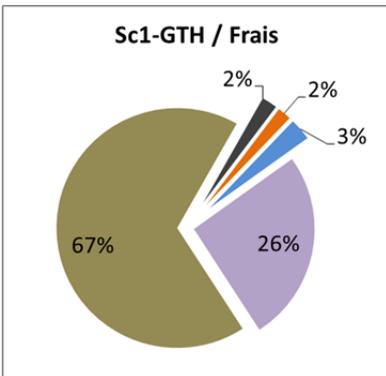
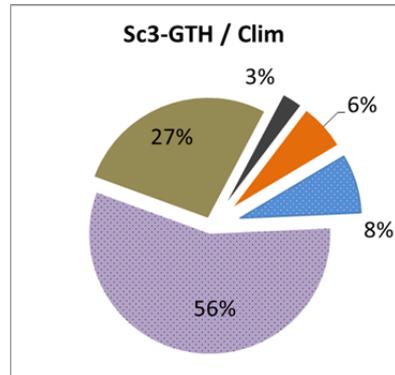
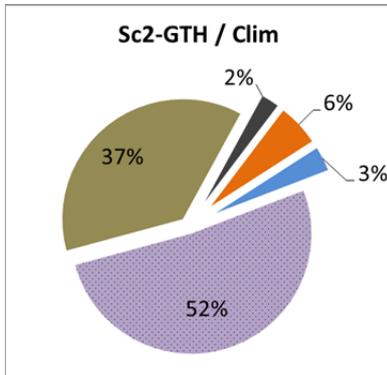
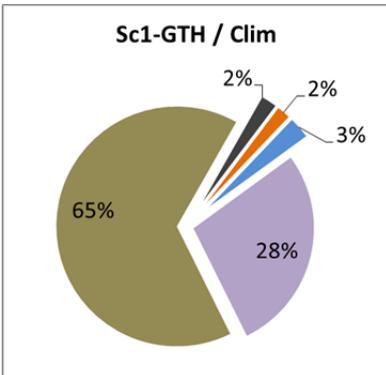
L'illustration 55 détaille la répartition des coûts d'investissement des différentes solutions. On remarque que le coût du réseau représente plus de la moitié des coûts d'investissement totaux pour la majorité des solutions énergétiques.

Une synthèse des principaux indicateurs économiques est présentée dans la suite de cette section.

Sc1

Sc2

Sc3



- P4 : Etudes / maîtrise d'œuvre
- P4 : doublets
- P4 : PACg ou Chaufferie Gaz
- P4 : Réseau
- P4 : Autres équipements de surface

Illustration 55 : Répartition des coûts P4.

8.4.2. Coût global

Les illustrations ci-dessous montrent la répartition des coûts globaux par poste de coût, en valeur et en pourcentage. Les coûts d'exploitation sont actualisés par un taux d'actualisation de 4 % et sur une durée de vie de 30 ans, correspondant à la durée de vie moyenne des machineries (PACg et ChG).

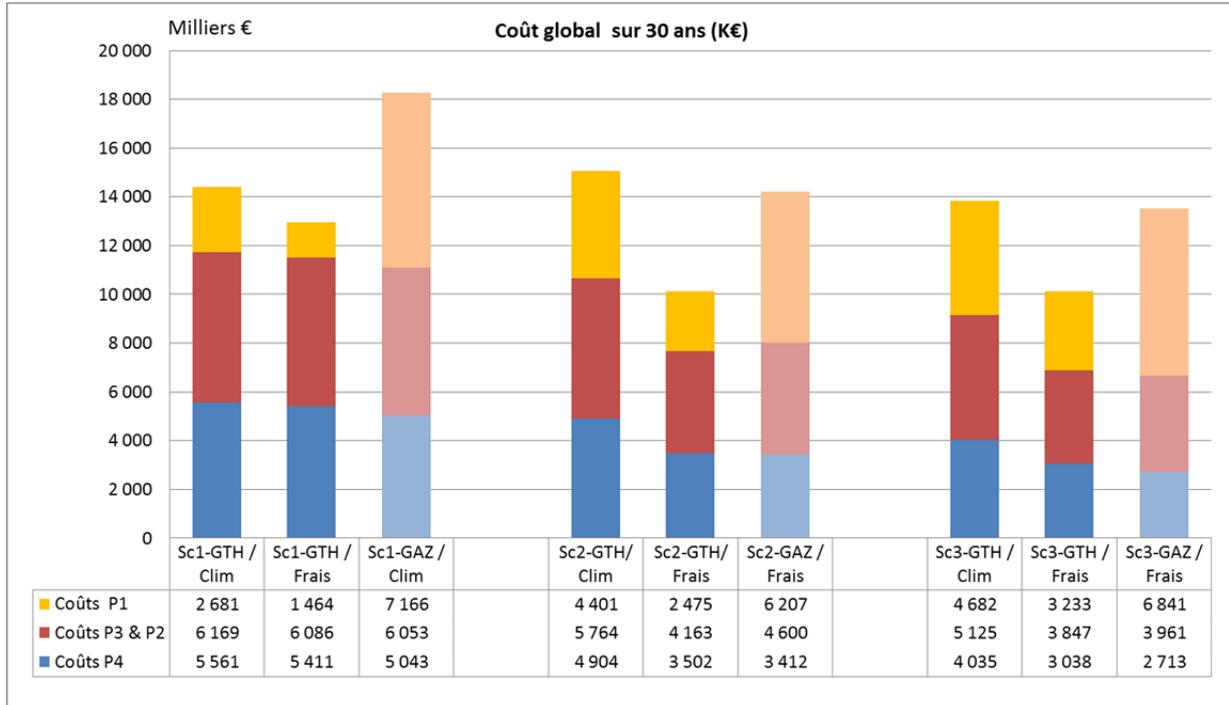


Illustration 56 : Coût global sur 30 ans (en k€).

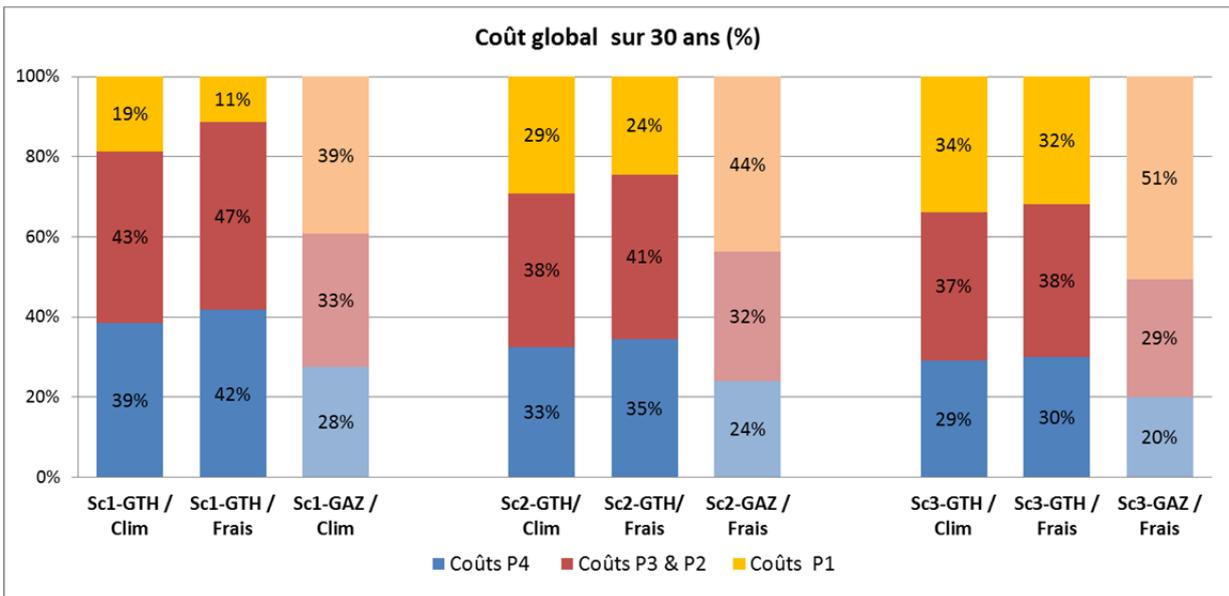


Illustration 57 : Répartition du coût global (en %).

D’ores et déjà, on constate que les solutions géothermiques avec Rafraîchissement (mode frais) sont les moins coûteuses en termes de coût global. Il atteint environ 10,1 millions € dans le cas où les investissements sont échelonnés sur trois phases (Sc3-GTH / Frais).

Dans le cas d’une machinerie répartie, le coût global des solutions avec chauffage au gaz et Rafraîchissement est légèrement inférieur que celui des solutions géothermiques avec climatisation (Sc2-GTH / Clim et Sc3-GTH / Clim). Ceci s’explique par : (i) un coût unitaire plus faible pour les ChG que pour les PACg ; (ii) un coût d’investissement en PACg plus élevé pour la climatisation que pour le Rafraîchissement où il n’y a pas de PACg.

En termes d'économie d'énergie, les coûts P1 des solutions géothermiques (entre 11 % et 34 % du coût global) représente un peu moins de la moitié des coûts P1 que pour les solutions avec chaufferie gaz (entre 39 % et 51 % du coût global). L'économie annuelle réalisée grâce à la géothermie est comprise entre 125 k€/an et 330 k€/an.

8.4.3. Coût du kWh produit

Le coût de production de la chaleur et de froid (en MWh/an) est donné dans l'illustration 58. Pour les solutions géothermiques il est compris entre 47 €/MWh (Sc3-GTH / frais) et 71 €/MWh (Sc2-GTH / clim), à comparer avec le coût du MWh des solutions de référence qui varie entre 63 et 86 €/MWh.

Cette illustration montre que le coût de production géothermique combinant le chauffage et le Rafraîchissement est économiquement plus intéressant. Pour cette solution, le coût d'investissement par kW installé est égal à 467 €/kW.

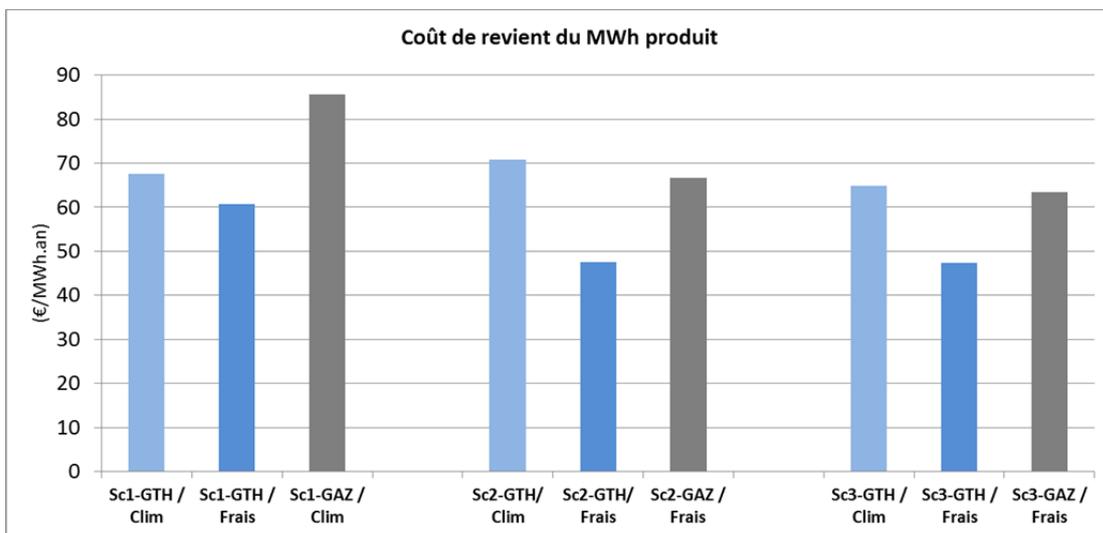


Illustration 58 : Coût de revient par kWh produit.

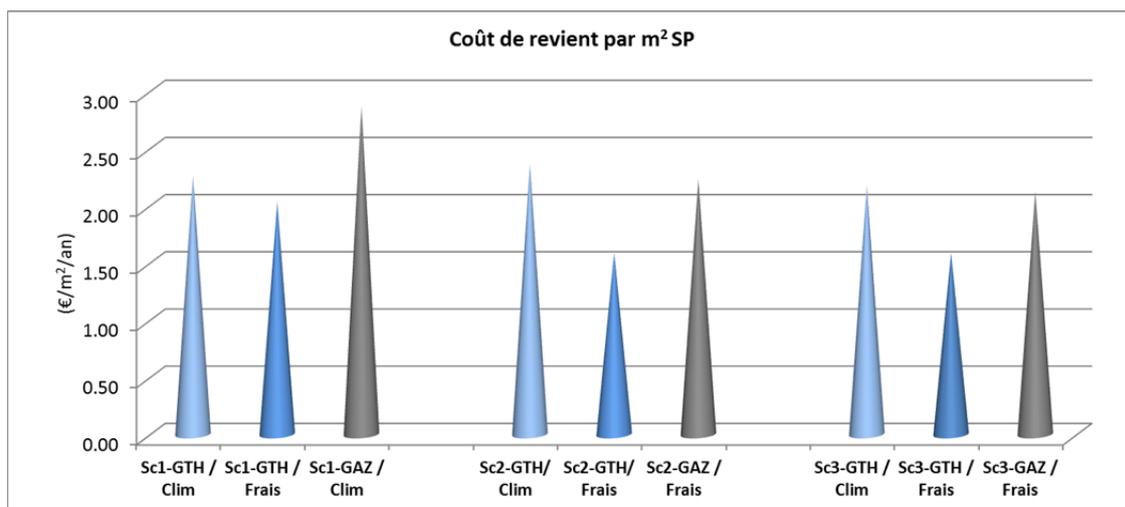


Illustration 59 : Coût de revient annuel par m² de surface plancher.

Ramené à l'ensemble des surfaces planchers chauffées ou rafraichies de Nice Méridia (368 463 m²), le coût de production géothermique le plus économique est alors estimé à 1,59 €/m².an. Ce coût ne fait pas de distinction entre les différents usages du bâti.

8.4.4. Rentabilité économique : TdR et VAN

Les ratios par MWh produit ou par kW installé estimés précédemment ne permettent pas de déterminer la rentabilité économique d'une solution technique donnée, les recettes n'étant pas prise en compte.

À ce stade de l'analyse, on considère que le prix de vente de la chaleur et du froid est constant toute au long de la période d'analyse et égal à 7 c€/kWh. Avec une production annuelle totale de 12 333 516 kWh, la recette annuelle (annuité) est alors de 863 k€. Ces annuités sont à nouveau actualisées pour estimer la valeur actuelle nette (VAN) et le temps de retour sur investissement (TdR) sur une durée de 30 ans. Ces critères de rentabilité sont synthétisés dans les illustrations 59 et 60.

Quel que soit le scénario énergétique, la VAN est strictement positive, rendant économiquement acceptable toute les solutions techniques.

Le classement de ces valeurs montre que la solution technique la plus intéressante est Sc2-GTH / Frais, avec une VAN évalué à 220 k€/an et la moins rentable est la solution Sc1-GAZ / Clim avec une VAN de 42 k€/an.

Le TdR correspondant à la solution la plus rentable est seulement de 5 ans et celui de la solution la moins rentable est évalué à 12 ans. Ces temps de retour relativement très courts expriment la possibilité de reconstituer des fonds propres rapidement, sous l'hypothèse de prix de vente de l'énergie considérée. Ils sont par conséquent moins risqués pour les investisseurs qui mettent à disposition des financements de moyen terme.

Le tableau 26 donne un exemple de calcul de la VAN et du TdR pour le sous-scénario Sc3-GTH / Clim et pour lequel les coûts d'investissement sont réparti sur trois périodes.

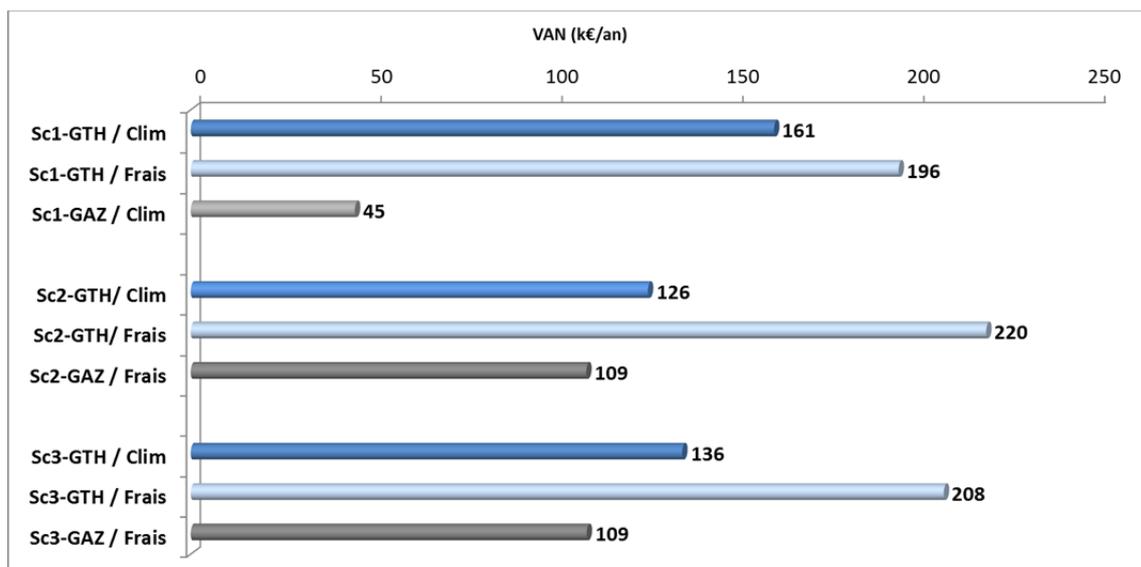


Illustration 60 : Valeur actuelle nette.

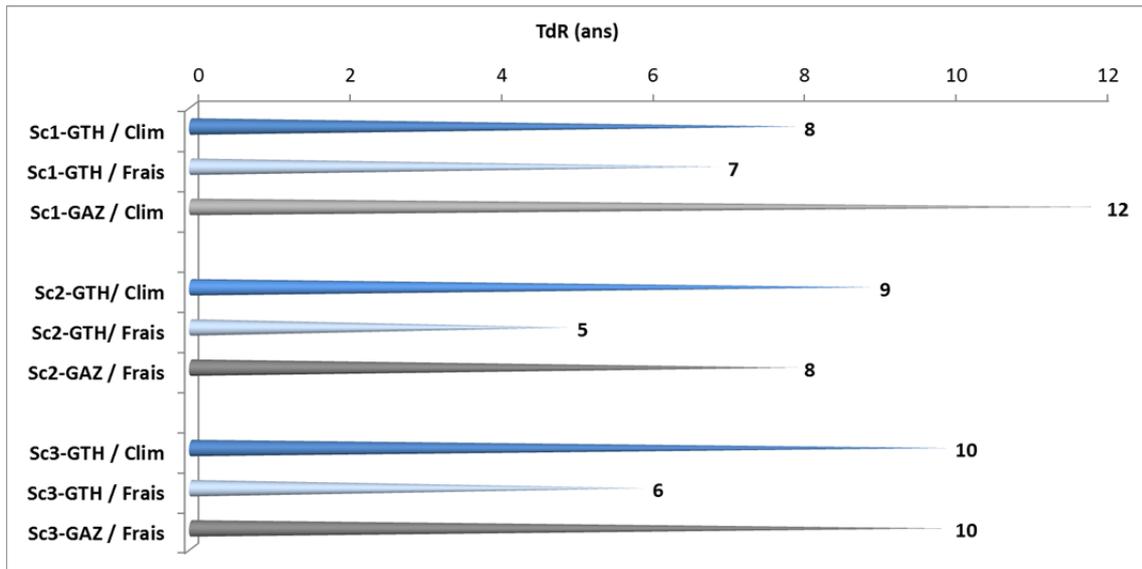


Illustration 61 : Temps de retour sur investissement.

Année	Facteur d'actualisation	Coût d'investissement. P4 (k€)	Coût d'exploitation P1+P2&3 (k€/an)	Recette annuelle (k€/an)	Flux de trésorerie (k€/an)	VAN (k€/an)
0	1.000	-2 350			-2 350	-2 350
1	0.962		-294	453	159	-2 106
2	0.925		-294	453	159	-1 801
3	0.889		-294	453	159	-1 460
4	0.855	-813	-294	453	-654	-1 807
5	0.822		-402	625	223	-1 302
6	0.790		-402	625	223	-853
7	0.760		-402	625	223	-479
8	0.731	-1 356	-402	625	-1 133	-1 177
9	0.703		-567	863	296	-619
10 = TdR	0.676		-567	863	296	-218
11	0.650		-567	863	296	51
12	0.625		-567	863	296	217
13	0.601		-567	863	296	308
14	0.577		-567	863	296	349
15	0.555		-567	863	296	358
16	0.534		-567	863	296	349
17	0.513		-567	863	296	331
18	0.494		-567	863	296	310
19	0.475		-567	863	296	288
20	0.456		-567	863	296	266
21	0.439		-567	863	296	247
22	0.422		-567	863	296	229
23	0.406		-567	863	296	213
24	0.390		-567	863	296	199
25	0.375		-567	863	296	186
26	0.361		-567	863	296	174
27	0.347		-567	863	296	163
28	0.333		-567	863	296	153
29	0.321		-567	863	296	144
30	0.308		-567	863	296	136

Tableau 26 : Exemple de calcul de la VAN et du TdR (Sc3 – GTH / Clim).

8.4.5. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité des indicateurs économiques est réalisée en faisant varier indépendamment les hypothèses des paramètres du prix de vente de la chaleur/froid et des tarifs de l'énergie (gaz et électricité).

Prix de vente de la chaleur et du froid

En faisant varier le prix de vente de la chaleur/ froid entre -20 % et 20 %, la VAN et le TdR sont donnés dans le tableau ci-dessous. Globalement, les résultats financiers sont peu sensibles à cette variation, sauf pour le sous scénario Sc1-GAZ / Clim. Ce dernier n'est plus rentable en

dessous d'un prix de vente chaleur/froid de 6 c€/kWh. Cette solution ne peut être rentabilisée sur la durée de vie de l'investissement (TdR > 30 ans).

Variation prix de vente de chaleur froid	-20%	-10%	0%	10%	20%	-20%	-10%	0%	10%	20%
	0.056	0.063	0.070	0.077	0.084	0.056	0.063	0.070	0.077	0.084
	VAN					TdR				
Sc1-GTH / Clim	82	122	161	201	240	10	9	8	7	7
Sc1-GTH / Frais	116	156	196	235	275	9	8	7	7	6
Sc1-GAZ / Clim	-34	6	45	85	124	-1	16	12	10	9
Sc2-GTH/ Clim	47	87	126	166	205	12	10	9	8	7
Sc2-GTH/ Frais	141	180	220	259	299	7	6	5	5	4
Sc2-GAZ / Frais	30	70	109	149	188	12	9	8	7	6
Sc3-GTH / Clim	57	96	136	175	215	12	11	10	10	9
Sc3-GTH / Frais	129	168	208	248	287	10	9	6	6	5
Sc3-GAZ / Frais	30	70	109	149	189	13	11	10	9	6

Tableau 27 : Variation de la VAN et du TdR en fonction du prix de vente de chaud/froid.

Prix de vente du gaz et de l'électricité

Les taux annuels moyens d'accroissement des tarifs énergétiques sont respectivement de 2 % pour l'électricité et de 5 % pour le gaz naturel. Ces taux d'évolution des prix sont basés sur les hypothèses et tendances observées depuis les cinq dernières années.

Les illustrations suivantes présentent la sensibilité de la VAN à l'évolution des prix de l'électricité pour les solutions géothermiques et à l'évolution du prix du gaz pour les solutions de références avec chauffage au gaz.

L'illustration 14 montre clairement que la rentabilité de la géothermie est relativement peu dépendante de l'évolution du tarif de l'électricité. Ainsi, une augmentation de ce dernier de +10 % diminuerait la VAN de 3,9 k€ pour les solutions en mode frais et de 7.1 k€ pour les solutions en mode clim. Elle se traduit aussi par une augmentation du coût MWh produit de 1 300 €/MWh.an au maximum pour le Sc1-GTH/Clim et de moins de 1 000 €/MWh.an pour les cinq autres sous-scénarios géothermiques.

En comparaison des sous-scénarios de référence intégrant du chauffage au gaz (Illustration 63), une augmentation du prix du gaz de +10 % (sans variation du prix de l'électricité) diminuerait la VAN de 15 k€ et ceci quel que soit la solution choisie.

Plus globalement, les augmentations du prix de l'électricité sont relativement peu défavorables aux solutions 100 % géothermiques (chaud et froid), alors que celles du gaz sont très défavorables aux solutions gaz.

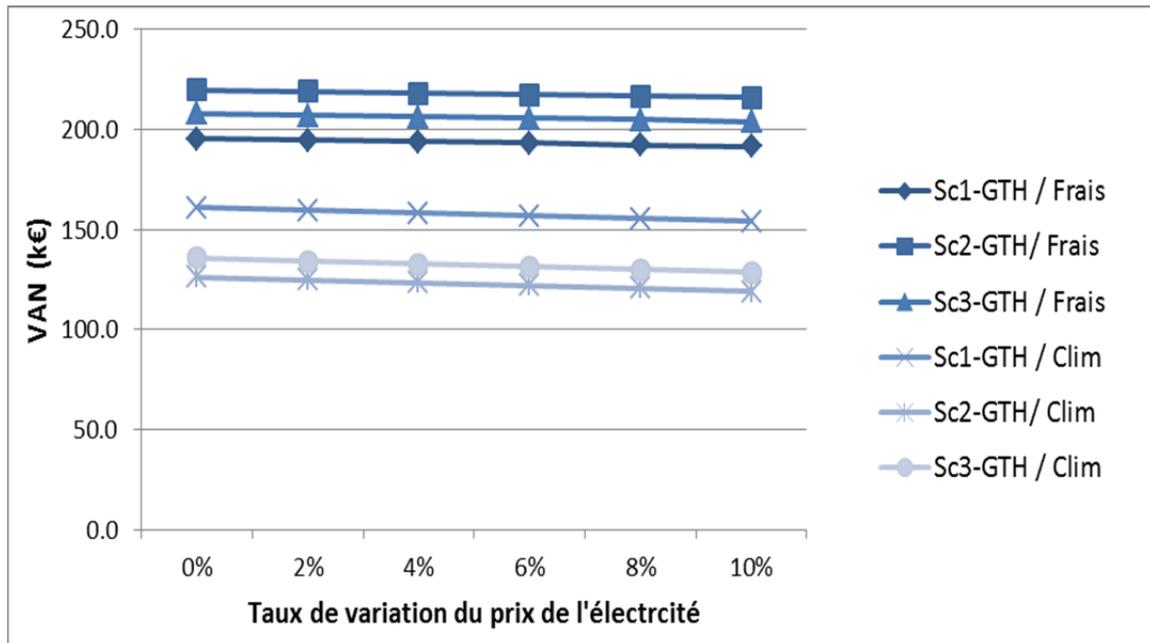


Illustration 62 : VAN en fonction du prix de l'électricité (sous-scénarios avec chaud géothermique).

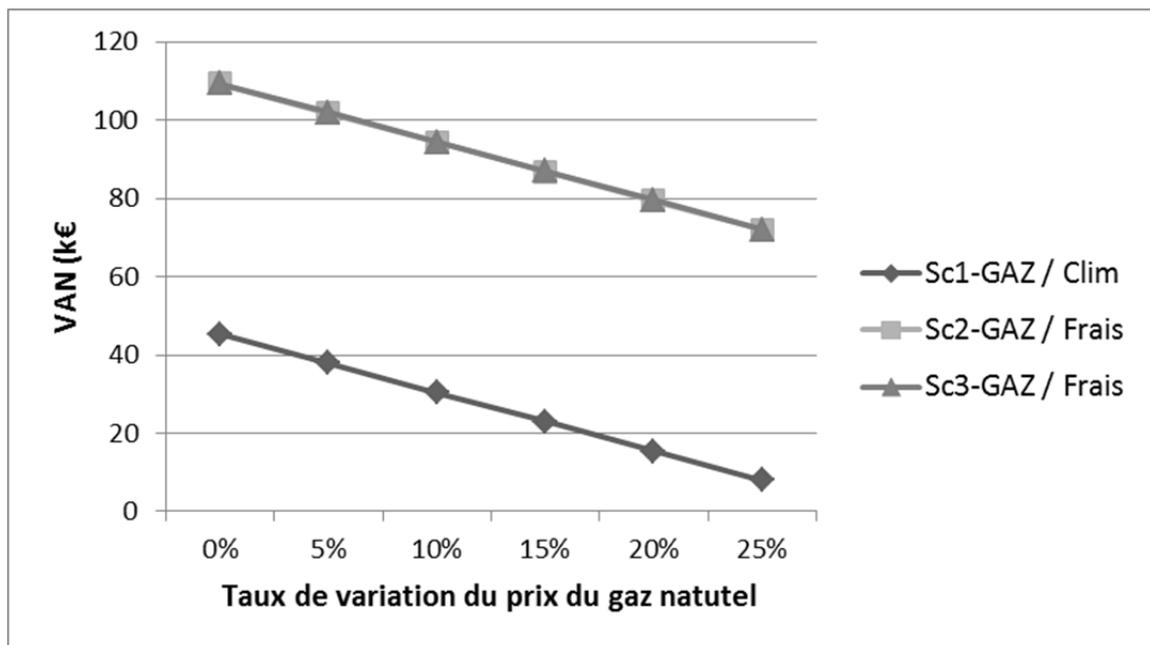


Illustration 63 : VAN en fonction du prix du gaz (sous-scénarios avec chaud gaz).

8.5. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE

L'illustration 64 présente le résultat du bilan des émissions de CO₂ pour les neuf sous-scénarios. Les solutions géothermiques engendrent des émissions de CO₂ significativement moindres que les solutions avec chauffage au gaz naturel. La quantité d'émission évitée grâce à la géothermie est de l'ordre de 1 200 tonnes éq. CO₂.

Les émissions de CO₂ pour les solutions les plus rentables économiquement (mode frais) sont de 125 tonnes éq. CO₂ pour Sc3-GTH/frais et de 169 tonnes éq. CO₂ pour Sc1-GTH/frais et Sc2-GTH/frais.

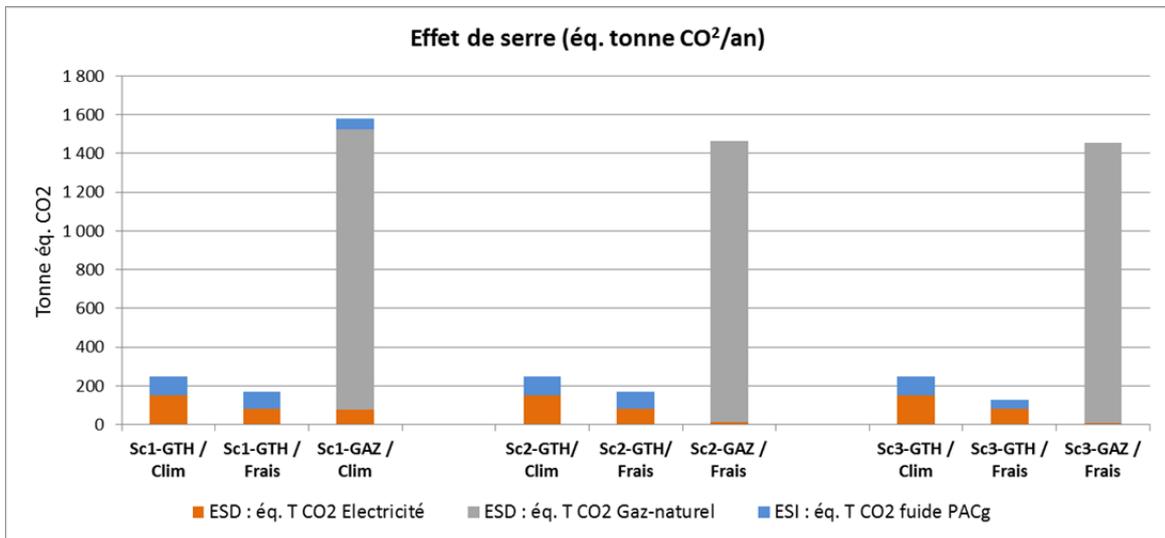


Illustration 64 : Bilan environnemental des différents sous-scénarios.

9. Conclusions

Dans un contexte d'envolée des prix de l'énergie et une nécessité de réduire son empreinte écologique, le recours aux énergies vertes semble offrir une réelle alternative, particulièrement quand celles-ci présentent un caractère local et que leur viabilité économique est prouvée.

De ce point de vue, la géothermie constitue une solution bien adaptée pour couvrir les besoins thermiques de la future technopole de Nice Méridia, sous réserve de lever certains verrous techniques pouvant réduire sa performance énergétique.

La surface constructible totale de cet éco-quartier avoisinerait 320 000 m² lorsqu'il sera entièrement aménagé, répartie entre logement, bâti destiné au secteur tertiaire et à des activités liées à la recherche, à la formation et aux affaires entrepreneuriales. Il représentera un besoin thermique total de 12 TWh annuels correspondant aux appels de chauffage, d'eau chaude sanitaire et de froid (freecooling pour l'habitat et climatisation pour le reste du bâti).

Ce besoin pourra être couvert par la géothermie grâce à la mise en place de plusieurs doublets géothermiques (deux au minimum) captant la nappe des alluvions du Var, qui représente la ressource géothermale.

En effet, pour la concrétisation de cette opération, trois scénarii d'exploitation ont été proposés, du plus centralisé (Sc. 1 : chaufferie centrale et deux doublets) au plus décentralisé (Sc. 3 : machinerie répartie et six doublets). La solution intermédiaire est une combinaison entre les deux (Sc. 2 : machinerie répartie et deux doublets). Il s'agit là de propositions de mise en place que l'aménageur et les futurs opérateurs auront la nécessité d'adapter selon leurs priorités, les contraintes imposées par le contexte, et le planning de développement de l'urbanisation de Nice Méridia.

<p align="center">Scénario 1 (Sc1) Machinerie centralisée et réseau 4 tubes Une phase d'investissement</p>	<p>Deux doublets alimentent en eau de nappe (15 °C) une « chaufferie » centrale, qui fournit de l'eau chaude et l'eau fraîche ou froide. Un réseau 4 tubes distribue l'énergie thermique directement aux niveaux des températures requises par les bâtiments.</p>
<p align="center">Scénario 2 (Sc2) Machineries réparties et réseau 2 tubes en boucle tempérée Une phase d'investissement</p>	<p>Deux doublets alimentent un échangeur de chaleur qui permet, via un réseau deux tubes en boucle fermée, de distribuer aux bâtiments une eau (15 °C) permettant à des machineries thermodynamiques réparties sur le réseau de livrer du chaud, de l'ECS, du frais ou du froid.</p>
<p align="center">Scénario 3 (Sc3) Déploiement en 3 phases des doublets, des machineries et des réseaux. Trois phases d'investissement</p>	<p>Jusqu'à six doublets alimentent, via des échangeurs de chaleur, un réseau en boucle fermée distribuant de l'eau tempérée (15 °C). Les investissements pour les doublets et les extensions de réseau se font en trois phases accompagnant les constructions des îlots.</p>

Dans les trois cas de figure, la modélisation montre que l'exploitation géothermique n'aura pas d'impact négatif sur la nappe alluviale. En particulier, les opérations d'AEP ne seront pas pénalisées.

Concernant la préservation de la réserve en eau, il est important de rappeler en premier lieu, que le volume d'eau pompé sera simultanément restitué à sa nappe d'origine, via les puits de réinjection exécutés en aval de la production. Ce dispositif, dont la mise en place est une obligation réglementaire, assurera le maintien de l'équilibre hydrodynamique de la ressource géothermale.

En outre, les capacités productives élevées de la nappe (une perméabilité de $1,5 \cdot 10^{-2}$ m/s pour une épaisseur mouillée de plus de 30 m) lui permettent de mobiliser des volumes d'eau de plus en plus importants avec la montée des sollicitations sans risquer son épuisement.

Pour ce qui est de l'aspect qualitatif, l'eau pompée puis réinjectée ne subit aucune dégradation au cours du processus, hormis une variation de température comprise entre 5 et 7 °C, due au prélèvement de calories ou de frigories lors du passage par les pompes à chaleur. Cette gamme de variation thermique appliquée à une nappe dont la température est à environ 15 °C n'entraîne aucune détérioration de sa qualité. De plus, dans ce contexte de proximité des captages AEP, la modélisation a prouvé que ces derniers ne sont pas affectés directement par la propagation des panaches thermiques bien qu'une intrusion avec un faible écart de température (2 °C par rapport à la nappe) ait été mise en évidence au niveau du périmètre rapproché 2 du captage des prairies. Cependant, cette situation n'est en rien préjudiciable à la qualité des eaux vu l'écart de température très faible, et est due à la proximité de la réinjection du périmètre AEP concerné. Il suffirait d'implanter l'opération plus en amont pour y remédier.

Le modèle numérique conçu dans le cadre de cette étude devra permettre de déterminer les configurations optimales pour la mise en place de la géothermie sur le secteur de Nice Méridia.

Les futurs utilisateurs du modèle devraient veiller à deux points pour rendre son usage le plus représentatif possible :

- introduire les variations mensuelles moyennes de la température de l'eau et de la piézométrie de la nappe. Les calculs ont été réalisés en régime permanent correspondant à l'état de la nappe à la fin du mois de mai 2013 ;
- tenir compte de l'ensemble des opérations sollicitant la nappe, notamment les captages AEP et les éventuelles futures opérations qui seraient mises en place au fur et à mesure de l'aménagement de la zone.

Le seul point identifié comme pouvant freiner l'intégration de la géothermie dans le paysage énergétique de la ZAC est relatif à la réinjection, en ce sens que le contexte géothermal local est doublement pénalisé par ce qui représente son atout majeur, la nappe alluviale supérieure. En effet, le niveau piézométrique de cette dernière est très proche de la surface du sol. Lors de la réalisation des forages, le niveau statique a été mesuré à environ 4 m de profondeur, et dans certains points voisins en dehors de Nice Méridia, les enregistrements passés ont révélé des épisodes où le niveau de l'eau a pu être intercepté à moins de 2 m. Or les calculs des rabattements et surélévations de la nappe alluviale sous l'effet des pompages/réinjection ont montré qu'un débit de 300 m³/h pourrait entraîner une variation de niveau d'environ 3 m. Cela représente une marge de sécurité faible pouvant impliquer une remontée d'eau excessive dans les ouvrages de réinjection et à leur périphérie avec un risque de débordement ponctuel. Cela sera d'autant plus marqué qu'il s'agit d'une nappe alluviale avec un faciès sableux à grains fins, pouvant impliquer un risque de colmatage au niveau du puits de réinjection. Cette obturation des forages de réinjection limiterait grandement leur capacité d'évacuation des eaux, ce qui entraînera une surélévation de la côte encore plus marquée.

Ce constat est applicable aux exploitations géothermiques appelant des débits très significatifs, comme les scénarios 1 et 2 où le débit en jeu culminerait à 300 m³/h par doublet. Le scénario 3

est à même d'épargner à la nappe ce risque, car les débits en jeu dans Sc1 et Sc2 sont pratiquement divisés par 3. Il faudra néanmoins veiller à ce que plusieurs puits de réinjection ne soient situés dans un périmètre très proche car cela reviendrait à additionner leurs débits en une seule réinjection.

Les recommandations à respecter par rapport à ce point sont les suivantes :

- il faut procéder à des tests de réinjection avant toute opération de géothermie ;
- la conception et l'exécution des ouvrages devront tenir compte du contexte hydrogéologique du milieu, en les faisant réaliser par des entreprises compétentes. La mise en place d'un massif filtrant et d'un tubage aux crépines adaptées est essentielle ;
- en fonction des résultats des tests de réinjection, le recours à un fonctionnement en triplet géothermique au lieu du doublet permettrait de répartir le volume d'eau à évacuer sur deux ouvrages de réinjection. Les puits de réinjection devront être suffisamment distants pour éviter toute accumulation.

En résumé, les trois scénarios sont susceptibles de couvrir les besoins thermiques de Nice Méridia, avec l'appui de tampons et l'inertie des bâtiments qui devra être suffisante pour faire face aux situations climatiques extrêmes. L'impact sur la nappe a été estimé comme très faible que ce soit au niveau hydrodynamique ou thermique. Concernant la configuration de la mise en place des ouvrages, celle du scénario 3 paraît complexe du fait du nombre important d'ouvrages à implanter dans un périmètre assez restreint ; le risque de phénomènes de recyclage et/ou de conflits d'usage entre opérations est très élevé ce qui réduirait de façon significative la performance énergétique et l'intérêt général de l'opération. Si le choix est fait d'adopter ce scénario, une modélisation précise doit être réalisée pour déterminer les meilleurs emplacements d'ouvrages.

Outre ces critères de décision d'ordre technique et énergétique, les critères d'ordre économique peuvent aussi intervenir dans le choix de la solution appropriée.

En effet, l'analyse économique développée dans cette étude a pour but de fournir des indicateurs pour juger de l'intérêt des différentes solutions techniques (scénarios et sous-scénarios). Compte-tenu des hypothèses et incertitudes associées aux paramètres utilisés, les résultats de cette analyse sont à considérer en termes d'ordre de grandeur plus qu'en valeurs absolues. Elle devra être affinée dans les études de faisabilité détaillées.

La comparaison des scénarios montre que la solution géothermique avec une machinerie répartie et le recours au Rafraîchissement est la plus intéressante d'un point de vue économique et environnemental (Sc2/Frais et Sc3/Frais). Son coût d'investissement est estimé à environ 3,5 millions d'€ et son coût annuel d'exploitation à 384 k€/an, dont 143 k€/an de coût énergétique (consommation électrique). La répartition spatiale des installations de cette même solution en six doublets pour étaler les investissements dans le temps sur trois périodes permet de ramener le coût d'investissement à 3 millions d'€ par effet d'actualisation. À l'inverse, le coût annuel d'exploitation est plus élevé et estimé à 409 k€/an en raison du nombre de doublets. Au final, les coûts globaux sur 30 ans sont sensiblement identiques pour les deux variantes de la solution décentralisée avec Rafraîchissement géothermique (avec ou sans phasage des investissements). Le coût moyen de production du chaud/frais est alors de 5 c€/kWh, soit 1,59 €/m².an de la surface plancher pour l'aménagement Nice Méridia.

10. Bibliographie

Moulin M., Salquebre 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

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.

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.

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.

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.

D. Maton, M. Analy, P. Durst, O. Goyeneche, C. Zammit avec la collaboration de R. Pissy (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.

Poux A., Goyeneche 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-FR. 97 p., 4 ann.

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.

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

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

www.ecovallee-plaineduvar.fr

www.cote-azur.cci.fr

www.nicecotedazur.org

www.nice.fr

www.nicematin.com

www.actuari.com/

www.alpes-maritimes.equipement.gouv.fr

www.ademe.fr

www.cg06.fr

www.regionpaca.fr

Annexe 1

Réglementation en vigueur régissant la géothermie



La réglementation en vigueur régissant la géothermie

Les principaux textes réglementaires qui s'appliquent à l'exploitation des eaux souterraines par forage et à l'exploitation des calories souterraines, donc aux opérations de géothermie sont :

- le Code minier et ses textes d'application, qui relèvent du ministre chargé des mines (la réglementation est appliquée par les Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement : DREAL) ;
- le Code de l'environnement qui relève du ministre chargé de l'environnement ;
- le Code de la Santé Publique, qui relève du ministre chargé de la santé ;
- Code Général des Collectivités Territoriales qui relève du ministre de l'intérieur.

1. Le code minier

La géothermie est régie par le code minier¹ en vertu de son article 3 qui donne une définition de la géothermie et du régime juridique qui lui est applicable.

Ainsi, « *les 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* », sont considérés comme des mines.

Une substance minière appartient à l'Etat et non au propriétaire du sol. L'exploitation d'une ressource minière nécessite donc des autorisations accordées par l'Etat. L'instruction des demandes d'autorisation est effectuée par le préfet du département concerné avec l'appui des DREAL qui se prononcent sur la recevabilité des demandes et sur les garanties financières et techniques exigées par la réglementation en vigueur.

Plusieurs types d'exploitations géothermiques sont distingués : les gîtes à « haute température » (supérieure à 150°C) et les gîtes à « basse température » (inférieure à 150°C)².

Des règles spécifiques s'appliquent à chacun, mais des dispositions communes s'appliquent à tous.

¹ Principaux textes d'application du code Minier : décret n°78-498 du 28 mars 1978, décrets n°2006-648 et n°2006-649 du 2 juin 2006.

² Température mesurée à la surface du sol au cours des forages d'exploration.

1.1. Dispositions spécifiques à chaque type d'exploitation géothermique

1.1.1. Les opérations haute température (pour mémoire).

Elles sont régies par les titres II, III, IV, VI bis, VIII, IX et X du code minier. Le décret n°2006-648 du 2 juin 2006 relatif aux titres miniers et aux titres de stockage souterrain précise les dispositions du code Minier à leur égard :

- **Recherche de mine** (titre II) : lorsque sont entreprises des recherches de mines par une personne autre que le propriétaire des terrains, celle-ci doit alors soit recueillir le **consentement du propriétaire**, soit détenir une **autorisation** du ministre chargé des mines après mise en demeure du propriétaire, soit détenir un **permis exclusif de recherches**. Ce permis est délivré à l'issue d'une procédure d'enquête publique et de mise en concurrence, pour une période de 5 ans au plus renouvelable deux fois, à un explorateur qui jouit de l'exclusivité du droit d'effectuer tous travaux de recherches dans le périmètre dudit permis et de disposer librement des produits extraits à l'occasion des recherches et des essais qu'elles peuvent comporter ;
- **Exploitation de mine** (Titre III) : l'exploitation est soumise à l'octroi d'une **concession** par décret en Conseil d'Etat (Article 25 du code minier). Cette concession peut être accordée à titre exclusif au demandeur déjà titulaire d'un permis de recherches, à l'intérieur du périmètre de ce permis, pendant la durée de sa validité et sur des substances mentionnées par celui-ci. Une concession est octroyée pour une période ne pouvant pas excéder 50 ans, renouvelable par périodes de 25 ans maximum.

Les procédures d'attribution de ces titres miniers (permis exclusif et concession) sont décrites dans le décret 2006-648 du 2 juin 2006.

1.1.2. Les opérations basse température

Les opérations basse température sont soumises à un Titre spécifique du code minier, le titre V (articles 98 à 103), qui institue une procédure plus simple que celle établie par les titres II et III.

a - Les opérations basse température (régime normal)

- **Recherche de gîte géothermique de basse température** : une demande d'autorisation de recherches doit être adressée au Préfet (article 98 du Code Minier). Il s'agit de conférer une autorisation de recherches par arrêté préfectoral après enquête publique. Celle-ci, désignée également par l'appellation « permis exclusif de recherches », est accordée, en vertu du décret n°78-498 du 28 mars 1978, après instruction du dossier du demandeur pour une durée maximale de trois ans ;
- **Exploitation de gîte géothermique de basse température** : elle est soumise à l'obtention d'un **permis d'exploitation** minier accordé par le préfet après enquête publique (article 99 du Code Minier) pour une durée maximale de 30 ans renouvelable par périodes de 15 ans maximum. Le titulaire d'une autorisation de recherches peut seul obtenir, pendant la durée de cette autorisation, un permis d'exploitation aux conditions de l'article 99 du code minier.



Les procédures de demande et d'attribution de ces permis sont détaillées dans les articles 3 à 7 du décret n°78-498 relatif aux titres de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques.

b - Les opérations basse température de minime importance (régime dérogatoire)

Texte de référence : article 17 du décret 78-498 pris en application de l'article 102 du code minier.

- **Définition** : « sont considérées comme des exploitations géothermiques à basse température de minime importance les prélèvements de chaleur souterraine :
 - dont le débit calorifique maximal possible calculé par rapport à une température de 20 degrés Celsius est inférieur à 200 thermies par heure (=230 kW)
 - ET dont la profondeur est inférieure à 100 mètres ».
- **Régime réglementaire** : ce type d'exploitation est dispensées de l'autorisation de recherches et du permis d'exploitation prévus aux articles 98 et 99 du code minier ; elles sont en revanche soumises à **déclaration préalable**, au service interdépartemental de l'industrie et des mines (la DREAL aujourd'hui) un mois avant leur réalisation.

Cette formalité doit être effectuée par le maître d'ouvrage ou par le foreur. L'article 17 du décret de 1978 précité indique que l'accomplissement de cette formalité s'effectue « selon les modalités prévues pour les déclarations de fouille en application de l'article 131 du code minier » et par lettre recommandée avec accusé de réception.

Cette déclaration tient lieu de la déclaration prévue à l'article 131 du code minier.

1.2. Dispositions applicables à toutes les opérations de travaux de recherches et d'exploitation de gîtes géothermiques

1.2.1. Ouverture de travaux de géothermie

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

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

Les procédures de demande d'autorisation sont précisées par le décret n°2006-649 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines.



2.1.3. La « nomenclature eau »

La nomenclature répartissant les installations ouvrages, travaux et activités (IOTA) soumis à autorisation ou déclaration figure à l'article R. 214-1 du Code de l'environnement. Le principe du fonctionnement de la « nomenclature eau », d'après les circulaires d'application³ consiste à appliquer soit le régime déclaratif, soit le régime d'autorisation, soit, pour les IOTA entrant dans plusieurs des rubriques, le régime le plus contraignant (c'est-à-dire le régime d'autorisation).

Les opérations de géothermies sont concernées par la « nomenclature Eau » dans différents cas de figure :

- Pour la réalisation d'ouvrages souterrains en lien avec les eaux souterraines ;
- Lorsqu'elles impliquent des prélèvements d'eau souterraine ;
- Lorsqu'elles impliquent des rejets dans le milieu naturel.

a - Rubriques « réalisation de forages en lien avec les eaux souterraines »

- **Rubrique 1.1.1.0.** : sondage, forage, y compris les essais de pompage, création de puits ou d'ouvrage souterrain, non destiné à un usage domestique, exécuté en vue de la recherche ou de la surveillance d'eaux souterraines ou en vue d'effectuer un prélèvement temporaire ou permanent dans les eaux souterraines, y compris dans les nappes d'accompagnement de cours d'eau sont soumis à déclaration.

b - Rubriques « prélèvements »

- **Rubrique 1.1.2.0.** : les 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 sont soumis à :
 - Autorisation si le volume total prélevé est supérieur ou égal à 200 000 m³/an ;
 - Déclaration si le volume total prélevé est supérieur à 10 000 m³/an mais inférieur à 200 000 m³/an.
- **Rubrique 1.3.1.0.** : les prélèvements dans des zones où des mesures permanentes de répartition quantitative sont instituées (Zones de Répartition des Eaux), sont soumis à :
 - Autorisation si leur débit est supérieure ou égale à 8 m³/h ;
 - Déclaration dans les autres cas.

³ circulaire du 16 mars 2004 et circulaire du 22 octobre 2006

La réglementation en vigueur régissant la géothermie



classées pour la protection de l'environnement définies à l'article L.511-1 du code de l'environnement.

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

Les prescriptions applicables à ces ouvrages sont celles fixées par les arrêtés ministériels applicables à l'activité :

- pour les activités soumises à autorisation, il s'agit :
 - de l'arrêté ministériel du 2 février 1998 modifié relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation ;
 - des arrêtés ministériels plus spécifiques à l'activité ;
 - des dispositions de l'arrêté préfectoral d'autorisation.
- pour les activités relevant du régime déclaratif, il s'agit :
 - des arrêtés ministériels applicables à l'activité (L.512-10 du code de l'environnement) ;
 - des prescriptions générales préfectorales (L.512-9 et R.512-51 du Code de l'Environnement) imposées par secteur d'activité ;
 - des dispositions imposées par arrêté préfectoral spécifiquement à l'installation (L. 512-12 et R.512-52 du Code de l'Environnement).

Il convient de noter que l'arrêté ministériel du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondages, forages, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration, même s'il n'est juridiquement pas applicable, peut constituer une référence utile à prendre en considération.

Par ailleurs, et conformément à l'article L.214-7 du code de l'environnement, les forages nécessaires au fonctionnement d'ICPE « *sont soumis aux dispositions des articles L. 211-1, L. 212-1 à L. 212-11, L. 214-8, L. 216-6 et L. 216-13, ainsi qu'aux mesures prises en application des décrets prévus au 1° du II de l'article L. 211-3. Les mesures individuelles et réglementaires prises en application de la législation des installations classées fixent les règles applicables aux installations classées ayant un impact sur le milieu aquatique, notamment en ce qui concerne leurs rejets et prélèvements* » :

- Article L.211-1, qui a pour objet une gestion équilibrée et durable de la ressource en eau (cette gestion prend en compte les adaptations nécessaires au changement climatique).
- Article L.212-1 à L.212-11, relatif aux documents de planification par bassin, sous-bassins ... (SDAGE, SAGE...);
- Article L.214-8, relatif à l'instrumentation avec des moyens de mesure, à la charge des exploitant ou des propriétaires, des installations permettant d'effectuer à des fins



non domestiques des prélèvements en eau superficielle ou des déversements, ainsi que toute installation de pompage des eaux souterraines ;

- Article L. 211-3 alinéa 1^{er} du point II, relatif aux mesures de limitation ou de suspension provisoire des usages de l'eau, pour faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de sécheresse, d'inondations ou à un risque de pénurie ;
- Articles L.216-6 à L.216-13 imposant des sanctions pénales en cas d'infraction à différentes dispositions prévues pour protéger les intérêts mentionnés à l'article L.211-1 du code de l'environnement (loi sur l'eau).

2.2.2. Pompes à chaleur

Les PAC sur nappe sont concernées par la rubrique 2920 de l'annexe 1 de l'article R511-9 qui prévoit :

- Pour les installations de réfrigération ou compression fonctionnant à des pressions effectives supérieures à 10^5 Pa (mais ne comprimant pas ou n'utilisant pas des fluides inflammables ou toxiques) :
 - un régime d'autorisation si la puissance absorbée est supérieure à 500 kW ;
 - un régime de déclaration si la puissance absorbée est supérieure à 50 kW, mais inférieure ou égale à 500 kW.
- Des réglementations spécifiques concernent l'utilisation des fluides frigorigènes.

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

2.3. Articulation avec le code de la Santé Publique

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

2.4. Bilan sur l'application du Code de l'Environnement aux opérations de géothermie

Au final, une opération de géothermie avec prélèvement d'eau :

- doit disposer de l'autorisation de travaux délivrée dans les conditions prévues par l'article 2006-649 d'application de l'article 83 du code minier (et qui remplace la déclaration au titre de l'article 131 du code Minier) ;

La réglementation en vigueur régissant la géothermie



- doit avoir obtenue cette autorisation en fournissant les documents prévus par le code de l'environnement (au titre de la législation « Eau » et/ou de la législation « ICPE ») et par le code de la Santé Publique, pour que cette autorisation vaille au titre du code de l'Environnement ;
- doit être réalisée en conformité avec les prescriptions de l'arrêté du 11 septembre 2003 précisant les conditions techniques de respect de la rubrique 1.1.1.0,
- doit répondre, le cas échéant, aux prescriptions des arrêtés correspondants aux autres rubriques de la nomenclature « Eau » et « ICPE » dans lesquelles entre cette opération, au titre de ses prélèvements, ou rejets, ou réinjections, etc.

3. Le Code de la Santé Publique

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

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

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

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

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

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

4. Le Code Général des Collectivités Territoriales

Depuis le 1er janvier 2009, tout particulier utilisant ou souhaitant réaliser un ouvrage de prélèvement d'eau souterraine (puits ou forage), à des fins d'**usage domestique** doit **déclarer** cet ouvrage ou son projet en mairie. Les informations relatives à cette déclaration sont tenues à disposition du représentant de l'Etat dans le département et des agents des services publics d'eau potable et d'assainissement (décret 2008-652 du 2 juillet 2008 pris en application de l'article L. 2224-9 du code général des collectivités territoriales).

La réglementation en vigueur régissant la géothermie



Une fiche déclarative est définie dans l'arrêté de 17 décembre 2008 ; elle est fournie en annexe 3 et est disponible au téléchargement sur le site Internet : <http://www.foragesdomestiques.developpement-durable.gouv.fr>.

5. Evolutions en cours

La réglementation relative à la géothermie est en cours de modification. Les changements envisagés sont importants et, dans cette période charnière (réorganisation des services de l'Etat), il est recommandé aux maîtres d'ouvrage de se rapprocher des services locaux (départementaux et régionaux) en charge de l'instruction des dossiers de déclaration et d'autorisation : DDT et DREAL.

Annexe 2

Régime juridique applicable à la géothermie sur nappe : Code minier et Code de l'Environnement

Code minier (CM)		Code de l'environnement (CE)
Géothermie haute température	Titres II - Travaux de recherche : permis de recherche	<p>Rubrique 1.1.1.0 – Réalisation sondage, forage, ... en lien avec les eaux souterraines : déclaration</p> <p>Rubrique 1.1.2.0 - Prélèvement d'eau souterraine (cas général) : autorisation si $Q \geq 200\,000\text{ m}^3/\text{an}$ // déclaration si $10\,000\text{ m}^3/\text{an} < Q < 200\,000\text{ m}^3/\text{an}$.</p> <p>Rubrique 1.2.1.0 - Prélèvement d'eau souterraine en nappe d'accompagnement de cours d'eau : autorisation si $Q \geq 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ou si $Q \geq 5\%$ du débit du cours d'eau // déclaration si $400\text{ m}^3/\text{h} < Q < 1\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ou si $2\% < Q < 5\%$ du débit du cours d'eau.</p> <p>Rubrique 1.3.1.0 - Prélèvement d'eau souterraine en ZRE⁵ : autorisation si $Q \geq 8\text{ m}^3/\text{h}$ // déclaration si $Q < 8\text{ m}^3/\text{h}$.</p> <p>Rubriques 2... - Rejets d'eau</p> <p>Rubrique 5.1.1.0 – Réinjection dans une même nappe : autorisation si $Q \geq 80\text{ m}^3/\text{h}$ // déclaration si $8\text{ m}^3/\text{h} < Q < 80\text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Rubrique 5.1.2.0 - Travaux de recherche et d'exploitation de gîtes géothermiques : autorisation</p>
	Titre III - Travaux d'exploitation : concession minière	
	Titre IV - Ouverture de travaux (Art 83)	
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	
	Titre IV (Art 83) : Ouverture de travaux	
	Titre V (Art 98) : Travaux de recherche : permis de recherche	
Géothermie basse température (régime normal)	Titre V (Art 99) - Travaux d'exploitation : permis d'exploitation	
	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	
	Titre IV (Art 83) : Ouverture de travaux	
	Titre V (Art. 102) + décret 78-498 (Art 17) – Minimale importance : déclaration selon modalités Art 131.	
Géothermie basse température de minimale importance	Titre VIII (Art 131) - Réalisation ouvrage souterrain > 10m : déclaration	

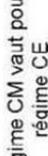
Equivalences inter-codes⁴

Régime CM vaut pour régime CE 

Régime CE vaut pour régime CM 

Régime CM vaut pour régime CE 

Régime CE vaut pour régime CM 

Régime CM vaut pour régime CE 

Régime CE vaut pour régime CM 

⁴ Pour qu'il y ait équivalence inter-code, le dossier de déclaration et/ou d'autorisation déposé auprès des administrations compétentes doit comporter l'ensemble des pièces exigées indépendamment par chacun des codes.

⁵ ZRE : Zone de Répartition des Eau (zone où des mesures permanentes de répartition quantitative de la ressource sont instituées)

Annexe 3

Fiche de déclaration en mairie des prélèvement, puits et forages à usage domestiques

5 - Localisation de l'ouvrage. Veuillez joindre à la déclaration un plan de localisation de l'ouvrage à l'échelle du 1/25000 ou un extrait du cadastre. Les coordonnées GPS de l'ouvrage pourront être également communiquées.

Adresse Numéro : Voie :

Lieu-dit : Localité :

Code postal BP cedex

Cadastre : Section(s) Parcelle(s) n°

Code BSS (Banque du Sous-Sol) pour tout ouvrage existant :

Coordonnées GPS de l'ouvrage* :
 Longitude (deg : mn,ss) Latitude (deg : mn,ss)

Nous vous rappelons qu'une déclaration spécifique doit être faite auprès des services déconcentrés régionaux chargés des mines, pour tout ouvrage de plus de 10 mètres de profondeur ; cette déclaration permet un enregistrement dans la Banque du Sous-Sol (BSS) et un code BSS est ainsi attribué à l'ouvrage (article 131 code minier). Adresse et Contact disponibles sur le site : www.drire.gouv.fr

6 - Type d'ouvrage (veuillez cocher la case correspondante).

Forage Puits Autres à préciser,

Date de création¹ (cas d'un ouvrage ancien)
 Date prévisionnelle d'achèvement des travaux (cas d'un nouvel ouvrage)

7 - Usages auxquels l'ouvrage est destiné (veuillez cocher les cases correspondantes).

Utilisation de l'eau pour la consommation humaine (au sens de l'article R. 1321-1 du code de la santé publique) Oui Non

En cas d'utilisation de l'eau pour la consommation humaine :
 pour un usage unifamilial², une analyse de l'eau de type P1, à l'exception du chlore, définie dans l'arrêté du 11 janvier 2007 (relatif au programme de prélèvements et d'analyses du contrôle sanitaire pour les eaux fournies par un réseau de distribution) doit être réalisée et jointe à la déclaration ; pour les ouvrages à réaliser l'analyse est transmise après travaux ;
 pour les autres cas, une autorisation préfectorale doit être demandée au titre de l'article L.1321-7 du code de la santé publique.

Autres usages de l'eau Oui Non

Si oui, préciser :

Existence d'un réseau de distribution d'eau intérieur au bâtiment alimenté par l'ouvrage Oui Non

Après usage, existence d'un rejet des eaux issues du pompage dans le réseau public de collecte des eaux usées Oui Non

Après usage, existence d'un rejet des eaux issues du pompage dans le réseau public de collecte des eaux pluviales Oui Non

8 - Caractéristiques de l'ouvrage (veuillez indiquer les caractéristiques réelles pour les ouvrages existants, et les prévisions pour les nouveaux ouvrages à réaliser).

Nom ou type de la nappe dans lequel le prélèvement va être effectué (si connu) :

Profondeur de l'ouvrage : (en m) Diamètre de l'ouvrage : (en mm)

Débit de prélèvement : (en m³/h) Volume annuel prélevé : (en m³/an)

Présence d'une margelle béton autour de la tête du forage ou puits : Oui Non

Ouvrage réalisé en se conformant à la norme NF X 10-999 forages d'eau et de géothermie : Oui Non

Le respect de cette norme permet de garantir que l'ouvrage est réalisé dans les règles de l'art et permet notamment de protéger la ressource souterraine de toute infiltration directe d'eau de ruissellement superficielle potentiellement polluée.

Il est rappelé que tout pompage doit être équipé d'un compteur volumétrique (article L.214-8 du code de l'environnement)

Fait à :
 le
 Nom, Prénom :
 Signature

¹ ou date d'achèvement d'un nouvel ouvrage.
² unifamilial : usage restreint aux besoins d'une seule famille.
 Les champs suivis de (*) sont facultatifs

Annexe 4

Garantie AQUAPAC



ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie



**GARANTIE SUR LA RESSOURCE
EN EAU SOUTERRAINE
A FAIBLE PROFONDEUR
UTILISEE
A DES FINS ENERGETIQUES**

Les nappes d'eau souterraines de faible profondeur
recèlent un potentiel énergétique utilisable grâce aux pompes à chaleur.

Cependant, il peut exister une incertitude sur les conditions d'utilisation de la ressource
naturelle qui dépend des caractéristiques géologiques locales.

La procédure **AQUAPAC**, créée par l'**ADEME**, le **BRGM**, et **EDF** prend en charge la
couverture financière de ce risque géologique,

Gestion administrative et financière du système de garantie : Fax : 01 58 50 06 80

SAF-ENVIRONNEMENT

195, boulevard Saint Germain

75007 PARIS

Tél. : 01 58 50 76 76 - Fax : 01 58 50 06 80 - e-mail : herve.raimbault@caissedesdepots.fr

AQUAPAC est une assurance qui couvre les risques **géologiques** liés à la possibilité d'exploitation énergétique d'une ressource aquifère située en général à **moins de 100 m de profondeur**, puis au maintien de ses capacités dans le temps. Cette assurance s'applique en faveur des installations utilisant des pompes à chaleur d'une puissance thermique **supérieure à 30 KW**. C'est donc une double garantie, dont les deux aspects sont indissociables :

- **La garantie de recherche** couvre le risque d'échec consécutif à la découverte d'une ressource en eau souterraine insuffisante pour le fonctionnement des installations tel qu'il avait été prévu,

- **La garantie de pérennité** couvre le risque de diminution ou de détérioration de la ressource, en cours d'exploitation.

AQUAPAC assure pendant 10 ans les investissements réalisés pour le captage et le transfert de la ressource jusqu'à l'échangeur eau-eau et sa réinjection.

La garantie ne concerne pas les éventuels incidents de chantier, ni les conséquences des défauts de conception, de réalisation ou de maintenance.

Le Maître d'Ouvrage conserve l'entière responsabilité du respect de la réglementation, du choix des bureaux d'études ou entreprises, et de la réalisation de l'opération.

En aucun cas, **AQUAPAC** n'a pour objet de se substituer aux polices d'assurances dommage-ouvrage ou de responsabilité décennale au titre desquelles les opérateurs doivent normalement être couverts.

BENEFICIAIRES DE LA GARANTIE AQUAPAC

Les Maîtres d'ouvrages ou leurs mandataires (bureaux d'études, entreprises, prestataires de services, exploitants) désireux de se prémunir vis-à-vis des aléas géologiques liés à l'utilisation énergétique de l'eau souterraine à des fins de **chauffage** et/ou de **climatisation** peuvent souscrire la garantie **AQUAPAC**.

Cette garantie s'applique à tous les secteurs économiques: habitat, tertiaire, industriel ou agricole, qu'il s'agisse de bâtiments neufs ou existants, et quelle que soit la puissance de l'installation thermique.

ATTRIBUTION DE LA GARANTIE

Un Comité composé des représentants de l'ADEME, du BRGM, et d'EDF, assisté de la SAF-Environnement, décide de l'attribution, ou non, de la garantie, après examen d'un dossier que le requérant aura déposé auprès de la Saf-Environnement .

Ce dossier, dont un modèle peut être demandé auprès de la Saf-Environnement doit comprendre :

- **L'identification** de l'opération concernée, sa localisation et ses différents acteurs,

- **Une fiche descriptive** des besoins thermiques, et du mode d'évaluation des besoins en eau,

- **Une étude de faisabilité du projet** comportant une évaluation des contraintes réglementaires et environnementales, les caractéristiques de la ressource, le mode de captage et de réinjection, les essais et mesures hydrogéologiques prévus, la description de l'installation et des ouvrages de sous-sol et de surface,

- **les éléments économiques** comprenant les coûts prévisionnels d'investissement et de fonctionnement : études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, échangeur, PAC,

- **Le montant des investissements** pour lesquels la garantie est demandée, qui devra être clairement établi.

Si l'avis du Comité **AQUAPAC** est favorable, un contrat est alors signé entre la SAF et le Maître d'Ouvrage qui verse **en une seule fois, et au moment de la souscription de chaque garantie**, les cotisations et commissions forfaitaires suivantes :

- *Pour la garantie de recherche :*

- une cotisation égale à **5%** du montant des ouvrages garantis en recherche,

- *Pour la garantie de pérennité :*

- une cotisation égale à **4%** du montant des ouvrages garantis en pérennité,

FONCTIONNEMENT DE LA GARANTIE

Garantie de recherche

Risques couverts

Le risque couvert est celui de l'échec quant à la découverte du débit d'eau maximal de production fixé dans le contrat de garantie comme suffisant au fonctionnement correct des installations, à partir des éléments techniques fournis.

Le risque couvert est aussi celui de l'échec quant à la possibilité de réinjection du débit.

Montant garanti en recherche

Le montant garanti en recherche, fixé dans le contrat, est égal au coût réel des études préalables, forages, tests et analyses, équipements des puits, désignés dans la demande de recherche, (plafonné au montant prévisionnel), déduction faite des subventions reçues.

Lorsque plusieurs forages sont prévus, le contrat est établi pour le premier, et étendu par avenant au suivant après chaque constat de succès.

Fonctionnement de la garantie

La garantie prend effet dès la signature du contrat et le versement des primes de la garantie de recherche.

Le Maître d’Ouvrage peut alors faire réaliser les travaux de forage.

Il doit informer la Saf-Environnement de la date des essais et de la date de réception des ouvrages.

La capacité des ouvrages est mesurée à la fin des travaux, et le rapport de fin de forage avec les résultats des essais hydrogéologiques doit être envoyé à la Saf-Environnement

Evaluation du résultat du forage

Suivant la valeur du débit mesuré au cours des essais, il y aura succès, échec partiel ou échec total :

- *Succès* : le débit trouvé est supérieur ou égal au débit contractuel ;
- *Echec total* : le débit trouvé est inférieur à la moitié du débit contractuel ;
- *Echec partiel* : le débit trouvé est compris entre ces deux valeurs.

En cas de succès le demandeur reçoit alors l’appel de cotisation pour la garantie de pérennité, qui est accordée pour dix ans à partir de la date de réception du paiement de la cotisation correspondante.

Calcul de l’indemnité « recherche »

En cas d’échec total, le Comité AQUAPAC déclenche le versement de l’indemnité, égale au montant garanti.

En cas d’échec partiel, le Maître d’ouvrage peut néanmoins exploiter la ressource en son état et bénéficier alors de la garantie de pérennité :

- la nouvelle valeur du débit exploitable est définie par un avenant au contrat de garantie ;
- le montant de l’indemnité est alors proportionnel au déficit en eau sur le débit garanti initial

Garantie de pérennité

Risques couverts :

Sous réserve d’un entretien correct des ouvrages et des équipements d’exploitation, attesté par un carnet de maintenance ou des factures de prestations de services, la garantie de pérennité couvre les risques suivants :

- a) *diminution des débits d’exhaure ou de réinjection* au-dessous de la valeur garantie :
- sinistre partiel : le débit diminue et atteint une valeur comprise entre la valeur garantie et la moitié de cette valeur.
 - sinistre total : le débit atteint une valeur inférieure à la moitié du débit de garantie

b) *dommages* aux matériels de puisage et de réinjection et/ou aux équipements du circuit primaire, y compris l’échangeur, occasionnés par des changements survenus dans les caractéristiques de la ressource dus à des causes naturelles ou de voisinage.

Durée de la Garantie

La garantie est accordée pour une période de **10 ans** à partir de la date effective de mise en service.

Elle peut être différée en cas de forage d’essai. Si ce délai dépasse 6 mois, un nouvel essai de pompage devra être effectué.

Montant garanti en pérennité

Le montant garanti, fixé par contrat, est égal au coût de l’ensemble des ouvrages primaires neufs : forages, pompes, matériels de surface, y compris l’échangeur eau-eau. Ces coûts s’entendent toutes subventions déduites.

Pour tenir compte de l’amortissement de l’installation, ce montant garanti diminue de 5 % par semestre écoulé.

En cas d’échec total, le coût prévisionnel des travaux nécessaires à la restauration fonctionnelle de l’installation, peut être également garanti.

Calcul de l’indemnité « pérennité »

L’assiette **A** de l’indemnisation est calculée ainsi :

- a) *Diminution des débits d’exhaure ou de réinjection* :
- en cas de sinistre partiel, **A** = la fraction du montant garanti proportionnelle au déficit en eau,
 - en cas de sinistre total, **A** = montant garanti

b) *Dommages* :

- en cas de poursuite de l’exploitation, **A** = coût réel des travaux de remise en état, plafonné au montant garanti,
- en cas d’abandon de l’exploitation, **A** = montant garanti.

Fonctionnement de la garantie

En cas de constat de modification des caractéristiques de la ressource de nature à perturber l’exploitation, le maître d’ouvrage ou l’exploitant adresse une déclaration de sinistre à la Saf-Environnement.

Des essais hydrogéologiques peuvent alors être réalisés par le maître d’ouvrage, en accord avec le Comité qui pourra mandater un expert.

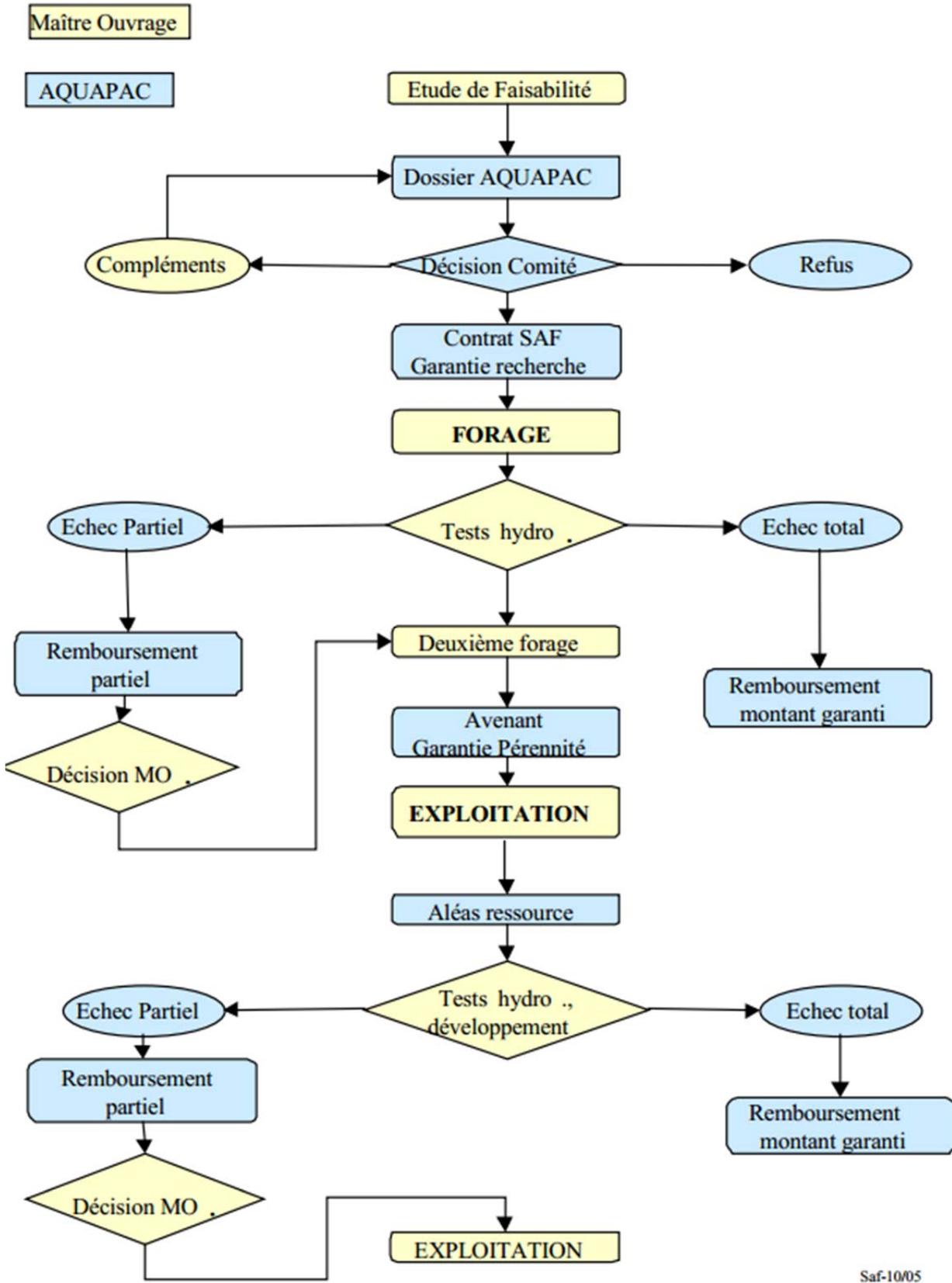
Ensuite, le Comité apprécie la recevabilité du sinistre et déclenche, s’il y a lieu, le paiement des indemnités.

Le Comité se réserve toutefois la possibilité en lieu d’indemnisation de restaurer le forage ou l’installation

PLAFOND

Les indemnisations sont plafonnées à **115 000 Euros** par sinistre.

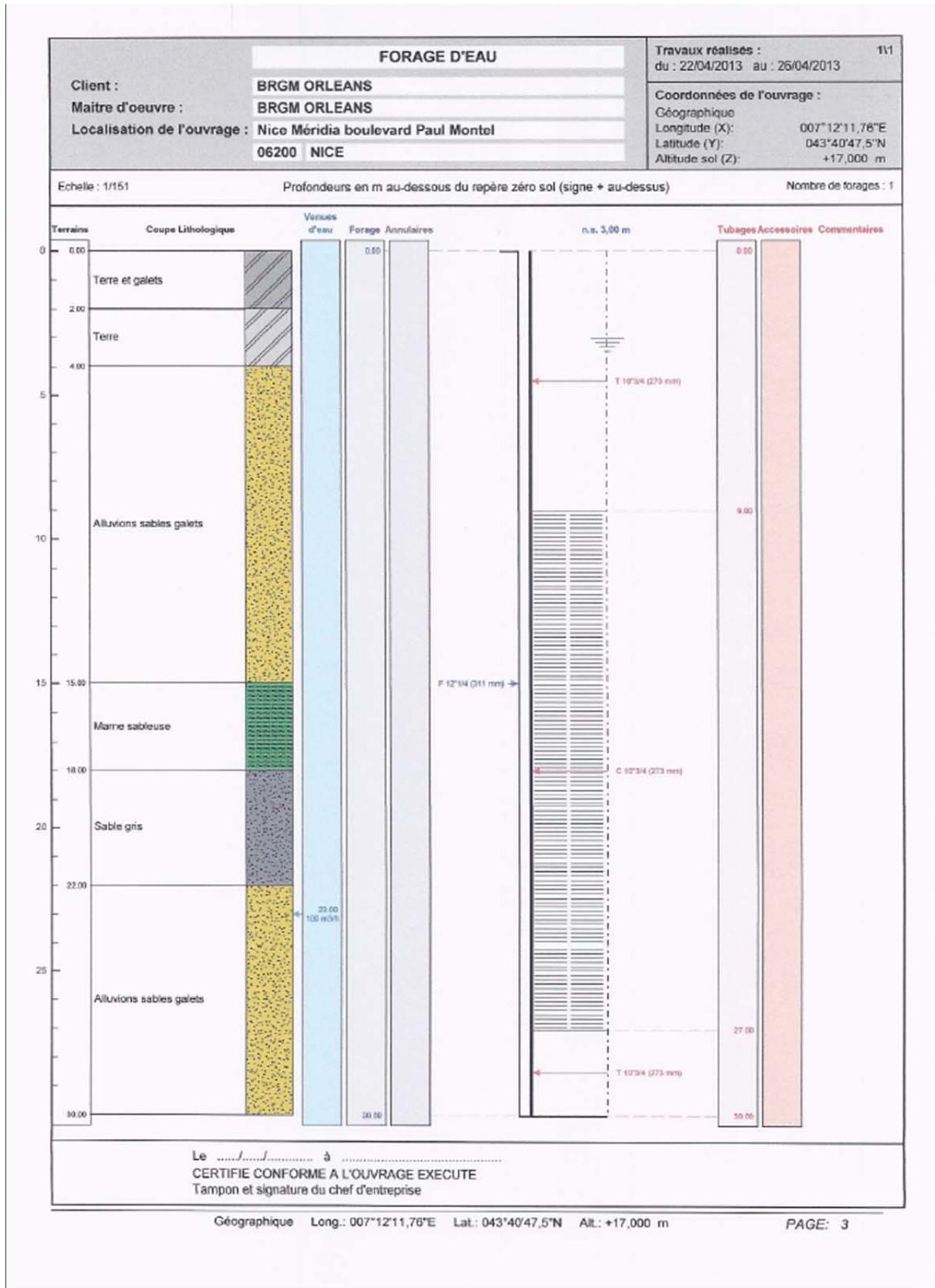
Procédure AQUAPAC



Saf-10/05

Annexe 5

Coupes lithologiques et données des forages réalisés sur Nice Méridia



FORASUD S.A.

**TRONCONS de L'OUVRAGE
FORAGE D'EAU**

Client:	BRGM ORLEANS
Maitre d'oeuvre:	BRGM ORLEANS
Lieu de l'ouvrage :	Nice Méridia boulevard Paul Montel
	06200 NICE

LITHOLOGIE

De	à	Libellé
0.00	2.00	Terre et galets
2.00	4.00	Terre
4.00	15.00	Alluvions sables galets
15.00	18.00	Marne sableuse
18.00	22.00	Sable gris
22.00	30.00	Alluvions sables galets

FORAGE

De	à	Ø"	Ømm	Mode de forage	Fluide de forage
0.00	30.00	12"1/4	311.00	M.ft.	Air

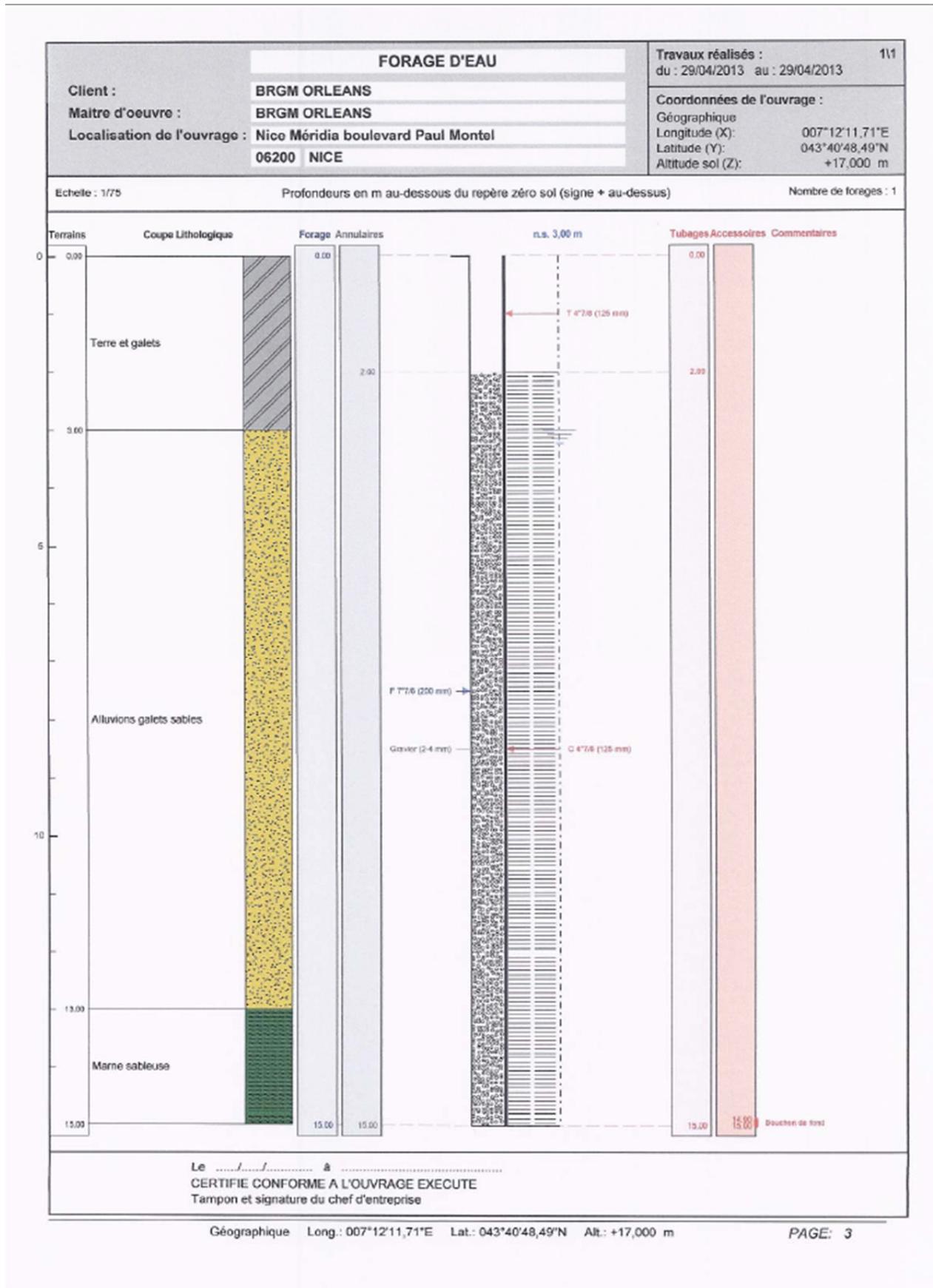
* Reconnaissance

ARRIVEES D'EAU

Profondeur (m)	Débit (m3/heure)
23.00	100.00

TUBAGE

De	à	Ø"	Ømm	Epais.	Ecra.	Nature du tubage	Type	Slot	Vide %
0.00	9.00	10"3/4	273.00	6.00		Acier-ordinaire	Tube-plein		
9.00	27.00	10"3/4	273.00	6.00		Acier-ordinaire	Crepine fentes-oblongues	4.00	8
27.00	30.00	10"3/4	273.00	6.00		Acier-ordinaire	Tube-plein		



FORASUD S.A.

TRONCONS de L'OUVRAGE FORAGE D'EAU

Client:	BRGM ORLEANS
Maître d'oeuvre:	BRGM ORLEANS
Lieu de l'ouvrage :	Nice Méridia boulevard Paul Montel
	06200 NICE

LITHOLOGIE

De	à	Libellé
0.00	3.00	Terre et galets
3.00	13.00	Alluvions galets sables
13.00	15.00	Marne sableuse

FORAGE

De	à	Ø"	Ømm	Mode de forage	Fluide de forage
0.00	15.00	7"7/8	200.00	M.f.t.	Air

* Reconnaissance

TUBAGE

De	à	Ø"	Ømm	Epais.	Ecra.	Nature du tubage	Type	Slot	Vide %
0.00	2.00	4"7/8	125.00	6.00		P.v.c.	Tube-plein		
2.00	15.00	4"7/8	125.00	6.00		P.v.c.	Crepine fentes	1.00	

REPLISSAGE

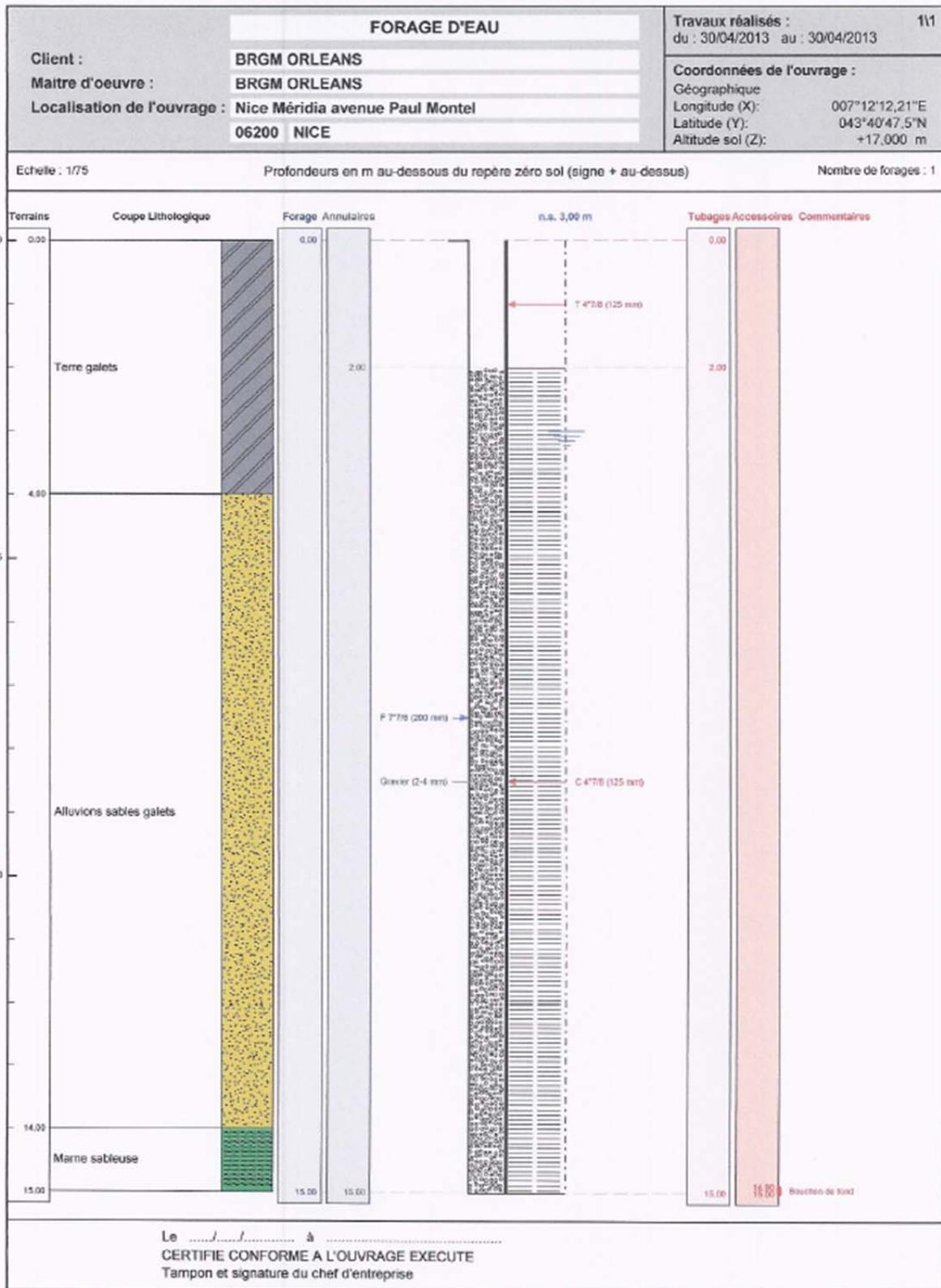
De	à	Ø"	Ømm	Matériau	Nature	Méthode de pose	Texture	Gra. (mm)	Vol. m3
2.00	15.00	4"7/8	125.00	Gravier	Gravier	Gravitaire	Roule	2.00-4.00	

ACCESSOIRE

De	à	Type d'accessoire
14.90	15.00	Bouchon de fond

Epais.=Epaisseur (mm) Ecra.=Résist. à l'écrasement (bar) Slot (mm) Granul.=Granulométrie Min/Max (mm)

PAGE: 2



FORASUD S.A.

**TRONCONS de L'OUVRAGE
FORAGE D'EAU**

Client:	BRGM ORLEANS
Maitre d'oeuvre:	BRGM ORLEANS
Lieu de l'ouvrage :	Nice Méridia avenue Paul Montel 06200 NICE

LITHOLOGIE

De	à	Libellé
0.00	4.00	Terre galets
4.00	14.00	Alluvions sables galets
14.00	15.00	Mame sableuse

FORAGE

De	à	Ø"	Ømm	Mode de forage	Fluide de forage
0.00	15.00	7"7/8	200.00	M.f.t.	Air

* Reconnaissance

TUBAGE

De	à	Ø"	Ømm	Epais.	Ecra.	Nature du tubage	Type	Slot	Vide %
0.00	2.00	4"7/8	125.00	6.00		P.v.c.	Tube-plein		
2.00	15.00	4"7/8	125.00	6.00		P.v.c.	Crepine fentes	1.00	

REMPLISSAGE

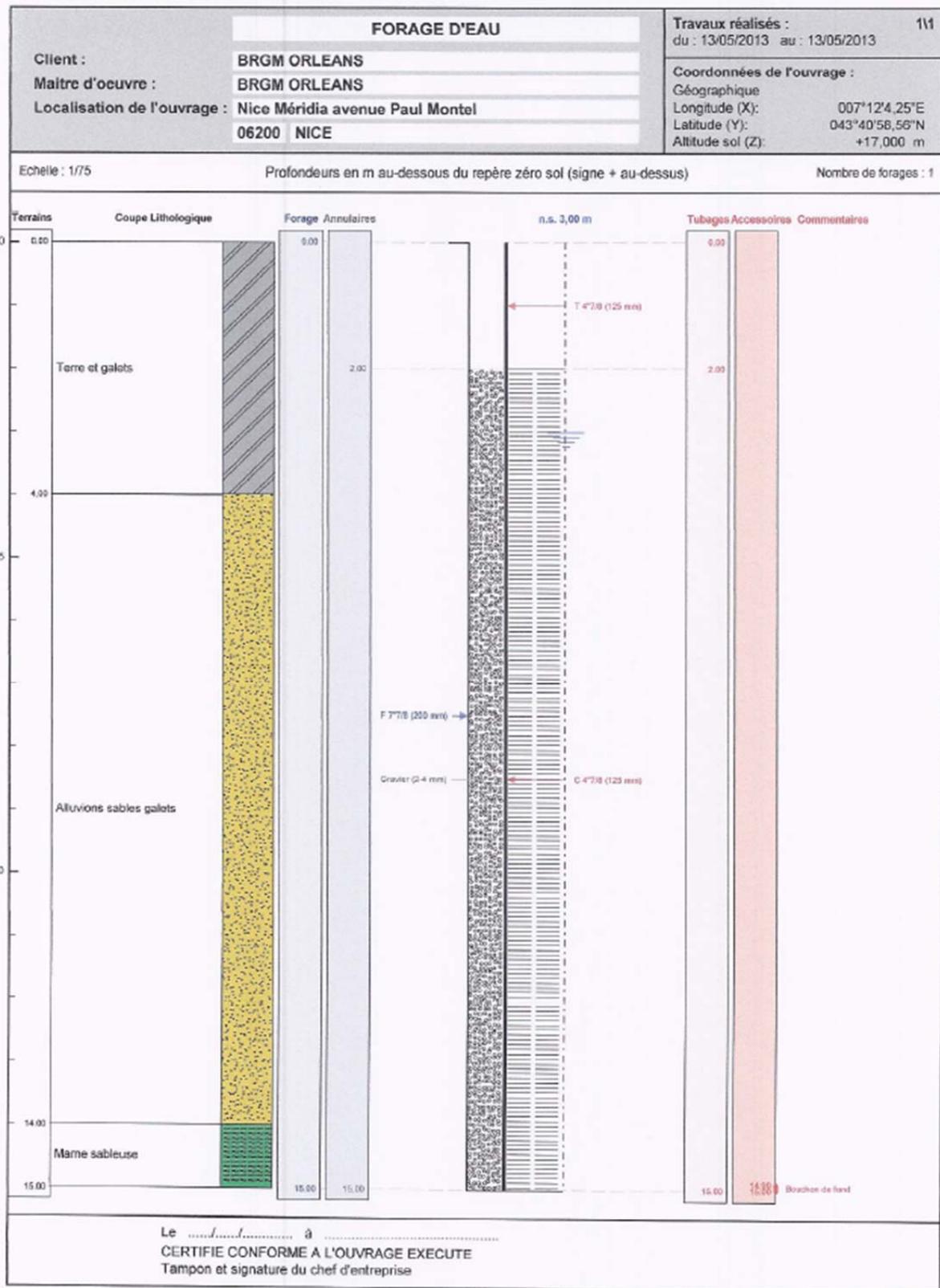
De	à	Ø"	Ømm	Matériau	Nature	Méthode de pose	Texture	Gra. (mm)	Vol. m3
2.00	15.00	4"7/8	125.00	Gravier	Gravier	Gravitaire	Roule	2.00-4.00	

ACCESSOIRE

De	à	Type d'accessoire
14.90	15.00	Bouchon de fond

Epais.=Epaisseur (mm) Ecra.=Résist. à l'ecrasement (bar) Slot (mm) Granul.=Granulométrie Min/Max (mm)

PAGE: 2



FORASUD S.A.

**TRONCONS de L'OUVRAGE
FORAGE D'EAU**

Client:	BRGM ORLEANS
Maître d'oeuvre:	BRGM ORLEANS
Lieu de l'ouvrage :	Nice Méridia avenue Paul Montel
	06200 NICE

LITHOLOGIE

De	à	Libellé
0.00	4.00	Terre et galets
4.00	14.00	Alluvions sables galets
14.00	15.00	Marne sableuse

FORAGE

De	à	Ø"	Ømm	Mode de forage	Fluide de forage
0.00	15.00	7"7/8	200.00	M.f.t.	Air

* Reconnaissance

TUBAGE

De	à	Ø"	Ømm	Epais.	Ecra.	Nature du tubage	Type	Slot	Vide %
0.00	2.00	4"7/8	125.00	6.00		P.v.c.	Tube-plein		
2.00	15.00	4"7/8	125.00	6.00		P.v.c.	Crepine fentes	1.00	

REMPLISSAGE

De	à	Ø"	Ømm	Matériau	Nature	Méthode de pose	Texture	Gra. (mm)	Vol. m3
2.00	15.00	4"7/8	125.00	Gravier	Gravier	Gravitaire	Roule	2.00-4.00	

ACCESSOIRE

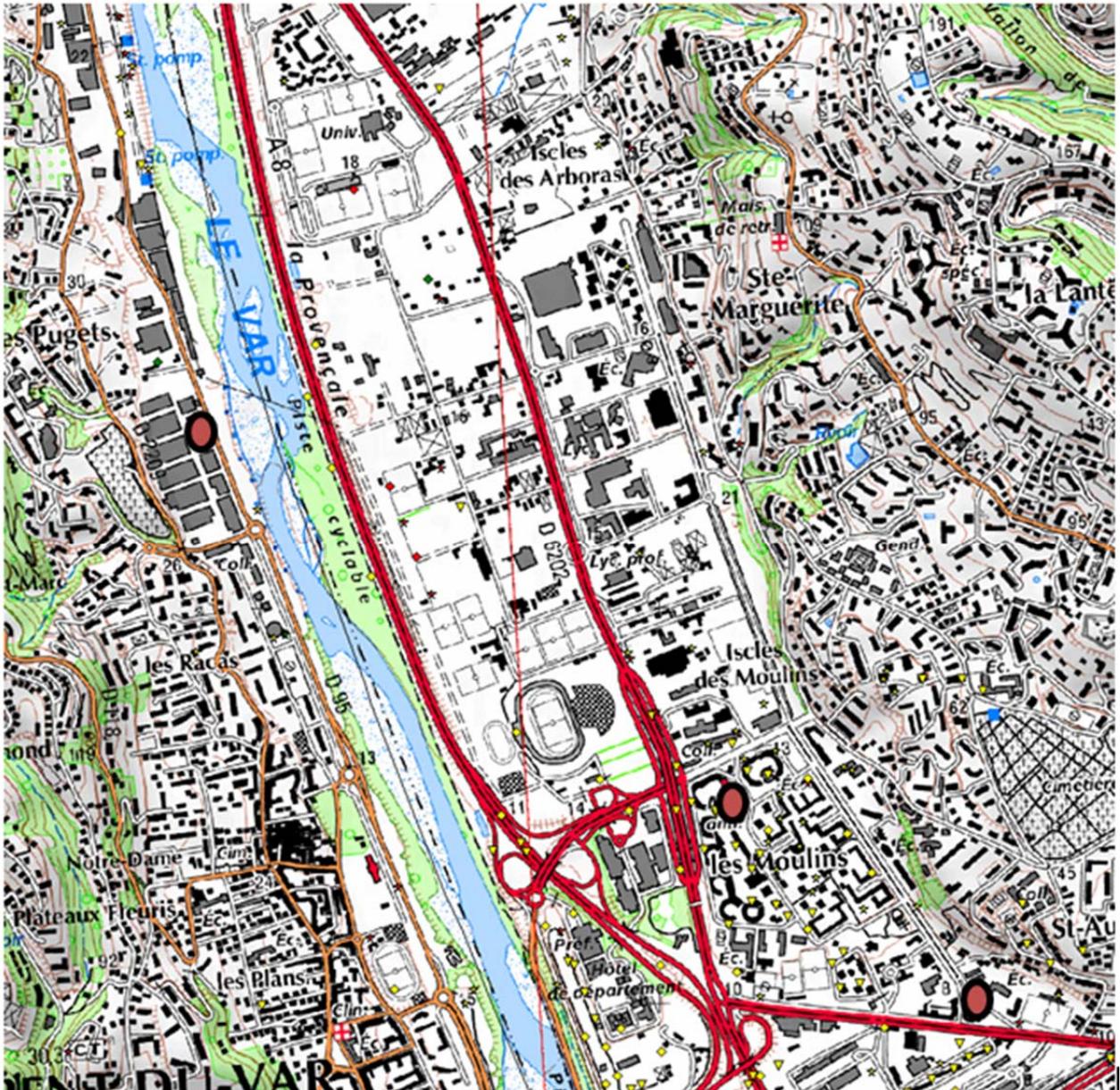
De	à	Type d'accessoire
14.90	15.00	Bouchon de fond

Epais.=Epaisseur (mm) Ecra.=Résist. à l'écrasement (bar) Slot (mm) Granul.=Granulométrie Min/Max (mm)

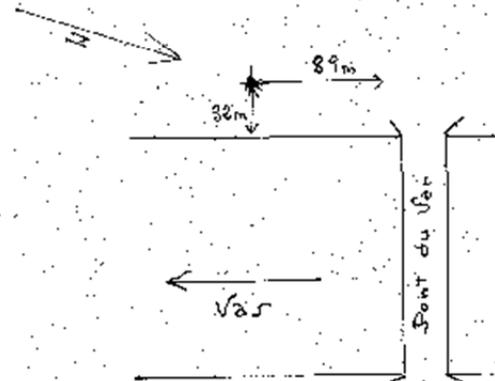
PAGE: 2

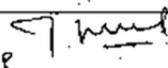
Annexe 6

Exemples forages BSS et leurs données utilisés pour la modélisation



DÉPARTEMENT : ALPES MARITIMES N° B.R.G.M. d'enregistrement : /

COMMUNE : 123 ST LAURENT DU VAR	CARTE GÉOL. AU 1/80 000
DÉSIGNATION : S 2 (Pr Léon Bertrand)	N° Feuille 225 NICE
OBJET : Recherche d'Eau	ATLAS AU 1/2 000
Date d'exécution : 1936	Feuille NICE
Profondeur finale : 28m 20	Indice de classement :
Nature : Sondage	N° 1/8 N° d'entrée aux archives
Mode de forage : trépan	1000 1 198
Maître de l'oeuvre : Pts & Chaussées.	Archivage D
Propriétaire en 19 :	Coordonnées Lambert : X = 990,85 Y = 165,46
Entrepreneur : S.I.F. BACHY	Zone III
Travaux conseillés ou suivis par : Pr Léon Bertrand	Cote du sol (Z) : EPD = +3,000 ENG = RNG =
Origine des documents :	Carte détaillée ou croquis côté :
Hauteur du tubage ou de la margelle dépassant le sol :	
Accessibilité :	
Mode d'équipement : Néant	
Observations :-	Niveau aquifère de 27m 50 à 28m 20
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET GÉOLOGIE :	
Alluvions du Var sur Pliocène.	
Échantillons :	 041790 10001X0198

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	FORAGE		TUBAGE			OBSERVATIONS				
	De	à	De	à	Ø		Épaisseur, nature			
			0 4,50	4m 50 ?	300m/m 202/ 217 165/ 150					
HYDROLOGIE	Repère altimétrique :		Cote du repère :							
	NIVEAU PIÉZOMÉTRIQUE									
	Date	Profondeur du forage	Profondeur du plan d'eau	Cote absolue du plan d'eau	T°	Observations :				
	1936		0m,75							
DÉBIT										
Date	Profondeur du forage	Durée	Débit pompage	m ³ /h Artésien	Cote absolue du plan d'eau	Cote absolue du niveau dynamique	Denivelation	T°	p18°	Observations
Archivage des documents originaux non reproduits :										
Dossier instruit par : SAVOYE le 8.2.68					Mis à jour par : le					
Nombre d'intercalaires : Dossier C jusqu'au					Contrôlé par :  le 10.06.68					

à NICE, le 2 avril 1936

Le VAR - fleuve

1000-1-118

Rive droite

SERVICE HYDRAULIQUE

Alimentation en eau des communes du département

Affaires générales & Diverses


 041791
 10001X0196

Recherches d'eau souterraines

Rapport du Subdivisionnaire.

Compte-rendu pour le Conseil Général.

Par délibération du 15 mars 1935, le Conseil Général des Alpes-Maritimes a voté un crédit de Frs 1 60.000 pour effectuer les premiers forages dans le VAR (rive droite) et le Loup, à l'effet de déterminer l'importance de leurs nappes souterraines.

Dans sa séance du 5 novembre 1935, cette assemblée a décidé de faire procéder pour l'instant aux recherches portant sur la nappe souterraine rive droite du Var, aux endroits suivants indiqués par M. le Professeur BERTRAND dans son rapport du 12 août 1935 :

- 1°) - à l'amont de la Commune de St-LAURENT-du-VAR derrière la digue Toosca ;
- 2°) - en aval de la Route Nationale n° 7, derrière la digue rive droite du Var.

Pour permettre de faire ces recherches, nous avons passé le 13 janvier dernier, un marché de gré à gré, avec la Société de sondages, injections et forages spécialisée pour les travaux de cette nature.

Cette commission a été approuvée par M. le Préfet en exécution de la délibération du Conseil Général du 5 novembre 1935.

Le premier sondage derrière la digue Toosca, a été attaqué le 21 février, il s'est poursuivi jusqu'au 23 mars, date à laquelle nous avons donné l'ordre d'arrêter ce chantier et de transporter le matériel au deuxième emplacement.

Nous donnons ci-dessous les renseignements recueillis au cours des opérations pour le forage, situé à l'amont

de la Commune de St-LASSENT du-VAR.



Ce forage a été fait au moyen d'un tube guide en tôle roulée de 300 m/m de diamètre sur 4 m.50 de profondeur, puis avec des tubes en acier étiré sans soudure de 202/217 et de 150/165.

Il a été découvert une nappe d'eau souterraine à la profondeur de 23 m. légèrement supérieure à celle de 26 m.37 existant sur la rive gauche du VAR. Cette nappe a une hauteur de 1 m.

Nous joignons au présent rapport une coupe des terrains rencontrés au cours des opérations et indiqués ci-après :

entre 0 et 24 m. : sable et galets contenant suivant les endroits une proportion plus forte de sable.

de 24 à 26 m. : argile gris avec galets, mélangés à raison de 50 % environ.

de 26 à 28 m. : sable et galets agglomérés.

de 28 à 29 m. : sable, galets et nappe d'eau.

Nous avons continué le forage jusqu'à la profondeur de 40 m. et le terrain entre 28 et 40 m. se compose de sable, de galets et d'argile.

Nous avons alors jugé inutile de descendre plus bas, et nous avons fait retirer les tubes inférieurs et conservé seulement 28 m.31 de tubes atteignant la nappe d'eau de façon à pouvoir faire de nouveaux essais de pompage, le cas échéant.

La nappe d'eau rencontrée remonte à 0 m.75 au-dessous du niveau de sol. au cours de ces opérations, nous avons fait des essais de pompage pendant 30 heures consécutives avec une pompe qui a débité en moyenne 5 l,5 secondes ; il a été constaté que l'abaissement de la nappe qui était au début de 4 m.50 s'est maintenu ensuite à 3.00 de moyenne.

Il est évident que ces travaux consistent surtout en une reconnaissance et qu'il n'est guère possible de pouvoir déterminer le débit maximum que l'on pourra atteindre avec les tubes de petites dimensions employés.

Pour cela, il serait nécessaire d'excaver des puits de 1 m.50 de diamètre comme l'a fait la compagnie des Eaux sur la rive gauche du VAR.

Les eaux provenant de la nappe rencontrée ont été analysées par le Laboratoire Municipal de Nice à la suite d'un prélèvement fait le 16 mars ; nous joignons au présent rapport le résultat de cette analyse.

Ce résultat paraît satisfaisant ; au point de vue bactériologique, il ne relève la présence d'aucun bacille coli, ni d'entérocoques ; d'après les conclusions, l'eau recueillie

est de qualité suffisante au double point de vue organique et bactériologique.

Nous proposons de porter les renseignements ci-dessus recueillis au cours du sondage de reconnaissance effectué sur la rive droite du Var, derrière la digue Tosca, à la connaissance du Conseil Général.

L'INGENIEUR des T.P.E.

signé : AUBERT.



041793
13001X0198

1969 / 29

A envoyer en 3 ex. à l'Ingénieur en Chef des Mines qui transmettra au Bureau de Recherches Géologiques et Minières 74, Rue de la Fédération, PARIS-15^e

Numéro d'inscription au registre de l'arrondissement minéralogique N° 7815

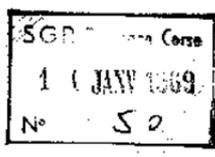
DECLARATION DE TRAVAUX COMPORTANT EXPLORATION DU SOUS-SOL

Article 131 du Titre VIII du Code Minier

MAITRE DEL'OUVRE } Nom et prénoms : M. le Maire de la Ville de Nice
Adresse : Mairie, rue de l'Hotel de Ville
Tel. 85.79.11

ENTREPRENEUR } Nom et prénoms : Etudes et Travaux de Fondations
Adresse : Place des Fontêtes
Aux en Provence
Tel. 27.91.97

EMPLACEMENT DES TRAVAUX
Département : Alpes Maritimes
Commune : NICE
Désignation : Colline de S'Augustin
Lotissement SAIDA. Studio de la
Coordonnées Lambert } x = Victorine
y =
altitude : z = + 30.00
Feuille :

CROQUIS DE SITUATION


OBJET DES RECHERCHES (1)
Substances : (eau, pétrole, etc...)
Reconnaissance de terrain pour voir souterrains
NATURE DES TRAVAUX (2)
Puits, sondage, forage, galerie, tranchée, etc...
Sforages
Profondeur prévue : ~ 30m
Date de début des travaux : 16-11-1968

Nom et adresse du géologue conseil chargé de suivre les travaux :
MECASOL 50 rue Gerard Paris 13^e
tel : 707-70-76

~~Transmis à M. le Directeur du Bureau~~
~~L'Administration à reproduire les documents ou renseignements qui seront recueillis dans ces travaux (3)~~

Marseille, le 19 DEC 1969
L'Ingénieur en Chef des Mines, A NICE

Signature : LE DIRECTEUR GÉNÉRAL des Travaux et Services Techniques

(1) Personne pour le compte de laquelle le travail est exécuté.
(2) Biffer les mentions inutiles.
(3) Eventuellement biffer cette mention ou indiquer la restriction à y apporter, notamment :
- date à partir de laquelle l'autorisation sera valable.
- indication de ceux des renseignements qui doivent rester confidentiels.



DOSSIER 3.163_685.

SONDAGE N° S. 2

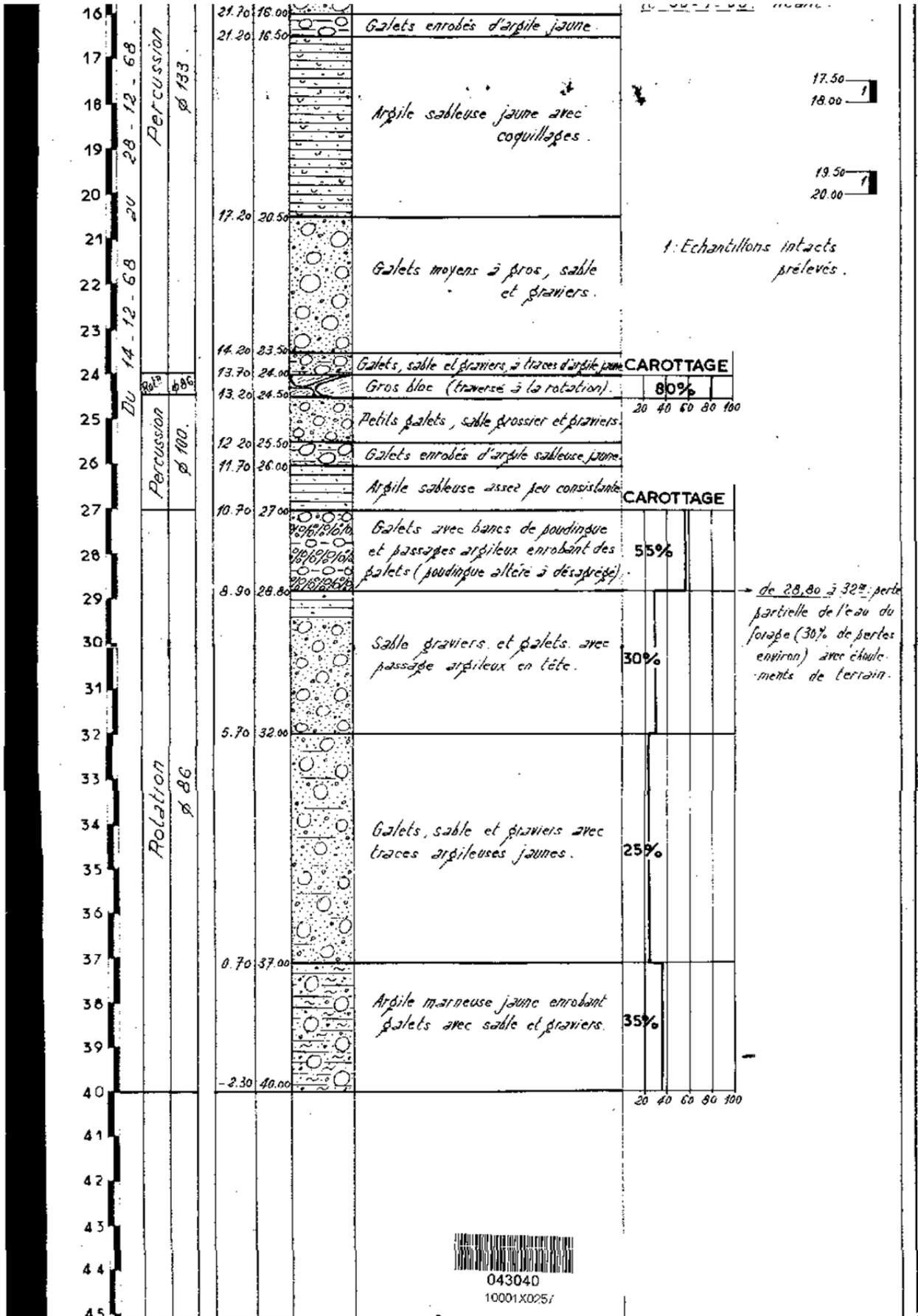
1000 - 10 - 257

VILLE DE NICE
AUTOROUTE URBAINE SUD
SECTION SAINT-AUGUSTIN - ROUTE DE GRENOBLE

Sondage de Reconnaissance

Etudes et Travaux de Fondations ————— Aix-en-Provence.

Rens. Techn.		Renseignements Géologiques				
Dates	Méthode	Cotes	Profondeur	Schéma	Nature des Terrains traversés	Observations
	Percussion	37.70	0.00	RRR	Remblai poudronneux à blocs calcaires	Tubage ϕ 165 de 0 à 2.4 ^m . Télescopage ϕ 108 de 0 à 2.7 ^m .
1		36.90	0.80		Argile sableuse brune	1.50 — 1
2		36.10	1.60		Argile sableuse brune et rougeâtre.	2.00 — 1
3		35.20	2.50		Argile sableuse jaune.	3.50 — 1
4		33.20	4.50		Argile rouge consistante	4.00 — 1
5						CAROTTAGE
6	Rotation et Percussion					6.00 — 1
7	ϕ 133					6.50 — 1
8		29.70	8.00		Argile sableuse rouge.	80% 8.00 — 1
9		28.20	9.50		Blocs préseux et galets.	75% 8.50 — 1
10		27.70	10.00		Galets moyens à gros, sable et graviers avec traces de cimentation (sorte de pouddingue désagrégé).	60% 9.50 — 1
11		25.90	11.80		Galets moyens à gros, sable et graviers, avec traces d'argile jaune.	20 40 60 80 100 10.00 — 1
12						<i>Nota: mise en place d'un tube piézométrique de 18^m de longueur, crépiné sur 12^m (de 6 à 18^m); un bouchon étanche d'argile ayant été descendu au préalable de 18 à 40^m de profondeur.</i>
13		21.70	16.00		Galets érodés d'argile jaune.	<i>Niveau d'eau dans le piézomètre (c. 30-1-69): néant.</i>
14		21.20	16.50			



FORAGE : 20 1000-1-450 Dossier : 4 028

NATURE DU TERRAIN	ALITUDE	PROFONDUR	MODULE Γ en kg/cm ²	PRESSION LIMITE DE RUPTURE en kg/cm ²				PRESSION DE FLUAGE en kg/cm ²			
				0	10	20	30	0	5	10	15
	965	0,00									
Terre végétale bruneuse	905	0,60									
<u>EAU</u>	6,65	3,00									
Altitudes du Var (Sable, graviers ronds et galets)											
	-2,05	11,70									
Argile vaseuse bleu-noir	3,35	13,00									
Arrêt de forage											



TABLEAU DES RELEVES PIEZOMETRIQUES (SOL - ESSAIS)

N°	S. 1		S. 2		S. 3		S. 4		S. 5	
	+ 8.82		+ 9.44		+ 11.70		+ 13.45		+ 8.75	
COTE N.G.F										
Date du relevé	Cote N.G.F.	Profondeur	Cote N.G.F.	Profondeur	Cote N.G.F.	Profondeur	Cote N.G.F.	Profondeur	Cote N.G.F.	Profondeur
27.2.70	+ 5.15	- 3.57	+ 6.35	- 3.19	+ 6.85	- 4.85	+ 7.30	- 6.15	+ 5.10	- 3.65
12.3.70	+ 5.25	- 3.57	+ 6.42	- 3.02	+ 6.80	- 4.90	+ 7.10	- 6.35	+ 4.85	- 3.90
26.3.70	+ 5.20	- 3.62	+ 6.30	- 3.34	+ 6.90	- 4.80	+ 7.35	- 6.10	+ 5.15	- 3.60
8.4.70	+ 5.07	- 3.75	+ 6.19	- 3.25	+ 6.72	- 4.90	+ 7.14	- 6.31	+ 4.93	- 3.82
10.5.70	+ 5.32	- 3.50	+ 6.48	- 2.86	+ 6.97	- 4.73	+ 7.38	- 6.07	+ 5.27	- 3.48
30.5.70	+ 5.15	- 3.67	+ 6.40	- 3.04	+ 6.85	- 4.85	+ 7.20	- 6.25	+ 5.15	- 3.60
29.6.70	+ 5.27	- 3.55	Relevé impossible par manque de profondeur		+ 6.90	- 4.80	+ 7.35	- 6.10	+ 5.40	- 3.35

- 18 bis - DOSSIER No 4 028



SD. DE. SOL dossier: 4028 RESULTATS DES ANALYSES EN LABORATOIRE

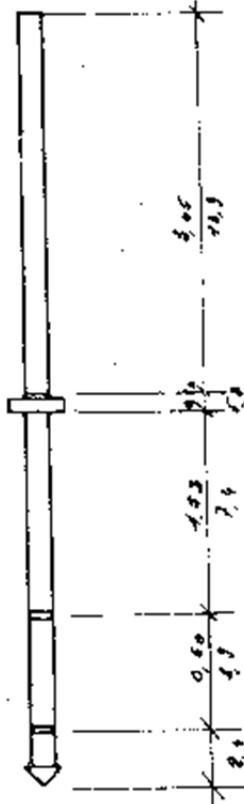
N° de échantillon	N° de sondage profondeur de l'échantillon	NATURE DE L'ECHANTILLON	Teneur en eau	Densité humide	Densité sèche	LIMITE D'ATTERBERG			CISAILLEMENT		Résistance à la compression simple	OEDOMETRE			
						L	L _P	P	φ	c Kg/cm ²		E	F	E	E
1	C.1 12,40 à 12,30	Argile noire avec petit lit de sable et de graviers	26,7%	1,820	1,515	33,5	20,5	13	0	0,5		27	47	85	200
2	C.1 13,80 à 14,00	Argile noire plastique vaseuse	32%	1,885	1,425	30,5	18,3	12,2	0	0,3					
	C.2 14,60 à 15,00	Sable gris argileux avec gros galets	19,3%	2,065	1,725					INEXPLOITABLE					
	C.2 14,40 à 14,30	Sable fin gris à graviers blancs	13%	1,765	1,565				29°	0,55					
3	C.3 15,30 à 15,20	Galets de gros et petites dimensions et argile noire et de sable fin gris	20,9%	2,030	1,680	27	24	3		INEXPLOITABLE					
4	C.3 16,00 à 16,50	Argile noire avec quelques galets	26,3%	1,330	1,565	31	23	8	0	0,5					
5	C.3 24,20 à 24,60	Argile noire	34,4%	1,880	1,400	30	23	7	0	0,65					
6	C.3 25,00 à 25,50	Argile noire	23,9%	1,945	1,510	26	18,5	6,5	0	0,45					
7	C.4 16,50 à 17,00	Argile noire avec trace de fibres de bois	37,2%	1,850	1,350	37	26	8	0	0,55		35	35	55	97
	C.4 17,20 à 17,70	Argile noire	16,2%	2,030	1,800				0	0,65					
	i.4 18,00 à 18,50	Sable fin gris mouillé	23,7%	1,945	1,540				36°	0,40					
	C.5 18,20 à 18,70	Sable gris et quelques graviers	22,3%	1,930	1,570				40°	0,30					
8	C.6 18,50 à 19,20	Argile grise	27,8%	1,330	1,415	27	22	5	0	0,5					
9	C.6 18,50 à 19,30	Argile grise très plastique fluide	33,4%	1,865	1,390	32,7	24,7	11		INEXPLOITABLE					
	C.6 14,70 à 15,20	Sable fin légèrement argileux	23,7%	1,850	1,480				41°	0,15					





PENETROMETRE DYNAMIQUE

CARACTERISTIQUES :



TIGES JOY A \varnothing 42,25 mm L=1,52 m
 POINTE BULBE \varnothing 60 $s=28,3 \text{ cm}^2$
 DE LA POINTE 45°

POIDS DU MOUTON: M = 61
 HAUTEUR DE CHUTE 0,50

L'ensemble permanent comprend de haut en bas:
 une tige guide de 3,00 m poids 13,9 Kg
 une enclume 5,2 "
 une tige de 0,60 m 3,9 "
 une pointe bulbe 2,4 "

soit l'ensemble 25,4 Kg

nombre de tige	poids P	P x M
1	32,8 kg	93,8 kg
2	40,2 "	101,2 "
3	47,6 "	108,6 "
4	55,0 "	116,0 "
5	62,4 "	123,4 "
6	69,8 "	130,8 "
7	77,2 "	138,2 "
8	84,6 "	145,6 "
9	92,0 "	153,0 "
10	99,4 "	160,4 "
11	106,8 "	167,8 "
12	114,2 "	175,2 "
13	121,6 "	182,6 "
14	129,0 "	190,0 "
15	136,4 "	197,4 "

FORMULE DES HOLLANDAIS

$$\frac{M^2 \times H}{e \times s (P, M)} \times \frac{1}{5} \text{ coefficient de sécurité}$$

$$= \frac{61 \times 61 \times 50}{e \times 28,3 \times (P, M)} \times \frac{1}{6}$$

$$= \frac{5560}{e \times (P, M)} \times \frac{1}{6}$$

N.B

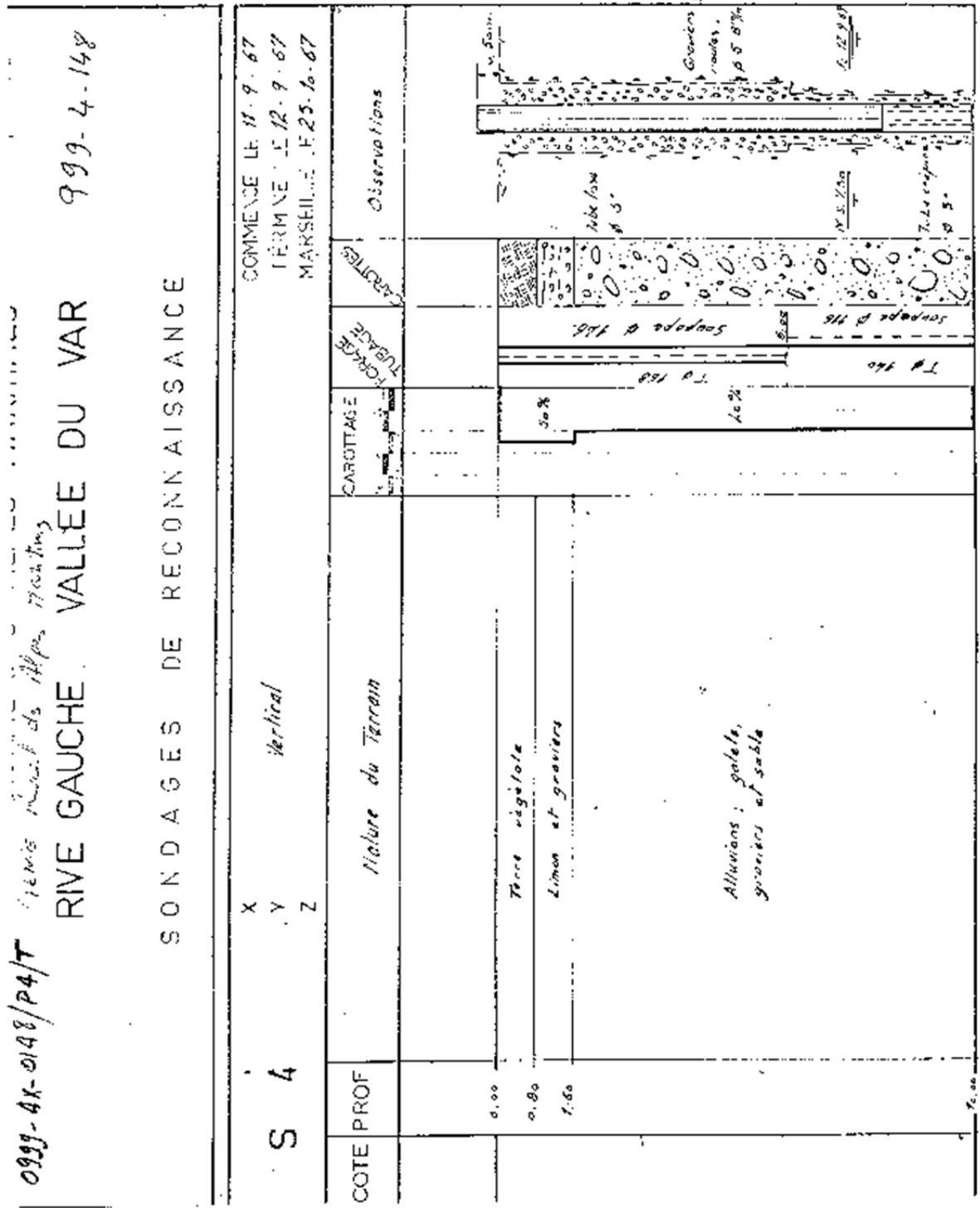
La tige 0,60m sert à un premier battage afin de donner un bon départ avant le battage proprement dit

L'enfoncement initial de 0,50m correspond donc à un avant trou mais pendant son exécution les valeurs de battage sont notées

*Déclaration au titre de la Loi sur l'Eau
Rapport de fin de travaux - réalisation d'un piézomètre
(commune de Nice)*

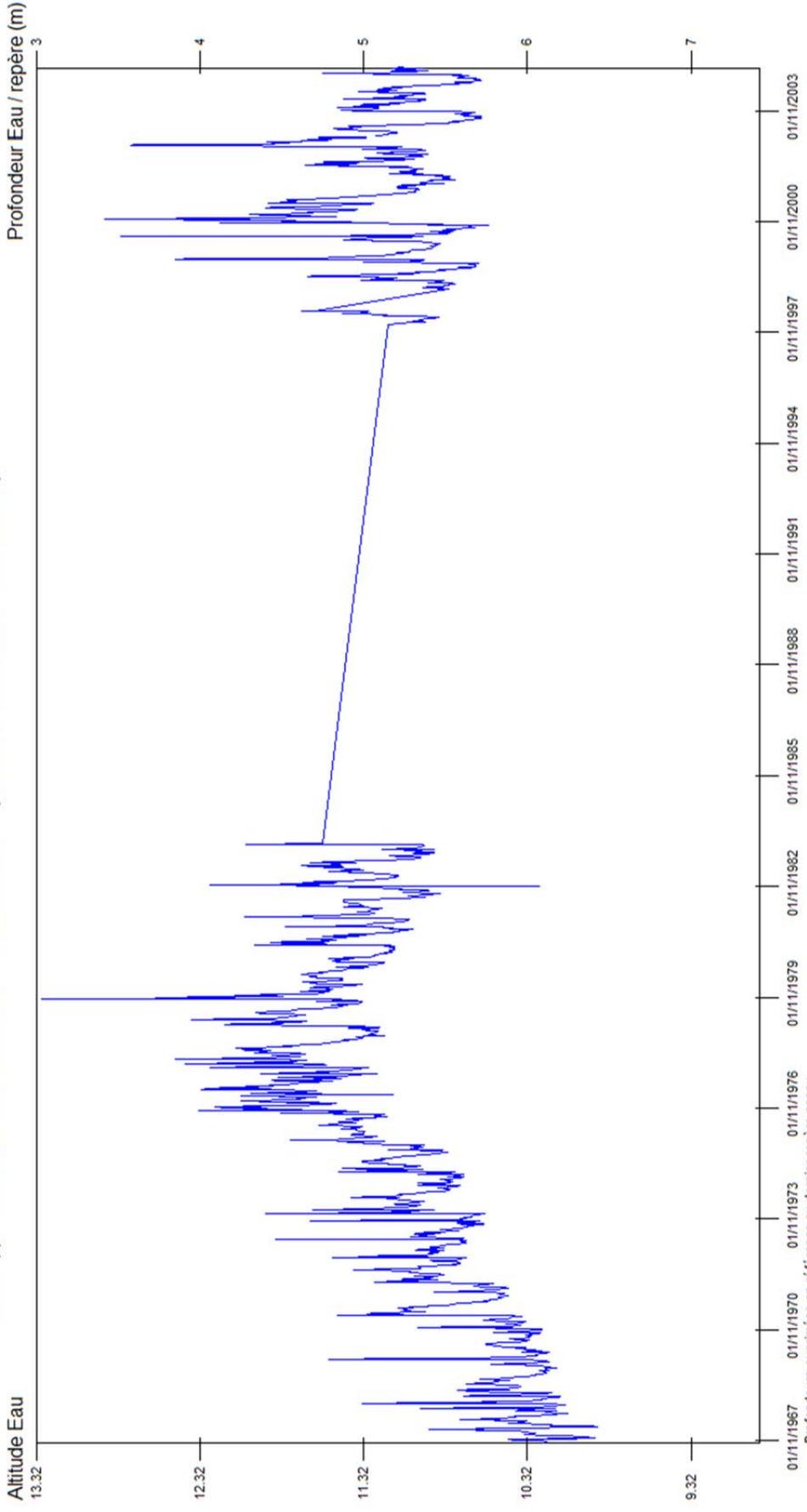
Tableau récapitulatif des principales caractéristiques du piézomètre

Designation	P4 1016
Code station réseau piézométrique PACA	330.001
Code BSS	09994X0524/P4b
Lieu dit	Isclès des Arboras
Commune	Nice
Département	Alpes Maritimes
Coordonnées Lambert:	Lambert 3 (m)
X	991347
Y	3 166 155
Z	17,00
Profondeur totale	15 m
Nature de l'ouvrage	piézomètre
Diamètre tubage intérieur	132/140 mm
Côte crépine	de -11,4 m à -15 m/sol
Aquifère	Nappe alluviale du Var
Dates réalisation	19/07 au 21/07/2005
Entreprise de forage	A. MACCARIO
Date équipement de l'enregistreur	03/08/2005
Marque du matériel	OTT France
Type appareil	Thalimèdes
Télétransmission	GSM



Index BRGM: 09994X0148
Désignation: P4
Commune: NICE
 Lieu dit: ST ISIDORE - BASSE VALLEE DU VAR .P4
 Département: ALPES-MARITIMES (06)
 Région: SGR/PAC

Réseau: RB
Prof. Ouvrage: 10
 Côte du Repère: 16.32
 Côte du Sol: 16.32 (Précision côte:RNG)
 Code Nappe: ANMBN_{1,2,3,4}+L
 Système Aquifère: 330
 Nom Nappe: ALLUVIONS DE LA BASSE VALLEE DU VAR (NAPPE PHREATIQUE DU BAS-VAR)



Piézométrie du 15/10/1967 au 31/12/2004 tracée le 21/01/2014
 Profondeurs exprimées en référence au dernier repère connu.

Annexe 7

Autorisation de rejet dans le réseau des eaux pluviales



Mise à jour 04/03/2013 – version 2



DIRECTION DES GÉORESSOURCES
Arrivé le : 316 123
A suivre par : N. ANALY
Copie p.l. :
Class. : N° 45

BRGM
3, avenue Claude Guillemin
BP 36009
45060 Orléans cedex 2 - France

A l'attention de Monsieur Mohammed ANALY

Nice, le 28 MAI 2013

Monsieur,

Suite à votre demande d'autorisation de déversement d'eaux de pompage de la nappe au réseau public d'eaux pluviales en date du 14 mai 2013, veuillez trouver ci-joint l'autorisation de rejet.

Elle est valable pendant 3 jours à compter du 28 mai 2013.

La direction de l'assainissement, de l'hydraulique et du pluvial reste à votre entière disposition pour tous renseignements complémentaires que vous jugeriez nécessaires.

Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de mes salutations distinguées.

PO
Pour le président, par délégation de signature
Le directeur de l'assainissement,
de l'hydraulique et du pluvial

Emmanuel ROMIEU

N/Réf.: CC/FG/13L0504
Direction de l'assainissement, de l'hydraulique et du pluvial
Service Etudes Générales – Gestions des rejets industriels
Métropole Nice Côte d'Azur – 06364 Nice cedex 4
Téléphone 04-89-98-18-94 - Télécopie 04-89-98-18-50
christelle.coll@nicedazur.org

 <p>MÉTROPOLE NICE CÔTE D'AZUR</p> <p>Pôle développement durable et environnement Direction de l'assainissement, de l'hydraulique et du pluvial 06364 NICE Cedex 4</p>	<p>COMMUNE DE NICE</p>
	<p>AUTORISATION PROVISOIRE DE BRANCHEMENT ET DE REJET D'EAUX DE POMPAGE DE NAPPES PHREATIQUES AU RESEAU PUBLIC D'EAUX PLUVIALES</p>
	<p><u>Demande du</u> : 14 mai 2013</p> <p><u>Permissionnaire</u> : Mohammed ANALY, BRGM</p>

Le Président de la métropole NICE COTE d'AZUR soussigné,

Vu la demande en date du 14 mai 2013 par laquelle Monsieur ANALY Mohammed, représentant du BRGM demande l'autorisation :

- d'établir un branchement au réseau pluvial entre son chantier Nice Méridia et le réseau public d'eaux pluviales de Nice
- de rejet des eaux de pompage de nappe phréatique pour le projet suivant : **essai de pompage pour la reconnaissance hydrogéologique de la nappe des alluvions dans le cadre du programme de recherche et développement d'évaluation du potentiel géothermique du secteur de Nice Méridia, situé à l'adresse suivante : Boulevard Paul Montel, 06200 Nice,**

Vu le code de la santé publique,

Vu le règlement d'assainissement métropolitain de NICE CÔTE D'AZUR adopté par délibération du 21 septembre 2012, et notamment son article 3.04 « Cas des eaux souterraines » qui stipule :

« En l'absence d'autorisation, il est interdit de rejeter, dans le réseau public de collecte d'eaux usées des eaux prélevées dans une nappe phréatique soit :

- Des eaux de source,
- Des eaux d'exhaures,
- Des eaux souterraines,
- Des eaux de drainage notamment dans le cas de rabattement de nappe ou d'utilisation de pompa à chaleur (utilisation d'installations des climatisations ou de traitement thermique).

Après utilisation, les eaux issues de pompage destinées à l'eau potable, déclarées en mairie comme telles, sont admises dans le réseau d'eaux usées.

En cas de pompage, les eaux souterraines pourront être rejetées prioritairement dans le réseau d'eaux pluviales, après autorisation écrite accordées par Nice Côte d'Azur (chapitre 3 du règlement d'assainissement métropolitain). »

AUTORISE, SOUS RESERVE DES PRESCRIPTIONS CI-APRES ET DES CONDITIONS FIXEES PAR LA REGLEMENTATION SUSVISEE, LE PETITIONNAIRE A :

- RACCORDER LES EAUX DE NAPPE PHREATIQUE DE SON CHANTIER AU COLLECTEUR PUBLIC D'EAUX PLUVIALES
- REJETER PROVISOIREMENT LES EAUX DE POMPAGE DE NAPPE PHREATIQUE AUX RESEAUX PUBLICS D'EAUX PLUVIALES.

ARTICLE 1^{ER} - UTILISATION DU BRANCHEMENT

Le branchement raccordé au réseau d'eaux pluviales est, dans le cadre de la présente autorisation, destiné uniquement à l'évacuation des eaux de pompage de la nappe (les eaux usées, quelque soit leur origine, sont exclues). Les eaux de nappe devront être conformes aux dispositions du règlement d'assainissement collectif susvisé. Les caractéristiques techniques à respecter y sont détaillées.

ARTICLE 2 - ENTRETIEN DES BRANCHEMENTS DE RESEAU PLUVIAL ET DE LEURS ACCESSOIRES

L'entretien et tous les travaux afférents aux branchements dans toute l'emprise publique jusqu'au raccordement au réseau public d'eaux pluviales sont à la charge du service gestionnaire du réseau public.

Toutefois en cas de dégâts résultant d'une utilisation non conforme du branchement, le service gestionnaire pourra

recouvrer auprès du permissionnaire les frais afférents à la remise en état du branchement.

ARTICLE 3 - RESERVE DES DROITS DES TIERS

Les autorisations de branchement aux réseaux d'eaux pluviales sont données sous réserve des droits des tiers.

ARTICLE 4 - SUPPRESSION OU MODIFICATION DES AUTORISATIONS

Les autorisations de branchement aux réseaux d'eaux pluviales sont de pure tolérance ; elles peuvent toujours être modifiées ou révoquées en tout ou partie, lorsque l'administration le juge utile à l'intérêt public et le permissionnaire est tenu de se conformer à ce qui est prescrit à ce sujet sans qu'il puisse se prévaloir de l'autorisation précédemment accordée pour réclamer une indemnité quelconque.

<p>ARTICLE 5 - EN CAS DE VENTE</p> <p>En cas de vente de la propriété, le vendeur devra communiquer à l'acheteur, l'ensemble des prescriptions techniques liées à la présente autorisation de branchement.</p>	<p>7-2 PRESCRIPTIONS PARTICULIERES</p> <p>Les prescriptions particulières auxquelles doivent répondre les eaux de pompage de nappe, dont le rejet est autorisé par le présent arrêté, sont définies en annexe 2.</p>
<p>ARTICLE 6 - NATURE DU RESEAU RECEPTEUR</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Nature</u> : réseau d'eaux pluviales • <u>Situation géographique</u> : Boulevard Paul Montel, 06200 Nice • <u>Dimensions</u> : 1600 x 1600 mm 	<p>ARTICLE 8 : CONDITIONS DE SURVEILLANCE DU DÉVERSEMENT</p> <p>Le pétitionnaire est responsable, à ses frais, de la surveillance et de la conformité de ses rejets au regard des prescriptions du présent arrêté d'autorisation de déversement et de la réglementation applicable.</p> <p>Le pétitionnaire met en place, sur les rejets d'eaux de nappe, un programme de mesures dont la nature et la fréquence sont définis à l'annexe 2.</p> <p>Tous les prélèvements et analyses sont effectués selon les méthodes normalisées en vigueur. L'établissement tient à disposition de Nice Côte d'Azur tous les éléments permettant de justifier du respect de ces prescriptions (nom du ou des laboratoires en charge des analyses, attestations et certification,...).</p> <p>Le pétitionnaire fournit, par mail, les résultats d'analyses aux adresses suivantes :</p> <p style="text-align: center;">rejets.industriels@nicecotedazur.org</p>
<p>ARTICLE 7 - CARACTERISTIQUES DU REJET</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Date et durée des rejets</u> : entre le 28 mai 2013 et le 31 mai 2013 – 72h de rejet des eaux de pompage • <u>Débit maximum de rejet</u> : 150 m³/h • <u>Rejet en continu 24h/24</u> : oui <input checked="" type="checkbox"/> - non <input type="checkbox"/> 	
<p>7-1 PRESCRIPTIONS GENERALES</p> <p>Les eaux de pompage de nappe rejetées devront répondre aux prescriptions du règlement d'assainissement métropolitain de Nice Côte d'Azur et doivent :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Etre débarrassées des matières ou des substances susceptibles : <ul style="list-style-type: none"> ✓ De porter atteinte à la santé du personnel d'exploitation des ouvrages d'évacuation et de traitement de Nice Côte d'Azur, ✓ D'endommager le système de collecte et de traitement de Nice Côte d'Azur ainsi que leurs équipements connexes, ✓ D'entraver le fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées et le traitement des boues, ✓ D'être à l'origine de dommages à la flore ou à la faune aquatique, d'avoir des effets nuisibles sur la santé ou de remettre en cause les différents usages existants (prélèvement pour l'adduction en eau potable, zones de baignades,...) à l'aval des points de déversement des collecteurs publics. ✓ D'empêcher l'évacuation des boues produites par le système d'assainissement en toute sécurité d'une manière acceptable pour l'environnement. ➢ Etre exempts (cf. annexe 1) des : <ul style="list-style-type: none"> ✓ 13 substances dangereuses prioritaires de la directive européenne cadre sur l'eau (DCE) 2000/60/CE du 23 octobre 2000, modifiée par la directive 2008/105/CE du 16 décembre 2008, ainsi que des substances de la liste I de la directive 76/464/CEE du 4 mai 1976. ✓ 20 substances prioritaires de la DCE et substances visées par le décret n° 2005-378 du 20 avril 2005 et substances figurant à l'annexe V de l'arrêté du 22 juin 2007, dans des concentrations susceptibles de conduire à une concentration dans les boues issues du traitement ou dans le milieu récepteur supérieure à celles qui sont fixées réglementairement. ➢ Le rejet de substances radioactives ne pourra être admis qu'avec l'accord de l'autorité sanitaire et uniquement si la concentration en radioéléments est conforme à l'arrêté du 30 octobre 1981 et à la circulaire n°2001-323 du 9 juillet 2001. ➢ La laitance des bétons et des ciments utilisés doit être évacuée, le rejet aux réseaux d'assainissement et pluvial est strictement interdit. 	<p>Article 9 : SIGNALEMENT DE POLLUTION ACCIDENTELLE</p> <p>Tout incident générateur de pollution accidentelle doit être immédiatement signalé à la direction de l'assainissement, de l'hydraulique et du pluvial :</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> <p>Tous les jours ouvrables : Tel : 04 89 98 18 00</p> <p>Les samedis, dimanches, jours fériés et nuits Tel : 06 78 95 87 29</p> </div> <p>Article 10 : DOMMAGES AU RESEAU PUBLIC IMPUTABLES AU PÉTITIONNAIRE</p> <p>Le pétitionnaire sera passible de sanctions pénales en cas de constatation de dégradation du réseau public en aval du rejet due au non respect du présent arrêté.</p> <p>Les frais de constatation des dégâts (sondage visuel des réseaux, prélèvements, analyses, etc.) et de réparation de ceux-ci seront entièrement à la charge du bénéficiaire du présent arrêté.</p> <p>ARTICLE 11 – OBLIGATIONS DU PETITIONNAIRE</p> <p>Le pétitionnaire devra justifier qu'il détient les autorisations ou déclarations nécessaires, notamment au titre de la loi sur l'eau, pour procéder au pompage objet de la présente demande mais également, pour rejeter les eaux de pompage dans le milieu naturel (vallon, fleuve, milieu marin, etc.) le cas échéant.</p> <p>Le pétitionnaire devra obligatoirement faire réaliser, à ses frais, un état des lieux du réseau avant rejet (inspection télévisée des canalisations ou visite d'ouvrages visitables), par l'exploitant du réseau concerné.</p> <p>Pendant la période de rejet, le service gestionnaire du réseau pourra demander au pétitionnaire le curage et le nettoyage à ses frais du réseau, autant de fois que nécessaire, en cas de dépôts constatés (sable, fines, etc.)</p> <p>De même, un état des lieux du réseau à la fin du rejet devra être réalisé, toujours aux frais du pétitionnaire, par l'exploitant du réseau concerné. Les travaux de remises en état ou de réhabilitation qui seraient constatés lui seront alors automatiquement imputés.</p>

A la fin des travaux, le branchement temporaire au réseau d'assainissement d'eaux usées ou d'eaux pluviales devra être mis hors service et être convenablement colmaté.

ARTICLE 12 - RESERVE DES DROITS DES TIERS

Les autorisations de rejet aux réseaux d'eaux pluviales des eaux de pompage des nappes phréatiques et des sources sont données sous réserve des droits des tiers. Elles supposent notamment que le pétitionnaire est en règle avec les déclarations ou autorisations de pompage à obtenir auprès de la police de l'eau ou du service compétent désigné au titre de la loi sur l'eau.

ARTICLE 13 - SUPPRESSION OU MODIFICATION DES AUTORISATIONS

Les autorisations de rejet aux réseaux d'eaux pluviales des eaux de pompage des nappes phréatiques et des sources sont de pure tolérance et sont délivrées à titre précaire et révocable.

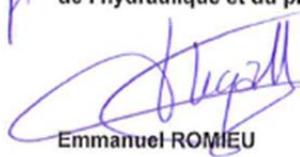
Elles peuvent toujours être modifiées ou révoquées en tout ou partie, lorsque l'administration le juge utile à l'intérêt public, notamment pour permettre des opérations de maintenance, d'entretien et de réhabilitation des ouvrages d'eaux pluviales, lorsque le dimensionnement du réseau est jugé insuffisant ou encore par temps de pluie ou en prévision d'épisodes pluvieux.

Le service gestionnaire se laisse donc la possibilité de demander à tout instant l'arrêt des pompages, notamment pour des raisons d'exploitation du réseau.

Le permissionnaire est tenu de se conformer à ce qui est prescrit à ce sujet sans qu'il puisse se prévaloir de l'autorisation précédemment accordée pour réclamer une indemnité quelconque.

Fait à Nice, le **28 MAI 2013**

Pour le président et par délégation de signature,
le directeur de l'assainissement,
de l'hydraulique et du pluvial

p10

Emmanuel ROMIEU

ANNEXE 1 : Liste des substances prioritaires dans le domaine de l'eau

13 substances dangereuses prioritaires de la DCE :

Anthracène
 Cadmium et ses composés
 Chloroalcanes, C10-C13
 Composés du tributylétain
 Diphényléther bromé
 Endosulfan
 Hexachlorobenzène
 Hexachlorobutadiène
 Hexachlorocyclohexane
 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (benzo(a)pyrène, benzo(b)fluoranthène, benzo(g,h,i)perylène, benzo(k)fluoranthène, indeno(1,2,3-cd)pyrène)
 Mercure et ses composés
 Nonylphénols
 Pentachlorobenzène

8 substances de la liste I de la directive 76/464/CEE non visées par la DCE :

Aldrine
 DDT (y compris les métabolites DDD et DDE)
 Dieldrine
 Endrine
 Isodrine
 Tétrachloroéthylène
 Tétrachlorure de Carbone
 Trichloroéthylène

20 substances prioritaires de la DCE :

Alachlore
 Atrazine
 Benzène
 Chlorfenvinphos
 Chlorpyrifos - Ethylchlorpyrifos
 1,2 Dichloroéthane
 Dichlorométhane
 Di(2-éthylhexyl)phthalate (DEHP)
 Diuron
 Fluoranthène
 Isoproturon
 Naphthalène
 Nickel et ses composés
 Octylphénols
 Pentachlorophénol
 Plomb et ses composés
 Simazine
 Trichlorobenzène
 Trichlorométhane (chloroforme)
 Trifluraline

ANNEXE 2 : PRESCRIPTIONS TECHNIQUES PARTICULIERES

Les eaux de nappe rejetées dans le **réseau d'eaux pluviales** doivent répondre aux prescriptions suivantes :

A) Débits de référence :

Débit moyen journalier : 3 600 m³/jour

Débit maximum de rejet total par temps sec : 150 m³/h

LES REJETS PAR TEMPS DE PLUIE SERONT STRICTEMENT INTERDITS.

B) Température et pH autorisés

La température devra être inférieure ou égale à 30°C.

Le pH devra être compris entre 5,5 et 8,5.

C) Concentrations et flux maximum autorisés :

Les rejets d'eaux de nappe doivent respecter les concentrations et flux maximum suivants :

Paramètre	Concentration maximale autorisée en mg/l	Flux maximal autorisé en g/jour
Demande chimique en oxygène (DCO)	125	450 000
Matières en suspension (MES)	35	126 000
Demande biologique en oxygène à 5 jours (DBO5)	25	90 000
Azote global (NGL)	10	36 000
Phosphore total (Pt)	1	3 600
Hydrocarbures totaux (Ht)	5	18 000

D) Installations de prétraitement / récupération et entretien

Le pétitionnaire a l'obligation de maintenir en permanence ses installations de prétraitement/récupération en bon état de fonctionnement, qu'elles soient existantes ou à créer.

Le pétitionnaire doit, par ailleurs, s'assurer que les déchets récupérés par les dites installations sont éliminés dans les conditions réglementaires en vigueur.

Avant rejet, les eaux de pompage de nappe doivent faire l'objet, si nécessaire, du prétraitement suivant :

- Filtration sur charbon actif
- Filtration sur colonne résine filtrante
- Décantation en bac

Ces ouvrages devront être entretenus régulièrement par une entreprise spécialisée.

E) Collecte et élimination des déchets liquides et/ou des eaux usées non domestiques non rejetées au réseau public d'assainissement

Le pétitionnaire générant des déchets liquides qui ne sont pas rejetés dans le réseau public d'assainissement doit pouvoir justifier, au service assainissement, de la collecte et de l'élimination de ces effluents par un prestataire agréé (bordereau de suivi des déchets, bon d'enlèvement).

F) Surveillance des rejets

1) Auto-surveillance

L'Etablissement devra mettre en place un dispositif de comptage (débitmètre) de ses eaux rejetées dans le réseau public.

Toutes les analyses sont effectuées selon les méthodes normalisées en vigueur.

Les mesures de concentration seront effectuées sur un échantillon ponctuel pris en sortie du dispositif de prétraitement, avant rejet au réseau d'eaux pluviales.

Le pétitionnaire doit tenir à disposition de la direction de l'assainissement les informations ou les certificats correspondants, attestant de l'entretien régulier de ses installations de prétraitement et/ou récupération de ses déchets.

2) Contrôles par Nice Côte d'Azur

Des prélèvements et des contrôles pourront être effectués à tout moment par Nice Côte d'Azur à la sortie du dispositif de prétraitement, afin de vérifier si les eaux de pompage de nappe déversées dans le réseau public d'eaux pluviales sont en permanence conformes aux prescriptions.

Le pétitionnaire s'engage à ce que le regard de visite soit maintenu en permanence facilement accessible aux agents chargés de réaliser les contrôles inopinés.

Les frais de l'opération de contrôle concernée (frais d'analyses, frais de déplacement des agents,...) seront à la charge du pétitionnaire.

ANNEXE 3 : PLAN DE SITUATION DU POINT DE REJET



Point de rejet des eaux de
pompage au réseau public
d'eaux pluviales



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain - 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