

 <p>anteagroup</p>	<p>N° de l'affaire : PACP190050</p> <p>Projet de géothermie du nouveau MIN de la Gaude au lieu-dit « La Baronne » 06 - Evaluation des impacts de l'installation géothermique envisagée au MIN sur les eaux souterraines et superficielles</p>
<p>Objet : Annexe 3 - Evaluation des impacts de l'installation géothermique envisagée au MIN avec les installations d'eau potable et géothermiques existantes voisines – Reprise du modèle suite à l'avis de l'ARS du 18/10/2019</p>	

1. Impact sur les eaux souterraines et superficielles

Impact en phase chantier

La méthode de foration choisie étant la méthode ODEX, aucun impact qualitatif n'aura lieu sur la nappe (pas de boue de forage).

La prise en compte des prescriptions formulées dans la norme NF X 10-999 doit permettre de réduire les potentiels impacts sur le milieu souterrain :

- chantier clôturé et balisé avec signalétique adaptée ;
- mise en place d'un dispositif de stockage, de protection et de collecte des éventuelles fuites d'hydrocarbures et autres produits potentiellement polluants ;
- mise en place de moyens d'évacuation des déblais et des eaux issues du forage ;
- utilisation de matériel conforme CE, entretenu et en bon état de propreté.

Suite aux travaux de forages, des pompages de développement et des pompages d'essais seront effectués. A ce jour, le programme d'essai envisagé est le suivant :

- Le développement des ouvrages sera réalisé pendant une durée minimale de 8 heures par pompage à débit croissant avec des « pistonages » provoqués par des marches-arrêts de la pompe.

Les débits prévisionnels sont les suivants : 75 m³/h, 150 m³/h, 225 m³/h et 300 m³/h. Ainsi le débit pompé lors du développement des 6 ouvrages sera de l'ordre de 9000 m³.

- Après développement, un pompage par paliers enchaînés d'une heure sera réalisé sur l'ouvrage.

Les débits prévisionnels sont les suivants : 75 m³/h, 150 m³/h, 225 m³/h et 300 m³/h. Ainsi, le volume pompé de la nappe sera de 4500 m³ pendant l'essai par palier.

- L'essai de productivité sera réalisé sur chacun des doublets, avec pompage dans les forages de prélèvement et réinjection des eaux dans les forages de rejet. Le tuyau de

refoulement des eaux dans le forage de rejet devra être positionné suffisamment profond sous le niveau statique afin de limiter les phénomènes de brassage.

Les débits prévisionnels sont les suivants : 75 m³/h pendant 2 heures, 150 m³/h pendant 2 heures et 225 m³/h pendant 20 heures. Le volume pompé dans la nappe sera de 10350 m³/h.

Le volume total pompé dans la nappe des alluvions de la basse vallée du Var à la suite de l'ensemble des essais sera donc de l'ordre de 23 850 m³. Il est important de noter que le programme de pompage indiqué ci-dessus devra être adapté en fonction des rabattements et de la productivité réelle des forages.

Les eaux pompées seront rejetées après décantation dans le réseau public après obtention de l'autorisation nécessaire. Ces eaux devront être claires (après décantation) et exemptes de toute pollution.

Impact en exploitation

Dans l'objectif de statuer sur l'impact du dispositif géothermique en phase d'exploitation, une modélisation hydraulique et thermique a été réalisée.

Outil utilisé

Le modèle est construit avec le logiciel MARTHE, développé au sein du BRGM. Élaboré à partir de 1980 et régulièrement développé depuis cette époque pour répondre aux évolutions des standards informatiques et pour intégrer de nouvelles fonctionnalités en hydrodynamique et en transport, ce code de modélisation est dédié spécifiquement à la simulation des ressources souterraines (évaluation et gestion des ressources aquifères, impact de prélèvements et d'aménagements) et des transferts d'éléments dissous (éléments chimiques, éléments radioactifs, biseaux salés). Il s'agit d'un code de calcul en différences finies, utilisant un maillage de type « écossais » (colonnes et lignes de largeurs variables), monocouche (en plan ou en coupe verticale), multicouche ou 3D, avec possibilité de sous-maillages gigognes pour une représentation précise des géométries, simulant l'hydrodynamique et le transport hydrodispersif et thermique en régime permanent et en régime transitoire. L'équation générale aux dérivées partielles utilisée dans le code MARTHE pour résoudre l'écoulement transitoire au sein d'un aquifère tridimensionnel, poreux, captif, hétérogène et anisotrope est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Avec :

- h, la charge hydraulique [L]
- K, la conductivité hydraulique [L.T-1],
- SS, le coefficient d'emménagement spécifique [L-1],
- W, le terme source (flux unitaires entrants et sortants dans l'aquifère [T-1])
- t, le temps [T]

La résolution de l'équation générale de l'écoulement est effectuée sur un maillage tridimensionnel par la méthode des différences finies, en utilisant les conditions aux limites du

système. Les conditions aux limites correspondent à des données hydrogéologiques réelles traduites numériquement. Il peut s'agir de (Ledoux, 2003) :

- Charges ou de niveaux piézométriques imposés : il est admis dans ce cas, que le niveau piézométrique le long d'un contour (linéaire ou surfacique) est déterminé par une cause externe. Il peut s'agir à l'échelle locale ou régionale d'un plan d'eau libre (lac, réservoir, cours d'eau, etc.), d'un seuil autorisant le déversement d'une nappe (source), mais encore à l'échelle régionale d'une zone de nappe libre suffisamment alimentée pour que la piézométrie moyenne imposée par le réseau hydrographique drainant puisse être considérée comme invariante.
- Flux imposé : les échanges avec le milieu extérieur sont dans ce cas réglés par la connaissance a priori du flux d'eau traversant une portion donnée de limite. Diverses configurations relèvent de ce type de condition aux limites : zone d'alimentation de piedmont à l'amont d'un aquifère, infiltration à partir d'un cours d'eau non directement connecté à la nappe, ligne de courant de l'écoulement souterrain suffisamment éloignée de la zone d'intérêt de l'étude pour qu'elle puisse être raisonnablement considérée comme invariante.
- Conditions mixtes : charge imposée avec limitation du débit. L'existence d'une condition de charge ou piézométrie imposée implique la possibilité d'un échange de flux quelconque entre l'aquifère et le milieu extérieur (ex : source tarie, à débit imposé nul, débit de percolation d'une nappe vers une rivière nul, dans le cas où rivière et nappe sont déconnectées).

Parmi les grandeurs utilisées dans un modèle numérique, on peut distinguer :

- Les variables d'entrées et les variables de sortie ;
- Les paramètres de l'aquifère correspondant aux perméabilités (et coefficient d'emmagasinement en régime transitoire).

Les variables d'entrées correspondent aux différentes conditions aux limites, présentées précédemment et aux termes puits/sources. Les variables de sorties sont les charges hydrauliques h calculées. Les grandeurs au sein d'un élément de discrétisation sont supposées constantes (transmissivité, emmagasinement) ou uniformément réparties (pompage).

Construction du modèle

Principes et objectifs

L'analyse critique et la synthèse des données qui précèdent une modélisation hydrogéologique sont conduites de façon sélective et orientée pour atteindre les objectifs de l'étude. Il s'agit notamment de :

- Définir des zones «homogènes» pour les paramètres à distribution spatiale (perméabilité, recharge pluviale, etc.), en s'appuyant sur des critères géologiques, topographiques ou autres,

- Délimiter l'extension de la zone à modéliser (limites hydrauliques ou géologiques « vraies », ou limites arbitraires répondant à des critères de distance, d'influence, etc.) et définir les conditions aux limites associées (à flux imposé¹, à potentiel imposé², etc.).

Cette synthèse conduit à définir le modèle conceptuel, représentation schématique des transferts hydrauliques dans un contexte aquifère, élaborée après analyse des données géologiques et hydrogéologiques relatives au milieu concerné.

Le modèle conceptuel synthétise les informations à intégrer dans le modèle de simulation, lesquelles n'en sont plus ensuite qu'une transcription numérique.

Les caractéristiques du modèle conceptuel retenu dans le cadre de cette étude sont détaillées dans les paragraphes suivants.

Les données de base nécessaires au modèle sont donc les suivantes :

- Données définissant la géométrie du domaine modélisé : il s'agit des cotes des murs des formations hydrogéologiques considérées dans le modèle et de la topographie ;
- Paramètres spatialisés : des valeurs doivent être introduites dans chaque maille. Ces valeurs sont les perméabilités et les coefficients d'emmagasinement (en régime transitoire). Seules quelques valeurs étant connues (par la réalisation de pompage d'essai), ces paramètres doivent être restitués par le calage du modèle sur les observations piézométriques ;
- Données variables dans le temps : il s'agit des données de prélèvements à introduire ponctuellement ou de recharge de la nappe (par infiltration) à introduire par zones ;
- Données utilisées pour le calage : il s'agit des données d'observations portées à notre connaissance (cartes piézométriques, données piézométriques ponctuelles).

Une modélisation hydrogéologique a été réalisée par le BRGM précisément dans la zone d'intérêt en 2016 (BRGM/RP-65632-FR). Cette modélisation a pu être reprise et complétée.

Hypothèses de calcul

Les hypothèses de base retenues pour les simulations des écoulements et du transport de chaleur sont les suivantes :

- Écoulement dans la zone saturée des aquifères,
- Milieu poreux multicouches : le modèle MARTHE utilisé est un modèle hydrodynamique en milieu poreux classique. En réalité, le milieu considéré n'est pas un milieu poreux

¹ Limite à flux imposé : Il s'agit d'une limite du modèle pour laquelle on peut imposer :

- un flux nul : une limite à flux nul n'a pas de contribution active aux variations de charge hydraulique dans le modèle et ne fait qu'enregistrer passivement les variations de charge générées par les variations pluviométriques ou les sollicitations de nappe par pompage. Il peut s'agir par exemple d'un contact d'une formation aquifère avec un imperméable ou une ligne de courant séparant deux bassins versants hydrogéologiques ;
- un taux d'infiltration par recharge pluviale par exemple ;
- un prélèvement : débit imposé dans un ouvrage (puits, tranchée etc.)

² Limite à potentiel imposé : on impose une limite à potentiel imposé si la charge hydraulique y est indépendante des conditions de nappe. Ex : contact d'une nappe avec un plan d'eau libre (rivière, lac etc. Le long du contact nappe-rivière, le potentiel (charge hydraulique) est constant et imposé par la cote de l'eau dans la rivière

réel : les terrains réputés aquifères de la zone d'étude sont fissurés, faillés et les circulations se font préférentiellement au travers de ces structures. Le milieu souterrain peut, à l'échelle retenue, être représenté de manière acceptable, par une équation d'écoulement supposant un milieu poreux continu, selon la notion de volume élémentaire représentatif (VER³). Les hétérogénéités peuvent être représentées de cette façon par les variations de valeurs des paramètres hydrodynamiques à l'échelle d'un VER correspondant à la taille de la maille du modèle.

- Écoulement en régime permanent (phase de calage) puis transitoire (simulations),
- Transport de chaleur en régime transitoire.

La modélisation est réalisée dans un premier temps en régime permanent, qui permet de représenter un état moyen de la nappe à l'équilibre.

³ L'approche VER consiste à dire que l'on affectera à un point mathématique de l'espace la perméabilité d'un certain volume de matériaux, le VER, qui permettra la définition (éventuellement la mesure), de la propriété « moyenne » du volume en question. Il s'agit donc d'une intégration dans l'espace (G. de Marsily)

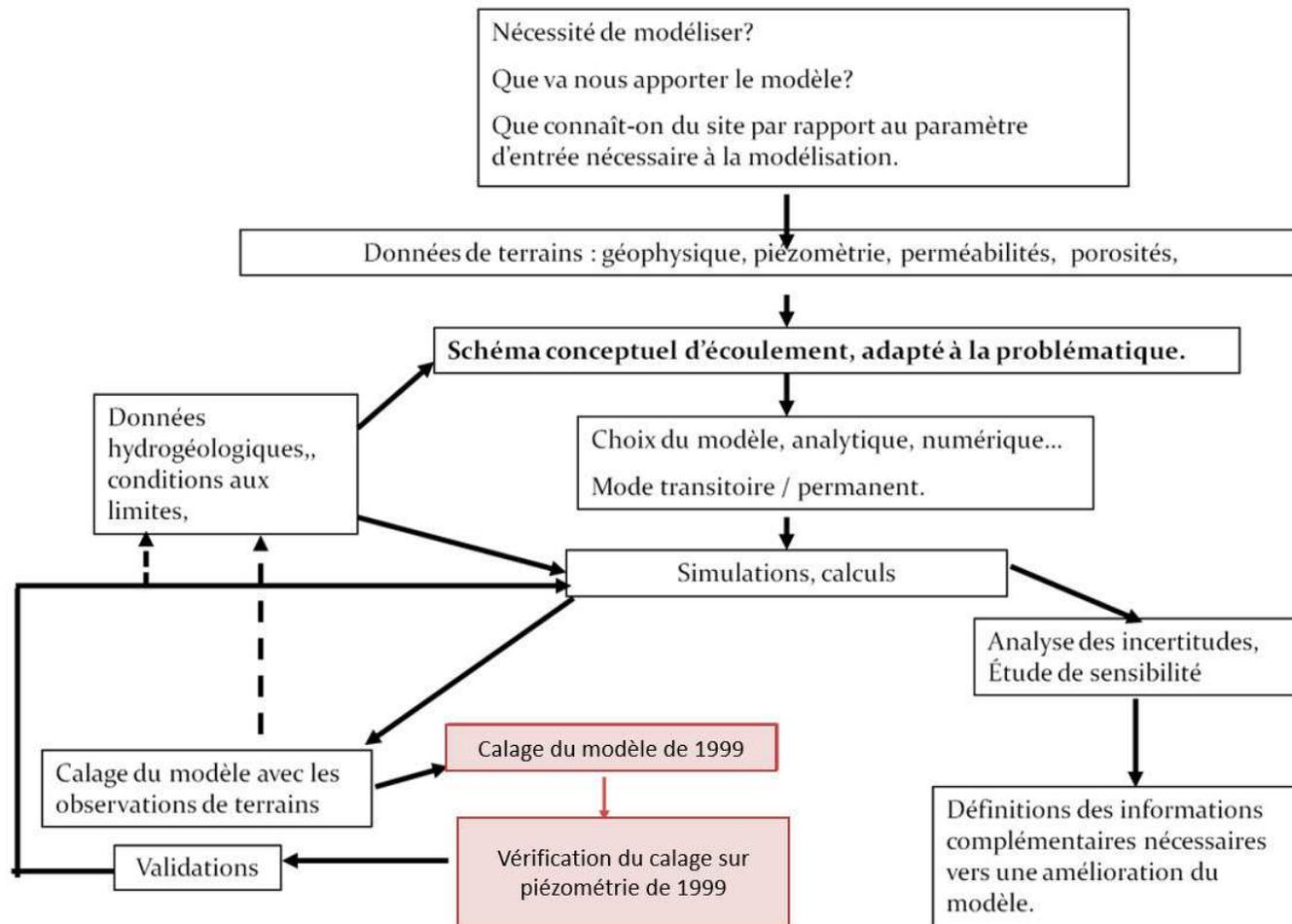


Figure 1 – Méthodologie déployée dans le cadre de la modélisation hydrodynamique et thermique du MIN (adapté d'après S. Denimal)

Piézométrie de référence – données de calage en hydrodynamique

La distribution spatiale de la piézométrie du secteur est connue grâce à :

- La carte piézométrique de la nappe alluviale superficielle du Var d’octobre 1999 (cf. Figure 2) avec les points de suivi associés.
- La carte piézométrique de la nappe alluviale de septembre 2007 issue du rapport Hydratec de 2009. Deux hypothèses ont été prises pour réaliser les cartes piézométriques : une carte avec une relation nappe-Var et une autre carte sans relation hydraulique entre la nappe et le fleuve (cf. Figure 3).

Un suivi piézométrique a été réalisé au droit du projet entre 2013 et 2015 par ERG. Ce suivi ne permet pas d’obtenir des informations précises de la piézométrie et sa fluctuation car les forages suivis étaient généralement secs.

La piézométrie de référence considérée est celle d’octobre 1999, car elle permet de bien caler les paramètres hydrodynamiques. En effet, les données du calage du modèle en régime permanent de la modélisation du BRGM de 2016 (modèle de La Baronne) semblent satisfaisantes. Ces résultats seront présentés et complétés par la suite.

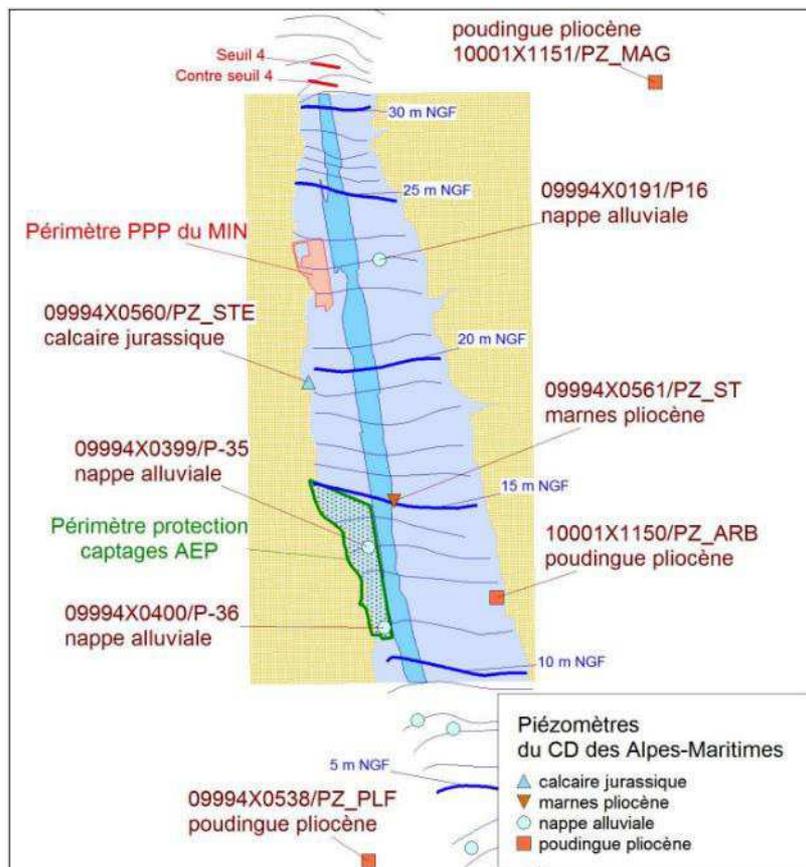


Figure 2 – Carte piézométrique de la nappe alluviale superficielle du Var de 1999 (source : rapport BRGM RP-65632-FR)

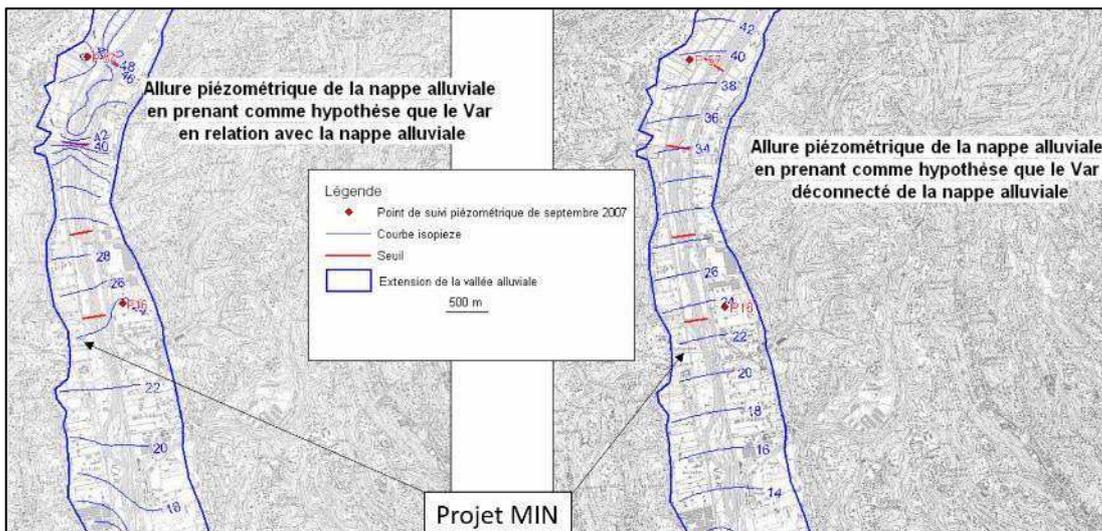


Figure 3 – Cartes piézométriques de septembre 2007 (Hydratec 2009)

Extension horizontale

Le modèle hydrogéologique 3D a été développé sous MARTHE, avec une extension permettant de simuler à la fois :

- Le fonctionnement hydrogéologique global des aquifères concernés par le projet, du plus profond au plus proche de la surface :
 - L'aquifère des poudingues pliocènes : composé principalement de galets et de débris arrondis consolidés et cimentés.
 - La nappe des alluvions du Var : composée de galets de plus de 2 cm, de graviers, de sables et de limons.
- Le fonctionnement de l'installation projetée et ses impacts sur les plans hydrauliques et thermiques.

L'extension horizontale du modèle doit inclure le champ captant Les Pugets. La nature des limites du modèle et leur distance avec le champ captant d'une part, et la zone du projet d'autre part, sont définies de manière à ce qu'elles n'aient qu'une influence limitée sur les niveaux piézométriques au droit de la zone du projet.

Ces différents objectifs ont conduit à reprendre l'extension du modèle de La Baronne du BRGM, présentée en Figure 4 sur une partie de la Vallée du Var, et centrée exclusivement sur le modèle en Figure 5.

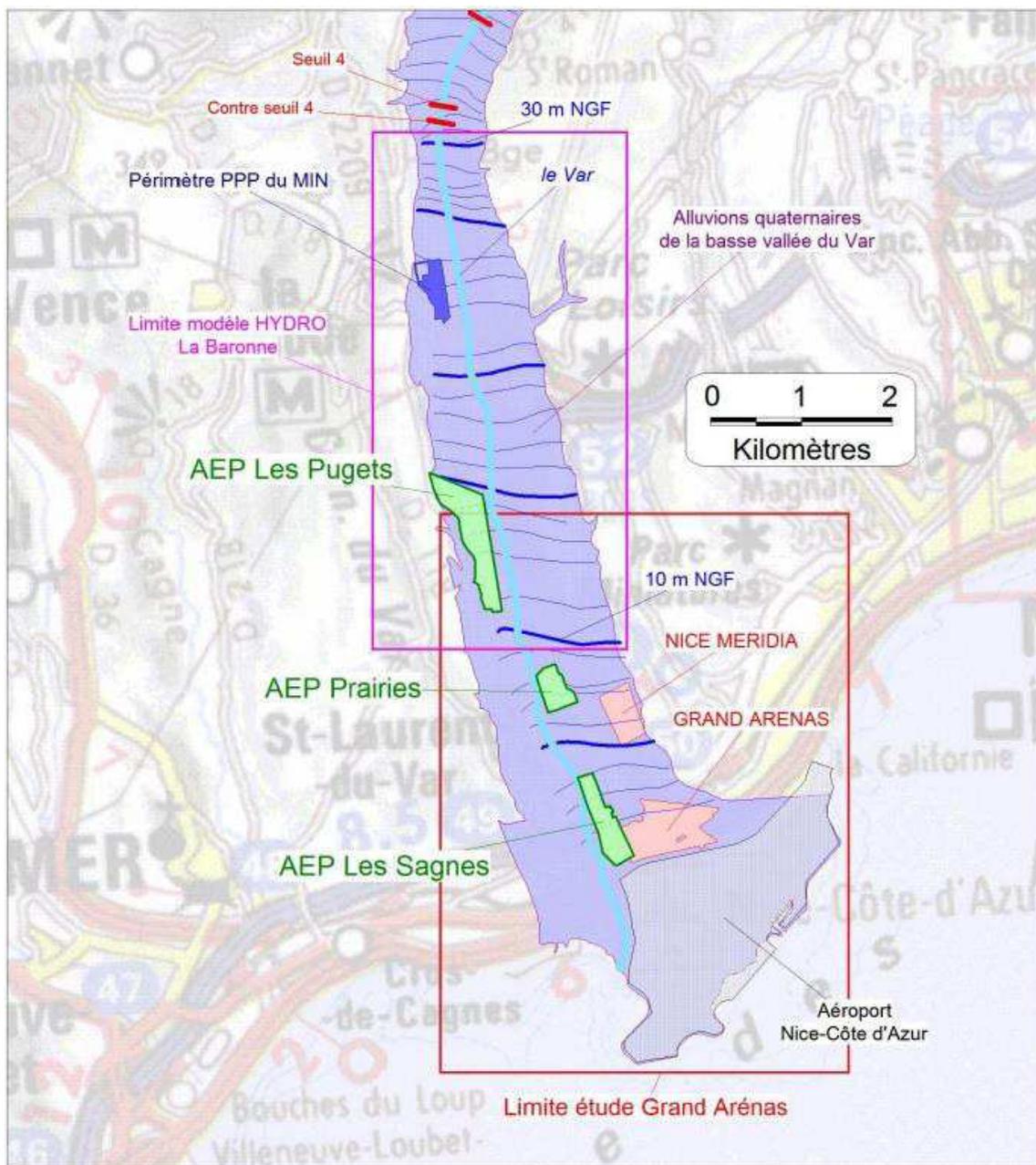


Figure 4 – Vallée du Var et localisation des limites de l'étude hydrogéologique de La Baronne (source : rapport BRGM RP-65632-FR)

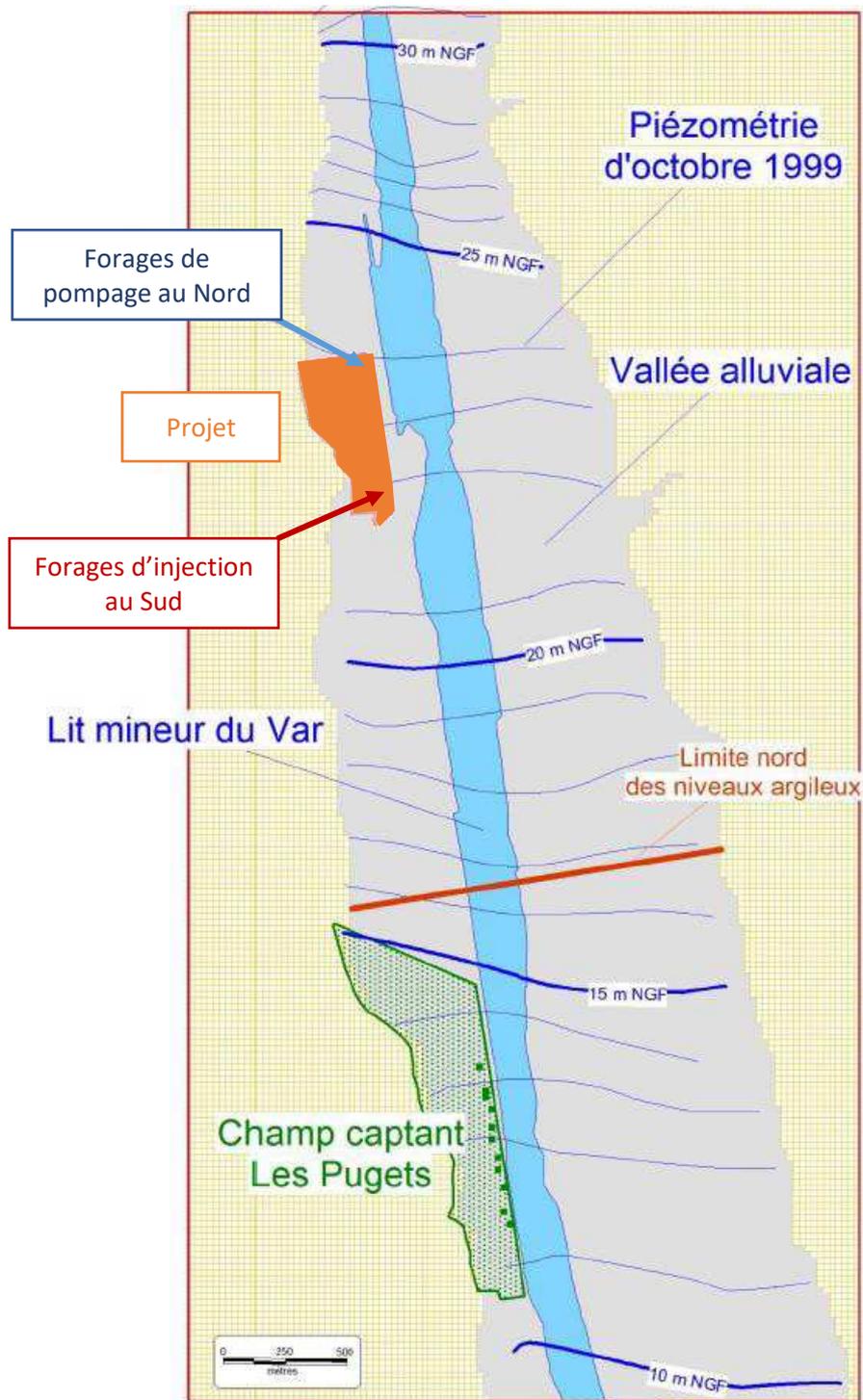


Figure 5 – Extension horizontale du modèle MARTHE (source : rapport BRGM RP-65632-FR)

Le projet étant situé dans la plaine alluviale du Var, les limites au Nord et au Sud du modèle ont été placées suffisamment éloignées en amont et en aval du site du projet et du champ captant des Pugets pour éviter d'éventuels effets de bords.

Les deux rives du Var ont été modélisées pour permettre de savoir si l'influence du projet peut s'étendre sur la rive Est du fleuve.

Extension verticale

Le modèle a été bâti en prenant en compte les couches géologiques suivantes rencontrées à l'échelle de l'extension horizontale du modèle :

1. Le Var
2. Alluvions en amont
3. Niveau argileux en aval
4. Alluvions en aval
5. Calcaires du Jurassique, argiles et poudingues du pliocènes

Les alluvions reposant sur l'aquifère des poudingues pliocènes, formation réputée peu perméable, le mur du modèle a donc été arrêté à la base de cette formation pour prendre en compte la faible recharge de la nappe des alluvions par cet aquifère.

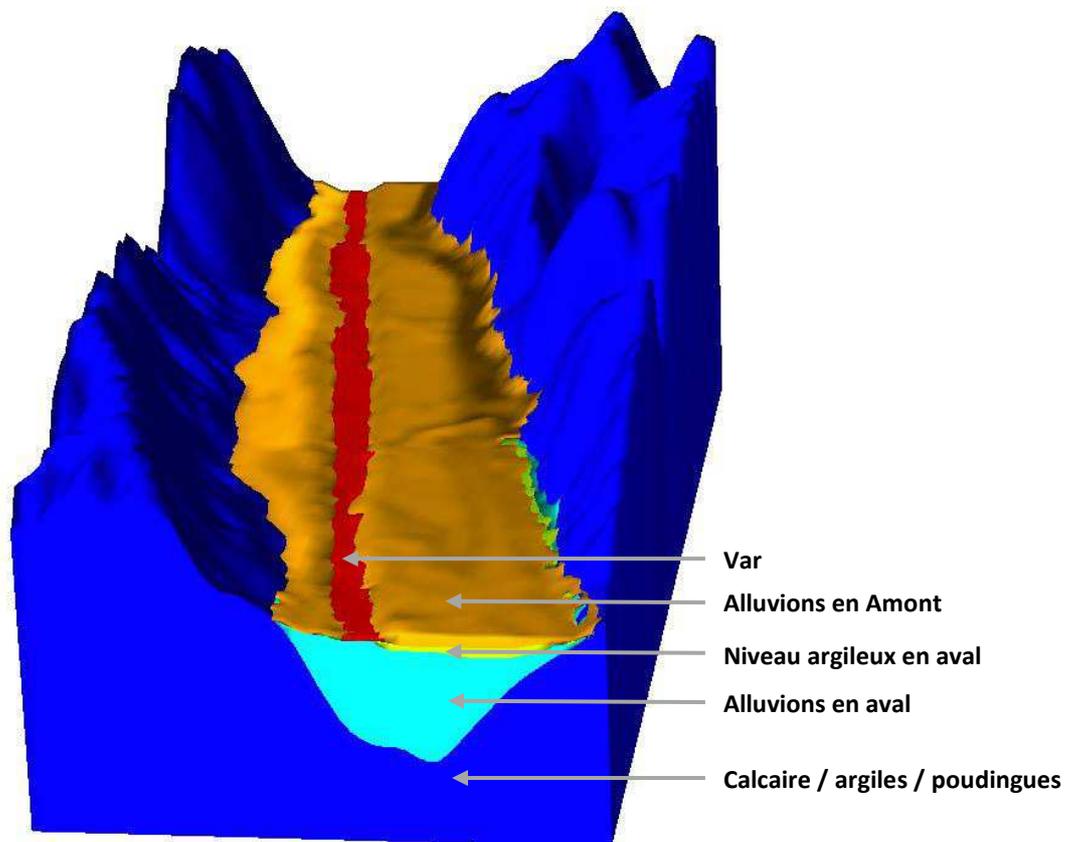


Figure 6 – Bloc 3D du modèle

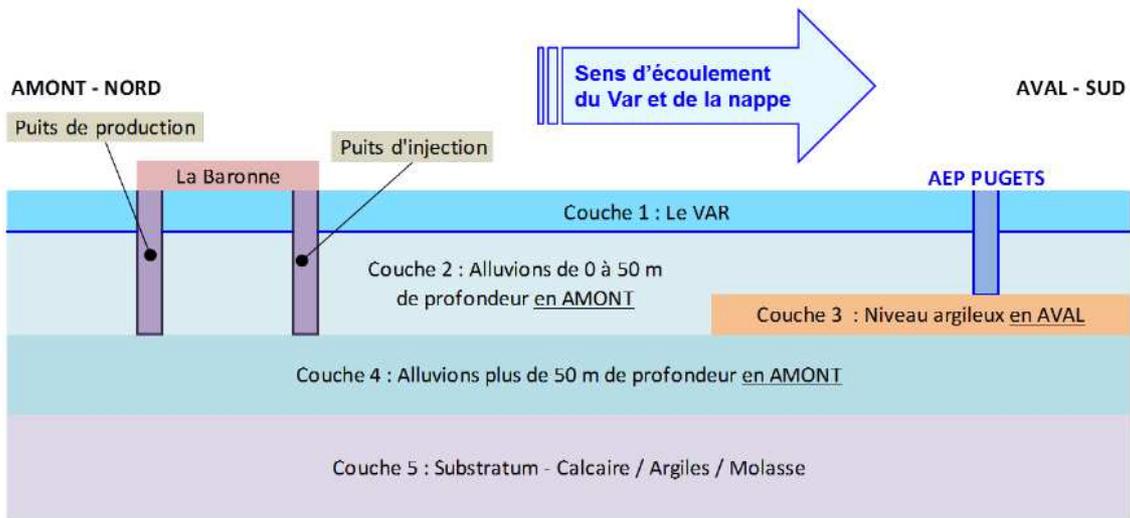


Figure 7 – Représentation schématique du modèle (source : rapport BRGM RP-65632-FR)

Paramètres hydrodynamiques recensés dans la littérature – perméabilités initiales à introduire

Les valeurs de perméabilité de l'ensemble des formations du modèle ont été déduites :

- De données issues de la Banque de données du Sous-Sol du BRGM,
- Des pompages d'essais réalisés sur le champ captant Les Pugets,
- De données de calage du modèle MEMOSOL de 2008 présentées dans le rapport BRGM RP-65632-FR,
- Des données de calage du modèle BRGM de 2016.

Les données bibliographiques sur la nappe superficielle des alluvions font état de perméabilités de l'ordre de 10^{-2} m/s à 10^{-3} m/s. Les pompages d'essais réalisés sur le champ captant AEP Les Pugets (rapport BRGM RP-65632-FR) ont permis de déterminer une transmissivité de 1.10^{-2} m²/s à 1.10^{-3} m²/s soit une perméabilité moyenne de 10^{-2} m/s.

Les données de calage du modèle MEMOSOL de 2008 ont permis une évaluation des coefficients de perméabilité moyens de la nappe des alluvions. La Figure 8 rend compte pour chaque couche du modèle MEMOSOL des coefficients de perméabilité possibles. La Figure 9 représente spatialement les évolutions de perméabilité par zone rentrées dans le modèle pour chaque couche.

Couche	Zone	K MINI	K MOYEN	K MAXI
Aquifère superficiel	1	3,0E-03	3,50E-03	4,0E-03
	2	5,0E-03	5,50E-03	6,0E-03
	3	1,0E-02	1,25E-02	1,5E-02
	4	8,0E-03	8,50E-03	9,0E-03
	5	4,0E-03	4,50E-03	5,0E-03
	6	5,0E-04	7,50E-04	1,0E-03
Eponte (imperméable)	EPONTE NORD	1,0E-06	5,50E-06	1,0E-05
	EPONTE SUD	1,0E-07	5,50E-07	1,0E-06
Aquifère profond	NORD	3,0E-03	3,50E-03	4,0E-03
	SUD	1,0E-03	1,50E-03	2,0E-03

Figure 8 – Coefficients de perméabilité des couches du modèle hydrodynamique MEMOSOL de 2008

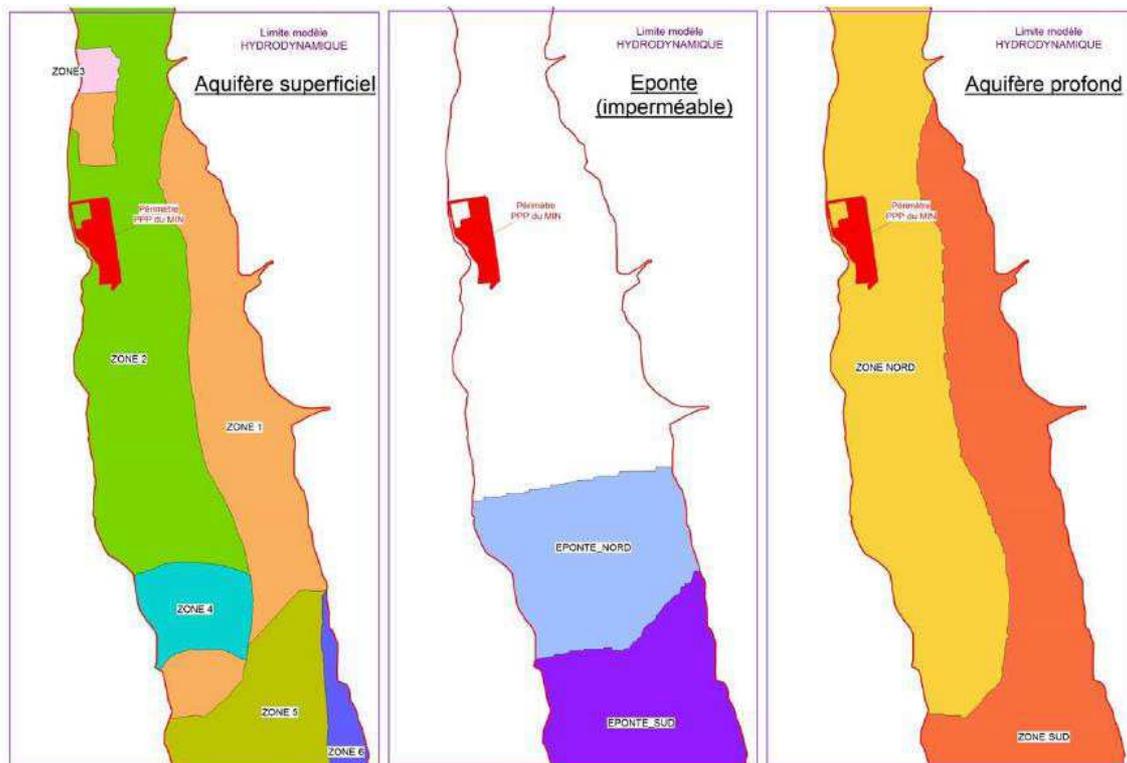


Figure 9 – Carte des zones des coefficients de perméabilité K des couches du modèle hydrodynamique MEMOSOL de 2008

Maillage du modèle

Le maillage général est constitué de mailles de 25 m de côté sur une superficie de 16 km².

Conditions aux limites

L'extension du modèle construit pour les besoins du projet étant différente de l'extension des formations aquifères cibles, des conditions aux limites doivent être définies en bordure du modèle d'après les connaissances disponibles sur la piézométrie régionale.

Les conditions aux limites du modèle calé sur la piézométrie de 1999 et reprises de la modélisation du BRGM (source : rapport BRGM RP-65632-FR) sont présentées sur la Figure 10.

Le modèle, calé sur la piézométrie de 1999, comprend des mailles à potentiel imposé :

- Sur la limite Nord pour les couches aquifères 2 et 4, le potentiel imposé correspond au potentiel observé de la nappe en octobre 1999, c'est-à-dire une cote égale à 31 m NGF,
- Sur la limite Sud pour les couches aquifères 2 et 4, le potentiel imposé correspond au potentiel observé de la nappe en octobre 1999, c'est-à-dire une cote égale à 9 m NGF,
- Les limites Est et Ouest sont à flux nul. L'écoulement considéré par le modèle est uniquement Nord-Sud.

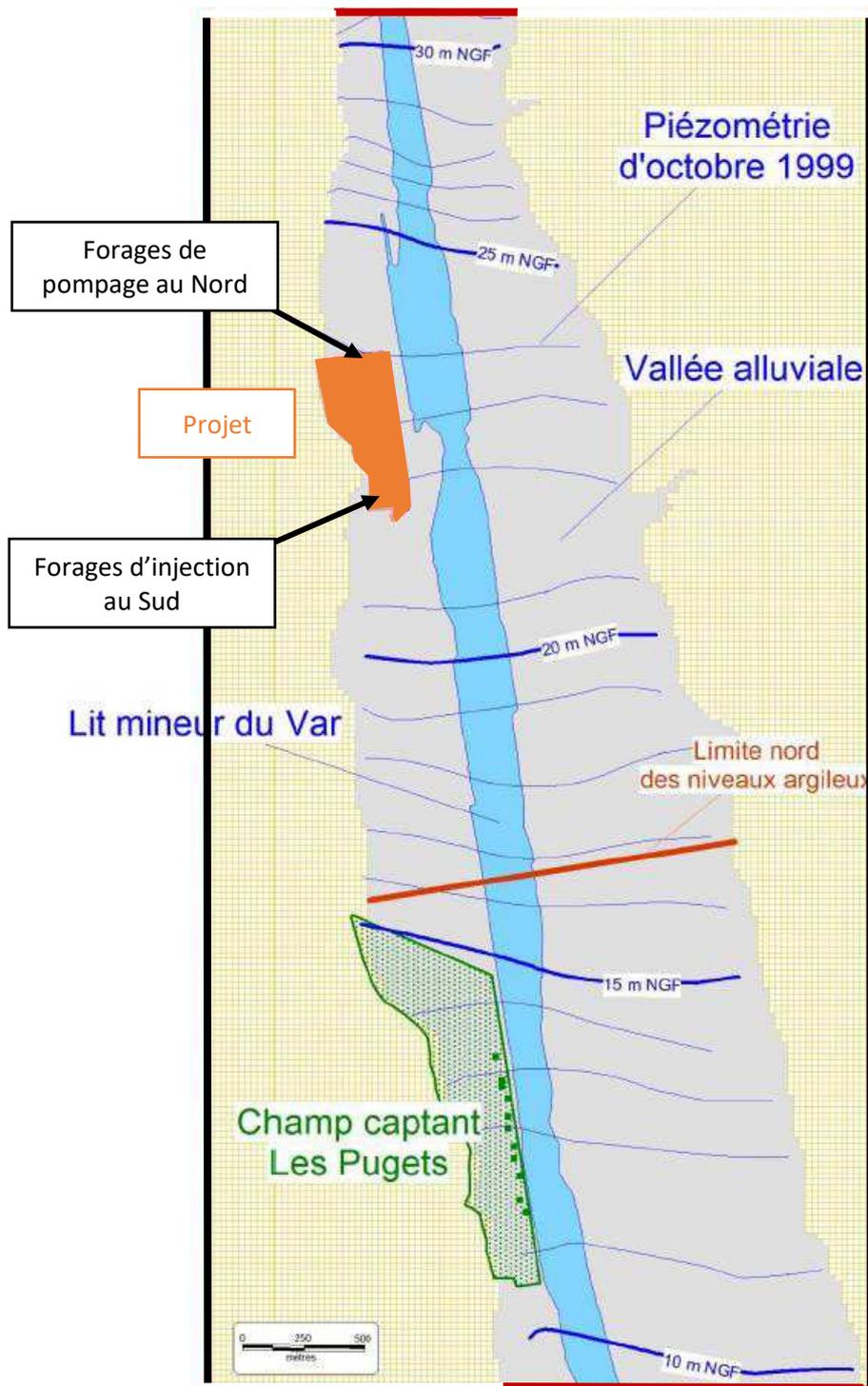


Figure 10 – Conditions aux limites du modèle BRGM (en noir : flux nul ; en rouge : charge imposée)

Recharge

Les données disponibles concernant la recharge sont les suivantes :

	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Cumul
Pluie (mm)	128,2	117,8	89,1	76,1	50,2	46,5	67,5	43,6	35,3	13,5	17,8	69,8	755,4
ETP (mm)	68,8	44,7	48,3	44,6	47,7	77,3	100,5	138,2	161,7	180,5	158,6	110,4	1181,3
ETR (mm)	68,8	44,7	48,3	44,6	47,7	77,3	100,5	138,2	40,7	13,5	17,8	69,8	711,9
RFU (mm)	100	100	100	100	100	100	100	5,4	0	0	0	0	
PEFF (mm)	59,4	73,1	40,8	31,5	2,5	0	0	0	0	0	0	0	207,3

Station de Nice Aéroport - Données sur la période 1981-2015

Les précipitations efficaces⁴ moyennes annuelles de 1981 à 2015 ont été déterminées par la Station de Nice Aéroport. La valeur de pluie efficace moyenne annuelle retenue dans le modèle est de 207 mm. Cette valeur correspond à la valeur retenue dans le modèle de La Baronne du BRGM (source : rapport BRGM RP-65632-FR).

Prélèvements considérés

Dans le secteur d'étude, les principaux prélèvements des forages d'eau potable sont ceux du champ captant Les Pugets sur la commune de Saint-Laurent-du-Var. Deux exploitants se partagent le champ captant : la Métropole Nice Côte d'Azur (MNCA) et le Syndicat Intercommunal du Littoral de la Rive Droite du Var (SILRDV).

La liste des forages est disponible en Figure 11 et leurs emplacements sont visibles en Figure 12.

Secteur	Identification	Indice BSS
Les Pugets MNCA	P1	09994X0172/P
	P2	09994X0495/PUIITS
	P3	09994X0508/P3
	P4	09994X0509/P4
Les Pugets SILRDV	P1	09994X0501/P1
	P2	09994X0502/P2
	P3	09994X0503/P3
	P4	09994X0504/P4
	P5	09994X0505/P5
	P7	09994X0506/P7
	P8	09994X0507/P8

Figure 11 – Liste des forages du champ captant Les Pugets

⁴ Fraction des précipitations génératrice d'écoulement, immédiat ou différé, superficiel ou souterrain. Comme les précipitations totales, elle s'exprime en hauteur (mm) rapportée à une unité de temps

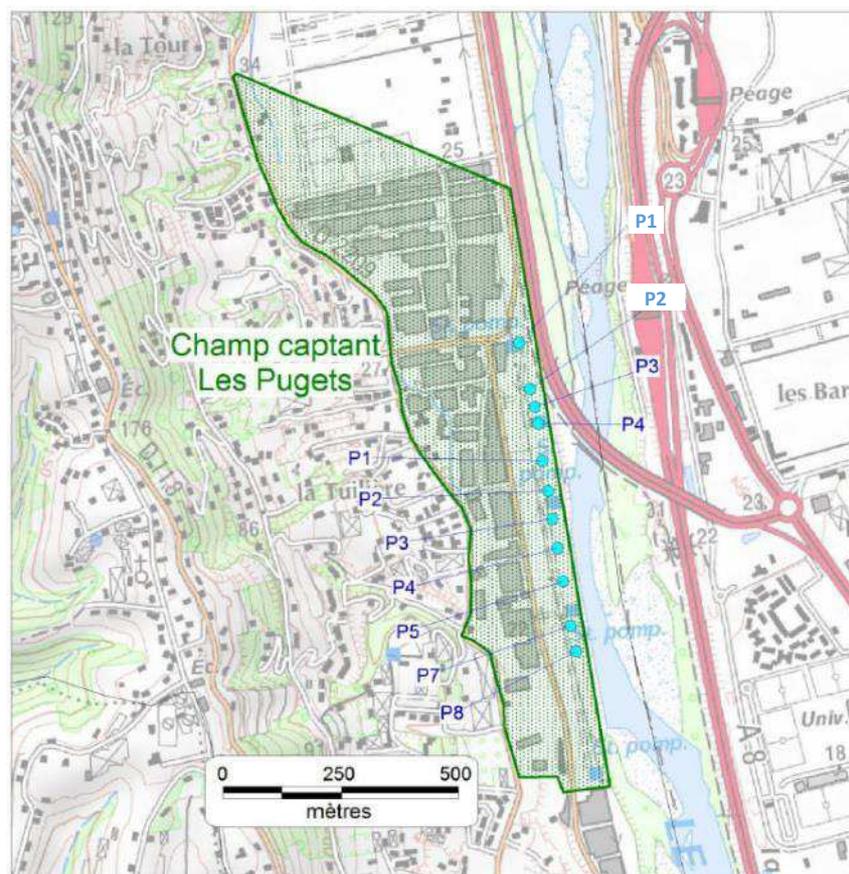
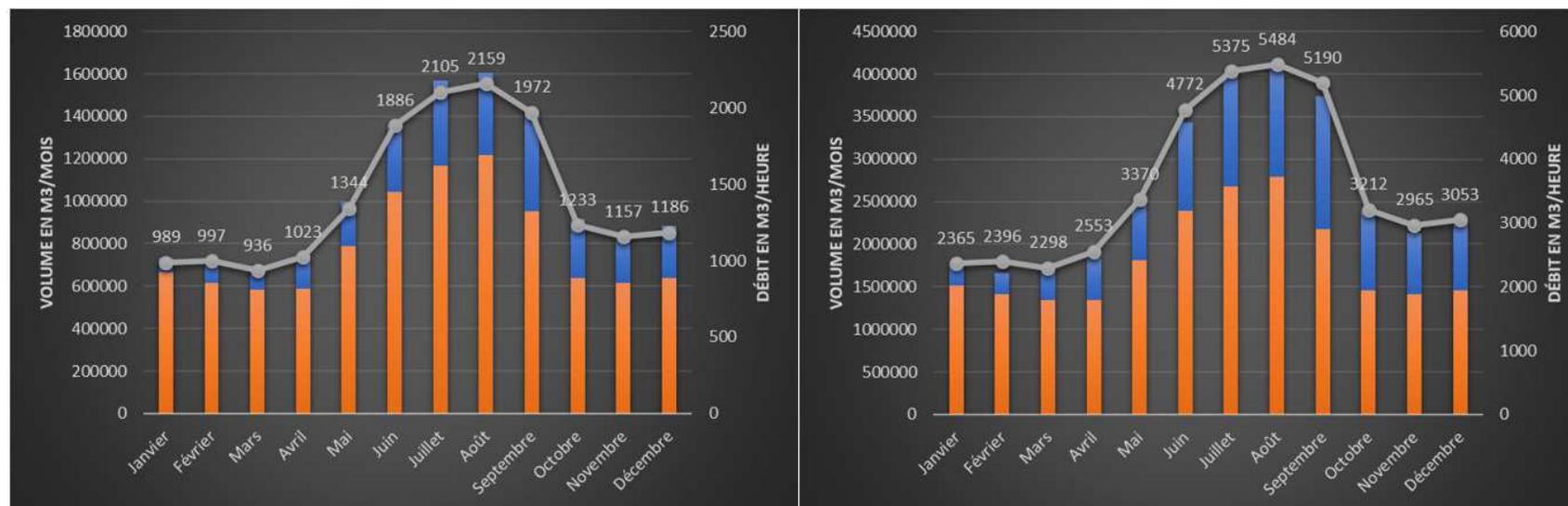


Figure 12 – Position des forages au niveau du champ captant Les Pugets

Pour le modèle en régime permanent, aucun prélèvement n'a été considéré.

Pour le modèle en régime transitoire, les prélèvements de l'année 2014 ont été augmentés au prorata des prélèvements maximaux autorisés par l'arrêté de 2016. Les prélèvements de l'année 2014 et ceux pris en compte dans le modèle sont présentés en Figure 13.



			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Année 2014	MNCA (4 forages)	m3/mois	72168	76560	111600	148320	210552	314640	398040	387624	468720	279744	218160	243288
		m3/jour	2328	2640	3600	4944	6792	10488	12840	12504	15624	9024	7272	7848
		m3/heure	97	110	150	206	283	437	535	521	651	376	303	327
	SILRDV (7 forages)	m3/mois	663648	617352	584784	588240	789384	1043280	1168080	1218672	951120	637608	614880	639096
		m3/jour	21408	21288	18864	19608	25464	34776	37680	39312	31704	20568	20496	20616
		m3/heure	892	887	786	817	1061	1449	1570	1638	1321	857	854	859
Total (m3/h)		989	997	936	1023	1344	1886	2105	2159	1972	1233	1157	1186	
Modélisé	MNCA (4 forages)	m3/mois	240312	254040	370512	492480	700104	1047600	1325064	1290096	1560240	930000	726480	807984
		m3/jour	7752	8760	11952	16416	22584	34920	42744	41616	52008	30000	24216	26064
		m3/heure	323	365	498	684	941	1455	1781	1734	2167	1250	1009	1086
	SILRDV (7 forages)	m3/mois	1519248	1413576	1339200	1345680	1807176	2388240	2673936	2790000	2176560	1459728	1408320	1463448
		m3/jour	49008	48744	43200	44856	58296	79608	86256	90000	72552	47088	46944	47208
		m3/heure	2042	2031	1800	1869	2429	3317	3594	3750	3023	1962	1956	1967
Total (m3/h)		2365	2396	2298	2553	3370	4772	5375	5484	5190	3212	2965	3053	

Figure 13 – Prélèvements mensuels et annuels de 2014/projeté du champ captant Les Pugets

In fine, l'un des objectifs du modèle étant d'estimer l'impact hydraulique et thermique de la future installation géothermique du projet, et à défaut d'une connaissance optimale des prélèvements futurs (à moyen/long terme), les paramètres ayant le plus d'influence sur les résultats seront la transmissivité des terrains (donc la perméabilité à introduire dans le modèle), le gradient hydraulique et le sens d'écoulement de la nappe, qui conditionnent les vitesses de transferts thermiques dans les aquifères.

Température de la nappe alluviale du Var

La température de la nappe alluviale du Var est suivie par le Conseil départemental des Alpes-Maritimes sur les piézomètres :

- P16 Nice Lingostière (situé à hauteur du projet sur la rive gauche du Var),
- P36 Pugets SILRDV (situé au niveau du champ captant Les Pugets).

Les températures sont mesurées à une profondeur de 10 à 15 m du sol. La température moyenne de la nappe est de 14°C avec des amplitudes observées entre l'été et l'hiver de 0,3 à 0,6°C (sans doute dues aux variations de température du Var).

Température (°C)	P16 Nice Lingostière	P36 Pugets SILRDV
Max	14,0	15,4
Min	13,4	15,1
Amplitude	0,6	0,3

Figure 14 – Températures de la nappe alluviale du Var sur P16 et P36

Température du Var

La température du Var est mesurée mensuellement dans la commune de Saint-Laurent-du-Var sur la station 06213000 (Figure 15). L'amplitude moyenne du Var de 2010 à 2015 entre l'été et l'hiver est supérieure à 16°C.

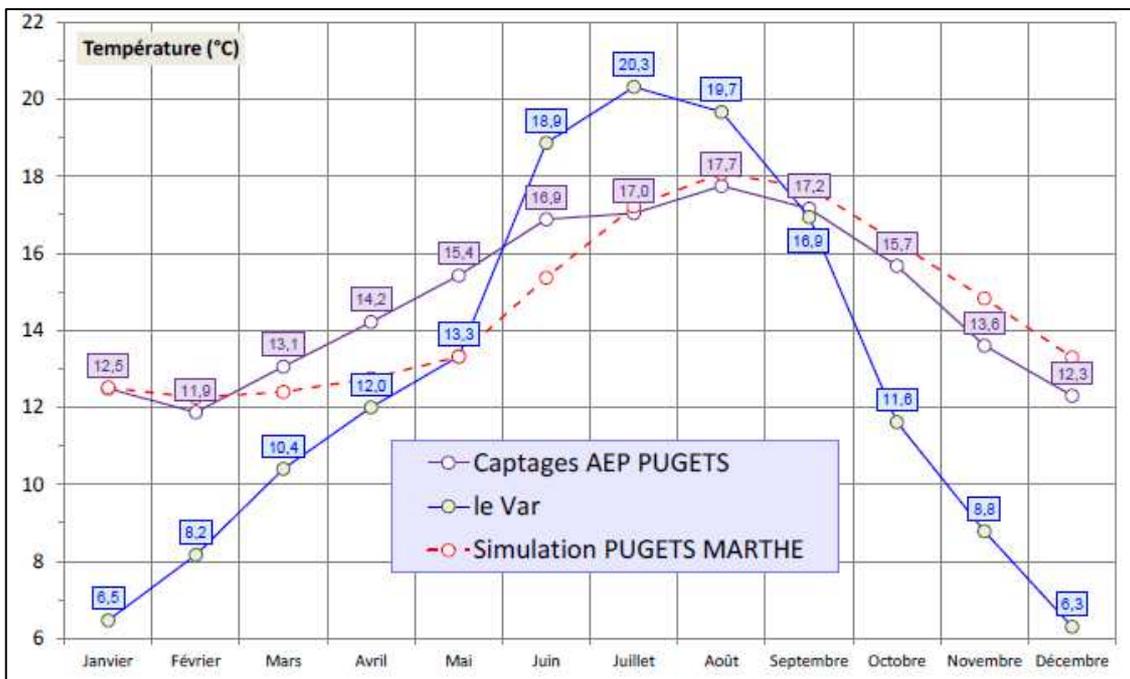
Année	Moyenne	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Janvier	6,5	6,9	6,8	5,3	5,8	7,2	6,8
Février	8,2	10,0	6,7	10,7	6,2	7,2	8,2
Mars	10,4	10,4	11,0	12,2	9,1	9,8	9,9
Avril	12,0	12,5	12,4	10,8	11,6	12,2	12,5
Mai	13,3	13,4	15,0	12,1	12,5	13,0	13,9
Juin	18,9	18,0	19,4	20,2	17,6	19,1	18,9
Juillet	20,3	22,7	18,8	19,6	19,2	18,5	23,1
Août	19,7	19,8	21,1	18,9	21,0	17,8	19,4
Septembre	16,9	13,9	17,6	17,7	17,6	17,9	
Octobre	11,6	9,2	14,3	8,1	12,4	12,3	13,4
Novembre	8,8	7,0	8,0	9,8	10,3	8,8	
Décembre	6,3	3,8	8,0	5,2	5,3	9,2	
	MINI	3,8	6,7	5,2	5,3	7,2	6,8
	MAXI	22,7	21,1	20,2	21,0	19,1	23,1

Figure 15 – Températures moyennes mensuelles au niveau de la station 06213000 (source : rapport BRGM RP-65632-FR)

La Figure 16 reporte les données de température mesurées sur le champ captant Les Pugets sur la période 2002-2011 (source : rapport BRGM RP-65632-FR)

	Température (°C)	
	Captages AEP PUGETS	le Var
Janvier	12,5	6,5
Février	11,9	8,2
Mars	13,1	10,4
Avril	14,2	12,0
Mai	15,4	13,3
Juin	16,9	18,9
Juillet	17,0	20,3
Août	17,7	19,7
Septembre	17,2	16,9
Octobre	15,7	11,6
Novembre	13,6	8,8
Décembre	12,3	6,3

Figure 16 – Températures moyennes mensuelles au niveau du champ captant Les Pugets (source : rapport BRGM RP-65632-FR)



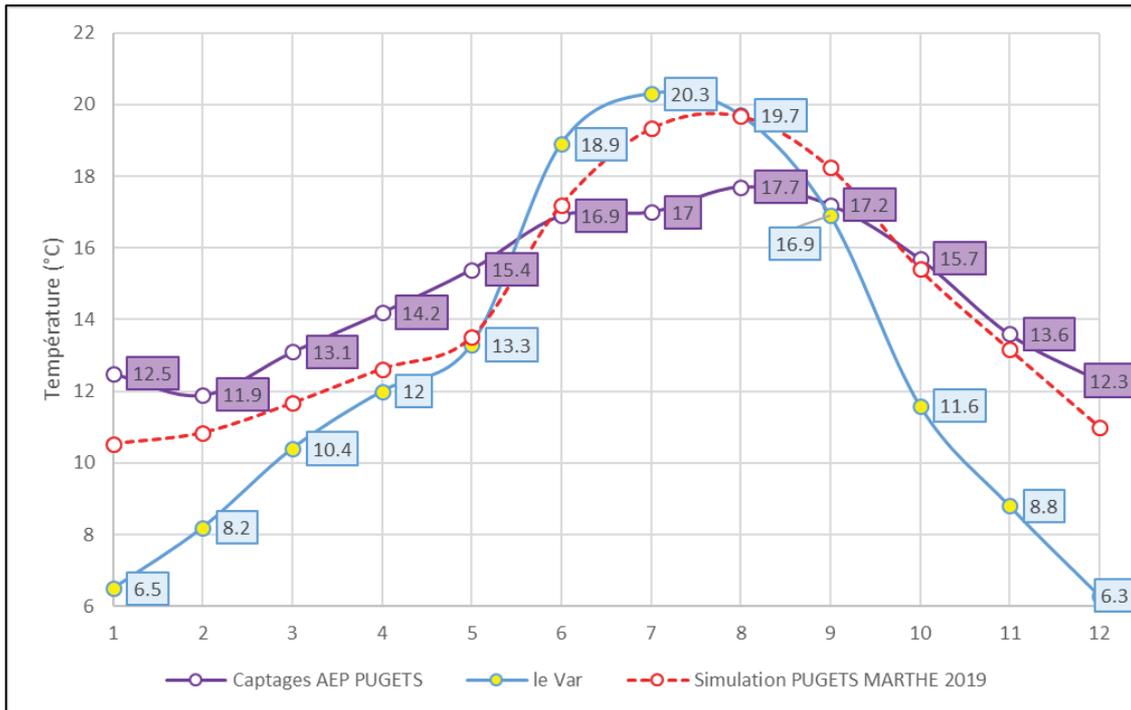


Figure 17 – Comparaison des températures moyennes mensuelles du Var, du champ captant Les Pugets et des simulations MARTHE 2016 (source BRGM) et 2019

La Figure 17 montre que la température des eaux prélevées dans les forages du champ captant des Pugets est fortement corrélée avec la température du Var. Il existe donc une relation hydraulique importante entre le Var et la nappe alluviale. De plus, la nouvelle simulation MARTHE basée sur des prélèvements AEP plus importants montre que les échanges entre le Var et la nappe augmentent avec les débits de pompage du champ.

Calage hydrodynamique initial : octobre 1999

La phase de calage hydraulique consiste en une estimation du jeu de paramètres hydrodynamiques (recharge, perméabilité et charges imposées aux limites) permettant de restituer au mieux les données d'observation (piézométrie). Le calage des paramètres permet de s'approcher le plus possible de ces observations.

Les perméabilités des différentes couches du modèle (Figure 20) ont été calées afin de reproduire de façon satisfaisante la piézométrie observée en octobre 1999. Les graphiques suivants présentent les résultats du calage :

- Graphiques niveaux simulés par rapport aux niveaux observés en octobre 1999,
- Piézométrie restituée pour la nappe des alluvions.

L'analyse de ces graphiques et la carte piézométrique restituée montrent que le modèle restitue globalement bien l'allure générale de la piézométrie d'octobre 1999 :

- Les écoulements convergent vers la mer Méditerranée ;
- Les niveaux piézométriques sont correctement restitués au vu de la taille des mailles. L'écart simulé-observé est inférieur à ± 70 cm.

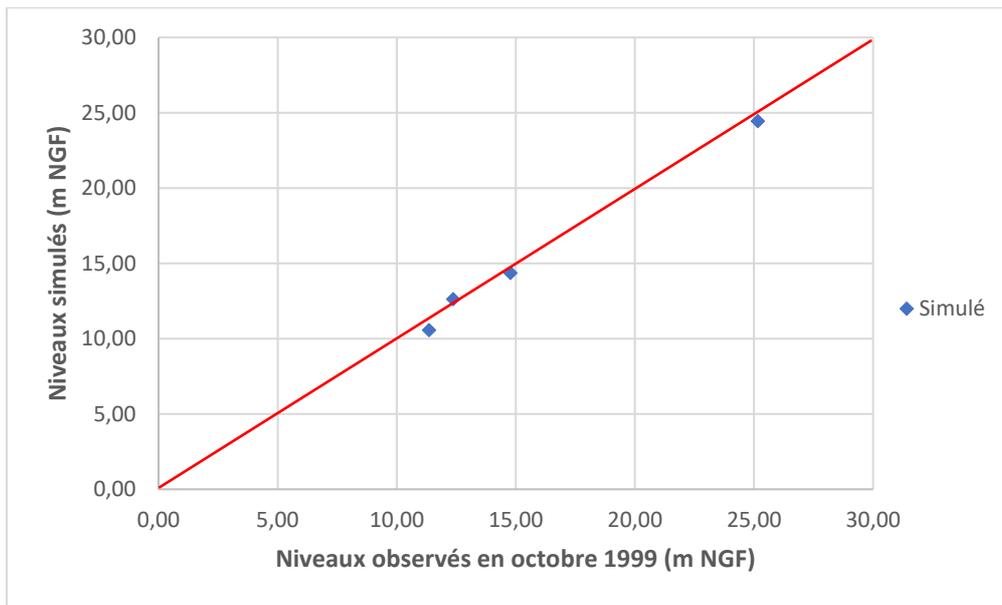


Figure 18 – Comparaison des niveaux observés et restitués par le modèle dans les alluvions

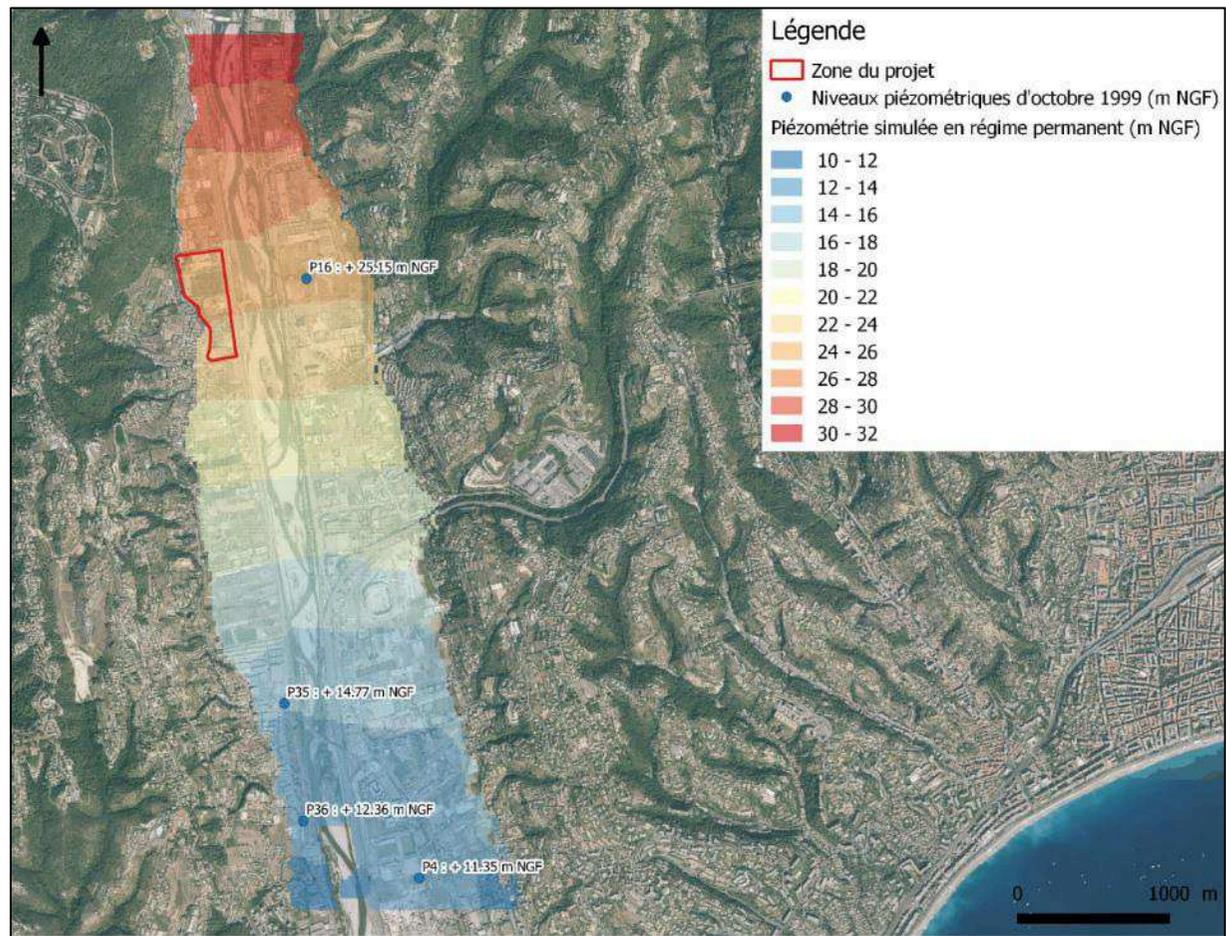


Figure 19 – Comparaison des piézométries simulées et observées (octobre 1999)

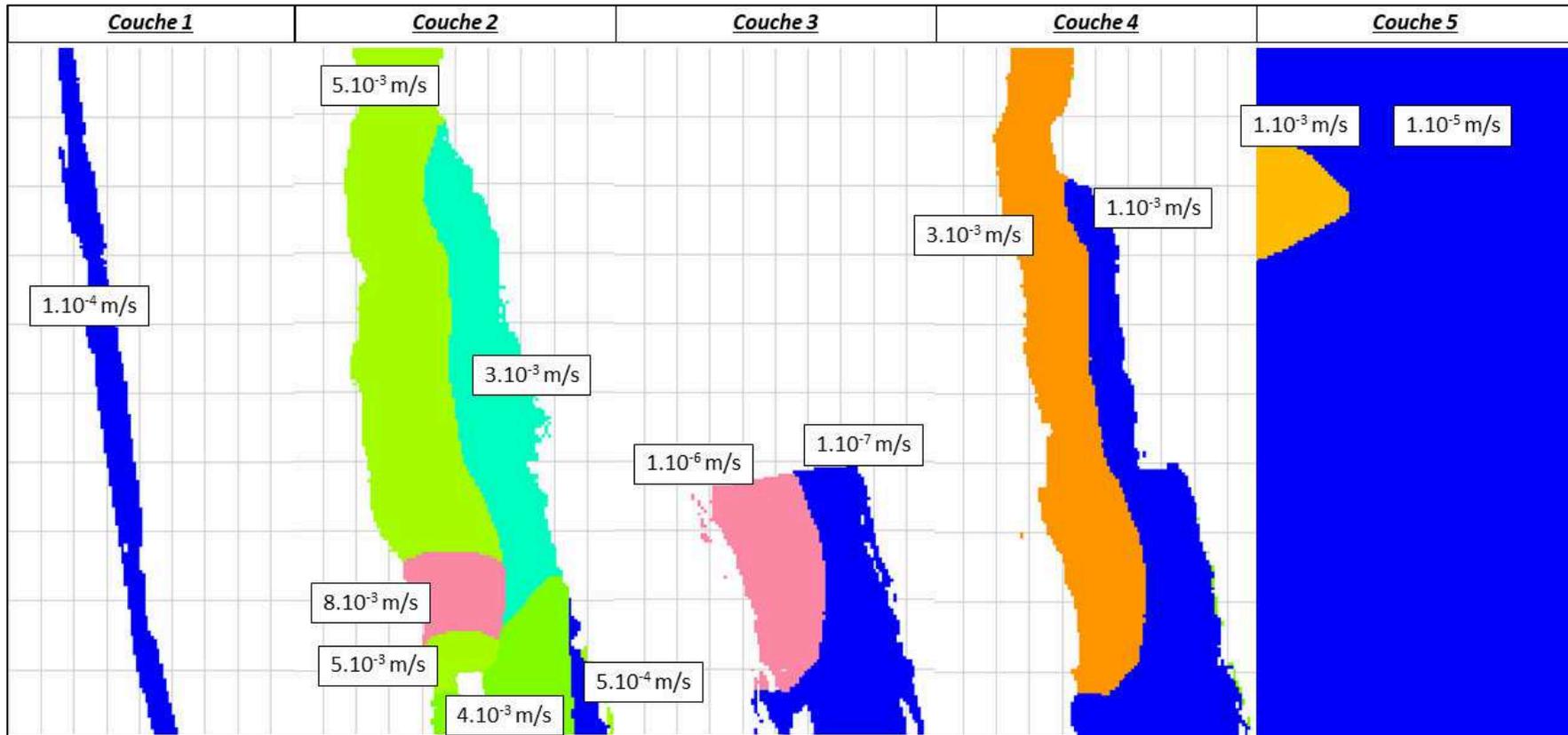


Figure 20 – Perméabilités issues du calage

Simulations hydro-thermiques

Installations géothermiques recensées dans le voisinage

D'après le rapport du BRGM RP-60742-FR : la nappe alluviale du Var est sollicitée par une quinzaine d'installations géothermiques.

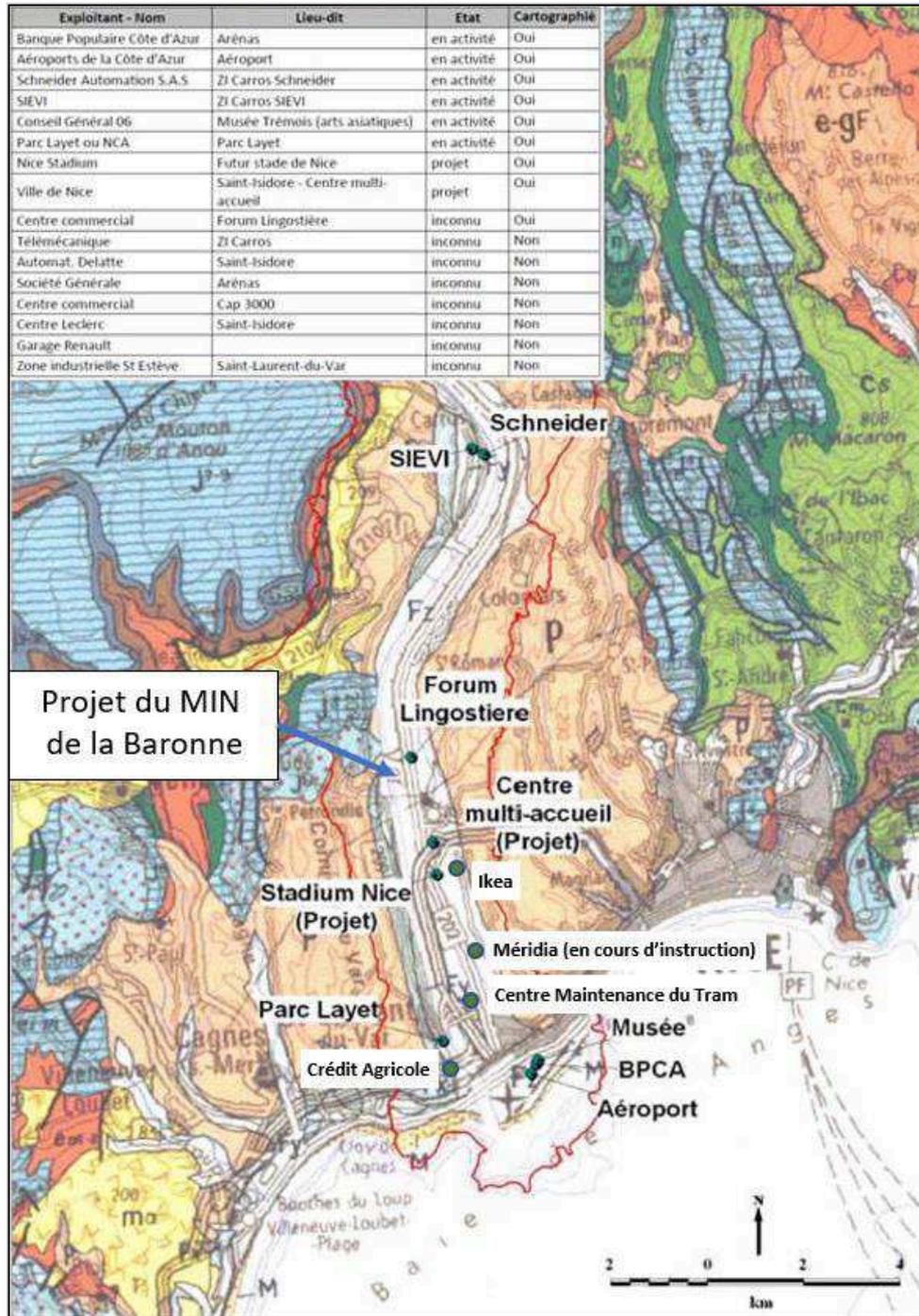


Figure 21 – Localisation des usages géothermiques connus (source : rapport BRGM RP-60742-FR)

La Figure 23 montre les installations recensées au voisinage du projet :

- **Forum Lingostière** (Rapport BRGM 89 SGN 576 – Forum Nice Lingostière – Climatisation et chauffage par pompe à chaleur, réalisation des ouvrages de pompage et de réinjection)
- **Groupe scolaire St-Isidore (centre multi-accueil)**
- **Stade Allianz Riviera**
- **IKEA Développement** (arrêté préfectoral n°15746 du 16 Mai 2018 octroyant un permis d'exploitation de gîte géothermique basse température dans la commune de Nice)

Dans le modèle, les installations suivantes ont été mises en fonctionnement :

- L'installation du **Forum Lingostière**. Cette installation n'a pas d'existence réglementaire. Sur la base des documents recueillis (rapport BRGM 89 SGN 576 PAC de 1989) deux forages (production et réinjection) ont été réalisés avec un débit de pointe objectif de 250 m³/h.

Le régime de fonctionnement retenu et simulé depuis 1990 pour l'installation du Forum Lingostière est le suivant :

- 3750 h/an de fonctionnement à 200 m³/h pour produire du froid (Delta de +7°C sur la réinjection)
- 1250 h/an de fonctionnement à 200 m³/h pour produire du chaud (Delta de - 5°C sur la réinjection)

- L'installation du **groupe scolaire St-Isidore (centre multi-accueil)**. Aucune information n'a pu être transmise par la DREAL sur cette installation. Un échange oral a permis d'établir qu'un doublet géothermique de 20 m³/h a été réalisé en 2017 et ne serait mis en service que depuis quelques mois.
- L'installation du **Stade Allianz Riviera**. Deux forages de prélèvement (F1 et F2) ont été réalisés en 2012. Ils ont recoupé les alluvions du Var jusqu'à 43,3 et 42,8 m de profondeur et ont montré des niveaux graveleux très aquifères au-delà de 36 m de profondeur. Les forages ont été crépinés à partir de 38 m de profondeur et équipés de pompes d'exploitation de 100 m³/h. Le rejet des eaux géothermales s'effectue via le réseau d'eau pluvial : cette installation est considérée dans le modèle sans réinjection.

- L'installation **d'IKEA Développement**. Le projet comprend deux forages de prélèvement (P1 et P2) et deux forages de réinjection (R1 et R2).

Le régime de fonctionnement pour chaque doublet retenu et simulé pour l'installation d'IKEA est décrit dans le tableau ci-dessous.

Période	Hivernale	Estivale	Année
Durée	5 mois (novembre à mars)	7 mois (avril à octobre)	12 mois
Période	7 jours/7 24 heures/24	6 jours/7 14 heures/24	-
Fonctionnement	Chauffage	Rafrâichissement	Rafrâichissement et chauffage
Besoins énergétiques (kW)	1030	1 000	-
Ecart thermique maximal (°C)	-6	+11	-
Débit maximal (m ³ /h)	120 (quelques heures/an)	90 (< 50 heures/an)	-
Débit moyen sur la période (m ³ /h)	50	45	-
Volume prélevé (m ³)	≈ 183 000	≈ 132 000	≈ 315 000

Figure 22 – Répartition des besoins énergétiques, des débits d'exploitation et des volumes prélevés estimés (source : Rapport n° 83714/B – Antea Group)

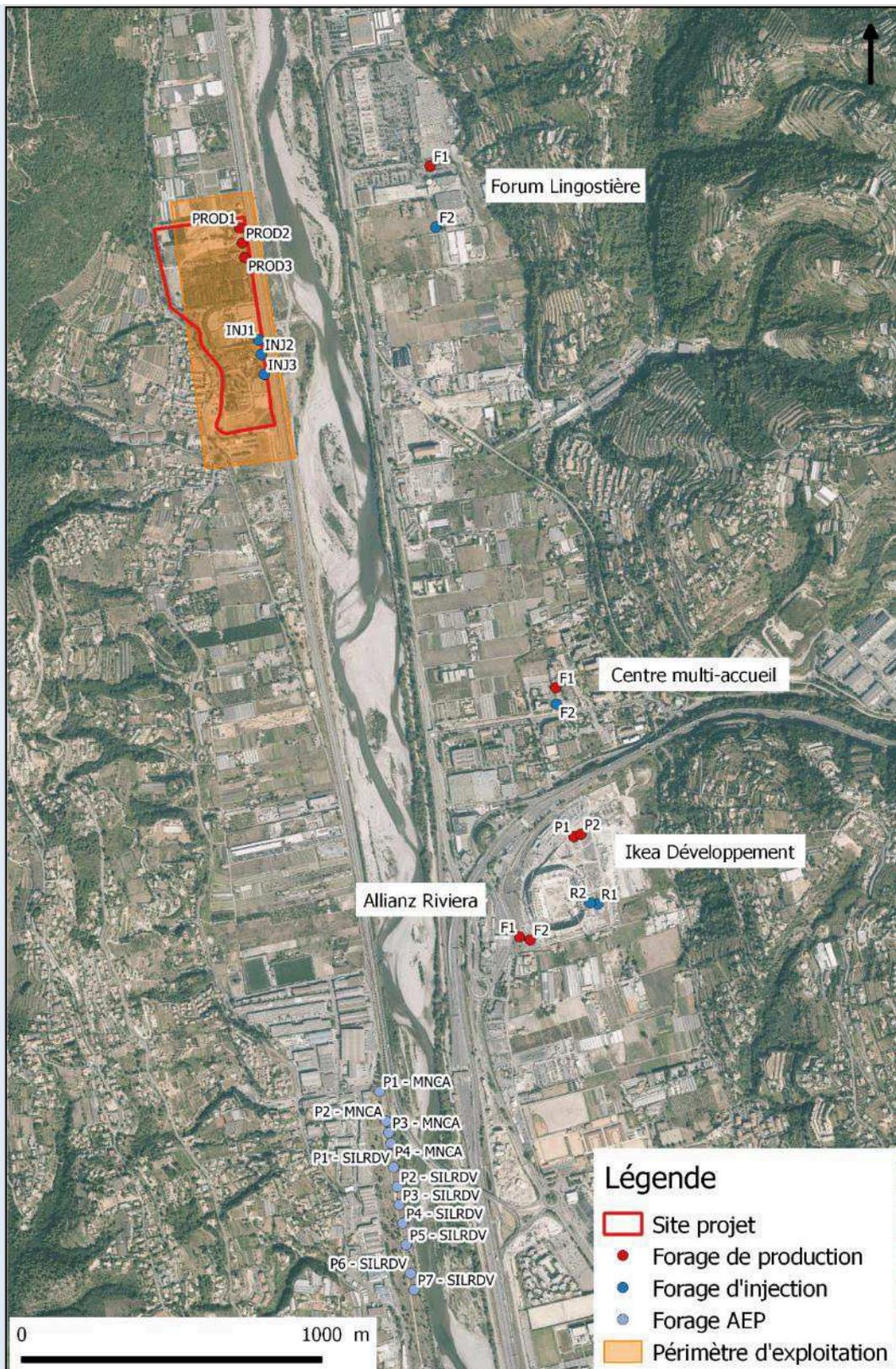


Figure 23 – Installations géothermiques recensées au voisinage du projet

Hypothèses de calcul

Les besoins en eau nécessaires au fonctionnement de l'installation sont donnés ci-dessous. Le débit moyen est équiréparti entre les six ouvrages. Ceux-ci sont positionnés tel que sur la Figure 24 suivante.

	Energie (kWh)	Débit (m3/mois)	Débit moyen (m3/h)	Delta T (°C)
Janvier	69897	19726	27	3
Février	122790	21316	31	5
Mars	168408	25711	35	5.6
Avril	435739	51199	71	7.3
Mai	625372	72248	97	7.4
Juin	1015675	117225	163	7.5
Juillet	1350112	155824	209	7.4
Août	1262778	145744	196	7.5
Septembre	993880	114709	159	7.5
Octobre	609671	70365	95	7.5
Novembre	281765	35871	50	6.8
Décembre	127856	17863	24	6.2

Tableau 1 – Besoins énergétiques

La Figure 24 rend compte de l'implantation potentielle des forages du projet MIN. Les forages de production sont séparés entre eux d'une distance de 50 m environ. Les forages d'injection INJ1 et INJ 2 sont séparés de 50 m et les forages INJ 2 et INJ 3 de 68 m environ. La distance entre le forage de production PROD 3 et le forage d'injection INJ 1 est d'environ 280 m.



Figure 24 – Implantation prévisionnelle des forages

Deux types de calcul ont été effectués :

- Afin d'estimer l'impact hydrodynamique sur les installations existantes, les calculs ont été réalisés en régime permanent (état stabilisé) au débit de pointe de :
 - $\pm 200 \text{ m}^3/\text{h}$ par forage pour le projet du MIN,
 - $\pm 200 \text{ m}^3/\text{h}$ pour l'installation de Lingostière.

L'objectif était de se placer dans la configuration la plus défavorable.

- Afin d'estimer l'impact thermique, les calculs ont été réalisés en considérant les débits moyens indiqués dans le Tableau 1. Afin de se rapprocher le plus possible de la réalité la température de rejet est directement asservie mensuellement à la température des puits de pompage (fonction asservissement thermique du code de calcul MARTHE). Pour considérer l'impact thermique sur les installations voisines la modélisation a été réalisée avec et sans le projet MIN.

Résultats sur le plan hydraulique

L'impact hydraulique sur le voisinage est très limité. A plus de 200 mètres des forages, la hausse (ou la baisse) du niveau est inférieure à 0,1 m.

Dans la nappe alluviale, les remontées du niveau sont maximales à proximité immédiate des forages d'injection et sont de l'ordre de 0,4 m à l'échelle de la taille des mailles.

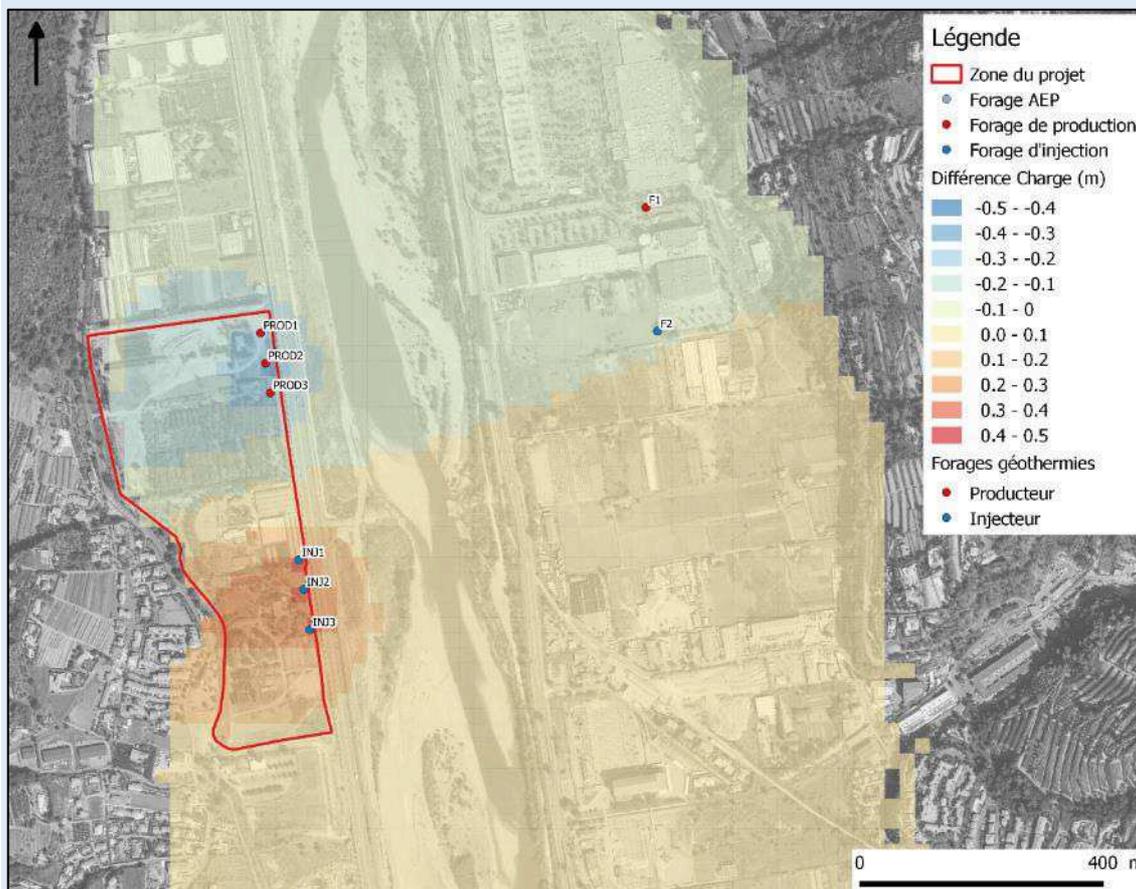


Figure 25 – Rabattement/réhausse induit par l'exploitation fonctionnant au débit de pointe

Résultats sur le plan thermique

La Figure 26 illustre l'évolution de la température calculée aux forages au cours du temps. On constate que les eaux réinjectées ne sont quasiment pas recyclées par les forages de pompage, ce qui se traduit par une quasi-absence d'évolution de la température de production qui reste stable dans le temps.

En effet, après 30 ans d'exploitation, la température moyenne annuelle sur les forages de pompage est passée de 14,0 à 14,1°C.

La bulle thermique se développe autour des trois forages d'injection. L'impact thermique de l'installation reste cependant limité au voisinage du projet. A 300 mètres en aval hydraulique, l'augmentation de température est de l'ordre de 2°C. Le panache thermique n'atteint pas le champ captant des Pugets et ne perturbe pas les autres installations de géothermie, notamment celle de Lingostière, après 30 ans d'exploitation.

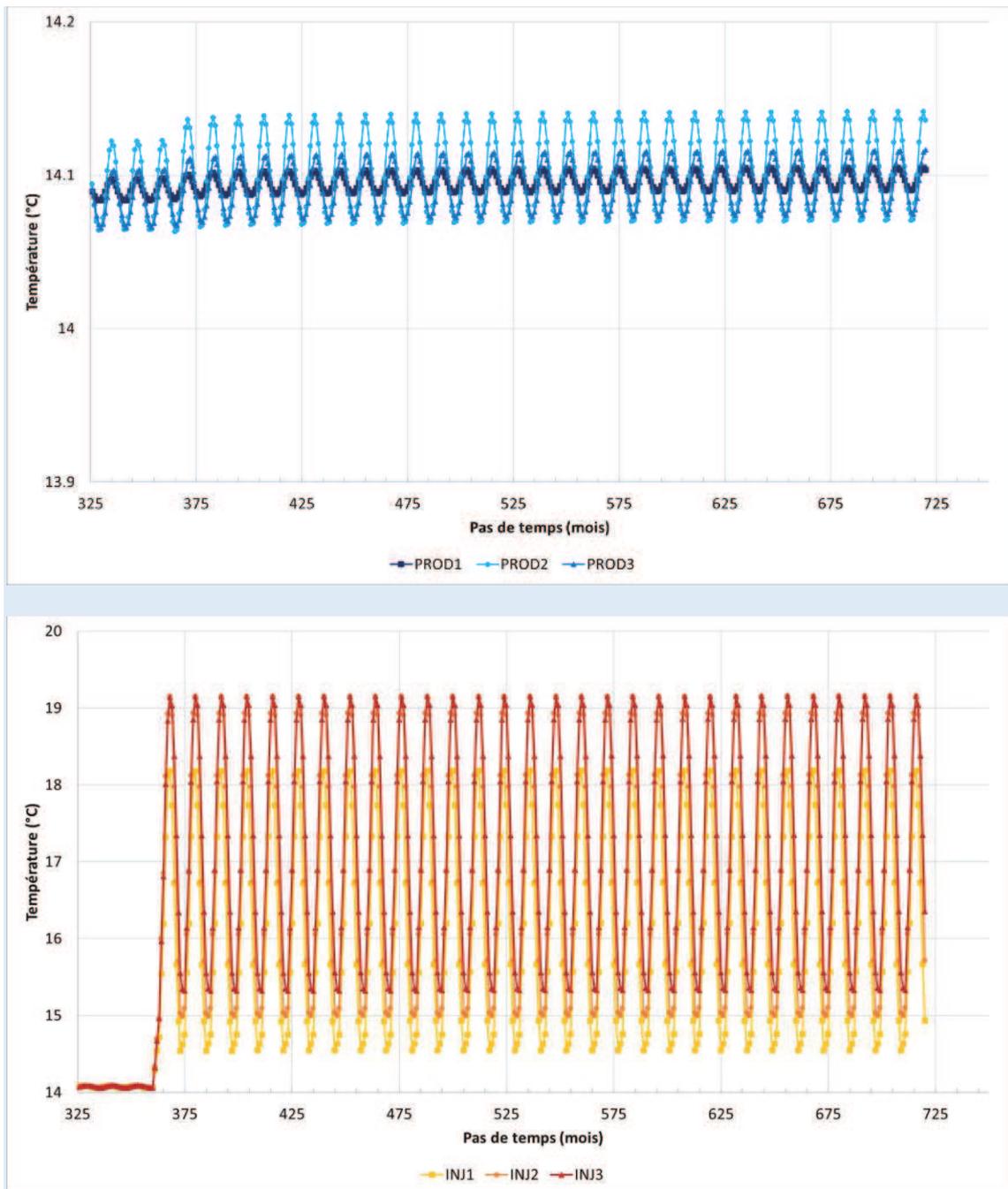


Figure 26 – Evolution de la température aux forages de pompage et aux forages de rejet

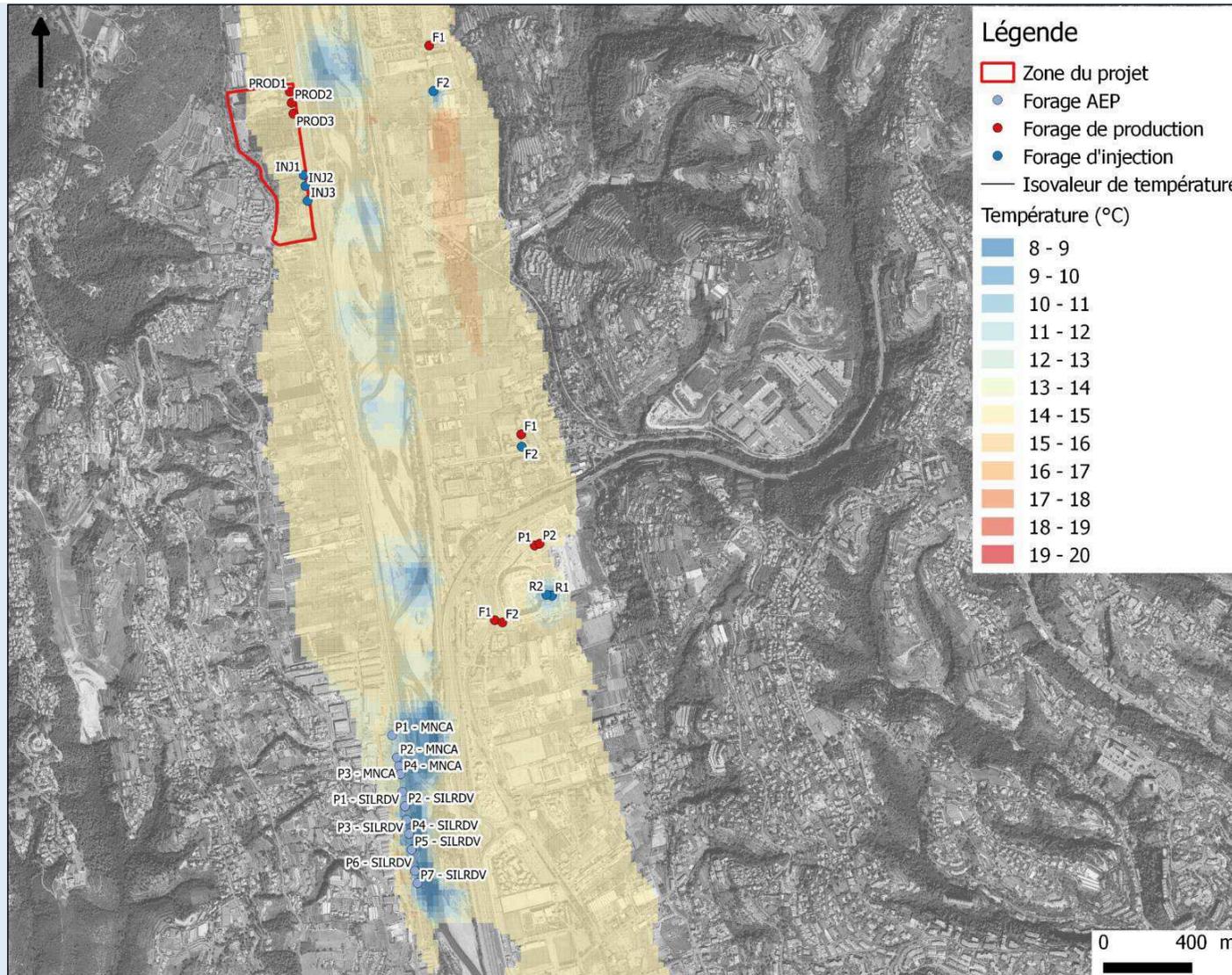


Figure 27 – Carte des températures à l'état initial

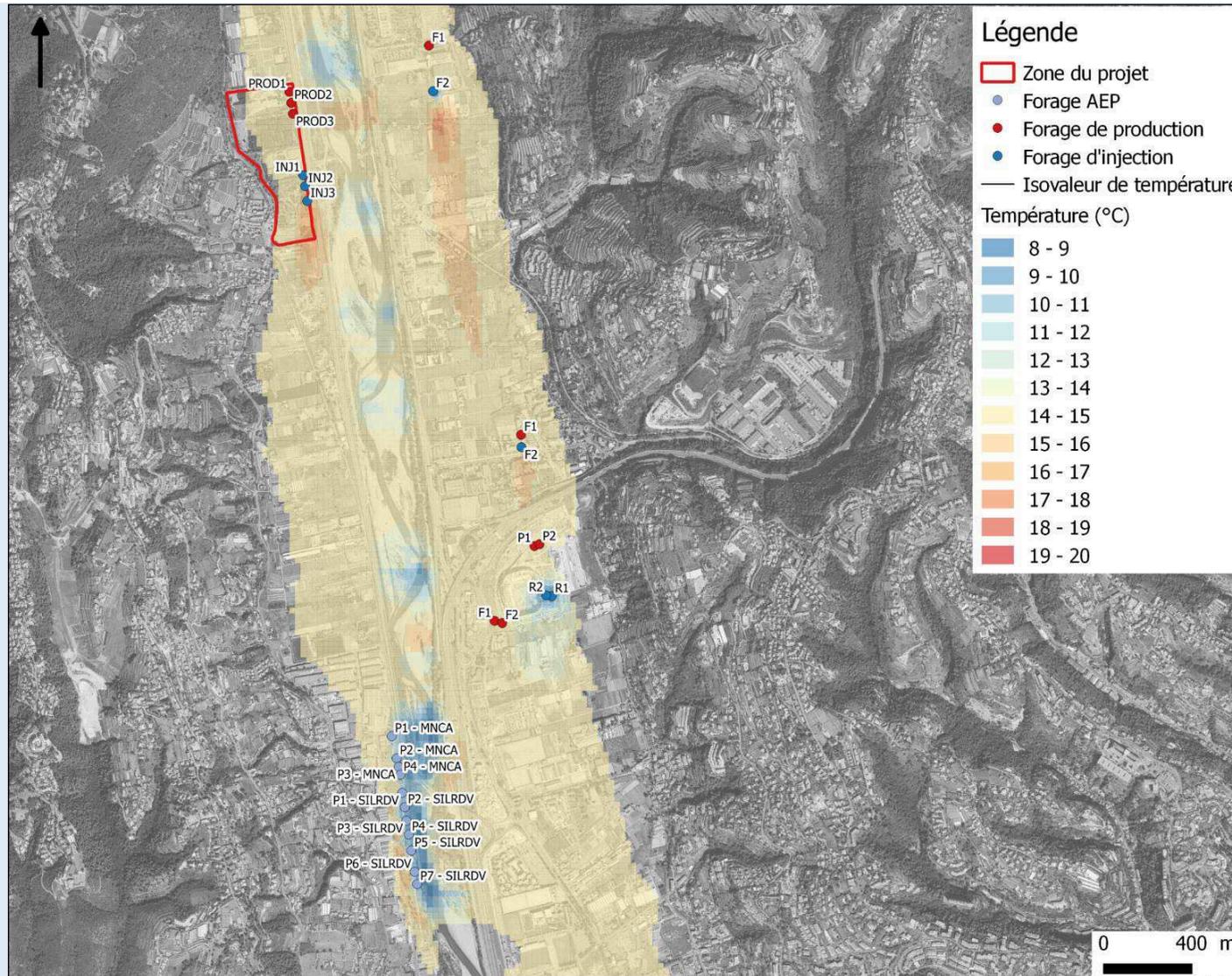


Figure 28 – Carte des températures après 1 an d'exploitation

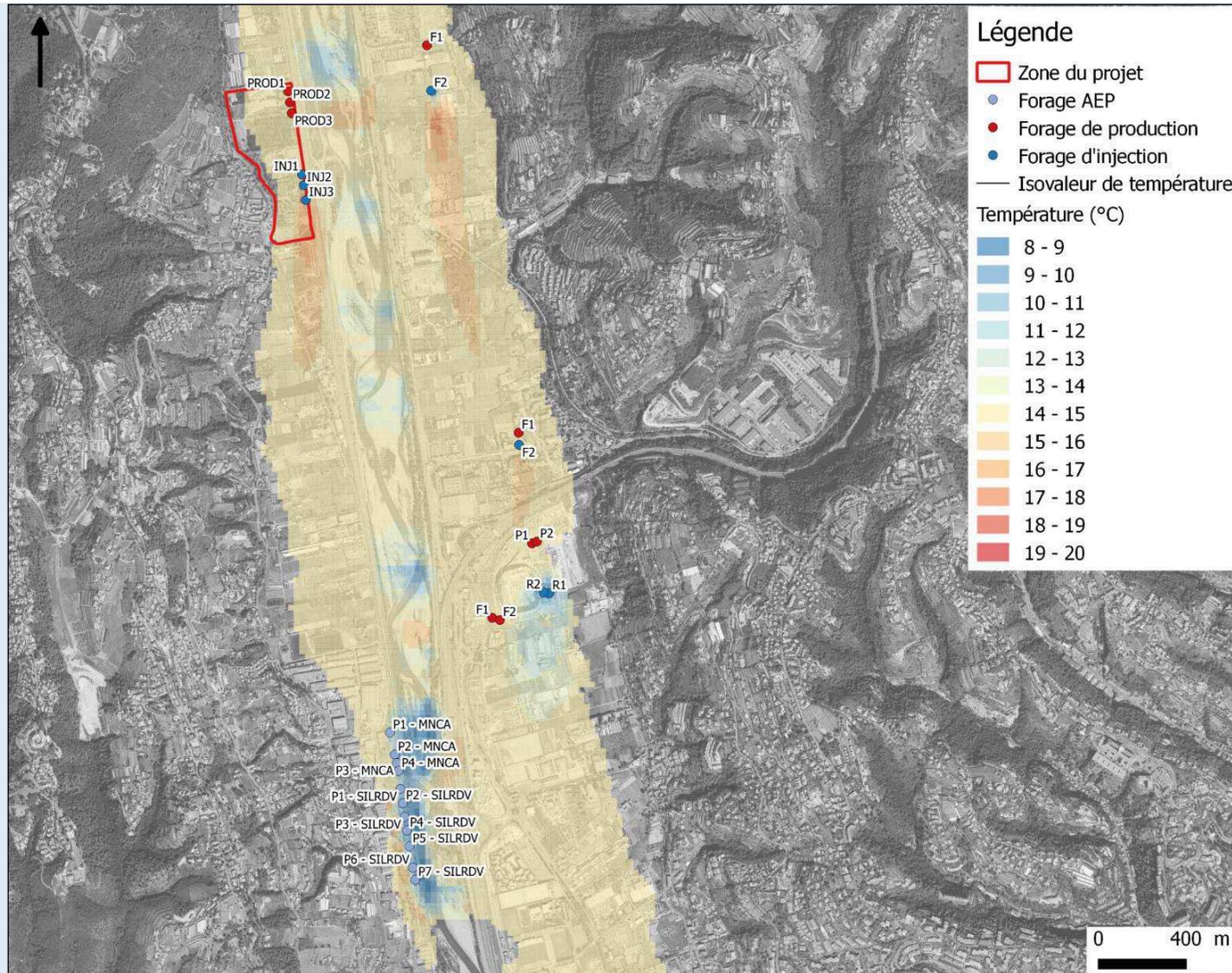


Figure 29 – Carte des températures après 2 ans d’exploitation

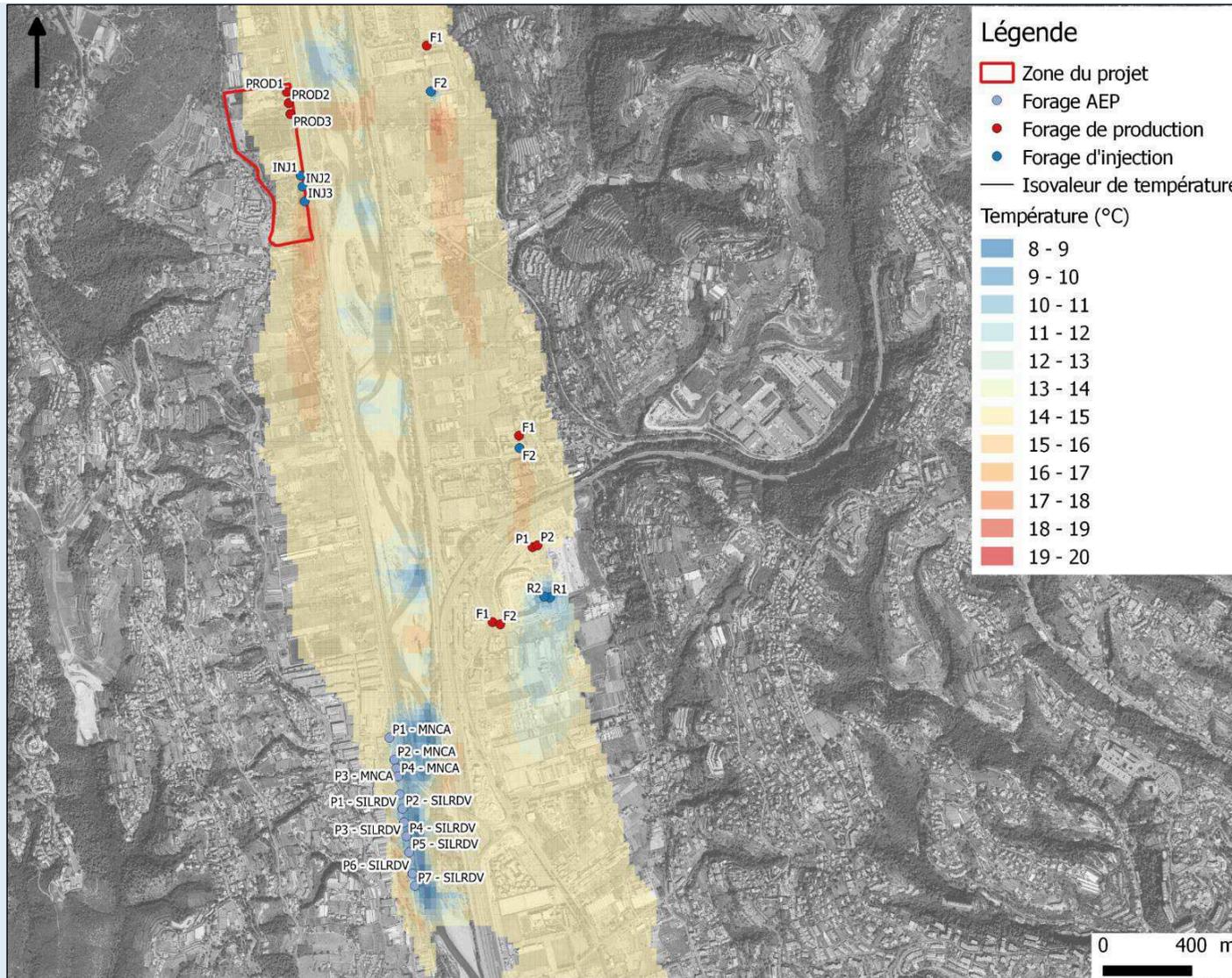


Figure 30 – Carte des températures après 3 ans d'exploitation

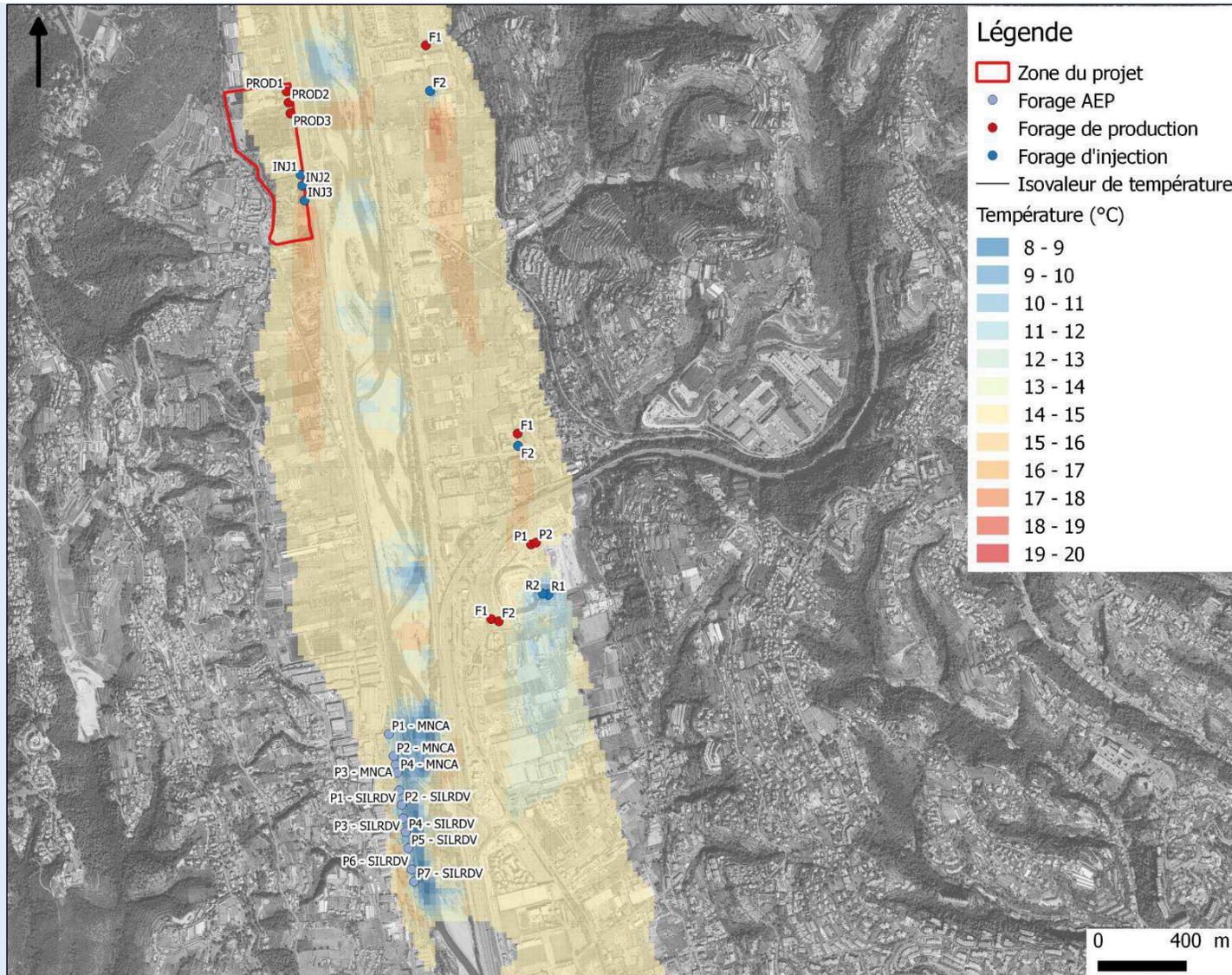


Figure 31 – Carte des températures après 5 ans d'exploitation

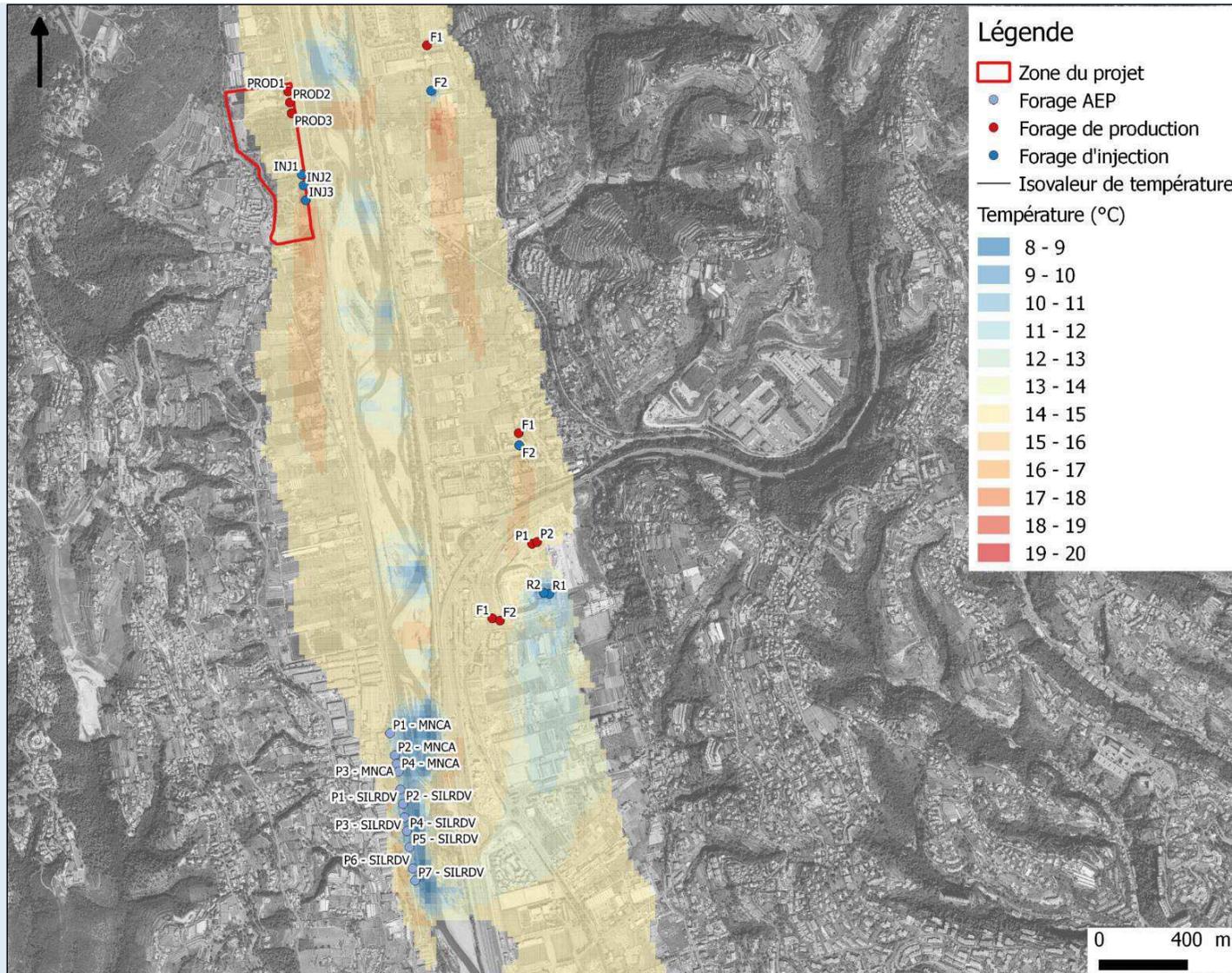


Figure 32 – Carte des températures après 10 ans d'exploitation

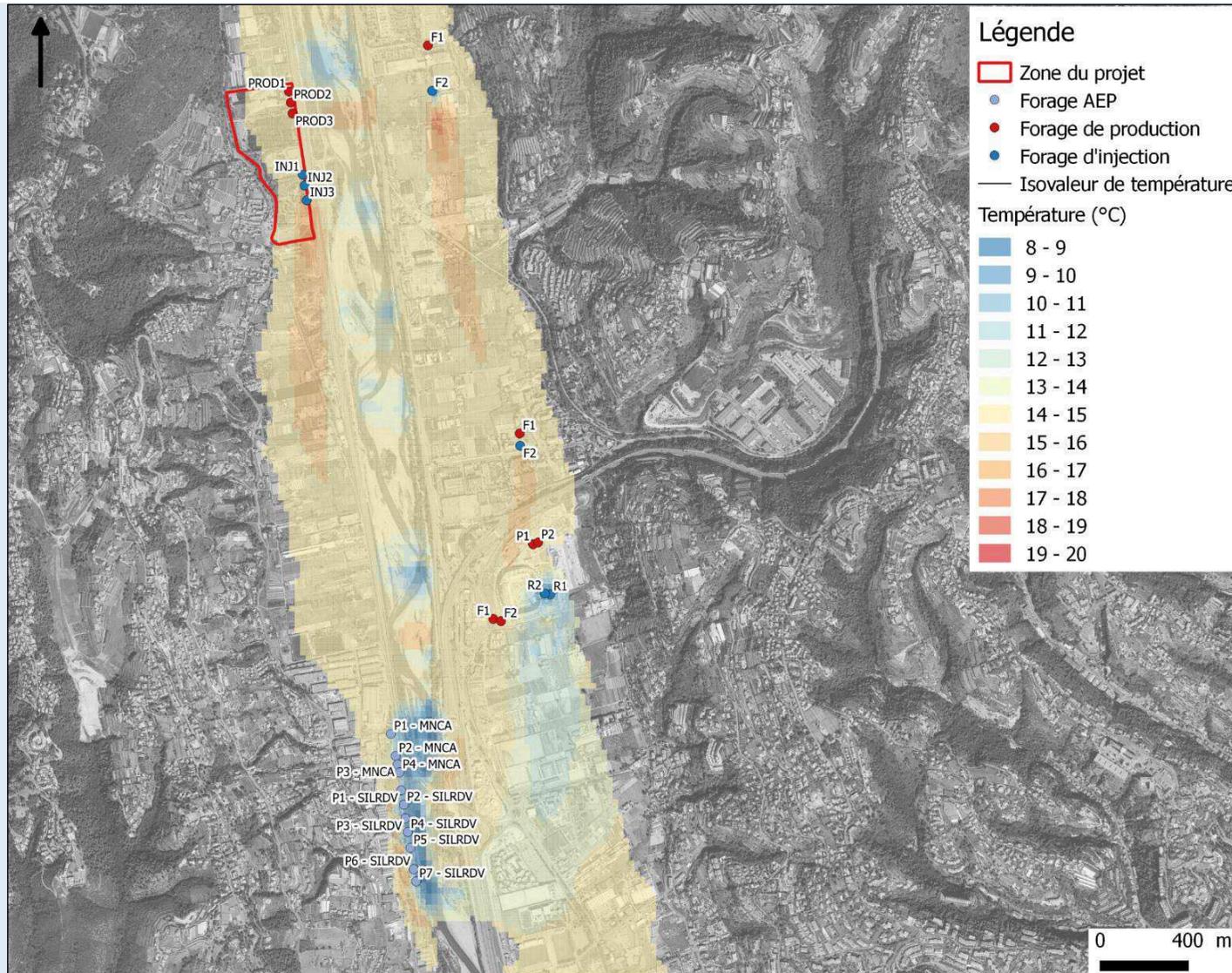


Figure 33 – Carte des températures après 15 ans d'exploitation

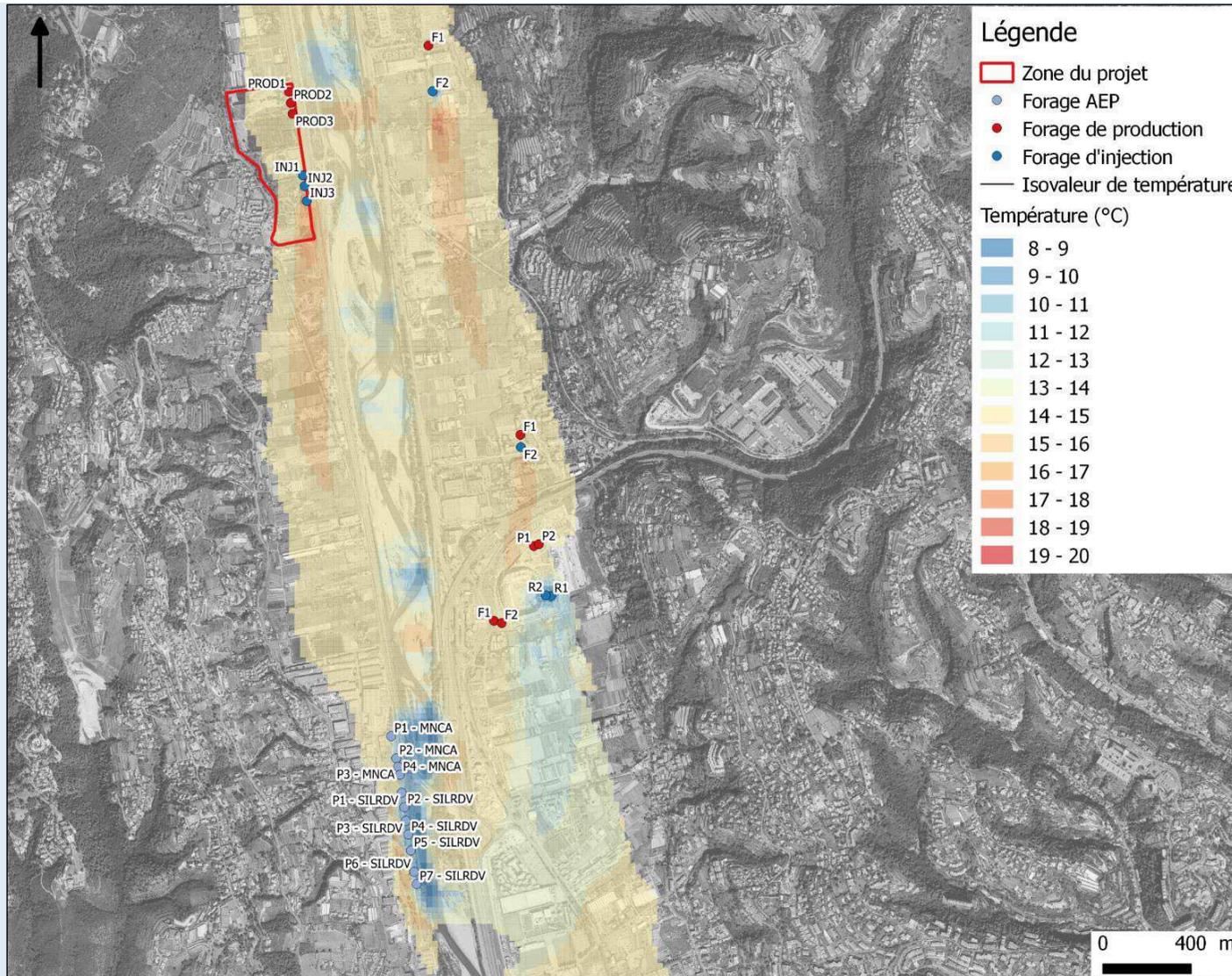


Figure 34 – Carte des températures après 20 ans d'exploitation

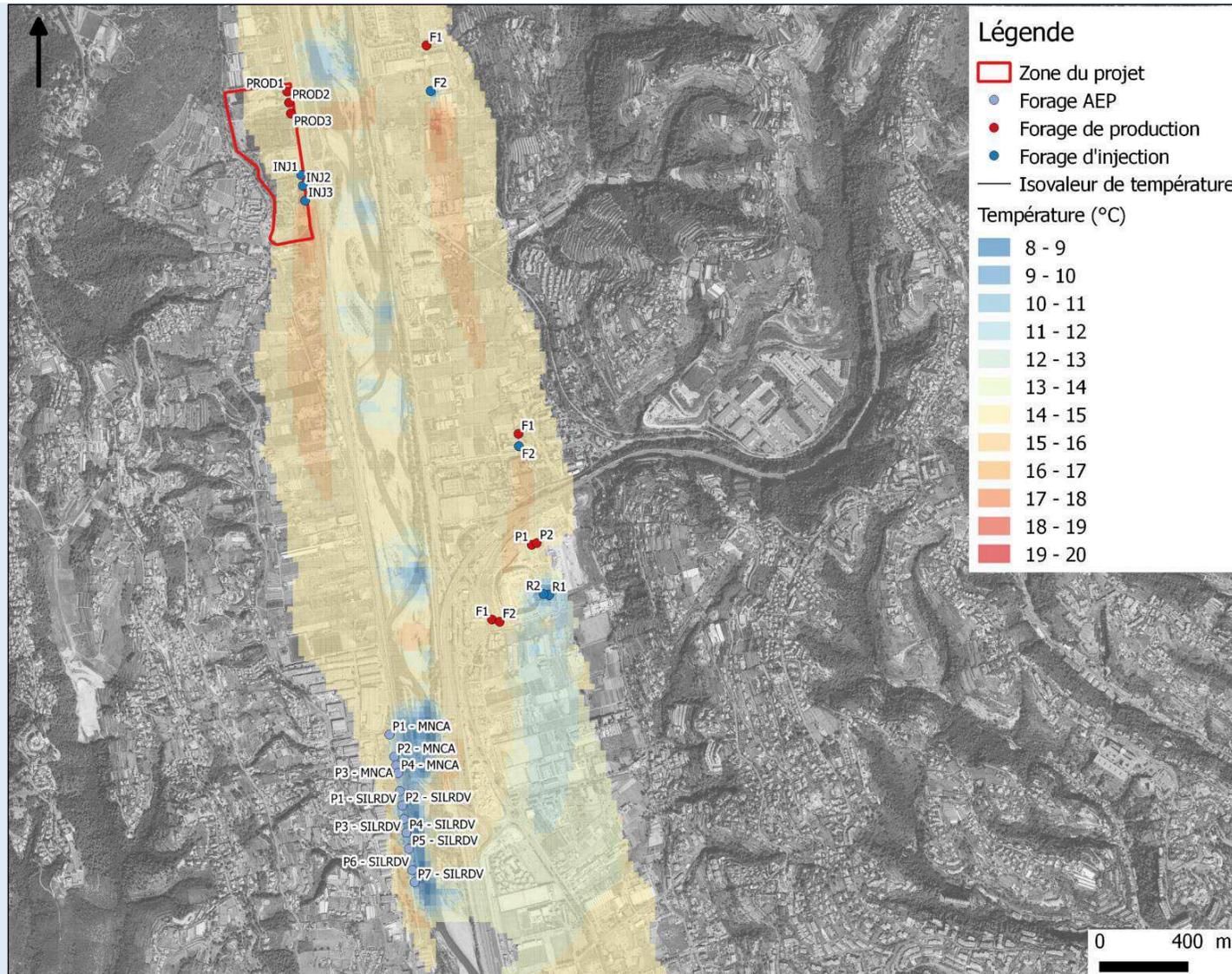


Figure 35 – Carte des températures après 25 ans d'exploitation

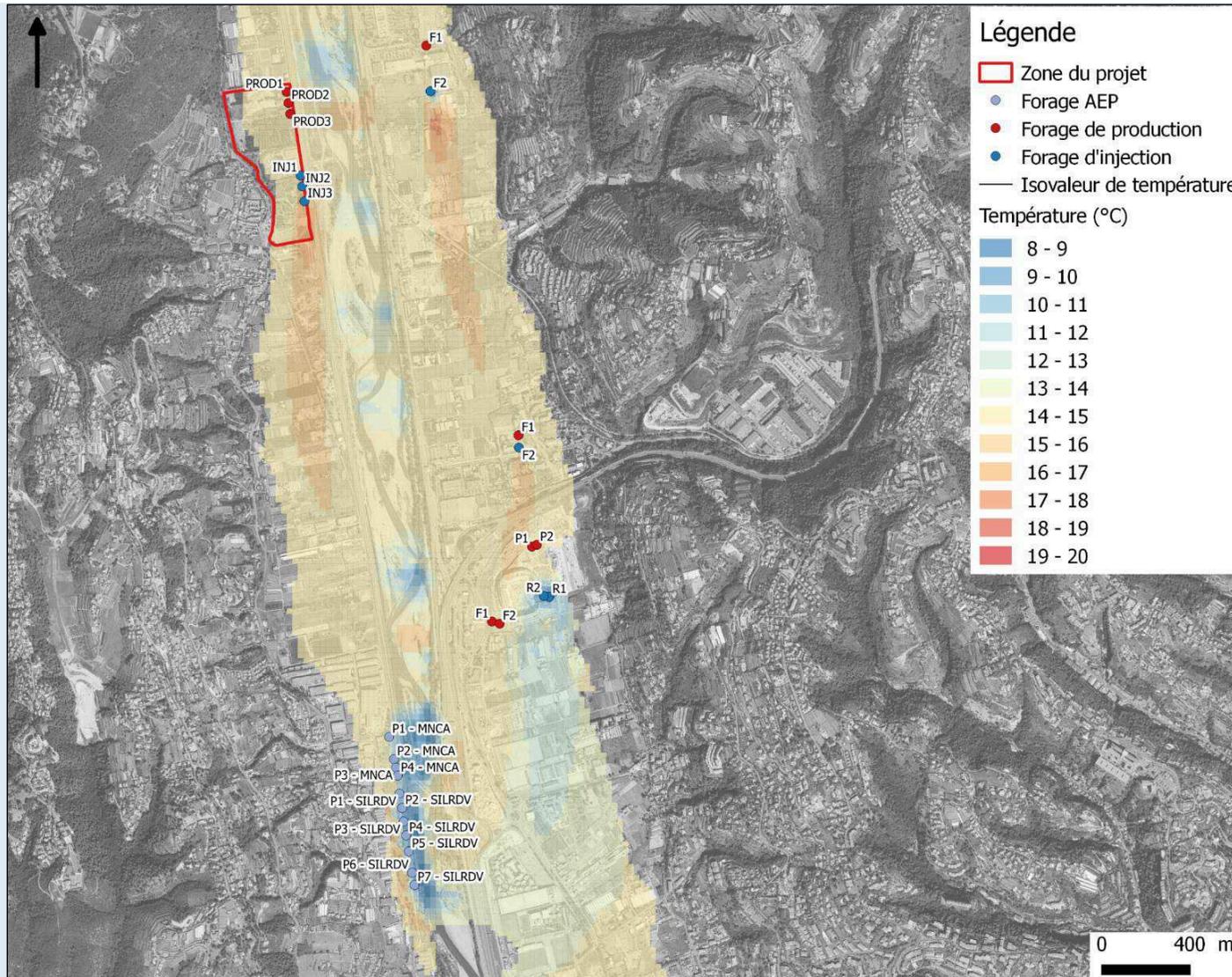


Figure 36 – Carte des températures après 30 ans d'exploitation

Conclusion sur la faisabilité en exploitation

Les calculs réalisés ont montré que l'exploitation est envisageable sur le plan hydrodynamique, sous réserve d'une validation in-situ des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère retenues dans le modèle.

L'impact sur la température de la nappe est suffisamment faible pour que l'exploitation thermique projetée soit validée. Il faut noter que le dispositif de géothermie et le mode de fonctionnement retenus ont été fortement optimisés (en termes de débit, de delta T...) par rapport à l'exploitation initialement envisagée par le BRGM, ce qui explique la très forte diminution des impacts hydrauliques et thermiques du projet.

La distance entre les producteurs et les injecteurs est telle qu'aux débits d'exploitation proposés, le recyclage des eaux est quasi-inexistant : la nappe a le temps d'évacuer les calories injectées avant que celles-ci ne soient pompées.

Il est donc recommandé d'exploiter l'installation selon les hypothèses de débit et de delta température considérés dans cette modélisation.