

Suivi d'un aquifère stratégique, la nappe alluviale du fleuve Var. Pour une gestion globale et raisonnée de la ressource en eau souterraine

David Sollima¹, et Anne-Laure Thaon², Alexandre Emily³, Guillaume Tennevin³, Christian Mangan⁴.

Au regard des forts enjeux d'alimentation publique en eau potable du littoral des Alpes-Maritimes, de la multiplicité des opérateurs et du manque total ou partiel de réseau de suivi, le Conseil départemental des Alpes-Maritimes a engagé, depuis 2003, une politique volontariste en matière de gestion des ressources stratégiques départementales. Des études d'amélioration des connaissances sur les eaux souterraines ont été menées afin de mieux comprendre le fonctionnement des aquifères, leurs relations et leurs potentialités. Un réseau de surveillance départemental a été créé et pérennisé. Il compte à ce jour près de 60 points de suivi, répartis sur plusieurs territoires et masses d'eau souterraines : la basse vallée du fleuve Var, les basses vallées de la Cagne, du Loup et de la Brague, le bassin versant des Paillons et la basse vallée de la Roya (Italie).

La basse vallée du fleuve Var : un territoire d'avenir à forts enjeux

Cet article présente la démarche volontariste de mise en œuvre et d'exploitation du réseau de suivi de la basse vallée du Var qui a été celle, menée par le Département des Alpes-Maritimes depuis 2003, puis transférée au Syndicat Mixte maralpin pour les Inondations, l'Aménagement et la Gestion de l'Eau (SMIAGE) depuis le 1^{er} janvier 2017 en tant que compétence opérationnelle dédiée à la gestion équilibrée de la ressource en eau. Ce réseau de surveillance unifié compte, à ce jour, 41 points de suivi (Fig.1) dont

32 sont exploités par le SMIAGE, en régie : deux agents y consacrent 110 jours par an. *L'aquifère alluvial de ce territoire présente, depuis toujours, un intérêt départemental stratégique* notamment au regard de la bonne qualité et du potentiel quantitatif élevé de la ressource et des pressions anthropiques d'aménagement de ce territoire de

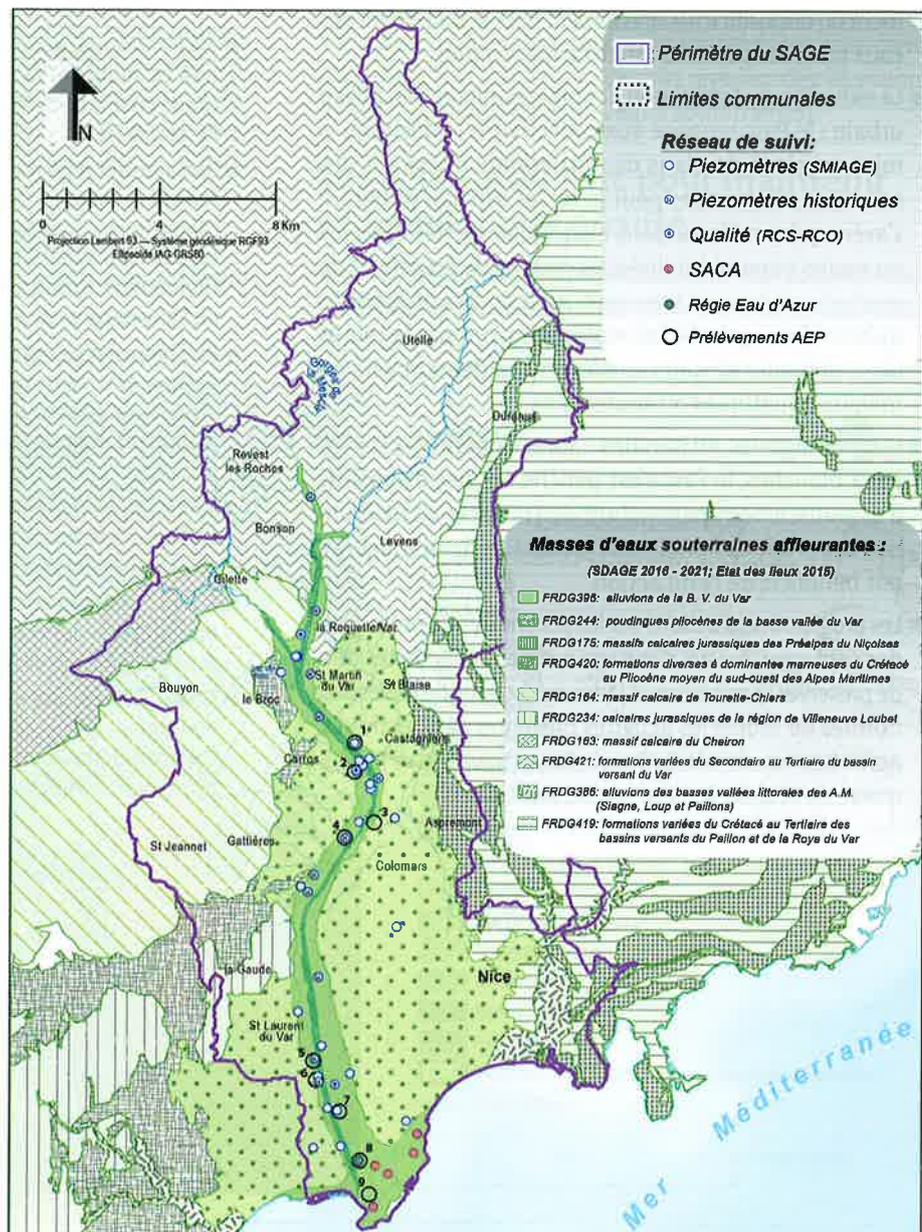


Figure 1. Localisation des piézomètres du réseau unifié et des champs captants de la basse vallée du Var. Source : travail personnel des auteurs sur MAP Info, V.11.5.

1. Ingénieur territorial au sein du SMIAGE Maralpin, au service du suivi de la ressource en eau souterraine et de l'appui technique à l'eau potable. Courriel : dsollima@departemento6.fr

2. Ingénieur territorial au sein du SMIAGE Maralpin, au service du suivi de la ressource en eau souterraine et de l'appui technique à l'eau potable. Courriel : althaon@departemento6.fr

3. Bureau d'études H2EA.

4. Cabinet d'études Mangan.

plus en plus élevées. Cette ressource en eau souterraine permet, en effet, l'alimentation publique en eau potable de près de 600 000 personnes du littoral, d'Antibes à Menton. L'AEP est l'usage principal et représente 90% des prélèvements. Cette nappe alluviale est actuellement exploitée sur neuf sites de production (voir figure 1) par : la Régie Eau d'Azur (champs captants des Prairies et des Sagnes à Nice, champ captant du Bastion et prise d'eau de secours du Roguez à Castagniers) ; la Métropole Nice Côte d'Azur (champs captants de Carros et des Pugets I à Saint Laurent-du-Var) ; le Syndicat Intercommunal du Littoral de la Rive Droite du Var (champ captant des Pugets II à Saint Laurent-du-Var) ; la Société du Canal de la Rive Droite du Var (puits de Carros-La-Manda) et la Société des Aéroports de la Côte d'Azur (aéroport de Nice), pour un prélèvement total annuel de l'ordre de 35 millions de m³.

Contexte hydrogéologique

Dans sa basse plaine, le fleuve Var circule sur un remplissage alluvial, surimposé à un épais dépôt de sédiments pliocènes ayant constitué un ancien delta du fleuve. Cet ensemble surmonte un substratum très variable et à géologie complexe comprenant pour l'essentiel, l'avant-pays provençal à l'Ouest et les chaînons subalpins de l'arc de Nice à l'Est. Les alluvions de la basse vallée du Var comblent le surcreusement incisé lors de la régression würmienne et se sont mises en place par la suite, lors de la remontée post-glaciaire et holocène. Les dépôts alluviaux s'étendent sur une trentaine de kilomètres de long, entre la Tinée et la mer, et remontent plus ou moins largement dans les diverses branches du réseau hydrographique. Ils constituent une plaine étroite qui s'élargit vers la confluence avec l'Estéron, au-delà de laquelle sa largeur évolue de 500 à 1 000 m jusqu'à la mer. Ce remplissage alluvial offre un profil caractéristique en « V » et son épaisseur dans l'axe croît notablement jusqu'au littoral marin, évoluant localement de 30 à 40 m en amont jusqu'à 100 à 130 m en aval. Les alluvions sont essentiellement constituées de matériaux sablo-graveleux intercalés de lentilles argileuses éparses, dans lesquels s'écoule la nappe libre superficielle. Les insertions argileuses augmentent dans la partie aval de la plaine, ce qui favorise l'individualisation de nappes semi-captives en relation avec la nappe libre. Plus près de l'embouchure du fleuve, d'épais niveaux argilo-vaseux à tourbeux sont également imbriqués dans le remplissage, où l'aquifère se digitalise alors en plusieurs nappes superposées, dont une nappe captive profonde. La nappe alluviale superficielle de la basse vallée du Var est largement alimentée par les eaux du fleuve. Les échanges sont relativement limités en basses eaux, mais apparaissent importants lors des crues où ils renouvellent

plus de 60% des eaux de la nappe. Les apports souterrains depuis les rives et le soubassement du remplissage alluvial jouent, également, un rôle de premier plan. C'est le cas des calcaires jurassiques en rive droite de la vallée sur la commune de La Gaude, et surtout des poudingues pliocènes sur la majorité de la plaine à l'aval du confluent Var-Estéron, où ils constituent le soubassement presque exclusif du remplissage alluvial.

Mise en place d'un réseau unifié : modernisation du réseau historique et création de nouveaux piézomètres

Historiquement, le lit du fleuve Var a été endigué afin d'assurer le développement agricole de la plaine. La surexploitation des gravières qui s'est développée dans les années 1950-1960 a entraîné un enfoncement important du lit et donc un abaissement de la nappe. Plusieurs seuils ont donc été construits dès 1970 afin de remonter et maintenir artificiellement le niveau de la nappe alluviale. Un réseau piézométrique historique a donc été mis en place par l'État, à cette période, sur la basse vallée du fleuve Var (voir figure 1). Créée en 1996, l'association nappe du Var composée de quatre membres (communauté urbaine Nice Côte d'Azur, syndicat intercommunal de l'Estéron et du Var inférieurs, syndicat intercommunal du littoral de la rive droite du Var et société des aéroports de la Côte d'Azur) a pris en charge la gestion de ce réseau de 11 piézomètres alluviaux. L'intervention technique du BRGM PACA a permis d'établir le suivi annuel piézométrique et qualitatif (bilan des analyses du contrôle sanitaire des champs captants) de la nappe. L'instrumentation était composée de limnigraphes à flotteurs, elle a été modernisée en 2008 par le Département des Alpes-Maritimes par la mise en pla-



Photo 1. Piézomètre équipé d'un module de télétransmission. Source : Cliché des auteurs.

ce de sondes numériques et de modules de télétransmission (Photo 1). Entre 2008 et 2016, vingt-et-un points ont ainsi été créés par le Conseil départemental des Alpes-Maritimes et équipés de sondes de mesure de pression, dont cinq inscrits dans le programme d'abaissement des seuils du fleuve et seize lors de campagnes d'exploration menées dans le cadre d'études hydrogéologiques majeures (HYDRATEC, 2009 ; Tennevin G., Emily A. (BE H2EA) ; Mangon Ch., 2010) ayant permis l'amélioration des connaissances sur la nappe alluviale et les nappes profondes et une meilleure compréhension de leur fonctionnement et de leurs relations. Huit piézomètres de 354 à 530 m ont été créés pour reconnaître les aquifères profonds de la basse vallée du Var, calcaires jurassiques et poudingues pliocènes, ces derniers jouant un rôle important dans l'alimentation de la nappe alluviale. **Ces reconnaissances ont permis notamment de mettre en évidence le fort potentiel de l'aquifère pliocène.**

La principale difficulté technique rencontrée pour la création de ce réseau a été l'identification de sites adaptés à la réalisation de forages, vis-à-vis des contraintes topographiques, foncières et de la forte urbanisation du littoral des Alpes-Maritimes. Afin d'assurer la pérennité des piézomètres, il a été décidé de créer ces ouvrages préférentiellement sur des parcelles publiques. Des conventions ont été élaborées pour chaque ouvrage entre les collectivités concernées et le Département des Alpes-Maritimes, permettant la bonne réalisation des travaux de forage et assurant l'accessibilité permanente nécessaire à la bonne gestion des ouvrages et de leurs instrumentations. Les travaux de modernisation du réseau historique et de création des piézomètres complémentaires ainsi que les études associées ont représenté un inves-

tissement public financier global de 1,5 millions d'euros. Ce programme départemental a été subventionné à hauteur de 70% par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et par l'Union Européenne (Fonds FEDER).

Instrumentation de mesure employée et application d'un protocole métrologique de gestion

Les piézomètres sont actuellement instrumentés par des sondes de mesure de pression (cellule de mesure à membrane céramique, avec une compensation de la pression atmosphérique), de température et pour certains, de conductivité électrique. Il s'agit de matériels de marque OTT France®, société retenue dans le cadre d'une commande publique. Ce sont des instrumentations spécifiques dédiées au monitoring environnemental, notamment au suivi des nappes d'eaux souterraines. Leur gamme de mesure de pression varie entre 0.4 et 10 bars, avec une précision de 0.05% ; la précision sur la température est de 0.5°C. Ces matériels sont fabriqués en Allemagne, ils sont fournis avec des longueurs de câble variables allant jusqu'à 200 m. Les points de surveillance sont à 90% équipés de dispositifs de télétransmission, via le réseau GSM permettant l'envoi quotidien des données vers l'interface informatique du SMIA-GE avec incrémentation directe de la base de données brutes. Les logiciels utilisés sont Hydras3 et Hydras3Rx. Un protocole métrologique commun et unique (Fig. 2) a été mis en place et activé en interne au vu du grand nombre de points suivis (10 000 données générées par mois), de l'étendue géographique importante du réseau (six bassins versants concernés) et de sa gestion en régie.

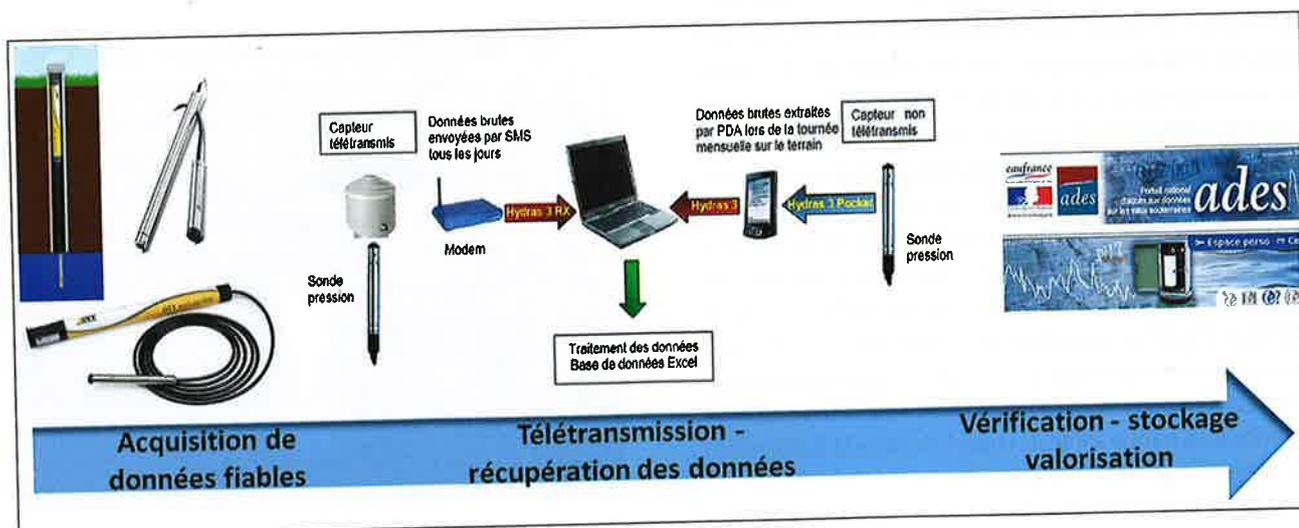


Figure 2. Synoptique métrologique relatif à l'acquisition, la validation et la diffusion des données. Source : travail personnel des auteurs.

Cette approche métrologique permet une surveillance préventive des installations, et assure la fiabilité des données à des fins de partage et de diffusion. Des indicateurs de traçabilité sont mis en place : suivi hebdomadaire des télétransmissions, fiches papier d'interventions et de maintenance curative et fichier informatique de consigne unique centralisé. Dans une logique préventive des installations, des campagnes de vérification sur le terrain sont réalisées trimestriellement. Lors de ces visites, sont vérifiés les abords du piézomètre, l'état extérieur du forage, le dispositif de fermeture puis le fonctionnement de l'instrumentation. Un recalage du niveau d'eau est éventuellement réalisé par comparaison à une mesure piézométrique in situ. Enfin, chaque visite fait l'objet d'une récupération systématique des données des trois derniers mois. Afin de s'assurer de l'état de santé du réseau, chaque semaine une vérification des données télétransmises est effectuée. Dans le cas de dysfonctionnements avérés, une intervention curative sur site est déclenchée sous sept jours afin de remettre en service le dispositif de mesure et, le cas échéant, d'assurer le remplacement immédiat de la sonde dans le cas d'un envoi en SAV du matériel, pour permettre la continuité de la chaîne de mesure. À l'échelle trimestrielle, les chroniques piézométriques sont validées et si nécessaire, recalées avant leur mise en ligne sur la plateforme ADES (portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines), accessible au grand public (voir figure 2).

Mise en place d'une gouvernance

La démarche menée par le Département des Alpes-Maritimes et poursuivie par le SMIAGE, s'inscrit dans une logique de partenariat technique, d'échange de données et de partage des connaissances. Une convention de partenariat a été signée en 2013, entre le Département, les producteurs publics d'eau potable de la basse vallée (métropole Nice Côte d'Azur, syndicat intercommunal du littoral de la rive droite du Var, syndicat intercommunal de l'Estéron et du Var inférieurs) et l'aéroport de Nice (société des aéroports de la Côte d'Azur). Cette convention a permis d'inclure au réseau départemental neuf points complémentaires gérés par les partenaires. Ce réseau unifié de la basse vallée du Var compte au total 41 points (voir figure 1). Cette collaboration conduit annuellement à la réunion d'un comité de suivi élargi composé notamment des partenaires techniques, des services de l'État, de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée et de la Chambre d'agriculture. À cette occasion, le rapport annuel de suivi des nappes du Var de l'année écoulée est présenté ; il intègre

les données de l'ensemble des partenaires (piézométrie, conductivités et volumes de prélèvements) et fait état du contexte pluviométrique nécessaire à l'analyse des piézométries. Ce suivi rend compte également du contexte hydrologique du fleuve Var (données de la DREAL PACA-station Pont Napoléon III à Nice), principale alimentation de la nappe alluviale ainsi que de l'évolution annuelle des chroniques piézométriques selon trois secteurs de la nappe, d'amont en aval. **Le secteur aval est sujet à la plus grande partie des prélèvements. De ce fait, ce secteur fait l'objet d'une surveillance accrue** aussi bien sur le suivi piézométrique que sur la prévention du risque d'intrusion d'eaux marines. Pour ce faire, un focus est réalisé sur les piézomètres situés dans les champs captants des Sagnes à Nice et des Pugets I et II à Saint Laurent-du-Var. Une analyse des volumes prélevés est également présentée pour mieux appréhender cette analyse quantitative. Pour l'aspect qualitatif, sont présentées les données de conductivité de la nappe à plusieurs profondeurs sur plusieurs points de suivi. Ainsi, ce comité constitue un lieu de discussions et d'échanges techniques sur le suivi de la ressource et les stratégies de prélèvements. Par ailleurs, le SMIAGE intervient auprès des services de l'État (DDTMO6, ARS-DTO6) en tant que producteur de données, notamment dans le cadre de comités sécheresse. Cela a été le cas en 2016 et 2017. Cette démarche s'intègre dans le SAGE nappe et basse vallée du fleuve Var (voir figure 1) qui a été approuvé le 9 août 2016 et dont un de ses objectifs est la préservation de la ressource en eau avec, comme préconisation, la mise en place d'une gestion globale de la ressource souterraine.

Suivi des intrusions d'eaux marines : action développée depuis 2013

Au regard de la position côtière de la partie terminale de la nappe et des forts enjeux actuels et futurs liés à l'exploitation de la ressource alluviale pour l'usage AEP, un contrôle au cours du temps de l'évolution des intrusions d'eaux salines a été engagé par le Département, en 2013, dans le cadre du partenariat sur la basse vallée du fleuve Var. Il s'agissait, dans un premier temps, d'initier une bancarisation de données avec la mesure en continu des conductivités électriques de la nappe alluviale, sur trois secteurs, à plusieurs profondeurs (Fig. 3). Ce monitoring, piloté par le SMIAGE, a été complété depuis 2015 par la réalisation d'analyses chimiques en périodes d'étiage, sur certains points, afin de caractériser les fortes conductivités mesurées en profondeur. Une étude bibliographique préalable (Hsissou Y., Mudry J., Mania J., Bouchaou L. ; Chauve P., 1999 ; ONEMA ; BRGM, 2011) a permis de cibler les principales espèces conser-

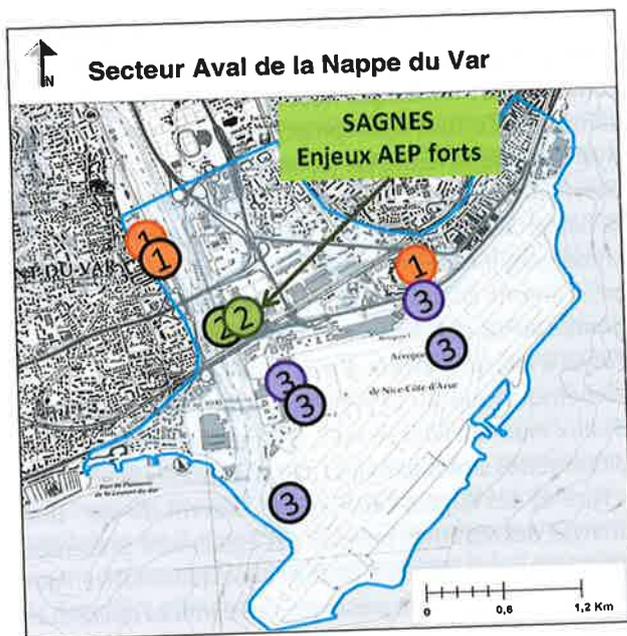


Figure 3. Carte de localisation des points de surveillance d'intrusions d'eaux marines. Source : d'après « SAGE Nappe et Basse Vallée du Var ». Légende : orange : ouvrage géré par le SMIAGE ; vert : ouvrage géré par la Régie Eau d'Azur ; violet : ouvrage géré par la société des aéroports de la Côte d'Azur ; cercle noir : nappe alluviale profonde ; cercle de couleur : nappe alluviale superficielle.

vatives d'eaux marines permettant de calculer un pourcentage d'intrusion : les bromures, les chlorures, la conductivité électrique et dans une moindre mesure, le bore. Cette action est menée en collaboration avec l'Université de Nice Sophia-Antipolis (Laboratoire Géozur / Département de chimie : Barats A. et Renac Ch.) pour la recherche d'éléments traces (18) afin d'établir un diagnostic environnemental fin et d'essayer d'appréhender les divers flux des systèmes.

Prélèvements et suivi de la conductivité de la nappe

Cinq campagnes de prélèvements et d'analyses chimiques ont été réalisées, entre 2015 et 2017. Pour une bonne représentativité des échantillons, l'emploi d'un préleveur pneumatique de marque SOLINST® a été privilégié dès la campagne d'octobre 2016. Les stations de suivi sont les suivantes (Fig. 3) :

- d'une part, les deux piézomètres de Point-du-Jour, à St-Laurent-du-Var (rive droite), gérés par le SMIAGE. Ces piézomètres alluviaux sont interdistantes de 2 m : l'un est superficiel (25 m de profondeur et crépiné de -16 à -25 m), l'autre est plus profond (70 m de profondeur, crépiné de -35 à -70 m). Ils sont équipés de trois sondes de mesure de conductivité, positionnées à trois profondeurs différentes. À -20 m, les conductivités varient entre

530 et 710 $\mu\text{S}/\text{cm}$; cette variation est fortement liée à l'hydrologie du Var en relation directe avec la nappe libre. À -40 m, les conductivités varient entre 620 et 1 050 $\mu\text{S}/\text{cm}$ selon la saison (influence des apports du Var en hautes eaux et contamination par les eaux profondes en période d'étiage). À -60 m, les conductivités évoluent en quasi permanence entre 1 020 et 1 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$;

- d'autre part, les deux piézomètres nord et sud du champ captant des Sagnes (interdistants de 10 m), à Nice, en rive gauche du Var, gérés par la Régie Eau d'Azur. Les profondeurs de mesure sont -14 m en nappe alluviale libre et -40 m en nappe alluviale semi-captive. À -14 m, les conductivités oscillent entre 530 et 670 $\mu\text{S}/\text{cm}$, liées à la piézométrie de la nappe libre en relation directe avec le Var. On retrouve donc des valeurs similaires à celles de Point-du-Jour, en nappe superficielle. À -40 m, les conductivités varient entre 850 et 1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On retrouve, à cette profondeur, des valeurs de conductivités plus élevées que celles mesurées en nappe libre, aux Sagnes et similaires à celles de Point-du-Jour à même profondeur.

Sur la plateforme aéroportuaire de Nice, deux points de suivi de la conductivité de la nappe alluviale superficielle (ouvrages de 10 m de profondeur) enregistrent des valeurs comprises entre 950 et 1 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur le secteur Est ; les conductivités sont moins élevées sur le secteur Ouest de l'aéroport, entre 450 et 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs plus basses s'expliquent par la proximité de ce secteur au lit actif du fleuve Var, la nappe étant donc directement alimentée par le cours d'eau et moins soumise aux influences d'eaux marines. Concernant la nappe alluviale profonde (entre 50 et 100 m de profondeur), les conductivités varient entre 500 et 6 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, les plus fortes valeurs enregistrées étant celles mesurées aux plus grandes profondeurs. Ces gammes de conductivités révèlent ainsi des influences d'eaux marines ; en considérant le caractère conservatif de ce paramètre, le taux d'intrusion serait de l'ordre de 10%. Notons tout de même que les prélèvements d'eau potable de l'aéroport de Nice se font exclusivement en nappe profonde (captée à environ 50 m de profondeur) et que ces eaux présentent constamment des conductivités conformes⁵ à la réglementation des eaux destinées à la consommation humaine. Un suivi annuel des piézométries et des conductivités du réseau de surveillance de l'aéroport conclut à une alimentation significative très probable de la nappe alluviale profonde par l'encaissant, expliquant la limitation du phénomène d'intrusion d'eaux marines sur cette plateforme aéroportuaire située sur la mer.

Signature chimique de l'eau de mer

Les ions chlorures (Cl^-) et sodium (Na^+) sont les

5. 180 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C selon le Code de la Santé Publique.

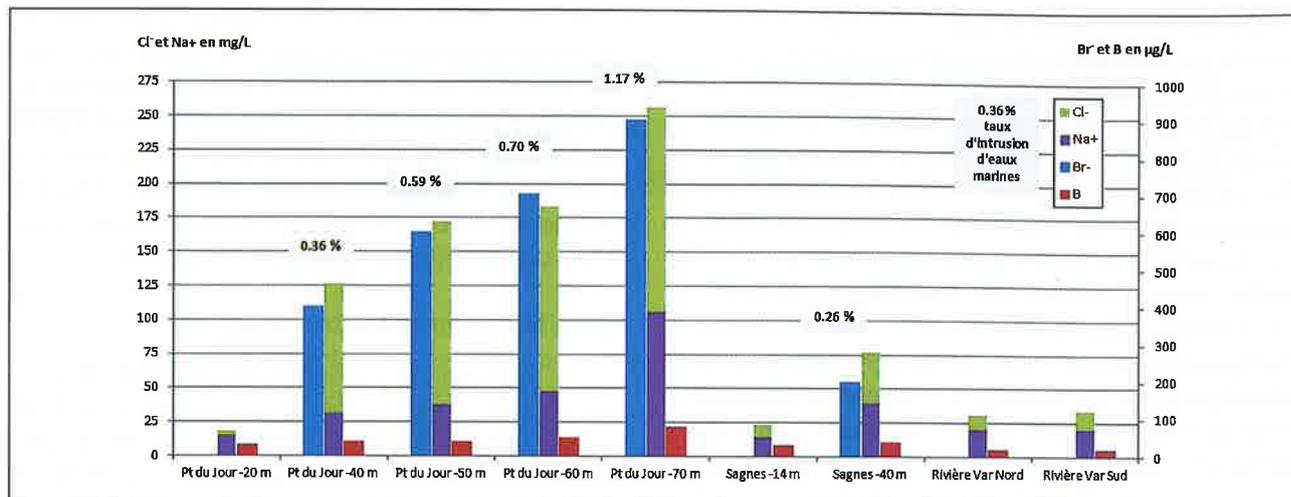


Figure 4. Concentrations des ions chlorures Cl⁻, sodium Na⁺, bromures Br⁻ et du bore des eaux superficielles et souterraines au Point-du-Jour (Saint Laurent-du-Var) et aux Sagnes (Nice) – campagne d’octobre 2016. Source : travail personnel des auteurs.

deux espèces chimiques majoritaires de la composition de l’eau de mer, à des teneurs respectives de 21.6 g/L et 11.9 g/L (analyse d’eau de mer à Nice - plage de Carras réalisée en octobre 2016). Sa conductivité électrique est d’environ 54 000 µS/cm. Concernant les éléments traces, en octobre 2016, cinq éléments ont révélé des teneurs bien plus importantes dans l’eau de mer que dans les eaux de rivière ou les eaux souterraines : le lithium (Li), le rubidium (Rb), le strontium (Sr), le molybdène (Mo) et l’uranium (U). Les concentrations dans l’eau de mer sont pour le Li de 15 à 25 fois plus importantes, pour le Rb de 100 à 400, pour le Sr de 6 à 8, pour le Mo de 10 à 20 et pour U de 3 à 4. Une augmentation des concentrations de ces cinq éléments pourrait donc être une bonne indication d’apports d’eau de mer ou bien de la remise en solution de ces éléments contenus dans le réservoir sédimentaire suite à un changement des conditions physico-chimiques du milieu. D’après la bibliographie, ces éléments ne sont pas conservatifs. L’évolution de leurs teneurs résulterait à la fois de phénomènes directs de dilution

eaux douces/eaux de mer, et de phénomènes indirects d’interaction avec le substrat géologique de l’aquifère (sorption/désorption, précipitations/dissolutions). Ils sont tout de même des traceurs qualitatifs de ce phénomène de façon très sensible.

Quantification des apports en eau de mer dans les eaux souterraines

En octobre 2016 (en période d’étiage avancé), ce suivi a montré une augmentation des teneurs en ions majeurs notamment Cl⁻, Br⁻, Na⁺ et une hausse du bore avec la profondeur, aussi bien à Point-du-Jour qu’aux Sagnes (Fig. 4). À titre d’illustration, la teneur en Cl⁻ enregistrée à -70 m à Point-du-Jour a été de 256 mg/L. Cela explique donc les fortes conductivités électriques enregistrées, depuis plusieurs années. L’apport d’eaux de mer en profondeur est confirmé par ces premiers résultats. Il a été estimé aux Sagnes, à -40 m de profondeur, un taux d’intrusion d’eaux marines de 0.26%. À Point-du-Jour, cet apport a été estimé à 0.36% à -40 m de profondeur et à

Octobre 2016	Sr	Mn	Tl	Ba	Zn	Li	Co	Cu	Pb	As	Rb	U	Mo	Cs	Ag	Cd	W	Al
Point du Jour -20m	1327	34,6	4,99	39,6	2,40	9,78	1,06	1,15	0,327	0,719	0,285	1,17	0,614	<0,000€	0,097	<0,004	<0,004	196
Point du Jour -40m	1414	28,2	24,2	46,1	3,92	11,3	0,479	1,42	0,981	2,06	2,94	1,30	0,529	<0,000€	<0,01	<0,004	<0,004	636
Point du Jour -50m	1558	20,9	17,4	51,4	2,76	11,5	0,435	1,13	0,861	2,39	3,62	1,38	0,564	<0,000€	<0,01	<0,004	<0,004	514
Point du Jour -60m	1667	87,9	43,2	67,8	10,1	11,2	1,32	3,07	3,63	4,77	4,81	1,66	0,524	0,076	0,476	<0,004	<0,004	1555
Point du Jour -70m	1569	229	69,1	70,7	39,1	18,7	3,59	11,9	10,1	6,50	6,90	2,44	1,90	0,309	0,38	0,097	<0,004	3091
Sagnes -14m	1289	3,19	1,24	36,2	0,282	9,73	0,091	0,340	0,097	0,428	0,118	1,06	0,574	<0,000€	<0,01	<0,004	<0,004	20,7
Sagnes -40m	1388	38,0	10,9	35,1	6,31	11,8	0,370	2,54	2,13	1,77	0,999	0,95	0,488	<0,000€	<0,01	<0,004	<0,004	346
Var N	1738	2,52	1,41	30,3	0,851	15,6	0,249	0,498	0,121	3,04	1,33	1,21	1,285	0,048	<0,01	<0,004	<0,004	47,1
Var S	1712	1,64	1,11	30,7	1,12	12,4	0,200	0,540	0,122	2,97	1,30	1,28	1,305	0,045	<0,01	<0,004	<0,004	37,0
Eau de mer	9110	1,52	3,63	6,58	ND	231	0,598	ND	0,743	ND	140	4,82	13,1	<0,06	<0,1	<0,04	<0,04	ND

* caractéristique de l’eau de mer ND : données non disponible

Figure 5. Concentrations des 18 éléments traces recherchés dans les différents compartiments échantillonnés lors de la campagne d’octobre 2016. Source : travail personnel des auteurs.

1.17% à -70 m (voir figure 4). Notons qu'à la profondeur -40 m, le pourcentage d'intrusion d'eaux marines semble un peu plus élevé à Point-du-Jour qu'aux Sagnes alors que la station des Sagnes est située à environ 1 km de l'embouchure du fleuve Var et que celle de Point-du-Jour est bien plus éloignée, à environ 2 km de distance de l'embouchure. Les ions Na^+ évoluent différemment des ions Cl^- , leur augmentation avec la profondeur est moins forte (espèce non conservative), très probablement parce que des échanges cationiques ont lieu au sein du substrat géologique de l'aquifère entre Na^+ et Ca^{2+} ou Mg^{2+} . Le calcul du rapport Na^+/Cl^- montre une anomalie sur le sodium entre -40 m et -60 m à Point-du-Jour. Le rapport Br^-/Cl^- évolue entre 0.14 et 0.16% entre -40 et -70 m à Point-du-Jour et il est de 0.12% aux Sagnes à -40 m. Ce rapport est un indicateur pertinent d'eau de mer entre deux espèces conservatives ; ces valeurs confirment la présence d'eaux marines en profondeur. Les concentrations de Li, Rb, Sr, Mo, Ba et U augmentent avec la profondeur (Fig. 5). A -70 m à Point-du-Jour, leurs concentrations sont nettement plus importantes qu'aux autres profondeurs. Les variations des cinq éléments traces, définis comme potentiels traceurs de l'eau de mer, confirment donc les résultats obtenus avec les ions majeurs, c'est à dire un apport d'eau de mer en profondeur, surtout à -70 m. L'apport en eau de mer semble bien plus important que sur le site de Sagnes.

Ces observations sont aussi valables pour tous les autres éléments traces, montrant une forte augmentation avec la profondeur notamment en dessous de -60 m. Par contre, l'eau de mer n'est pas enrichie en ces autres éléments traces. En conséquence, leur augmentation dans les eaux souterraines profondes n'est pas liée directement à un apport d'eau de mer mais résulte de modifications du milieu. Pour essayer de calculer un taux d'intrusion, seuls les cinq éléments traces spécifiquement enrichis dans l'eau de mer ont été utilisés et particulièrement sur le site de Point-du-Jour pour l'échantillonnage d'octobre 2016. L'ion Cl^- a été démontré précédemment comme un traceur des arrivées d'eau mer. Les enrichissements en éléments traces dans les eaux souterraines en profondeur devraient donc être proportionnels à celui du Cl^- si l'on émet l'hypothèse qu'ils sont conservatifs (dans ce cas, nous pourrions les utiliser comme traceurs quantitatifs, comme vu pour les ions majeurs). De manière générale, ces ratios sont variables et démontrent donc des phénomènes non conservatifs de ces éléments traces. Ceci est en accord avec la bibliographie qui suppose qu'aucun élément trace ne serait conservatif, que ce soit les cinq spécifiques à l'eau de mer ou les autres étudiés. Cela signifie donc que l'évolution des teneurs en éléments traces, dans les eaux souterraines, serait la résultante à la fois de phénomènes

directs de dilution entre eaux douces et eaux salées et de phénomènes indirects liés à une interaction avec l'aquifère (sorption/désorption, précipitations/dissolutions). Ces éléments ne sont donc pas des traceurs quantitatifs des apports en eau de mer. Les estimations établies de la proportion d'eau de mer entrant dans les eaux souterraines sont donc erronées et conduisent dans notre cas, à une surestimation des apports en eau de mer.

Qualité des eaux souterraines

Les teneurs en éléments traces sont généralement peu élevées et en-dessous des normes de potabilité, démontrant la bonne qualité des eaux souterraines prélevées. En octobre 2016, une hausse des teneurs de ces éléments traces a été observée avec la profondeur, particulièrement sur le site de Point-du-Jour, notamment pour le plomb, l'arsenic, le cuivre, le cobalt, l'uranium, le zinc (voir figure 5). Pour certains éléments, les concentrations atteintes peuvent même être proches ou égales aux limites réglementaires des eaux destinées à la consommation humaine (Pb 10.8 $\mu\text{g/L}$ et As 6.5 $\mu\text{g/L}$; la limite de qualité étant de 10 $\mu\text{g/L}$), voire même au-delà pour le Mn et l'Al (Mn 229 $\mu\text{g/L}$ et Al 3091 $\mu\text{g/L}$, les normes étant respectivement de 50 et 200 $\mu\text{g/L}$).

Conclusion

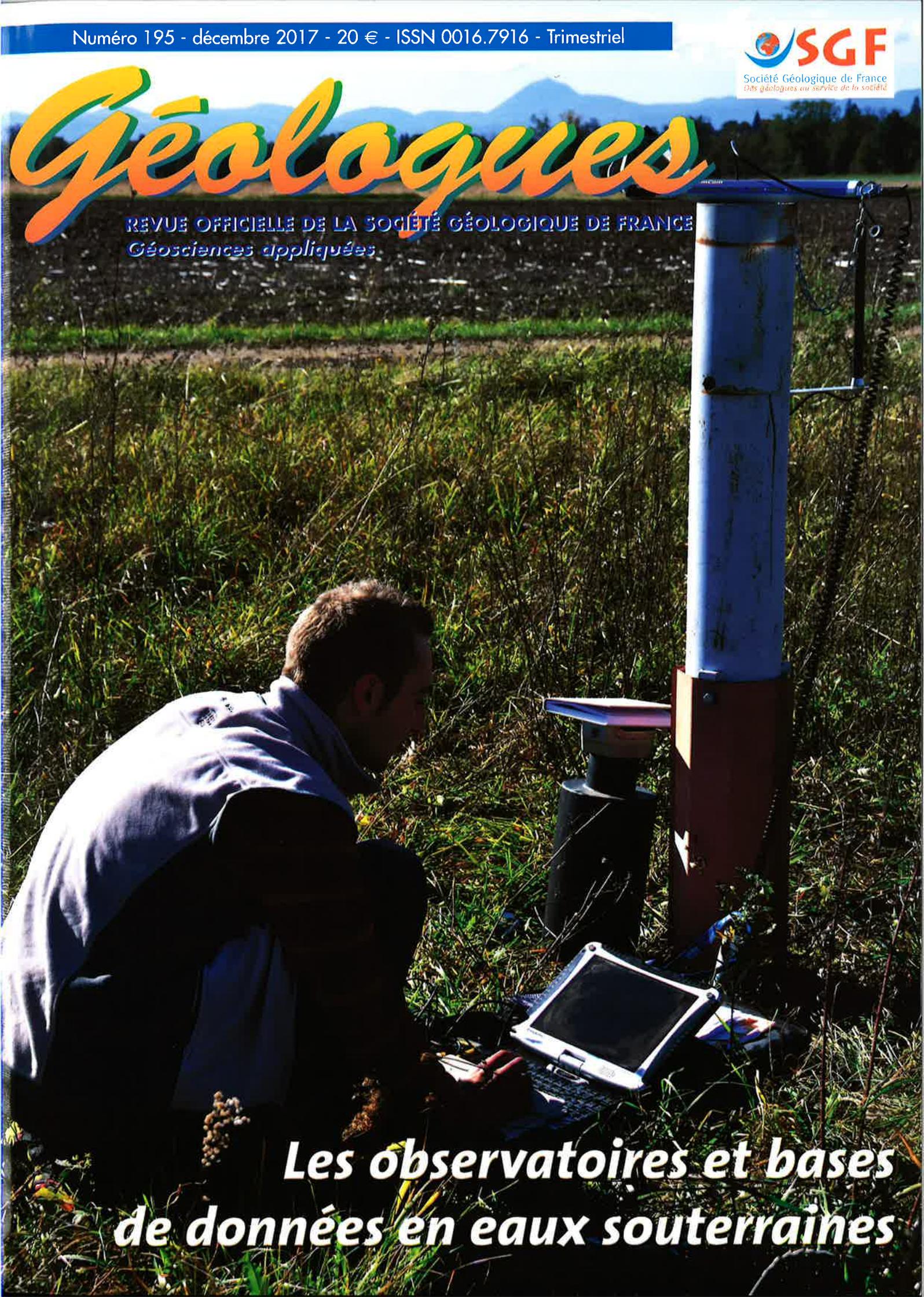
Ces suivis piézométriques et analytiques s'inscrivent dans une démarche préventive afin d'améliorer les connaissances, de veiller à la bonne qualité des nappes et de permettre une gestion raisonnée de la ressource en eau souterraine. Par ailleurs, l'utilisation d'éléments traces s'est avérée être un outil pertinent pour détecter l'apport ou l'évolution d'éventuels contaminants.

Bibliographie

- Hsissou Y., Mudry J., Mania J., Bouchaou L. et Chauve P., 1999. Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines : exemple de la plaine du Souss (Maroc). Comptes-rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science (381-386).
- ONEMA ; BRGM, 2011. Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau. Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques 123 p.
- HYDRATEC, 2009. Étude de la vulnérabilité de la nappe alluviale du Var aux aléas climatiques secs sévères. Rapport public commandé par le Conseil général des Alpes-Maritimes 122 p.
- Tennevin G., Emily A. (BE H2EA), Mangan Ch., 2010. Étude hydrogéologique des nappes profondes de la basse vallée du Var. Rapport public commandé par le Conseil Général des Alpes-Maritimes 101 p.

Géologues

REVUE OFFICIELLE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE
Géosciences appliquées



***Les observatoires et bases
de données en eaux souterraines***