HAL
open science

Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral

Nathalie Dörfliger

To cite this version:

Nathalie Dörfliger. Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral. Géosciences, 2013, 17, pp.74-81. hal-01062271

HAL Id: hal-01062271

https://brgm.hal.science/hal-01062271

Submitted on 9 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Face à l'augmentation des populations sur le littoral et au changement climatique, les ressources en eau souterraine sont au centre des préoccupations pour les années à venir. Les eaux souterraines sont, dans les terrains en continuité entre terre et mer, en équilibre fragile avec les eaux salées des océans. L'eau douce est déchargée dans les océans de manière diffuse ou ponctuelle, l'eau salée pénètre le continent en fonction des conditions naturelles et d'exploitation. La localisation de cette interface et la compréhension de son fonctionnement sont essentiels pour assurer une gestion durable des ressources en eau.

Entre terre et mer, les eaux souterraines du littoral

Nathalie Dörfliger

Hydrogéologue, directrice, Direction Eau, Environnement et écotechnologies, BRGM
n.dorfliger@brgm.fr

Source de la Vise dans l'étang de Thau, Balaruc-les-Bains (Hérault, Sud de la France).

La Vise spring in the Thau laguna, Balaruc-les-Bains (Hérault, southern France).

© M. Bakalowicz.

Les zones côtières sont définies comme les zones à terre dont l'environnement, le climat et l'économie sont fortement influencés par la présence proche de la mer ; elles ont une largeur moyenne de 50 km et occupent moins de 15 % de la surface totale du globe. Plus de 60 % de la population mondiale vit dans ces zones littorales. Elles attirent les populations et les touristes, tant pour les conditions climatiques et la qualité de vie que pour le développement économique (transport maritime, import-export). Cependant, ces zones sont exposées aux risques de catastrophes naturelles (inondations, tsunamis) ou de pénurie en eau, en partie en raison des intrusions salines dans les réservoirs d'eau souterraine. En outre, selon les climats, les eaux de surface peuvent y être rares. Les ressources en eau souterraine constituent alors des ressources importantes pour l'alimentation en eau potable (besoins accentués par le tourisme), l'agriculture et l'industrie. Une partie de l'eau douce s'écoule en mer, soit par les cours d'eau et fleuves, soit par les sorties en mer ponctuelles ou diffuses des eaux souterraines, sans qu'elle soit utilisée par l'homme, donc en pure perte.

> *« L'eau souterraine des aquifères côtiers est en continuité hydraulique avec la mer. »*

L'aquifère karstique de Cassis (Bouches-du-Rhône).

The karstic aquifer of Cassis (Bouches-du-Rhône Department, France).

© BRGM – N. Dörfliger.

Sur le littoral, les eaux souterraines prennent place dans des formations géologiques variées, entre terre et mer : dans des formations sédimentaires détritiques (deltas, bassins sédimentaires, alluvions) et en fonction des variations du niveau de l'océan, dans des formations calcaires (Méditerranée, Mexique, Floride...), des formations de socle (Bretagne, Écosse, pays scandinaves) ou des formations volcaniques (Réunion, Mayotte, Antilles, Canaries, Açores...). Cet espace entre continent et océan constitue une interface entre eaux douces et eaux salées. L'eau salée peut pénétrer le continent en fonction des conditions naturelles et des conditions d'exploitation. Du fait de sa densité supérieure à celle de l'eau douce, elle forme sous l'eau douce ce que l'on appelle un biseau salé.

Entre terre et mer : les sources sous-marines ou sorties d'eau douce en mer

L'eau souterraine des aquifères côtiers est en continuité hydraulique avec la mer. Si la charge hydraulique qui se traduit par un niveau de nappe dans le réservoir souterrain est supérieure au niveau de la mer et que les propriétés physiques permettent un écoulement, les eaux souterraines s'écoulent vers la mer. Des sorties d'eau douce peuvent ainsi prendre place soit de manière diffuse au travers des sédiments, soit de manière plus localisée sous forme de sources sous-marines. Ces décharges d'eau souterraine en mer peuvent avoir des conséquences environnementales sur les écosystèmes à cause de la charge en composés organiques, nutriments, métaux lourds, etc. Les sources sous-marines sont issues principalement d'aquifères côtiers karstiques, volcaniques ou fissurés.

Les sources sous-marines aux débits les plus importants proviennent des aquifères côtiers karstiques. Elles se retrouvent le long des côtes calcaires essentiellement sur le pourtour méditerranéen, en Europe ou encore en Asie et en Amérique centrale [Fleury *et al.* (2007)]. Elles sont situées de quelques dizaines mètres à plus de cent mètres de profondeur. L'amplitude de leur débit dépend de la karstification, du drainage souterrain des eaux souterraines au sein de l'aquifère et de la recharge par les précipitations sur les affleurements calcaires. Ce drainage souterrain est organisé selon un réseau de conduits de plus ou moins grande dimension, permettant les écoulements souterrains. Le développement de ces conduits résulte du processus de karstification au cours des périodes d'émersion des massifs calcaires, conditionné d'une part par les variations eustatiques (variation du niveau de la mer et mouvement tectonique), d'autre part par l'existence de fractures et la charge hydraulique (niveau d'eau influencé par les conditions climatiques) au sein du massif calcaire.

Les systèmes karstiques se sont développés lors des périodes de bas niveau marin. À l'échelle globale, les baisses du niveau marin sont essentiellement liées aux périodes glaciaires. Elles ont une amplitude de l'ordre de la centaine de mètres. Au niveau local, la variation du niveau marin peut être due à une cause tectonique, comme la crise de salinité messinienne (5,92 – 5,36 Ma) en Méditerranée liée à la fermeture du détroit de Gibraltar, avec une chute du niveau marin pouvant atteindre 1 500 mètres. Les types de systèmes karstiques sont fonction de l'amplitude des variations du niveau marin, des conditions en faveur de la karstification et des conditions de sédimentation (argiles ou coulées de basalte) qui ont suivi la remontée du niveau marin [Bakalowicz et El Hajj (2012)]. Les systèmes karstiques méditerranéens sont en général caractérisés par l'existence de sources sous-marines étagées en profondeur et avec des débits pouvant être importants. Les sources sous-marines étagées des grands systèmes karstiques ouverts en mer constituent des sorties d'eau douce, mais également des points d'entrée d'eau salée. Le niveau d'eau dans l'aquifère varie au cours d'un cycle hydrologique et peut également être influencé par des prélèvements dans l'aquifère pour satisfaire la demande en eau. Les débits des sources sont variables tout comme pour les sources karstiques terrestres, mais de plus, leur minéralisation peut varier au cours du cycle hydrologique. L'eau peut être saumâtre une grande partie du cycle hydrologique.

> *Les sources sous-marines constituent des sorties d'eau douce, mais également des points d'entrée d'eau salée.*

Les sources sous-marines karstiques connues de longue date ont intrigué les populations. Depuis l'Antiquité, des tentatives de captages des sources sous-marines ont été effectuées, mais très souvent, au vu de la complexité du milieu et du mélange entre l'eau douce et l'eau de mer, ces tentatives n'ont pas été couronnées de succès. Des travaux de recherche ont été menés dès les années 1960 sur certaines sources karstiques sous-marines aussi bien en France, qu'en Italie ou en Grèce. Un regain d'intérêt est apparu ces dernières années, en raison de l'accroissement de la demande en eau potable des zones côtières et des perspectives de pénurie liée aux effets du changement climatique. La détermination du débit des sources sous-marines reste un point crucial. Des méthodes fondées sur la composition chimique de l'eau, notamment en utilisant la mesure du radon, permettent d'effectuer des bilans et d'en déduire des débits, mais nécessitent un grand nombre de données. Des mesures *in situ* à l'aide d'un débitmètre installé sur une conduite posée et scellée au droit de la source sous-marine, si la configuration le permet, fournissent des chroniques de débits et des paramètres physicochimiques. Ces dispositifs sont fragiles et vulnérables aux tempêtes d'hiver. Finalement, les développements de véhicules sous-marins autonomes (robots) équipés de sondes permettent d'envisager des mesures répétées dans l'espace au-dessus des sources sous-marines. Ces mesures doivent être interprétées à l'aide de modèles hydrauliques utilisés en océanographie. Les dernières études ont montré que les débits des sources sous-marines karstiques étaient très souvent surestimés et que la qualité des eaux souterraines, marquées par un caractère d'eau saumâtre, n'était pas en faveur de leur captage en mer. Il est préférable de chercher à terre des secteurs favorables à l'implantation de forages et d'équiper les sources sous-marines avec des dispositifs de suivi de la température et de la conductivité pour accompagner la gestion des aquifères karstiques côtiers [Bakalowicz et El Hajj (2012)].

Entre terre et mer : l'intrusion saline

La salinité des eaux souterraines des aquifères côtiers en Europe est un phénomène bien connu depuis la fin du XIXe siècle. Le principe d'intrusion saline a été décrit au tournant du XXe siècle par Ghyben et Herzberg, à partir d'observations dans des aquifères des côtes de la mer du Nord aux Pays-Bas et sur les côtes septentrionales de la mer Baltique en Allemagne. De manière simplifiée, la position de l'interface eau douce/eau salée peut être estimée en considérant les rapports de la masse volumique de l'eau douce et de l'eau salée. Considérant un point à la surface de la nappe d'eau douce dans le réservoir souterrain, appelé aquifère (roche qui contient de l'eau et permet son écoulement), l'interface se situe sous le niveau de la mer, à une profondeur égale à quarante fois l'élévation du niveau de la nappe au-dessus du niveau de la mer *(figure 1a)*. Lors de l'exploitation d'un forage dans un aquifère côtier, un cône de rabattement se forme au droit du forage au niveau de la surface de la nappe, qui modifie l'interface entre l'eau douce et l'eau salée. Selon le principe de Ghyben-Herzberg, un rabattement d'un mètre provoqué par un pompage entraîne une remontée de l'eau salée de quarante mètres *(figure 1b)*.

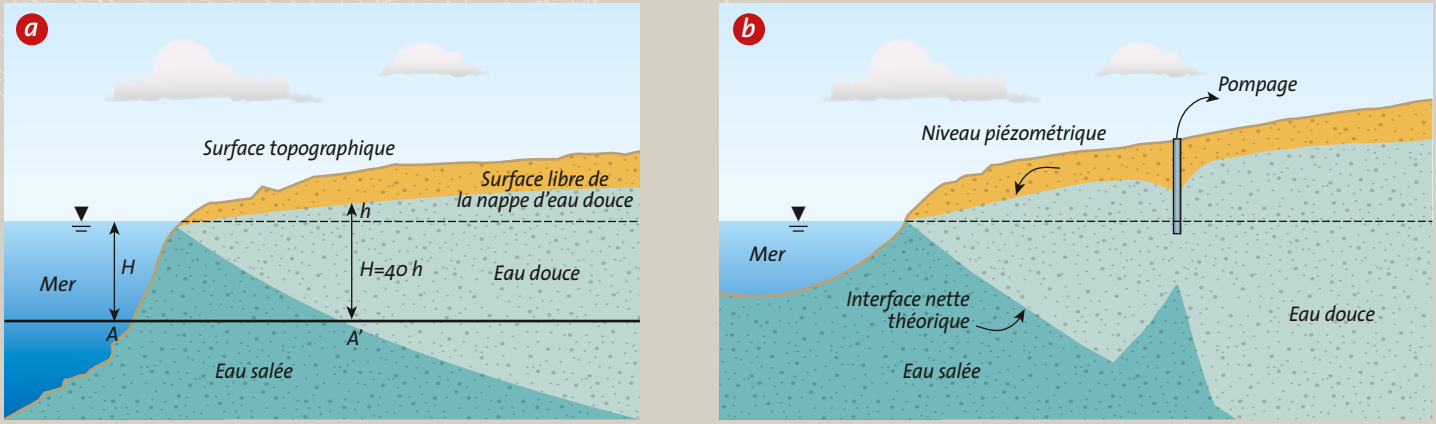


Fig. 1 : (a) Coupe schématique perpendiculaire au littoral selon le principe de Ghyben-Herzberg et (b) Impact d'un pompage sur l'interface eau douce/eau salée selon le principe de Ghyben-Herzberg.

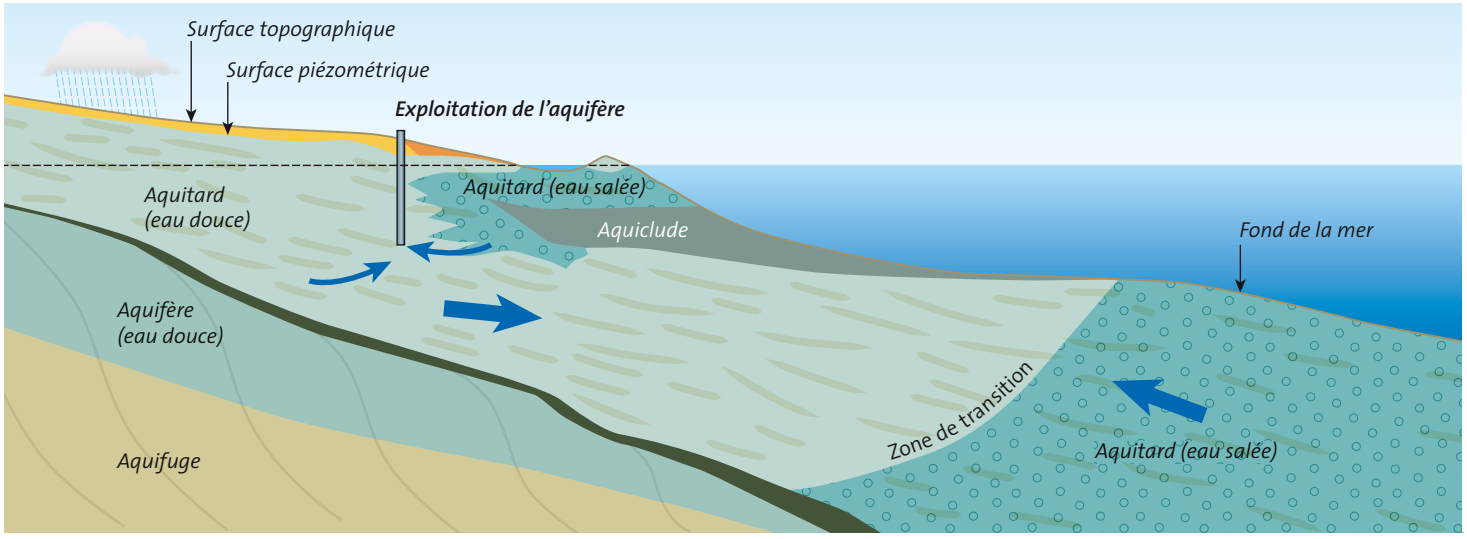
Fig. 1: (a) Conceptual cross section perpendicular to the coast according to the Ghyben-Herzberg principle and (b) Impact of a water abstraction on the fresh water/salt water interface according to the Ghyben-Herzberg principle.

Frissant et Bodéré (2009).

La situation réelle des aquifères côtiers est plus complexe et doit être décrite en considérant un espace tridimensionnel et les apports ou extractions d'eau, qui sont variables dans le temps et l'espace. Les propriétés physiques du milieu, ainsi que les écoulements souterrains créent une zone de mélange, dont les caractéristiques et la géométrie sont influencées par les hétérogénéités du milieu souterrain. En fonction de la géométrie et de la disposition des terrains, plusieurs aquifères peuvent être superposés, ainsi que plusieurs biseaux salés [Custodio (2002)]. Pour les aquifères profonds dont les formations plongent sous l'océan, l'interface eau douce/eau salée peut être située au niveau du plateau continental. Ce type de situation est fréquent dans les zones côtières au voisinage des deltas ou des bassins sédimentaires. Des contaminations d'eau souterraine peuvent également provenir d'éventuelles lagunes d'eau saumâtre *(figure 2)*.

Fig. 2 : Coupe hydrogéologique du Bassin du Roussillon avec intrusion saline dans l'aquifère supérieur en lien avec la mer et par infiltration d'eau saumâtre. Pour les aquifères profonds, une zone de transition ou d'interface eau douce/eau salée est située à plusieurs kilomètres de la côte [Aunay *et al.* (2006)].
– Aquifuge : formation qui ne peut ni contenir, ni transmettre de l'eau.
– Aquifère : peut contenir et transmettre de l'eau.
– Aquitard : peut transmettre de faibles flux d'eau.
– Aquiclude : ne peut transmettre que de très faibles flux d'eau.

Fig. 2: Hydrogeological cross section of the Roussillon Basin with salt water intrusion in the upper aquifer due to the sea and infiltration of brackish water. For deep aquifers, a saltwater/freshwater transition zone, or interface, is located several kilometers offshore [Aunay et al. *2006].*
– Aquifuge: layer that may neither contain nor transfer water.
– Aquifer: may contain and transfer water.
– Aquitard: may transmit low water fluxes.
– Aquiclude: may transmit only very low water fluxes.



► Origine et processus de salinisation des aquifères côtiers : approche multi-isotopique

Emmanuelle Petelet-Giraud – BRGM – Direction des Laboratoires, Unité de Géochimie Isotopique – e.petelet@brgm.fr

▲ **Région métropolitaine de Recife (Brésil). Urbanisation verticale sur la frange littorale gagnant sur la mangrove.**

The Recife (Brazil) metropolitan area. Vertical urbanization on the coastal fringe encroaching on the mangrove. © E. Petelet-Giraud

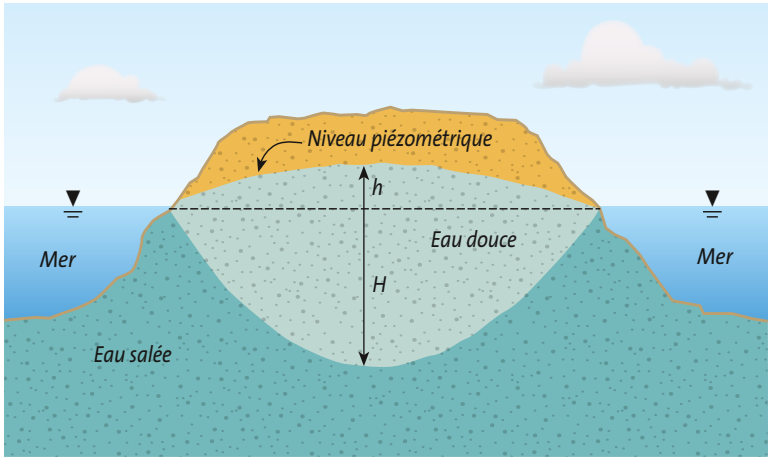
L'urbanisation croissante du littoral fait peser une menace sur les aquifères côtiers constituant des ressources en eau stratégiques. La vulnérabilité de ces aquifères est exacerbée dans les pays du sud en raison d'une augmentation galopante de la population sur le littoral, ne permettant pas la mise en place, au même rythme, de systèmes de gestion de l'eau. Outre la pollution engendrée par les rejets urbains et industriels, la qualité des eaux souterraines côtières peut être fortement dégradée à cause de la salinisation, phénomène naturel particulièrement accentué lorsque l'aquifère est fortement sollicité.

La mise en place de plans de gestion des ressources en eaux souterraines passe par l'identification des sources et mécanismes de salinisation. Les outils isotopiques couplés aux analyses élémentaires permettent de mieux contraindre les processus mis en jeu. Ainsi, les isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$) permettent d'évaluer, si elle existe, la proportion de paléo-eau de mer dans les eaux souterraines et d'estimer le degré d'évaporation des eaux de surface avant infiltration, mais aussi d'identifier des paléo-recharges sous des contextes climatiques différents. Des concentrations en bore élevées et une composition isotopique ($\delta^{11}B$) typique de l'eau de mer constituent un excellent traceur de l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers et permettent des calculs précis de mélange. Les isotopes $\delta^{34}S$ et $\delta^{18}O$ des sulfates permettent de discriminer la dissolution d'évaporites, des entrées d'eau de pluie, de l'intrusion d'eau de mer, ou paléo-eau de mer, mais aussi de mettre en évidence des conditions réductrices dans le système aquifère. Les isotopes du strontium ($^{87}Sr/^{86}Sr$) constituent un traceur des intrusions marines ; ils permettent aussi le calcul de mélanges, l'identification et la quantification des modifications chimiques de l'eau de mer liées à l'interaction avec la matrice aquifère. La combinaison des données chimiques et isotopiques permet d'élaborer des modèles conceptuels des mécanismes de salinisation ainsi que d'estimer les mélanges potentiels. Le panel d'outils isotopiques aujourd'hui à disposition permet aussi de tracer les sources de pollutions anthropiques.

Cette approche multi-isotopique est mise en œuvre pour l'étude des aquifères côtiers de Recife (Brésil) dans le cadre de l'ANR CEP&S COQUEIRAL (ANR-11-CEPL-012), collaboration franco-brésilienne. ■

Entre terre et mer : le cas des îles

Pour les îles de grande taille, les caractéristiques des aquifères côtiers ne diffèrent pas des aquifères côtiers continentaux, à l'exception de l'absence de grands bassins versants des cours d'eau. Pour les petites îles d'une superficie inférieure à 2 000 km², les problèmes d'intrusion saline dépendent des conditions hydrogéologiques. Les intrusions salines peuvent être locales, n'affectant pas l'ensemble de l'aquifère comme c'est le cas pour les îles volcaniques (Réunion, Canaries, Antilles, Mayotte) pour Grande-Terre en Guadeloupe (aquifère calcaire) ou plus importantes, comme par exemple à Majorque, en Méditerranée. La situation extrême correspond à une intrusion partielle ou complète et continue sous l'île. L'eau douce constitue une lentille flottant sur l'eau salée. Cette situation existe à Malte, sur les atolls océaniques et sur certains îlots des Caraïbes [Custodio, 2002] *(figure 3)*.



▲ **Fig.3 : Schéma d'un aquifère insulaire.**

Fig. 3: Conceptual cross section of an island aquifer.

D'après Frissant *et al.* (2005).

Au cours de la dernière décennie, la caractérisation de la géométrie des formations aquifères des îles volcaniques et de leurs propriétés hydrogéologiques a eu recours à la géophysique aéroportée. Le levé électromagnétique héliporté permet, dans des zones difficiles d'accès, de mettre en évidence des structures géologiques et d'obtenir des informations sur l'organisation des écoulements souterrains, ainsi que sur la localisation de l'interface eau douce/eau salée [Jaouën *et al.* (2012) ; Auken *et al.* (2009)] *(figure 4)*.

Photo aérienne de l'atoll de Rangiroa en Polynésie française (archipel des Tuamotu), 2012.

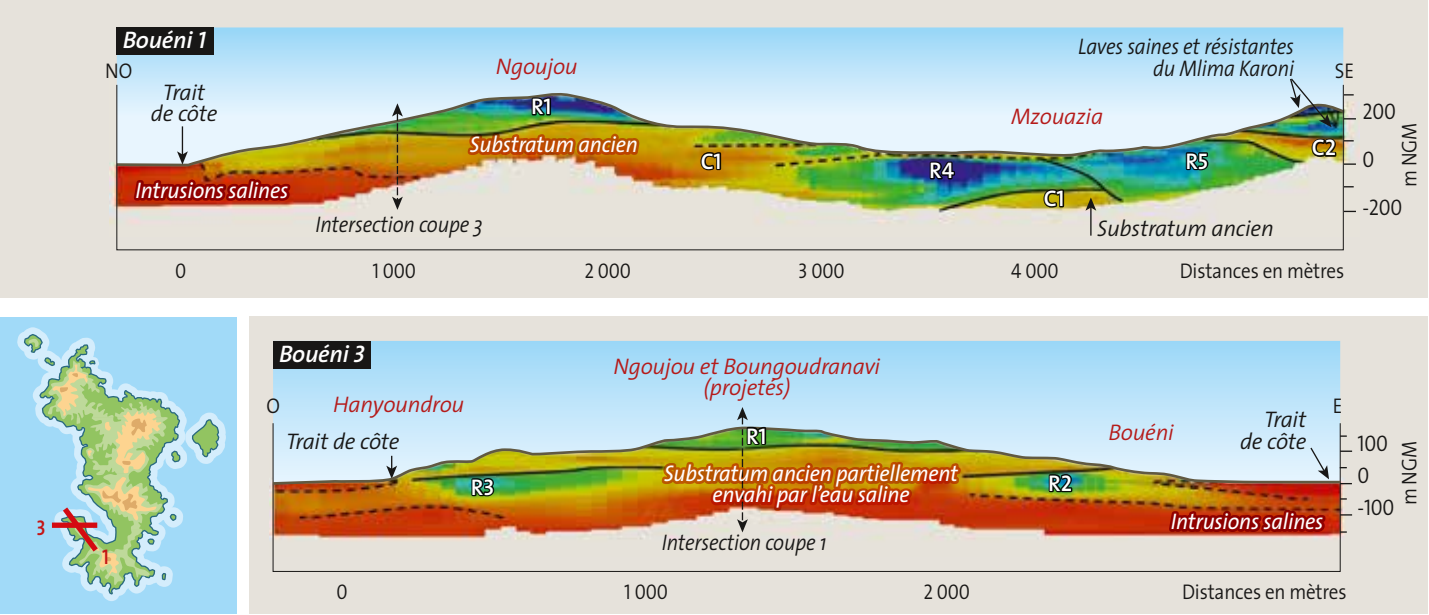
Aerial photograph of the Rangiroa atoll in French Polynesia, Tuamotu Archipelago (2012).

© BRGM – S. Lecacheux.

Fig. 4 : Coupe électromagnétique de la région de Bouéni dans le sud-ouest de l'île de Mayotte, indiquant en rouge les intrusions salines (NO Bouéni 1 et E Bouéni 3).

Fig.4: Cross section of the Bouéni area in southwestern Mayotte Island obtained by airborne electromagnetic survey, showing salt water intrusion in red (NO Bouéni 1 and E Bouéni 3).

D'après Jaouën *et al.* (2012).



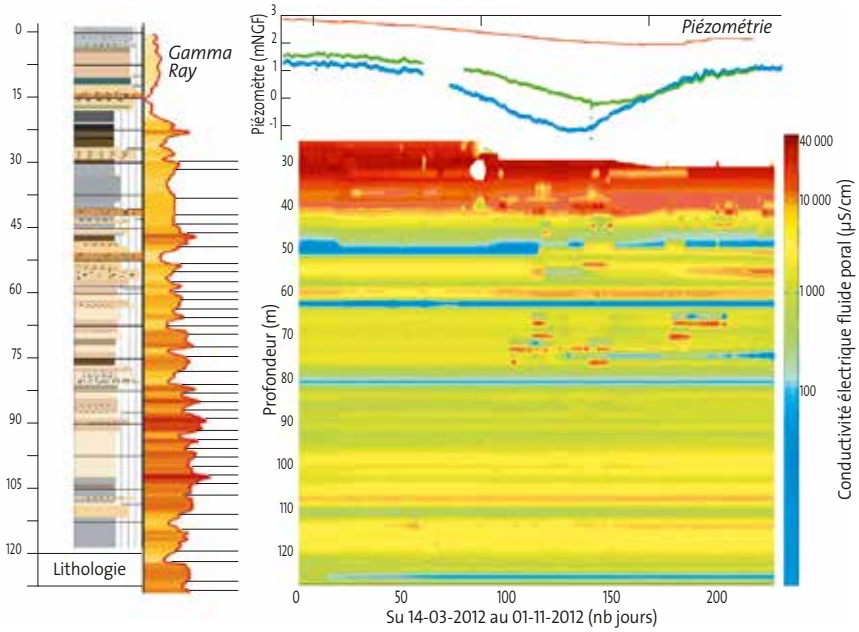
De la surveillance à la gestion des aquifères littoraux

Les aquifères littoraux sont caractérisés par un équilibre fragile entre eaux douces et eaux salées, équilibre qui peut être modifié lors de l'exploitation de l'aquifère ou encore par une variation du niveau marin (de manière temporaire lors de tempêtes ou plus durable avec l'augmentation du niveau marin sous influence de changement climatique). La gestion des aquifères littoraux nécessite, comme pour les autres aquifères, une utilisation durable des eaux souterraines conjuguée aux autres ressources en eau. Le point particulier supplémentaire à prendre en considération est le risque d'intrusion saline et de dégradation de la qualité de l'eau. Une gestion d'aquifère côtier requiert ainsi la compréhension du comportement des aquifères, la mise en œuvre d'un réseau de suivi avec des alertes et une volonté des autorités et usagers à s'engager pour un usage durable de la ressource en eau [Custodio (2002)].

► Caractérisation des intrusions salines au sein d'un aquifère côtier sédimentaire poreux

Nathalie Dörfliger – BRGM – n.dorfliger@brgm.fr

Les aquifères côtiers sont exploités pour différents usages avec, pour conséquence, un risque important d'intrusion saline. Bien que des formules empiriques permettent de localiser la position d'une zone de mélange entre l'eau douce et l'eau marine, la répartition des propriétés hydrodynamiques au sein de formations lithologiques hétérogènes rend difficile la compréhension du fonctionnement de cette interface. La plaine du Roussillon (Pyrénées-Orientales) constitue un exemple représentatif des aquifères côtiers de bassin sédimentaire détritique. Des intrusions salines existent au sein de cet ensemble aquifère complexe. Elles résultent soit de la connexion de niveaux supérieurs avec la mer ou de celle des lagunes avec des niveaux aquifères inférieurs par le biais des forages, soit de phénomènes de diffusion de saumures au sein de formations peu perméables. Dans le cadre du projet ANR Precodd 2009 « Grain d'sel », piloté par le BRGM, de nouvelles approches pour la connaissance et la métrologie des aquifères côtiers ont été développées. À l'échelle régionale, l'exploitation de données géophysiques aéroportées (Eufar en 2008) sur une zone de 40 km x 10 km, selon des lignes N–S espacées de cent mètres, a permis de mettre en évidence la spatialisation de l'intrusion saline au niveau du cordon dunaire. À l'échelle locale, l'acquisition de données hydrogéophysiques sur des forages (doublet) au Barcarès (150 mètres de profondeur) et à Canet (20 mètres de profondeur) a été réalisée. Les forages sont équipés pour l'un d'un système Westbay® SWS et pour l'autre d'un équipement à multi-électrode (SMD© Imageau), avec des électrodes séparées de 0,7 à 1,5 mètre. Le système multi-électrode permet d'enregistrer de manière continue la répartition verticale de la salinité des terrains. Les profils de conductivité électrique du fluide poral révèlent l'influence des précipitations sur la recharge de la nappe, ainsi que les variations de charge hydraulique dues aux prélèvements *(figure)*. Le système SWS permet d'échantillonner différents niveaux aquifères traversés par le forage et d'effectuer des mesures de pression, de température et de conductivité électrique de l'eau. Les échantillons d'eau prélevés sont analysés, notamment du point de vue isotopique, afin d'obtenir des informations complémentaires sur l'origine de la salinité. L'utilisation couplée de ces différentes approches constitue une réelle innovation en matière de système d'instrumentation intégrée. ■



▲ **Profil de conductivité électrique du fluide poral au regard de la piézométrie ainsi que du log lithologique et du gamma ray à Barcarès (plaine du Roussillon). En rouge, dans la zone comprise entre 60 et 80 mètres de profondeur, augmentation de la salinité après 100 jours et en orange, dans la zone supérieure à 110 mètres après 150 jours.**

Electrical conductivity profile of pore fluid versus the water-table time series and the lithological and gamma ray profile of the Barcarès (the Roussillon plain) boreholes. Shown in red, for the zone between depths of 60 and 80 m, an increase in salinity after 100 days, and in orange, for the zone below 110 m, after 150 days.

Source : ANR Grain d'sel (www.graindsel-anr.fr).

Les aquifères littoraux sont caractérisés par un équilibre fragile entre eaux douces et eaux salées.

L'étude du comportement des aquifères côtiers passe par la localisation des intrusions salines, la détermination de l'origine de la salinité et la connaissance de son fonctionnement en conditions naturelles et sous influence anthropique.

Concernant la localisation des intrusions salines, des méthodes indirectes sont employées. Les levés géophysiques au sol ou aéroportés permettent d'obtenir, pour une période donnée, la répartition de la conductivité électrique du sous-sol et de mettre en évidence des zones marquées par une intrusion saline. La géophysique en forage permet de suivre les variations de la conductivité électrique autour d'un forage au cours du temps *(encadré ci-contre)*. L'approche géochimique et isotopique constitue également un outil indispensable à la caractérisation des aquifères côtiers en vue d'établir des modèles conceptuels de fonctionnement utile pour le développement de modèles de gestion *(encadré page 78)*.

Des mesures régulières de chlorure ou de conductivité électrique des eaux souterraines constituent un autre outil de surveillance. Un réseau de forages existants ou dédiés peut permettre ces analyses, en plus du suivi du niveau de la nappe. Des profils verticaux de conductivité électrique peuvent être effectués périodiquement afin d'identifier l'interface entre eau douce et eau salée.

Pour des aquifères côtiers à enjeux, au vu des besoins en eau, une modélisation mathématique peut s'avérer indispensable. La réalisation d'une modélisation nécessite de disposer d'une connaissance suffisante de la géométrie, des propriétés physico-chimiques du réservoir et de ses conditions aux limites : précipitation, niveau marin (marée), prélèvements. Ce type de modèle permet de tester différents scénarios de gestion : impact de l'évolution des prélèvements sur certains secteurs pour certaines périodes ; impact de recharge artificielle avec des eaux de surface ou traitées pour constituer une barrière hydraulique souterraine, avec pour objectif de repousser l'intrusion saline ; voire impact d'une élévation du niveau marin.

Conclusions et perspectives

Les aquifères côtiers peuvent constituer des ressources en eau douce durables, pour les générations actuelles et futures, s'ils sont gérés et exploités de manière adéquate en considérant la recharge par les précipitations, les modalités d'exploitation et les caractéristiques hydrogéologiques. Certains aquifères côtiers constituent l'unique ressource en eau d'une région et doivent donc faire l'objet de mesures de protection et de gestion adaptées. Les aquifères côtiers sont sensibles aux risques d'intrusion saline, qui peuvent être augmentés si la demande en eau excède les ressources disponibles ou en cas de remontée du niveau marin. Si les conditions d'exploitation et climatiques ne sont pas modifiées, une augmentation du niveau marin aura pour conséquence un déplacement du biseau salé, qui n'aura que peu d'impact mais nécessitera une vigilance accrue.

Les outils géophysiques en cours de développement permettent d'acquérir de nouvelles connaissances sur les processus d'intrusion saline, en particulier dans les aquifères hétérogènes avec présence de niveaux argileux, ainsi que sur la géométrie et l'organisation des écoulements au sein des aquifères côtiers. Ils constituent de précieux outils d'investigation et de gestion pour les aquifères côtiers ou insulaires, en particulier en contexte volcanique.

Between land and sea, groundwater in coastal zones

Coastal areas characterized by intense economic and demographic development are a theater for natural hazards (flooding, tsunamis, water scarcity, salt water intrusion in aquifers). Due to climate variability, surface water may be rare in such areas. For this reason, groundwater located within geological layers between land and sea is of major importance for water supply, agriculture and industry.
The main issue for coastal aquifers is the risk of water quality deterioration due to increased salinity: natural mixing of fresh groundwater with salt water and also with fossil seawater entrapped in deep parts of the aquifers, diffusion of brines from flat areas or anthropic contaminations.
Salinity in groundwater is a phenomenon recognized since the end of XIX century, based on the difference in density between fresh water and seawater. However, it is still necessary to conduct studies and monitoring to characterize how coastal aquifers operate, in order to establish sustainable water management: direct methods via water sampling (geochemical and isotopic data) and indirect methods via geophysical survey.
Groundwater discharges in coastal areas occur through continental and submarine springs. Sizeable submarine springs are connected with karst aquifers. In the 1960's, as well as over the past decade, a number of scientific studies were carried out to assess the feasibility of capturing submarine spring water, spurred by increased water demand in coastal areas. The main results indicate that submarine spring discharges are mostly overestimated, that the water is influenced by mixing with seawater; thus, they do not come out in favor of capture facilities. A possibility is to establish coastal aquifers exploitation plans in order to limit and correct salinization problems, by applying technological approaches as well as a management scheme involving effective participation from stakeholders.

Bibliographie : **Auken E., Violette S., d'Ozouville N., Deffontaines B., Sørensen K.I., de Marsily Gh. (2009) –** An integrated study of the hydrogeology of volcanic islands using helicopter borne transient electromagnetic: Application in the Galápagos Archipelago, Comptes Rendus Geoscience, Volume 341, Issue 10, pp. 899-907. **Aunay B., Dörfliger N., Duvail C., Grelot F., Le Strat P., Montginoul M., Rinaudo J.-D. (2006) –** A multidisciplinary approach for assessing the risk of seawater intrusion in coastal aquifers: the case of the Roussillon Basin (France), International symposium Darcy 2006 – Darcy's legacy in a world of impending water shortage. **Bakalowicz M., El Hajj A. (2012) –** Les sources karstiques sous-marines de Méditerranée sont-elles des ressources non conventionnelles exploitables ? Dix-huitièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues « Ressources et gestion des aquifères littoraux », Cassis 2012. **Custodio E. (2002) –** Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures, in Groundwater and human development, Bocanegra, Martínes, Massone (Eds), 2002. ISBN 987-544-063-9, pp. 1905-1918. **Fleury P., Bakalowicz M., de Marsily Gh. (2007) –** Submarine springs and coastal karst aquifers: a review, Journal of Hydrology (2007) 339, 79-92. **Frissant N., René-Corail C., coll. Bonnier J. et De la Torre Y. (2005) –** Le phénomène d'intrusion saline à la réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. Rapport BRGM/RP-54330-FR, 64p., 27 ill., 4 tabl. **Jaouën T., Vittecoq B., Lions J., Castillo C., Deparis J., Baltassat J.M., François B., Pinson S., Gourcy L., Winckel A., Allier D. (2012) –** Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eau souterraine de Mayotte – Secteur Nord-Ouest. Rapport final BRGM/Rp-59550-FR, 424 p., 258 ill., 7 ann.