

Par définition, le karst côtier se trouve en contact avec la mer. Une partie seulement de la surface de ce karst est émergée. Elle collecte les eaux de pluie qui sont ensuite drainées par des sources situées au niveau de la mer, niveau de base hydraulique.

> Variations eustatiques, sources sous-marines

Qu'elles soient d'origine tectonique ou eustatique, les variations relatives du niveau de base ont un impact direct sur les karsts côtiers qui, comme les karsts continentaux, s'adaptent aux nouvelles contraintes imposées par les fluctuations du niveau marin (fig. 1).

Les émergences les plus basses signalées sur le littoral méditerranéen sont à environ 40 m sous le niveau de la mer (source de la Mortola, entre Menton et Vintimille). Le développement du karst à plusieurs centaines de mètres sous le niveau marin actuel est aujourd'hui expliqué par la chute du niveau marin lors de la crise de salinité messinienne [17] (Port Miou -179 m NGF, fontaine de Vaucluse - 224 m NGF, Font Estramar -167 m NGF); mais il peut aussi s'agir d'héritages tectoniques, endokarstiques, ou eustatiques plus anciens.

> Fonctionnement et contamination des sources

Comme tout aquifère côtier, le karst est soumis à l'intrusion de l'eau de mer, qui se mélange partiellement à l'eau douce météorique [1] [5]. L'eau de mer étant plus dense que l'eau douce, elle peut pénétrer et contaminer l'aquifère. Le degré de contamination de cet aquifère est fonction de la charge hydraulique de l'eau douce et de la profondeur de l'intrusion saline (fig. 2).

En aquifère poreux, la lentille d'eau douce « flotte » sur l'eau salée, et la position de l'interface est définie par la loi de Ghyben - Herzberg [22]. Mais en aquifère karstique, la distribution de l'eau de mer peut être très variable, en fonction du développement des conduits karstiques sous le niveau de la mer et de leur connectivité aux sources et à la mer. Il en résulte deux types d'intrusions : une intrusion saline diffuse à travers la matrice calcaire globalement semblable à celle d'un milieu poreux (fig. 3), et une intrusion saline directe par les conduits karstiques (fig. 4).

Parfois, les intrusions salines se manifestent sous la forme d'un coin d'eau salée plus dense fluant au plancher de la galerie karstique à partir de la source sous-marine, ce qui

a justifié la construction d'un barrage à Port Miou [112]. Ainsi, les mécanismes d'intrusion de l'eau de mer expliquent-ils la présence de sources d'eau saumâtre, qu'elles soient situées dans les terres à quelques mètres d'altitude au-dessus du niveau de la mer, ou sous le niveau de la mer comme aux sources de Port Miou et du Bestouan (fig. 5). La salinité est généralement inversement proportionnelle au débit, en relation étroite avec la charge hydraulique dans les conduits karstiques (fig. 2, 4).

> Vers une exploitation future des aquifères littoraux ?

Le développement économique des régions littorales méditerranéennes (Espagne, Crète, Liban, Syrie, Grèce, Turquie) est limité par le manque d'eau. Pourtant, la ressource karstique littorale avoisine probablement 1000 m³/s pour l'ensemble de la Méditerranée, mais les sources sont souvent saumâtres, ce qui interdit leur utilisation. La mise au point de méthodes d'étude et d'exploitation des eaux karstiques comme alternative au dessalement de l'eau de mer est donc un enjeu important. En France, plusieurs sites sont actuellement étudiés : Mortola (Menton-Vintimille) [3] [4]; Cabbé (Roquebrune-Cap-Martin), Les Pissarelles (Èze-sur-Mer) [4]; Port Miou et le Bestouan (Marseille-Cassis) [2]; la Vis (étang de Thau, Balaruc) [3]; font Estramar (étang de Leucate, Salses). Aucun site n'est pour l'instant exploité, car il est impossible de s'affranchir du problème de la salinité, la désalinisation étant encore trop onéreuse. Ces sources restent cependant les exutoires d'aquifères continentaux; l'étude de leur signal émis (variations de débit, de température, et de conductivité), couplée à des expériences de traçage, permet déjà d'obtenir d'importantes informations sur ces aquifères encore largement inexploités.

Le développement de la plongée spéléologique a permis de mieux connaître la géométrie des conduits noyés en amont des grosses émergences sous-marines, et les études paléogéographiques ont aidé à la compréhension des mécanismes de la contamination saline, souvent liée à la présence de galeries situées à grande profondeur [17]. Les captages à l'émergence ne semblant pas possibles, on pourrait alors envisager un prélèvement par forages à terre, en amont des zones contaminées par le sel.

[1] ARFIB B. 2001 - Étude des circulations d'eaux souterraines en aquifères karstiques côtiers : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce), 343 p. Thèse, Paris VI.

[2] CAVALERA TH. 2007 - Étude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritères, 389 p. Thèse, Marseille.

[3] FLEURY P. 2005 - Sources sous-marines et aquifères karstiques côtiers méditerranéens, 286 p. Thèse, Paris VI.

[4] GILLI É. 2003 - Les karsts littoraux des Alpes-Maritimes : inventaire des émergences sous-marines et captage expérimental de Cabbé. *Karstologia*, n° 40, p. 1-12.

[5] GILLI É., MANGAN CH. & MUDRY J. 2004 - Hydrogéologie, objets, méthodes et applications, 270 p. Dunod, Paris.



Figure 1 - Évolution du réseau karstique d'un aquifère littoral soumis aux variations eustatiques [3]. Avec la chute du niveau marin (t_1), la source S_0 est abandonnée au profit de S_1 . Lors des crues, S_0 peut encore fonctionner en trop-plein. Après la remontée du niveau marin (t_2), les réseaux supérieurs sont réactivés. Les réseaux inférieurs sont ennoyés et évoluent de plusieurs manières : 1/ abandon si le karst est colmaté par les sédiments marins ; 2/ maintien des écoulements profonds, remontant vers une source vauchusienne située à terre ; 3/ si le karst n'est pas colmaté, les sources basses deviennent sous-marines ou forment des estavelles.

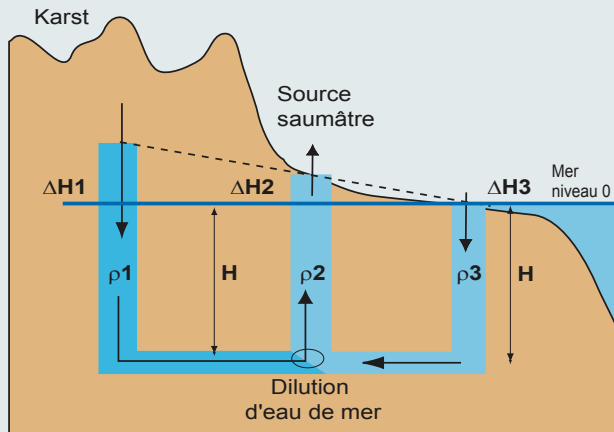


Figure 2 - Principe de la contamination saline, avec une source saumâtre située au-dessus du niveau de la mer. La hauteur de la colonne d'eau de mer (H) inférieure à $H + \Delta H_2$ à la source saumâtre est compensée par la différence de densité des fluides pour expliquer l'intrusion de l'eau de mer. Il en résulte la relation suivante, en tenant compte des pertes de charge liées à l'écoulement dans les conduits (ΔJ) : $[(H + \Delta H_1) \rho_1 - \Delta J_1] > [(H + \Delta H_3) \rho_3 - \Delta J_3] > [(H + \Delta H_2) \rho_2 + \Delta J_2]$; avec H profondeur des drains ; ΔH_1 gradient hydraulique du karst ; ρ_1 densité de l'eau du karst (considérée comme constante) ; ΔH_2 altitude de la source saumâtre (constante) ; ρ_2 densité de l'eau saumâtre (variable) ; ΔH_3 variation du niveau de la mer ; ρ_3 densité de l'eau de mer (considérée comme constante). Lorsque les conduits sont de très grande taille, ΔJ peut être négligé. Le modèle réalisé en laboratoire montre que si ΔH_1 augmente (karst alimenté par les précipitations), un courant s'établit vers la source saumâtre, ρ_2 peut diminuer par dilution ce qui déséquilibre la colonne d'eau de mer et permet l'apparition d'un ΔH_3 négatif proche de $-0,7$ m : il y a aspiration d'eau de mer comme aux moulins d'Argostoli (Grèce).

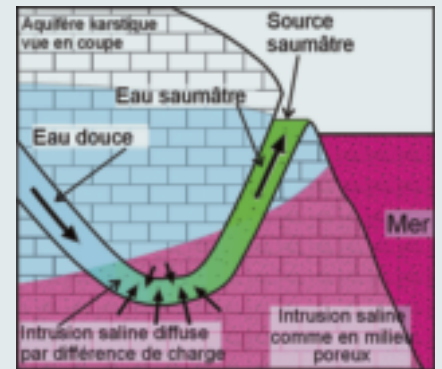


Figure 3 - Contamination d'une source saumâtre par la matrice équivalente à un milieu poreux.

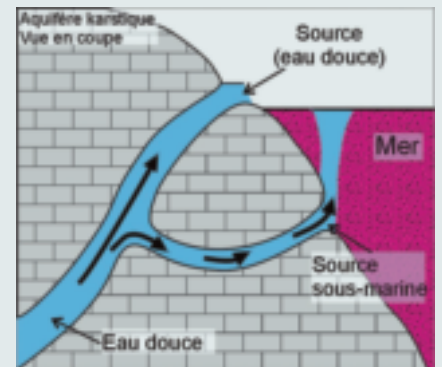
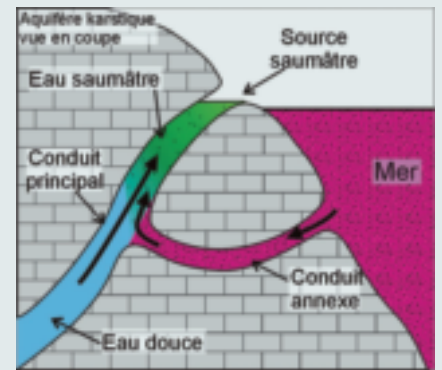


Figure 4 - Écoulement dans un réseau de conduits karstiques en relation directe avec la mer. La source sous-marine fonctionne en estavelle ; haut : en basses eaux, aspiration de l'eau de mer ; bas : en crue, expulsion de l'eau douce.



Figure 5 - Auréole d'une source sous-marine à la surface de la mer dans les calanques de Marseille.