

Classification des aquifères karstiques côtiers

P. Fleury⁽¹⁾, N. Dörfliger⁽¹⁾, M. Bakalowicz⁽²⁾

(1) Brgm, (2) Université Montpellier

p.fleury@brgm.fr, n.dorfliger@brgm.fr, michel.bakalowicz@gmail.com

A l'issue d'une synthèse bibliographique réalisée sur les aquifères karstiques littoraux, ainsi que de l'étude du fonctionnement hydrologique réalisée sur plusieurs systèmes à exutoires côtiers ou sous-marins [12] [13], il ressort qu'une typologie des sources exutoires de tels systèmes peut être associée à une caractérisation des systèmes karstiques littoraux. Trois types de systèmes peuvent être distingués. Ils seront ainsi décrits, puis une typologie sera proposée. Enfin, les conséquences en matière de ressource en eau et d'exploitation des différents types seront présentées.

I. SYSTEMES A KARSTIFICATION PEU OU MAL DEVELOPPEE

Ces systèmes possèdent des exutoires situés actuellement sous le niveau de la mer ; ils se sont mis en place lors des périodes de bas niveaux marins. Contrairement aux karsts méditerranéens messiniens, ces aquifères se sont développés alors que le potentiel de karstification était plus limité (durée courte, variations bathymétriques beaucoup plus faibles). Il en résulte des conduits de faibles dimensions peu organisés, en réseaux karstiques mal développés. Les écoulements se font alors au travers d'un réseau de fissures élargies, parfois recouvertes de sédiments détritiques donnant une impression de sorties diffuses. Les écoulements sont en général réduits. Le fait que le réseau karstique soit mal développé, donc sous-dimensionné, permet une mise en charge suffisante de l'aquifère, ce qui empêche ou au moins limite l'intrusion d'eau de mer. Les sources des Fontaines d'Yport sur la côte normande (Bassompierre et Roux, 1968) sont les exutoires de tels systèmes.

Par sa configuration, la source de la Mortola en Italie [14] semble également appartenir à ce type de système. En effet, les écoulements à la source s'effectuent à travers une fissure élargie et non par un conduit bien individualisé. L'étude du karst de la Mortola a également révélé que la karstification actuelle était relativement limitée, malgré le fait que cet aquifère soit passé par des phases de karstification importantes.

II. SYSTEMES A KARSTIFICATION BIEN DEVELOPPEE SOUS LE NIVEAU DE LA MER ET OUVERTS SUR LA MER

Ces systèmes karstiques se sont développés lors des périodes de bas niveaux marins. A l'échelle planétaire, ces chutes du niveau marin sont essentiellement liées aux périodes glaciaires, qui restent limitées dans le temps (quelques dizaines de milliers d'années) avec une amplitude de l'ordre de la centaine de mètre. Sur un plan plus local, il faut rappeler l'incidence de la crise du Messinien qui a affecté uniquement la Méditerranée ; elle s'est traduite par une chute du niveau marin de 1500 m pendant une période de 500 000 ans, avec des conditions climatiques favorables à la karstification.

C'est pourquoi des réseaux karstiques profonds, bien développés et étagés ont été mis en évidence sur tout le pourtour de la Méditerranée, alors qu'il n'en existe comparativement que très peu sur les autres côtes du globe. D'après l'étude bibliographique, ainsi que notre propre expérience, les sources littorales suivantes sont toutes associées à des systèmes karstiques bien développés :

Moraig-Toix (Espagne) [15],

Chekka (Liban) [11]

Port-Miou (France) [20] [6],

Ain-Zayanah (Libye) [19],

Source de Blaz (Croatie) [5],

Almyros d'Héraklion (Grèce) [1] [2],

Céphalonie (Grèce) [10],

Fontestramar (France) [7],

Les exutoires sont caractérisés par des conduits de dimensions importantes (plusieurs m² de section). Les réseaux peuvent être très profonds. Par exemple, le système Moraig - Toix a été reconnu jusqu'à la profondeur de -70 m ; la source profonde de Chekka s'écoule par -165 m, le conduit de Port-Miou a été reconnu jusqu'à -175 m, à Ain-Zayanah un conduit a été observé jusqu'à -80 m. La profondeur de contamination du conduit débouchant à la source de l'Almyros d'Héraklion par l'eau de mer a été évaluée à -500 m. Ces conduits profonds se trouvent ainsi en relation directe avec le milieu marin à l'exception de l'Almyros d'Héraklion où la contamination ne semble pas [1] [2] être liée à l'arrivée d'eau par un conduit, mais plutôt à une contamination par l'eau salée contenue dans la matrice poreuse entourant ce conduit.

Les réseaux de conduits de ces systèmes sont dimensionnés par rapport aux écoulements de crue et sont par conséquent sur-dimensionnés lors de l'étiage. Durant les basses eaux, la charge hydraulique dans l'aquifère est faible, de sorte que l'eau de mer pénètre par les conduits les plus profonds. Ce phénomène est clairement observé sur les sources étagées de Chekka. En étiage, seules les sources situées dans la zone des 30 m s'écoulent, l'eau étant saumâtre (la salinité en octobre 2004 était d'environ 22 g/l aux sources de Chekka), alors que les conduits profonds sont des points d'entrée d'eau de mer. En période de crue, l'ensemble des conduits profonds s'active et l'eau s'écoulant des différentes sources est relativement douce.

La source de Fontestramar, située au nord de Perpignan dans le département des Pyrénées Orientales, est l'exutoire principal du massif karstique des Corbières orientales. Ce dernier est constitué du karst d'Opoul et du synclinal du Bas-Agry, qui couvrent une superficie d'environ 200 km². Il s'agit d'un karst binaire alimenté en proportion significative (entre 40 et 50 %) par des pertes de l'Agly (fleuve côtier). Ces pertes sont situées à environ 20 km à l'amont hydraulique de la source de Fontestramar. Les débits évoluent entre 1 m³/s et plus de 15 m³/s. Comme à l'Almyros d'Héraklion, la conductivité électrique est inversement proportionnelle au débit. En étiage, elle est de l'ordre de 7 mS/cm (soit 3 g/l), elle est inférieure à 2 mS/cm en crue (moins de 1 g/l). La salinité de la source est liée à la présence de l'étang côtier de Salses Leucate, la part d'eau de l'étang entrant dans le système représente entre 5 et 10 % de la recharge du système. L'exploration du karst noyé de Fontestramar a atteint la côte de -164 m NGF, le conduit continuerait en profondeur le long d'une pente assez raide. Par ailleurs Les analyses géochimiques (géothermomètre de la silice) indiquent que le réservoir est profond de plus de 400 mètres, les eaux semblent alors être stockées dans les réseaux karstiques développés le plus en profondeur [18].

Un forage de reconnaissance profond de 500 m a été réalisé en 2009 [16] à environ 8 km en amont de la source de Fontestramar, selon l'axe de drainage identifié entre la zone de perte et la source. L'objectif était de recouper le réseau de drainage profond en amont de la zone d'intrusion saline. Le forage a ainsi recoupé un drain secondaire d'environ 20 cm de diamètre à 420 m de profondeur. L'interprétation des essais de pompage réalisés révèle que ce conduit est un drain secondaire, le drain principal étant localisé à faible distance (quelques centaines de mètres), le débit transitant est évalué à plusieurs centaines de m³/h. Les analyses chimiques révèlent que l'eau est de bonne qualité, la zone noyée sur ce secteur est exempte de contamination. Les prospections doivent se poursuivre avec en 2012 une amélioration des capacités de production l'ouvrage existant (acidification, réalésage éventuel), la réalisation d'un nouveau forage à proximité est également en projet.

Le développement du réseau de conduit recoupé à 420 m est à mettre en relation avec la crise messinienne de salinité. Enfin, l'analyse des courbes de récession de la source a révélé que le coefficient de tarissement est faible et le volume dynamique est très grand, indiquant que le système de Fontestramar possède une importante zone noyée. Le volume entrant est égal au volume sortant, il est d'environ 100.10⁶ m³, le

Le volume des réserves est évalué à $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Les temps d'infiltration relativement courts (35 jours) et les vitesses moyennes d'infiltration relativement élevées indiquent que ce système présente une karstification importante dans sa partie supérieure.

Le système de Fontestramar est marqué par une karstification profonde et bien développée qui doit être mise en relation avec la crise du Messinien. Il existe entre l'aquifère karstique et l'étang littoral de Salse-Leucate des connexions responsables d'une intrusion d'eau salée au cours des étiages. Le système de Fontestramar appartient bien au second type de notre classification.

Ainsi les sources littorales et sous-marines des systèmes karstiques fonctionnels sont caractérisées par un débit moyen important soumis à une forte variabilité saisonnière, donc à de forts débits lors des crues, avec une eau plus douce en crue et saumâtre en étiage.

III. SYSTEMES A KARSTIFICATION BIEN DEVELOPPEE SOUS LE NIVEAU MARIN, MAIS PARTIELLEMENT OU TOTALEMENT ISOLES DE LA MER

Certaines conditions géologiques font que les conduits bien développés en profondeur deviennent finalement inactifs, par suite d'un colmatage interne ou de la mise en place d'une couverture imperméable lors de la sédimentation marine, après remontée du niveau de base.

Le système karstique de Thau appartient probablement à ce type. La source sous-marine de la Vise dans l'étang marin côtier est l'un des exutoires de ce système [17]. Compte tenu des nombreuses manifestations karstiques du bassin d'alimentation (morphologie de surface typique, sources terrestres pérennes et saisonnières, grottes et gouffres atteignant la zone noyée, écoulements rapides prouvés par traçages passant sous le bassin miocène de Montbazin – Gigean), il est clair que ce système a été soumis à une importante karstification. Sa position sur la côte lui procure une situation en théorie favorable à la mise en place de réseaux profonds, lors de la crise messinienne notamment. Or la région littorale a été recouverte d'une épaisse formation imperméable pliocène et quaternaire. Le drainage karstique s'est développé à des profondeurs d'au moins 200 m sous le niveau marin actuel, sous les formations miocènes qui constituent le fond du bassin de Thau. Au niveau de la source de la Vise, l'épaisseur de la couverture miocène est au maximum de 30 m ; son érosion locale lors des émergences l'a amincie suffisamment pour que des écoulements se produisent maintenant que l'aquifère est en charge.

A Anavalos Kivéri en Grèce, il existe quatre sources côtières et sous-marines principales qui s'écoulent entre 0 et 7 m de profondeur. Leur salinité est relativement faible toute l'année, inférieure à 0,3 g/l pour la source côtière, la salinité évolue entre 0,3 et 2,5 g/l pour les sources sous-marines [3]. Les débits sont importants (le débit moyen total est supérieur à $10 \text{ m}^3/\text{s}$). Nous ne possédons aujourd'hui aucune information sur la géologie de la zone, mais il semble que, du fait de l'importance de leurs débits, ces sources soient les exutoires d'un système à karstification bien développée. Le fait que l'eau des sources soit très peu contaminée par l'eau de mer tend à montrer que s'il existe des conduits profonds, alors ils ne laissent pas pénétrer l'eau de mer. C'est pourquoi il nous semble que les sources d'Anavalos Kivéri ne sont pas reliées à un réseau de conduits profonds encore actifs hydrologiquement. Une analyse détaillée de la géologie de la zone pourrait apporter d'intéressantes informations et permettre de classer ou non ces sources dans le troisième type de notre classification.

La source de la Fontaine de Vaucluse est caractérisée par un conduit vertical de plus de 300 m soit plus de 220 m sous le niveau de la mer. Une vaste barrière étanche condamne les anciens drains profonds situés sous le niveau de la mer et sépare l'aquifère de la mer [21]. Pour le Lez, dans un rapport d'expert non publié destiné à la DDASS de l'Hérault, datant de 1979, Avias propose les limites des périmètres de protection du captage, en incluant les affleurements calcaires existant à l'aval de la source. Il justifie cette limite en se référant aux effets de la crise messinienne qui auraient certainement conduit au développement des conduits karstiques en direction de la mer, à l'aval de l'exutoire actuel. La karstification du système du Lez serait profonde, tout comme le système de Vaucluse. Ce système serait également protégé par une barrière étanche, constituée par l'importante sédimentation plio-quaternaire tout au long du littoral dans cette région.

IV. SYNTHÈSE DES SYSTÈMES KARSTIQUES LITTORAUX ET TYPOLOGIE DES SOURCES SOUS-MARINES

Pour résumer, les sources sous-marines et littorales sont les exutoires de trois types principaux de systèmes karstiques littoraux.

Ce sont d'abord les sources issues de systèmes à karstification peu développée, proches plutôt des aquifères fissurés. Les systèmes possèdent de fortes pertes de charge, en particulier au niveau des exutoires qui apparaissent plutôt dispersés. Ils sont peu étendus et leurs réserves restent limitées comparées à celles d'un karst bien développé. Les débits aux exutoires sont relativement faibles ; l'eau peut rester douce toute l'année.

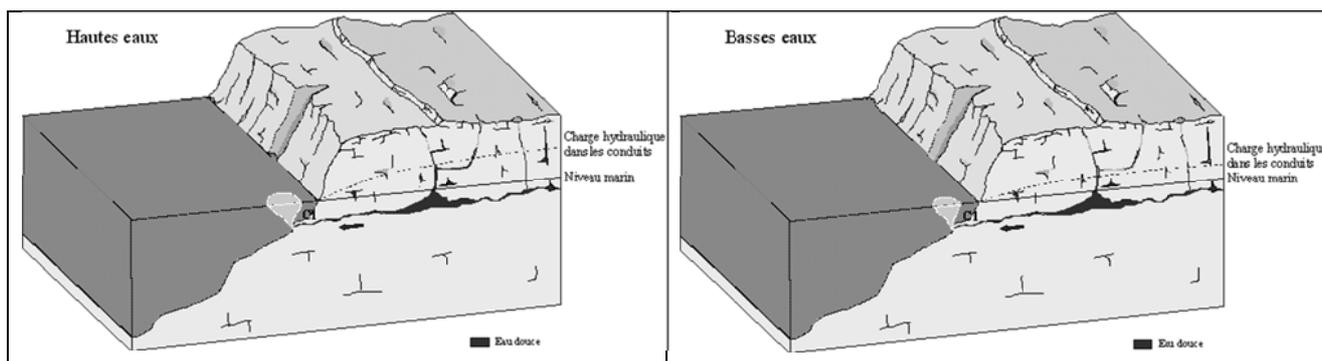


Figure 2. Type 1 : aquifère littoral à karstification peu développée et exutoires dispersés et réduits (période de hautes eaux en haut et période d'étiage en bas).

Le deuxième type regroupe les systèmes à karstification bien développée, souvent organisée en réseaux étagés sur des niveaux multiples avec des puits de jonction profonds. La karstification peut être très développée sous le niveau de base actuel. Les conduits sont sur-dimensionnés par rapport aux écoulements d'étiage ; de ce fait, les pertes de charge sont faibles au niveau des exutoires. Ces systèmes sont étendus et possèdent des réserves importantes. Leurs sources sont caractérisées par des débits moyens élevés, à forte variabilité saisonnière ; la salinité de l'eau, souvent faible en crue, est généralement élevée lors des étiages.

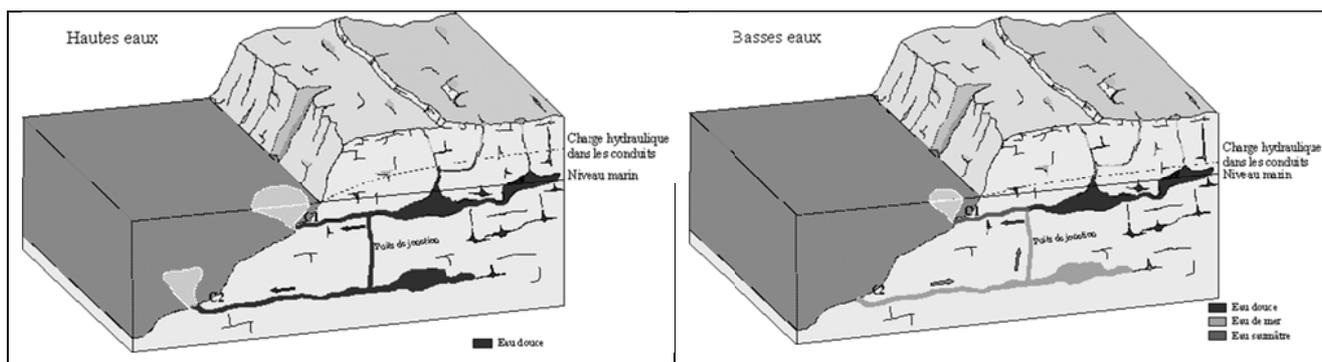


Figure 3. Type 2 : aquifère littoral à karstification bien développée et à conduits bien ouverts sur le milieu marin (période de hautes eaux en haut et période d'étiage en bas).

Enfin, le dernier type concerne les systèmes bien karstifiés, polyphasés également, mais préservés de la contamination par l'eau de mer grâce à des colmatages ou des dispositifs géologiques particuliers. Les pertes de charge au niveau des exutoires marins d'origine karstiques sont très élevées. Les réserves sont importantes, les débits sont variables et l'eau reste douce au cours du cycle hydrologique.

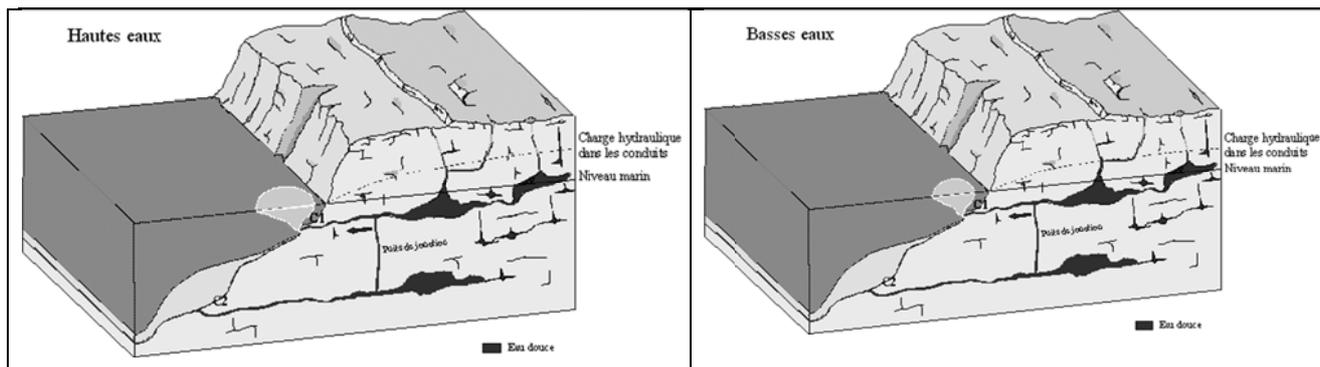


Figure 4. Type 3 : aquifère littoral à karstification bien développée ayant évolué vers des conditions d'isolement du milieu marin (période de hautes eaux en haut et période d'étiage en bas).

Ce schéma caractérise les systèmes où les exutoires sous-marins ont été conservés (système de Thau par exemple). Il n'est pas adapté aux systèmes isolés de la mer par des formations imperméables (par exemple le Lez ou Vaucluse). Voici un second schéma correspondant à ce cas, l'eau ressort plus haut que le niveau marin à une certaine distance de la mer.

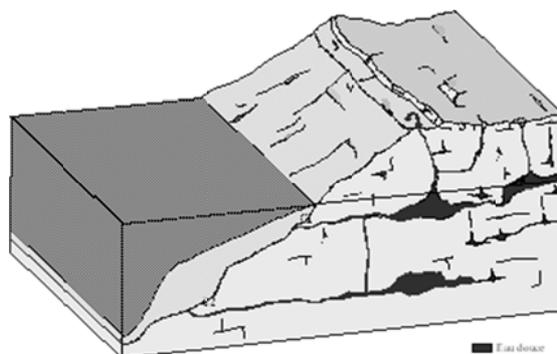


Figure 5. Type 3 : aquifère littoral à karstification bien développée complètement isolé du milieu marin.

V. Exploitation de la ressource

V.1. Captages en mer

En matière d'exploitation des ressources en eau littorales, émergeant en mer, le captage direct devrait être limité aux sources appartenant aux systèmes 1 et 3. Ce sont en effet les seules à avoir une faible salinité.

Les systèmes du premier groupe, généralement caractérisés par des faibles débits, donc à ressource limitée, ne présentent pas un grand intérêt. Leur mise en exploitation, nécessitant des investissements importants, ne permettra pas de mobiliser de grands volumes d'eau.

Le captage en mer des systèmes du troisième groupe présente un intérêt, l'exemple du barrage d'Anavalos Kivéri sera présenté par la suite.

V.2. Réalisation de dispositif de mise en charge

Le captage simple consistant à conduire l'eau en surface des sources sous-marines n'est pas adapté pour les sources appartenant aux systèmes de type 2, à cause de la forte salinité de l'eau. Ces sources au fort débit représentent pourtant une importante ressource en eau perdue pour les collectivités, cette eau ne pouvant être utilisée telle qu'elle.

Pour empêcher l'intrusion d'eau de mer, des mises en charge de l'aquifère ont été envisagées. Il s'agit de la réalisation de barrages ou la mise en place de dispositifs obturateurs, permettant les mises en charge dans l'aquifère. Ceux-ci pourraient être construits soit dans le conduit comme à Port-Miou, soit au niveau

de l'exutoire comme cela fut réalisé à l'Almyros d'Héraklion, soit directement en mer comme à Anavalos Kiveri.

Ainsi à Port-Miou les mises en charge (niveau de +3,66 m NGF atteint) rendues possible par le barrage étaient insuffisantes pour empêcher les intrusions d'eau de mer prenant place au niveau du conduit profond connecté à la mer (connexion karst - milieu marin à une profondeur supérieure à 175 m). En parallèle, lors de ces périodes de mise en charge, une partie du flux s'évacuait en mer au travers d'autres conduits, notamment au niveau de la source du Bestouan.

Concernant l'Almyros d'Héraklion, les mises en charge réalisées par le barrage au niveau de la source n'ont pas permis non plus d'interrompre les intrusions salines. La surcharge appliquée était insuffisante du fait de la profondeur importante de la zone d'intrusion saline.

Concernant le barrage en mer d'Anavalos Kiveri, il s'agit probablement d'une des réussites les plus spectaculaires de captage d'eau douce en mer. Ce captage fonctionne toujours. Construit entre 1969 et 1972, le barrage en béton de forme semi-elliptique de 150 m de long et 8 m au-dessus du fond de la mer, isole de la mer quatre sources principales situées très près de la côte, entre 0 et 7 mètres de profondeur. Leur débit total moyen est de 900 000 m³/j (10 m³/s). Avant la mise en place du barrage, la teneur en chlorure évoluait entre 172 et 1500 ppm selon les sources. Une légère mise en charge contrôlée et surveillée à l'intérieur du barrage (la cote de l'eau dans la retenue est 35 cm au-dessus du niveau de la mer) permet d'obtenir une teneur en chlorure inférieure à 500 ppm. Un système de vannes permet de respecter ce nouvel équilibre hydrodynamique entre les deux plans d'eau. Un pompage est effectué directement dans la retenue afin d'acheminer l'eau vers le réseau de distribution.

Des dispositifs obturateurs ont été observés sur les sources de Chekka au Liban, ces derniers consistant à boucher les conduits au niveau des conduits des différentes sources sous-marines. A priori ces dispositifs se sont révélés inadaptés et ont été expulsés probablement dès les premières crues. L'obturation des exutoires a conduit à des mises en charges fortes, aboutissant à l'expulsion des différents bouchons.

Il faut ainsi garder à l'esprit que ces ouvrages sont difficiles à réaliser, et que le dispositif final devra être choisi en s'appuyant sur des connaissances détaillées du système et de son fonctionnement. Les exemples de Port-Miou et de l'Almyros d'Héraklion doivent inciter à la prudence.

V.3. Forage à terre

Une autre démarche a ainsi été entreprise concernant ces karsts côtiers bien développés ouverts sur le milieu marin (type 2). Elle consiste à rechercher la ressource en amont des zones de contamination, grâce à la réalisation de forage à l'intérieure des terres. Ce type d'entreprise a été réalisé au niveau du système des Corbières. Un forage profond de 500 m a ainsi recoupé le réseau de conduit à 420 m, la ressource ne présente pas de problème de qualité en relation avec une éventuelle intrusion saline.

Enfin, les systèmes du troisième type semblent être les mieux adaptés pour une éventuelle exploitation, ils sont en effet caractérisés par de forts débits et une faible salinité même en étiage. Concernant les aquifères côtiers bien karstifiés en profondeur mais sous couverture sédimentaire importante, ils sont actuellement en cours de caractérisation sur plusieurs secteurs de la région Languedoc-Roussillon. Plusieurs projets de recherche visent ainsi à caractériser cette ressource. Une méthodologie basée sur la réinterprétation de profils sismiques permettant l'identification de zones aquifères favorable a ainsi été mise en place [9]. Dans ce cadre deux forages de reconnaissance de la ressource des aquifères karstiques sous couverture seront réalisés sur le secteur de Béziers en 2012 [8].

VI. CONCLUSION

L'étude du fonctionnement hydrologique et la synthèse bibliographique des aquifères karstiques côtiers a permis d'établir une typologie de ces systèmes selon 3 grands groupes à savoir :

- Type 1 : systèmes à karstification peu développée, ils sont caractérisés par des débits aux exutoires faibles ; une eau relativement douce toute l'année.
- Type 2 : systèmes à karstification bien développée, souvent organisée en réseaux étagés, ouvert en profondeur sur le milieu marin. Leurs sources sont caractérisées par des débits moyens élevés, à forte variabilité saisonnière ; la salinité de l'eau, souvent faible en crue, est généralement élevée lors des étiages.
- Type 3 : systèmes bien karstifiés, préservés de la contamination par l'eau de mer grâce à des colmatages ou des dispositifs géologiques particuliers. Les réserves sont importantes, les débits sont variables et l'eau reste douce au cours du cycle hydrologique

Ainsi, les conditions d'exploitations seront variables selon les systèmes. Les systèmes de type 1 associés à une faible ressource présentent peu d'intérêt. La ressource pourra être capté localement au niveau des exutoires. Pour les systèmes de type 2 les ressources sont importantes. La mise en place de dispositif de mise en charge dans le but d'éviter les intrusions de mer est difficile à mettre en place et présente des résultats peu encourageants, si bien que la prospection à terre de la ressource par forage paraît plus adaptée. Enfin pour le troisième type de système, l'utilisation de la ressource au niveau des exutoires est adaptée. Aussi, dans le cas d'aquifères sous couverture où les exutoires ne sont pas connus, la reconnaissance de la ressource par forage est préconisée.

Références bibliographiques :

- [1] Arfib B., 2001 - Etude des circulations d'eaux souterraines en aquifère karstique côtier : observations et modélisation de la source saumâtre Almyros d'Héraklion, Crète (Grèce). Thèse, 337 p.
- [2] Arfib B., de Marsily G., 2004 - Modeling the salinity of an inland coastal brackish karstic spring with a conduit-matrix model, *Water Resour. Res.*, N°40, W11506, doi:10.1029/2004WR003147.
- [3] Argyriadis I., 2003. Une réalisation industrielle d'exploitation de résurgences sous-marines d'eau douce. *Géologues*, N°136, 42-46 pp.
- [4] Bassompierre P., Roux J.C., 1968 - Etude hydrogéologique des Fontaines d'Yport (Seine Maritime), BRGM, Mont Saint Aignan, 31 p.
- [5] Bonacci O., Roje-Bonnaci T., 1997 - Sea water intrusion in coastal karst springs : example of the Blaz Spring (Croatie). *Hydrological Sciences Journal*, N° 42, 89-100 pp.
- [6] Cavalera T., 2007 - Étude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritère, Thèse, 403 p.
- [8] Coueffé R., Fleury P., Capar L., 2011 - Caractérisation géologique du secteur de l'agglomération de Béziers à partir de la réinterprétation des profils sismiques et définition de zones favorables pour l'implantation d'ouvrages de reconnaissance. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-60640-FR, 140 p.
- [7] Dörfliger N., Fleury P., Ladouche B., 2008. Inverse modelling approach to allogenic karst system characterisation. *Ground Water*. doi: 10.1111/j.1745-6584.2008.00517.x. 13 p.
- [9] Dorfliger N., Fleury P., Le Strat P., 2008 - Caractérisation géologique et hydrogéologique des aquifères carbonatés karstiques sous couverture. Rapport d'avancement. BRGM/RP-56375-FR.
- [10] Drogue C., 1989 - Continuous inflow of seawater and outflow of brackish water in the substratum of the karstic island of Cephalonia, Greece. *Journal of Hydrology*, N° 106: 147-153 pp.
- [11] El Hajj A, 2008 – L'aquifère carbonaté de Chekka (Liban) et ses exutoires sous-marins. Caractéristiques hydrogéologiques et fonctionnement, Thèse.
- [12] Fleury P., 2005 - Sources sous-marines et aquifères côtiers méditerranéens : fonctionnement et caractérisation, Thèse, 286 p.

- [13] Fleury P., Bakalowicz M., De Marsily G., 2007a – Submarine Springs and coastal aquifers : a review. *Journal of Hydrology*, N°339, 79-92 pp.
- [14] Fleury P., Bakalowicz M., Becker P., 2007b - Caractérisation du système karstique à exutoire sous-marin de la Mortola (Italie), *CR Géosciences*, N°339, 409-417 pp.
- [15] Fleury P., Bakalowicz M., de Marsily G., Cortes J.M., 2007c. Functioning of a coastal karstic system with a submarine outlet. *Hydrogeology Journal*, 11 p.
- [16] Fleury P., Ladouche B., Dewandel B., Dörfliger N., Le Strat P., Grunenwald G., Izac J-L., Cubizolles J. - 2009. Evaluation des ressources en eau souterraine des systèmes aquifères karstiques des Corbières. Phase III – Démonstration de la ressource. Rapport « final ». BRGM/RP-57612-FR, 148 p.
- [17] Ladouche B., Bakalowicz M., Courtois N., Doerfliger N., Pinault J.L., Chemin P., Anus S., 2001 - Etude du pourtour de l'étang de Thau, phase II. Fonctionnement hydrogéologique du bassin karstique de Thau. 2, RP-50787-FR, BRGM, 275 p.
- [18] Ladouche B., Dörfliger N., 2004 - Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières orientales - Rapport final de la phase I du projet Évaluation des ressources en eau des Corbières. Volume 2 - Caractérisations géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du Bas-Agly » BRGM/RP-52919-FR. 198 p.
- [19] Potié L., 1974 - Résurgences sous-marines d'eau douce en Libye., rapport SEM, 23 p.
- [20] Potie, L., 1979. Ressources en eau des zones côtières. Syndicat de recherche de Port-Miou, Marseille, 4 p.
- [21] Puig J.M., 1987 - Le système karstique de la Fontaine de Vaucluse, Thèse, 205 p.