

## "Sharing experience in karst water resources in the Middle East"

Ankara, 27-29 Mai 2014

Cet atelier a été organisé par une équipe coordonnée par le Prof. Mehmet Ekmecki de l'Université Hacettepe d'Ankara en Turquie. Chris Groves de l'Université du Kentucky et co-porteur du programme IGCP 598 de l'UNESCO sur les karsts, a co-organisé le planning scientifique, avec Michel Bakalowicz, coordinateur du thème « Hydrogéologie karstique » du programme MEDFRIEND de l'IHP/UNESCO.

L'objectif de cet atelier était de partager les connaissances sur les ressources en eau du karst autour de la Méditerranée et plus particulièrement au Moyen-Orient et au Maghreb, entre des « jeunes » hydrogéologues et des hydrogéologues seniors. Les participants avaient été invités de manière à couvrir au maximum les pays et les problématiques concernés. Le partage des connaissances entre chercheurs régionaux et le transfert vers les plus jeunes, fait partie des objectifs des deux grands programmes IGCP et IHP/FRIEND de l'UNESCO qui encadrent cet atelier.

Certaines présentations ont porté sur *des aspects généraux ou régionaux*. Ainsi, **Chris Groves** (États-Unis, co-responsable du projet IGCP 598 « Environmental change and sustainability in karst systems », professeur émérite d'hydrogéologie, Western Kentucky University) a exposé en introduction les perspectives globales sur les ressources en eau du karst. **Gil Mahé** (France, HydroSciences Montpellier) a présenté les projets IHP FRIEND et MED-FRIEND de l'UNESCO.

MEDFRIEND est l'un des huit programmes FRIEND du Programme hydrologique international de l'UNESCO. Son but est de promouvoir la recherche collaborative entre pays voisins en hydrologie et sciences associées, dans plusieurs thèmes de recherche majeurs pour la région. Ces thèmes sont : érosion et transport solide, écohydrologie côtière, hydrogéologie karstique, événements extrêmes, impact du changement global sur les régimes hydrologiques et ressources en eau. Une base de données commune a été élaborée et est accessible aux membres uniquement. Le programme MEDFRIEND a démarré en janvier 2009, suivant le programme FRIEND-AMHY qui avait débuté en 1991. Il y a pour le moment 18 pays riverains de la Méditerranée qui ont adhéré au programme MEDFRIEND. Les types d'activités coordonnées par MEDFRIEND sont : des ateliers scientifiques et conférences internationales, des formations de groupe en laboratoire ou sur le terrain, des échanges scientifiques.

Depuis 2009 chaque thème de recherche du programme MEDFRIEND a organisé au moins un événement scientifique.

Le Maroc (Rabat 2 fois, et Fez), l'Algérie (Tipaza), la Tunisie (Bizerte), la Turquie (Istanbul et Ankara), l'Italie (Cosenza 2 fois), ont accueilli un atelier, séminaire ou conférence scientifique durant cette période. Par ailleurs MEDFRIEND et FRIEND-AOC ont organisé le premier meeting conjoint entre les deux programmes, à Ouagadougou en 2013. Le Maroc, l'Algérie et la Tunisie ont abrité chacun une formation, et MEDFRIEND a participé à une formation organisée en Hongrie. Des articles tirés des présentations réalisées lors de ces événements ont alimenté plusieurs numéros spéciaux de Sécheresse (2 fois), La Houille Blanche, Le Journal de l'Eau et de l'Environnement, Revue des Sciences de l'Eau, Hydrological Sciences Journal. Les chercheurs de MEDFRIEND ont par ailleurs contribué largement aux articles publiés dans les livres rouges de l'AISH lors de trois conférences à Fez en 2010, Melbourne en 2011 et Göteborg en 2013, et l'Université de Cosenza a

publié également un ouvrage spécial suite à l'atelier de 2011. Le site MEDFRIEND est hébergé à HSM, <http://armspark.msem.univ-montp2.fr/medfriend/index.asp>

La prochaine conférence FRIEND aura lieu à Montpellier en octobre. Ce sera l'occasion de rencontrer les 7 autres programmes FRIEND de la planète.

Parmi les activités en préparation dans le cadre de MEDFRIEND, une formation sur la modélisation hydrologique entre HSM et le Maroc, une formation sur l'utilisation de données spatiales organisée par le Maroc et la Côte d'Ivoire, une seconde conférence MEDFRIEND/FRIEND-AOC peut-être organisée en Côte d'Ivoire, et une conférence internationale sur les grands bassins africains programmée pour fin octobre 2015 à Hammamet en Tunisie.

**Bartolomé Andreo Navarro** (Espagne, professeur à l'université de Malaga) a présenté les différentes méthodes de cartographie de la vulnérabilité en vue de la protection des eaux souterraines karstiques en région méditerranéenne. Il a montré que ces méthodes (EPIK, COP, PaPRIKa, etc.) appliquées sur un même système karstique fournissent en général des résultats différents, prouvant qu'il n'est pas possible d'envisager un traitement quasi automatique de cette cartographie. Il faut toujours confronter ces résultats à une bonne connaissance du terrain complétée par des essais de traçage.

**Ezzat Raeisi** (Iran, professeur à l'université de Shiraz) a brièvement présenté l'importance du karst en Iran : 11% des affleurements, mais les aquifères karstiques se développent souvent sous d'autres formations, dont les alluvions. Il a ensuite montré, à partir d'exemples pris dans le Zagros où les calcaires sont abondants, comment ont été établis les bilans hydrologiques de systèmes karstiques se déchargeant totalement ou partiellement dans des aquifères alluviaux. Ces décharges dans les alluvions ou les colluvions ont donné lieu dans l'Antiquité à l'exploitation de l'eau souterraine par des qanats.

**Marwan Ghanem** (Palestine, professeur à l'université de Bir Zeit) a présenté les principaux aquifères, carbonatés karstiques pour la plupart, de la rive ouest du Jourdain, exploités pour l'eau potable et l'irrigation. Il existe trois ensembles aquifères : le bassin occidental ( $460 \text{ hm}^3/\text{an}$ ), coulant vers l'ouest, où aucun nouveau puits ne peut être foré depuis 1967 ; le bassin oriental ( $100 \text{ hm}^3/\text{an}$ ), surexploité, s'écoulant vers la vallée du Jourdain et dont l'exploitation est contrôlée par un comité israélo-palestinien ; le bassin nord-est, limité par la Ligne Verte et dont l'exploitation est contrôlée également. Dans le bassin oriental, la source El Sultan ( $16 \text{ hm}^3/\text{an}$ ) alimente la ville de Jéricho. En règle générale, l'accès à la ressource est restreint ; par exemple, aucun accès au Jourdain n'est permis malgré les accords internationaux. Ainsi l'eau potable est insuffisante et doit être en partie achetée à une compagnie israélienne. Les pollutions sont nombreuses et chroniques : eaux usées non ou mal traitées, décharges d'ordures, agriculture. L'exemple de la région de Natuf a été présenté, avec la pollution du bassin de Matwi, due aux rejets directs d'eaux usées non traitées en provenance des colonies israéliennes voisines. Enfin l'aquifère carbonaté plus profond ne peut être exploité, car ses eaux sont salées.

**Myriam Saadé-Sbeih** (Suisse, université de Lausanne) a présenté les principaux résultats d'un projet coordonné par l'Institut de Hautes Études Internationales et du Développement de Genève, et financé par l'Agence Suisse pour le Développement et la Coopération. Ce projet consiste à faire la synthèse des connaissances hydrologiques, hydrogéologiques, socio-économiques et agronomiques sur le bassin de l'Oronte. L'Oronte, principal fleuve méditerranéen du Moyen-Orient, naît dans le nord de la Bekaa au Liban d'une source karstique, Ain ez Zarka ( $Q_{\text{moyen}}=13 \text{ m}^3/\text{s}$ ), et s'écoule vers le nord à l'est du Mont Liban et de son prolongement en Syrie, jusqu'à la plaine du Ghab, au nord de

laquelle il oblique vers l'ouest pour rejoindre la Méditerranée à Antakia (Antioche), en Turquie. La partie turque du bassin, avec l'Afrin et le Karasu, n'a pas été prise en compte. Le fleuve reçoit tout au long de son cours les eaux de grands aquifères karstiques. La comparaison des débits du fleuve et de certaines des principales sources montrent une forte diminution entre les années 1980 et 2000, sous l'effet du développement des périmètres irrigués conduit sans gestion appropriée. Seul Ain ez Zarka n'est pas touché par cette baisse. Cet exemple est représentatif de beaucoup de bassins hydrologiques méditerranéens, frappés par la surexploitation des ressources en eau souterraine qui affecte durablement l'état des réserves, au point de présenter une menace sérieuse pour le maintien de l'activité économique.

**Michel Bakalowicz** (HydroSciences Montpellier) a ébauché une synthèse des connaissances sur les aquifères karstiques méditerranéens, leurs ressources et leur capacité de stockage. Trois grands ensembles sont considérés : les karsts de montagne, à ressources souvent importantes du fait des précipitations élevées et de l'étendue des systèmes karstiques (SK), mais à réserves limitées ; les karsts liées aux grands bassins et aux systèmes horst-graben, que l'évolution polyphasée a doté d'une grande capacité de stockage les régularisant (SK associés aux bassins de la Bekaa au Liban, du Ghab et de l'Euphrate en Syrie), avec parfois contribution d'eaux thermales, enrichies en CO<sub>2</sub> d'origine profonde (Algérie, Turquie) ; les karsts littoraux, connectés ou non à la mer, résultant d'une intense karstification au cours de la Crise Messinienne de Salinité (MCS), responsable d'un abaissement du niveau marin de 1500 à 2500 m sous le niveau actuel. C'est la MCS qui est responsable du fait que plus de 90% des sources karstiques sous-marines mondiales sont concentrées dans le bassin méditerranéen.

**Mehmet Ekmekci** (Turquie, UKAM, Centre International de Recherche sur les Ressources en Eau Karstiques, université Hacettepe, Ankara) a présenté une synthèse sur l'évolution du karst turc, par comparaison avec l'évolution générale tectonique et paléogéographique. Il montre les liens très forts, associés aux mouvements de bascule du pays depuis l'Oligocène, produits par la tectonique régionale des plaques. Il propose une classification des karsts, sur la base de caractères régionaux, permettant une bonne caractérisation hydrogéologique préalable (article téléchargeable : <http://carsologica.zrc-sazu.si/downloads/322/mehmet.pdf>).

**Walid Daher** (Liban, université St Joseph de Beyrouth) a abordé les problèmes posés par la recharge artificielle des aquifères karstiques. Il a esquissé certaines solutions intéressantes. Cette technique de gestion proactive est essentielle sous climat semi-aride et dans les zones littorales touchées par l'intrusion marine. Mais les connaissances insuffisantes et les risques font qu'il existe très peu de cas de réalisation. Un premier exemple est pris dans la banlieue de Beyrouth, où l'eau de la rivière de Beyrouth est injectée directement dans un forage. Mais aucun suivi n'est réalisé, si bien qu'il est impossible de juger de l'efficacité de cette recharge ; de plus l'eau injectée est souvent mélangée à des eaux usées non traitées. Il a fait part également d'un exemple en Jordanie étudié par J. Xanke (Université de Karlsruhe, Allemagne), où la recharge est faite à partir d'un barrage et d'une injection dans des forages à l'aval, pour une exploitation à partir d'un champ de forages, quelques km à l'aval. Il apparaît qu'en réalité l'essentiel de la recharge est assuré par les fuites dans la retenue elle-même. Dans ces conditions, la forte sédimentation dans la retenue conduit à un colmatage progressif et donc à une baisse du rendement.

Les autres présentations ont exposé des études plus locales, mais présentant toutes un intérêt plus

général dans la mesure où elles portaient sur des aspects communs à tous les karsts méditerranéens. Ainsi **Levent Tezcan** (Turquie, UKAM, Ankara) a présenté le système karstique de Gökova, qui se décharge par des sources saumâtres et par des sources sous-marines. Il a tenté une modélisation semi-distribuée, sur la base d'un compartimentage du système en accord avec sa structure.

**Türker Kurttas** (Turquie, UKAM, Ankara) a présenté les différentes approches géochimiques et isotopiques pour déterminer l'origine de la salinisation des eaux souterraines karstiques littorales. C'est en effet un problème récurrent tout au long des côtes turques, où il est nécessaire de faire la part entre l'intrusion marine, naturelle ou provoquée, et les différents processus de salinisation.

**Mohammad Alhyari** (Jordanie, Ministère de l'Eau et de l'Irrigation, Amman) a présenté les résultats d'une étude réalisée en partenariat avec l'Institut Fédéral pour les Géosciences et les Ressources Naturelles d'Allemagne (BGR) sur la contamination de la source de Tanour, à Ajlun. La Jordanie est l'un des pays au monde où la ressource en eau par habitant est la plus faible ; elle est tombée au cours des 60 dernières années de 3600 à 140 m<sup>3</sup>/an/hab. Elle doit donc être particulièrement bien protégée et gérée. La source de Tanour ( $Q_{\text{moyen}} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ ) est une source karstique à fortes variations saisonnières ( $Q_x = 840 \text{ m}^3/\text{h}$  ;  $Q_n = 13,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ; un suivi en continu des concentrations en TOC par UVA est assuré. Elle a été sélectionnée pour la délimitation des zones de protection, car sa ressource est menacée par des pollutions multiples, rejets de pressoirs d'huile d'olives et d'eaux usées domestiques. Les déchets de pressage d'olives sont particulièrement polluants, à cause des composés organiques (surtout des polyphénols) et une forte acidité. Les concentrations de TOC sont utilisées comme alerte en cas de contamination. Les temps de parcours de polluants sont en cours de détermination. Ce type de pollution est fréquent en région méditerranéenne.

**Belkhacem Bekkoussa** (Algérie, Université de Mascara) a présenté une étude hydrogéologique des Monts de Tlemcen, dans l'ouest de l'Algérie. Il s'agit d'un massif calcaire karstifié, s'enfouissant en bordure sous les formations sédimentaires imperméables de bassins. Les eaux du massif sont exploitées en partie pour alimenter l'agglomération d'Oran. À défaut de données hydrométriques sur les sources, les écoulements ont été étudiés au moyen de la géochimie et des isotopes. Les zones de recharge des principales sources et des forages associés, définies à partir de la géologie et de la topographie, ont été validées par l'oxygène-18 en fonction de l'altitude. Cependant certains systèmes s'écartent de cette relation, ce qui a été interprété comme dû à la contribution de recharges plus anciennes. Les informations fournies par carbone-13, carbone-14 et tritium font apparaître une majorité d'eaux actuelles, dans les systèmes perchés, des eaux âgées de quelques dizaines d'années et enfin plus rarement des eaux beaucoup plus anciennes dans les parties captives et plus profondes des bordures du massif. La protection et la gestion de cette importante ressource régionale dispose maintenant d'une base intéressante qu'il faudra compléter par une analyse quantitative des ressources et des réserves. Dans la discussion qui a suivi, il est apparu des caractères communs avec d'autres ensembles aquifères karstiques d'Algérie, dans les régions de Saida et de Constantine, où la structure est également en horst-graben, avec enfouissement sous des alluvions ou sous une couverture imperméable plus récente. Cette structure en horst-graben paraît classique en Algérie. Elle permet la venue d'eaux thermales profondes, souvent chargées de CO<sub>2</sub> profond, contribuant ainsi au développement d'une karstification particulière, classique et hydrothermale, créant d'importantes structures de stockage et favorable au succès des forages à faible et moyenne profondeur. Ce type d'aquifère karstique est de ce fait plus facilement soumis que les autres aux

pollutions, à partir des zones de grabens où sont installées cultures et agglomérations, et à leur surexploitation par un nombre important de forages.

**Bouabid El Mansouri** (Maroc, université de Kenitra) a exposé les résultats d'études hydrogéologiques dans la région d'Ifrane, dans le Moyen Atlas. Les formations carbonatées karstifiées y sont abondantes et constituent des aquifères intéressants pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation. Cependant, il est nécessaire de définir les conditions de leur protection. La méthode EPIK a été retenue, à cause des données disponibles qui permettaient de l'appliquer. Malgré tout, la surexploitation de ces ressources se traduit par une décroissance notable du niveau des nappes (2 m/an en moyenne), cause de l'assèchement de sources et d'écoulements de surface. La discussion qui a suivi a montré que cette diminution des réserves contribue à la production agricole en partie exportée vers l'Europe. Ainsi le Maroc exporte une partie de son eau sous forme « virtuelle », en créant un appauvrissement préjudiciable à son avenir.

**Hassan Abde-Alfatah Jebreen** (Palestine, université de Birzeit) a présenté une étude en cours du bassin de Soreq, appartenant à l'ensemble aquifère occidental, près de Ramallah. Ce bassin de 150 km<sup>2</sup> est constitué de calcaires et de dolomies karstifiées, drainés par une dizaine de sources, débitant au total environ 0,7 hm<sup>3</sup>/an. Les variations du chimisme de ces eaux ont été étudiées en fonction de l'hydrologie (hautes et basses eaux) afin de caractériser et de localiser les sources de pollutions, pour tenter d'y remédier. Le suivi a porté sur les éléments en traces (métaux lourds) et la microbiologie, en plus des composés majeurs et mineurs. Certaines des sources montrent un important niveau de pollution, au-delà des normes mondiales de potabilité. Les principales sources de pollutions sont d'origine industrielle et agricole. De plus certaines eaux sont marquées par une salinité élevée, empêchant leur utilisation pour l'irrigation. Malgré ces niveaux de pollution élevés, les eaux sont utilisées car ce sont les seules ressources et il n'existe pas d'unité de traitement. Une politique d'information de la population est mise en place pour tenter de limiter ces pollutions.

**Zargham Mohammadi** (Iran, université de Shiraz) a étudié le temps de réponse aux précipitations de systèmes karstiques du Zagros. Les deux systèmes étudiés sont ceux de la source de Dime ( $Q_m = 2,6 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $Q_x = 5 \text{ m}^3/\text{s}$  ;  $Q_n = 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et de Pireghar (respectivement 1, 1,53 et 0,73 m<sup>3</sup>/s). Il a analysé les courbes de décrue et récession, montrant selon les cas l'écoulement dans un drain épiphréatique et le stockage dans la matrice rocheuse.

**Harun Aydin** (Turquie, UKAM et université de Van) a présenté ses travaux de PhD dans la région de Yenipazar, où le niveau de la rivière Sakarya est commandé par celui de la Mer Noire. L'évolution régionale a été replacée dans le cadre du modèle général d'évolution depuis le Miocène moyen. Le système karstique de Harmanköy – Beyyayla a subi une évolution complexe, avec l'érosion d'une grande partie des affleurements carbonatés, qui n'a laissé que des reliques d'anciens réseaux de drainage, avec une inversion générale des écoulements souterrains, d'abord S-N, puis N-S. La chute de plus de 200 m du niveau de la Mer Noire au cours des périodes froides du Quaternaire a engendré une incision importante, avec formation de gorges. L'abaissement du niveau de base karstique a ainsi réactivé des parties de réseaux anciens.

**Laura Osterhoudt** (États-Unis, Western Kentucky University) a mis en oeuvre au cours de sa thèse de Master un suivi à pas de temps courts sur plusieurs sites du karst du Kentucky. Le premier est une infiltration temporaire au toit d'un conduit, 20 m sous une parcelle cultivée ; la courbe de « restitution » de l'atrazine donne un pic à 38 ppb ! Le second site a permis d'étudier au moyen de

traçages la discordance entre les bassins versants superficiel et souterrain, dans le bassin supérieur de la Green River. Le dernier cas portait sur Lost River, où les pertes jouent un rôle important dans l'introduction de matière organique et son oxydation ultérieure dans le système. Dans les trois cas, un suivi en continu au moyen de capteurs (pH, EC, T et niveau d'eau, et potentiel d'oxydo-réduction pour le cas 3) à un pas de temps très court de 10 à 15 mn a permis d'étudier les propriétés de transport et de stockage, ainsi que les temps de réponse aux événements pluvieux. La discussion a porté sur le premier cas où l'épikarst joue un rôle déterminant en provoquant un écoulement horizontal hors de la parcelle cultivée jusque vers une doline où l'eau rejoint le conduit.

**En conclusion**, les présentations et les discussions ont montré l'existence de nombreux points communs pour tous ces karsts méditerranéens et pour leurs ressources en eau souterraine, aussi bien au plan de leur genèse, de leur évolution et de leur fonctionnement qu'en termes de besoins en méthodes d'études et d'interprétation. En ce qui concerne le karst lui-même et ses ressources, les mêmes problèmes se posent : les pollutions d'origines multiples (agriculture et eaux usées non traitées) et la surexploitation des ressources conduisant à une diminution parfois critique des réserves exploitables. En régions littorales, la surexploitation conduit à une intrusion saline qui vient s'ajouter à celle naturelle déjà parfois notable. Une source de pollution commune aux régions méditerranéennes est celle des rejets de pressage pour l'huile d'olives. La mise au point d'unité de traitement et de valorisation de ces déchets paraît indispensable.

*Au plan méthodologique*, contrairement à l'hydrologie de surface, le besoin de mise en commun de données ne paraît pas encore se faire sentir. En revanche, il est clair que le partage des connaissances, en particulier pour les méthodes d'études (analyse des hydrogrammes et des chimiogrammes notamment), permettrait de faire progresser les interprétations et, donc les connaissances, encore trop fragmentaires, sur les karsts méditerranéens et leurs ressources. Cet atelier a ainsi été l'occasion de créer l'amorce d'un réseau qui devrait permettre de partager nos approches et nos études de cas. Il serait souhaitable que plusieurs ateliers du même type soient organisés dans les prochaines années, dans plusieurs pays, avec visite de sites karstiques et de programmes de suivi, afin de rapidement pérenniser la communauté sur ce sujet et accélérer le transfert des savoir-faire en terme de terrain, observatoire et analyse.