

Les eaux souterraines

Par Ghislain de MARSILY

Professeur émérite à Sorbonne Universités (Université Paris VI-Pierre et Marie Curie) et à l'École des Mines de Paris – Institut MinesTélécom

et Mustapha BESBES

Professeur d'hydrogéologie émérite à l'École nationale d'ingénieurs de Tunis - Université de Tunis El Manar

L'eau contenue dans le sol et dans le sous-sol constitue la majeure partie de l'eau qu'utilise l'homme. Nous décrivons ici l'occurrence, le renouvellement ou le tarissement de cette ressource au niveau mondial, les menaces dues aux activités humaines qui pesent sur la qualité des eaux, la sécurité intérieure et extérieure des eaux souterraines, ainsi que les mesures visant à préserver celles-ci et leur gestion participative.

Introduction

L'eau contenue dans le sol et le sous-sol a pour origine quasi exclusive ⁽¹⁾ les précipitations du grand cycle de l'eau ⁽²⁾. On peut y distinguer une eau « verte », qui est l'eau de pluie stockée temporairement en surface dans les premiers mètres du sol et qui est reprise par l'évaporation et (surtout) par la transpiration de la végétation (poste dominant dans le bilan hydrologique) et une eau « bleue », souterraine, qui s'infiltre plus profondément dans la terre, circule dans les pores, fissures et autres interstices et constitue les aquifères dont nous parlerons plus loin. Cette eau s'écoule vers les sources, les fleuves ou directement dans la mer et elle peut être captée par l'homme grâce à des puits ou à des forages. Pour compléter cet inventaire, l'eau « bleue » superficielle est celle qui s'écoule dans les rivières.

Occurrences et gisements des eaux souterraines

La partie saturée d'eau d'un aquifère forme une nappe souterraine : les termes « phréatique » (ou « libre ») désignent les nappes les plus proches du sol. Celles-ci surmontent éventuellement une ou plusieurs nappes profondes (ou captives).

En ce qui concerne la nappe libre, on appelle « surface piézométrique » l'interface située entre une zone saturée (dont tous les pores sont remplis d'eau) et une zone non-saturée (où air et eau coexistent dans les pores et où l'eau « verte » est stockée).

La forme que prend cette surface piézométrique renseigne sur les écoulements souterrains, ainsi que sur les zones de recharge et d'exutoire.

Les nappes captives se rencontrent à plusieurs centaines de mètres (parfois à plus de deux mille mètres) de pro-

fondeur dans les grands bassins sédimentaires. Elles sont confinées, à leur base et à leur sommet, par des couches peu perméables. La pression qui y règne est élevée, si bien que lorsque l'on perce le toit de la nappe par un forage, l'eau remonte sous l'effet de sa pression, et elle peut même dans certains cas jaillir, en surface : on parle alors de nappe artésienne.

La vitesse de l'eau au sein de ces aquifères captifs est faible (de quelques mètres par an, voire moins d'un mètre). Ainsi, par exemple, la nappe captive de l'Albien, qui est située à six cents mètres au-dessous de Paris, est alimentée par la pluie dans ses affleurements du département de l'Yonne (comme une nappe libre) et elle s'écoule en direction de ses points bas (dans la Baie de la Seine, partie de la Manche).

À Paris, la pression y atteignait en 1841 (lors du premier forage réalisé dans le quartier de Grenelle) près de sept cents mètres d'eau. Le toit de la nappe étant à une profondeur de six cents mètres, la nappe présentait un profil artésien, avec une pression, au niveau du sol parisien, de près de cent mètres d'eau. Depuis lors, de nombreux forages ont été creusés dans cette même nappe et la pression de l'eau a par conséquent chuté : aujourd'hui, la nappe n'est plus artésienne et il faut pomper l'eau sous la surface du sol pour pouvoir l'en extraire. Des phénomènes analogues sont observés dans le bassin de Londres, dans la plaine du Pô ou encore dans la nappe saharienne du Sud algéro-tunisien.

(1) Il existe cependant un petit peu d'eau « juvénile », qui est exhalée en certains endroits par le refroidissement de magmas dans la croûte terrestre.

(2) Les anciens philosophes grecs pensaient, quant à eux, que c'était l'eau de mer qui, remontant depuis les côtes vers les continents, alimentait les sources et les fleuves lorsqu'il ne pleuvait pas. Cette eau de mer serait dessalée par « filtration » lors de son parcours (cette idée a perduré jusqu'au XVIII^e siècle...!).

Les eaux souterraines dans le cycle de l'eau

Les précipitations qui tombent sur les continents (113 000 km³/an) vont alimenter les différents éléments du cycle hydrologique continental : stockage superficiel, ruissellements et écoulements en rivières. Lorsque les propriétés des terrains (porosité, perméabilité) sont favorables, l'eau pénètre à l'intérieur du sol par infiltration. Sous la surface du sol, les pores des formations géologiques renferment initialement à la fois de l'air et de l'eau : c'est la zone non saturée qui renferme la réserve en eau du sol (l'eau « verte ») et dont l'humidité excédentaire est véhiculée vers le bas par drainage gravitaire pour aller s'accumuler dans les formations géologiques perméables plus profondes et constituer les réserves d'eau des nappes souterraines. Ensemble, ces quantités d'eau accumulées et la roche saturée forment un aquifère.

L'ensemble des réserves d'eau douce du globe représente 3 % du volume d'eau sur Terre, dont l'essentiel est contenu dans les océans. Les eaux souterraines douces représentent 33 % des réserves, soit 15 millions de km³. En moyenne de 1 500 ans, leur temps de séjour peut aller de l'année au million d'années (on parle alors d'eau « fossile »). Le flux total des eaux douces souterraines du globe est de l'ordre de 10 000 km³/an, soit près de 10 % du volume des précipitations annuelles continentales, contre 26 000 km³/an pour les eaux superficielles (DE MARSILY, 2009). Ces ordres de grandeur sont confirmés par des modèles hydrologiques globaux de la planète (DÖLL et FIEDLER, 2008 ; WADA et al., 2010) dans lesquels la recharge des eaux souterraines est évaluée à 13 000 km³/an (au lieu de 10 000 km³/an), soit 35 % des ressources en eau renouvelables.

L'exploitation des eaux souterraines dans le monde et leur surexploitation

Les prélèvements d'eau souterraine dans le monde ont été estimés à 1 000 km³/an en 2010 (VAN DER GUN, 2012), dont 67 % pour l'irrigation, 22 % pour les besoins domestiques et 11 % pour l'industrie. Ces volumes représentent près de 10 % des ressources en eau souterraine renouvelables et 25 % des prélèvements en eau douce de la planète. La Figure 1 (ci-contre) présente l'évolution des prélèvements dans les 12 pays les plus forts préleveurs et en France (dont la somme en 2010 fait 73 % du total mondial, avec 60 % pour le seul continent asiatique : l'Inde prélève 250 km³/an au moyen de près de 25 millions de puits et forages).

De nombreuses nappes phréatiques de par le monde ont été exploitées d'une manière excessive (par rapport à leur recharge naturelle par les précipitations) pour soutenir le développement de l'agriculture irriguée, ce qui diminue les réserves géologiques des aquifères et risque d'entraîner à terme le tarissement total des nappes les plus vulnérables : ainsi, en Tunisie, plusieurs nappes phréatiques seront totalement épuisées avant la fin du XXI^e siècle (au rythme actuel des prélèvements) et elles ne pourront plus

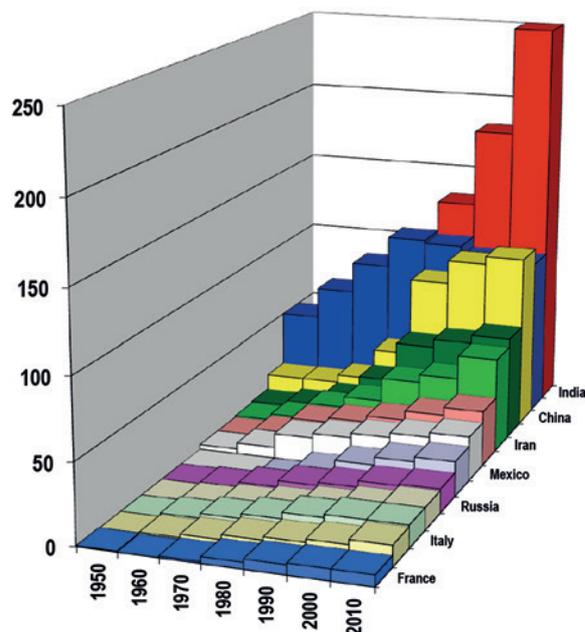


Figure 1 : Prélèvements d'eau souterraine (en km³/an) entre 1950 et 2010

(sources : SHAH, 2004 ; MARGAT, 2008 ; VAN DER GUN, 2012).

fournir qu'une fraction de la recharge de l'année. Par ailleurs, d'importants aquifères profonds des régions arides dont les eaux sont faiblement renouvelables ont été soumis à une exploitation intensive au cours des dernières décennies. Globalement, l'on estime que les prélèvements d'eau souterraine dans le monde ont sextuplé au cours des 60 années écoulées (VAN DER GUN, 2012). Il en est résulté, un peu partout dans le monde, de très importants rabattements des nappes au caractère parfois irréversible, entraînant souvent une lente dégradation de la qualité chimique des eaux souterraines du fait du lessivage de sels d'origine tellurique.

La permanence d'une nappe souterraine reflète un équilibre entre a) ses entrées d'eau (recharges par infiltration-diffuse des précipitations au sol ou concentrée, le long des cours d'eau) et b) ses sorties : les débits de drainages concentrés dans un cours d'eau, une source ou directement en mer, évaporation dans des exutoires diffus (appelés chotts ou sebkhas en Afrique du Nord, et playas en Amérique) et les prélèvements.

Tout nouveau prélèvement constitue une ponction sur les réserves de la nappe à proximité et se traduit par un rabattement de son niveau, celui-ci se stabilisant s'il a induit a) une réduction suffisante des sorties naturelles, ou b) un accroissement conséquent de la recharge par les cours d'eau.

Si le prélèvement dépasse la capacité de récupération du système, le rabattement continue de s'accroître, ce qui définit un état d'épuisement des réserves et de surexploitation de la nappe. En climat aride, les apports annuels sont très variables : le diagnostic de surexploitation nécessite de disposer de longues séries d'observations (voir la Figure 2 de la page suivante). La majorité des cas de surexploitation s'observent dans les régions arides et semi-arides,

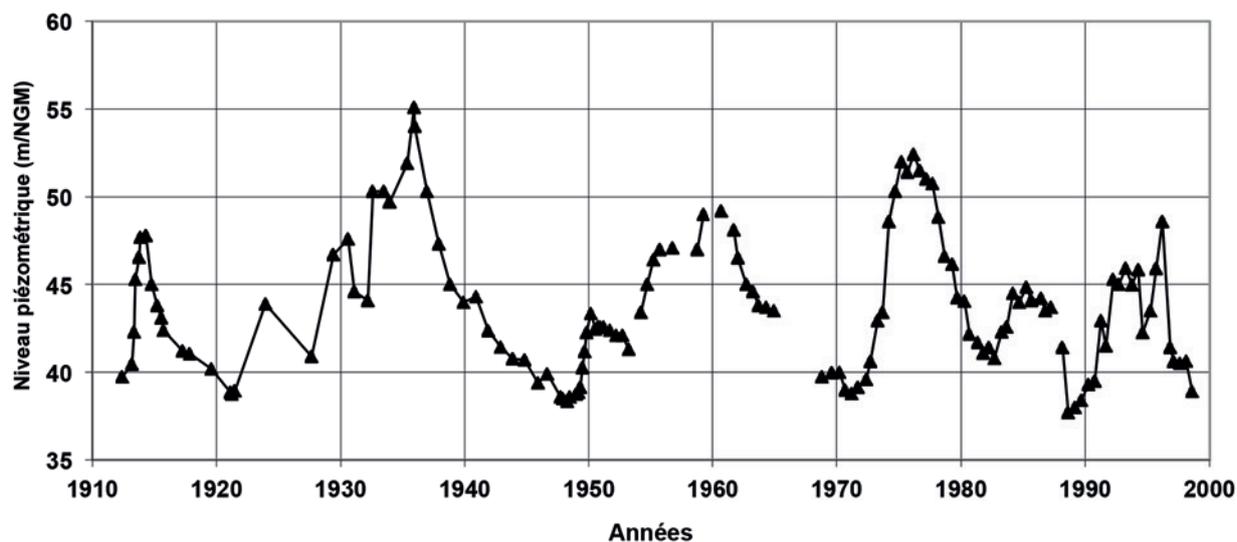


Figure 2 : Niveau piézométrique de la nappe phréatique de Mornag (Tunisie) de 1910 à 2000 (ENNABLI, 1980 ; HORRICHE, 2004) (les remontées du niveau correspondent à des successions d'années très pluvieuses).

où de fortes demandes d'eau pour l'irrigation des cultures excèdent les capacités de recharge des aquifères.

Le volume d'eau fourni par surexploitation des aquifères de la planète, qui fait l'objet d'un intérêt récent en raison de son impact avéré sur l'élévation du niveau des mers suite au ralentissement de la construction de grands barrages (WADA *et al.*, 2016), a été respectivement estimé, pour 2000, à 145 km³/an (KONIKOW, 2011), 204 km³/an (WADA *et al.*, 2012) et 113 km³/an (DÖLL *et al.*, 2014). Bien qu'encore entachée d'incertitude, la surexploitation des aquifères devrait encore croître au cours du XXI^e siècle en raison du changement climatique et d'une élévation des températures entraînant une augmentation des besoins en eau pour l'irrigation.

Les outils de télédétection contribuent à réduire ces incertitudes d'estimation. Ainsi, la mission de gravimétrie spatiale GRACE⁽³⁾ fournit depuis 2002 les variations spatio-temporelles des masses d'eau contenues dans le sol. Corrigées des composantes superficielles (eau de surface, réserves en eau du sol), ces mesures fournissent les variations du stock d'eau des aquifères de la Terre. La carte ci-contre⁽⁴⁾ (voir la Figure 3) indique les variations de masse des eaux souterraines en Inde (RODELL *et al.*, 2009) entre 2002 et 2008 (avec les diminutions en rouge et les gains en bleu, d'après les observations du satellite GRACE). La diminution observée dans le nord-ouest de l'Inde est de 4 cm d'eau/an, équivalant à une baisse du niveau de la nappe phréatique de 33 cm/an. Les gains d'eau souterraine dans le sud de l'Inde sont dus à des précipitations supérieures à la moyenne (la pluviométrie a été normale, sur la période étudiée, dans le nord-ouest du pays).

Pour lutter contre la surexploitation, il n'y a que trois solutions : réduire les prélèvements, faire de la recharge artificielle des nappes (par bassins d'infiltration ou par injection dans des forages) à partir d'eau de surface disponible en saison humide, ou transférer de l'eau de surface par

canaux en la substituant aux prélèvements, comme l'ont fait les Américains à partir du fleuve Colorado, ou comme vont le faire les Chinois à partir du Yang-Tsé.

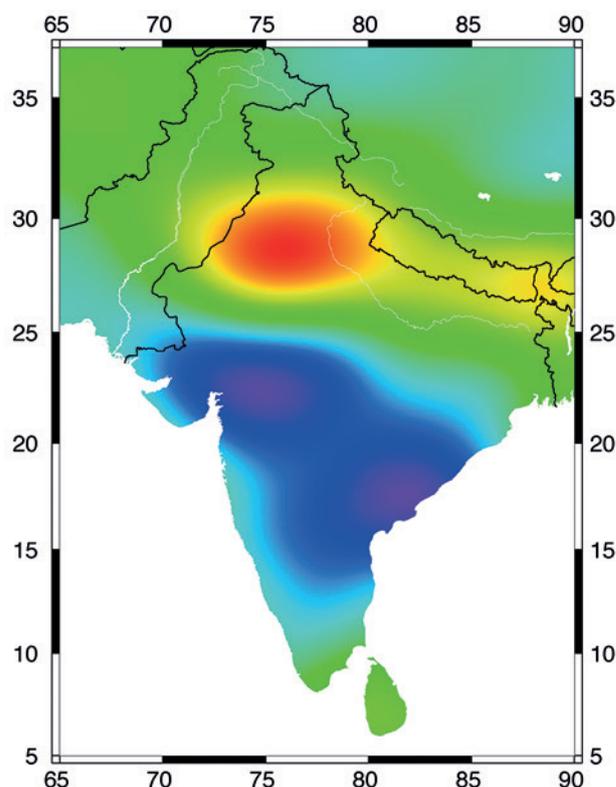


Figure 3 : Variation de la quantité d'eau présente dans les aquifères indiens entre 2002 et 2008 (image obtenue par le satellite GRACE).

Source : RODELL (M.), VELICOGNA (I.) & FAMIGLIETTI (J. S.), "Satellite-based estimates of groundwater depletion in India", *Nature* 460, 2009, pp. 999-1002 (Credit : VELICOGNA (I.) / UC Irvine).

(3) Gravity Recovery And Climate Experiment.

(4) https://www.nasa.gov/topics/earth/features/india_water.html

Les menaces pesant sur la qualité de l'eau souterraine et les directives européennes

Les nappes souterraines superficielles sont souvent affectées par des contaminations diffuses au premier rang desquelles la pollution bactérienne d'origine fécale, suivie des pollutions dues aux pratiques agricoles notamment par les nitrates et les pesticides ou à des pollutions localisées d'origine industrielle ou accidentelle.

Ces contaminations sont parfois induites par une exploitation excessive de l'eau souterraine : modification de la composition chimique d'origine tellurique, invasion d'eau salée (en bord de mer), solubilisation d'éléments toxiques comme l'arsenic (ainsi, au Bangladesh, des dizaines de millions de personnes ont été intoxiquées à des degrés divers par l'arsenic naturel de l'eau des puits (HARVEY et al., 2002)). La prévention et la préservation de la qualité des eaux souterraines nécessitent des mesures spécifiques adaptées aux niveaux des menaces, notamment pour la protection des captages d'eau potable qui intègrent le concept de « parcs naturels hydrogéologiques » proposé par G. de Marsily (1991) et qui devient partiellement d'actualité en France, aujourd'hui, pour la protection des AAC (aires d'alimentation des captages), avec plus de 1 000 captages classés « Grenelle », pour lesquels l'État a décidé de tenter de restaurer une bonne qualité des eaux par l'instauration de mesures agro-environnementales sévères applicables par les agriculteurs.

La directive-cadre sur l'eau (DCE) de l'Union européenne, adoptée en 2000 et visant à « rétablir un bon état écologique et chimique » des eaux superficielles et souterraines (en 2015, en 2022 ou, au plus tard, en 2029) a imposé de découper le territoire national en « masses d'eau souterraine », dont chacune délimite un domaine géographique, un aquifère ou une portion d'aquifère où les eaux ont un contexte similaire et dont la qualité doit être maintenue (ou améliorée) grâce à des mesures de restauration (un découpage similaire existe aussi pour les eaux superficielles).

La France a défini sur son territoire 553 masses d'eau souterraine. L'état d'une masse d'eau souterraine est déterminé par la plus mauvaise valeur de son état quantitatif et de son état chimique : une eau souterraine est en bon état lorsque son état quantitatif et son état chimique sont qualifiés, au minimum, de bons. En 2005 (ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer), un état des lieux a défini le risque de non atteinte du bon état des masses d'eau souterraine en France en 2015⁽⁵⁾ : 208 masses d'eau présentaient un risque avéré de non atteinte du bon état (si aucune mesure n'était mise en place), 108 un risque potentiel et 237 présentaient un bon état probable.

Sur le plan qualitatif, les principaux paramètres déclassant les masses d'eau souterraine en France sont aujourd'hui toujours dus aux nitrates et aux pesticides d'origine agricole. La directive de 2006 de la DCE sur les eaux souterraines vise à prévenir (et à lutter contre) la pollution des eaux souterraines. Les mesures prévues comprennent les critères permettant a) d'évaluer l'état chimique des eaux, b) d'identifier les hausses significatives et durables des te-

neurs en polluants, et c) de prévenir et de limiter les rejets indirects (après percolation) de polluants dans les eaux souterraines (notamment de substances dangereuses).

La sécurité des eaux souterraines

Sécurité intérieure

La sécurité intérieure des eaux souterraines désigne leur sécurité d'approvisionnement : celle-ci implique que l'on préserve les eaux souterraines contre tous les risques de dégradation de leur état tant quantitatif que qualitatif.

L'impact du changement climatique sur les eaux souterraines

Le changement climatique se traduit par une modification du régime de recharge des nappes, un recours accru à ces ressources aquifères en raison de leur forte résilience, une fragilisation des aquifères côtiers suite à l'élévation du niveau marin, et un accroissement général de la demande en eau dû au réchauffement climatique. P. Döll (2009) a simulé l'impact du changement climatique en 2050 sur la recharge pour plusieurs scénarios et modèles climatiques identifiant des zones de plus forte vulnérabilité en Afrique du Nord, dans le sud-ouest de l'Afrique, le nord-est du Brésil et le centre de la région andine.

La conservation des réserves stratégiques de secours

Des aquifères en nombre limité situés à proximité immédiate des grandes métropoles urbaines doivent être conservés dans un bon état quantitatif et qualitatif au titre de « réserves stratégiques » pour l'alimentation de secours des populations en cas de crise ultime (pollution atteignant le réseau d'eau potable, accident nucléaire ou acte terroriste). C'est par exemple déjà le cas de la nappe albienne, en ce qui concerne l'agglomération parisienne (Agence de l'Eau Seine-Normandie, SDAGE, 2016).

L'accroissement des ressources aquifères

La mobilisation de ressources en eau superficielle par de grands barrages est en voie d'achèvement dans de nombreuses parties du monde (sauf en Afrique) et des techniques traditionnelles de récupération sont à nouveau promues dans les régions arides. Ainsi, par exemple, en Tunisie, des banquettes antiérosives (qui limitent le ruissellement et augmentent l'infiltration) recouvrent plus d'un million d'hectares de terres arables : elles ont permis une spectaculaire régénération des terres de parcours pour le pâturage de troupeaux. Mais leur impact sur le bilan hydrique (notamment sur la recharge des nappes) n'est pas encore établi. Ces ouvrages d'art sont en tous les cas reconnus pour augmenter un peu plus l'évapotranspiration favorisant l'accumulation des ressources en eau du sol que l'on appelle l'eau « verte ». Une autre voie est le stockage à long terme en aquifères que maîtrisent depuis de nombreuses années les États arides de l'Ouest américain, notamment en ce qui concerne les ressources du Colorado. Dans d'autres régions arides, des sources d'eau de

(5) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-directive-sur-les-eaux.html>

surface de la dimension du Colorado sont rares, et les expériences de stockage souterrain sont encore timides (on peut citer parmi celles-ci la vallée du Souss, au Maroc, où les quantités infiltrées dans le lit de l'oued depuis 1990 ont dépassé le milliard de m³ (ABHSM, 2005).

Sécurité extérieure : les aquifères transfrontaliers

Près de 300 aquifères transfrontaliers ont été inventoriés par le programme mondial de cartographie hydrogéologique et d'évaluation de l'UNESCO, le WHYMAP (IGRAC, 2009 ; UNESCO, 2011). Certains des plus grands aquifères transfrontaliers du monde sont localisés en Amérique du Sud (bassin du Guarani) et en Afrique du Nord (système aquifère des grès nubiens et système aquifère du Sahara septentrional, le SASS). Des initiatives ont d'ores et déjà permis de mettre en place des mécanismes de gestion conjointe par les pays riverains : une autorité commune pour gérer le système aquifère des grès nubiens (Égypte, Libye, Soudan, Tchad), le mécanisme de concertation du SASS (Algérie, Libye, Tunisie) ou l'accord sur l'aquifère du Guarani (Brésil, Argentine, Paraguay, Uruguay). D'autres cas existent ailleurs dans le monde (notamment en Europe), mais en nombre très limité. En réalité, c'est dans les accords portant sur l'utilisation des bassins hydrographiques que peuvent se trouver mentionnées les eaux souterraines : sur les 400 traités actuellement en vigueur relatifs aux eaux douces transfrontières, 100 mentionnent les eaux souterraines, une dizaine seulement étant spécifiquement consacrés à la gestion conjointe d'aquifères transfrontaliers (MATSUMOTO, 2002). Quant à la réglementation internationale, elle a évolué au cours des 50 dernières années, depuis les « Règles d'Helsinki » (de 1966) et des références aux bassins hydrographiques pouvant inclure les eaux souterraines peu profondes, jusqu'à l'adoption par l'Assemblée générale de l'ONU, le 11 décembre 2008, de la résolution 63-124 portant sur le projet de « Loi sur les aquifères transfrontières », cette résolution pouvant servir de base pour l'élaboration d'une convention internationale (un projet réexaminé par l'Assemblée générale du 9 décembre 2011, celle-ci renvoyant les protagonistes aux règles de bon voisinage en « encourageant les États concernés à prendre les dispositions adéquates et à engager des accords bilatéraux pour la gestion appropriée de leurs aquifères transfrontières »).

Une gestion participative des eaux souterraines

L'eau souterraine constitue une ressource distribuée : la nappe se présente comme un réseau exploité collectivement et interactivement nécessitant un mode de gestion associant tous les usagers. La forme d'organisation associant les usagers à la gestion de la ressource comporte des principes directeurs universellement admis (OLLAGNON, 1991) : a) chaque usager trouve son intérêt individuel à prélever toujours plus sur une ressource partagée - pour éviter les abus, il faut favoriser la négociation ; b) la responsabilité de chacun sur l'état de la nappe est réelle, mais sans choix collectif d'ensemble, cet état est livré à la conscience de chacun (ce qui est insuffisant) et, enfin, c) pour les eaux souterraines, il faut prendre en compte l'ignorance qui libère de toute responsabilité à long terme.

Responsabilité, négociation, participation, solidarité ne sont rendues possibles que par une prise de conscience du caractère de « bien commun » de la nappe, une « conscience de nappe ».

Deux moyens permettent de sceller une telle conscience : a) l'éradication de l'ignorance des effets d'une surexploitation par l'éducation et la formation et b) l'instauration d'une redevance effective sur les prélèvements, qui signifie que l'eau a bien une valeur pour tous.

L'objectif de tout projet de gestion participative est de doter les agriculteurs-usagers d'informations, de connaissances et de compétences leur permettant d'assurer par eux-mêmes une gestion durable de la nappe et de contrôler leur propre demande. L'hypothèse fondamentale est que l'accès aux données et aux connaissances scientifiques élémentaires sur la nappe doit fournir aux agriculteurs les moyens de découvrir et d'adopter des solutions adéquates et durables pour régler les problèmes de surexploitation. La collecte des données et leur analyse sont conduites par les agriculteurs eux-mêmes⁽⁶⁾. Dans une perspective plus globale, Elinor Ostrom (1999) montre comment les individus arrivent à gérer des biens communs hors des modèles classiques étatisation/privatisation au travers d'institutions de gestion participative (dont cet auteur définit les conditions de leur durabilité).

En France, depuis 1994, ont été définies des « zones de répartition des eaux » (ZRE), où l'on constate une insuffisance chronique des ressources en eau par rapport aux besoins, et ce, tant pour les eaux souterraines que pour les eaux de surface. Dans ces zones, les prélèvements supérieurs à 8 m³/h sont soumis à autorisation. De plus, avec la loi sur l'eau (LEMA) de 2006, ont été créés dans les ZRE des « organismes uniques de gestion collective des eaux » (ce sont souvent les Chambres d'Agriculture qui jouent ce rôle) qui répartissent entre les usagers les volumes d'irrigation autorisés (tous les prélèvements doivent être mesurés par un compteur).

Conclusion

Les eaux souterraines ont l'immense avantage d'être une ressource distribuée qui permet des prélèvements diffus sans qu'il soit besoin d'un réseau de transport de l'eau (bien sûr, encore faut-il que des nappes aquifères existent). De plus, elles constituent des stocks d'eau importants et non contestés (comme le sont les barrages). Ces stockages sont le plus souvent saisonniers, ils s'étendent de la fin de périodes humides à la fin de périodes sèches. Mais, comme nous l'avons vu avec l'exemple de la nappe du Mornag, en Tunisie, ce stockage permet de lisser la variabilité des recharges annuelles, et ce, parfois sur plusieurs décennies. Mais, en certains lieux, un stockage d'eau dit « fossile » (c'est-à-dire constitué pendant des périodes plus humides de l'ère quaternaire) permet de bénéficier pendant quelques décennies (ou parfois durant quelques

(6) *Community Initiatives in Managing Groundwater Distress; APFA-MGS experience ; <http://www.apfamgs.org>*

siècles, pour les très grandes nappes) d'une réserve abondante, que l'on peut vider. Mais il faut alors prévoir une source de substitution le jour où la nappe en question sera tarie. Aujourd'hui, la recharge artificielle des nappes n'est pas assez développée pour accroître les réserves en eaux souterraines. Une gestion collective des prélèvements doit être mise en œuvre.

La protection de la qualité des eaux souterraines est une contrainte indispensable si l'on veut pouvoir continuer à utiliser cette ressource. La source majeure de pollution des nappes étant l'agriculture, il est indispensable de développer une « agro-écologie » qui permette de maîtriser les flux de polluants agricoles.

L'augmentation de la demande en eau est dictée par deux phénomènes : la croissance démographique et la modification des régimes alimentaires (la consommation accrue de viande engendrant un besoin en végétaux exigeants en eau pour l'alimentation du bétail). Quand cette augmentation de la demande en eau concerne des pays arides aux ressources en eau insuffisantes, il n'y a que trois solutions : a) transférer de l'eau par canaux ou par aqueducs depuis des régions plus riches en eau ; b) transférer de la nourriture produite ailleurs (l'on parle alors d'« eau virtuelle ») et enfin, c) permettre la migration des populations des zones arides vers les zones plus arrosées.

Si la croissance démographique n'est pas maîtrisée, le problème des migrants dont nous parlons aujourd'hui ne fera que s'amplifier.

Bibliographie

ABHSM (2005), *Renforcement de la recharge artificielle de la nappe du Souss*, agence de bassin hydraulique Souss Massa : www.riob.org/IMG/pdf/recharge_souss_05.pdf

Agence de l'eau Seine-Normandie, SDAGE 2016-2021 (2016) : http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Dossier_partage/INSTITUTIONNEL/SDAGE_2016_2021/AESN_SDAGE2016__WEB_.pdf

Voir aussi :

http://sigessn.brgm.fr/files/FichesMESO/Fiches_resumees/Fiche_resume_MESO_FRHG218_Seine-Normandie.pdf

DÖLL (P.), "Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment", *Environ. Res. Lett.* 4, IOP Publishing, 2009. Doi : 10.1088/1748-9326/4/3/035006

DÖLL (P.) & FIEDLER (K.), "Global-scale modeling of groundwater recharge", *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 2008, pp. 863-885. Doi : 10.5194/hess-12-863-2008.

DÖLL (P.), MULLER SCHMIED (H.), SCHUH (C.), PORTMANN (F. T.) & EICKER (A.), "Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modelling with information from well observations and GRACE satellites", *Water Resour. Res.* 50, 2014, pp. 5698-5720. Doi : 10.1002/2014WR015595.

ENNABLI (M.), *Étude hydrogéologique des aquifères du nord-est de la Tunisie. Pour une gestion intégrée des*

ressources en eaux, thèse de doctorat ès-sciences, Nice, 1980.

HARVEY (C. F.) & al., "Arsenic Mobility and Groundwater Extraction in Bangladesh", *Science* 22, vol. 298, Issue 5598, november 2002, pp. 1602-1606. Doi : 10.1126/science.1076978.

HORRICHE (F.), *Contribution à l'analyse et à la rationalisation des réseaux piézométriques*, thèse de doctorat ENIT, Tunis, 2004.

KONIKOW (L. F.), "Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea level rise", *Geophys. Res. Lett.* 38, L17401, 2011. Doi : 10.1029/2011GL048604.

MARGAT (J.), *Exploitation et utilisation des eaux souterraines dans le monde*, France, Éditions BRGM, 2008.

MARSILY DE (G.), *L'Eau, un trésor en partage*, Paris, Dunod, 2009.

MARSILY DE (G.), « Création de « parcs naturels hydrogéologiques ». Plaidoyer », bulletin SRETIEINFO, *Recherche Études Environnement Développement*, ministère de l'Environnement, 34 juin 1991, pp. 5-7.

MATSUMOTO (K.), *Transboundary groundwater and international law: past practices and current implications*, MSc, Dep. Geosciences, Oregon State University, 2002.

OLLAGNON (H.), *La Gestion patrimoniale des eaux souterraines à travers l'exemple de la nappe phréatique d'Alsace*, Comité Pollution des nappes phréatiques de l'Académie des Sciences, Paris, janvier 1991.

OSTROM (E.) & al., "Revisiting the Commons: Local Lessons, Global Challenges", *Science*, n°284, 1999, p. 278.

RODELL (M.), VELICOGNA (I.) & FAMIGLIETTI (J. S.), "Satellite-based estimates of groundwater depletion in India", *Nature* 460, 2009, pp. 999-1002. Doi : 10.1038/nature08238.

SHAH (T.), *Groundwater and Human Development: Challenges and Opportunities in Livelihoods and Environment*, Presentation made at the 2004 Stockholm World Water Week, Water Science and Technology, 2004.

VAN DER GUN (J.), *Groundwater and Global Change: Trends, Opportunities and Challenges*, in WWDR4, UNESCO, 2012.

WADA (Y.), VAN BEEK (L. P. H.), VAN KEMPEN (C. M.), RECKMAN (J. W. T. M.), VASAK (S.) & BIERKENS (M. F. P.), "Global depletion of groundwater resources", *Geophys. Res. Lett.* 37, L20402, 2010. Doi : 10.1029/2010GL044571.

WADA (Y.), VAN BEEK (L. P. H.), SPERNA-WEILAND (F. C.), CHAO (B. F.), WU (Y.-H.) & BIERKENS (M. F. P.), "Past and future contribution of global groundwater depletion to sea-level rise", *Geophys. Res. Lett.* 39, L09402, 2012. Doi : 10.1029/2012GL051230.

WADA (Y.), LO (M.-H.), YEH (P. J.-F.), REAGER (J. T.), FAMIGLIETTI (J. S.), WU (R.-J.) & TSENG (Y.-H.), "Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise", *Nature Climate Change* 6, 2016, pp. 777-780, 2016. Doi : 10.1038/nclimate3001.