



CHANGEMENT GLOBAL ET EAU SOUTERRAINE

MESSAGES CLES

- l'eau souterraine constitue un excellent 'amortisseur' de la variabilité climatique des ressources en eau de surface (aidant ainsi à l'adaptation au changement climatique), du fait des réserves stockées dans les systèmes aquifères
- les impacts du réchauffement global induit par l'homme sur l'eau souterraine demeurent incertains mais sont préoccupants, étant donné le rythme élevé de leur changement par rapport aux oscillations climatiques naturelles
- les empreintes paléo-environnementales révèlent que des changements majeurs sont intervenus dans les systèmes d'eau souterraine à la suite d'un 'changement climatique naturel' au cours des 10,000 - 500,000 années passées et que des oscillations mesurables du taux et de la salinité de la recharge se sont produites au cours des 50-100 dernières années
- certains changements d'origine anthropique dans l'utilisation des sols ont déjà engendré des impacts importants sur l'eau souterraine, l'intensification de la production agricole en réponse à la croissance de la population mondiale et de la demande en nourriture étant le facteur le plus important
- l'épuisement des ressources en eau souterraine depuis les années 1950, principalement du fait du pompage dans des puits dédiés à l'agriculture irriguée, a conduit indirectement à un transfert net d'eau de la terre vers la mer, contribuant ainsi à une élévation du niveau de la mer

Quel est le lien entre les changements globaux d'origine climatique et d'occupation des sols et les eaux souterraines ?

L'eau souterraine (contenue dans les sédiments et les roches) constitue la réserve d'eau douce principale de la planète, généralement avec des temps de stockage allant de plusieurs décennies à des siècles et des millénaires. Les ressources en eau souterraine constituent donc un excellent 'tampon' contre les effets de la variabilité climatique sur les ressources en eau de surface, en raison des réserves généralement importantes et largement réparties, stockées dans les systèmes aquifères. Mais des questions se posent quant à la résilience naturelle des réserves d'eau souterraine au changement global et quant à l'efficacité de nos efforts pour les conserver et les protéger.

L'eau souterraine entre et sort des systèmes aquifères au sein du sous-sol, son stockage étant augmenté ou diminué en fonction des modifications apportées au bilan hydraulique, qui varie dans le temps et est contrôlé à la fois par les conditions naturelles et les activités humaines, avec :

- des apports dans les zones de recharge - principalement par infiltration de la pluie en excès et de masses d'eau de surface selon des processus naturels et comme résultat des pratiques d'irrigation agricole (et plus localement par l'infiltration des fuites provenant des conduites d'eau urbaines et des collecteurs d'eaux usées)

UNE OASIS SAHARIENNE CREEE PAR L'EMERGENCE DE L'EAU SOUTERRAINE STOCKEE DANS UN GRAND SYSTÈME AQUIFÈRE DEPUIS 10,000-1,000,000 ANNEES



- des sorties - par décharge naturelle au droit des sources et dans les cours d'eau, les zones humides et les lacs et par pompage dans les puits

Avant le développement d'une activité anthropique à grande échelle (au plus tôt avant 1850 et avant 1950 dans beaucoup de régions), l'impact humain sur les systèmes d'eau souterraine (en termes de modification, d'exploitation et de pollution) était minime par rapport à la ressource disponible. La plupart des systèmes aquifères étaient dans un état d'équilibre entre recharge et décharge et la qualité naturelle de l'eau souterraine était généralement excellente. Mais la croissance démographique, l'intensification de l'agriculture, le développement de l'urbanisation/l'industrialisation et les changements climatiques ont exercé une pression accrue sur l'eau souterraine.

L'objectif de ce document stratégique est de passer en revue les connaissances actuelles sur les impacts à grande échelle du changement climatique et de l'utilisation anthropique des sols sur nos ressources en eau souterraine, en termes à la fois de quantité et de qualité ⁽¹⁾. A l'avenir, à l'occasion d'un bilan sur la durabilité sociale des activités humaines, il sera essentiel de considérer attentivement l'épuisement et la dégradation de l'eau souterraine et ce en termes d'impact sur le capital environnemental.

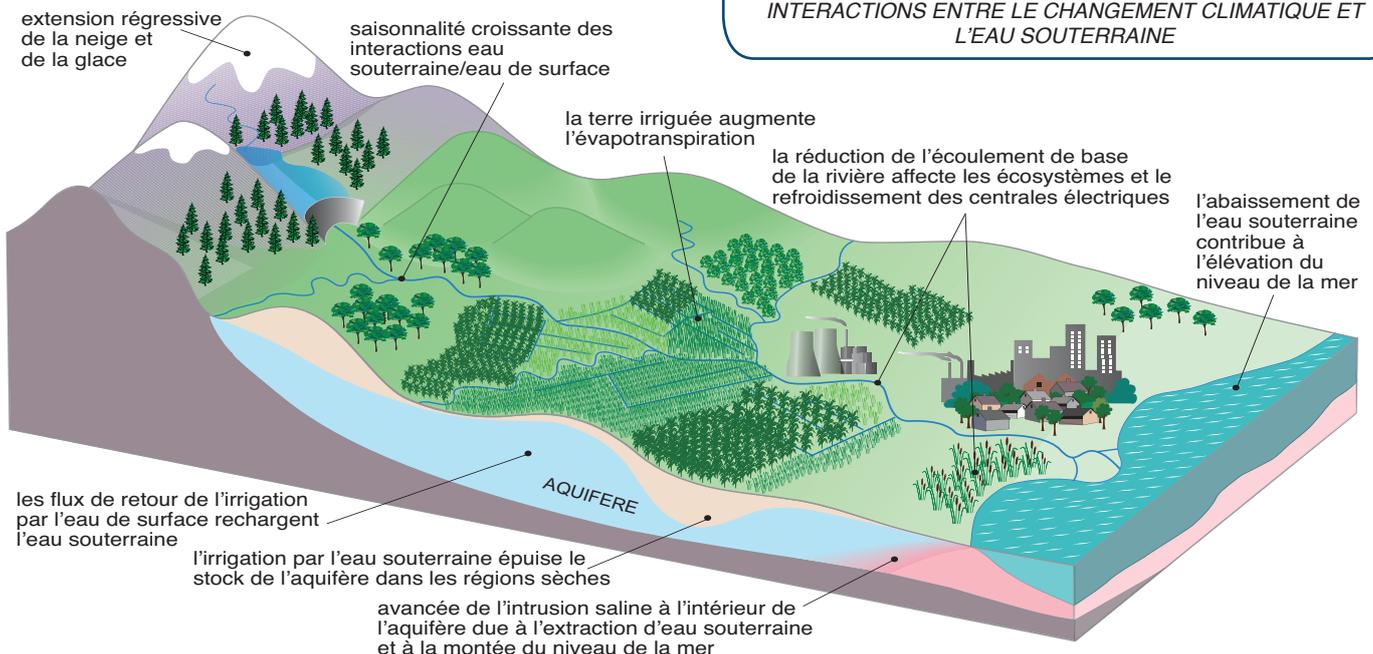
(1) d'autres mémoires de cette série ont abordé les problèmes de production agricole (Sécurité Alimentaire et eau souterraine), d'urbanisation (Villes résilientes et eau souterraine) et de pollution industrielle (Santé Humaine et eau souterraine)

Quel est l'effet probable du réchauffement de la planète sur l'eau souterraine ?

L'estimation des taux de recharge actuels de l'eau souterraine (et leur prédiction dans le futur) est d'une importance fondamentale quand on considère la durabilité de la ressource – dans les zones d'aridité croissante, la recharge par les pluies deviendra moins significative que la recharge indirecte par le ruissellement de surface et la recharge induite par l'activité humaine.

Une incertitude importante demeure quant à l'effet précis du réchauffement mondial sur la recharge de l'eau souterraine dans différentes régions. D'un côté, des températures ambiantes plus élevées provoqueront des événements pluvieux moins nombreux mais des pluies plus intenses et une recharge accrue est susceptible de se produire (contrebalançant une croissance de l'évapotranspiration) telle que dans nombre d'aquifères fissurés (à emmagasinement faible) la surface piézométrique s'établira à des niveaux plus haut que ceux enregistrés auparavant, causant des dommages aux propriétés et aux récoltes. D'un autre côté, des événements pluvieux plus rares mais plus abondants épuiseront l'humidité du sol et pourraient conduire à une érosion et à un ravinement ou à une compaction du sol, qui réduirait la capacité d'infiltration et la recharge de l'eau souterraine.

REPRESENTATION CONCEPTUELLE DES PRINCIPALES INTERACTIONS ENTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ET L'EAU SOUTERRAINE



Il est important de noter que les “rythmes naturels” de changement du climat et de couverture du sol régulièrement constatés durant les 400,000 dernières années ont été plus lents que ceux induits par l’homme. Le taux de réchauffement planétaire le plus faible prévu est environ 10 fois supérieur à ce qui s’est produit auparavant, ce qui suscite des inquiétudes quant à son effet sur la recharge de l’eau souterraine, particulièrement pour les aquifères à faible emmagasinement desquels dépendent des millions d’habitants dans les régions tropicales. Néanmoins, étant donnée l’inertie du stockage de nombreux aquifères de taille importante, seul un changement climatique durable aura pour conséquence l’épuisement des réserves en eau souterraine disponibles.

En revanche, l’exploitation accrue de l’eau souterraine et certains changements majeurs d’occupation des sols sont de nature à exercer un impact majeur à la fois sur la recharge et sur la qualité de l’eau souterraine en quelques décennies. Ainsi, en regardant vers l’avenir, les impacts conjugués du réchauffement planétaire, du changement d’affectation des terres et de l’exploitation de l’eau souterraine doivent être pris en compte.

Que révèle l’empreinte paléo-environnementale sur l’influence de la variabilité naturelle du climat sur l’eau souterraine

La réponse à long terme des systèmes d’eau souterraine à la variabilité naturelle du climat, indépendamment de l’activité humaine, peut être identifiée à partir des preuves paléo-environnementales. Dans leur état naturel, la plupart des systèmes d’eau souterraine et leur couverture terrestre se sont adaptés aux principaux cycles de changement climatiques au cours des 200,000 années passées voire plus. Et à court terme, pour certaines zones semi-arides (comme le Sahel), les profils isotopiques et de chlorures de « l’humidité de la zone non saturée » au-dessus des aquifères révèlent qu’au cours des 50-100 dernières années, ils ont été marqués par l’oscillation du taux de recharge et de salinité de l’eau souterraine causée par les cycles de sécheresse.

De plus, l’eau souterraine de beaucoup de grands systèmes aquifères, sur lesquels se trouvent aujourd’hui les parties du monde les plus arides, révèle que la plus grande partie de l’eau a été rechargée il y a entre 5,000 et 500,000 ans ou plus, pendant les épisodes anciens d’un climat plus froid et plus humide (exemple de l’aquifère des Grès de Nubie au Sahara) - et que dans

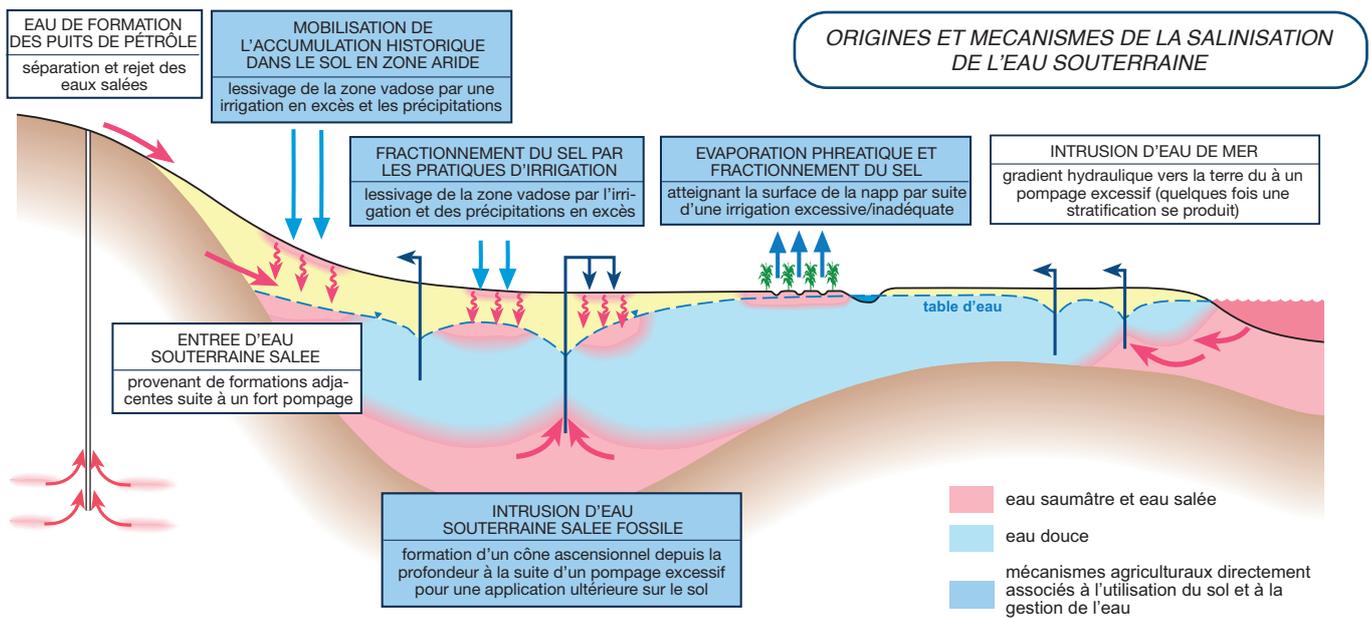
ces zones le « profil de la zone non saturée » indique qu’une petite recharge par les pluies (< 5 mm/an) a eu lieu par la suite. Puisque la recharge contemporaine est responsable d’une petite fraction seulement de l’eau souterraine présente dans de tels aquifères, leurs ressources doivent être considérées comme ‘non renouvelables’ et l’alimentation en eau qu’elles fournissent fortement résiliente à la variabilité du climat actuel. Cependant, en fin de compte, leur utilisation sera limitée dans le temps et mérite à ce titre un examen attentif - aujourd’hui, les pays les plus dépendants de telles ressources sont la Libye, l’Arabie Saoudite et l’Algérie, avec une utilisation significative également en Australie, en Chine, en Iran, en Egypte, en Tunisie, au Botswana, en Mauritanie, au Pérou et aux Etats-Unis d’Amérique

De quelle manière l’utilisation de l’eau souterraine contribue-t-elle au changement global ?

L’eau souterraine a été une ressource vitale pour l’alimentation en eau domestique et l’irrigation agricole à travers l’histoire de l’humanité. Mais une exploitation intensive de l’eau souterraine a commencé dès les années 1950 à la suite des avancées majeures réalisées dans les connaissances géologiques, la foration des puits, la technologie de pompage et l’électrification rurale. Globalement, les prélèvements d’eau souterraine ont continué à croître, atteignant 900 km³/an en 2010 et ont fourni environ 36% de l’alimentation en eau potable, 42% de l’eau d’irrigation et 24% de l’alimentation directe en eau industrielle. L’intensité des prélèvements est excessivement forte en Chine, en Inde, au Pakistan, en Iran, dans une partie du Bangladesh, au Mexique, aux Etats-Unis d’Amérique, en Afrique du Nord et au Moyen Orient. Les estimations du taux de baisse permanente du stockage se situent entre 100 et 145 km³/an pour la période 2000-08 ⁽²⁾.

L’épuisement de la ressource en eau souterraine contribue indirectement à la montée planétaire du niveau de la mer (avec de sérieuses conséquences sur les zones côtières), en générant un transfert d’eau depuis un stock terrestre de long terme vers une circulation au sein de l’hydrosphère de surface. Ce processus est sujet à des incertitudes du fait de l’imprécision inhérente aux bilans hydriques à long terme des aquifères, du stockage unitaire moyen des aquifères épuisés pouvant être drainé et de la proportion d’eau souterraine extraite restant dans le micro-climat local. Les estimations récentes vont jusqu’à 0.6 mm/an, une valeur de 0.3 mm/an (équivalant à un

(2) Doell et al (2012), Wada et al (2016)



De nombreux exemples graphiques de l'impact majeur des changements d'usage agricole du sol sur l'eau souterraine existent, pour des types de climat très divers :

- L'introduction d'une irrigation à grande échelle par l'eau de surface dans plusieurs zones semi-arides a conduit à une accumulation majeure d'eau souterraine sur des décennies depuis le milieu du 19^{ème} siècle, plus particulièrement au Pakistan et au Pendjab Indien
- En Europe Méditerranéenne et aux Etats-Unis d'Amérique, le développement d'une activité horticole intensive visant la production de fruits et légumes s'est traduit par une pollution sérieuse de l'eau souterraine par les nitrates et les pesticides rémanents.
- en agriculture sèche, la conversion massive du pâturage extensif à la culture intensive des céréales depuis les années 1950 dans l'Ouest de l'Europe a produit un changement marqué dans la qualité de la recharge de l'eau souterraine avec une pollution diffuse par les nitrates et les herbicides rémanents.

Globalement une zone d'accroissement permanent des terres agricoles (1.6 millions ha actuellement) est impactée par la salinisation, effaçant la plus grande partie du gain de productivité de l'agriculture réalisé par ailleurs ⁽⁴⁾. De nombreuses causes sont liées à l'eau souterraine

- l'évaporation directe depuis des surfaces piézométriques peu profondes, souvent associée à une irrigation inefficace utilisant de l'eau de surface importée dans des zones de drainage naturel inadéquat

- la salinité naturelle mobilisée depuis la profondeur dans les systèmes d'eau souterraine du fait du creusement et du pompage de puits d'eau non contrôlés et de la lixiviation du sous-sol salin à la suite du défrichage de la végétation naturelle
- L'augmentation de la salinité des sols lors d'une irrigation avec de l'eau souterraine minéralisée, qui est ensuite lessivée vers les aquifères superficiels

Comprendre les liens entre l'utilisation agricole des sols et l'eau souterraine est une base essentielle de la gestion intégrée des ressources en eau, et bien que ces liens aient été reconnus depuis longtemps, ils n'ont pas encore été largement traduits dans la politique et la pratique de gestion du sol.

Aujourd'hui, des forces s'exerçant à grande échelle, en particulier la mondialisation des marchés de denrées, sont devenues les déterminants principaux du changement d'utilisation des sols, avec certains facteurs nationaux ou locaux qui atténuent ou amplifient leurs effets. Elles influencent non seulement les choix d'utilisation du sol de millions de petits producteurs mais aussi ceux des grands investisseurs internationaux (privés et publics). Les projets de terres agricoles à grande échelle dans les pays moins développés sont estimés avoir augmenté d'au moins 36 Mha depuis 2000. Lorsque les tractations foncières ont lieu sans le consentement ouvert et éclairé des utilisateurs locaux actuels, on les désigne par le terme d'accaparement de terres' et de telles acquisitions impliquent souvent aussi un accès préférentiel (mais pas complètement étudié) à l'eau souterraine.



GLOBAL CHANGE & GROUNDWATER

Dans les pays à faible revenu, il y a un besoin pressant d'accroître la production des céréales de base comme le maïs, le riz et le blé, dont les rendements ne représentent généralement que 30-50 % de ceux de l'agriculture plus "avancée". Une production accrue peut être recherchée par l'introduction de l'irrigation et/ou l'amélioration des pratiques de gestion du sol et de l'eau, mais elle peut ne pas être adaptée à certains contextes écologiques. Les préoccupations grandissent à propos de l'impact sur l'eau souterraine d'un accroissement de la consommation d'eau, de la salinité et de la lixiviation des nutriments et/ou des pesticides.

BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE

- Basharat M, Hassan D, Bajkani A A & Sultan S J 2014 Liaison entre eau de surface et eau souterraine – choix de gestion de l'eau souterraine pour le système d'irrigation du Bassin de l'Indus. Publication IWASRI 299 – Institut International de Recherche sur la Saturation et la Salinisation (Lahore)
- Doell P et al 2012 Impact des prélèvements en eau souterraine et en eau de surface sur les variations du stock d'eau continentale. *Journal Geodynamics* 59-60 : 143-156
- Doell P et al 2014 Evaluation à l'échelle mondiale de l'épuisement de l'eau souterraine et des extractions d'eau souterraine impliquées : combinaison d'une modélisation hydrologique et de l'information fournie par les puits et les satellites GRACE – Recherches sur les Ressources en Eau 50 : 5698-5720
- Edmunds W M & Tyler S W 2002 Les zones non saturées en tant qu'archives des climats passés : vers un nouvel indicateur pour les régions continentales *Journal d'Hydrogéologie* 10 : 216-228
- Foster S S D & Loucks D P 2008 Ressources en eau souterraine non renouvelables – un guide pour une gestion socialement durable, à l'adresse des porteurs d'une politique de l'eau. UNESCO-IHP VI Series Eau Souterraine 15 (Paris)
- Foster S & MacDonald A 2014 Le dialogue 'sécurité de l'eau' - pourquoi est-il besoin d'être mieux informé sur l'eau souterraine. *Journal d'Hydrogéologie* 22 : 1489-1492
- Foster S & Cherlet J 2014 Les liens entre l'occupation du sol et l'eau souterraine – dispositions d'une gouvernance et stratégies de gestion pour garantir une 'récolte durable'. Article sur les Perspectives de Partenariat Mondial de l'Eau (Stockholm)
- Konikow L F 2011 Contribution de l'épuisement planétaire de l'eau souterraine depuis 1900 à la montée du niveau de la mer *Les Lettres de la Recherche en Géophysique* 38 : L 17401
- Margat J & Gun J van der 2013 L'eau souterraine à travers le monde - un synopsis géographique. Taylor et Francis (London)
- Quereshi A S, Gill M A & Sarwar A 2008 La gestion durable de l'eau souterraine au Pakistan. *Irrigation et Drainage* 59 : 107-116
- Taylor R G et al 2013 Eau souterraine et changement climatique. *Changement Nature et Climat* 3 : 322-329
- UNESCO - IHP 2015 Eau souterraine et changement climatique – atténuation de la crise mondiale de l'eau souterraine et adaptation au changement climatique Programme Hydrologique International GRAPHIC Article sur l'avancement du Projet (Paris)
- Voss C I & Soliman M 2013 Le Système Aquifère Nubien, aquifère transfrontalier non renouvelable, au Tchad, en Egypte, en Libye et au Soudan : problèmes d'eau souterraine classiques, analyses et modélisations hydrogéologiques parcimonieuses. *Journal d'Hydrogéologie* 22 : 441-468
- Wada et al 2016 Devenir de l'eau pompée dans le sous-sol et contributions à la montée du niveau de la mer. *Changement Nature et Climat (en ligne)* DOI : 10.1038/NCLIMATE3001

ACTIONS PRIORITAIRES

- des investigations plus détaillées et une gestion des systèmes d'eau souterraine sur le long terme sont nécessaires pour dresser l'état de leur ressource présente et la dynamique des flux et pour confirmer les tendances actuelles des changements du stockage et de la qualité.
- un effort systématique doit être porté pour affiner la pratique opérationnelle en vue d'une gestion adaptative de la ressource en eau, en particulier par la promotion de l'usage conjoint de l'eau souterraine et de l'eau de surface, plutôt que de les traiter comme des stocks séparés
- une recherche détaillée (dans divers contextes topographiques et hydrogéologiques) est nécessaire sur la réponse de la recharge de l'eau souterraine à la variation de l'intensité de la pluie, à l'augmentation de la température du sol et au changement d'occupation du sol, de manière à hisser la compréhension du phénomène à un niveau comparable à celui atteint pour les ressources en eau de surface
- une modélisation numérique des systèmes d'eau souterraine, développée à grande échelle temporelle et spatiale (contrainte par de meilleures données de terrain) est nécessaire pour progresser dans la compréhension de la manière dont de tels systèmes paraissent répondre aux pressions créées par une utilisation accrue du sol et un changement accéléré du climat