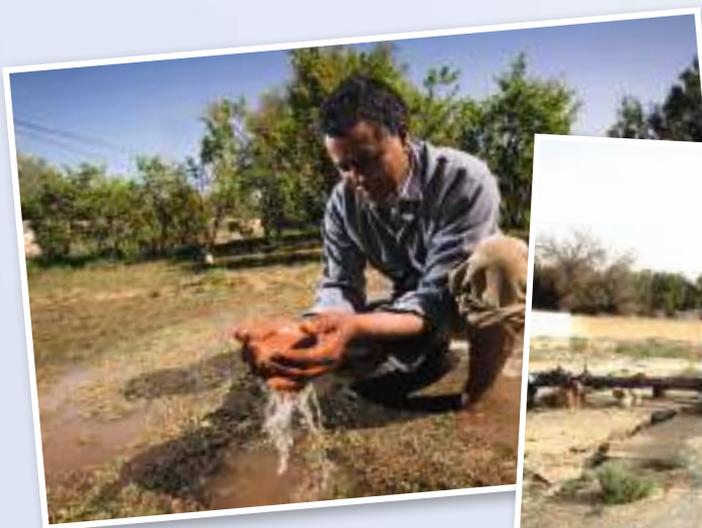


CSEFD

Les dossiers
thématiques

Numéro 14

LES RESSOURCES EN EAU PROFONDE DU DÉSERT DU SAHARA ET DE SES CONFINS ARIDES ET SEMI-ARIDES



AGROPOLIS
INTERNATIONAL
RESEARCH FOR AGRICULTURE - ENERGY - ENVIRONMENT



Comité Scientifique Français de la Désertification
French Scientific Committee on Desertification

Les dossiers thématiques du CSFD numéro 14

Directeur de la publication

Jean-Luc Chotte

Président du CSFD

Directeur de recherche de l'Institut de recherche pour le développement (IRD)

Auteur

Yves Travi

Hydrogéologue, hydrochimiste, isotopiste, Avignon Université, France, yves.travi@univ-avignon.fr

Contributeurs

- **Lilia Benzid**, chargée de la communication et du genre, Observatoire du Sahara et du Sahel, Tunisie
- **Marc Bied-Charreton**, agroéconomiste et géographe, professeur émérite de l'Université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yveline, France
- **Philippe Bilet**, juriste en droit public, Université Jean Moulin Lyon 3, France
- **Gilles Boulet**, hydrologue, IRD, France
- **Richard Escadafal**, pédologue spécialisé en télédétection, retraité de l'IRD, France
- **Sonja Koepfel**, experte en affaires environnementales, Convention sur l'eau, Division de l'environnement, Commission économique pour l'Europe des Nations Unies, Suisse

Coordination éditoriale et rédaction

Isabelle Amsallem, amsallem@agropolis.fr
Agropolis Productions

Réalisation

Frédéric Pruneau, pruneauproduction@gmail.com
Pruneau Production

Remerciements pour les illustrations

Véronique Gaston et **Daina Rechner** (photothèque Indigo de l'IRD, <https://indigo.ird.fr>), **Philippe Crochet**, **Alexis Gutierrez** (BRGM), **Jacques Taberlet** ainsi que les auteurs des différentes photos présentes dans le dossier.

Impression : LPJ Hippocampe (Montpellier, France)

Dépôt légal : à parution • **ISSN** : 1772-6964

Imprimé à 1 000 exemplaires

© CSFD / Agropolis International, janvier 2021.

Comité Scientifique Français de la Désertification

La création, en 1997, du Comité Scientifique Français de la Désertification, CSFD, répond à une double préoccupation des ministères en charge de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. D'une part, il s'agit de la volonté de mobiliser la communauté scientifique française compétente en matière de désertification, de dégradation des terres et de développement des régions arides, semi-arides et subhumides afin de produire des connaissances et servir de guide et de conseil aux décideurs politiques et aux acteurs de la lutte. D'autre part, il s'agit de renforcer le positionnement de cette communauté dans le contexte international. Pour répondre à ces attentes, le CSFD se veut une force d'analyse et d'évaluation, de prospective et de suivi, d'information et de promotion. Le CSFD participe également, dans le cadre des délégations françaises, aux différentes réunions statutaires des organes de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification : Conférences des Parties, Comité de la Science et de la Technologie, Comité du suivi de la mise en œuvre de la Convention. Il est également acteur des réunions aux niveaux européen et international. Il contribue aux activités de plaidoyer en faveur du développement des zones sèches, en relation avec la société civile et les médias. Le CSFD participe à des réseaux internationaux (par exemple le réseau international DNI, *DeserNet International*).

Le CSFD est composé d'une vingtaine de membres et d'un Président, nommés intuitu personae par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et issus des différents champs disciplinaires et des principaux organismes et universités concernés. Le CSFD est géré et hébergé par Agropolis International, association de médiation sciences-sociétés qui s'appuie sur un écosystème académique remarquable en région Occitanie dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation, de la biodiversité et de l'environnement. Le Comité agit comme un organe indépendant et ses avis n'ont pas de pouvoir décisionnel. Il n'a pas de personnalité juridique. Le financement de son fonctionnement est assuré par des contributions du ministère de l'Europe et des Affaires étrangères, du ministère de la Transition écologique et solidaire. La participation de ses membres à ses activités est gracieuse et fait partie de l'apport du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

Pour en savoir plus

www.csf-desertification.org

La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français. Les dossiers thématiques du CSFD sont téléchargeables sur le site internet du Comité, www.csf-desertification.org

Pour référence

Travi Y., 2021. Les ressources en eau profonde du désert du Sahara et de ses confins arides et semi-arides. *Les dossiers thématiques du CSFD*. N°14. janvier 2021. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 56 pages

La dégradation des terres concerne environ 23 % de la surface émergée du globe, augmente à un rythme annuel de 5 à 10 millions d'hectares. Elle affecte 3,2 milliards de personnes dans le monde. Dans les zones sèches, qui représentent près de 40 % des terres (hors terres gelées), on parle de désertification.

L'utilisation mal contrôlée de l'Homme sur les terres est la principale cause de dégradation des sols. Le changement climatique accentue ces effets et accélère la désertification. La lutte contre la désertification est au cœur des enjeux de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Éviter, réduire la dégradation des sols, restaurer les terres dégradées aident à lutter contre le changement climatique (e.g. restaurer 350 millions d'hectares permettrait de soustraire de l'atmosphère de 13 à 26 gigatonnes de CO₂) et de lutte contre la perte de biodiversité. Tendre vers un monde neutre en termes de dégradation des terres est la cible 3 de l'Objectif de Développement Durable 15 « Vie terrestre ». Restaurer les terres – les services qu'elles rendent à la Planète et aux Sociétés – est au cœur de la Décennie de la restauration des écosystèmes lancé par les Nations Unies (2021-2030).

Lutter contre la désertification et la dégradation des terres est un enjeu mondial qui repose sur des actions concrètes adaptées aux conditions locales. Cette mise œuvre nécessite une coopération entre tous les acteurs : organisations de la société civile, organisations professionnelles, partenaires techniques et financiers, décideurs publics, acteurs du secteur privé, établissements d'enseignement supérieur et de recherche. La recherche a, quant à elle, le rôle d'accompagner ces actions ancrées dans les territoires,

ainsi que les décideurs publics et privés, par les connaissances scientifiques les plus récentes.

C'est pour répondre à cette nécessité que le Comité Scientifique Français de la Désertification a décidé de lancer une série intitulée « *Les dossiers thématiques du CSFD* » qui veut fournir une information scientifique valide sur la désertification, toutes ses implications et ses enjeux. Cette série s'adresse aux décideurs politiques et à leurs conseillers du Nord comme du Sud, mais également au grand public, aux journalistes scientifiques du développement et de l'environnement. Elle a aussi l'ambition de fournir aux enseignants, aux formateurs ainsi qu'aux personnes en formation des compléments sur différents champs disciplinaires. Enfin, elle entend contribuer à la diffusion des connaissances auprès des acteurs de la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et la lutte contre la pauvreté : responsables d'organisations professionnelles, d'organisations non gouvernementales et d'organisations de solidarité internationale.

Ces dossiers sont consacrés à différents thèmes aussi variés que les biens publics mondiaux, la télédétection, l'érosion éolienne, l'agroécologie, le pastoralisme, etc., afin de faire le point des connaissances sur ces différents sujets. Il s'agit également d'exposer des débats d'idées et de nouveaux concepts, y compris sur des questions controversées, d'exposer des méthodologies couramment utilisées et des résultats obtenus dans divers projets et, enfin, de fournir des références, des adresses et des sites internet utiles. Ces dossiers sont validés par les membres du comité.

JEAN-LUC CHOTTE

Président du CSFD

Directeur de recherche de l'Institut de recherche pour le développement (IRD)

D'une superficie comparable à celle de l'Europe géographique (dix millions de km²), le désert du Sahara constitue la plus grande étendue de terre aride d'un seul tenant dans le monde. Avec ses confins semi-arides, il occupe la quasi-totalité de l'Afrique septentrionale, de l'océan Atlantique à la mer Rouge, et près de la moitié de la surface totale de ce continent. Cette vaste région renferme aussi parmi les plus grandes réserves d'eau douce liquide présentes sur Terre.

Le Comité Scientifique Français de la Désertification s'attache, dans ce dossier technique coordonné par Yves Travi, qui a consacré l'essentiel de sa carrière à l'étude des ressources en eau de cette région du monde, à présenter et expliciter cet apparent paradoxe.

Ce dossier nous rappelle notamment que les eaux souterraines constituent, sur notre planète, le deuxième stock d'eau douce après les glaces continentales polaires, loin devant les eaux de surface des lacs et des rivières. Il nous montre aussi que la présence de ces stocks d'eau douce liquide sur les continents n'est pas directement liée au climat, mais qu'elle dépend aussi de la structure géologique du sous-sol. À cet égard, l'Afrique septentrionale est dotée des meilleurs réservoirs géologiques en la matière. Il s'agit de bassins sédimentaires, parmi les plus vastes du monde, remplis de roches accumulées depuis plusieurs centaines de millions d'années sur plusieurs milliers de mètres d'épaisseur. Chaque mètre cube de ces roches poreuses, appelées « aquifères », renferme de 50 à plusieurs centaines de litres d'eau exploitables. Et cette eau est douce, elle n'est pas salée par la présence de couches de sel parmi les sédiments, comme c'est souvent le cas pour les aquifères profonds.

Ce dossier nous montre néanmoins que, compte tenu du climat aride qui règne aujourd'hui dans cette région du monde, ces réserves d'eau colossales ne sont, pour une grande part, que très faiblement alimentées, c'est-à-dire renouvelées ou « rechargées », par les précipitations (les pluies) actuelles. Il s'agit là d'une contrainte importante, qui n'existe pas dans les régions du monde qui sont plus arrosées. En d'autres termes, pour établir une analogie financière, ces stocks d'eau souterraine peuvent être comparés à un capital financier et leur recharge

actuelle à des intérêts générés par ce capital. En théorie, l'exploitation sur le long terme de ces ressources en eau souterraine ne peut être considérée comme durable que si elle touche aux intérêts, donc à la recharge, et non au capital, le stock.

Les flux d'alimentation de ces aquifères sahariens (leur « recharge ») sont donc très faibles, voire quasi nuls dans certaines zones. Par conséquent, la quantité d'eau souterraine qui sort naturellement de ces réservoirs, notamment à l'origine des oasis qui ponctuent le désert, est, globalement, très faible. Pourtant, elle est d'une importance capitale, en ces lieux spécifiques, tant pour les sociétés humaines que pour les écosystèmes, puisqu'il s'agit de la seule ressource en eau douce de cette vaste région. En outre, dans de nombreux cas, les débits de sortie naturels actuels, aux oasis notamment, ne sont pas en équilibre avec le climat d'aujourd'hui et sont encore le fruit, du fait de la lenteur des écoulements souterrains, de périodes de recharge plus importantes, datant d'il y a plusieurs milliers, voire plusieurs dizaines de milliers d'années. C'est pour cette raison que ces eaux souterraines sont souvent qualifiées de « fossiles ».

Ce dossier nous explique aussi que l'introduction, au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, de techniques modernes de pompage de l'eau souterraine dans ces aquifères par forages profonds a permis un certain développement économique dans ces régions, ainsi que l'amélioration du bien-être des populations concernées. Ce mode de prélèvement artificiel de l'eau souterraine, par opposition aux sorties naturelles artésiennes dans les oasis, au sein de ces aquifères peu rechargés se fait souvent en prélevant plus que la recharge, donc en puisant sur le capital. Il induit aussi des impacts, à plus ou moins long terme, jusqu'à plusieurs siècles, tant socio-économiques que sur les écosystèmes, impacts eux aussi bien décrits dans ce dossier.

Yves Travi, et les autres contributeurs au dossier, proposent aussi une excellente perspective sur les différents types de méthodes et d'approches progressivement développées par l'hydrogéologue, le scientifique spécialiste des eaux souterraines, depuis la seconde moitié du xx^e siècle. Ces méthodes ont été nécessaires pour la connaissance, la mise en valeur

et la gestion de ces grands aquifères sédimentaires, notamment dans ce contexte spécifique aride. Cette région du monde a ainsi servi de terrain expérimental à de nombreux développements scientifiques (isotopie, datation des eaux souterraines, paléoclimatologie, calage des modèles numériques...) qui, en retour, ont permis d'établir les connaissances sur ces systèmes hydrogéologiques rares. Ce dossier constitue donc additionnellement une excellente illustration de la manière dont les progrès scientifiques les plus pointus peuvent profiter au développement économique d'une région du monde, en l'occurrence ici par sa connaissance hydrogéologique.

Les données et outils techniques sont donc maintenant disponibles. Certes, comme le soulignent les auteurs de ce dossier, des progrès sont encore nécessaires, notamment pour disposer de modèles de simulation des écoulements d'eau souterraine encore plus précis et fiables. Néanmoins, ces données et outils sont d'ores et déjà à disposition des décideurs (élus, associations, représentants professionnels, populations, etc., des régions concernées) et permettent d'évaluer avec une précision satisfaisante non seulement les débits d'eau souterraine exploitables, mais aussi les localisations géographiques les plus appropriées pour cette exploitation, et également les incidences, à plus ou moins long terme, de cette exploitation (tarissement des sources, assèchement des oasis, augmentation des coûts de pompage, etc.). Les connaissances scientifiques et techniques sont donc à disposition des décideurs qui possèdent de ce fait tous les éléments pour construire et faire leurs choix parmi différentes politiques d'utilisation de ces eaux souterraines. Faut-il réduire voire stopper l'exploitation actuelle de ces importantes réserves afin de laisser ce stock intact pour les générations futures, comme cela pourrait être fait pour un gisement minier laissé « en réserve » par exemple ? À l'opposé du champ des possibles, faut-il utiliser ce capital en quelques décennies afin de satisfaire des besoins qui, avec le recul du long terme, pourront paraître superflus, surtout si aucune solution relais n'est prévue ? Des solutions intermédiaires sont-elles envisageables, en s'inspirant par exemple de celles mises en œuvre par certains pays disposant de ressources pétrolières ou minières importantes : la satisfaction aujourd'hui de besoins vitaux et/ou à haute

valeur ajoutée ; la constitution, au moyen d'une partie des bénéfiques économiques tirés de ce capital en eau, d'un autre type de capital, technologique ou financier par exemple, destiné à garantir un relais efficace lorsque le capital en eau initial sera tari ? En résumé, il s'agit de choix politiques, à effectuer au premier chef par les décideurs locaux concernés, pour lesquels l'hydrogéologue doit apporter sa contribution technique destinée à éclairer les décideurs ; il doit néanmoins leur laisser toute latitude d'effectuer eux-mêmes ces choix politiques. À cet égard, l'exploitation de type minier des eaux souterraines ne se distingue pas des autres exploitations minières : nous extrayons un éventail de ressources rares du sous-sol pour satisfaire nos besoins actuels, sans nous soucier de la façon dont les générations suivantes se procureront les ressources dont ils auront besoin. Il s'agit là d'un problème éthique et moral qu'il serait urgent d'aborder, tant dans le domaine de l'eau que celui des métaux rares et autres minéraux. Un nouveau rapport de prospective comme celui du Club de Rome de 1972 apparaît comme indispensable aujourd'hui...

Le présent dossier thématique vulgarisé sur les ressources en eau du désert du Sahara et de ses confins arides et semi-arides, de grande qualité, satisfera aussi bien les spécialistes des eaux souterraines désireux d'élargir leur culture hydrogéologique, qu'un grand public souhaitant se documenter sur la problématique des ressources en eau de cette région du monde et, plus largement, des régions arides et semi-arides comportant de grands bassins sédimentaires à faible recharge. Il servira aussi sans aucun doute d'ouvrage de référence permettant d'inspirer les politiques d'utilisation des ressources en eau souterraine de cette région du monde.

PATRICK LACHASSAGNE

Hydrogéologue, Directeur, HydroSciences Montpellier,
Université Montpellier, CNRS, IRD, France
Président du Comité Français d'Hydrogéologie
de l'Association Internationale des Hydrogéologues

GHISLAIN DE MARSILY

Professeur émérite à Sorbonne Université
Membre de l'Académie des Sciences, France



▲ Lac Katam, Tchad. © Jacques Taberlet



Sommaire

Introduction : l'eau douce, un enjeu mondial.....	6
Eaux fossiles et désertification	10
Caractéristiques générales des aquifères fossiles	18
Hydrogéologie des grands aquifères d'Afrique septentrionale	26
Une gestion durable des grands aquifères fossiles est-elle possible ?	38
Quel avenir pour les aquifères profonds des régions saharo-sahéliennes ?	50
Pour en savoir plus... ..	52
Lexique.....	56
Acronymes et abréviations.....	56

Introduction : l'eau douce, un enjeu mondial

L'eau, sur la Terre, est essentiellement contenue dans les océans. L'eau douce continentale représente un peu moins de 3 % et se décompose en deux entités : les stocks et l'eau du cycle de l'eau renouvelable (Marsily *et al.*, 2015). Quand il pleut, une fraction de l'eau qui atteint le sol contribue à l'eau dite « bleue » qui s'écoule en surface, dans les rivières et, après percolation, de façon

souterraine dans les nappes, ou encore alimente les lacs ; le reste constitue l'eau « verte » qui est provisoirement stockée dans le sol, puis directement évaporée ou absorbée puis évapotranspirée par les plantes. L'eau bleue représente environ 32 % des précipitations à l'échelle du globe, soit approximativement 36 000 km³ d'eau de pluie par an (Marsily *et al.*, 2018 ; Marsily, à paraître).

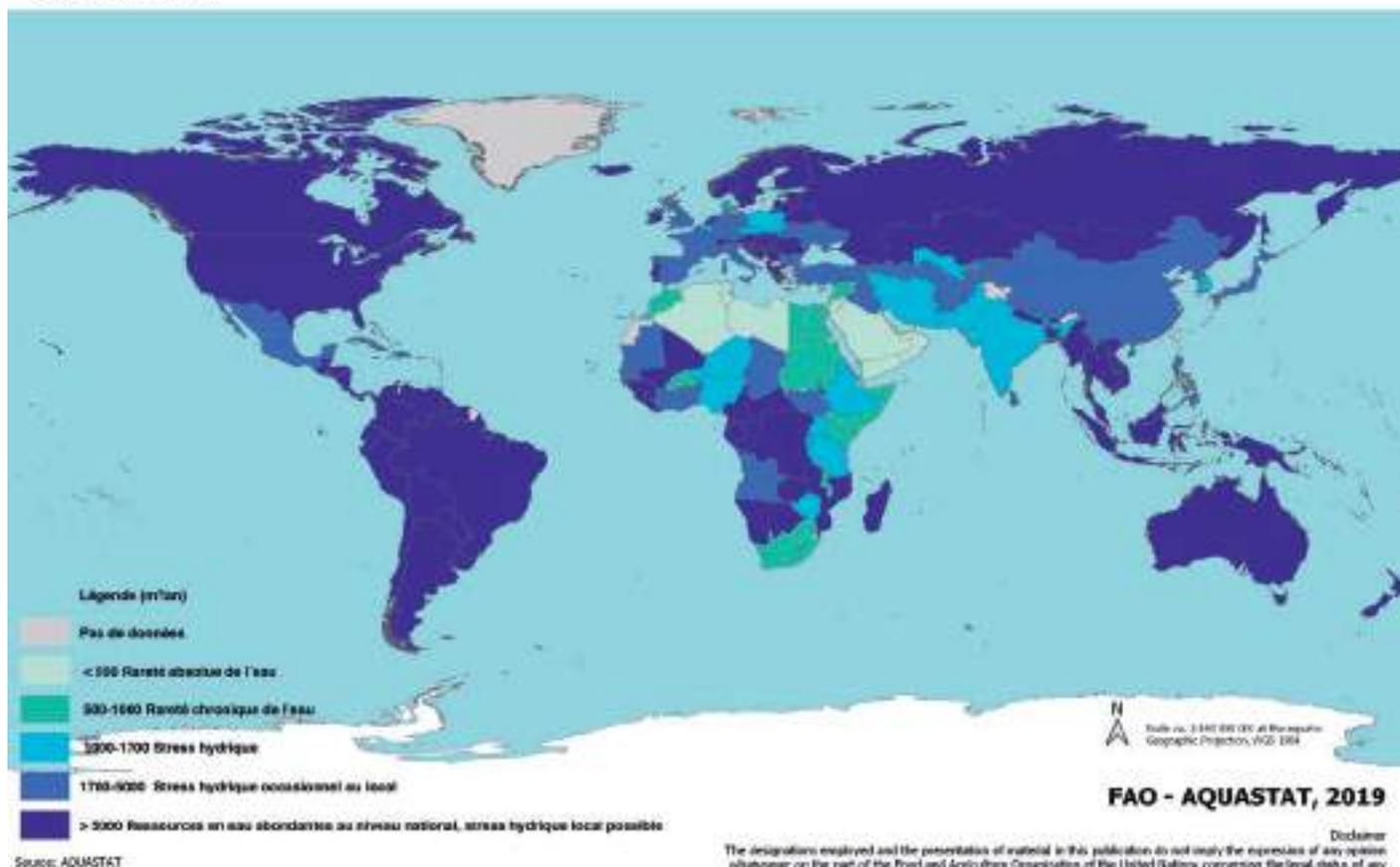


▲ Irrigation, Tunisie. Monsfe Hnshir (agriculteur) témoigne de l'importance de l'irrigation de sa parcelle agricole, Kettana, Tunisie.
Christian Lamontagne © IRD

UNE RESSOURCE LIMITÉE ?

La ressource en eau directement utilisable par les populations appartient à l'eau bleue. Celle-ci est principalement utilisée à des fins domestiques, industrielles, de transport et d'irrigation agricole. La ressource en eau domestique s'intègre donc dans un objectif plus général de gestion et de préservation de la ressource en eau.

Les prélèvements d'eau bleue (tout type d'usage confondu) sont en 2020 de l'ordre de 4 700 km³/an dans le monde, soit 13 % de l'eau disponible, pour une consommation de 2 500 km³/an, soit 7 % de l'eau disponible. L'irrigation constitue la part principale des prélèvements car elle concourt à assurer les besoins alimentaires des populations.



▲ Disponibilité en eau douce (m³/personne/an) en 2017. D'après FAO-AQUASTAT, 2019

DES SITUATIONS RÉGIONALES VARIÉES

La croissance de la population mondiale, l'intensification de l'agriculture, l'augmentation de l'utilisation de l'eau dans l'industrie entraînent une hausse continue de la demande en eau. Les besoins en eau, à l'horizon 2050, devraient ainsi augmenter d'environ 50 %, en particulier du fait de la demande en irrigation agricole. Malgré cela, la demande sera encore très inférieure à l'eau disponible. **On ne peut donc pas parler de pénurie d'eau douce à l'échelle mondiale.**

Toutefois, cette vision globale reflète imparfaitement la réalité lorsqu'on considère l'échelle régionale. En effet, **l'eau douce n'est pas répartie équitablement sur le globe** (cf. carte ci-dessus), suivant en cela l'abondance ou la rareté des précipitations en plus d'une distribution de la population souvent en inadéquation avec cette ressource. La gestion de l'eau peut alors être confrontée à différents enjeux contradictoires et des choix stratégiques doivent s'opérer. Par exemple, l'eau

potable, selon les endroits, peut être confrontée à des problèmes de rareté, de transport et/ou de qualité. Dans les zones déficitaires, l'eau potable entre directement en concurrence avec d'autres utilisations beaucoup plus consommatrices (comme l'irrigation) et oblige à mettre en place des stratégies comme celle de compenser la diminution de la consommation d'eau d'irrigation par l'importation de la nourriture qu'il n'est plus possible de produire sur place.

Compte tenu de l'importance considérable de la ressource en eau douce pour l'humanité, en particulier à la lumière des changements climatiques, **la gestion durable de cette ressource devient une priorité**. Ainsi, parmi les 17 objectifs de développement durable (ODD), adoptés le 25 septembre 2015 par les États membres des Nations Unies, l'ODD 6 s'intéresse tout particulièrement à l'eau (*cf.* zoom ci-contre).

LE STOCK D'EAUX DOUCES SOUTERRAINES

95 % de l'eau utilisée sur Terre proviennent de la ressource renouvelable. Les 5 % restants proviennent du stock d'eau souterraine. À l'échelle mondiale, ce stock décroît continuellement du fait (1) d'une surexploitation pour l'irrigation de quelques grandes ressources en eau souterraine comme c'est le cas en Inde, aux États-Unis, au Pakistan, en Iran et au Mexique (Döll *et al.*, 2016) et (2) surtout du fait de l'utilisation des eaux fossiles de grands aquifères non renouvelés, souvent seule ressource régionale d'importance disponible dans les régions où ils se trouvent.

L'Afrique septentrionale est un bon exemple de cette problématique car cette région abrite de nombreux grands aquifères transfrontières non ou peu alimentés. Ces eaux souterraines constituent souvent la principale et, parfois, la seule ressource en eau douce disponible et leur utilisation peut ainsi être source de conflits. Par conséquent, ces aquifères ont été très étudiés au cours de la période 1990-2010 et ont fait l'objet d'actions concrètes de rapprochement entre les pays concernés pour une gestion commune. Ces actions se sont ensuite considérablement ralenties du fait de l'insécurité endémique régnant dans la plupart de ces pays. Mais les connaissances apportées et les actions en cours sont suffisantes pour apporter un éclairage sur leur lien possible avec les phénomènes de désertification et décrire leur fonctionnement hydrogéologique fortement influencé par les climats du passé, et dont l'étude s'appuie sur les méthodes isotopiques et les modélisations. Dans cet ouvrage, ces deux aspects font l'objet des deux premiers chapitres. L'hydrogéologie et l'étude de ces systèmes sont décrites en détail dans le troisième chapitre, en s'appuyant sur trois exemples de grands systèmes aquifères profonds : le bassin du Tchad, le système aquifère des grès nubiens (NSAS) et le système aquifère du Sahara septentrional (SASS). Enfin, dans le dernier chapitre, la question de la gestion rationnelle de ces grands systèmes et son aspect transfrontière sont abordés en décrivant en détail les actions entreprises sur le NSAS et le SASS. C'est également l'occasion de rappeler les textes juridiques internationaux en vigueur dans ce domaine.

▼ Dunes du Grand Erg Oriental, Tunisie. Vincent Bonneau © IRD



→ ZOOM | Un ODD dédié à l'eau

L'ODD 6 vise à « garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau ». Plus précisément, cet objectif vise un accès universel et équitable à l'eau potable, à l'hygiène et à l'assainissement d'ici 2030, en particulier pour les populations vulnérables. Il appelle également à une gestion durable de cette ressource,

et mentionne la réduction du nombre de personnes souffrant de la rareté de l'eau. Cet objectif intègre la notion de gestion transfrontalière de cette ressource, essentielle à sa gestion durable mais aussi favorable à la paix et à la coopération. L'ODD 6 s'accompagne de huit cibles qui contribuent chacune à l'atteinte de cet objectif (cf. tableau ci-dessous).

Cibles	Descriptifs
Accès à l'eau potable	6.1 D'ici à 2030, assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable.
Accès aux services d'assainissement et d'hygiène	6.2 D'ici à 2030, assurer l'accès de tous, dans des conditions équitables, à des services d'assainissement et d'hygiène adéquats et mettre fin à la défécation en plein air, en accordant une attention particulière aux besoins des femmes et des filles et des personnes en situation vulnérable.
Qualité de l'eau	6.3 D'ici à 2030, améliorer la qualité de l'eau en réduisant la pollution, en éliminant l'immersion de déchets et en réduisant au minimum les émissions de produits chimiques et de matières dangereuses, en diminuant de moitié la proportion d'eaux usées non traitées et en augmentant considérablement à l'échelle mondiale le recyclage et la réutilisation sans danger de l'eau.
Gestion durable des ressources en eau	6.4 D'ici à 2030, augmenter considérablement l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans tous les secteurs et garantir la viabilité des prélèvements et de l'approvisionnement en eau douce afin de tenir compte de la pénurie d'eau et de réduire nettement le nombre de personnes qui souffrent du manque d'eau.
Gestion intégrée des ressources	6.5 D'ici à 2030, mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau à tous les niveaux, y compris au moyen de la coopération transfrontière selon qu'il convient.
Protection et restauration des écosystèmes	6.6 D'ici à 2020, protéger et restaurer les écosystèmes liés à l'eau, notamment les montagnes, les forêts, les zones humides, les rivières, les aquifères et les lacs.
Coopération et renforcement de capacités	6.a D'ici à 2030, développer la coopération internationale et l'appui au renforcement des capacités des pays en développement en ce qui concerne les activités et programmes relatifs à l'eau et à l'assainissement, y compris la collecte de l'eau, la désalinisation, l'utilisation rationnelle de l'eau, le traitement des eaux usées, le recyclage et les techniques de réutilisation.
Gestion collective de l'eau	6.b Appuyer et renforcer la participation de la population locale à l'amélioration de la gestion de l'eau et de l'assainissement.



Eaux fossiles et désertification

En dehors des grands bassins fluviaux, la présence d'eau douce dans les zones arides ou désertiques de la bande saharo-sahélienne, sous la forme de lacs ou de sources (oasis), est souvent exclusivement liée à l'émergence d'eaux souterraines profondes, considérées comme « fossiles » car accumulées lors des périodes pluvieuses du Quaternaire, il y a des milliers voire des centaines

de milliers d'années. Leur surexploitation par l'homme (par drainage et pompage) ou leur vidange naturelle conduisent à l'assèchement et/ou à la salinisation de ces zones humides et, par voie de conséquence, à la disparition de leur biodiversité. **La préservation des ressources en eaux souterraines profondes constitue un facteur important pour lutter contre la désertification.**

▼ **Lac Oum El Ma erg d'Oubari en Libye.** Résurgence d'eau souterraine.
© Philippe Crochet



→ ZOOM | Un peu de terminologie hydrogéologique...

Aire d'alimentation ou zone de recharge : domaine dans lequel ont lieu les apports d'eau, continus ou temporaires, qui alimentent une nappe, un aquifère défini, notamment un aquifère en partie captif, non alimenté sur toute son étendue.

Aire d'influence d'un captage : domaine dans lequel le niveau piézométrique d'une nappe est influencé, c'est-à-dire modifié par des rabattements sous l'effet d'un prélèvement.

Alimentation d'une nappe : apport d'eau externe, de toutes origines, à un aquifère.

Aquifère : couche ou massif de roches perméables comportant une zone saturée (ensemble du milieu solide et de l'eau contenue) suffisamment conducteur d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables.

Aquifère captif et nappe captive : aquifère surmonté d'horizons géologiques peu perméables dont la nappe souterraine qu'il contient est sans surface libre ; elle est soumise en tous points à une pression supérieure à la pression atmosphérique. Cette nappe est dite « captive » et sa surface piézométrique est supérieure au toit de l'aquifère. Ainsi, la baisse du niveau piézométrique ne désature pas l'aquifère, limité par son toit, mais entraîne une décompression hydraulique.

Aquifère libre et nappe libre : aquifère généralement superficiel dont la surface piézométrique forme la limite supérieure et dont la nappe est dite « à surface libre ». Le niveau piézométrique fluctue librement et sa pression est équivalente à la pression atmosphérique. Lorsque le niveau piézométrique baisse le réservoir se désature.

Artésianisme : phénomène de jaillissement d'eau souterraine à la surface du sol.

Artésien : qualifie un puits ou un forage exploitant une nappe captive, dans lequel l'eau s'élève naturellement.

Champ de captage : domaine comportant un certain nombre de captages, de puits de pompage interconnectés ou non, disposés de manière à restreindre leurs interférences et exploités ensemble pour une même utilisation.

Décompression hydraulique : lors de l'exploitation ou de la vidange naturelle d'une nappe emprisonnée entre deux niveaux imperméables (« nappe captive »), son niveau piézométrique baisse, comme pour une nappe libre mais sans que l'aquifère ne soit désaturé. Seule la pression en son sein diminue. Cela entraîne d'une part une diminution (élastique en général, donc réversible) de la porosité de la roche et, d'autre part, une décompression de l'eau qu'elle renferme, d'où le terme de « décompression hydraulique ». Ce sont ces deux processus qui permettent la production d'eau sans désaturer le milieu.

Drainance : transfert d'eau souterraine, le plus souvent vertical et lent, à travers un niveau semi-perméable.

Nappe d'eau souterraine : ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique.

Niveau piézométrique : niveau supérieur de la colonne liquide statique qui équilibre la pression hydrostatique au point auquel elle se rapporte. Il est matérialisé par le niveau libre de l'eau dans un tube vertical ouvert au point considéré (piézomètre).

Système aquifère : aquifère ou ensemble d'aquifères et de corps semi-perméables (« aquitards ») d'un seul tenant, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique continue et qui est circonscrit par des limites faisant obstacle à toute propagation d'influence appréciable vers l'extérieur. Un système aquifère est à la fois le champ d'écoulement des eaux souterraines (et de transport par celles-ci), suivant la répartition des potentiels (charge hydraulique ou pression de la colonne d'eau), et le champ de propagation d'influences de toutes origines, naturelles (recharge, décharge par exemple) et artificielles (pompage par exemple).

Zone non saturée : système à trois phases (solide, liquide, gaz) où seule une partie des espaces lacunaires sont remplis d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol.

Zone saturée : système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores du milieu solide sont remplis d'eau.

Pour plus d'informations : Castany et Margat, 1977 ; Collin, 2004
<http://hydrologie.org>



LES EAUX FOSSILES : DES RESSOURCES ANCIENNES ET VULNÉRABLES

Schématiquement, et du point de vue de leur gestion, il existe deux catégories de systèmes aquifères, à savoir (1) ceux dans lesquels l'eau souterraine s'écoule et qui se rechargent au fil des saisons – les systèmes aquifères « renouvelables » – et (2) ceux qui se rechargent peu ou pas en raison des contextes climatique et/ou géologique – les systèmes aquifères « non renouvelables » ou « peu renouvelables ». La gestion durable de ces deux types de système repose sur des schémas d'exploitation différents.

Les aquifères renouvelables sont réalimentés dans leurs zones de recharge par les pluies directement, par percolation, ou indirectement, via les eaux de surface. Parfois, ils peuvent aussi être réalimentés par les nappes profondes, en particulier dans les zones de pompage, par le phénomène de drainance ascendante entre deux aquifères contigus et superposés et provoquée par la baisse de charge (ou du niveau piézométrique) de l'aquifère superficiel. La partie renouvelable de cette ressource peut être considérée comme étant la part du flux naturel moyen que l'on peut utiliser dans des conditions techniques, économiques et

Les eaux fossiles se sont accumulées dans des aquifères à des époques géologiques lointaines, il y a des milliers voire des centaines de milliers d'années lorsque les conditions climatiques étaient plus humides qu'aujourd'hui.

environnementales acceptables. En effet, la « réserve » d'eau, que l'on peut entamer dans un premier temps, si le réservoir est suffisamment épais et si le niveau de la nappe est proche du sol, peut alors se reconstituer sur le moyen terme. **Une gestion durable veut que l'on s'intéresse seulement à cette partie renouvelable.**

On trouve fréquemment ces systèmes aquifères dans les régions humides ou tempérées, notamment sous la forme de nappes alluviales ou colluviales, ou encore dans les systèmes karstiques où l'eau s'écoule de manière significative durant un cycle hydrologique. **Ils sont beaucoup moins nombreux dans les régions arides ou semi-arides où les réseaux hydrographiques se résument souvent aux grands fleuves.** Les nappes superficielles des régions sahéniennes sont réalimentées au cours des saisons des pluies, mais elles restent très vulnérables du fait de réserves très limitées et qui résistent mal à de longues périodes de sécheresse.

Les aquifères non renouvelables, au contraire, sont peu ou pas réalimentés, du fait de leurs caractéristiques hydrogéologiques, mais aussi et surtout parce qu'ils se situent aujourd'hui sous des climats arides ou

semi-arides alors qu'ils se sont constitués, pour l'essentiel, lors de périodes géologiques anciennes, plus humides. Les précipitations dans ces régions sont en effet souvent trop faibles et l'évapotranspiration trop forte pour recharger significativement les nappes profondes. Dans cette seconde catégorie, qui correspond en général aux aquifères des grands bassins sédimentaires, l'eau est alors dite « fossile ».

Par définition, **les eaux fossiles sont donc des eaux d'origine atmosphérique qui se sont rechargées directement ou indirectement, via les fleuves et les lacs, au cours des épisodes humides du Quaternaire.** Compte tenu de leur enfouissement dans les niveaux captifs et loin des zones de recharges, ces eaux sont sous pression (« en charge ») et peuvent rejoindre la surface naturellement – sous forme de sources ou de venues diffuses qui alimentent des fleuves et des lacs comme par exemple le lac Yoa au nord du Tchad (cf. photographie ci-dessous) – ou artificiellement (à l'aide de forages).

Les prélèvements anthropiques (artificiels) de ces eaux fossiles correspondent essentiellement à du déstockage et, dans les premières années d'exploitation,

◀ **Accès à l'eau au Niger.**
Forage artésien.
Wankam, dans la région de Tillabéri.
Tahirou Amadou © IRD

n'influencent souvent que relativement peu les flux naturels sortants (aux sources et par drainance). Dans le cas des nappes captives profondes, ce déstockage ne désature pas le réservoir mais provoque une décompression hydraulique.

Dans les régions humides ou tempérées, les aquifères non renouvelables existent à côté de cours d'eau permanents et d'aquifères renouvelables, mais ces derniers sont utilisés de préférence et, lorsque la décompression est suffisante, ils peuvent même parfois réalimenter les aquifères sous-jacents (par drainance descendante). Leur gestion y est donc relativement plus aisée.

À l'échelle du globe, l'exploitation de ces aquifères non renouvelables ne représente pas des quantités d'eau considérables (32 km³/an, soit environ 4 % de l'exploitation d'eau souterraine mondiale). Mais, **dans les régions arides ou semi-arides, les aquifères non renouvelables constituent souvent la principale – voire la seule – ressource en eau mobilisable. Leur utilisation s'apparente donc à une exploitation de type minier, c'est-à-dire avec un risque important d'épuisement** (cf. zoom page suivante).

▼ **Lac Yoa (370 ha, profondeur maximale 25 m) près d'Ounianga Khebir, Nord du Tchad.** Entre le Tibesti et l'Ennedi, ce lac est alimenté par plusieurs sources qui jaillissent des grès fracturés (eau à 300 mg/l de minéralisation).
© Jacques Taberlet



→ ZOOM | Exploitation minière des eaux fossiles : une caractéristique des zones sèches ?

Pour l'essentiel, et même en totalité dans la plupart des pays du monde, les exploitations d'eau souterraine captent des ressources renouvelables. Toutefois, une fraction minime de ces prélèvements au plan mondial, mais notable dans quelques pays, correspond à des exploitations minières de ressources non renouvelables.

Quantité d'eau produite dans le monde par exploitation minière

Sur la base des statistiques disponibles (données de 1995 à 2005), relativement anciennes et incomplètes, l'exploitation minière d'eau souterraine atteindrait, pour cette période récente, environ 32 km³/an dans le monde (cf. tableau ci-contre).

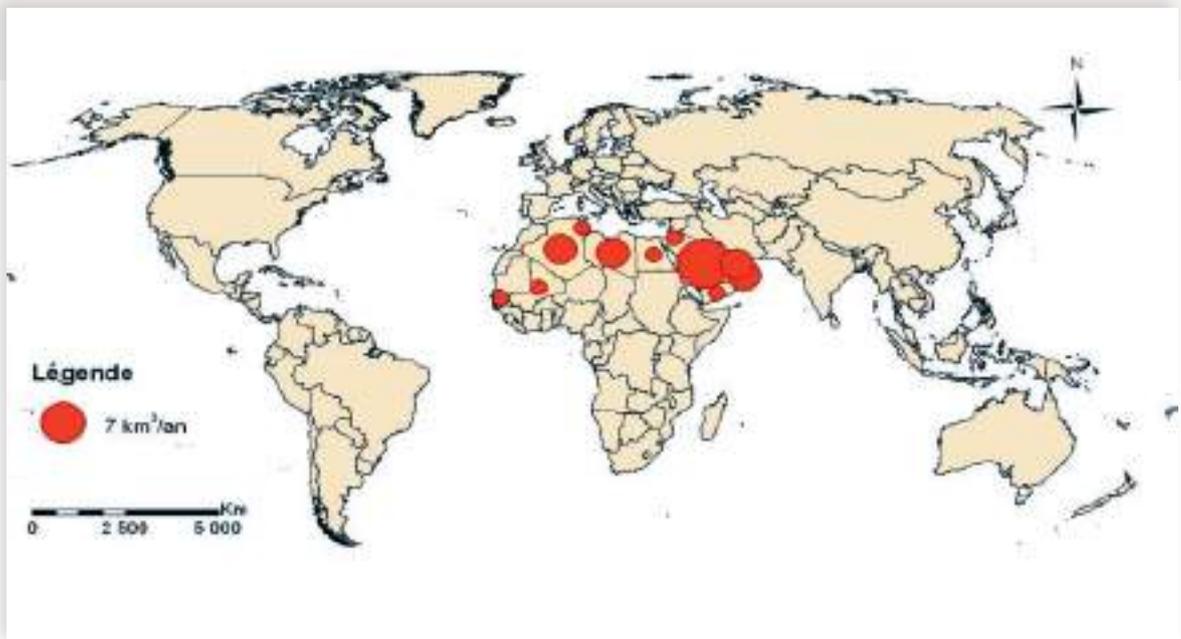
Part de ces productions par rapport aux exploitations totales d'eau souterraine

L'exploitation totale d'eau souterraine dans le monde s'élève à environ 800 km³/an. Aussi, la part due aux

exploitations minières s'élèverait à 4 % au plan mondial, ce qui est relativement faible. Toutefois, ce type d'exploitation des eaux fossiles se concentre dans quelques pays et est prédominante dans certains d'entre eux (cf. carte ci-dessous).

Les pays producteurs

L'exploitation minière des eaux souterraines est relativement concentrée : les trois plus grands pays producteurs – Arabie saoudite, Libye et Algérie – cumuleraient près de 85 % du total mondial estimé. Il est à remarquer qu'il s'agit de pays dont l'économie est en majeure partie minière (exploitation des hydrocarbures), pour qui la valorisation de ressources non renouvelables est familière et normale, même s'agissant de l'eau... **L'exploitation minière de l'eau est ainsi une spécialité de la zone aride et hyperaride : la quasi-totalité de ces extractions (98,5 %) se situe dans les pays arabes.**



Au-delà d'un certain seuil, toute utilisation des eaux fossiles est considérée comme une surexploitation qui conduit à la disparition progressive du stock d'eau contenu dans l'aquifère. Ces eaux constituent alors une ressource exploitée de type minier.

Dans les plus grands pays producteurs, l'extraction des ressources non renouvelables est une source d'approvisionnement notable, souvent dominante, voire la seule. Celle-ci couvre une majeure partie des besoins en eau (principalement pour l'irrigation) :

- 86 % en Arabie saoudite
- 83 % en Oman
- 74 % dans les Émirats Arabes Unis
- 71 % en Libye
- 35 % en Algérie (~ 100 % au Sahara)

Ces exploitations minières de ressources en eau non renouvelables sont des facteurs de développement appréciables à court et moyen termes, mais, à l'évidence, qui risquent de poser des problèmes à long terme, humains, sociétaux et écologiques.

D'après Margat, 2008
Pour plus d'informations : Marsily *et al.*, 2015 ; Marsily, à paraître

Pays	Date des données	Extraction km ³ /an	Aquifères exploités	Références
Arabie saoudite	2000	20,47	Arabian Multilayered Aquifer System	Abdurrahman, 2002
Lybie	1999-2000	3,2	Nubian Sandstone Aquifer SASS, Murzuk	Bakhbakhi, 2002 OSS, 2003
Algérie	2000	1,68	SASS	OSS, 2003
Émirats Arabes Unis	1995-96	1,57	Arabian Multilayered Aquifer System	ESCWA, 1999
Oman	1998	1,09		ESCWA, 1999
Égypte	2002	0,9	Nubian Sandstone Aquifer	ESCWA, 1999
Yémen	2005	0,9	Tihama Aquifer	Al Asbahi, 2005 (IWC-Env.)
Tunisie	2000	0,46	SASS	OSS, 2003
Jordanie	1998	0,35	Disi Aquifer	ESCWA, 1999
Koweït	1998	0,25	Arabian Multilayered Aquifer System	ESCWA, 1999
Mali	2000	0,2	Bassin de Taoudéni	OSS/UNESCO, 2005
Sénégal	2003	0,18	Maastrichtien	OSS/UNESCO, 2005
Bahreïn	1995-96	0,16	Arabian Multilayered Aquifer System	ESCWA, 1999
Qatar	1995-96	0,15	Arabian Multilayered Aquifer System	ESCWA, 1999
Afrique du Sud	-	~ 0,10	Karoo Aquifer	
Mauritanie	2003	0,09	Maastrichtien	OSS/UNESCO, 2005

▲ **Exploitation minière des ressources en eau souterraine non renouvelables dans le monde.**

Productions contemporaines d'après les données disponibles.

▼ **Oasis d'El Guettar, Tunisie.** Forage profond atteignant les aquifères fossiles. Situé en amont de l'oasis, l'eau s'écoule gravitairement vers les parcelles cultivées et les habitations. Jean-Pierre Montoroi © IRD



SALINISATION ET PERTE DE BIODIVERSITÉ

Qu'elles jaillissent naturellement (sources pouvant alimenter des oasis) ou artificiellement (forages), les conditions d'exutoire et d'utilisation des eaux fossiles peuvent avoir une incidence importante – telle que la salinisation des eaux et des sols ou l'arrêt du jaillissement naturel de la ressource – dans des environnements fragiles, comme par exemple celui de l'oasis de Kufrah (Lybie) ou encore au Sud de la Tunisie.

Étant par définition peu ou pas rechargés, ces aquifères constituent une ressource de type minier ; cette ressource est donc menacée à plus ou moins long terme dès que la vidange (naturelle) ou les prélèvements sont supérieurs à l'alimentation en eau. Que ce soit naturellement, très lentement, ou plus rapidement du fait d'une forte exploitation, la pression hydraulique diminue dans l'aquifère (décompression hydraulique), le niveau piézométrique de la nappe baisse, entraînant progressivement la disparition des sources et, par voie de conséquence, de ces oasis.

Par ailleurs, du fait de la très forte évaporation de l'eau liée aux températures élevées qui prédominent dans ces environnements, la salinisation des eaux et des sols peut y être importante. En effet, les sels (éléments dissous) présents naturellement dans les eaux souterraines ne s'évaporent pas et s'accumulent sur place. **La salinisation est donc associée à la dynamique des eaux souterraines qui alimentent les eaux de surface et accompagne ainsi souvent la baisse des niveaux et des débits des eaux souterraines.** Ces évolutions ont forcément un impact négatif important sur la biodiversité.

Assèchement des zones humides et salinisation...

Par exemple, l'oasis de Kufrah (Sud de la Libye, près des frontières du Tchad et de l'Égypte) était un magnifique lac d'eau douce en 1924. Devenu un lac salé en une quarantaine d'années (jusqu'aux années 1960), il a complètement disparu aujourd'hui du fait de l'arrêt de l'artésianisme. Les palmeraies sont depuis alimentées par des forages profonds de plusieurs dizaines de mètres (voir les photos ci-dessous).



▲ Évolution du lac de l'oasis de Kufrah de 1924 à nos jours.

Haut : d'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

Milieu : © W.M. Edmunds

Bas : © Y. Travi

La baisse du niveau du lac, concomitante à la baisse de son alimentation, entraîne la disparition de son exutoire. L'eau n'est plus suffisamment renouvelée et le lac se concentre alors du fait de l'évaporation. De même, dans les endroits où l'eau stagne avec une faible épaisseur ou effectue des allers-retours, les dépôts de sels s'installent rapidement (comme c'est le cas autour du lac Youan au Tchad, cf. photos ci-contre).

... et perte de la biodiversité

Une microfaune et une macrofaune, permanentes ou saisonnières, très riches, sont présentes autour et au sein de ces plans d'eau douce en plein désert. **Il est évident que la disparition totale, ou la salinisation, de ces plans d'eau s'accompagne de la disparition de la quasi-totalité de la biodiversité.**

Même si, à plus ou moins long terme, certains de ces sites naturels sont condamnés par la vidange et la décompression naturelle de l'aquifère profond, une bonne gestion de la ressource en eau peut les préserver pour de nombreuses années. La salinisation peut en effet être combattue en assurant un bon drainage des plans d'eau et les forages peuvent remplacer les venues d'eau naturelles à condition que leurs débits soient adaptés aux conditions hydrogéologiques pour préserver au maximum la ressource.

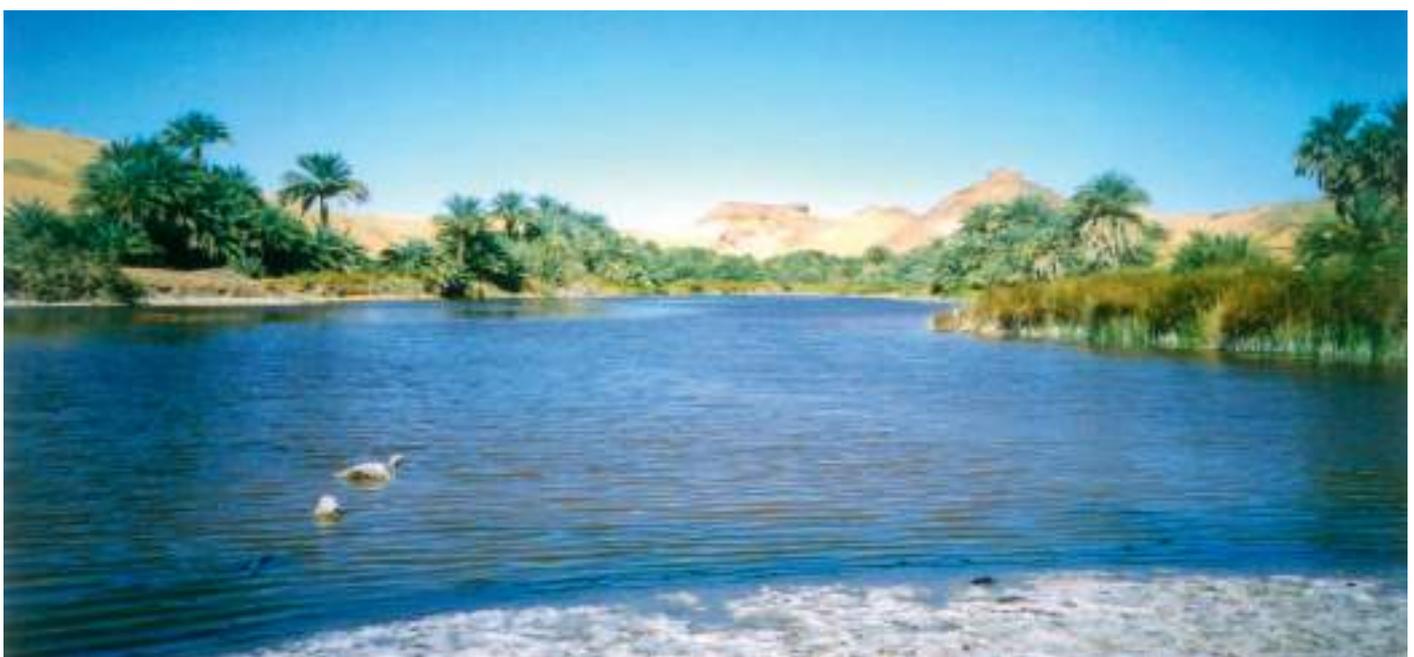
Pour en savoir plus sur la description et le comportement hydrologique de ces lacs : Van Der Meeren Thijs *et al.*, 2019.



▲ Zone du lac Yoa (Tchad). Source d'eau douce et dépôts de sel à proximité.
© Ministère en charge de l'Eau, Bureau national de la commission conjointe de la nappe des grès de Nubie, Ndjamena, Tchad



▲ Zone d'Ounianga Serir, lac Teli, Tchad.
Dépôts de sels sur les rives du lac. © Jacques Taberlet



▲ Présence d'oiseaux dans les eaux douces du lac Bokou, près d'Ounianga Serir au Nord du Tchad.
© Ministère en charge de l'Eau, Bureau national de la commission conjointe de la nappe des grès de Nubie, Ndjamena, Tchad

Caractéristiques générales des aquifères fossiles



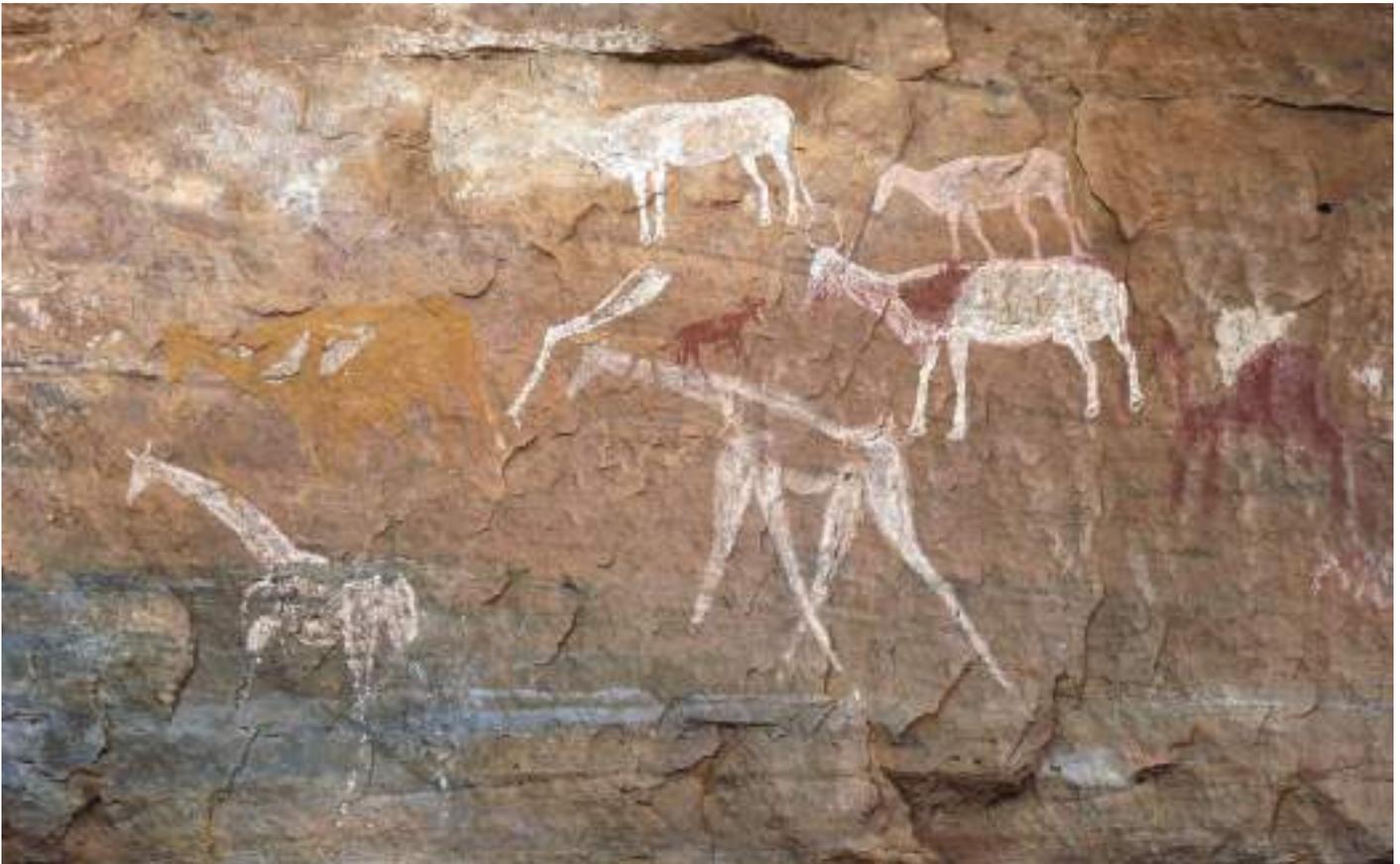
▲ Forage artésien dans le bassin du Lac Tchad, Nigeria. © I. Baba Goni



▲ Lac fossile dans le Sahara algérien (In Atei), constitué d'alternances de diatomites et de dépôts détritiques fins et grossiers. De nombreux fossiles de poissons d'eau douce sont présents dans les diatomites. On trouve également sur les berges des restes d'animaux sauvages, du charbon de bois et des outils préhistoriques. © Yves Travi

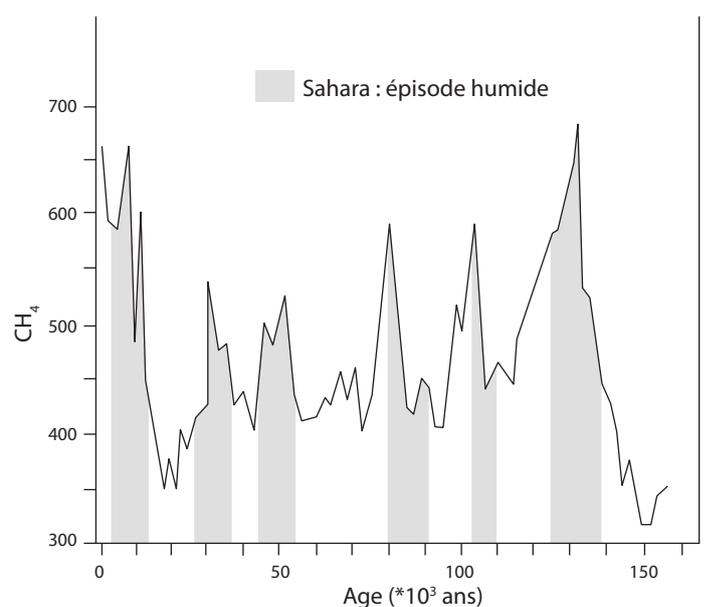
PALÉO-HYDROLOGIE : DES AQUIFÈRES PROFONDS RELIQUES DES PÉRIODES HUMIDES DU QUATERNAIRE

Il existe de nombreux indices (peintures rupestres, outils, etc.) indiquant la présence ancienne de zones peuplées, avec de l'eau en abondance et une végétation dense, dans les régions sahariennes et subsahariennes. De larges rivières, dont les lits sont encore visibles dans la topographie, s'écoulaient vers le Nord en direction de la Méditerranée ou vers l'Atlantique au Sud ou encore vers de vastes dépressions lacustres. Des traces de la présence de lacs (des sédiments ou des restes et fossiles de faune) sont actuellement visibles dans les endroits les plus arides du Sahara (cf. la photographie à gauche et celle ci-contre).



▲ **Peinture rupestre en Libye.** Pour les Touaregs, le djebel Akakus est la Tadrart, « la montagne » en tamasheq, sous-entendu le massif le plus haut du sud-ouest libyen. Le site préhistorique du Tadrart Akakus a été classé site du Patrimoine Mondial par l'UNESCO pour sa richesse exceptionnelle en gravures et peintures rupestres. Au travers des animaux et des figures humaines représentées, cette zone quasi-désertique témoigne de l'évolution du climat à travers le temps. Christian Leduc © IRD

Les réservoirs souterrains pouvaient alors se remplir à partir des reliefs centraux du Sahara jouant un rôle de « château d'eau » ou par infiltration des grandes étendues lacustres. Les datations obtenues montrent que des recharges épisodiques ont eu lieu aux différentes époques humides de l'Holocène et du Pléistocène tardif. **À l'heure actuelle, le Sahara et le Sahel regorgent ainsi d'importantes quantités d'eau stockées en profondeur héritées de ces périodes anciennes.** Les oasis du désert représentent les seuls « restes » visibles du fonctionnement hydrologique de ces époques. Ils constituent les points de sortie naturels de ces vastes aquifères profonds, sous l'effet de la pression, de l'eau infiltrée il y a plusieurs milliers d'années (cf. zoom page suivante).



▲ **Évolution du climat (en relation avec les concentrations atmosphériques du méthane) sur 150 000 années, et phases pluviales au Sahara.**

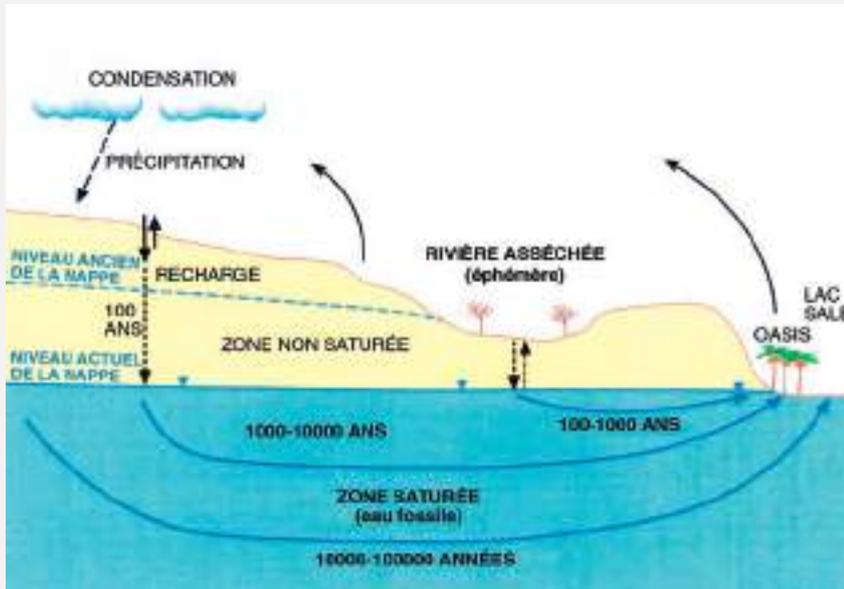
D'après Petit-Maire *et al.*, 1991

→ ZOOM | Oasis : une réminiscence des périodes humides anciennes

Les oasis, en zones désertiques, sont alimentées par des eaux souterraines d'origine profonde. Celles-ci peuvent remonter à la surface à la faveur de fractures, associées à des structures géologiques diverses, plus ou moins complexes, ou par affleurement de la surface

de la nappe (actuel ou ancien) au niveau de dépressions topographiques (cf. schéma ci-dessous, à gauche).

Les exutoires se présentent sous la forme de sources, de plans d'eau ou de zones humides.



▲ Cycle de l'eau en région aride. La pluie de l'époque actuelle peut mettre plusieurs dizaines ou centaines d'années pour atteindre la nappe. Le niveau de cette dernière s'ajuste aux conditions arides actuelles. D'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

▲ Oasis d'Aoué et ses palmiers au nord de la guelta d'Archei au Tchad. Marcel Roche © IRD



▲ Guelta d'Archei, au sud-ouest du massif de l'Ennedi. © Jacques Taberlet

FONCTIONNEMENT DES AQUIFÈRES PROFONDS DE LA ZONE SAHARO-SAHÉLIENNE

Le Sahara : présence de vastes aquifères

La majeure partie du Sahara reçoit moins de 100 mm de pluie par an. On trouve toutefois de l'eau souterraine de bonne qualité dans un grand nombre de vastes bassins sédimentaires, mais l'extraction de cette eau potable nécessite parfois des ouvrages de captage très profonds. La géochimie et l'hydrologie isotopique (cf. p. 23) ont démontré qu'il s'agissait d'eaux anciennes alimentées par les pluies (recharges) durant des périodes anciennes qui bénéficiaient alors de climats plus humides que ceux d'aujourd'hui.

Les eaux souterraines s'écoulent généralement depuis les reliefs qui s'étendent au centre du Sahara (Hoggar, Tassili, Tibesti, Air, Adrar des Iforas, Ennedi), zones d'alimentation potentielle (les zones de recharge), vers le centre des bassins où l'écoulement des eaux est le plus souvent très lent (quelques mètres par an) avec une composante verticale ascendante relativement importante (cf. carte et schéma ci-contre).

Les bassins sédimentaires du Sahel et du Sahara contiennent de grandes ressources en eau souterraine fossile.



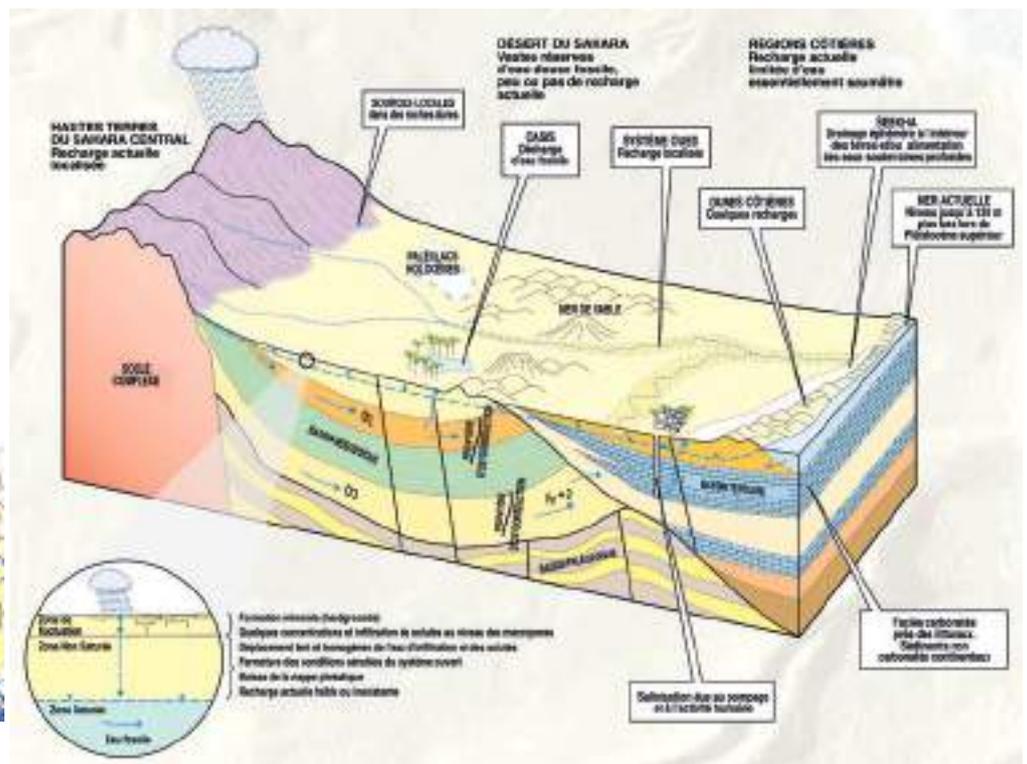
▲ Le Sahara.

► Représentation schématique des paysages, de la recharge et de l'évolution de la qualité des eaux souterraines dans la partie africaine du Sahara.

D'après Edmunds, Travi et al., 2001

▼ Délimitation des grands aquifères profonds captifs en Afrique septentrionale.

D'après Seguin et Gutierrez, 2016



Ainsi, des réserves étendues d'eaux anciennes fossiles existent dans de larges bassins sédimentaires du Sahara à l'image du système aquifère du Sahara septentrional (cf. p. 34). Ces bassins comprennent des séries géologiques s'étendant du Cambrien (ère primaire) au Quaternaire et renferment de nombreuses strates perméables contenant de l'eau douce jusqu'à 2 000 m de profondeur.

Les eaux douces passent progressivement à des eaux saumâtres en s'approchant des côtes en même temps que les faciès géologiques continentaux laissent place à des faciès marins dominés par les carbonates.

Le Sahel : des aquifères plus petits

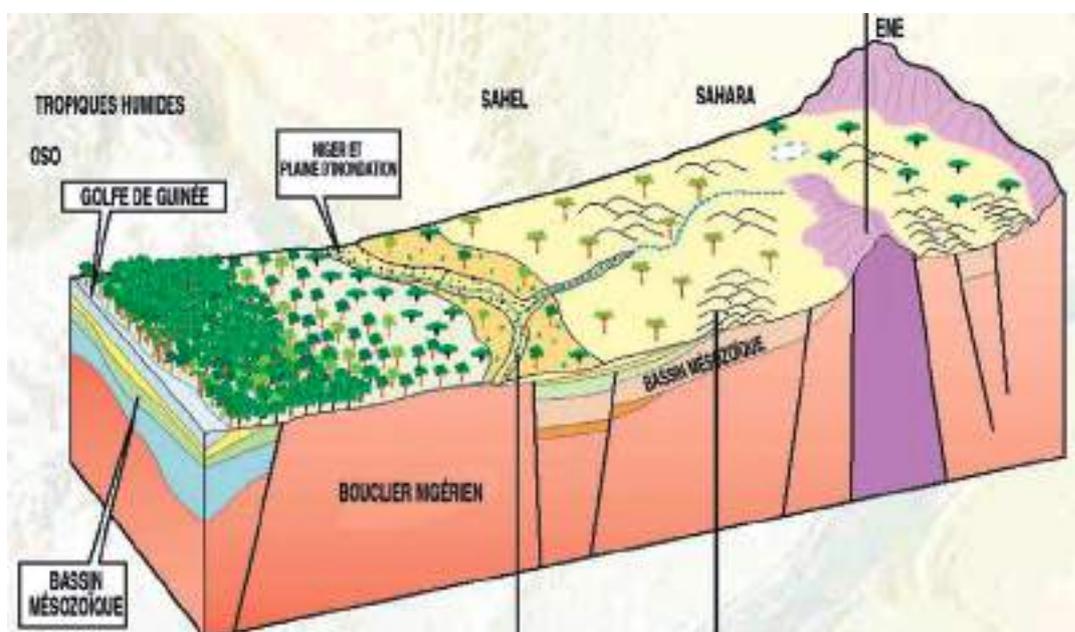
Le Sahel sépare la zone tropicale humide du Sahara proprement dit. Deux grands fleuves, le Sénégal et le Niger, comme le Nil plus à l'Est, s'étendent à travers le Sahel, apportant l'eau en provenance de la zone tropicale humide. De même, le Chari fournit la principale alimentation en eau du lac Tchad.

Plusieurs bassins sédimentaires se trouvent dans la zone sahélienne (sénégal-mauritanien, Tchad, Iullemeden) toutefois relativement plus petits que leurs équivalents de la zone nord-saharienne.

Plusieurs de ces bassins se situent dans des grabens (fossés d'effondrement) du socle (bouclier africain, composé de granites, roches métamorphiques et roches sédimentaires anciennes). **Les aquifères ont été fortement réalimentés au cours du Pléistocène et, plus localement, au cours de l'Holocène, et de nombreux paléo-lacs témoignent des derniers climats humides autour de 4 000 ans BP (*Before Present**).**

Comme pour le Sahara, la plupart des eaux souterraines du Sahel sont fossiles et des recharges actuelles significatives interviennent seulement le long des rivières pérennes ou saisonnières.

* Par convention, la date du « présent » est située au 1^{er} janvier 1950.



▲ Représentation schématique des paysages et de la présence des eaux souterraines dans les régions sahéliennes. D'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

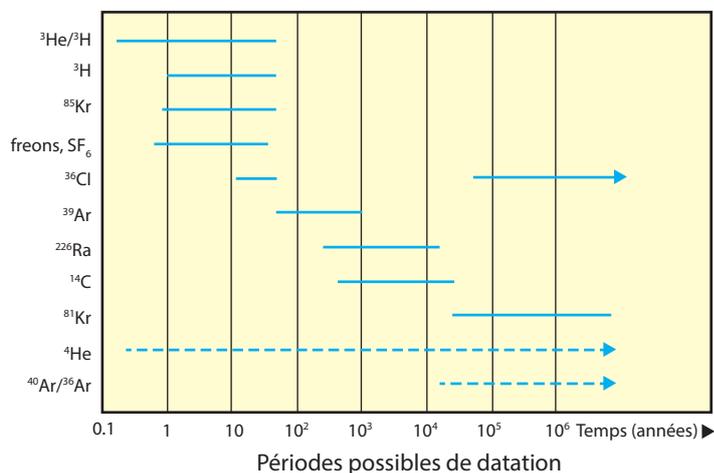
INDICATEURS PALÉOCLIMATIQUES ET OUTILS DE DATATION

Utilisation de traceurs isotopiques

Pour reconstituer les climats terrestres anciens, les scientifiques s'appuient sur des indicateurs paléoclimatiques. L'eau rencontrée au-dessus ou au-dessous du niveau des nappes peut fournir des renseignements utiles pour reconstituer le climat du passé et déterminer les périodes de recharge des aquifères. Pour cela, sont utilisés des traceurs sensibles aux variations climatiques (température et pluviométrie) et des indicateurs de temps de séjour pour dater l'eau souterraine et situer ainsi, dans le temps, l'évolution des paramètres climatiques.

L'eau souterraine est une mémoire du passé. L'eau peut garder les traces des climats et des températures du passé, de la végétation ancienne et des roches qu'elle a traversées. En effet, elle conserve certaines caractéristiques acquises au moment de son infiltration et s'écoule ensuite très lentement dans le sous-sol. Des eaux âgées jusqu'à plusieurs millions d'années sont donc présentes dans le sous-sol.

Une série de radio-isotopes et d'éléments chimiques d'origine anthropique (comme les chlorofluorocarbones – CFC – communément appelés fréons, par exemple) peut être utilisée pour estimer l'âge de l'eau. Ces traceurs couvrent des périodes allant de quelques dizaines d'années à plusieurs dizaines ou centaines de milliers d'années (cf. figure ci-dessous). Beaucoup de ces traceurs sont d'une utilisation et d'une interprétation délicates et nécessitent l'intervention d'un spécialiste.



▲ Échelles de temps couvertes par les différents traceurs

D'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

Les traceurs isotopiques sont devenus d'utilisation courante, comme le couple oxygène 18/deutérium ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) et le carbone-14 (^{14}C) utilisé pour les eaux anciennes, ou encore le couple oxygène 18/deutérium et tritium ou les CFC, pour les eaux récentes. Ces outils permettent de déterminer le temps de résidence de l'eau et de mettre en évidence l'origine et les conditions climatiques de la recharge.

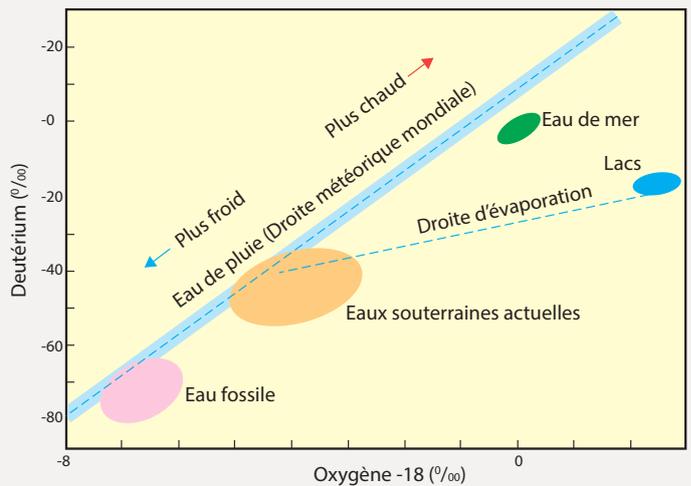
Le radiocarbone (ou isotope radioactif du carbone, ^{14}C), associé au couple $^{18}\text{O}/^2\text{H}$, est probablement le plus utilisé dans les études sur les eaux souterraines saharo-sahéliennes, comme c'est le cas de la dépression de l'Azaouad située au nord du fleuve Niger (cf. l'encadré page 25). Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène sont utilisés pour reconstituer les paléoclimats, en caractérisant les eaux évaporées et les conditions de la recharge (origine des eaux, température et pluviosité) (cf. zoom page suivante).

Les rapports entre les gaz nobles (hélium, néon, argon, krypton, xénon, radon), plus rarement utilisés (du fait d'un échantillonnage et d'analyses plus complexes), fournissent quant à eux des informations sur les températures atmosphériques des périodes plus anciennes, dans la mesure où leur solubilité dépend de la température ; cette signature est conservée lorsque l'eau atteint les réservoirs captifs.

→ ZOOM | Utilisation des isotopes de la molécule d'eau pour reconstituer les paléoclimats

Les isotopes sont des atomes du même élément chimique qui ne diffèrent que par le nombre de neutrons de leur noyau ; ils n'ont donc pas la même masse atomique. L'eau est composée de deux isotopes stables, à savoir : $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$, isotopes lourds et $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$, isotopes légers. Ces isotopes se fractionnent au cours des processus météorologiques (condensation et évaporation) et leurs rapports évoluent en conséquence. Ainsi la composition isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ ou $\delta^2\text{H}_2$) peut être utilisée comme traceur climatique des eaux souterraines : des valeurs plus négatives associées à une diminution relative de l'isotope lourd (appauvrissement en ^{18}O , par exemple) indiquent généralement un climat plus froid et plus humide ; inversement un enrichissement relatif en ^{18}O relève d'un climat plus chaud ou d'une forte évaporation de l'eau analysée. Dans le cas de l'évaporation, le fractionnement se faisant dans une atmosphère non saturée (contrairement à la condensation), ^{18}O et ^2H fractionnent de manière différente et, sur le diagramme, les points s'alignent alors sur une droite d'évaporation avec une pente différente de celle de la droite des vapeurs océaniques (droite météorique mondiale).

Pour plus d'informations : Tweed *et al.*, 2019

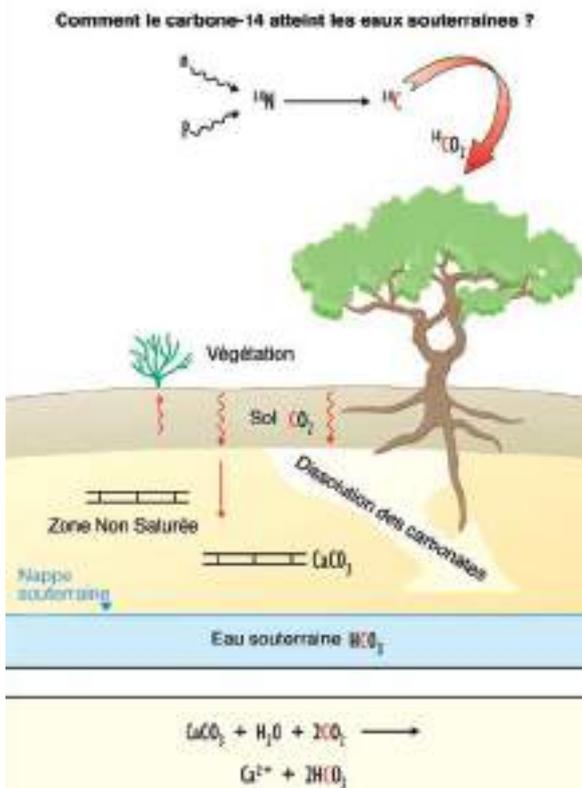


▲ Informations données par la relation $^{18}\text{O}/^2\text{H}$.

D'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

Carbone-14 et krypton-81, outils de datation privilégiés des eaux souterraines très anciennes

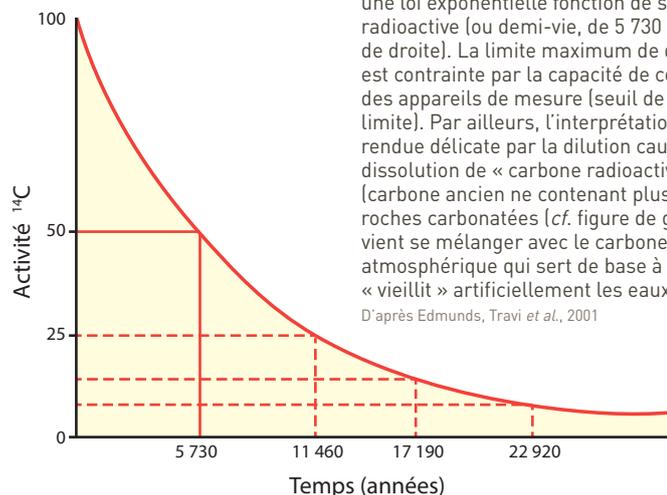
Les eaux souterraines des régions saharo-sahéliennes présentent des temps de résidence dans les réservoirs de l'ordre de plusieurs milliers, voire dizaines de milliers d'années ou plus. Aussi, la méthode de datation des eaux souterraines au moyen du carbone-14 est de loin la plus utilisée puisque son champ d'action, avec une précision suffisante, s'étend jusqu'à environ 35 000 ans (*cf.* figure ci-dessous).



La datation au carbone-14 est basée sur la mesure de son activité radiologique résiduelle. Principalement deux méthodes sont utilisées pour les eaux souterraines :

1. le comptage en scintillation liquide des particules bêta, après extraction du carbone contenu dans les différentes formes carbonatées dissoutes dans l'eau et transformation sous forme de benzène ;
2. la spectrométrie de masse à accélérateur (AMS), méthode plus récente, considérée comme la plus efficace. La fraction du carbone-14 est directement mesurée (par comptage des atomes) par rapport aux atomes de carbone 12 et 13.

Décroissance radioactive ^{14}C



◀ Le carbone-14, seul isotope radioactif du carbone, est produit dans la haute atmosphère par le rayonnement cosmique et, comme tout atome de carbone, se combine avec l'oxygène pour former du CO_2 . Une fois isolé de l'atmosphère, dans le sous-sol, le carbone 14 commence peu à peu à se désintégrer (décroissance radioactive). Son activité radiologique décroît au cours du temps selon une loi exponentielle fonction de sa période radioactive (ou demi-vie, de 5 730 ans, *cf.* figure de droite). La limite maximum de datation est contrainte par la capacité de comptage des appareils de mesure (seuil de détection limite). Par ailleurs, l'interprétation est souvent rendue délicate par la dilution causée par la dissolution de « carbone radioactivement mort » (carbone ancien ne contenant plus de ^{14}C) des roches carbonatées (*cf.* figure de gauche) qui vient se mélanger avec le carbone d'origine atmosphérique qui sert de base à la datation et « vieillit » artificiellement les eaux souterraines.

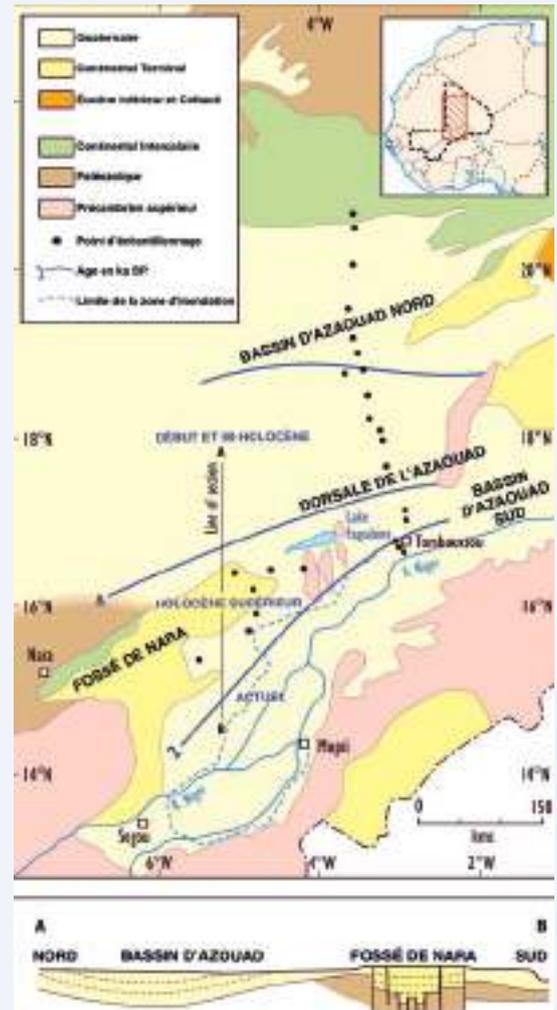
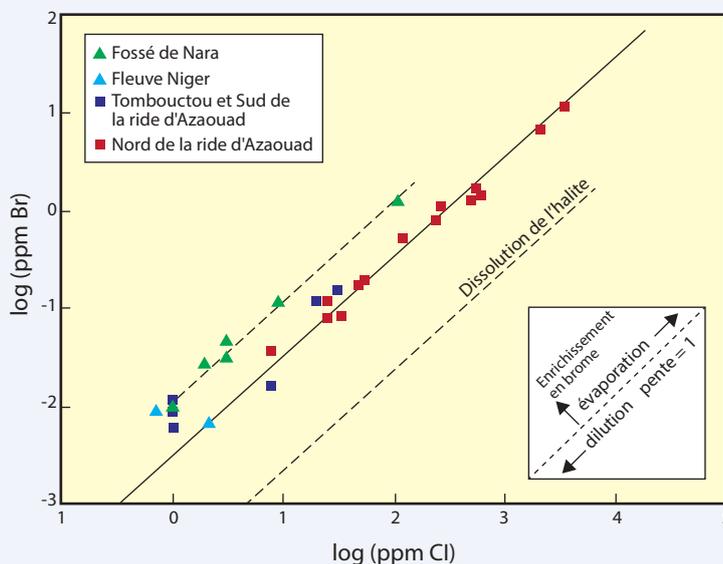
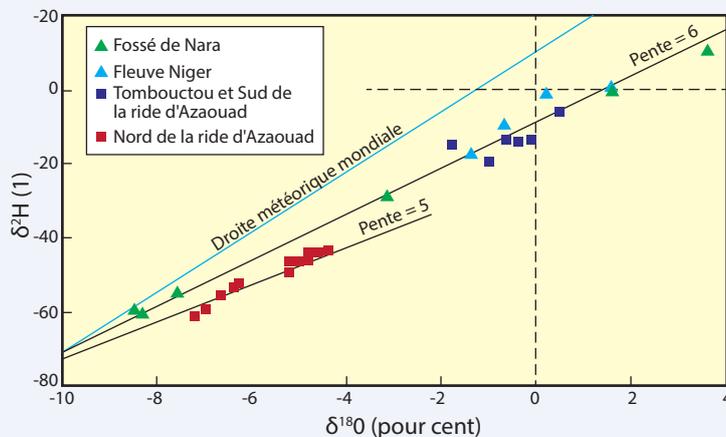
D'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

→ EXEMPLE | Utilisation des isotopes de l'eau et du carbone-14 pour caractériser des paléorecharges d'eau souterraine au nord du Mali

Au Mali, la dépression de l'Azaouad située au nord du fleuve Niger a été rechargée à la fois lors des épisodes de crues du Niger actuels et directement par les précipitations durant les périodes humides de l'Holocène.

Ceci est clairement démontré par les compositions chimiques et isotopiques (isotopes de la molécule d'eau) et bien défini dans le temps par les âges radiocarbone (datation au ^{14}C). Ces derniers montrent une zonation qui suggère que le fleuve a migré du Nord vers le Sud, traversant le fossé de Nara, sur une période de 4 000 ans depuis la fin de la période humide de l'Holocène. Les signatures chimiques et isotopiques suggèrent que l'extension vers le nord de la recharge par les crues du fleuve a été limitée par la ride de l'Azaouad ; en effet, la partie Sud montre des signatures caractéristiques des eaux du fleuve, tandis que dans la partie Nord, au nord de la ride, les signatures indiquent une recharge exclusivement par les eaux de pluie locales.

D'après Fontes *et al.*, 1991



▲ Schéma géologique et coupe à travers le bassin de l'Azaouad, Mali. © Edmunds, Travi *et al.*, 2001

- ▲ Haut : signatures isotopiques de l'évaporation (pentes 5 et 6). Celles-ci permettent de distinguer les eaux souterraines du Sahara (ride d'Azaouad) de celles de la zone sahélienne au Sud, réalimentée par une paléo-recharge du Niger.
- ▲ Bas : rapport Br/Cl. Celui-ci permet de distinguer les eaux légèrement enrichies en brome, en relation avec une recharge depuis le fleuve de celles dont le rapport est proche de celui des précipitations.

Les limitations de la datation au ^{14}C , au regard des âges très anciens des eaux profondes des grands bassins saharo-sahéliens, ont conduit à s'intéresser de plus en plus au krypton-81, complémentaire du carbone-14 pour dater les eaux au-delà de 35 000 ans, voire jusqu'à plusieurs centaines de milliers d'années. Son utilisation, longtemps entravée du fait de conditions d'échantillonnage et d'analyses relativement complexes,

s'est développée ces dernières années avec la mise au point de nouvelles techniques. Le krypton-81 est un gaz noble chimiquement inactif et il ne nécessite donc pas de correction comme pour le carbone qui évolue chimiquement dans le système. Par ailleurs, la mesure concomitante du krypton-85 permet de contrôler une éventuelle pollution par du gaz atmosphérique actuel lors de l'échantillonnage (Purtschert *et al.*, 2013).

Hydrogéologie des grands aquifères d'Afrique septentrionale



▲ **Oasis de Douz au sud de la Tunisie.** Douz est une ville du sud de la Tunisie connue comme la « porte du Sahara ». Durant l'Antiquité, c'était l'oasis la plus importante de la région. Elle était une escale importante pour les caravanes dans leurs voyages entre le Sahara et la Tunisie septentrionale. C'est désormais une destination de beaucoup de touristes venus visiter les dunes du Grand Erg Oriental. Edmond Bernus © IRD

En Afrique septentrionale, trois grands types d'unités géologiques peuvent être distingués : (1) les zones de socle ancien, (2) les bassins sédimentaires continentaux et (3) les bassins sédimentaires côtiers, ces derniers étant essentiellement représentés en zone subsaharienne par le bassin sénégalo-mauritanien.

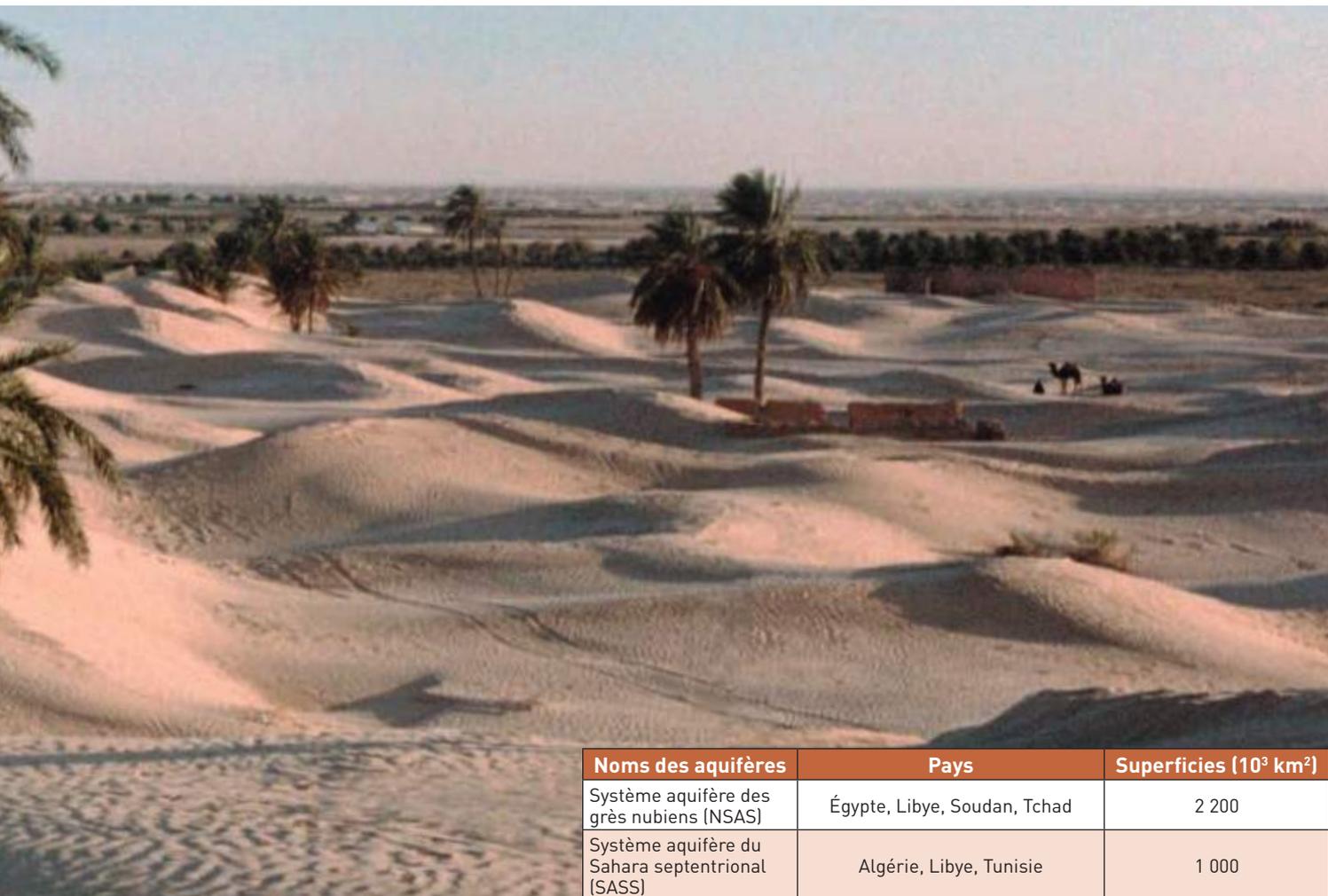
Les aquifères profonds les plus importants, souvent multicouches et captifs dans leur partie centrale (c.-à-d. intercalés entre deux formations géologiques quasi-imperméables), correspondent aux bassins sédimentaires continentaux et se situent dans les deux grandes séquences géologiques suivantes :

- le Continental Terminal (ou Complexe Terminal en Afrique du Nord) constitué de formations sédimentaires d'âge cénozoïque (Éocène moyen-Pliocène, de 56 à 2,6 millions d'années BP) essentiellement détritiques, sableuses ou sablo-argileuses ;

- le Continental Intercalaire, d'âge essentiellement mésozoïque (entre 252,2 et 66 millions d'années BP) dont les formations sédimentaires sont à dominante gréseuse avec des intercalations argileuses. Il constitue le réservoir aquifère le plus important de l'Afrique saharo-sahélienne, dont la ressource est souvent considérée comme non ou peu renouvelable.

DES SYSTÈMES AQUIFÈRES TRÈS VASTES

Les principaux bassins sédimentaires continentaux de la zone Sahara/Sahel sont schématiquement représentés sur la carte ci-contre et les principaux aquifères de ces bassins, sont partagés entre plusieurs pays (cf. tableau ci-contre).



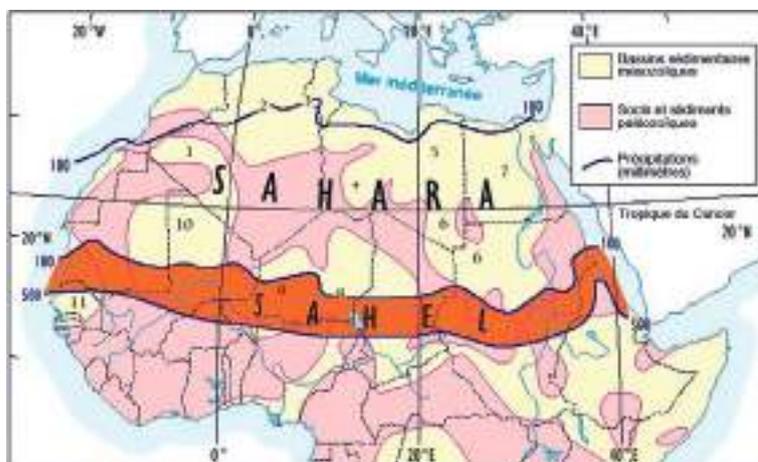
Noms des aquifères	Pays	Superficies (10 ³ km ²)
Système aquifère des grès nubiens (NSAS)	Égypte, Libye, Soudan, Tchad	2 200
Système aquifère du Sahara septentrional (SASS)	Algérie, Libye, Tunisie	1 000
Bassin du lac Tchad	Niger, Nigeria, Tchad, Cameroun, République centrafricaine	1 500
Système aquifère du Taoudeni (SAT) et des Iullemeden (SAI)	Bénin, Burkina Faso, Mali, Mauritanie, Niger, Nigeria, Algérie	SAT : 2 000 SAI: 500
Bassin de Murzuk	Algérie, Lybie, Niger	450
Bassin sénégal-mauritanien	Mauritanie, Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau	340

Certains de ces aquifères ont fait l'objet de **modélisation numérique*** comme le système aquifère du Sahara septentrional (SASS), le *Nubian Sandstone Aquifer System* (NSAS), les bassins des Iullemeden et de Taoudeni, ces deux derniers mettant en évidence des flux de recharge non négligeables sur le versant Sud et via le fleuve Niger.

Compte tenu de la position géographique de leur bordure (zone d'alimentation potentielle), le SASS et le NSAS peuvent recevoir des flux de recharge, en particulier au Sud et via le fleuve Niger et le Nil. Ces recharges restent cependant dérisoires au regard du volume des réservoirs.

* Les termes définis dans le lexique (page 58) apparaissent en bleu et sont soulignés dans le texte.

▲ Principaux aquifères profonds de l'Afrique septentrionale. D'après Seguin et Gutierrez, 2016



▲ Carte schématique des principaux bassins sédimentaires de la zone Sahara/Sahel. 1. Tindouf ; 2. Grand Erg Occidental ; 3. Grand Erg Oriental ; 4. Murzuq ; 5. Sirte ; 6. Kufrah ; 7. « Western Desert » ; 8. Tchad ; 9. Illumedun ; 10. Taoudenni ; 11. Sénégal-mauritanien. D'après Edmunds, Travi *et al.*, 2001

AQUIFÈRE DES GRÈS NUBIENS : LE NSAS

Historique des études

La plupart des études géologiques, hydrogéologiques, hydrochimiques et isotopiques sur le NSAS (pour *Nubian Sandstone Aquifer System*) ont été réalisées dans les années 1970 et 1980. On peut citer en particulier les études menées pendant plusieurs années par le projet allemand du *Collaborative Research Center* (SFB, Université technique de Berlin) en Égypte (Toshka, Dakhla, Bahariya, Farafara) et au Soudan (Darfour et Est Kordofan) et par le BGS (*British Geological Survey*) dans les bassins de Sarir et Kufrah en Libye (Thorweihe et Schandelman, 1993 ; Edmunds et Wright, 1979).

Une compilation des connaissances sur le NSAS a été réalisée par le CEDARE (*Center for Environment and Development for the Arab Region and Europe*, cf. zoom page suivante) en 2001 qui a proposé un [modèle numérique](#) pour prévoir les modifications du bilan et de la qualité des eaux souterraines. Au cours de la période 2006-2013, un vaste programme* a permis d'acquérir un grand nombre de données et de proposer une nouvelle modélisation d'ensemble, en plus de son objectif de gestion commune de ce grand système aquifère suivant les procédures des Nations Unies (procédures SADA, *Shared Aquifer Diagnostic Analysis*) et SAP (*Strategic Action Plan*).

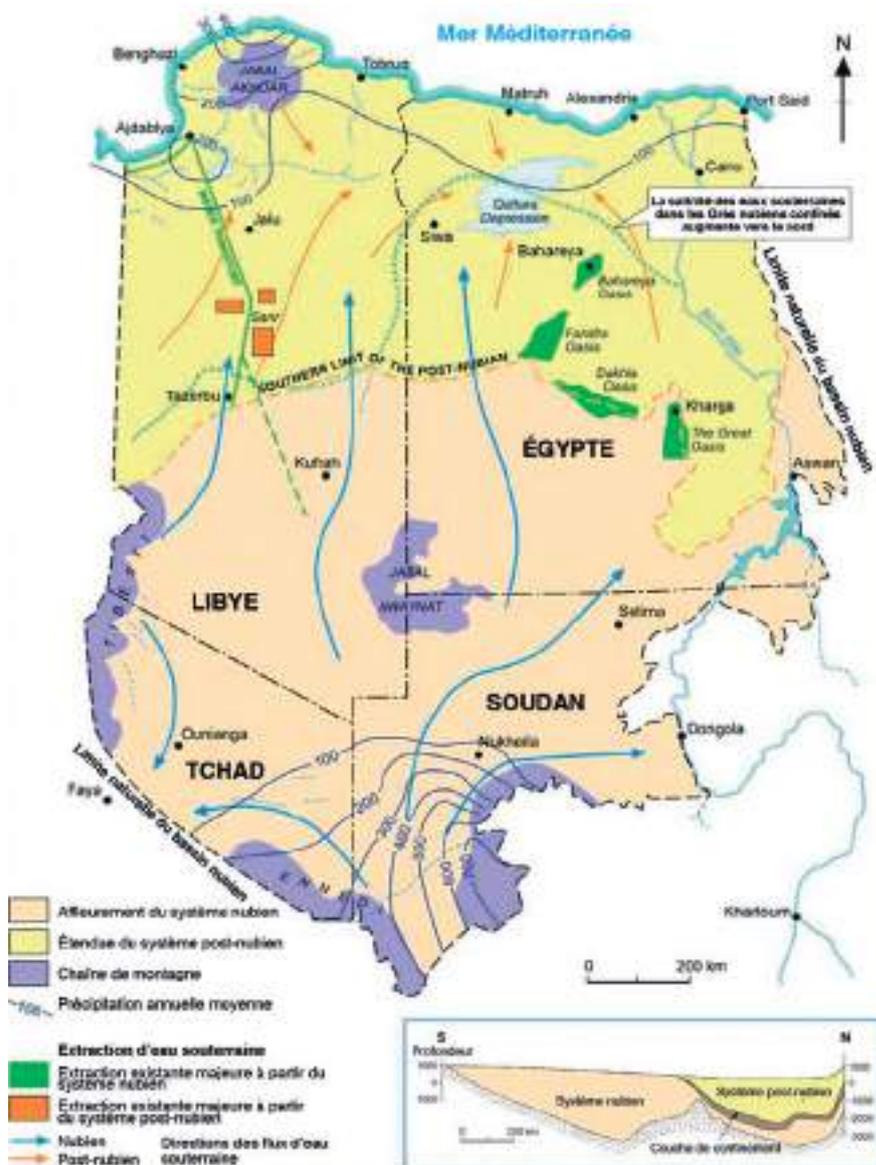
* Programme réalisé par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), l'Agence Internationale pour l'Énergie Atomique (AIEA) et le programme Hydrologique International de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO).

Épais par endroits de 3 500 mètres, le NSAS est l'une des plus grandes réserves d'eaux souterraines du monde.

Description du système aquifère

Le système aquifère des grès nubiens couvre une superficie d'environ 2,2 millions de km² sur quatre pays : le Soudan (376 000 km²), le Tchad (376 000 km²), l'Égypte (828 000 km²) et la Libye (760 000 km²).

Sur la représentation schématique ci-dessous, on peut distinguer plusieurs sous-bassins dont le système de Kufrah, s'étendant du Tchad vers la Libye, et celui de Dakhla en Égypte avec les dépressions majeures comprenant les oasis de Kharga, Dakhla, Farafra et Bahariya.



▲ Carte du système aquifère des grès nubiens (NSAS). D'après UNESCO, 2001

État des connaissances : datations et modélisations

Sur la base de scénarios climatiques, le bilan des eaux souterraines du NSAS et de son régime d'écoulement a été simulé pour la première fois par **modèle numérique** vers la fin des années 1970. Ce modèle a mis en évidence les directions d'écoulement et la localisation des zones potentielles de recharge (actuelles ou passées) et de décharge (oasis d'Égypte et de Libye) de la nappe.

À partir de ces données, un nouveau modèle a été développé par le CEDARE au début des années 2000. Les données isotopiques (isotopes de l'environnement) et géochimiques ont été utilisées pour préciser les paramètres du modèle et conforter les résultats en termes de recharge et de régime d'écoulement. Ce modèle d'échelle régionale considère deux niveaux superposés (NAS et PNAS). Plusieurs scénarios d'exploitation croissante entre 2000 et 2015 ont pu être testés sur la période 2000-2060. Ce modèle est actuellement utilisé pour prévoir l'évolution du bilan hydrogéologique et de la qualité des eaux. De nombreux autres modèles à caractère plus local, autour des grands champs de captage en Lybie ou en Égypte, ont été réalisés entre les années 1970 et 2005.

Plus récemment (2009)*, un nouveau modèle original car fondé sur la paléo-hydrologie (datation des différentes périodes de recharge paléo-climatiques) a été proposé (cf. zoom page suivante).

De manière générale, **les modèles s'accordent à dire que l'exploitation envisagée pour les années à venir ne met pas en péril la réserve globale sur une période de plusieurs centaines d'années.** En revanche, des dommages locaux sont à craindre près des grands champs de captage du fait d'un rabattement local (baisse du niveau piézométrique) trop important de la nappe.

De nombreuses datations ont été effectuées depuis les années 1970, qui fournissent des temps de résidence variables des eaux souterraines. Nombre d'entre elles sont biaisées du fait de l'utilisation de techniques anciennes et des difficiles conditions d'échantillonnage. Mais en se basant sur les plus récentes et en prenant en compte les résultats de différentes techniques, on peut estimer que les temps de résidence (dépendant du volume d'eau stockée et du taux de vidange du système) varient de 100 000 à plus de 2 000 000 d'années. **Ceci traduit une réserve énorme, probablement une des plus importantes au monde et indique une recharge essentiellement datée du Quaternaire ancien, les épisodes humides postérieurs à la dernière glaciation (autour de 10 000 ans) ayant eu un impact limité sur la recharge.**

Plusieurs estimations du volume d'eau stockée dans ce grand réservoir ont été faites. La plus vraisemblable, déterminée à partir de la modélisation de la zone saturée et la calibration des paramètres hydrauliques, fournit une estimation de l'ordre de **370 000 km³** (cf. tableau ci-dessous).

* Dans le cadre des projets mis en œuvre par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), avec l'appui du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) et le Fonds pour l'environnement mondial (FEM) (2003-2010).
Pour les activités de l'AIEA en matière de ressource en eau, voir : <https://www.iaea.org/topics/water>
Aggarwal *et al.*, 2011 ; Wallin *et al.*, 2005.

Pays	Superficies (1 000 km ²)			Stocks d'eau douce* (km ³)			Extraction (km ³ /an)		
	PNAS	NAS	Total	PNAS	NAS	Total	PNAS	NAS	Total
Égypte	569	311	880	102 417	52 299	154 716	0,306	0,2	0,506
Libye	350	300	650	11 240	125 309	136 549	0,264	0,567	0,831
Soudan	-	750	750	-	47 807	47 807	-	0,84	0,84
Tchad	-	70	70	-	33 878	33 878	-	0,0	0,0
Total	919	1 430	2 350	113 657	259 293	372 950	0,57	1,607	2,177

* En supposant une capacité d'emmagasinement de 10⁻⁴ de la partie confinée de l'aquifère et une porosité efficace de 7 % de la partie non confinée.

▲ **Volumes d'eau stockée dans les différents pays et volumes d'eau pompés.** D'après CEDARE/IFAD, 2002

→ ZOOM | Le modèle de l'AIEA utilisant la radiochronologie et la paléo-hydrologie

Établi avec la participation de tous les pays concernés par le NSAS, le modèle développé par l'AIEA utilise les données collectées pour de précédents modèles (CEDARE), mais avec une approche originale utilisant mesures radio-chronologiques et paléo-hydrologie. Ce modèle AIEA est tridimensionnel (alors que celui développé par CEDARE était bidimensionnel), avec deux couches : (1) au Nord, le NAS captif et le PNAS libre et (2) au Sud, uniquement le PNAS libre.

Le modèle AIEA considère l'aquifère comme un seul système homogène mais anisotrope (c.-à-d. avec une forte perméabilité horizontale et une faible perméabilité verticale). Ce modèle est construit en utilisant la méthode des différences finies et le code de simulation des eaux souterraines *Modflow*, la géométrie étant établie à partir des données topographiques issues du modèle CEDARE et les données récentes du « *Schuttle radar for land surface topography* ». Le modèle AIEA couvre une plus vaste superficie que le modèle CEDARE en englobant une plus grande partie du Soudan vers le Sud-Est, de la Lybie vers l'Ouest et une petite extension vers les oasis du Tchad, et il se veut être le plus proche possible des limites hydrogéologiques naturelles du système.

Calibration du modèle

La calibration repose principalement sur le postulat que l'aquifère s'est rechargé depuis la surface au cours des périodes humides (recharge > vidange) et se vidange (recharge <<< vidange) au cours des périodes sèches. La dernière période de recharge significative s'est terminée il y a 10 000 ans environ. Ainsi, une simulation démarrant à moins 10 000 ans devrait donc reproduire l'état actuel du niveau de la nappe. Les niveaux de référence sont issus des données des années 1960 (c'est-à-dire avant le début de son exploitation intensive) et sont relatives aux altitudes des oasis et des **sebkhas** qui y correspondent à celles de la nappe. En ajustant les perméabilités horizontale et verticale de l'aquifère, ce modèle a pu reproduire le niveau actuel de la nappe.

Une fois la réponse de l'aquifère calibrée sur 10 000 ans, le modèle a été ajusté plus finement localement pour représenter les baisses de niveau historiques observées sur trois champs de captage en Égypte et en Lybie. Ceci a permis de connaître la part, dans le rendement spécifique de l'aquifère (quantité d'eau extraite par mètre de baisse du niveau piézométrique/ de la pression dans l'aquifère), de sa capacité à restituer de l'eau d'une part par décompression hydraulique et d'autre part par désaturation de l'aquifère. La porosité de l'aquifère, qui influence la vitesse d'écoulement des eaux souterraines, a été fixée pour l'ensemble du système ; aucune variation spatiale de la perméabilité n'est prise en compte. Seuls les âges radio-chronologiques ont été utilisés pour calibrer la porosité. En se basant sur une réévaluation des âges carbone-14 (^{14}C) et chlore 36 (^{36}Cl), et grâce à l'utilisation récente du Krypton (^{81}Kr), **l'âge des eaux souterraines varie de 200 000 à 1,5 millions d'années.**

Résultats préliminaires et impacts transfrontaliers

Le modèle, une fois calibré, a été testé sur une période de 3 millions d'années en simulant l'alternance des périodes sèches et humides sur la base des connaissances paléoclimatiques. Les figures ci-contre montrent une absence probable d'écoulements à travers la frontière entre le Tchad et la Lybie ainsi que de faibles mouvements de l'eau souterraine vers le Nord, à la frontière entre la Lybie et l'Égypte.

L'effet des pompages de plusieurs champs de captage (Kufrah au Nord et East Oweinat au Sud) a également été simulé sur une période de 200 ans. **Il montre un fort impact local sur le niveau de la nappe mais un effet régional très limité et l'absence d'effet transfrontalier.**

La faible extension des aires d'influence illustre **l'énorme potentiel de ce système.** Ainsi, dans les secteurs où l'aquifère est particulièrement épais (comme à Kufrah en Lybie), l'extraction d'eau souterraine devrait pouvoir se poursuivre sur des dizaines, voire des centaines d'années sans impact régional significatif.

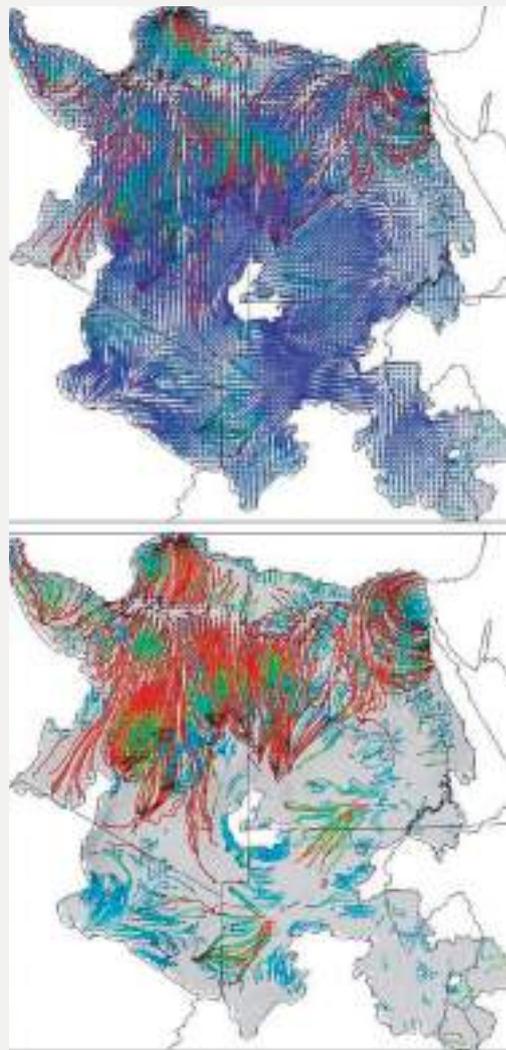
Dans le secteur où le réservoir aquifère est plus mince (Sud Égypte et Soudan), une forte extraction ne devrait pas causer d'effet régional et transfrontalier mais pourrait avoir un impact local non négligeable.

Le modèle a fait l'objet de tests et d'ajustements pour éprouver sa robustesse avant d'être mis à disposition pour une utilisation par les États concernés.

Pour plus d'informations : Voss et Soliman, 2014
Nubian News : www.iaea.org/newscenter/news/chad-egypt-libya-and-sudan-agree-on-framework-for-joint-management-of-the-nubian-sandstone-aquifer-system
Nubian Regional Strategic Action Programme : www.iaea.org/sites/default/files/sap180913.pdf

► Directions d'écoulement illustrant l'écoulement naturel de l'eau souterraine dans le NSAS avant le début de son exploitation dans les années 1960.

Les lignes bleu foncé indiquent des directions relatives à des âges de l'ordre de 50 000 ans (entre recharge et sortie de l'eau souterraine) et les lignes rouges représentent des circuits d'environ 2,5 millions d'années. La figure du haut montre toutes les directions d'écoulement et celle du bas seulement celles âgées de plus de 50 000 ans.



LES AQUIFÈRES PROFONDS DU BASSIN DU TCHAD

Historique des études

Les premières études géologiques et hydrogéologiques significatives ont commencé au Tchad dans la première moitié du 20^e siècle avec, en particulier, des études hydrogéologiques menées en 1940 et 1941 dans le bassin du Chari-Baguirmi. Les premières campagnes de reconnaissance hydrogéologique par sondage ont été entreprises dès 1950, mettant en évidence la nature et la géométrie du remplissage sédimentaire de la cuvette tchadienne. Des cartes de reconnaissance hydrogéologique au 1/500 000 ont ensuite été réalisées dès 1964. Elles seront ensuite synthétisées pour aboutir à une première carte hydrogéologique synthétique du bassin sédimentaire en 1969 (Schneider, 1969).

L'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM) s'est également intéressé au lac Tchad et à ses relations avec les nappes de surface dès 1965. Une synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad (1966-1970) a été publiée en 1972 (CBLT-PNUD-UNESCO, 1972). En 1992, la carte géologique et les cartes hydrogéologiques au 1:1 500 000 de la République du Tchad ont été éditées, accompagnées d'un mémoire explicatif volumineux (Schneider et Wolf, 1992).

D'importantes ressources en eaux souterraines sont exploitables dans les bassins hydrogéologiques tchadiens. Cette ressource est localisée majoritairement dans des grands systèmes aquifères sédimentaires continus couvrant 75 % du territoire.

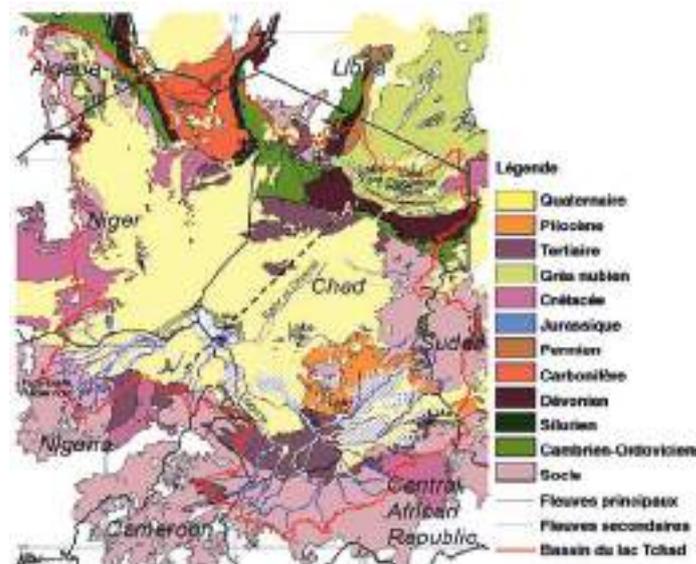
Le Schéma directeur de l'eau et de l'assainissement (2001) reprend et synthétise les principaux travaux antérieurs. Puis, plus récemment, entre 2010 et 2016, des études hydrogéologiques, géochimiques et isotopiques détaillées ont été réalisées au Tchad par l'Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles (BGR). Ces études concernent essentiellement les eaux peu profondes des plaines d'inondation du Logone-Chari, du Kanem et du Bahr

el Gazal. En 2015, Bouchez *et al.* déterminent, à l'aide du ³⁶Cl, les temps de séjour des eaux de l'aquifère du Continental Terminal (autour de 300 000 ans), remettant alors en question les précédentes datations réalisées sur la partie Sud du bassin, au Nigeria, dans ce même aquifère (autour de 40 000 ans).

Pour pallier le manque de données hydrogéologiques classiques, l'hydrologie isotopique a été utilisée depuis la fin des années 1960. Initialement localisées autour du lac Tchad, les investigations ont progressivement intéressé l'ensemble du bassin (Tchad, Nord-Cameroun, Nigeria, Niger), à l'occasion de projet de coopération technique de l'AIEA et de travaux universitaires. La grande majorité des travaux concernent cependant l'aquifère superficiel.

Description du système

Le bassin du lac Tchad se situe dans la partie orientale de la région du Sahel, en bordure Sud du désert du Sahara. C'est l'un des plus grands bassins hydrogéologiques sédimentaires d'Afrique, couvrant environ 2 400 000 km². Cet ensemble aquifère est transfrontalier et partagé entre le Tchad, le Cameroun, la République centrafricaine, le Niger et le Nigeria. Les aquifères sédimentaires continus et transfrontaliers représentent presque trois quarts de la superficie totale du bassin orographique du lac Tchad.



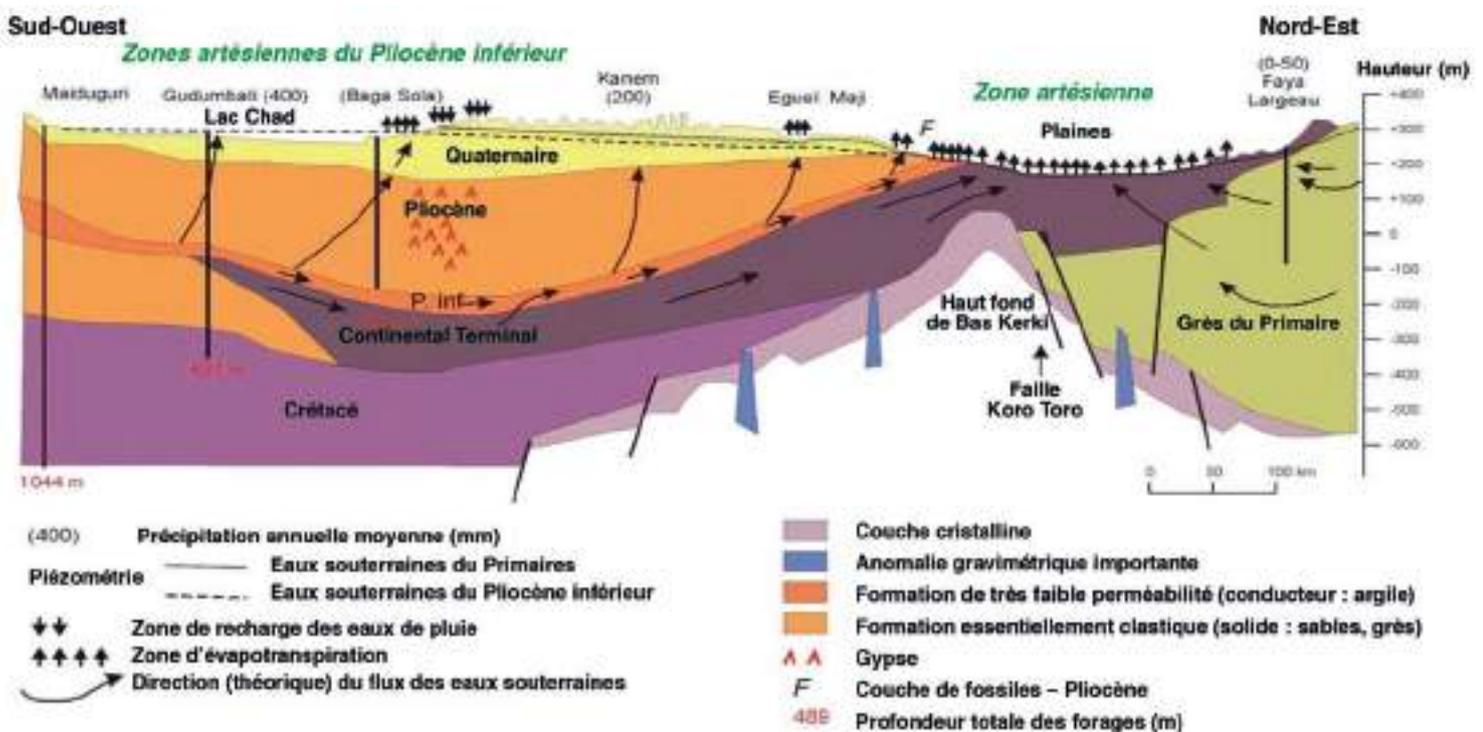
▲ Géologie du bassin du lac Tchad. D'après Schneider et Wolf, 1992 ; BGR, 2012

Dans sa partie Sud, l'aquifère est composé de couches sédimentaires qui ont commencé à se déposer au Crétacé, jusqu'à 7 000 m d'épaisseur. Constitués fréquemment de sables et de grès et séparés par des horizons plus argileux parfois discontinus, ces sédiments renferment une réserve importante en eau souterraine qui se manifeste sous la forme de nappes libres (« les nappes phréatiques »), captives ou semi-captives, parfois artésiennes dans les zones topographiquement déprimées. De bas en haut, on distingue quatre grands ensembles aquifères superposés, celui du Crétacé, du Continental Terminal, du Pliocène et du Quaternaire (cf. carte de la page précédente et schéma ci-dessous) :

- l'aquifère du Crétacé (« *Lower Aquifer* » au Nigeria) est très mal connu ; il repose sur le socle cristallin ;
- l'aquifère du Continental Terminal inclut à cet endroit le Maastrichtien, le Paléogène et le Miocène. Captif dans le centre du bassin et autour du lac Tchad, il est libre (phréatique) dans les Pays Bas (Bodélé) et au Sud du Tchad ;
- l'ensemble du Pliocène inférieur se situe entre 250 et 300 m sous la surface du sol. La limite entre cet aquifère et celui du Continental Terminal est souvent mal définie.

Il est artésien autour du lac Tchad sur une superficie d'environ 60 000 km² et est exploité au Niger et au Nigeria par plusieurs forages artésiens. Le Pliocène débute par une série sableuse de 10 à 30 m d'épaisseur (Pliocène inférieur) et se poursuit par une sédimentation argileuse épaisse de 200 m qui sépare l'aquifère du Pliocène inférieur – Pliocène de l'ensemble aquifère rapporté au Quaternaire ;

- l'aquifère de la nappe phréatique de N'Djamena est situé dans les niveaux détritiques du Quaternaire. Il est pour l'essentiel formé d'alternances d'argile et de sable. Un niveau argileux situé à une vingtaine de mètres de profondeur sépare de manière discontinue deux horizons ; un supérieur exploité par les puits villageois et l'autre, plus profond, exploité par forage. La base de cet ensemble se situe entre 50 et 180 m de profondeur sous le niveau du sol. Les niveaux piézométriques peu profonds (de 5 m en bordure du fleuve Chari à 80 m au centre du creux piézométrique de la plaine du Chari Baguirmi) font de cette nappe **une ressource facile à exploiter et de grande extension qui constitue, à l'heure actuelle, la principale source d'approvisionnement en eau de la région.**



▲ Coupe du bassin du lac Tchad de Maiduguri (Sud-Ouest) à Faya Largeau (Nord-Est).

D'après Schneider et Wolff, 1992 ; BGR, 2012

État des connaissances

Du fait d'une grande disponibilité en eau dans sa partie superficielle, les nombreuses études entreprises sur ce bassin se sont essentiellement penchées sur l'aquifère « phréatique » libre et ont quelque peu délaissé les aquifères profonds. La partie supérieure est donc relativement bien connue (taux de recharge, relations avec le lac Tchad, volumes exploitables et renouvelables).

En revanche, l'aquifère profond du Continental Terminal reste peu connu, pour la simple raison qu'il est encore peu exploité. La plupart des forages se situent dans sa partie Sud au Nigeria, ce qui a permis de constater la présence d'une recharge significative estimée dans une fourchette de 50 à 130 mm par an et une ressource renouvelable estimée à 12 millions de m³ par an. Sur la base d'une baisse de niveau de 10 m, la réserve exploitable est estimée entre 70 et 145 millions de m³ par an. Il est clair toutefois qu'en l'absence de modélisation (rendue difficile à l'heure actuelle du fait du manque de données), ces estimations restent très incertaines.

Une carte piézométrique approximative confirme les directions d'écoulement des eaux souterraines du sud vers le nord. Des datations récentes au ³⁶Cl confirment ces directions et ont évalué le temps de résidence des eaux souterraines à plus de 300 000 ans vers le centre du bassin (Bouchez *et al.*, 2015).



▲ Le lac Tchad sous influence climatique. Tchad. François Delclaux © IRD

LE SYSTÈME AQUIFÈRE DU SAHARA SEPTENTRIONAL (SASS)

Historique des études

Les premières études publiées sont anciennes et accompagnent l'essor de l'exploration pétrolière dans les années 1950. En 1952, un premier recueil de monographies « Données sur l'hydrogéologie algérienne,

la géologie et les problèmes de l'eau en Algérie » est publié sur la base d'études ponctuelles et révèle l'existence de très nombreux rapports relatifs aux ouvrages de captage (sources et puits). La structure et la nature du Mésozoïque saharien ont également été décrites en détail dans les années 1960 (Busson, 1967 ; Conrad, 1969). En 1972, l'UNESCO finance un projet pour synthétiser l'ensemble des données disponibles sur la gestion des ressources en eau, présentes et futures, du SASS sur sa partie tunisienne et une grande partie de la zone algérienne (UNESCO, 1972). Le document produit sert à développer un modèle mathématique global évolutif (c.-à-d. de l'ensemble du système aquifère avec la possibilité de mise à jour au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données ; voir par exemple Besbes, 2010) lors d'un projet commun algéro-tunisien géré par l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS, 2002, 2003, 2008). Avec l'apport de nouvelles études et modélisations locales, en particulier sur le territoire libyen, il a ainsi été possible de reconstituer le fonctionnement du système aquifère et de proposer des scénarios d'exploitation. Plus récemment, la prise en compte de la paléo-hydrologie à l'aide de traceurs radioactifs (¹⁴C, ³⁶Cl, ⁴He, ¹³⁴U/¹³⁸U), couplée à la modélisation hydrogéologique, a permis d'appréhender les différents épisodes de recharge au cours du Quaternaire, de mettre en évidence et de quantifier une recharge actuelle et ainsi de consolider les modèles hydrogéologiques numériques existants (Baba Sy, 2005 ; Guendouz et Michelot, 2006 ; Pettersen, 2014).

Description du SASS

Le système aquifère du Sahara septentrional couvre un million de km² environ dont 700 000 km² en Algérie, 80 000 km² en Tunisie et 250 000 km² en Libye. Il s'étend, du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements du Tidikelt et au rebord méridional du Tinrhert et, d'Ouest en Est, depuis la vallée du Guir-Saoura jusqu'au Graben de Hun en Libye (*cf.* carte ci-contre).

Globalement, on distingue deux grands réservoirs constitués de bas en haut par le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT), qui est plus ou moins l'équivalent du Continental Terminal sud-saharien. Le bassin couvert par ce grand système aquifère peut se subdiviser en trois sous-entités : les deux sous-bassins (1) du Grand Erg Occidental et (2) du Grand Erg Oriental – qui sont des cuvettes à écoulement **endoréique** aboutissant dans les dépressions fermées des « **chotts** » et « **sebkhas** » – et (3) le plateau de la Hamada El Hamra.

Le Complexe Terminal est un ensemble peu homogène comprenant des formations carbonatées de la fin du Secondaire (Crétacé supérieur) et des épisodes détritiques du Tertiaire, notamment du Miocène.

écoulements souterrains globalement orientés du nord vers le sud (Moulla *et al.*, 2012).

Dans la partie orientale, le CI peut potentiellement être rechargé au niveau (1) du massif de l'Atlas au Nord et (2) du plateau de Tinrhert au Sud. Cette configuration induit, dans le premier cas, des écoulements d'Ouest en Est et, dans le second, du Sud vers le Nord, avec un exutoire naturel commun au niveau des **chotts** tunisiens et de l'aquifère côtier de la Djeffara. La recharge actuelle a été longtemps considérée comme négligeable, conférant à cet aquifère un caractère non renouvelable (Edmunds *et al.*, 2003 ; Guendouz *et al.*, 1997). Ce point de vue repose sur de nombreuses estimations de la recharge réalisées entre les années 1960 et 2000 en utilisant différentes approches : bilans hydrologiques, hydrodynamiques, traceurs géochimiques et isotopiques de l'infiltration ou encore modélisations. Les valeurs de recharge obtenues, qui se situent pour la plupart entre 8 et 15 m³ par seconde, reposent cependant sur des données souvent disparates et/ou imprécises.

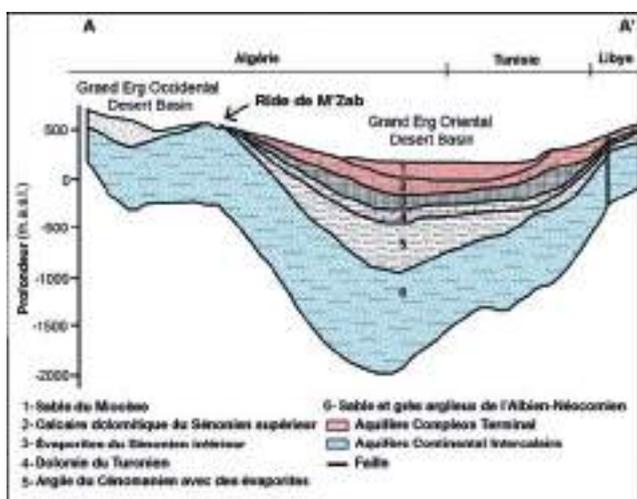
L'aquifère du Complexe Terminal (équivalent du Continental Terminal en Afrique) présente une configuration similaire à celle du CI avec toutefois une possibilité supplémentaire d'alimentation, directe, depuis les dunes de sable du désert oriental (ERESS, 1972 ; Guendouz *et al.*, 2003). Les estimations de la recharge de cet aquifère sont moins nombreuses que pour le CI – du fait du potentiel du CT nettement inférieur et de son artésianisme plus faible, ce qui augmente le coût de production – et ont été essentiellement réalisées grâce à des modélisations. Ces dernières estiment la recharge du CT entre 18 et 24 m³ par seconde (ERESS, 1972 ; OSS, 2003).



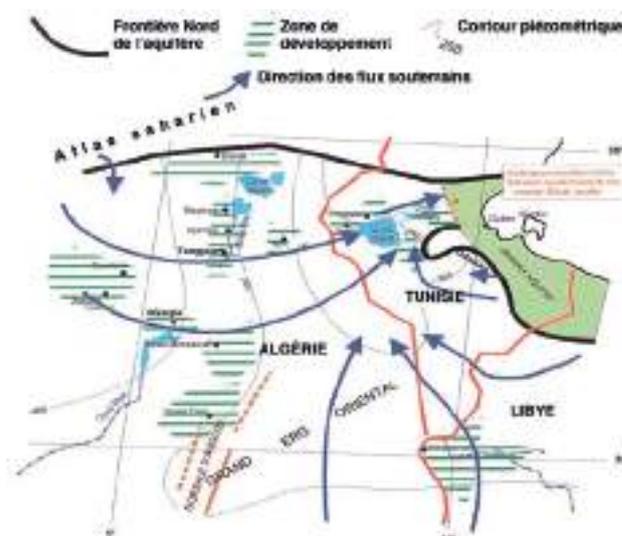
▲ Carte du Sahara septentrional. La partie colorée en jaune correspond au SASS. D'après OSS, 2003

Le Continental Intercalaire se définit comme l'ensemble continental compris entre les plissements hercyniens, qui ont repoussé la mer de la plateforme saharienne, et l'invasion marine du Crétacé supérieur. Cet ensemble comprend majoritairement les formations continentales grés-argileuses du Crétacé inférieur, auxquelles l'étude des coupes de forages a permis d'associer des sédiments marins ou lagunaires, post-paléozoïques et antécénomaniens, intercalés au sein du CI.

D'un point de vue hydrogéologique, le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental sont séparés (pas de continuité spatiale des écoulements de part et d'autre d'une crête piézométrique) par la ride de M'zab qui s'étend de l'Atlas au Nord jusqu'au plateau de Tademaït (*cf.* carte ci-dessus). Dans la partie occidentale, Le système aquifère est exclusivement utilisé par l'Algérie. La configuration géologique rend possible une recharge du CI (aquifère libre) au niveau de l'Atlas saharien en Algérie et à l'Est au niveau de la ride de M'zab, avec des



▲ Coupe Ouest/Est du SASS. D'après Kamel, 2012



▲ Schéma hydrogéologique du CI dans le Grand Erg Oriental algéro-tunisien. D'après UNESCO, 2006

Modélisations et gestion du SASS

Au Sahara septentrional (Algérie, Tunisie, Libye), les prélèvements ont fortement augmenté depuis les années 1970 : de 790 millions de m³ par an en 1970, ils ont connu une brusque accélération au cours des années 1980 pour atteindre 2,3 milliards de m³ en 2000 (Baba Sy, 2005). Ces niveaux d'exploitation sont conformes aux prévisions du projet « Étude des ressources en eau du Sahara septentrional » (ERESS, 1972) qui envisageaient une croissance des prélèvements de 790 millions de m³ par an (1970) jusqu'à 1,8 ou 2,5 milliards de m³ par an en 2000 (selon les scénarios) alors que l'exploitation se faisait grâce à près de 9 000 points d'eau (74 % en Algérie, 14 % en Tunisie, 12 % en Libye). Les prélèvements de cette période 1970-2000 correspondent à un déstockage d'environ 30 à 40 milliards de m³ au total.

En maintenant le niveau de prélèvements de 2000, le projet SASS a ensuite projeté un déstockage, à l'horizon 2050, d'un volume de 83 milliards de m³ au total. Ces évaluations sont à mettre en parallèle avec les différentes estimations de la réserve totale du système, entre 60 000 (UNESCO, 1972) et 31 000 milliards de m³ (Baba Sy, 2005), tout en gardant à l'esprit que seule une fraction de l'eau d'un aquifère captif est utilisable et qu'il est donc

nécessaire de tenir compte des effets possibles de la décompression (perte d'artésianisme d'où des difficultés d'extraction et un coût d'exploitation élevé, le tassement du réservoir, des venues d'eau salée...) et de la répartition géographique de l'exploitation.

Au Sahara septentrional, plusieurs modèles de dimensions variées et utilisant différentes techniques (méthode analogique, éléments finis ou différences finies) ont été élaborés. Sur la base de ces modélisations et banques de données issues de nombreuses études, l'OSS a établi en 2002 (première phase du projet SASS) un modèle mathématique tridimensionnel, utilisant la technique des différences finies. Celui-ci a été réalisé en considérant un schéma hydrogéologique avec trois niveaux aquifères séparés par deux horizons semi-perméables (cf. schéma ci-dessous). Il a été ensuite validé sur la base de cartes piézométriques établies les années précédentes par différents auteurs. Ce modèle a ainsi estimé (1) une recharge globale de l'ordre de 36 m³ par seconde, (2) des échanges verticaux entre les deux principaux aquifères (du CI vers le CT) de 5,8 m³ par seconde et (3) que 75 % des écoulements avaient pour exutoire les **chotts** et les **sebkhas**, le reste pouvant atteindre la mer Méditerranée.

SCHEMA HYDROGÉOLOGIQUE DU SAHARA SEPTENTRIONAL		
ALGÉRIE	TUNISIE	LIBYE
Toit imperméable		
Nappe des Sables	Nappe des Sables du Djeric	Sables et calcaires Miocène inf.
NAPPE DU COMPLEX TERMINAL - CRÉTACÉ SUPÉRIEUR		
Nappe des calcaires	Nappes des calcaires Netraoua	Mizdah Crétacé supérieur
Semi perméable		
Nappe du Turonien - Nalut Aquifer		
Semi perméable		
NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE - AQUIFÈRE KIKLAH		
Crétacé inf. Jurassique Trias	Crétacé inf. Jurassique sup.	Crétacé inf. Jurassique sup.
Substratum imperméable ou semi imperméable		
Paléozoïque	Jurassique inf. Trias	Carbonifère
		Cambo-Ordovicien

▲ Schéma hydrogéologique conceptuel du SASS. D'après OSS, 2003

Ce modèle a subi plusieurs évolutions afin de prendre en compte des spécificités locales ou de nouvelles données, en particulier dans sa partie tunisienne. Après calibration, plusieurs simulations des effets de l'exploitation jusqu'à l'horizon 2050 ont été effectuées en considérant différents scénarios : (1) maintien du niveau actuel d'exploitation, (2) augmentation minimale ou (3) forte augmentation. Quel que soit le scénario testé, l'impact de l'exploitation est important, avec des baisses de niveau de plusieurs dizaines de mètres – voire plusieurs centaines – en particulier au niveau des stations de pompage, ce qui fait craindre la perte totale de l'artésianisme, des problèmes de salinisation des chotts et des sebkhas ainsi que des influences transfrontalières. Bien que ce modèle global soit pertinent pour mettre en lumière les enjeux et les risques liés à l'exploitation du SASS, il a cependant montré ses limites en termes de gestion et d'outil de décision pour les décideurs. Les études se sont donc ensuite orientées vers des modélisations sectorielles s'attachant à définir les

potentialités régionales de l'aquifère plutôt qu'à modéliser l'impact de perspectives d'exploitation au niveau global (Besbes *et al.*, 2005).

Selon l'OSS (2003), ces simulations prévisionnelles, basées sur une approche hydraulique, ont montré qu'il était possible d'augmenter l'exploitation par forages du SASS (estimée à 2,3 milliards de m³ en 2000) à hauteur de 7,8 milliards de m³ par an, et ce « en respectant dans une certaine mesure les contraintes relatives aux risques de dégradation de la ressource ». Toutefois, cela représenterait un niveau d'exploitation huit fois supérieur aux ressources renouvelables estimées du SASS et donc un puisage important sur les réserves du système. Par ailleurs, cela ne paraît possible qu'au prix d'un redéploiement des secteurs d'exploitation vers les secteurs où la nappe est à surface libre. Ainsi, 80 % des prélèvements additionnels devraient se faire dans des régions éloignées et encore peu étudiées.



▲ **Oasis de Timimoun, Algérie.** La ville de Timimoun, surnommée la flamboyante, est située à l'ouest du plateau de Tademaït. Elle est entourée d'un ensemble d'oasis (palmeraies) qui bordent le Grand Erg Occidental. François Molle © IRD

Une gestion durable des grands aquifères fossiles est-elle possible ?



▲ Forage artésien de la ville de Douz, région de Kébili dans le sud-tunisien. Pierre Deschamps © IRD

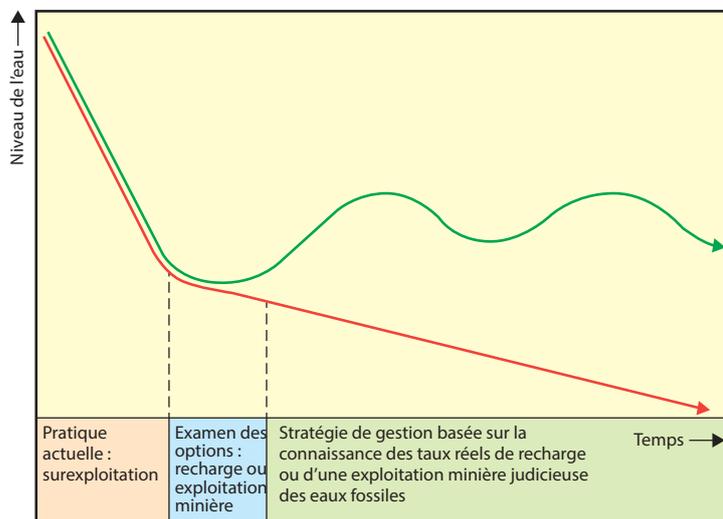
Les zones arides et semi-arides, où la ressource en eau est rare, doivent faire face aux besoins croissants des populations. Un des grands enjeux est alors de garantir la durabilité de l’approvisionnement grâce notamment à une « bonne » gestion de la ressource en eau souterraine.

GESTION DES AQUIFÈRES FOSSILES

De manière générale, dans un aquifère, sous des conditions naturelles et sur une période suffisamment longue, la recharge naturelle s’équilibre avec la décharge naturelle, les variations périodiques de la recharge se traduisant principalement par des variations du stock d’eau présent dans l’aquifère (hausse ou baisse du niveau piézométrique de la nappe). Dans le cas des aquifères fossiles, peu ou pas réalimentés, mais renfermant des stocks d’eau considérables, l’exploitation s’additionne à la décharge naturelle et donc accélère la décompression des aquifères captifs. Il s’ensuit une baisse de l’altitude des zones de décharge, ce qui entraîne alors la disparition des zones humides ou des résurgences (sources, lacs, oasis, etc.).

Outre une évaluation du volume d’eau disponible, une bonne connaissance de l’origine et de l’âge des eaux souterraines aide à définir les meilleures stratégies d’exploitation pour limiter l’impact sur la ressource. Comme indiqué dans le schéma ci-contre, une surexploitation initiale est souvent possible sans impacter fortement l’environnement. Se pose ensuite la question d’un rééquilibrage avec une éventuelle recharge ou d’une poursuite de la surexploitation. Cette dernière doit être réalisée avec prudence en privilégiant une exploitation raisonnée, autour de petites exploitations et en planifiant la baisse de capacité de l’aquifère.

Toutefois, **une gestion efficace ne se résume pas à une évaluation globale des volumes extraits de l’aquifère car l’impact environnemental dépend aussi de la position des ouvrages de captage par rapport aux zones de recharge et de décharge de la nappe, ainsi que de la planification de l’exploitation.** Ces éléments sont pris en compte dans les modèles mathématiques qui, une fois établis et validés, permettent de vérifier des scénarios d’exploitation.



▲ Différentes stratégies d'exploitation.

Ligne verte : prélèvement identique à la recharge

Ligne rouge : exploitation de type minier

D'après Edmunds, Travi et al., 2001

Les modèles : un outil d'aide à la gestion de la ressource ?

Le développement de modèles mathématiques susceptibles de simuler l'impact de l'exploitation, doit se baser tout d'abord sur une bonne connaissance des paramètres quantitatifs et qualitatifs des systèmes (flux, limites géométriques, paramètres hydrodynamiques, qualité de l'eau) et éventuellement de leur évolution dans le temps*. Pour cela, outre les données existantes, on peut réaliser ou mettre en place un grand nombre d'activités : cartes et coupes géologiques, réseaux de mesures et de suivis piézométriques, mesures des débits aux exutoires de l'aquifère, naturels ou artificiels, essais de pompage et mesures de débit, prélèvements d'échantillons pour réaliser des mesures chimiques et isotopiques, utilisation de traceurs naturels ou artificiels, prospections géophysiques.

Après validation, synthèse, interprétation de ces données et éventuellement intégration dans un système d'information géographique (SIG), il est possible d'établir un modèle conceptuel du système aquifère étudié. Ce modèle représente les caractéristiques et les modes de fonctionnement de la ressource considérée et, en particulier, ses relations avec les entités voisines (aquifères, zones étanches, eaux de surface, zones non saturées, etc.). Il exprime aussi l'état des connaissances hydrogéologiques à un moment donné ainsi que les éventuelles incertitudes.

* Pour les aquifères très anciens, la modélisation peut parfois être réalisée en plusieurs étapes correspondant à des époques climatiques différentes.

L'élaboration d'outils mathématiques et numériques aidera ensuite à comprendre de manière approfondie le fonctionnement des hydro-systèmes et l'évolution de la ressource en eau selon différents scénarios d'exploitation. Les modèles mathématiques, en effet, peuvent préciser certains paramètres physiques difficiles à appréhender sur le terrain (vitesses d'écoulement, débits, volumes échangés, etc.), et proposent une synthèse générale, plus ou moins précise, du fonctionnement du système aquifère dans l'espace bi- ou tridimensionnel et de ses possibles évolutions quantitatives et qualitatives dans le temps. Il est ainsi possible de tester différents scénarios d'exploitation à l'échelle globale, mais aussi relatifs aux impacts locaux des actions ou des pressions anthropiques sur ces systèmes.

Si les modèles mathématiques et numériques sont correctement validés et étalonnés pour les objectifs recherchés, ils peuvent servir d'outils de gestion et aider à gérer le potentiel de la ressource en fonction de besoins exprimés ou des développements économiques projetés.

Toutefois, il faut garder à l'esprit que les modèles sont seulement une représentation plus ou moins précise de la réalité (fortement dépendante de la quantité et de la qualité des données recueillies) et que compte tenu du nombre de paramètres en jeu, les calages et validations

Des outils d'aide à la décision peuvent être mis au point et simuler différents scénarios d'exploitation. Mis à disposition des décideurs, les résultats aident à construire des politiques d'exploitation des eaux souterraines avec une bonne connaissance des bénéfices et impacts associés.

peuvent être illusoire. Il est donc nécessaire d'associer aux plans d'exploitation des eaux souterraines des réseaux de surveillance destinés à suivre les évolutions (débits, niveaux piézométriques) et à valider les hypothèses issues des modèles ou à les corriger.

Les transferts d'eau souterraine vers les zones déficitaires ou vulnérables

Outre la possibilité d'appliquer différents scénarios d'exploitation à l'échelle globale ou locale, la connaissance approfondie du fonctionnement des systèmes aquifères peut aider à envisager des transferts d'eau. Compte tenu de l'hétérogénéité de certains systèmes aquifères et de leur forte inertie, certaines

zones plus sensibles peuvent être préservées en recevant des apports d'eau, par conduite depuis des parties moins sensibles de l'aquifère, à l'instar de ce qui est actuellement à l'étude sur le bassin du Sénégal (voir l'exemple ci-dessous). L'eau ainsi transférée peut être utilisée directement ou réinjectée dans l'aquifère au niveau de zones altérées quantitativement et/ou qualitativement.

→ EXEMPLE | **Projet de transfert d'eau souterraine vers la zone du bassin arachidier du Sénégal**

La nappe profonde, renfermée dans les sables, grès et grès argileux du Maastrichtien sur l'ensemble du bassin sédimentaire du Sénégal, constitue la principale ressource en eau de ce pays. Cette nappe est fortement exploitée et présente, en de nombreux endroits, des risques de surexploitation.

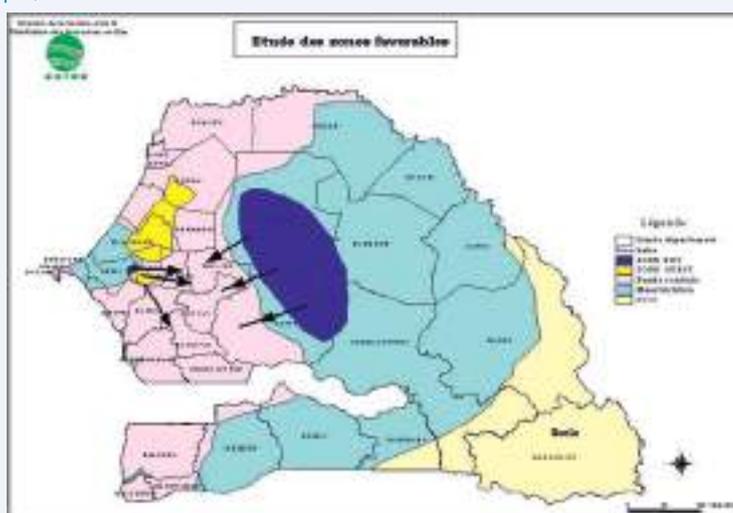
La coupe géologique ouest-est à travers le bassin sédimentaire du Sénégal (cf. carte ci-contre), laisse apparaître deux parties distinctes : les niveaux grésos-sableux de l'aquifère du Maastrichtien, relativement peu profonds à l'Est, s'enfoncent assez brutalement vers l'Ouest sous l'effet de la tectonique, en devenant plus argileux. Cette rupture s'accompagne de l'apparition d'une eau de moins bonne qualité avec le risque d'une détérioration rapide sous l'effet d'une exploitation excessive. Cette zone correspond grossièrement au bassin arachidier caractérisé par une forte densité de population dans les grands centres urbains tels que les villes de Touba, Mbacké, Diourbel, Kaolack, Fatick, etc. Dans ces zones et localités avoisinantes, les potentialités des nappes superficielles sont le plus souvent faibles et de mauvaise qualité, et les populations doivent se contenter d'une eau salée et fluorée de la nappe maastrichtienne (résidu sec supérieur à 1,5 g/l et teneur en fluor supérieure à 2 mg/l).

La possibilité d'un transfert d'eau souterraine a donc été envisagée et des études ont été engagées dans ce sens dans le cadre du projet PAGIRE-BA (Plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau dans le Bassin arachidier) initié par le ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement du Sénégal et la direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau (DGPRES). Plusieurs options ont été envisagées, la plus prometteuse concernant logiquement la zone Est de l'aquifère du Maastrichtien (cf. carte ci-contre). Pour cette zone, les objectifs étaient d'évaluer les potentialités réelles de la nappe maastrichtienne de ce secteur, de déterminer les quantités exploitables et de localiser les zones de prélèvements pour éviter une salinisation de cette zone, à partir de la bande salée à l'Ouest et/ou de la partie salée sous-jacente du Maastrichtien.

Toute une série d'opérations ont été engagées comprenant, en particulier, des prospections hydrogéologiques et géophysiques par sondages électriques, le creusement de cinq ouvrages pour effectuer des pompages d'essai, la mise en place et le suivi d'un réseau piézométrique et, enfin, un grand nombre d'analyses hydrochimiques et bactériologiques.

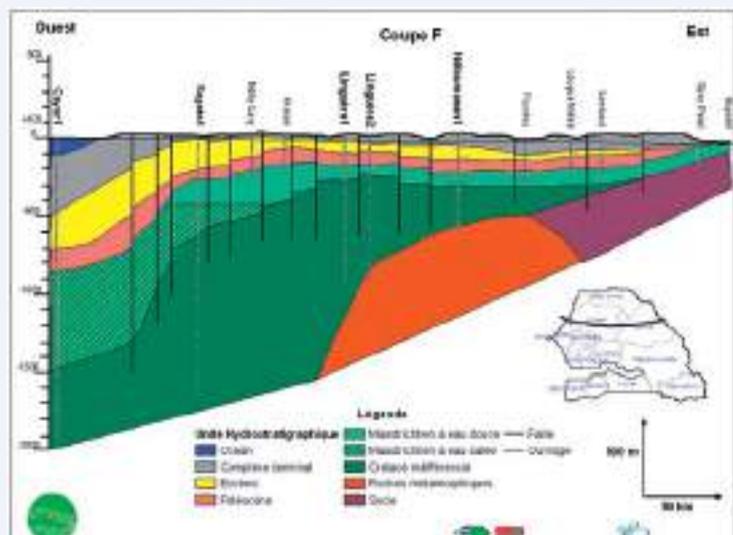
L'ensemble des données recueillies a permis la construction d'un modèle mathématique à partir duquel a été proposé un scénario possible. Les débits mobilisables pourraient s'élever à près de 100 000 m³ par jour en répartissant les forages de captage sur trois sites d'exploitation, constitués de neuf forages chacun, situés à l'Est de la limite de la zone d'eaux saumâtres, le long d'une ligne Nord-Sud. L'extension des zones d'appel (zones d'influence) de ces captages les préserve d'une contamination par les eaux plus salées du secteur Ouest.

Pour plus d'informations : www.dgpres.gouv.sn



▲ **Transferts d'eau souterraine envisagés dans le bassin du Sénégal.**

D'après DGPRES, 2015



▲ **Coupe géologique Ouest-Est à travers le bassin sédimentaire du Sénégal.**

D'après DGPRES, 2015

UNE INDISPENSABLE GESTION TRANSFRONTALIÈRE

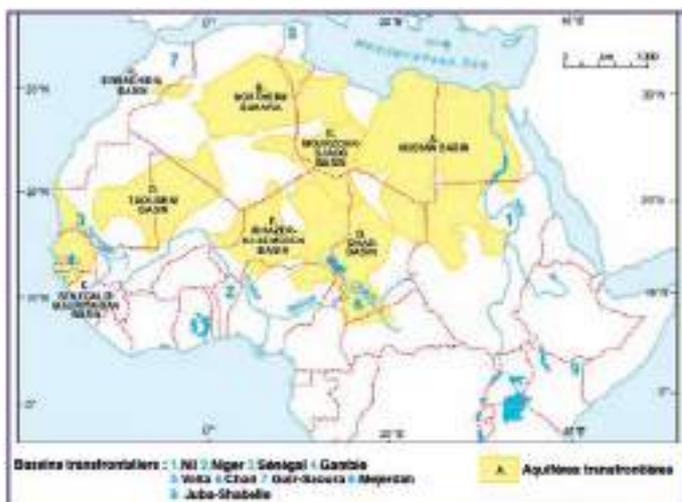
Les eaux souterraines alimentent plus de la moitié des populations dans le monde et soutiennent un grand nombre d'activités économiques, en particulier l'agriculture. Soumises à des pressions croissantes, elles nécessitent une attention particulière pour une gestion durable en adéquation avec les évolutions économiques et sociétales (AFD, 2010). **Cet enjeu est complexe car les décisions politiques, nécessaires à une bonne gestion, concernent souvent plusieurs États souverains, avec des priorités pas forcément identiques.** Il existe, en effet, de nombreux cas où le cycle hydrologique concernant des eaux souterraines (recharge, écoulement, décharge) se déroule sur le territoire de deux ou plusieurs États : par exemple un aquifère traversé par une frontière, avec une partie dans un État et une autre dans un État limitrophe ou encore un aquifère qui se trouve dans le territoire d'un État mais dont la zone d'alimentation se situe dans un autre, etc. Il est également possible que l'exploitation d'un aquifère dans un pays ait des conséquences quantitatives et/ou qualitatives au-delà de ses frontières....

Plus de 270 systèmes aquifères transfrontières ont été recensés dans le monde par le programme « *Internationally Shared aquifer resources management* » (ISARM)* de l'UNESCO.

Les grands bassins transfrontaliers de la zone saharo-sahélienne

La quasi-totalité des grands aquifères subsahariens s'étendent sur plusieurs pays (cf. carte ci-dessous). Leur bonne gestion passe donc par une approche transfrontalière.

* Voir www.isarm.net



(comme l'obligation de ne pas abuser de ses droits) et la jurisprudence (comme le principe de l'utilisation non dommageable du territoire). **Ces dispositifs visent à favoriser des processus d'entente et de négociation entre les États.**

Les eaux souterraines partagées ont été prises en compte plus récemment, par étapes successives, parmi lesquelles on peut retenir plusieurs initiatives (cf. zoom page suivante).

Ces différentes initiatives caractérisent une évolution certaine du droit international qui ne s'intéressait essentiellement, à l'origine, qu'aux eaux de surface frontalières (rivières, lacs) et à leur rôle comme élément de territoire et de voie de communication. L'aspect économique apparaît ensuite avec la notion de ressource (agriculture, industrie) plus centrée sur la population mais avec souvent un caractère territorial. L'affirmation du droit de la personne à l'eau potable (droit à la vie et à la santé) l'instaure progressivement comme un droit universel rendant nécessaire une coopération interétatique.

L'adaptation aux eaux souterraines a nécessité d'intégrer les spécificités de la ressource souterraine, plus fragile sur le long terme. La référence à ce jour reste la Résolution 63/124 qui promeut deux règles fondamentales du droit international de l'eau : (1) une utilisation équitable et raisonnable de la ressource, (2) veiller à ne pas causer de dommage significatif.

L'utilisation équitable et raisonnable (« durable ou optimale ») implique une gestion commune et nécessite la prise en considération de plusieurs facteurs. L'article 5 de la résolution précise les différents « facteurs pertinents pour une utilisation équitable et raisonnable » à prendre en compte, relatifs, d'une part, aux besoins économiques et sociaux et, d'autre part, aux caractéristiques et potentialités du système aquifère et à sa protection.

La règle de l'interdiction de causer un dommage, essentiellement élaborée pour la pollution transfrontalière, est plus difficile à mettre en œuvre pour l'aspect quantitatif (volume d'eau prélevé) car toute exploitation a forcément un impact sur l'hydrosystème concerné. Elle nécessite une bonne connaissance commune du système et de trouver la solution la moins pénalisante après dialogue entre les parties prenantes (États concernés).

La coopération entre acteurs étatiques et non étatiques pour une gestion rationnelle des ressources en eaux souterraines peut s'appuyer sur le concept de « Gestion Intégrée des Ressources en Eau » (GIRE) promu depuis 1992. En effet :

- Les « principes de Dublin », adoptés lors de la conférence internationale sur l'eau et l'environnement de 1992, soulignent notamment que « l'eau douce est une ressource limitée et vulnérable, indispensable à la vie, au développement et à l'environnement » et que « le développement et la gestion des eaux devraient être fondés sur une approche participative impliquant usagers, planificateurs et décideurs à tous les niveaux ». Le programme d'actions adopté à cette occasion prévoit notamment la protection des écosystèmes aquatiques.
- Le Sommet de la Terre de Rio de la même année avait notamment pour objectif d'organiser une gestion durable de la ressource en eau en instaurant des modes de coordination entre les différents usagers, les gestionnaires et les autorités publiques.

À l'heure actuelle, le concept GIRE est encore peu utilisé au niveau transfrontalier du fait de différentes contraintes naturelles, administratives, économiques et sociales.

→ ZOOM | Droit international sur les eaux souterraines : quelques dates clés

1989. Projet de traité dit de « Bellagio » relatif aux eaux souterraines transfrontalières. Élaboré à l'initiative d'experts, ce traité promeut « l'unité de gestion » (respect des eaux souterraines et reconnaissance des interrelations entre eaux superficielles et souterraines), la « communauté d'intérêts » ainsi que « l'utilisation optimale et la conservation sur une base raisonnable et équitable incluant la protection de l'environnement souterrain ». Ce projet n'a toutefois pas été suivi d'effets mais certains de ses principes ont été repris dans des instruments internationaux ultérieurs.

1992. Adoption, sous l'égide de la Commission des Nations Unies pour l'Europe, de la « Convention d'Helsinki » sur la protection et l'utilisation des cours d'eaux transfrontaliers et des lacs internationaux ; celle-ci inclut les systèmes aquifères partagés. Elle impose aux Parties contractantes de coopérer pour prévenir et maîtriser la pollution et pour assurer une utilisation rationnelle et impartiale des eaux transfrontières.

1997. Adoption de la Convention de New York sur le droit relatif aux utilisations des cours d'eau internationaux à des fins autres que la navigation. Entrée en vigueur en 2014 et comptant 36 États Parties (février 2019), cette convention ne concerne cependant que les eaux souterraines partagées associées à un cours d'eau. Elle promeut le principe selon lequel les États du « cours d'eau » utilisent sur leurs territoires respectifs le « cours d'eau » international de manière équitable et raisonnable et participent de la même façon à son utilisation, à sa mise en valeur et à sa protection. Cette participation comporte à la fois le droit d'utiliser la ressource en eau et le devoir de coopérer à sa protection et à sa mise en valeur.

1999. Le Protocole de Londres sur l'eau et la santé ajoute à la Convention d'Helsinki la prise en compte des effets préjudiciables, à court et long termes, sur la santé et le bien-être des personnes, d'une gestion non durable du cycle hydrologique. Les États Parties doivent ainsi assurer à tous les habitants, notamment aux personnes défavorisées ou socialement exclues, « un accès équitable à l'eau, adéquat du

point de vue aussi bien quantitatif que qualitatif » et doivent assurer « une protection efficace des ressources en eau utilisées pour l'approvisionnement en eau potable et des écosystèmes aquatiques correspondants contre la pollution due à d'autres causes, notamment à l'agriculture, à l'industrie et aux autres rejets et émissions de substances dangereuses ».

30 novembre 2012. La conférence des Parties de la convention d'Helsinki a adopté une décision qui permet aux États non membres de la CEE-ONU (Commission Économique des Nations Unies pour l'Europe) d'y adhérer, alors qu'elle avait été initialement négociée comme un instrument régional par les pays de la CEE-ONU. Cette extension va ainsi (et notamment) autoriser l'adhésion du Tchad (22 février 2018) et du Sénégal (31 août 2018) (43 États Parties en février 2019).

2008. Adoption par l'Assemblée générale des Nations Unies, de la Résolution 63/124 du 11 décembre 2008 portant sur le droit des aquifères transfrontières. Cette résolution est fondée sur la souveraineté de chacun des États de l'aquifère transfrontière sur la portion située sur son territoire, avec l'obligation d'exercer sa souveraineté conformément au droit international et aux principes d'utilisation équitable et raisonnable, ce qui implique de ne pas causer de dommage significatif aux autres États, d'échanger en continu les données et informations établies par les États, de prévenir, réduire et maîtriser la pollution par la mise en œuvre de plans de gestion et de surveillance.

Ce principe a été rappelé par la Recommandation de la 6^e Commission de l'Assemblée générale des Nations Unies le 11 novembre 2016, qui souligne que le droit des aquifères transfrontières « est de toute première importance pour les relations entre États et qu'il faut gérer de façon raisonnable et appropriée les aquifères transfrontières, qui constituent une richesse naturelle d'une importance vitale pour les générations présentes et futures, en faisant appel à la coopération internationale ».

Pour plus d'informations : Berberis, 1987 ; Sohlne, 2002 ; AFD, 2010 ; Simonel *et al.*, 2012 ; Lasserre et Cardenas, 2016



▲ Forage exploitant la nappe des Grès Nubiens, dans le wadi Qena (« Eastern desert ») en Égypte (forage prévu pour un futur ranch). © R. Guiraud

LA DIFFICILE MISE EN ŒUVRE D'UNE GESTION DURABLE TRANSFRONTALIÈRE DE LA RESSOURCE

La gestion des eaux souterraines en général – et plus encore lorsque celles-ci sont transfrontalières – nécessite **des moyens financiers conséquents aux niveaux national et international pour couvrir les dépenses d'investissement et de renouvellement des installations, puis les frais d'exploitation, de maintenance et d'entretien.** Ce point pose problème dans de nombreux pays en développement. Trouver un mode de gestion homogène entre les États se heurte à de nombreuses difficultés liées parfois à de vieilles inimitiés historiques ou à l'absence de volonté politique. À cela s'ajoutent des capacités techniques, financières, institutionnelles et administratives très diverses selon les pays. Par ailleurs, la priorité est souvent donnée aux contraintes économiques plutôt qu'à celles environnementales.

Le droit international n'est actuellement pas contraignant. Pour l'essentiel, il invite le plus souvent les États à coopérer et fournit, en cas de succès des négociations, des règles et des outils pour y parvenir.

Dans les faits, **il s'agit à l'heure actuelle, plutôt d'une gestion concertée pour gérer les problèmes de concurrence entre différents usages et acteurs en essayant de limiter les dégradations environnementales et les conflits sociaux.** Cette gestion concertée peut se mettre en place avec la création d'organisations intergouvernementales, comme le montrent les deux exemples développés ci-après.

→ ZOOM | Les différents organismes de gestion (surface et souterrain) en Afrique

- *Liptako-Gourma Authority* (ALG) : www.liptakogourma.org
- Autorité du bassin du Niger (ABN) : www.abn.ne
- *Volta basin Authority* : www.abv-volta.org
- Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS) : www.omvs.org
- Organisation pour la mise en valeur du fleuve Gambie (OMVG) : www.pe-omvg.org
- Commission du bassin du lac Tchad (CBLT) : www.cblt.org
- Comité Inter-État de lutte contre la sécheresse au Sahel (CILSS) : www.cilss.int
- Facilité africaine de l'eau (FAE) : www.africanwaterfacility.org

Exemple de gestion concertée : le cas du NSAS

Le grand système aquifère des Grès nubiens est exploité par quatre pays : l'Égypte, le Tchad, le Soudan et la Libye. Le processus de coopération entre ces quatre États a

évolué lentement au gré de plusieurs accords et de la mise en place d'instruments de coopération avec en particulier la création d'une institution internationale (Quadri, 2017).

Une organisation intergouvernementale de gestion...

L'Égypte et la Libye ont manifesté un intérêt à l'organisation d'une gestion commune du NSAS dès les années 1980, ce qui s'est concrétisé par un accord, en 1991, pour la création d'une structure (formalisée en 1992) : le JSAD-NSAS (*Joint Authority for the Study and Development of the Nubian Sandstone Aquifer System*). Le Soudan a rejoint cette association en 1996 et le Tchad en 1999. À cette date, un mode de fonctionnement a été élaboré : le bureau directeur, dont le siège est officiellement hébergé à Tripoli depuis 2006, est constitué de trois représentants, d'un niveau ministériel, de chaque pays avec un directeur exécutif, un secrétariat et une équipe technique. Un bureau national, avec un coordinateur et une équipe technique, est présent dans chaque pays membre. Des rencontres régulières sont programmées et des réunions exceptionnelles peuvent avoir lieu à la demande d'un des États membres. Des représentants des organisations internationales ou de pays donateurs peuvent être invités à ces rencontres.

... pour étudier et surveiller le NSAS

Du point de vue juridique, le champ d'action du JSAD-NSAS se limite à une régulation interne et ne comprend pas de pouvoir de procédure pour la gestion de l'aquifère. Ses sources de financement sont les contributions annuelles des pays membres et les subventions provenant d'institutions nationales ou internationales et de pays donateurs.

Son principal rôle est la surveillance et l'étude de l'aquifère en commun. Cela se traduit par la collecte de données, la préparation d'études et le développement de programmes et de règles communes d'utilisation de l'eau de l'aquifère. Sa mission inclut également d'étudier les aspects environnementaux liés à l'état de l'aquifère et, en conséquence, d'essayer de promouvoir la limitation de l'extraction des eaux souterraines dans les États membres.

Deux accords, principalement de procédure, négociés par le Centre pour l'Environnement et le Développement pour la Région Arabe et l'Europe (CEDARE) et signés en 2000, mettent l'accent sur la nécessité de poursuivre le *monitoring* et la mise à jour des données de façon constante et de partager les données et l'information.

En 2006, une nouvelle étape est franchie avec la mise en place d'un nouveau programme « *Regional Action programme for the Integrated NSAS management* » financé par le FEM et mis en œuvre par le PNUD, l'AIEA et l'UNESCO (Programme Hydrologique International). Ce projet avait pour objectifs de mieux comprendre le fonctionnement et les potentialités de l'aquifère et d'établir les bases d'un plan d'action stratégique (SAP) en s'appuyant sur les règles de la résolution 63/124 (cf. page 43). Concrètement, quatre objectifs spécifiques ont été définis :

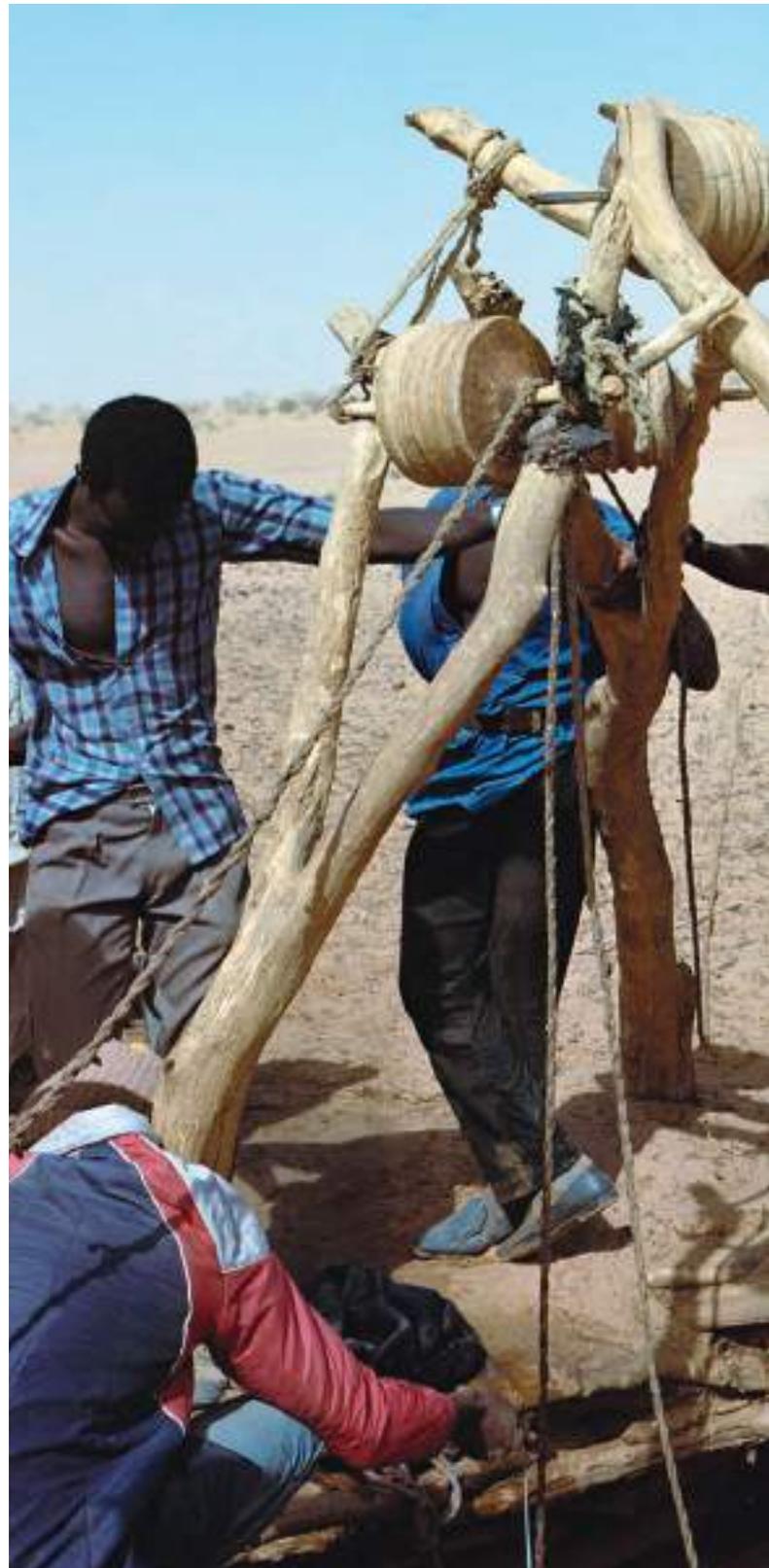
- identifier les dangers principaux et leurs causes en utilisant une analyse diagnostique de l'aquifère partagé (*SADA, Shared Aquifer Diagnostic Analysis*). Cette analyse a mis en exergue la croissance démographique, des structures de gouvernance inadaptées aux niveaux national et international ainsi que la pauvreté ;
- combler les lacunes de connaissance en utilisant des approches techniques appropriées ;
- préparer un plan d'action stratégique définissant la politique et les réformes légales et institutionnelles nécessaires pour traiter les risques identifiés ;
- proposer une structure institutionnelle pour mettre en œuvre ce plan d'action stratégique.

Un plan d'action stratégique pour une meilleure coopération transfrontalière

Le plan d'action stratégique, signé à Vienne par les quatre pays le 18 septembre 2013, incite à renforcer le rôle et les capacités de la « *Joint Authority* » et à définir de nouveaux domaines de coopération. Il insiste sur la nécessité de développer une politique régionale de mesures et de gestion et, pour cela, renforcer les aspects institutionnel et légal liés à la gestion du NSAS. Il préconise de développer une structure de coopération dédiée à l'échange de données et la création d'un réseau de mesures sur l'ensemble du système aquifère. Enfin, il recommande d'améliorer l'efficacité des bureaux régionaux dans les pays membres.

L'objectif final de ce plan d'action est de rendre possible, à travers des procédures légales et institutionnelles, une coopération transfrontalière qui intègre les activités socio-économiques et les schémas d'aménagement sur la base de l'utilisation efficace des ressources en eau souterraine. Dans ce domaine, l'implication de l'agriculture ainsi que le contrôle et la prévention des flux migratoires jouent un rôle essentiel.

Ce dernier projet constitue une avancée significative pour la gestion de ce grand système aquifère transfrontière, même si l'analyse « SWOT » (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) réalisée en octobre/novembre 2011, laisse apparaître de nombreuses faiblesses et lacunes. Les actions préconisées par ce plan sont malheureusement en « stand-by » du fait des événements et de la guerre civile en Lybie depuis 2014.



▲ Puits traditionnel profond. Bassin de Taoudenni, Nord du Mali. © Yves Travi

Le cas du SASS et le rôle de l'OSS

Le système aquifère du Sahara septentrional est partagé par trois pays : l'Algérie, la Lybie et la Tunisie. Les responsables de ces trois pays ont pris conscience des risques de surexploitation dès la fin des années 1960.

En 1972, un programme algéro-tunisien (étude des ressources en eau du Sahara septentrional, ERESS), a réalisé une première modélisation de cet aquifère avec une première évaluation de l'impact des prélèvements en cours et de leur augmentation probable. Ce programme a ensuite été actualisé en 1980.

C'est dans le cadre global du programme de l'Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) sur les aquifères des grands bassins que le programme spécifique SASS est né après une série de séminaires et d'ateliers régionaux. Un document de programme, signé à Tunis en septembre 1997, désigne l'OSS comme maître d'ouvrage du programme et responsable de la recherche de financements. Ce programme prévoyait une étude de la ressource et de ses usages, de proposer un mécanisme de suivi et de gestion commune ainsi que des recommandations quant aux meilleures valorisations possibles de cette eau.

En mai 1999, une première phase de trois ans (1999-2002) a été lancée avec l'appui des administrations responsables de l'eau des trois pays, de la coopération suisse, du Fonds international de développement agricole (FIDA) et de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Ce premier programme (SASS I) a été suivi de deux autres, à savoir SASS II (2003-2006) et SASSIII (2010-2015).

SASS I : hydrogéologie, base de données et modélisation

L'OSS assure la coordination de ce programme et s'appuie sur les experts nationaux et internationaux pour sa réalisation. Cette première phase (1999-2002) a fait l'objet d'une collaboration étroite entre les responsables de l'eau des trois pays concernés avec l'installation d'une équipe SASS à Tunis. Outre une dynamique de concertation entre les différents acteurs, cette première phase a permis :

- d'améliorer significativement la connaissance géologique et hydrogéologique du système aquifère ;
- la création d'une base de données référençant 9 000 forages et leurs principales caractéristiques dont les débits d'exploitation. Dotée d'outils d'analyse, celle-ci peut fonctionner comme un véritable système d'information, fournissant ainsi un outil de gestion à disposition des trois pays ;

- la réalisation d'un modèle mathématique, apportant une valeur ajoutée aux modèles précédents, en intégrant la partie libyenne et en utilisant les nombreuses données et études accumulées entre 1972 et 1999. Ce modèle rend possible la réalisation de simulations et la formulation de prévisions ;
- la recommandation de mettre sur pied un mécanisme permanent de concertation entre les trois pays, dont la nature juridique reste à définir.

SASS II : mise en place d'un mécanisme de concertation

Cette deuxième phase (2003-2006)* a abouti à :

- la réalisation de deux sous-modèles (Biskra et Bassin occidental en Algérie) et du modèle de la Djeffara tuniso-libyenne (Besbes *et al.*, 2005) ;
- l'établissement d'un diagnostic sur les pratiques agricoles ;
- la mise en place d'un mécanisme de concertation au niveau institutionnel entre les trois pays dont l'unité de coordination est hébergée par l'OSS. À l'issue de plusieurs ateliers et réunions, la configuration du mécanisme de cette structure, son fonctionnement et son financement ont été adoptés officiellement en novembre 2017 et un coordinateur a été nommé pour une année sur une base tournante. Il a pour principale mission d'offrir un cadre d'échange et de coopération entre les trois pays pour les activités d'études et de recherches en commun, de définition des protocoles d'échange de données, de mise à jour des modèles et de leur exploitation, d'actions de formation, etc.

À l'issue de la phase d'exploitation des nouvelles connaissances sur le SASS et de la proposition d'hypothèses variées sur l'utilisation de l'eau, il est apparu indispensable de mener une enquête socio-économique poussée sur la situation des irrigants et sur les coûts réels de l'utilisation de l'eau. Cette action a été entreprise lors du projet SASS III.

SASS III : recommandations opérationnelles pour une gestion durable de la ressource en eau

La troisième phase du projet (2010-2015) avait pour finalité de proposer des recommandations opérationnelles visant l'amélioration de la gestion de la ressource, en particulier pour l'irrigation agricole, dans le cadre de politiques de développement durable.

* Phase réalisée avec l'appui de la Direction du développement et de la coopération (DDC Suisse), du Fonds français pour l'environnement mondial (FFEM), du Fonds pour l'environnement mondial (FEM), du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), de l'UNESCO et de l'Agence de coopération internationale allemande pour le développement (*Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit*, GIZ).

→ ZOOM | L'Observatoire du Sahara et du Sahel

L'OSS est une organisation à caractère international à vocation africaine, créée en 1992 et établie à Tunis en 2000. Son action se situe dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches de la région sahélo-saharienne. L'OSS compte parmi ses membres 25 pays africains, 7 pays non-africains et 13 organisations représentatives de l'Afrique de l'Ouest, de l'Est et du Nord, d'organisations des Nations Unies ainsi que des organisations non gouvernementales.

L'OSS a pour mission d'appuyer ses pays membres africains dans la gestion durable de leurs ressources naturelles dans un contexte de changement climatique particulièrement défavorable. Pour cela, il s'investit dans :

- la mise en œuvre des accords multilatéraux des Nations Unies sur la désertification (CNULD), la biodiversité (CNUDB) et le changement climatique (CCNUCC) ;
- la promotion d'initiatives régionales et internationales liées aux défis environnementaux de l'Afrique sahélo-saharienne ;
- la définition de concepts et l'harmonisation d'approches et méthodologies en rapport avec la gestion durable des terres, les ressources en eau et les changements climatiques.

L'Observatoire s'appuie nécessairement sur la transmission des connaissances, le renforcement des capacités et la sensibilisation de toutes les parties prenantes.

Les activités et les projets de l'OSS sont financés respectivement par les contributions volontaires des pays membres, et par les subventions et les dons provenant des partenaires au développement.

Grâce à des mécanismes de gouvernance efficaces et à une équipe compétente, multiculturelle et multidisciplinaire, l'OSS apporte une contribution à haute valeur ajoutée dans le paysage institutionnel international et africain.

L'action de l'OSS couvre une large palette d'interventions qui concernent le suivi et la surveillance de l'environnement en appui aux efforts des pays dans la lutte contre la dégradation des terres et la désertification, dans la gestion durable des ressources en eau, la résilience des populations, et dans la sauvegarde du patrimoine biologique. Dans le cadre des ressources en eau plusieurs grands projets ont été conduits ou réalisés, ces dernières années par l'OSS :

- **SASS** : Afrique du Nord (Algérie, Lybie, Tunisie), système aquifère du Sahara septentrional, projet réalisé en trois phases entre 2000 et 2015, apportant successivement une meilleure connaissance du système, des outils de gestion et

une valorisation de l'utilisation de l'eau, en particulier pour l'irrigation.

- **CREM** : Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie), Coopération régionale pour une gestion durable des ressources en eau au Maghreb, réalisé en deux phases (2014-2018 et 2019-2020, 2020 - 2021) pour la mise en place d'une stratégie régionale de gestion des ressources en eau.

- **NB-ITTAS** : Afrique de l'Ouest et du Nord (Algérie, Bénin, Burkina Faso, Cameroun, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali, Mauritanie, Niger, Nigeria et Tchad), projet ABN-OSS « Améliorer la GIRE, la gestion et la gouvernance fondées sur la connaissance du bassin du Niger et du système aquifère d'Iullemeden-Taoudeni/Tanezrouft ».

- **GICRESAIT** : Afrique de l'Ouest et du Nord (Algérie, Bénin, Burkina Faso, Mali, Mauritanie, Niger et Nigeria), « Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Niger » (2010-2017), évaluation du potentiel et suivi des ressources en eau de ces deux grands systèmes aquifères, débuté en 2004 par l'étude du SAI.

- **IGAD** : Afrique de l'Est (Djibouti, Éthiopie, Érythrée, Kenya, Ouganda, Somalie, Soudan, Soudan Sud), projet « Cartographie, évaluation et suivi des ressources en eau partagées de la sous-région » exécuté par l'OSS (2007-2012) pour une vision commune de la gestion concertée des ressources en eau transfrontières.

- **Appui aux mécanismes de concertation :**

- **SASS** : l'unité de coordination du mécanisme de concertation du SASS, est domiciliée au siège de l'OSS depuis 2008. Ses missions essentielles sont entre autres, d'appuyer les pays dans la mise en œuvre des principales activités techniques destinées à faciliter la concertation entre les pays.

- **SAIT** : mise en place d'un mécanisme de concertation pour la gestion intégrée des eaux souterraines partagées d'Iullemeden et Taoudéni/Tanezrouft lors de la réunion des ministres, tenue le 27 mars 2014 à Abuja. Le principe de la création de ce cadre de gestion de ces ressources en eau a été adopté avec un Protocole d'accord déjà signé par quatre pays (Bénin, Mali, Niger et Nigeria).

Sur ces différents projets, de nombreux documents (cartes, atlas, rapports techniques et documentaires, bases de données, SIG, Géoportail) ont été publiés par l'OSS.

Pour plus d'informations : www.oss-online.org

Pour des raisons opérationnelles, le projet a fait l'objet de trois conventions signées avec les trois partenaires de coopération que sont la Facilité africaine de l'eau, le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) et le Fonds pour l'Environnement Mondial (FEM).

Le projet SASS III visait un double objectif :

- l'enrichissement des acquis de la connaissance hydrogéologique de la ressource en eau par des données socio-économiques décrivant la réalité du fonctionnement des exploitations agricoles (cf. zoom page suivante) ;
- la proposition d'alternatives pour le redéploiement de l'agriculture de la zone et des recommandations opérationnelles pour une agriculture durable avec préservation des ressources en eau et des sols. Ce dernier point a été abordé en développant l'installation d'un certain nombre de « pilotes de démonstration agricole » répartis sur tout le SASS.

Six problématiques de gestion des eaux d'irrigation ont été identifiées et sélectionnées par les autorités en charge de l'eau des trois pays concernés, autour desquelles ont été conçus les projets de pilotes de démonstration. Ces derniers présentent différents objectifs spécifiques tels

que la sauvegarde des *foggaras* (galeries souterraines servant à l'irrigation au Sahara), la maîtrise de la dégradation des sols, la restauration ou la sauvegarde des systèmes de production, la valorisation des eaux géothermales, le traitement des sols affectés par la salinisation ou encore la rationalisation de l'utilisation des eaux saumâtres. Les résultats obtenus dans les six pilotes ont été validés au cours de trois ateliers nationaux et d'un atelier régional (OSS, 2012, 2015) (cf. zoom page suivante).

▼ Forage artésien de Rtem, région de Tozeur, Tunisie, abandonné et non bouché. Un exemple de mauvaise gestion. Pierre Deschamps © IRD



▲ Atelier de forage profond. © Edmunds, travi et al., 2001

→ ZOOM | SASS III : données socio-économiques et résultats des pilotes de démonstration agricole

Pour dresser un état des lieux quantitatif et qualitatif de l'agriculture irriguée sur l'ensemble du bassin, 3 000 exploitations, réparties sur 10 zones (cinq en Tunisie, quatre en Algérie, une en Libye) ont fait l'objet d'enquêtes élaborées pour décrire leur fonctionnement et le comportement des

agriculteurs irrigants. Sur ce dernier point, en considérant les différentes conditions d'accès à l'eau (privé, collectif ou gratuit), deux variables apparaissent particulièrement pertinentes : l'incidence de la salinité de l'eau et le coût supporté par l'exploitant (cf. tableau ci-dessous).

	Moyenne SASS	Accès privé	Accès collectif	Accès gratuit	Algérie	Libye	Tunisie
Consommation d'eau par hectare et par exploitant (m ³ /ha)	12 686	10 516	14 746	21 735	13 520	9 134	13 266
Coût de l'eau (\$/m ³)	0,036	0,045	0,028	0,004	0,036	0,028	0,040
Productivité de l'eau (\$/m ³)	0,413	0,484	0,350	0,274	0,405	0,341	0,458
Marge brute par ha	3 909	4 270	3 176	4 683	4 632	2 861	3 478
Importance de l'élevage (% de la recette agricole)	17,72	19,7	12,94	30,85	14,9	27,9	9,4
Superficie irriguée moyenne	4,2	6	2,6	0,85	5,1	6	1,8
Élasticité-prix de la demande en eau en % (variation de la consommation lorsque le prix augmente de 100 %)	-12	-27	-8	-	-45	-25	-33
Élasticité-salinité en % (variation de la productivité de l'eau lorsque la salinité augmente de 100 %)	-75	-67	-80	-	-53	-52	-35

▲ Récapitulatif des résultats par catégorie d'accès à l'eau. D'après OSS, 2015

Le coût plus élevé de l'accès privé à l'eau et, plus globalement, l'élévation du coût supporté par l'exploitant, entraînent une réduction de la consommation et la recherche de systèmes de culture alternatifs améliorant la productivité de l'eau. La salinité a un impact économique important qui justifie les investissements de lutte contre ce fléau (drainage, bonification des terres, déminéralisation, etc.). L'ensemble des résultats peut servir de base à des politiques de développement (tarification de l'eau, foncier, investissements, etc.).

Pour aider les « décideurs », un modèle hydro-économique a été mis au point. Il permet de simuler des scénarios et de définir pour chacun d'entre eux : 1) le volume maximal à pomper dans l'aquifère et 2) le revenu maximal dégagé.

Les pilotes de démonstration agricole : les six pilotes (deux dans chacun des trois pays) avaient pour objectifs de tester des solutions techniques pour une meilleure productivité de l'eau, en relation avec les problèmes de pénurie, de salinisation, d'inefficacité de l'irrigation et de dégradation des sols.

Les solutions techniques rentables mises en application (énergie solaire, réalisation de drainage enterré, déminéralisation, irrigations localisées conjuguées avec l'intensification raisonnée des systèmes de culture) ont nettement amélioré la productivité de l'eau. On peut citer, par exemple, l'utilisation de l'énergie solaire et la modification du système d'irrigation dans l'oasis de Reggane en Algérie ou la restauration des sols altérés par la salinisation et l'hydromorphie à Kebili en Tunisie). Ces résultats ont joué un rôle pédagogique, non négligeable, en améliorant la perception de la valeur de l'eau chez les agriculteurs dorénavant plus enclins à payer l'eau d'irrigation et à investir pour une meilleure efficacité.

Par ailleurs, les pilotes ont également joué un rôle social en favorisant le dialogue entre les agriculteurs et en favorisant la diffusion des innovations et l'acceptabilité sociale des innovations. « Ces dynamiques se sont avérées prometteuses et peuvent permettre de revitaliser l'intérêt pour l'agriculture irriguée dans certaines régions à travers le bassin ».

Pour plus d'informations : OSS, 2015



▲ Forage actionné par énergie solaire, Thialaga, vallée du Fleuve. Sénégal. Kirsten Simondon © IRD

Quel avenir pour les aquifères profonds des régions saharo-sahéliennes ?



▲ Lac Trouna, Lybie. Ce lac fait partie des 22 lacs de la Ramlah des Daoudas. © Jacques Taberlet

Les grands aquifères profonds de la zone saharienne et de ses confins arides et semi-arides renferment des quantités considérables d'eau douce. À la faveur de structures géologiques favorables qui permettent à cette eau, en partie piégée et sous pression, de remonter à la surface, ils ont créé des « îlots » d'eau douce dans le désert et rendu possible le déploiement des sociétés humaines et de l'agriculture oasienne. Les techniques modernes d'exploitation des eaux profondes assurent, à l'heure actuelle, le développement de nombreuses régions et une amélioration des conditions de vie des populations. Mais, ces réserves en grande partie héritées des épisodes humides du passé sont souvent peu ou pas renouvelées et sont donc, à priori, vulnérables.

Au cours des dernières décennies, ces grands systèmes aquifères ont fait l'objet d'études poussées, utilisant les outils classiques de l'hydrogéologie ainsi que les nouvelles méthodes développées au cours de cette période. Elles ont permis de proposer et de développer des modèles hydrogéologiques utilisés pour simuler l'évolution future de ces grands systèmes aquifères en fonction de différents scénarios envisagés. **Compte tenu des énormes quantités d'eau, si on les considère dans leur globalité, ces systèmes ne semblent pas menacés à court ou moyen terme.** Mais, l'exploitation n'est pas uniformément répartie et certains secteurs, sur lesquels se concentre l'exploitation, montrent déjà localement des problèmes techniques et environnementaux. Il est donc important de développer des modèles régionaux



susceptibles de mieux planifier l'exploitation. Toutefois, les modèles sont seulement une représentation plus ou moins précise de la réalité (fortement dépendante de la quantité et de la qualité des données recueillies). **Il est donc nécessaire de maintenir les réseaux de surveillance et de poursuivre l'acquisition de données, pour valider les prévisions et affiner les modèles.**

À plus ou moins long terme, la surexploitation de ces aquifères, partagés par plusieurs pays, peut conduire à de sérieux problèmes économiques et politiques. Il paraît difficile de faire le choix de priver les populations des bienfaits de cette ressource pour la préserver pour les générations futures, à une échéance encore difficile à évaluer. **En revanche, sa gestion doit nécessairement faire l'objet de choix politiques d'économie et de priorisation de l'utilisation de l'eau.** Ces démarches

doivent s'accompagner d'un renforcement des coopérations régionale et internationale pour améliorer la connaissance de ces systèmes et développer les techniques modernes qui permettent une meilleure rentabilité et donc une économie d'eau, en particulier en agriculture, comme cela a commencé à être fait sur le SASS. Il paraît également nécessaire de développer une approche globale de la politique de gestion de l'eau, incluant la sécurité alimentaire et la notion d'eau « virtuelle » (équivalent en eau d'une ressource importée ou exportée, agricole par exemple). Ces problématiques sont particulièrement bien décrites et développées dans l'ouvrage de Besbes *et al.* (2018)* sur la sécurité de l'eau en Tunisie.

* Mustapha Besbes, professeur émérite à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis et associé étranger de l'Académie des Sciences à Paris, est un spécialiste des ressources en eau des pays arides, souvent consulté lors des différentes étapes du projet SASS.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abdurrahman W., 2002. *Development and management of groundwater in Saudi Arabia*. GW- MATE/UNESCO Expert group meeting, Socially sustainable management of groundwater mining from aquifer storage. Paris, 6 pages.

AFD, 2010. Vers une gestion concertée des aquifères transfrontaliers. Guide méthodologique. À savoir. 3. Paris, 122 pages.

Aggarwal P.K., Froehlich K., Gofiantini R., 2011. Contributions of the International Atomic Energy Agency to the development and practice of isotope hydrology. *Hydrogeology Journal*, 19 : 5-8.

AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB, IGRAC, 2015. *Intégration de la gestion des eaux souterraines dans les organismes de bassin transfrontalier en Afrique*. Manuel de formation produit par AGW-Net, BGR, IWMI, Cap Net, RAOB et IGRAC. 241 pages.

Al Asbahi, Qahtan Yehya A.M., 2005. *Water resources information in Yemen*. UN Intersecretariat working group on environment statistic (IWC-Env.), International work session on water statistics, Vienna (June 20-22 2005). http://unstats.un.org/unsd/environment/envpdf/pap_wasess3a3yemen.pdf

Baba Sy M., 2005. *Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional*. Thèse de Doctorat en Géologie, Université de Tunis El Manar, 261 pages.

Bakhabkhi M., 2002. Hydrogeological framework of the Nubian sandstone aquifer system. In: Appelgren B. (ed.), *Managing shared aquifer resources in Africa (ISARM Africa)*. *Proceedings of the international workshop, Tripoli (Libya), 2-4 June 2002*. IHP-VI, *Series on Groundwater n°8*. UNESCO, Paris : 177-201.

Berberis J.A., 1987. Le régime juridique international des eaux souterraines. *Annuaire Français de Droit International*. 33: 129-162.

Besbes M., Bouhlila R., Pallas P., Pizzi G., Ayoub A., Babasy M., El Barouni S., Horriche F., 2005. *Étude sur modèles mathématiques de la Jeffara tuniso-libyenne* [Study on mathematical models of Tunisian-Libyan Jeffara]. OSS report, OSS, Tunisie.

Besbes M., 2010. *Actualisation du modèle SASS. Rapport final*. OSS / Mécanisme de concertation du SASS.

Besbes M., Chahed J., Hamdane A., 2014. *Sécurité hydrique de la Tunisie : gérer l'eau en conditions de pénurie*. Éditions L'Harmattan, Paris, 358 pages.

Besbes M., Chahed J., Hamdane A., 2018. *National water security. Case study of an arid country: Tunisia*. Éditions Springer, Berlin, 272 pages.

BGR, 2012. *Groundwater need assessment. Lake Chad Basin. Report*. Berlin, 14 pages.

Bouchez C., Deschamps P., Goncalvez J., Hamelin B., Sylvestre F., Doumnang J.C., Mahamat Nour A., Baba Goni I., Favreau G., Genthon P., Seidel J.L., 2015. Investigation of ³⁶Cl distribution: towards a new estimation of groundwater residence times in the confined aquifer of the LCB? *Procedia Earth and Planetary Science*. 13: 147-150.

Busson G., 1967. *Le Mésozoïque saharien. 1ère partie : l'extrême Sud-tunisien*. Éditions du CNRS, Paris, 196 pages.

Castany G., Margat J., 1977. *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. BRGM Service géologique national, Orléans, 249 pages.

CBLT-PNUD-UNESCO, 1972. *Synthèse hydrologique du bassin du lac Tchad, 1966-1970*. Rapport technique, UNESCO, Paris, 218 pages + cartes.

CEDARE/IFAD, 2002. *Programme for the development of a regional strategy for the utilization of the Nubian Sandstone Aquifer System. Volume II: Hydrogeology*. CEDARE, Le Caire, Égypte.

Collin J.-J., 2004. Les eaux souterraines. Connaissance et gestion. BRGM Éditions / Hermann, Orléans, 170 pages.

Conrad G., 1969. *L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir)*. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, Éditions du CNRS, Paris, 527 pages.

DGPRES, 2015. *Projet de mise en œuvre du Plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin arachidier (PAGIRE-BA). Rapport de synthèse des études*. DGPRES, Sénégal, 21 pages.

Döll P., Douville H., Güntner A., Müller-Schmied H., Wada Y., 2016. Modelling freshwater resources at the global scale: challenges and prospects. *Surveys in Geophysics*. 37: 195-221. DOI: 10.1007/s10712-015-9343-1

Edmunds W.M., Wright E.P., 1979. Groundwater recharge and paleoclimate in the Sirte and Kufra basins, Libya. *Journal of Hydrology*. 40(3-4): 215-241.

Edmunds W.M., Travi Y., Zuppi G.M., Gasse F., Dodo A., Goni I.B., Djoret D., 2001. *Groundwater: a renewable resource? Focus on Sahara and Sahel*. GASPAL (Groundwater as Palaeoindicator) (EC ENRICH, ENV4- CT97-0591), British Geological Survey, Oxfordshire, 20 pages.

Edmunds W.M., Guendouz A.H., Mamou A., Moulla A., Shands P., Zouari K., 2003. Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Applied Geochemistry*. 18(6): 805-822.

ERESS, 1972. *Étude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final*. 1 carte, 12 planches. OSS, Tunis, 78 pages.

ESCWA, 1999. *Updating the assessment of water resources in ESCWA member States*. Rep. E/ESCWA/ENR/1999/WG.1/WP.3, Economic and Social Commission for Western Asia, Beirut.

Fontes J.C., Andrews J.N., Edmunds W.M., Guerre A., Travi Y., 1991. Paleorecharge by the Niger River (Mali) deduced from groundwater geochemistry. *Water Resources Research*. 27(2): 199-214.

Guendouz A., Moulla A.S., Edmunds W.M., Shand P., Zouari K., Mamou A., 1997. Palaeoclimatic information contained in groundwaters of the Grand Erg Oriental, North-Africa. In : *International symposium on isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere, Vienna, 14-18 April 1997*. IAEA-SM-349-/43: 555-571.

Guendouz A., Moulla A.S., Edmunds W.M., Zouari K., Shands P., Mamou A., 2003. Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complex Terminal aquifer in Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal*. 11: 483-495.

Guendouz A., Michelot J.L., 2006. Chlorine 36 dating of deep groundwater from Northern Sahara. *Journal of Hydrology*. 328(3): 572-580.

Kamel S., 2012. Application of selected geothermometers to Continental Intercalaire thermal water in southern Tunisia. *Geothermics*. 41: 63-73. DOI: 10.1016/j.geothermics.2011.10.003

- Lasserre F., Cardenas Y.V., 2016. L'entrée en vigueur de la Convention de New York sur l'utilisation des cours d'eau internationaux : quel impact sur la gouvernance des bassins internationaux ? *Revue québécoise de droit international*. 29-1: 85-106.
- Margat J., 2006. *Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde*. Co-édition BRGM-UNESCO, Paris, 52 pages.
- Margat J., 2008. *Les eaux souterraines dans le monde*, Éditions BRGM, Orléans, 44 pages.
- Marsily G. de, à paraître. Will we soon run out of water? *Annals of Nutrition and Metabolism*. (www.karger.com/ANM).
- Marsily G. de, Abarca-del-Rio R., 2015. Water and food in the twenty-first century. *Surveys in Geophysics*. 37: 503-527. DOI: 10.1007/s10712-015-9335-1
- Marsily G. de, Abarca-del-Rio R, Cazenave A, Ribstein P., 2018. Allons-nous bientôt manquer d'eau ? *La Météorologie, Revue de l'atmosphère et du climat*. 101: 39-49.
- Moulla A.S., Guendouz A., Cherchali M.E.H., Chaid Z., Ouarezki S., 2012. Updated geochemical and isotopic data from the Continental Intercalaire aquifer in the Great Occidental Erg sub-basin (south-western Algeria). *Quaternary international*. 257: 64-73.
- OSS, 2002. *Système aquifère du Sahara septentrional : de la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne*. Tunis, 58 pages.
- OSS, 2003. *Système aquifère du Sahara septentrional. Gestion commune d'un bassin transfrontière. Études et rapports*. Projet SASS. Tunis, 147 pages.
- OSS, 2008. *Système aquifère du Sahara septentrional. Gestion concertée d'un bassin transfrontalier*. Coll. Synthèse, n°1. Tunis, 49 pages.
- OSS, 2012. *Système aquifère du Sahara septentrional, « SASS III ». Rapport d'activités année 2012*. Tunis, 39 pages.
- OSS, 2015. *Pour une meilleure valorisation de l'eau d'irrigation dans le bassin du SASS. Diagnostic et recommandations*. Tunis, 32 pages.
- OSS/UNESCO, 2005. *Ressources en eau et gestion des aquifères transfrontaliers de l'Afrique du Nord et du Sahel*. ISARM Africa, UNESCO IHP-IV Series on groundwater. N°11. Paris, 134 pages.
- Petit-Maire N., Fontugne M., Rouland-Lefevre C., 1991. Atmospheric methane ratio and environmental change in the Sahara an Sahel during the last 130 kyrs. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 86(1-2): 197-206. DOI: 10.1016/0031-0182(91)90009-G
- Pettersen J.O., 2014. *Traçage isotopique (³⁶Cl, ⁴He, ²³⁴U) et modélisation hydrogéologique du système aquifère du Sahara septentrional. Application à la recharge Quaternaire du Continental Intercalaire*. Thèse de doctorat, Géosciences de l'environnement, Université d'Aix Marseille, France. 329 pages.
- Purtschert R., Sturchio N.C., Yokochi R., 2013. Krypton dating of old groundwater. In : Suckow A., Aggarwal P.K., Araguas-Araguas L. (éd.). *Isotope methods for dating groundwater*. IAEA, Vienne: 91-124.
- Quadri E., 2017. *The Nubian sandstone aquifer system. A case of cooperation in the making*. XVI World Water Congress. International Water resources Association (IWRA). Cancun, Mexico, 29 May-3 June 2017. 10 pages.
- Raimond C., Sylvestre F., Zakinet D., Moussa A. (éd.), 2019. *Le Tchad des lacs. Les zones humides sahéliennes au défi du changement global*. Collection Synthèses, IRD Éditions, Montpellier, France. 368 pages.
- Salem O., Pallas P., 2001. The Nubian sandstone aquifer system (NSAS). In : Puri S. (éd.). *Internationally shared (transboundary) aquifer resources management - Their significance and sustainable management*. IHP-VI, IHP Non Serial Publications in Hydrology, UNESCO, Paris, 74 pages.
- Schneider J.L., 1969. *Carte hydrogéologique de la République du Tchad*. BRGM, Orléans.
- Schneider J.L., Wolf J.P., 1992. *Carte géologique et carte hydrogéologique au 1500000 de la République du Tchad, mémoire explicatif*. Document du BRGM. 209, vol. 1 et 2. Orléans, 689 pages.
- Seguin J.-J., Gutierrez A., 2016. Les ressources en eau du continent africain : rareté et abondance. *Géosciences*. 21: 58-66.
- Simonel N., Requier-Desjardins M., Baba Sy M., Latrech D., Dodo A., 2012. La gestion des ressources transfrontières en eau souterraine à l'échelle supranationale. Une étude du système aquifère du Sahara septentrional et du système aquifère Iullemeden en Afrique. In : Maganda C., Petit O., Peter Lang S.A. (éd.), *La gouvernance des ressources naturelles stratégiques : perspectives contemporaines dans le domaine de l'environnement*: 99-127. Regional Integration and Social Cohesion. hal-02178756
- Sohlne J., 2002. *Le droit international des ressources en eau douce : solidarité contre souveraineté*. La documentation française, Paris. 608 pages.
- Thorweihe U., Schandelmeier H. (éd.), 1993. *Geoscientific research in northeast Africa*. Balkema, Rotterdam, 793 pages.
- Tweed S., Leblanc M., Cartwright I., Bass A., Travi Y., Marc V., Nguyen Bach T., Dang Duc N., Massuel S., Kumar U.S., 2019. Stable isotopes of water in hydrogeology. In: Maurice, P. A. (éd.) *Encyclopedia of water: science, technology and society*. Wiley: Hoboken, NJ. DOI: 10.1002/9781119300762.wsts0154
- UNESCO, 1972. *Étude des ressources en eau du Sahara septentrional (ERESS) : Algérie, Tunisie - (mission). Rapport sur les résultats du projet, conclusions et recommandations*. Paris. Disponible sur UNESCODOC : code du document TR/UNESCO/UNDP(SF) REG.100
- UNESCO, 2001. *Internationally shared (transboundary) aquifer resources management. Their significance and sustainable management. A framework document*. IHP-VI, Non Serial Documents in Hydrology. November 2001, UNESCO, Paris.
- UNESCO, 2004. *Proceedings of the International workshop on managing shared aquifer resources in Africa, Tripoli, Libya, June 2-4, 2002*. Ed. Applegreen, B., ISARM-Africa. IHP-VI, Series on Groundwater. No. 8, 238 pages.
- UNESCO, 2006. *Non renewable groundwater resources. A guidebook on socially sustainable management for water policy makers*. IHP-VI, series on groundwater. N°10, 104 pages.
- Van der Meeren T., Deschamp P., Sylvestre F., Kemkong B., Moussa A., Schuster M., Verschuren D., 2019. Les lacs d'Ounianga. Mieux comprendre leur dynamique hydrologique et écologique par une approche interdisciplinaire. Chapitre 6. In : *Le Tchad des lacs. Les zones humides sahéliennes au défi du changement global*. Collection Synthèses, IRD Éditions, Montpellier, 368 pages.
- Voss C.I., Soliman S.M., 2014. The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan: classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modeling. *Hydrogeology Journal*. 22(2): 441-468.
- Wallin B., Gaye C.B., Gourcy L., Aggarwal P., 2005. Isotope methods for management of shared aquifers in Northern Africa. *Ground Water*. 43: 744-749.

SITES INTERNET

(Liste non exhaustive)

Organisations internationales

CEDARE - *Center for Environment and Development for the Arab Region and Europe*
<http://web.cedare.org/>

FAO - Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
www.fao.org/land-water/water/fr/

FEM - Fonds pour l'environnement mondial
www.thegef.org/topics/international-waters

FFEM - Fonds Français pour l'Environnement Mondial
www.ffem.fr/fr/page-thematique-axe/eaux-internationales

FIDA - Fonds international de développement agricole
www.ifad.org/fr/water

IAEA - Agence Internationale de l'Énergie Atomique
www.iaea.org

IGRAC - *International Groundwater Resources Assessment Centre*
www.un-igrac.org/fr

ISARM - *Internationally Shared Aquifer Resources Management*
<https://isarm.org>

Nations Unies - Décennie de l'eau 2018-2028
www.un.org/sustainabledevelopment/fr/water-action-decade/

OIEau - Office International de l'Eau
www.oieau.fr

OSS - Observatoire du Sahara et du Sahel
www.oss-online.org

PNUD - Programme des Nations Unies pour le Développement - ODD6
www.undp.org/content/undp/fr/home/sustainable-development-goals/goal-6-clean-water-and-sanitation.html

PNUE - Programme des Nations Unies pour l'Environnement
www.unenvironment.org/fr/explore-topics/water/about-eau

UNESCO - Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
<https://fr.unesco.org/themes/securite-appvisionnement-eau/hydrologie/eaux-souterraines>

Agences de coopération internationale

AFD - Agence Française de Développement
www.afd.fr

Institutions et laboratoires de recherche

BRGM - Bureau de Recherches Géologiques et Minières, France
www.brgm.fr/activites/eau/eau

Cirad - Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, France
www.cirad.fr

CNFSH - Comité National Français des Sciences hydrologiques
<https://hydrologie.org>

IRD - Institut de recherche pour le développement, France
www.ird.fr

Réseaux

RIOB - Réseau International des Organismes de Bassin
www.riob.org/fr

Ritimo - Réseau d'information et de documentation sur le développement durable et la solidarité internationale (site « Partage des eaux »)
www.partagedeseaux.info



▲ Les dromadaires à l'abreuvoir au puits dans le grand erg oriental, Tunisie. Vincent Simonneaux © IRD

Lexique

Chott. En Algérie et en Tunisie, lac salé, plus ou moins desséché.

Endoréique. Eaux de surface n'atteignant pas la mer ou l'océan mais alimentant un plan d'eau sans exutoire ou bien absorbées au cours de leur écoulement par infiltration et/ou évaporation.

Modélisation numérique. Elle consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique.

Sebkha. En Afrique du Nord, fond plat et salé d'une dépression fermée, sans végétation, caractérisé par des efflorescences salines en périodes sèches, inondable par des eaux de crue ou des remontées d'eaux profondes en périodes de pluie.

Acronymes et abréviations

ABN	Autorité du bassin du Niger
AIEA	Agence internationale pour l'énergie atomique
BGR	Institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles - <i>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</i>
BGS	<i>British Geological Survey</i>
BP	<i>Before present</i>
CBLT	Commission du bassin du lac Tchad
CEDARE	Centre pour l'Environnement et le Développement pour la Région Arabe et l'Europe / <i>Center for Environment and Development for the Arab Region and Europe</i>
CI	Continental Intercalaire
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
CREM	Projet « Coopération régionale pour une gestion durable des ressources en eau au Maghreb »
CSFD	Comité Scientifique Français de la Désertification
CT	Continental Terminal (ou Complexe Terminal en Afrique du Nord)
DGPPE	Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau, Sénégal
ERESS	Étude des ressources en eau du Sahara septentrional
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEM	Fonds pour l'Environnement Mondial
FFEM	Fonds Français pour l'Environnement Mondial
FIDA	Fonds international de développement agricole

GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
IRD	Institut de recherche pour le développement
ISARM	Programme « <i>Internationally Shared aquifer resources management</i> »
JSAD-NSAS	<i>Joint Authority for the Study and Development of the Nubian Sandstone Aquifer System</i>
NAS	Système aquifère nubien
NSAS	Système aquifère des grès nubiens
ODD	Objectifs de développement durable
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PAGIRE-BA	Plan d'action de gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin arachidier
PNAS	Système aquifère post-nubien
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SADA	<i>Shared Aquifer Diagnostic Analysis</i>
SAI	Système aquifère des lullemeden
SAP	<i>Strategic Action Plan</i>
SASS	Système aquifère du Sahara septentrional
SAT	Système aquifère du Taoudeni
SIG	Système d'information géographique
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

Résumé

95 % de l'eau douce utilisée par les hommes au niveau mondial, essentiellement d'origine souterraine, proviennent de la ressource en eau renouvelable (part des précipitations qui n'est ni consommée par les plantes puis évapotranspirée, ni évaporée). Les 5 % restants proviennent du stock d'eau souterraine emmagasinée lors des périodes de recharge excédentaire. À l'échelle mondiale, ce stock décroît continuellement du fait d'une surexploitation liée à un déséquilibre entre la vidange, naturelle ou provoquée (notamment pour l'irrigation agricole), et la recharge ou tout simplement du fait de la quasi-absence de recharge. C'est le cas des grands aquifères de la région saharo-sahélienne, souvent seule ressource régionale d'importance disponible.

Ces réserves d'eau souterraines non renouvelées, souvent qualifiées de « fossiles », sont en grande partie héritées des périodes humides du Quaternaire. L'âge et les conditions de leur recharge ont pu être étudiés à l'aide de l'hydrologie isotopique (marqueurs de conditions climatiques et datations) associée à de nombreuses traces d'un vaste système hydrologique (réseaux hydrographiques fossiles, sédiments lacustres) et de vie humaine, animale et végétale.

Dans la partie saharienne, la raréfaction des précipitations au cours des derniers millénaires et la vidange naturelle de ces grands aquifères ont conduit progressivement le désert à reprendre ses droits. À l'heure actuelle, seuls subsistent quelques oasis alimentées par l'émergence des eaux souterraines sous pression. Ces milieux fragiles sont menacés par la surexploitation des ressources en eau souterraines. De nombreuses études, associant souvent plusieurs pays, ont ainsi été entamées depuis les années 1970 pour mieux comprendre le fonctionnement de ces aquifères et tenter de les gérer durablement.

Ce dossier replace, tout d'abord, les eaux profondes de la zone saharo-sahélienne dans le contexte de la disponibilité en eau douce sur la planète et souligne l'importance de leur préservation pour lutter contre la désertification. Il s'intéresse ensuite aux caractéristiques générales de ces grands systèmes aquifères, souligne leurs spécificités géologiques et paléo-hydrogéologiques et décrit les méthodes d'étude, en s'appuyant sur trois exemples de grands systèmes aquifères profonds : le bassin du Tchad, le système aquifère des grès nubiens (NSAS) et le système aquifère du Sahara septentrional (SASS). Enfin, la question de la gestion rationnelle de ces grands systèmes et son aspect transfrontalier sont abordés en décrivant les actions entreprises sur le NSAS et le SASS

Mots clés :

Aquifères profonds, région saharo-sahélienne, paléo-hydrogéologie, gestion transfrontalière, ressources en eau, oasis

Abstract

95% of the freshwater used by mankind worldwide—mainly groundwater—derives from renewable water resources (i.e. the share of rainfall not taken up by plants or evaporated). The remaining 5% is from the groundwater stock accumulated during excess recharge periods. Globally, this stock is constantly declining due to overexploitation linked to an imbalance between natural or human discharge (especially for crop irrigation) and groundwater recharge, or simply due to the complete absence of recharge. This is the case regarding the large Saharo-Sahelian aquifers, which are often the only substantial water resources available in this region.

These nonrenewable, so-called 'fossil', groundwater resources were generally formed during the wet Quaternary Periods. The age and conditions of their recharge have been studied using isotope hydrology (climatic markers and dating) combined with abundant evidence of a vast hydrological system (fossil hydrographic networks, lake sediments) and of human, animal and plant life.

In the Saharan zone, the dwindling rainfall pattern over the last few millennia and the natural discharge of these large aquifers have gradually led to formation of the desert as we know it today. Currently, only a few oases remain that are supplied by groundwater pushed to the surface under pressure. These fragile environments are threatened by the overuse of groundwater resources. Many often transboundary studies have been conducted since the 1970s to gain insight into the functioning of these aquifers and to come up with ways to manage them sustainably.

This *Dossier* considers the deep groundwater resources in the Saharo-Sahelian zone in terms of the availability of fresh water worldwide and highlights the importance of preserving them to combat desertification. It focuses on the general features of these major aquifer systems, while underlining their geological and paleohydrogeological specificities. The study methods are then described based on three examples of major deep aquifer systems: the Chad Basin, the Nubian Sandstone Aquifer System (NSAS) and the North-Western Sahara Aquifer System (NWSAS). Finally, the rational management of these large-scale systems and transboundary aspects are addressed while outlining the initiatives undertaken on the NSAS and NWSAS.

Keywords:

Deep aquifers, Saharo-Sahelian region, paleohydrogeology, transboundary management, water resources, oasis

Dans la même collection

Numéros déjà parus

La lutte contre la désertification : un bien public mondial environnemental ? Des éléments de réponse...

(M. Requier-Desjardins et P. Caron, janv. 2005)
Disponible aussi en anglais

La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification

(G. Begni, R. Escadafal, D. Fontannaz et A.-T. Nguyen, mai 2005)
Disponible aussi en anglais

Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification

(M. Mainguet et F. Dumay, avril 2006)
Disponible aussi en anglais

Lutte contre la désertification : l'apport d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)

(M. Raunet et K. Naudin, septembre 2006)
Disponible aussi en anglais

Pourquoi faut-il investir en zones arides ?

(M. Requier-Desjardins, juin 2007)
Disponible aussi en anglais

Sciences et société civile dans le cadre de la lutte contre la désertification

(M. Bied-Charreton et M. Requier-Desjardins, septembre 2007)
Disponible aussi en anglais

La restauration du capital naturel en zones arides et semi-arides Allier santé des écosystèmes et bien-être des populations

(M. Lacombe et J. Aronson, mars 2008)
Disponible aussi en anglais

Une méthode d'évaluation et de cartographie de la dégradation des terres. Proposition de directives normalisées

(P. Brabant, août 2010)
Disponible aussi en anglais

Pastoralisme en zone sèche. Le cas de l'Afrique subsaharienne

(B. Toutain, A. Marty, A. Bourgeot, A. Ickowicz et P. Lhoste, février 2012)
Disponible aussi en anglais

Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables

(M. Bernoux et T. Chevallier, décembre 2013)
Disponible aussi en anglais

L'ingénierie écologique pour une agriculture durable dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest.

(D. Masse, J.-L. Chotte et E. Scopel, septembre 2015)
Disponible aussi en anglais

Surveiller la désertification par télédétection

(R. Escadafal et G. Bégni, novembre 2016)
Disponible aussi en anglais

Questions de genre en zones sèches. Les femmes, actrices de la lutte contre la désertification

(Droy I., coord., octobre 2019)
Disponible aussi en anglais





**Ministère de l'Enseignement
supérieur, de la Recherche et de
l'Innovation**

1 rue Descartes
75231 Paris CEDEX 05
France
Tél. +33 (0)1 55 55 90 90
www.enseignementsup-recherche.gouv.fr



Agropolis International

1000 Avenue Agropolis
34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél. +33 (0)4 67 04 75 75
www.agropolis.fr



**Ministère de l'Europe et des
Affaires étrangères**

27, rue de la Convention
CS 91533
75732 Paris CEDEX 15
France
Tél. +33 (0)1 43 17 53 53
www.diplomatie.gouv.fr



**Ministère de la Transition
écologique et solidaire**

92055 Paris-La-Défense CEDEX
France
Tél. +33 (0)1 40 81 21 22
www.ecologique-solidaire.gouv.fr

NOUS CONTACTER



CSFD
Comité Scientifique
Français de la Désertification
Agropolis International
1000 Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél.: +33 (0)4 67 04 75 75
Fax: +33 (0)4 67 04 75 99
csfd@agropolis.fr
www.csf-desertification.org

Suivez-nous sur

facebook

twitter
twitter.com/csfd_fr

Photos de couverture

1. Irrigation, Tunisie. Christian Lamontagne © IRD
2. Forage artésien, Douz, Tunisie. Pierre Deschamps © IRD
3. Lac Trouna, Lybie. © Jacques Taberlet