

Prospection des ressources hydrauliques du désert: rôle des isotopes

par R. Gonfiantini*

De temps à autre, la presse fait état des gigantesques réserves d'eaux souterraines du Sahara, dont l'exploitation rationnelle transformerait le désert en terre cultivable. Bien qu'il s'agisse là de projets dont la réalisation est plutôt problématique, il n'en demeure pas moins que la nappe phréatique est relativement abondante dans la majeure partie du Sahara (ainsi que dans d'autres déserts), mais elle est rarement d'accès facile. Que savons-nous vraiment de ces ressources et de la manière dont elles se sont constituées dans des zones où les précipitations sont si rares? Que savons-nous de l'histoire hydrologique du désert? La réponse à ces problèmes est importante pour l'évaluation correcte et l'utilisation des eaux souterraines et les techniques isotopiques peuvent nous aider à l'obtenir.

Le terme *désert* désigne toutes les régions arides où les précipitations sont si rares que l'homme ne peut y habiter en permanence. Bien qu'on admette généralement une limite maximale de 250 mm par an de précipitations pour les déserts, celles-ci sont encore plus faibles sur la majeure partie des déserts actuels et très souvent nettement inférieures (moins de 100 mm par an) — ce qui correspond à peu près à 15% des précipitations sur la plus grande partie de l'Europe — irrégulièrement réparties dans le temps et l'espace. On constate fréquemment une absence totale de précipitations pendant l'année (désert hyperaride). En conséquence, il n'y a pas de formation d'eau douce en surface, comme les fleuves et les lacs, et la nappe phréatique est généralement si profonde que les racines des plantes ou les puits artificiels ne peuvent l'atteindre. Il n'y a pas, ou seulement à titre exceptionnel, de formes permanentes de vie animale et végétale. Les établissements humains sont rares et ne peuvent s'implanter que dans les oasis, dépressions où le niveau des nappes souterraines atteint la surface ou s'en approche, de telle sorte qu'il est aisé d'utiliser l'eau pour l'irrigation et à d'autres fins, même avec des techniques primitives.

Les déserts occupent de vastes régions comprises essentiellement entre 15° et 30° de latitude. Le désert du Sahara, en Afrique du Nord, le plus grand du monde, a une superficie d'environ 9 millions de km², comparable à celle des Etats-Unis d'Amérique. Au nombre des autres grands déserts, on peut citer ceux de la Péninsule arabique et de l'Iran — que l'on peut considérer comme la prolongation du Sahara — le désert du Turkestan en URSS, le désert du Thar en Inde et le désert de Gobi en Chine et en Mongolie, le Grand Désert américain et — dans l'hémisphère sud — le désert du Kalahari en Afrique du Sud, le Grand Désert australien et le désert d'Atacama au Chili septentrional. Ce dernier, qui est relativement

petit par la superficie, est certainement le plus sec: on n'a pas enregistré de précipitations sur sa majeure partie pendant plus d'un siècle.

Evolution du climat

Toutefois, au cours de l'histoire géologique, le climat a changé à plusieurs reprises et les déserts actuels n'ont pas toujours été aussi arides, ni aussi dénués de vie et de végétation. Dans de nombreux sites sahariens, des peintures et des gravures rupestres et des restes d'activités humaines montrent que dans le passé le climat et l'environnement étaient favorables à la vie. On peut en conclure qu'à une certaine période, les précipitations étaient relativement abondantes et qu'on pouvait se procurer facilement de l'eau. La dernière de ces périodes "pluviales", le Néolithique humide, date environ de 7000 à 3000 avant notre ère. Par la suite, la situation s'est détériorée de plus en plus, avec l'assèchement des nappes de surface, la diminution graduelle du débit des sources et l'abaissement de la nappe phréatique. Cependant, il y a seulement 2000 ans, la situation était probablement nettement meilleure qu'aujourd'hui. Les légions romaines ont pu traverser à deux reprises le désert de Libye pour atteindre la grande oasis de Wadi Ajal au Fezzan et combattre les Garamantes: la première fois en 20 av. J.C., de Sabratha (à 65 km à l'ouest de Tripoli) à Ghadames et à nouveau à travers le plateau de Hamada-el-Hamra (Désert de la pierre rouge), soit un parcours total de 1200 km; la deuxième fois en 70 de notre ère, en suivant un itinéraire plus à l'est, à travers l'oasis de Al Djoufrah et le Djebel Sawda (Montagne noire).

Au sud du Sahara, approximativement entre 18 et 12° nord, les précipitations augmentent, bien qu'elles demeurent relativement rares. Mais, fait plus important, il y a des précipitations régulières en été, dues au déplacement de la mousson vers le nord. En conséquence, une maigre végétation, suffisante pour l'élevage nomade, apparaît pendant la saison des pluies. C'est le Sahel, mot qui veut dire "rivage" en arabe (le désert étant comparé à la mer). L'habitat sahelien est toutefois très fragile; une année ou deux de précipitations peu abondantes suffisent à causer des catastrophes et à entraîner la mort, par inanition, de milliers d'animaux et souvent d'hommes, en particulier d'enfants. Des tragédies de ce type se sont produites à plusieurs reprises ces dix dernières années. Elles peuvent également faire avancer le désert qui constitue de nos jours une préoccupation majeure pour les pays du Sahel.

Une seule ressource, les eaux souterraines

Il est évident que pour améliorer les conditions de vie dans les oasis et au Sahel et pour protéger cette

* M. R. Gonfiantini est membre de la Section d'hydrologie isotopique de la Division de la recherche et des laboratoires de l'AIEA.



Une des plus belles gravures rupestres du Wadi Zigzah (Fezzan, Libye) qui prouve l'existence antérieure d'un environnement favorable à la vie animale.

région des catastrophes naturelles, la première condition à remplir est d'assurer un approvisionnement suffisant en eau douce, qui ne peut évidemment provenir que des nappes souterraines. C'est pourquoi tous les pays arides ont des programmes de développement agricole, souvent financés par le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) en vue d'étudier et d'évaluer les ressources en eaux souterraines et de forer des puits pour les exploiter. Dans ces projets, les techniques isotopiques ont été utilisées à plusieurs reprises pour aider à évaluer correctement le volume des nappes souterraines.

Un problème fondamental des zones arides, que les techniques hydrologiques classiques ne permettent pas de résoudre aisément, consiste à déterminer si une nappe aquifère donnée est activement alimentée. En d'autres termes, est-ce que l'exploitation épuise une fois pour toutes cette nappe ou s'agit-il d'une ressource renouvelable? La nappe souterraine sera renouvelée par l'infiltration d'eau dans la zone d'alimentation où la formation géologique aquifère est exposée à la surface. Des déterminations au tritium peuvent souvent donner des indications.

Le tritium est un isotope radioactif d'hydrogène de masse 3 dont la période radioactive est de 12,43 ans.

Le lit actuellement asséché du Wadi Zigzah. Ce fleuve coulait probablement pendant le Pléistocène supérieur (de 65 000 à 10 000 ans av. notre ère) et le Néolithique humide (de 7000 à 3000 ans avant notre ère).



D'énormes quantités de tritium ont été injectées dans l'atmosphère de 1952 à 1963, au cours des essais de bombes à hydrogène. Auparavant, le seul tritium présent dans l'environnement résultait de l'irradiation cosmique et ne représentait qu'environ trois à quatre kg pour la terre entière. La concentration de tritium a atteint son maximum pendant les pluies du printemps 1963, où des valeurs jusqu'à 1000 fois supérieures au niveau naturel ont été observées dans l'hémisphère nord. Après 1963, le volume de tritium a diminué régulièrement, à cause de l'interdiction des explosions thermonucléaires dans l'atmosphère.

La teneur en tritium des eaux naturelles, en particulier des nappes souterraines, est généralement très faible. Toutefois, avec les techniques de comptage les plus perfectionnées, on peut déceler un atome de tritium dans 10^{18} atomes d'hydrogène. Une technique récemment mise au point mesure les atomes d'hélium 3 produits par la décroissance radioactive du tritium au moyen d'un spectromètre de masse. Ceci a réduit le niveau de détection au moins d'un ordre de grandeur, et le réduira peut-être de deux dans un proche avenir.

S'il y a présence de tritium, la nappe souterraine est récente et a été alimentée depuis 1952. On peut donc utiliser le tritium pour détecter l'alimentation qui s'est produite ces 30 dernières années. Toutefois, à cause de la rareté des précipitations dans les zones arides, une telle période risque de ne pas être significative statistiquement ou d'être insuffisante pour que les eaux infiltrées atteignent la nappe phréatique (partie la plus profonde de la nappe souterraine). En fait, les eaux souterraines peu profondes du Sahara ne contiennent pas de quantités notables de tritium, ce qui indique que l'alimentation récente est négligeable ou n'a pas encore atteint la nappe phréatique.

A l'inverse, s'il y a infiltration, on pourra la détecter et l'évaluer en analysant les variations de la teneur de tritium du sol humide au-dessus de la nappe phréatique. Les résultats indiquent que cette méthode est fiable et prometteuse, en particulier si elle est utilisée avec des modèles physiques décrivant l'écoulement des eaux. Pour étudier plus avant cette méthode, l'AIEA a récemment entrepris un programme de recherche coordonnée, avec l'appui financier de la République fédérale d'Allemagne, par l'intermédiaire du Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF). L'objet de ce programme sera d'étudier le processus d'infiltration des eaux dans les zones arides.

Pour estimer l'âge des eaux souterraines, une autre méthode consiste à mesurer la quantité de carbone 14 dans le carbone inorganique dissous. Le carbone 14 est un isotope radioactif du carbone, produit par l'irradiation cosmique et dont la période est de 5730 ans. La teneur de cet isotope radioactif dans l'acide carbonique actuellement contenu dans l'atmosphère est très faible, de l'ordre de 1 dans 10^{12} atomes. La photosynthèse de la respiration des plantes transfère le carbone de l'atmosphère à la terre et aux nappes souterraines, où il est dissous essentiellement sous forme de bicarbonate. Le datage des eaux souterraines, bien que compliqué par l'interaction des ions du bicarbonate avec la formation aquifère indique s'il s'agit d'eaux très anciennes. Cette méthode n'est valable que pour des eaux de plus de 2000 à 3000 ans. La limite maximale est de 30 000 ans actuellement, mais elle pourra être

poussée jusqu'à 70 000 ans et encore davantage avec la mise au point de nouvelles techniques de comptage au moyen d'un cyclotron ou de l'accélérateur Van de Graaff.

Toutefois, c'est un troisième instrument isotopique qui présente peut-être le plus d'intérêt pour l'étude des eaux souterraines dans les zones arides: les variations du pourcentage d'isotopes stables deutérium/hydrogène et oxygène 18/oxygène 16 dans l'eau. Il est maintenant évident que, dans le passé, ce pourcentage dans les eaux de pluie s'est modifié au fur et à mesure de l'évolution du climat. En conséquence, si les pourcentages isotopiques des nappes souterraines sont nettement inférieurs à ceux auxquels on s'attend dans le cas de précipitations modernes, la nappe souterraine n'est pas récente et a été alimentée il y a des milliers d'années, lorsque le climat était plus humide.

Les eaux anciennes

Dans les zones arides, en particulier dans les zones sahariennes ou sub-sahariennes, où l'AIEA a effectué plusieurs prospections hydrologiques au moyen de techniques isotopiques, comme sous-traitant d'autres organisations des Nations Unies (FAO, UNESCO, PNUD), les nappes souterraines profondes sont généralement très anciennes. La teneur en carbone 14 est souvent égale ou inférieure à 2 % de la teneur moderne, ce qui indique un âge de plus de 20 000 ans (compte tenu des erreurs et des incertitudes inhérentes à cette méthode). Ceci indiquerait que l'alimentation s'est probablement produite pendant la Période pluviale du Pléistocène supérieur (il y a 10 000 à 65 000 ans). A des latitudes plus élevées, cette période correspond aux dernières périodes glaciaires, qui s'appellent würmienne ou weichselienne en Europe et wisconsinienne en Amérique du Nord. La déperdition relative des isotopes lourds stables, deutérium et oxygène 18, qui indique que l'alimentation s'est produite à une période plus humide qu'aujourd'hui, milite également en faveur de cette théorie.

Des observations analogues à celles qui viennent d'être décrites ont été faites par exemple pour "l'Intercalaire continental", nom dont on désigne communément la principale formation aquifère du Sahara occidental qui s'étend essentiellement en Algérie, des Atlas aux Monts du Hoggar, dans le sens nord-sud et de la Tunisie et de la Libye occidentale jusqu'à la vallée de Wadi Saura, dans la direction est-ouest. Sa superficie totale est de 600 000 km² environ, soit 10% de plus que la France et sept fois celle de l'Autriche. Le volume d'eau contenu dans un aquifère de ce type est énorme, de l'ordre de milliers de km³.

L'Intercalaire continental s'étend essentiellement dans des zones désertiques, souvent à de grandes profondeurs: par exemple, à proximité de Touggourt, il est exploité par des puits forés dont les écrans (sections perforées) sont à une profondeur comprise entre 1500 et 1700 m. A cet endroit, la charge d'eau se trouve de 260 à 290 m au-dessus de la surface du sol et l'eau est à plus de 70°, de telle sorte qu'il faut la refroidir avant de la distribuer. A la périphérie, où la formation affleure, le carbone 14 augmente, ce qui indique la présence d'eau plus jeune. Les isotopes stables ont permis d'identifier une source d'alimentation aquifère peu



Puits artésien à Wadi Qirzah.

profonde du Grand Erg occidental. Il s'agit d'une vaste formation de dunes de sable, au nord-ouest de l'Intercalaire continental, qui s'est formée pendant la période hyperaride qui a suivi la période pluviale du Pléistocène supérieur et a précédé le Néolithique humide. Grâce à la technique des isotopes stables également, l'écoulement des eaux de l'Intercalaire continental dans une formation moins profonde a été définitivement confirmée en Tunisie, où les nappes phréatiques profondes remontent par le système de failles de El Hamma.

Ces derniers exemples montrent comment les mesures effectuées au moyen d'isotopes stables peuvent servir à identifier l'origine des nappes souterraines et des communications entre aquifères. Ce type de renseignements est évidemment essentiel lorsque l'on cherche à évaluer le volume d'un aquifère.

Dans une étude récente en Jamahiriya arabe libyenne, les isotopes stables ont aidé à déterminer l'écoulement des nappes souterraines. L'écoulement principal va du sud au nord dans les aquifères importants (Paléozoïque, Kicla) que l'on exploite de plus en plus. On a lancé de nombreux nouveaux projets agricoles et créé des fermes expérimentales dans plusieurs grandes oasis, du Fezzan à la mer (Mourzouk, Wadi Ajal, Wadi Ash Shati, Al Djoufrah, Wadi Zamzam, etc.). Là encore, le carbone 14 a permis de dire qu'il s'agit de nappes souterraines généralement anciennes (plus de 20 000 ans) et la teneur relativement faible de

Désert de dunes de sable (Erg) dans le Fezzan.





Le village sahélien de Boutilimit en Mauritanie méridionale.

deutérium et d'oxygène 18 appuie également cette conclusion. En outre, les isotopes stables ont aidé à préciser les relations entre les divers aquifères et à voir quel volume d'eaux souterraines provenaient de différentes sources.

Insuffisance de renseignements

L'étude de ressources en eaux souterraines dans les zones arides est complexe et difficile pour un grand nombre de raisons. Les puits forés, dont on peut utiliser la diagraphie stratigraphique pour procéder à une évaluation hydrogéologique des diverses formations aquifères, sont généralement rares et souvent absents sur des zones étendues; lorsqu'il y en a, la documentation pertinente est souvent perdue ou incomplète. Les divers types de données disponibles (météorologiques, climatologiques, hydrologiques, piézométriques, etc.) sont rares, compte tenu de la superficie des zones étudiées. En outre, trop peu de temps s'est passé depuis le début des observations, en particulier si l'on considère l'irrégularité et la rareté des phénomènes observés: par exemple, on sait peu de choses sur les précipitations dans le désert, leur hauteur moyenne et la probabilité de récurrence de précipitations dépassant une certaine

hauteur; en conséquence, toute évaluation du taux de renouvellement des nappes souterraines est sujette à caution.

Dans ce contexte, les techniques isotopiques fournissent des renseignements supplémentaires qu'on ne peut obtenir par d'autres moyens. Les variations en fonction du temps de la composition isotopique des précipitations semblent importantes car elles peuvent donner des indications sur le problème de l'alimentation moderne et permettre d'évaluer l'âge des nappes souterraines. On peut utiliser les isotopes stables comme traceurs écologiques pour suivre l'écoulement des nappes souterraines sur de grandes distances. Les isotopes écologiques ont, par rapport aux traceurs injectés artificiellement, l'avantage d'être injectés continuellement sur la totalité du secteur étudié, en conséquence, les résultats obtenus sont valables à la fois dans l'espace et dans le temps. D'autre part, les isotopes d'hydrogène et d'oxygène se conservent mieux que d'autres traceurs disponibles dans l'environnement tels que les éléments chimiques dissous dans l'eau (sauf pour la désagrégation du tritium, dont l'évolution est bien connue), ont des interactions négligeables ou limitées avec la matrice aquifère, et se comportent exactement comme l'eau parce qu'ils sont incorporés à la molécule d'eau.

L'application des techniques isotopiques aux études hydrologiques dans les zones arides a fait l'objet de discussions approfondies à la réunion d'un groupe consultatif organisé par l'AIEA en 1978. Dix-sept communications ont été présentées et sont maintenant publiées dans le compte rendu de la réunion (*Arid-zone hydrology: investigations with isotope techniques*, STI/PUB/547, AIEA, Vienne, 1980) qui résume la plupart des données et les résultats de dix années de travail environ dans les zones arides.

Le lac Um el Maih (Mère salée) dans la mer de sable d'Ubari, Fezzan. Dans cette région, plusieurs autres petits lacs de même type occupent des dépressions entre les dunes, où les nappes souterraines affleurent. Le taux d'évaporation étant très élevé, la teneur en sel des lacs est toujours importante et atteint souvent le point de saturation, ce qui engendre la formation de dépôts de sel essentiellement composés de chlorure de sodium. Ce sel est souvent ramassé et vendu par les petites communautés qui vivent dans l'oasis du lac.

