

IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Avril 2019

Version numérique :
www.iaea.org/bulletin



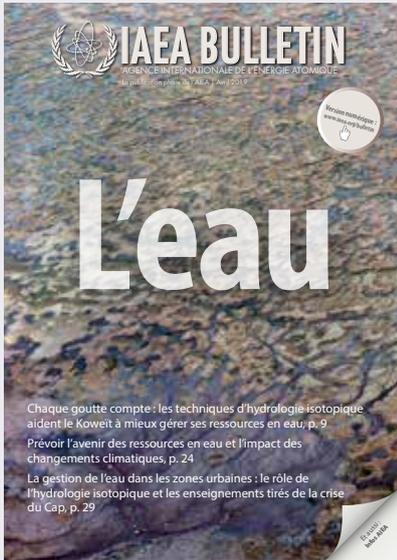
L'eau

Chaque goutte compte : les techniques d'hydrologie isotopique aident le Koweït à mieux gérer ses ressources en eau, p. 9

Prévoir l'avenir des ressources en eau et l'impact des changements climatiques, p. 24

La gestion de l'eau dans les zones urbaines : le rôle de l'hydrologie isotopique et les enseignements tirés de la crise du Cap, p. 29

Et aussi :
Infos AIEA



Le Bulletin de l'IAEA

est produit par

le Bureau de l'information

et de la communication (OPIC)

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne

B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Téléphone : (+43 1) 2600-0

iaebulletin@iaea.org

Direction de la rédaction : Laura Gil

Rédaction : Miklos Gaspar

Collaboratrice à la rédaction : Nicole Jawerth

Conception et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'IAEA est disponible à l'adresse
suivante :

www.iaea.org/bulletin

Des extraits des articles du Bulletin peuvent être utilisés librement à condition que la source soit mentionnée. Lorsqu'il est indiqué que l'auteur n'est pas fonctionnaire de l'IAEA, l'autorisation de reproduction, sauf à des fins de recension, doit être sollicitée auprès de l'auteur ou de l'organisation d'origine.

Les opinions exprimées dans le Bulletin ne représentent pas nécessairement celles de l'Agence internationale de l'énergie atomique, et l'IAEA décline toute responsabilité à cet égard.

Photo de couverture :

Littoral à marée basse, golfe Persique, Koweït

(Photo : D. Calma/IAEA)

Suivez-nous sur :



L'Agence internationale de l'énergie atomique a pour mission de prévenir la dissémination des armes nucléaires et d'aider tous les pays – en particulier ceux du monde en développement – à tirer parti de l'utilisation pacifique, sûre et sécurisée de la science et de la technologie nucléaires.

Créée en 1957 en tant qu'organe autonome, l'IAEA est le seul organisme des Nations Unies à être spécialisé dans les technologies nucléaires. Ses laboratoires spécialisés uniques au monde aident au transfert de connaissances et de compétences à ses États Membres dans des domaines comme la santé humaine, l'alimentation, l'eau, l'industrie et l'environnement.

L'IAEA sert aussi de plateforme mondiale pour le renforcement de la sécurité nucléaire. Elle a créé la collection Sécurité nucléaire, dans laquelle sont publiées des orientations sur la sécurité nucléaire faisant l'objet d'un consensus international. Ses travaux visent en outre à réduire le risque que des matières nucléaires et d'autres matières radioactives tombent entre les mains de terroristes ou de criminels, ou que des installations nucléaires soient la cible d'actes malveillants.

Les normes de sûreté de l'IAEA définissent un système de principes fondamentaux de sûreté et sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un degré élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements ionisants. Elles ont été élaborées pour tous les types d'installations et d'activités nucléaires destinées à des fins pacifiques ainsi que pour les mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants.

En outre, l'IAEA vérifie, au moyen de son système d'inspections, que les États Membres respectent l'engagement qu'ils ont pris, au titre du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires et d'autres accords de non-prolifération, de n'utiliser les matières et installations nucléaires qu'à des fins pacifiques.

Les tâches de l'IAEA sont multiples et font intervenir un large éventail de partenaires aux niveaux national, régional et international. Les programmes et les budgets de l'IAEA sont établis sur la base des décisions de ses organes directeurs – le Conseil des gouverneurs, qui compte 35 membres, et la Conférence générale, qui réunit tous les États Membres.

L'IAEA a son siège au Centre international de Vienne. Elle a des bureaux locaux et des bureaux de liaison à Genève, à New York, à Tokyo et à Toronto. Elle exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, à Seibersdorf et à Vienne. En outre, elle apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique de Trieste (Italie).

Mieux connaître les ressources en eau de la planète

Par Yukiya Amano, Directeur général de l'AIEA

L'eau est une ressource précieuse indispensable à la vie sur Terre. Cependant, nous en savons très peu sur les volumes disponibles, leur localisation précise et le moment où ces ressources s'épuiseront. Quatre-vingt-dix-huit pour cent de l'eau douce de la planète est souterraine. Pour protéger cette ressource contre les menaces, comme la surexploitation et la pollution, et la gérer de manière durable en pensant aux générations futures, il est nécessaire d'étudier les eaux souterraines de façon approfondie.

L'AIEA aide des experts nationaux dans cette tâche en favorisant l'utilisation des techniques isotopiques et le transfert de savoir-faire en matière scientifique. Les données collectées à l'aide des techniques isotopiques contribuent à améliorer les politiques relatives à la gestion de l'eau.

Aider les États Membres à gérer et à protéger leurs ressources en eau fait partie de notre mission, qui est de mettre l'atome au service de la paix et du développement. Nous encourageons les pays à tirer pleinement parti des techniques nucléaires pour améliorer tous les aspects de la vie de leurs populations et protéger l'environnement. La préservation des ressources en eau est essentielle à ces fins.

Le présent numéro du Bulletin de l'AIEA est consacré à l'utilisation des techniques nucléaires dans le domaine de l'hydrologie isotopique et aux travaux menés par l'AIEA pour mettre ces techniques à la disposition des États Membres. L'hydrologie isotopique y est expliquée dans les grandes lignes (lire en page 4) et des exemples de pays dont les efforts, conjugués à ceux de l'AIEA, donnent des résultats notables y sont présentés. L'article de la page 6, par exemple, explique que des spécialistes de l'hydrologie isotopique argentins recueillent des données qui permettront aux décideurs de concevoir des modèles de gestion de l'eau améliorés dans tout le pays.

Des autorités du Koweït présentent des projets visant à rendre l'utilisation de l'eau plus durable avec l'aide de l'AIEA (lire en page 9), tandis qu'aux Philippines, des chercheurs expliquent comment ils ont pu s'assurer que des eaux souterraines du nord du pays étaient propres à la consommation (lire en page 12). L'article en page 14

vous apprendra comment il a été possible de déterminer l'origine de la pollution de l'eau à Maurice, et l'article en page 16 renseigne sur l'existence de riches masses d'eau souterraines dans la région semi-aride du Sahel.



Ce numéro du Bulletin de l'AIEA comporte également une section consacrée à la technologie, dans laquelle sont décrites des méthodes d'hydrologie isotopique mises au point par l'AIEA à l'intention des États Membres. Il s'agit, par exemple, de la méthode de datation basée sur la mesure du tritium/de l'hélium 3 (lire en page 20), utilisée pour déterminer avec précision l'âge d'eaux jeunes, et de la modélisation du bilan hydrique reposant sur l'étude des isotopes (lire en page 24), qui aide les scientifiques à prédire les effets du changement climatique sur les ressources en eau.

Vous pourrez en apprendre plus sur le rôle de l'hydrologie isotopique dans la protection de l'environnement lors de la fracturation hydraulique (lire en page 22), et découvrir comment l'AIEA teste la capacité de laboratoires du monde entier à analyser l'eau (lire en page 26). En outre, est présenté le réseau mondial de surveillance des isotopes mis au point par l'AIEA en coopération avec l'Organisation météorologique mondiale (lire en page 18).

Le Colloque international sur l'hydrologie isotopique qui s'est tenu cette année était la 15^e manifestation de ce type. Il a rassemblé des professionnels de l'eau et de l'environnement du monde entier pour leur permettre de mieux comprendre les énormes avantages que confère l'hydrologie isotopique en matière de réponse à l'évolution rapide de l'environnement mondial.

J'espère que ce numéro du Bulletin de l'AIEA vous permettra de découvrir ces applications multiples et fascinantes de la technologie nucléaire.



(Photo : L. Potterton/AIEA)



(Photo : Escuela Superior Politécnica del Litoral/EPSOL, Équateur)



(Photo : L. Gil/AIEA)

Avant-propos

1 Mieux connaître les ressources en eau de la planète

4 Hydrologie isotopique : présentation générale

Résultats sur le terrain



6 L'Argentine utilise les techniques isotopiques pour gérer ses ressources en eau



9 Chaque goutte compte : les techniques d'hydrologie isotopique aident le Koweït à mieux gérer ses ressources en eau



12 Une étude révèle que l'eau est potable dans une ville des Philippines



14 Maurice : utilisation des isotopes pour déterminer l'origine de la pollution de l'eau dans les zones urbaines



16 Les techniques isotopiques servent à cartographier et à analyser les ressources en eaux souterraines au Sahel

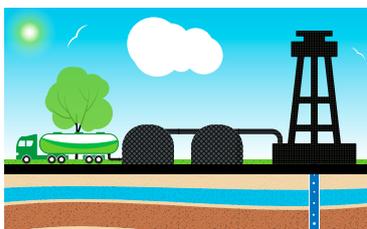
Technologie



18 Le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations



20 Gérer le bilan hydrique à l'aide de la technique de datation au tritium/hélium 3



22 Hydrofracturation : l'hydrologie isotopique peut contribuer à l'évaluation environnementale aux fins de la protection des eaux souterraines



24 Prévoir l'avenir des ressources en eau et l'impact des changements climatiques



26 Être à la hauteur
L'AIEA évalue la qualité des analyses de l'eau des laboratoires

Dans le monde

29 La gestion de l'eau dans les zones urbaines : le rôle de l'hydrologie isotopique et les enseignements tirés de la crise du Cap

— Par Jodie Miller

31 Cartographie isotopique de la pollution et de la réalimentation des eaux souterraines

— Par Joel Podgorski, Michael Berg et Rolf Kipfer

Infos AIEA

33 Garanties : un nouvel appareil aide l'AIEA à vérifier le combustible nucléaire usé

33 Le choix et l'évaluation du site d'une centrale nucléaire, principaux thèmes d'un atelier de l'AIEA en Ouzbékistan

34 Comment les techniques nucléaires aident à nourrir la population chinoise

Hydrologie isotopique : présentation générale

Par Lucía Ortega et Laura Gil



Les techniques isotopiques permettent aux scientifiques de bien comprendre les différents éléments du cycle hydrologique, ce qui les aide à mieux évaluer la quantité, la qualité et la durabilité de l'eau.

Les eaux souterraines sont l'élément le moins compris du cycle hydrologique. Les scientifiques utilisent des isotopes naturels comme traceurs pour déterminer si ces eaux sont réalimentées, d'où elles proviennent, comment elles se déplacent et si elles sont vulnérables à la pollution et aux changements des conditions climatiques.

Les eaux de différents endroits ont une signature isotopique différente. Les scientifiques utilisent cette « empreinte » pour retracer le parcours de l'eau tout au long du cycle hydrologique, de l'évaporation au retour dans les océans ou dans l'atmosphère en passant par la précipitation, l'infiltration, le ruissellement et l'évapotranspiration.

Mais qu'est-ce qu'un isotope ?

Un élément chimique, comme l'hydrogène, se compose d'un seul type d'atome. Il existe plusieurs variétés d'un même atome, les isotopes, qui possèdent les mêmes propriétés chimiques et le même nombre de protons et d'électrons mais pas le même nombre de neutrons. Les différents isotopes n'ont donc pas le même poids, ce qui est la clé des études hydrologiques.

L'hydrologie isotopique se fonde à la fois sur les isotopes stables et les isotopes instables. Les isotopes stables ne sont pas

radioactifs : ils n'émettent pas de rayonnements. Les isotopes instables (ou radio-isotopes), en revanche, subissent une décroissance radioactive et sont donc radioactifs.

On trouvera ci-après une explication succincte du fonctionnement de l'hydrologie isotopique.

Origine et transport de l'eau dans le cycle hydrologique

Chaque molécule d'eau (H_2O) se compose de deux atomes d'hydrogène (H) et un atome d'oxygène (O). Ces atomes ne sont pas tous les mêmes : certains isotopes sont plus légers, d'autres plus lourds. Les scientifiques utilisent du matériel d'analyse précis pour mesurer ces infimes différences de poids dans des échantillons d'eau. Pourquoi ?

Lorsque l'eau de mer s'évapore, les molécules aux isotopes les plus légers sont généralement les premières à s'élever, formant des nuages aux signatures isotopiques spécifiques. Ces nuages sont un mélange de molécules d'eau qui retombent sous la forme de gouttes de pluie. Les molécules aux isotopes les plus lourds tombent les premières. À mesure que les nuages se déplacent vers l'intérieur des terres, les isotopes plus légers tombent en plus grande proportion.

L'eau de pluie alimente les lacs, les rivières et les aquifères. En y mesurant la proportion d'isotopes lourds et d'isotopes légers, les scientifiques peuvent déterminer l'origine et le parcours de l'eau.

Âge des eaux souterraines

Les isotopes sont l'outil qui permet d'estimer le plus directement et le plus efficacement l'âge, la vulnérabilité et la durabilité des ressources en eau. Si les eaux souterraines d'un aquifère sont « vieilles », cela signifie que le débit est faible et qu'il peut falloir longtemps pour que l'aquifère se recharge. À l'inverse, les eaux souterraines jeunes sont facilement et rapidement réalimentées par l'eau de pluie mais peuvent aussi être facilement touchées par la pollution et les changements des conditions climatiques. En connaissant l'âge de l'eau, les scientifiques et les gouvernements ont une bonne idée de la rapidité avec laquelle les aquifères se rechargent.

Les hydrologues utilisent des isotopes radioactifs naturellement présents dans l'eau, comme le tritium (3H), le carbone 14 (^{14}C) et les radio-isotopes de gaz rares, pour estimer l'âge des eaux souterraines, qui peut aller de quelques mois à un million d'années.



Comme ces isotopes se désintègrent au fil du temps, ils sont de moins en moins abondants au fil des ans. Une forte concentration indique que les eaux sont « jeunes » et une faible concentration que les eaux sont « vieilles ». Ainsi, des eaux souterraines contenant du tritium en quantité détectable peuvent avoir jusqu'à 60 ans alors que des eaux souterraines sans trace de tritium sont nécessairement plus vieilles. Le tritium permet d'évaluer l'âge des eaux souterraines récemment réalimentées, c.-à-d. de moins de 60 ans, mais le carbone 14 permet de remonter à 40 000 ans et le krypton 81 jusqu'à un million d'années (voir page 21).

Qualité de l'eau

Les polluants présents dans les eaux de surface et les eaux souterraines proviennent de différentes sources (agriculture, industrie, déchets générés par l'homme) ou de processus géochimiques qui se produisent naturellement dans les aquifères.

L'agriculture, l'industrie et les ménages ne produisent pas les mêmes types de polluants. En analysant la composition chimique et isotopique d'un polluant, les scientifiques peuvent déterminer son origine.

Par exemple l'ion nitrate (NO_3^-), constitué d'azote et d'oxygène, est un polluant courant. L'azote a deux isotopes stables de poids différents. Le rapport de poids entre ces isotopes n'est

pas le même dans les déchets générés par l'homme et dans les engrais. L'azote des engrais provient de l'air, tandis que l'azote généré par les humains et les animaux subit un processus biologique qui lui donne différentes formes. La source des polluants peut donc être déterminée à l'aide des différences de poids entre isotopes.

Connaître l'origine des polluants est le premier pas vers la résolution des problèmes de qualité de l'eau. Les données issues de l'hydrologie isotopique aident les décideurs à planifier et gérer stratégiquement les ressources en eaux.

L'AIEA aide les scientifiques du monde entier en promouvant l'utilisation des techniques isotopiques et le transfert de connaissances scientifiques aux spécialistes de l'eau au niveau local. Pour en savoir plus, poursuivez votre lecture.

L'Argentine utilise les techniques isotopiques pour gérer ses ressources en eau

Par Laura Gil

En Argentine comme dans de nombreuses autres parties du monde, l'eau est menacée par la surexploitation et la contamination. Pour la protéger, les scientifiques l'analysent jusque dans ses plus infimes détails à l'aide de la technologie nucléaire et avec l'appui de l'AIEA.

« L'Argentine a la chance d'avoir une grande quantité d'eau par habitant mais celle-ci est très inégalement répartie dans le pays », constate Daniel Cicerone, responsable en gestion de l'environnement à la Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA) d'Argentine. « Dans certaines régions, savoir si l'eau utilisée au quotidien se réalimente régulièrement,

s'épuise ou risque d'être contaminée suffit à faire la différence entre pauvreté et prospérité. »

Ces informations peuvent être obtenues grâce à l'hydrologie isotopique, une discipline scientifique qui, selon Douglas Kip Salomon, professeur de géologie et de géophysique à l'Université de l'Utah (États-Unis), « est l'un des outils les plus efficaces et les plus fiables dont nous disposons pour étudier en profondeur les eaux souterraines ».

« La plupart des réserves d'eau douce utilisable dans le monde sont souterraines mais nous avons principalement accès aux eaux de surface », explique le professeur, qui aide actuellement des experts argentins à cartographier leurs ressources en eau avec l'appui de l'AIEA. « Il est fondamental de comprendre



« L'Argentine a la chance d'avoir une grande quantité d'eau par habitant mais celle-ci est très inégalement répartie dans le pays. Dans certaines régions, savoir si l'eau utilisée au quotidien se réalimente régulièrement, s'épuise, ou risque d'être contaminée suffit à faire la différence entre pauvreté et prospérité. »

— Daniel Cicerone, responsable en gestion de l'environnement à la Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA) d'Argentine

les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines pour pouvoir gérer adéquatement ces ressources et les protéger ».

Des réserves cachées

Depuis le début de 2016, des spécialistes argentins de l'hydrologie isotopique recueillent et interprètent des données provenant de deux régions stratégiques avec l'aide de l'AIEA. L'idée est que les décideurs se fondent sur ces informations pour améliorer les modèles de gestion de l'eau (ou modèles hydrologiques) dans ces régions, choisies pour des raisons différentes. Dans la première, la vallée aride de Mendoza (ouest de l'Argentine), la population dépend des eaux souterraines douces des aquifères d'Uspallata et de Yaguaraz et

d'autres aquifères plus petits. Les autorités veulent savoir si ces ressources sont exploitées de manière durable et si les capacités des aquifères permettent d'accroître la consommation d'eau.

« L'eau est indispensable, c'est la source même de la vie », souligne Sergio Cirauqui, employé d'un magasin de canoë-kayak et de rafting situé au sommet d'une montagne près d'Uspallata. « Mais nous savons très bien que l'eau est une ressource limitée, qu'il faut protéger et utiliser avec parcimonie, presque comme si elle était sacrée ».

Des spécialistes argentins de l'hydrologie isotopique et des experts internationaux et de l'AIEA sillonnent depuis plus d'un an les montagnes et les plaines de la province de Mendoza pour prélever des échantillons d'eau dans des puits, des lacs et des

La région argentine de Mendoza, où des scientifiques utilisent l'hydrologie isotopique pour étudier les eaux souterraines.

(Photo : L. Gil/AIEA)





Des spécialistes de l'hydrologie isotopique prélèvent des échantillons d'eau à Mendoza, dans l'ouest de l'Argentine.

(Photo : L. Gil/AIEA)

rivières. Dans les laboratoires, ils interprètent les résultats afin d'avoir une idée plus précise des ressources disponibles.

« Nous cherchons à savoir exactement comment l'eau des aquifères se déplace, comment elle interagit avec celle des rivières et combien il en reste », explique Sandra Ibañez, spécialiste de l'hydrologie isotopique à l'Université de Cuyo, à Mendoza, qui participe à un projet de coopération technique de l'AIEA dans le pays.

Ces données aident les décideurs à fixer des règles d'utilisation de l'eau pour la consommation, l'agriculture et l'industrie. Par exemple, sachant que des eaux souterraines sont infiltrées par des eaux de surface, ils peuvent édicter des règles plus strictes sur les niveaux acceptables de pollution.

« Une fois que nous aurons les résultats, nous pourrions décider quelles activités développer à Mendoza », dit Juan Andrés Pina, Directeur général adjoint de la Division des eaux souterraines au Département général de l'irrigation de Mendoza.

La deuxième région actuellement à l'étude est le lit d'un cours d'eau à Los Gigantes, une ancienne zone d'extraction d'uranium de la province de Córdoba, à 700 km environ à l'ouest de Buenos Aires. Un projet de remédiation environnementale y est en cours et les spécialistes de l'hydrologie isotopique

s'emploient à mieux connaître la qualité des eaux souterraines et les risques de contamination auxquelles elles sont exposées.

Dans le cadre du projet de l'AIEA, des scientifiques ont contrôlé la sûreté et la qualité de l'eau qui alimente le réservoir du lac de San Roque, source d'eau potable pour la population de Córdoba.

« Cette étude interdisciplinaire et interinstitutionnelle aidera les autorités à mieux conceptualiser et à mieux comprendre les caractéristiques hydrologiques de la région, et à renforcer la remédiation du site », dit Daniel Martínez, géologue et chercheur au Conseil national de recherche scientifique et technique (CONICET).

« Les projets régionaux de coopération technique ont joué un rôle essentiel dans le transfert de connaissances et de technologie aux institutions locales et nationales », souligne Raúl Ramírez García, chef de section au Département de la coopération technique de l'AIEA.

« Les nouvelles informations obtenues au moyen des techniques isotopiques faciliteront la surveillance des ressources en eau et la prise de décisions apportant des avantages sociaux et économiques aux populations locales », ajoute-t-il.

Chaque goutte compte : les techniques d'hydrologie isotopique aident le Koweït à mieux gérer ses ressources en eau

Par Aabha Dixit

Des pays arides comme le Koweït utilisent de plus en plus souvent des techniques fondées sur les isotopes stables pour évaluer leurs ressources en eaux souterraines et les gérer durablement pour leur population croissante.

« Il n'y a ni cours d'eau ni lacs permanents au Koweït et les eaux souterraines sont notre seule source d'eau naturelle. La moyenne des précipitations atteint à peine 115 millimètres par an et nous n'avons pas de cours d'eau douce », explique Muhammad Al Rashed, Directeur exécutif

Une scientifique du KISR prépare des échantillons d'eau à l'aide d'un incubateur en vue d'analyses bactériologiques. Les techniques isotopiques jouent un rôle essentiel dans les études sur la qualité de l'eau. (Photo : D. Calma/AIEA)



« Nous devons chercher l'eau potable partout où elle se trouve et la technologie isotopique nous y aide car elle concourt à une utilisation optimale de toutes les ressources en eau nécessaires au développement durable. »

— Khaled Hadi, Directeur de la Division des opérations, Centre de recherche sur l'eau, Institut koweïtien de recherche scientifique

du Centre de recherche sur l'eau de l'Institut koweïtien de recherche scientifique (KISR). Il est donc crucial d'appliquer des politiques efficaces de gestion de l'eau pour en assurer la qualité et la quantité et faire face à la demande de la population du pays, qui dépasse les quatre millions d'habitants.

Les réserves d'eau souterraine du Koweït se trouvent surtout dans le nord du pays et leur réalimentation est limitée, les aquifères ne recevant qu'une petite partie de l'eau de pluie.

Les techniques d'hydrologie isotopique sont l'une des principales méthodes scientifiques utilisées par les experts koweïtiens pour suivre les déplacements de l'eau douce et évaluer l'âge des eaux souterraines. Les divers isotopes que contient l'eau servent de « balises » permettant de déterminer la source, l'âge, les mouvements et les interactions des eaux de surface et souterraines (voir page 4 pour en savoir plus). Les données obtenues et visualisées sous la forme de cartes hydrologiques permettent aux experts de s'appuyer sur des éléments factuels pour prendre des décisions aux fins de la gestion durable des ressources. M. Al-Rashed et ses collègues ont réalisé plusieurs études d'hydrologie isotopique aux fins de la gestion des eaux souterraines du Koweït.

La consommation d'eau au Koweït est parmi les plus élevées au monde, avec plus de 400 litres par jour et par personne. La quantité prélevée des eaux souterraines au Koweït s'élève à 255 millions de mètres cubes par an alors que, selon les estimations, les aquifères souterrains ne se réalimentent naturellement qu'au rythme de 67 millions de mètres cubes par an. Comme ses ressources en eau douce sont limitées, le Koweït a largement recours au dessalement de l'eau de mer, un processus coûteux.

« Nous devons chercher l'eau potable partout où elle se trouve et la technologie isotopique nous y aide car elle concourt à une utilisation optimale de toutes les ressources en eau nécessaires au développement durable », explique Khaled Hadi, Directeur de la Division des opérations au Centre de recherche sur l'eau du KISR.

Le pays s'emploie à étudier les ressources en eaux souterraines en utilisant l'hydrologie isotopique et des méthodes physico-chimiques, à évaluer la réalimentation par les précipitations, à définir une stratégie optimale de production d'eau et à évaluer la faisabilité de projets de recharge artificielle des aquifères, explique Nader Al-Awadi, Commissaire exécutif du KISR pour la coopération internationale.

Appui des laboratoires aux études sur l'eau

L'AIEA aide le Koweït depuis 2000 par divers projets de coopération technique qui ont permis de mieux connaître les ressources en eaux souterraines et de prendre des mesures pour améliorer la gestion de l'eau.

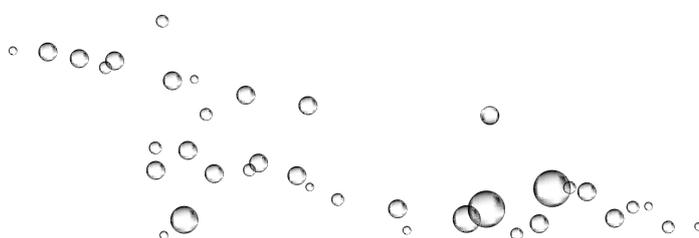
Par exemple, un projet de coopération technique appuyé par l'AIEA a consisté à collecter des données isotopiques sur les eaux souterraines du Koweït. Ces données ont ensuite été intégrées à celles d'études antérieures afin de cartographier les eaux souterraines de l'ensemble du pays. L'application des techniques isotopiques a aidé à déterminer l'origine, l'âge et les mouvements des eaux souterraines, informations essentielles pour une gestion durable des ressources en eau.

Un autre projet a consisté à étudier par la caractérisation isotopique les sources possibles de contamination au nitrate et au sulfate des nappes d'eaux souterraines du Koweït. Il s'est agi notamment d'évaluer les teneurs en matières radioactives naturelles des eaux souterraines. Les chercheurs ont constaté que la majeure partie des sulfates et nitrates que contenaient ces eaux était d'origine naturelle et non humaine.

Certains échantillons d'eau sont expédiés pour analyse au Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA à Vienne (Autriche).

L'AIEA a également appuyé la création du Laboratoire d'hydrologie isotopique du Koweït en fournissant des instruments de pointe dans le cadre de projets de coopération technique. L'aide au renforcement des capacités a également porté sur la formation de scientifiques et la réalisation de recherches sur divers aspects des eaux souterraines.

« Le Gouvernement koweïtien apprécie à sa juste valeur le rôle important que joue l'AIEA, par ses activités et son appui aux États Membres, en promouvant dans le monde entier le renforcement des capacités, la constitution de réseaux, le partage des connaissances et le développement de partenariats concernant divers aspects des utilisations pacifiques de la science et de la technologie nucléaires », dit Samira A. S. Omar, Directrice générale du KISR.



Une étude révèle que l'eau est potable dans une ville des Philippines

Par Miklos Gaspar



Les techniques isotopiques ont permis de confirmer que l'eau de la ville contenue dans les citernes se trouvant derrière ces garçons, et dans les nouveaux quartiers de Tacloban, est potable.

(Photo : M. Gaspar/AIEA)

L'eau de boisson de Tacloban, une ville philippine de 250 000 habitants, est potable, réalimentée régulièrement et non menacée par l'eau de mer. Cela vous semble simple ? Ce n'est pourtant qu'après des années de recherches et l'analyse de milliers d'échantillons d'eau, qui a nécessité l'utilisation de techniques isotopiques, que les chercheurs de l'Institut philippin de recherche nucléaire (PNRI), avec le soutien de l'AIEA et de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), sont arrivés à cette conclusion.

En 2013, lorsque la tempête causée par le typhon Haiyan, l'un des plus puissants cyclones de l'histoire, avait détruit une grande partie de la ville et fait des milliers de morts, les autorités locales avaient été confrontées à la lourde tâche de reconstruction, et avaient dû notamment éloigner la population des zones inondables. Mais les réserves d'eau de la ville avaient-elles été touchées par les vagues qui avaient balayé bâtiments et personnes ?

La tempête avait pu contaminer l'aquifère – couche souterraine de roches perméables – constituant la principale source d'eau de la ville. Cela représentait un réel danger, car le sel et d'autres contaminants comme la matière organique de cadavres d'animaux et d'êtres humains auraient pu rendre l'eau impropre à la consommation. Le PNRI a donc fait appel au programme de coopération technique de l'AIEA pour obtenir de l'aide dans l'utilisation de techniques isotopiques afin de caractériser l'aquifère.

Toutes les molécules d'eau ne naissent pas égales

Toutes les molécules d'eau sont composées d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, mais un petit pourcentage de ces atomes ont des neutrons supplémentaires dans leur noyau. Ce pourcentage dépend de l'âge et de la source de l'eau. Par conséquent, l'analyse isotopique de la composition des eaux souterraines permet aux chercheurs de voir si l'aquifère est réalimenté, c'est-à-dire s'il reçoit régulièrement de la « nouvelle » eau de pluie.

Les chercheurs ont installé 32 stations de contrôle des eaux souterraines et utilisent des techniques classiques et nucléaires pour caractériser l'eau. Ils n'y ont trouvé qu'une faible quantité de sodium et de chlorure, preuve que l'eau de mer n'a pas contaminé l'aquifère. Leurs recherches montrent également que la composition isotopique de l'eau de l'aquifère est proche de celle de l'eau de pluie de nos jours, ce qui signifie que l'approvisionnement en eau de la ville ne risque pas de disparaître, explique Raymond Sugang, chercheur principal du PNRI à la tête du projet. Il ajoute : « Tacloban est une ville en expansion avec une économie croissante. Il est donc rassurant de savoir que ses eaux souterraines sont alimentées par la pluie. »

La concentration d'azote et de matière organique dans l'eau était très faible, ce qui indique qu'il n'y a eu aucune contamination biologique. D'après Raymond Sugang, ces contaminants potentiels se sont sans doute décomposés avant d'atteindre les eaux souterraines.

La prochaine étape du projet pour le PNRI consistera à déterminer le taux exact de recharge de l'eau et à recommander aux autorités locales certaines politiques de protection de l'approvisionnement en eau. « C'est bien de savoir qu'il n'y a pas de danger immédiat, déclare Raymond Sugang, mais une politique d'utilisation durable de l'eau n'en demeure pas moins nécessaire. »



Chercher de l'eau potable sous terre

Au cours des dernières années, un nouveau quartier a émergé dans le nord de Tacloban, hébergeant de nombreuses personnes dont les maisons avaient été dévastées par le typhon de 2013. La disponibilité de l'eau est un problème dans cette zone de 10 000 personnes, et le PNRI a montré que les eaux souterraines se trouvant sous cette nouvelle zone habitée sont contaminées par du plomb et de l'arsenic, et donc impropres à la consommation humaine. D'après Raymond Sugang, cette contamination est sans doute causée par la décharge non réglementée qui borde la zone.

Pour Eddie Rasonabe, résident et responsable de la communauté locale, ces nouvelles ont été dévastatrices.

« Maintenant nous savons que nous ne pouvons plus compter sur les puits, et que nous devons payer l'eau pour l'instant. » Les pompes à main construites initialement grâce à l'assistance d'organismes d'aide internationale n'atteignent qu'un aquifère peu profond, et l'odeur de l'eau qui en provient est infecte, déplore Eddie Rasonabe. Il faut par conséquent acheter de l'eau minérale pour boire et cuisiner, ce qui est une dépense considérable pour ce père de sept enfants et un grand nombre de ses voisins. Mais les autorités locales ont une solution en vue : faire venir l'eau potable de l'aquifère non contaminé de la ville en contractant des accords avec des sociétés privées. De son côté, le PNRI s'assure, au moyen des isotopes, que le pompage d'eaux souterraines de ces puits de production profonds est conforme aux exigences qualitatives et que le taux de prélèvement est viable.

Eddie Rasonabe ne peut pas boire l'eau de son puits en raison de sa teneur élevée en plomb et en arsenic, révélée par une étude du PNRI. Le quartier a été construit pour loger les résidents dont les maisons avaient été détruites par le typhon Haiyan en 2013.

(Photo : M. Gaspar/AIEA)



Maurice : utilisation des isotopes pour déterminer l'origine de la pollution de l'eau dans les zones urbaines

Par Luciana Viegas

D'après les premières conclusions d'une étude faisant appel aux techniques isotopiques, menée avec l'appui de l'AIEA, les activités agricoles, les rejets illégaux d'eaux usées et l'élevage seraient comptés parmi les sources de la pollution à l'azote touchant les cours d'eau urbains de la région de Port-Louis, capitale de Maurice. Certains composés azotés, comme les nitrates, peuvent contaminer les cours d'eau urbains et, en concentrations excessives, représenter un danger pour la population et l'environnement.

« La pollution au nitrate est une préoccupation majeure dans le pays », affirme Yannick Fanny, responsable scientifique au Laboratoire national de l'environnement de Port-Louis, ville et centre économique les plus importants de l'île, avec ses quelque 200 000 habitants. « L'étude menée constitue un grand pas en avant : les premiers résultats montrent que la contamination au nitrate est très probablement due au fumier et aux déchets septiques, ainsi qu'à des matières organiques dissoutes dans le sol. »

L'azote, engrais essentiel, est largement utilisé depuis le milieu du XX^e siècle. Lorsqu'il est épandu de manière excessive, il peut contaminer les cours d'eau et les eaux souterraines en raison du ruissellement agricole, mais il peut aussi provenir de réseaux d'assainissement, de terrains d'élevage ou d'activités industrielles.

Le nitrate, composé azoté, constitue un nutriment essentiel pour les plantes. En quantités excessives, il peut poser un problème de santé publique, car il altère la capacité de transport de l'oxygène par le sang. Il peut également être à l'origine d'efflorescences algales dans les lacs et les cours d'eau, phénomène qui réduit la biodiversité et la capacité des écosystèmes aquatiques à répondre aux besoins de secteurs importants, comme le tourisme ou la pêche commerciale.

En 2016, des scientifiques ont commencé à collaborer avec l'AIEA en vue d'utiliser les techniques isotopiques pour déterminer l'origine de la pollution au nitrate, les autorités ayant détecté une contamination autour de Port-Louis. Les contaminants trouvés dans les ruisseaux et autres cours d'eau menacent des zones protégées, telles que la réserve ornithologique de l'estuaire de Rivulet Terre Rouge. À plusieurs reprises, des efflorescences algales toxiques se sont produites dans l'océan et ont causé la mort de nombreux poissons, au grand désarroi des pêcheurs locaux.

Cette pollution peut avoir diverses origines : des systèmes d'évacuation des eaux usées inappropriés, des fosses septiques défectueuses, les rejets industriels, l'élevage ou les activités agricoles. Lorsque l'origine de la pollution au nitrate est connue, les pouvoirs publics sont mieux à même de prendre les mesures adéquates pour protéger les cours d'eau et les eaux souterraines.

Cependant, il peut être difficile de déterminer l'origine des nitrates présents dans les cours d'eau. « La chimie classique permet de déterminer le niveau de pollution à l'azote d'un cours d'eau, mais pas l'origine de cette pollution », explique Ioannis Matiatos, spécialiste de l'hydrologie isotopique à l'AIEA. « L'analyse des isotopes du nitrate permet d'obtenir ce type d'informations. »

Grâce à une assistance technique, des scientifiques du Laboratoire national de l'environnement ont collecté des données chimiques et isotopiques dans 14 stations d'observation de cours d'eau et 15 puits de forage situés autour de la ville, ce qui leur a permis de mettre au jour des mécanismes qui influent sur la qualité de l'eau dans cette zone. Bénéficiant de visites d'experts, d'une formation et de la fourniture de matériel dans le cadre du programme de coopération technique de l'AIEA, ils ont échantillonné et analysé les composés azotés présents dans les cours d'eau de Port-Louis. La méthode employée consistait notamment à analyser l'« empreinte » spécifique du nitrate présent dans les molécules d'eau en étudiant la composition isotopique de celles-ci (voir la page 5 pour plus d'informations).

Passer à l'action

Les résultats du projet de coopération technique de l'AIEA serviront de base à l'élaboration d'un rapport complet contenant des constatations et des recommandations destinées aux responsables gouvernementaux, ainsi qu'aux collectivités locales. « Des programmes de mesures ciblées, mis en œuvre par l'ensemble des parties concernées, peuvent contribuer à résoudre ou à améliorer rapidement la situation dans de tels contextes urbains », explique Yannick Fanny.

Cette coopération amorce également le développement des activités de contrôle de l'eau dans tout le pays. Les scientifiques du Laboratoire national de l'environnement ont commencé à cartographier les zones d'où provient la majeure partie de l'azote qui pollue les cours d'eau et à prélever des échantillons de matière source en vue d'établir une liste des signatures isotopiques aux fins de l'identification des polluants.



Une spécialiste de l'hydrologie isotopique prélève des échantillons d'eau sur un site pollué à la périphérie de Port-Louis.

[Photo: J. Matiatos (AIEA)]

« Dans l'avenir, en cas d'incident, les autorités pourront mettre rapidement en correspondance les échantillons d'eau et les sources de pollution, ce qui leur permettra de déterminer

immédiatement le type d'activité probablement à l'origine de la pollution », indique Ioannis Matiatos.

Les techniques isotopiques servent à cartographier et à analyser les ressources en eaux souterraines au Sahel

Par Nathalie Mikhailova

Malgré une série de sécheresses et des précipitations invariablement faibles au cours des dernières décennies, le sous-sol du Sahel recèle d'importantes quantités d'eau.

Avec l'augmentation des besoins due à la croissance démographique et les incertitudes que les changements climatiques et l'exploitation des terres font peser sur les ressources en eau, comment garantir un approvisionnement sûr en eau salubre pour la consommation, la production vivrière et l'hygiène ? Dans une région semi-aride telle que le Sahel, des outils scientifiques permettant d'en savoir plus sur les ressources en eaux souterraines peuvent déterminer l'accès à une eau salubre à long terme.

Dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA débuté en 2012, des scientifiques d'Algérie, du Bénin, du Burkina Faso, du Cameroun, du Ghana, du Mali, de Mauritanie, du Niger, du Nigeria, de République centrafricaine, du Sénégal, du Tchad et du Togo ont appris à prélever des échantillons d'eau aux fins d'analyses isotopiques pour réaliser une étude approfondie des ressources en eaux souterraines. Le projet portait sur des parties de cinq grands systèmes aquifères transfrontières de la région : le système aquifère d'Iullemeden, le système de Liptako-Gourma-Haute-Volta, le bassin sénégalo-mauritanien, le bassin du lac Tchad et le bassin de Taoudéni.

Plus de 2 000 échantillons d'eau ont été prélevés de différents aquifères sur une période de quatre ans, pendant les saisons sèches et humides.

« À l'aide de traceurs isotopiques et chimiques, les scientifiques ont pu recueillir d'importantes informations sur l'origine, les modes d'écoulement, le temps de séjour et le taux de renouvellement des eaux souterraines », explique Kamel Zouari, Professeur et Chef de laboratoire à l'École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), qui a travaillé sur le projet. « Ils ont également pu établir les interactions hydrauliques entre les aquifères profonds et peu profonds, ainsi qu'entre les aquifères et les eaux de surface. Ces informations ont été compilées dans une base de données spéciale pour chaque bassin. » Pour en savoir plus sur les techniques utilisées, voir page 4.

Ces activités de recherche ont abouti à la création de la première description générale des ressources en eaux souterraines du Sahel, portant sur une superficie de cinq millions de kilomètres carrés. « Dans l'ensemble, les systèmes aquifères des différents bassins partagés constituent

une importante réserve d'eau de bonne qualité suffisant à la plupart des besoins humains », explique M. Zouari.

Utiliser les données pour élaborer des pratiques de gestion de l'eau

Les scientifiques de chaque pays ont établi des rapports nationaux que les autorités compétentes peuvent aujourd'hui utiliser pour prendre des décisions concernant l'eau. Dans le nord du Ghana, par exemple, des contrôles réguliers de la composition chimique et isotopique des eaux souterraines ont mis au jour des mécanismes de réalimentation et des sources de contamination inconnus auparavant.

« En étudiant les isotopes stables (oxygène 18 et hydrogène 2) des eaux souterraines, nous avons découvert qu'elles étaient d'origine météorique, ce qui veut dire qu'elles proviennent de précipitations locales », explique Enoch Asare, Chef de la Division des eaux souterraines à la Commission des ressources en eau du Ghana. De même, des analyses du tritium ont montré que l'aquifère avait été rechargé par des eaux souterraines au cours des 50 dernières années. « On a utilisé l'azote 15 pour déterminer les sources de contamination au nitrate dans certaines parties du bassin de la Volta Blanche. Il s'est avéré que la contamination provenait principalement de déchets d'origine humaine et animale. » L'identification des sources de contamination peut aider les autorités à protéger l'eau car elle révèle comment les eaux souterraines se rechargent, ce qui est essentiel pour leur durabilité.

La quantité, la qualité et la vitesse de réalimentation des eaux souterraines déterminent s'il y en a suffisamment pour les besoins de la population. Il faut des informations sur la source et l'âge des eaux souterraines pour pouvoir bien évaluer la durabilité des ressources, en particulier si des activités de prélèvement sont en cours ou prévues.

« Les activités de ce projet devraient aider les parties prenantes à mieux comprendre le système hydrogéologique du Ghana et donc à mettre en place des politiques qui permettront d'exploiter les eaux souterraines de manière à en assurer la durabilité », explique M. Asare.

Un projet de suivi a été lancé en 2018 pour intégrer davantage la gestion des ressources en eau souterraines dans les pays du Sahel. Mené par le Bénin, le Cameroun, le Ghana, le Niger et le Nigeria suivant la méthodologie du Projet de l'AIEA pour l'accroissement de la disponibilité en eau (IWAVE), il visera à relever les lacunes des



informations hydrologiques nationales et à élaborer des plans de renforcement des capacités adéquats.

La méthodologie IWAVE prévoit l'analyse des lacunes et la consultation des parties prenantes, l'élaboration d'une stratégie optimale de gestion des eaux souterraines et le recensement des capacités techniques essentielles dans lesquelles il faut investir.

Le réseau d'institutions nationales en place contribuera à l'amélioration de la caractérisation, de la gestion et de la surveillance des ressources en eaux souterraines à l'aide des techniques d'hydrologie isotopique et de techniques conventionnelles.

Des chercheurs de l'Université de Bangui prélèvent des échantillons d'eau dans un puits en République centrafricaine.

(Photo: L. Gil/AIEA)





Le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations

Depuis 1961, l'AIEA et l'Organisation météorologique mondiale (OMM) surveillent ensemble les isotopes de l'hydrogène (^2H , ^3H) et de l'oxygène (^{18}O) dans les précipitations à travers le monde.

Le réseau de surveillance des isotopes, ou « Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations (GNIP) », avait pour objectif initial de recueillir systématiquement, à l'échelle mondiale, des données de base sur les concentrations d'isotopes dans les précipitations, afin de mesurer les variations spatio-temporelles des isotopes de l'environnement dans les précipitations. Ces informations ont permis aux scientifiques de connaître l'origine, les mouvements et l'historique de l'eau. Pour appuyer ces travaux, l'AIEA a mis en place le Laboratoire d'hydrologie isotopique.

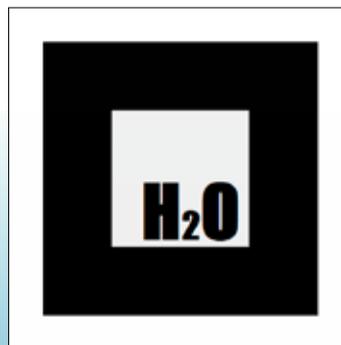
Des données isotopiques de base sont ainsi devenues accessibles pour les études hydrologiques. Elles peuvent être consultées en ligne par des chercheurs et des praticiens du monde entier depuis les années 1990. Ces données permettent aujourd'hui d'étudier les ressources en eau, mais aussi d'interpréter les archives climatiques et les migrations animales.

Le GNIP se compose actuellement de plus de 350 sites d'échantillonnage actifs dans plus de 90 pays et territoires. Si le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA conserve un rôle essentiel dans l'analyse des échantillons de précipitations recueillis par le GNIP, plus de 60 autres laboratoires, dont plusieurs ont été établis dans le cadre de projets de coopération technique de l'AIEA, participent à ce défi.

L'AIEA gère la base de données centrale du GNIP, qui contient plus de 130 000 relevés isotopiques de précipitations provenant de plus d'un millier de sites. En outre, l'Agence s'engage activement dans la recherche et le développement afin d'aider les scientifiques à recueillir des échantillons de précipitations. Elle a notamment mis au point un appareil d'échantillonnage des précipitations résistant à l'évaporation. Fiable et facile à utiliser, il permet également de réduire le prétraitement en laboratoire.

Les données historiques et actuelles de la base de données du GNIP permettent notamment de valider et d'améliorer les modèles de prévision climatique (voir page 24).

Pour en savoir plus, rendez-vous sur : h2o.iaea.org



Le GNIP

en chiffres

Plus de 60
laboratoires
d'analyse

Plus de 90 États Membres

Plus de 350 sites actifs du GNIP

Plus de 1 100 sites de surveillance

Plus de 130 000
relevés isotopiques
mensuels

Gérer le bilan hydrique à l'aide de la technique de datation au tritium/hélium 3

Par Nicole Jawerth

Gérer l'eau, c'est un peu comme gérer l'argent d'un compte en banque : il faut savoir exactement combien on va recevoir, combien on peut prélever et ce qui pourrait faire changer la situation. Une erreur de calcul peut avoir de graves conséquences, peut-être même à long terme. Dans le cas de l'eau, il peut s'agir de pénuries, de contamination ou de ressources inutilisables.

Pour dresser un bilan hydrique fiable, il importe notamment de connaître exactement l'âge de l'eau. Dans le cas des eaux jeunes, plus susceptibles d'être affectées par les conditions climatiques et la pollution actuelles, on utilise la technique de datation au tritium/hélium 3. Des scientifiques de 23 pays utilisent cette technique et d'autres pour collecter avec l'AIEA des données sur les ressources en eau.

« L'âge de l'eau nous indique son lieu d'origine le plus probable, la vitesse à laquelle elle se réalimente et dans quelle mesure elle risque d'être contaminée, Hamid Marah, Directeur scientifique du Centre national de l'énergie, des sciences et des techniques nucléaires du Maroc (CNESTEN). Grâce à la datation au tritium/hélium 3, on peut dire si les eaux ont 1, 5 ou 25 ans, et pas seulement si elles sont jeunes, vieilles ou un mélange des deux ».

L'âge de l'eau peut aller de quelques mois à plusieurs millions d'années. Si l'eau n'a qu'un an, par exemple, cela signifie que sa réalimentation prend un an et qu'elle est beaucoup

plus susceptible d'être affectée par les conditions climatiques et la pollution actuelles. En revanche, si elle a 50 000 ans, il lui faut 50 000 ans pour être réalimentée et elle risque moins d'être contaminée ou touchée par les conditions climatiques actuelles.

Presque toutes les réserves d'eau douce de la planète se trouvent dans les aquifères, des couches poreuses de roche perméable situées sous terre. On les appelle « eaux souterraines ». Lorsqu'elles sont suffisamment rechargées, ou réalimentées, elles s'écoulent dans les mers ou à la surface de la terre sous la forme de rivières, de sources et de lacs.

« La demande croissante d'eaux souterraines, associée aux effets de l'agriculture, des changements climatiques et de l'activité humaine, donne encore plus d'importance à la durabilité, dit M. Marah. Si on puise trop d'eau d'un aquifère, le niveau descend, ce qui peut avoir des conséquences catastrophiques sur plusieurs générations, et pas seulement 10 ou 20 ans ».

La datation au tritium/hélium 3 est une des techniques les plus couramment utilisées pour étudier les eaux jeunes, c.-à-d. les de moins de 60 ans (voir l'encadré « En savoir plus »). Les données issues de ces études peuvent aider les décideurs à définir des stratégies et des politiques de gestion des ressources en eau plus ciblées et plus durables.

« L'utilisation des techniques nucléaires pour étudier les ressources en eau bouscule les habitudes et modifie l'idée que nous nous faisons des principaux éléments qui déterminent les processus hydrologiques, dit Ricardo Sánchez-Murillo, spécialiste de l'hydrologie isotopique et maître de conférences à l'Université nationale du Costa Rica. Au Costa Rica, par exemple, on commence à tenir compte des résultats des études isotopiques dans les plans de gestion de l'eau et la prise de décisions en la matière, ce qui aidera le pays à réaliser l'objectif de développement durable n° 6 concernant l'eau à l'horizon 2030 ».

Un bilan plus exact

La datation au tritium/hélium 3 a pris de l'importance ces dix dernières années car les méthodes précédentes fondées uniquement sur le tritium sont de moins en moins utiles.

« Le tritium nous renseigne sur l'âge des eaux souterraines et nous indique si ces eaux se réalimentent ou pas, ce qui est très important, mais il ne donne pas à lui seul le degré de précision nécessaire. Les décideurs doivent en savoir plus : qu'est-ce que de l'eau jeune ? Que signifie l'âge de l'eau ? », dit M. Marah. À cause des tests atmosphériques des engins thermonucléaires dans les années 1950, la concentration de tritium dans l'atmosphère a fortement augmenté dans les années 1960 puis diminué progressivement.

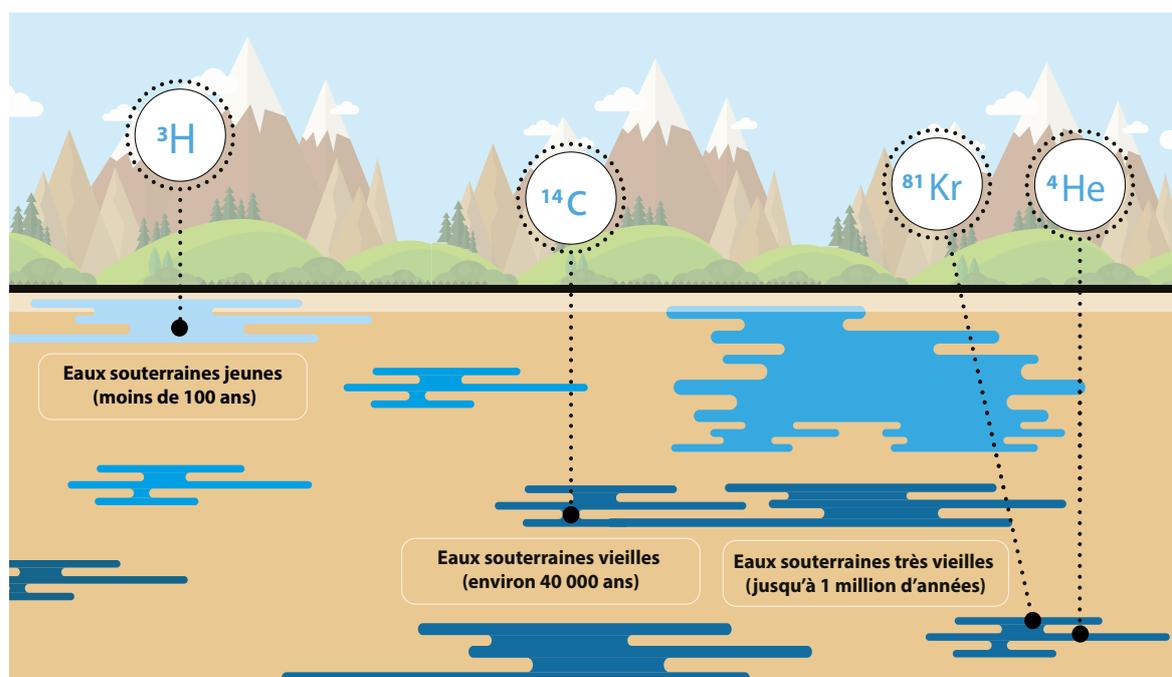


Des scientifiques utilisent des techniques isotopiques pour déterminer l'âge et l'origine de l'eau dans les sources du nord du Maroc.

(Photo : CNESTEN)

Les isotopes radioactifs naturellement présents dans l'eau, comme le tritium (^3H) et le carbone 14 (^{14}C), et les isotopes de gaz rares dissous dans l'eau, comme le krypton 81 (^{81}Kr), peuvent être utilisés pour estimer l'âge des eaux souterraines.

(Image : OIEA)



« Le tritium était un bon traceur entre les années 1960 et les années 1990 mais il est moins présent dans l'atmosphère aujourd'hui car il se désintègre en hélium 3. Aujourd'hui, on s'intéresse donc plutôt au ratio tritium/hélium 3, qui est nettement plus précis. »

L'hélium est un gaz inerte, ce qui signifie qu'il est stable et ne réagit pas chimiquement avec les autres éléments présents dans l'eau ou la roche. Il est donc un point de référence fiable et uniforme. En connaissant la proportion d'hélium du tritium/hélium 3 par rapport à la quantité totale d'hélium dans l'eau, ainsi que la concentration d'autres gaz rares, les scientifiques peuvent déterminer l'âge exact des eaux jeunes.

« Les gaz rares sont de plus en plus utilisés dans les études hydrologiques car les outils d'analyse sont devenus suffisamment perfectionnés pour en détecter des concentrations infimes, explique Takuya Matsumoto, spécialiste de l'analyse isotopique à l'AIEA. De nombreux pays ne peuvent toutefois pas se permettre de fonder leurs

propres laboratoires pour réaliser de telles analyses. Le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA leur offre ce service afin qu'ils puissent tirer parti de cette technique de pointe. »

Le Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA est un des rares laboratoires au monde capable d'effectuer ce type d'analyse. Pendant six ans, à compter de 2010, des experts de l'AIEA et des experts extérieurs de dix pays différents se sont employés à installer, à calibrer et à tester le spectromètre de masse de l'AIEA et à mettre au point le modèle mathématique pour l'analyse des résultats. Ils ont aussi établi des orientations concernant l'utilisation de la technique de datation au tritium/hélium 3. Depuis lors, de 300 à 400 échantillons de pays du monde entier sont analysés chaque année par le laboratoire, qui fonctionne 24 heures sur 24.

EN SAVOIR PLUS

Le tritium est l'un des trois isotopes de l'hydrogène. Comme il est radioactif, il se désintègre sur une période donnée et se transforme en hélium 3, un isotope stable, qui ne se désintègre pas. On sait qu'il faut environ 12 ans pour que la moitié des atomes de tritium présents dans l'eau se désintègrent en hélium 3.

Les scientifiques utilisent un appareil spécial, appelé spectromètre de masse, pour trier les isotopes en fonction de leur poids et déterminer leurs concentrations. Connaissant ces concentrations et la durée qu'il faut au tritium pour se transformer en hélium 3, ils peuvent retracer le parcours de l'eau, déterminer son âge et calculer la fréquence à laquelle elle se réalimente.



Hydrofracturation : l'hydrologie isotopique peut contribuer à l'évaluation environnementale aux fins de la protection des eaux souterraines

Par Miklos Gaspar

Toute activité industrielle menée à proximité d'une réserve d'eau peut, en principe, causer une contamination. Grâce à l'hydrologie isotopique, on dispose d'un ensemble incomparable de méthodes permettant de contrôler la qualité de l'eau et, le cas échéant, de déterminer la source de la contamination. L'hydrologie isotopique est de plus en plus utilisée pour protéger les eaux de surface et les eaux souterraines à proximité des sites où la technique de l'hydrofracturation est employée pour l'extraction du pétrole.

La fracturation hydraulique, ou hydrofracturation, a permis d'accéder à des réserves de pétrole et de gaz naturel jusque-là hors d'atteinte à des fins de production. Elle est à l'origine de près de la moitié de la production totale de pétrole aux États-Unis, et de nombreux pays en développement envisagent de commencer à l'utiliser.

Cette technique de stimulation des puits consiste à fracturer la roche en y injectant un fluide à haute pression constitué d'eau, de sable et d'autres additifs chimiques. Le fluide, injecté à travers un puits, provoque dans les formations rocheuses profondes des fissures par lesquelles le gaz naturel et le pétrole peuvent s'écouler plus librement. Ce procédé permet d'atteindre les réserves de pétrole et de gaz qui sont piégées en formations serrées et auxquelles les méthodes de forage et de pompage traditionnelles ne permettent pas d'accéder.

Les eaux de surface peuvent être contaminées si le fluide fuit lors de la fracturation ou s'écoule accidentellement depuis la fosse dans laquelle il est récupéré après l'extraction ; les eaux souterraines peuvent être contaminées si le fluide s'échappe, par exemple par des puits abandonnés ou fuyants ; et l'eau potable peut également être contaminée si du gaz naturel fuit dans des aquifères peu profonds.

Jennifer McIntosh, professeur d'hydrologie et de sciences atmosphériques à l'Université d'Arizona (États-Unis), explique qu'il est souvent difficile d'identifier la source et l'étendue de la contamination dans les cas de contamination présumée en raison d'un manque de données de référence. « Les scientifiques pourraient définir des orientations concernant les meilleures méthodes d'analyse à employer pour évaluer les émissions fugitives de gaz et de fluide de fracturation et la contamination des eaux souterraines », dit-elle.

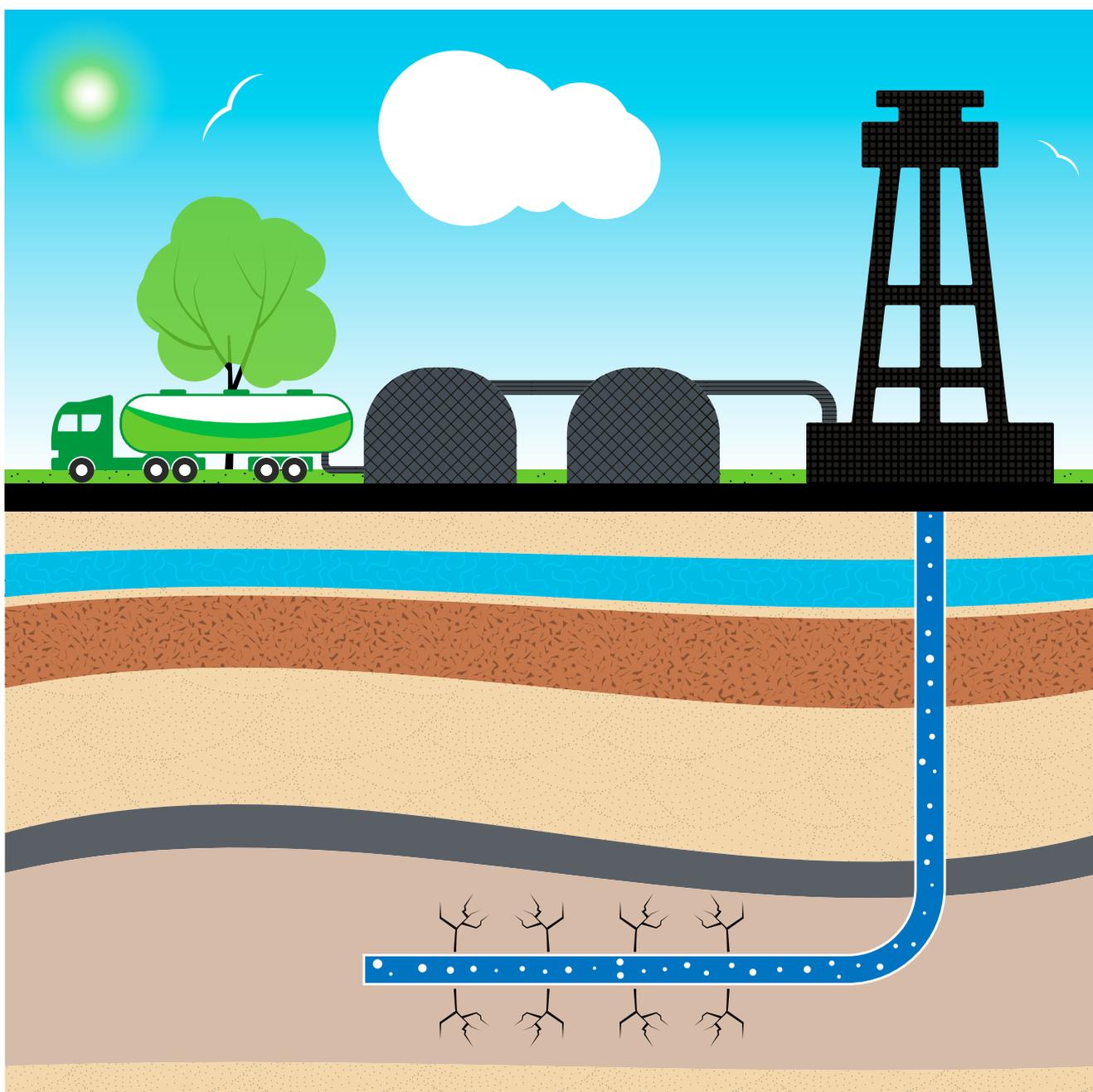
En quoi l'hydrologie isotopique peut-elle être utile ?

Dans un article récemment publié, Jennifer McIntosh et 14 consorts d'universités de premier plan du monde entier expliquent comment diverses techniques d'hydrologie isotopique peuvent être utilisées pour surveiller l'impact de l'hydrofracturation sur les eaux souterraines et les eaux de surface. Ils formulent également des recommandations concernant la méthode à appliquer selon les circonstances et les conditions environnementales. Les idées à l'origine de l'étude, intitulée « A Critical Review of State-of-the-Art and Emerging Approaches to Identify Fracking-Derived Gases and Associated Contaminants in Aquifers » (Examen critique des techniques de pointe et des techniques émergentes permettant d'identifier les gaz et les contaminants associés présents dans les aquifères comme suite à l'hydrofracturation) et publiée dans la revue scientifique *Environmental Science and Technology* en décembre 2018, ont été formulées lors d'une réunion technique de l'AIEA tenue deux ans auparavant.

Les nouvelles méthodes d'analyse faisant appel aux traceurs isotopiques naturels des hydrocarbures, à des ensembles de données à haute résolution relatives aux gaz naturels, et aux fluides associés présents entre la surface de la terre et les réservoirs cibles, et la combinaison de la géochimie des gaz rares et de la microbiologie avec des approches hydrogéologiques et géochimiques plus classiques, constituent des outils d'analyse puissants aux fins de l'identification de la source des fluides contaminés.

Certaines substances, comme des matières radioactives ou le sel, peuvent être présentes naturellement dans les eaux souterraines ou résulter de la pollution. L'hydrologie isotopique peut être utilisée pour faire la différence entre ces deux provenances. Le profil isotopique d'une source varie en fonction de son origine : en mesurant les concentrations des éléments mineurs, des isotopes stables de l'eau et des composants dissous ainsi que des isotopes radiogéniques de l'iode, du radon et du strontium, on obtient des informations sur l'origine de l'eau et de ses composants dissous. Ces données, associées à une analyse chimique classique des ions, permettent de savoir d'où provient l'eau et si les substances qu'elle contient résultent de l'hydrofracturation ou d'une autre activité humaine ou sont naturellement présentes dans l'environnement.

« Idéalement, une étude de la composition isotopique des eaux souterraines et des eaux de surface dans la zone concernée devrait être effectuée avant l'hydrofracturation, de façon à déterminer les caractéristiques de ces eaux avant le forage. Toute suspicion de pollution due à l'hydrofracturation pourrait



La fracturation hydraulique, ou hydrofracturation, est une technique de stimulation des puits consistant à injecter un fluide à haute pression dans la roche pour la fracturer et accéder aux réserves de pétrole et de gaz. Les hydrologues isotopiques peuvent contrôler la qualité de l'eau et déterminer la source des contaminants, le cas échéant.

ainsi être confirmée ou infirmée grâce à la comparaison des résultats d'une analyse isotopique à cet état de référence », explique Jennifer McIntosh.

Une nouvelle méthode isotopique complexe faisant appel aux « isotopes lourds agglomérés » du méthane permet aux scientifiques de déterminer comment les isotopes d'hydrogène sont positionnés par rapport à l'atome de carbone dans une molécule de méthane, ce qui les aide à repérer de quels gisements pourraient provenir les gaz isolés dont la présence est suspectée et à établir si le méthane examiné est issu de sources thermogéniques profondes ou s'il a été produit naturellement dans les aquifères par les bactéries du sol, voire les deux. « Les nouveaux radiotraceurs utilisés pour déterminer l'âge des eaux souterraines, comme le krypton 81 et les isotopes de l'argon, peuvent aider

à déterminer combien de temps les contaminants associés à l'hydrofracturation et à la production de pétrole et de gaz peuvent rester dans les aquifères d'eau potable », poursuit Jennifer McIntosh.

Dans la dernière partie de l'étude, les auteurs formulent des orientations concernant la mise en œuvre d'un programme d'identification des polluants par étapes. Ils exposent également un plan d'action stratégique destiné à permettre aux responsables de la réglementation de sélectionner la technique d'hydrologie isotopique la plus adaptée en fonction du site.

Jennifer McIntosh ajoute que certaines des méthodes mises au point pour détecter la pollution due à l'hydrofracturation peuvent être appliquées dans d'autres domaines, comme le stockage souterrain du dioxyde de carbone et le stockage définitif des déchets nucléaires.

Prévoir l'avenir des ressources en eau et l'impact des changements climatiques

Par Nicole Jawerth

Comment les changements climatiques influenceront-ils les réserves d'eau dans cent ans ? Pour répondre à ce type de question, les hydrologues ont recours à des modèles scientifiques. Le modèle de bilan hydrique de l'AIEA reposant sur les isotopes, par exemple, aide les experts à prédire de manière exacte et fiable l'impact que les changements climatiques auront sur les ressources en eau à très long terme. Les informations recueillies par les experts permettent aux décideurs d'élaborer des politiques d'utilisation durable de l'eau pour les générations futures.

Les modèles s'appuient sur les données disponibles et permettent d'étudier et de comprendre des idées, des objets et des processus qui sont difficiles à observer directement. Ils servent notamment à établir des prévisions, concernant par exemple les conditions météorologiques de la semaine à venir ou le taux de chômage des cinq prochaines années. Si les modèles présentent une version simplifiée et généralisée du monde réel, chaque aspect est calibré de façon à rendre une image fidèle de la réalité.

Les modèles de bilan hydrique décrivent le cycle de l'eau : précipitations, évapotranspiration, écoulement et évolution des réserves d'eau. Contrairement à de nombreux modèles traditionnels, le modèle de l'AIEA est ajusté et sa précision vérifiée au moyen d'isotopes, chacun se comportant de manière distincte mais constante (voir page 4). Au moyen d'un modèle de bilan hydrique correctement ajusté et vérifié, les scientifiques peuvent estimer avec justesse ce que l'avenir nous réserve, notamment l'impact que les changements climatiques auront sur les ressources en eau dans cent ans, voire à plus longue échéance.

Des prévisions précises à long terme

D'après Dessie Nedaw Habtemariam, professeur associé de l'Université d'Addis-Abeba (Éthiopie), la précision est primordiale dans les études hydrologiques à long terme, quel que soit le pays ou le climat auquel elles se rapportent, car une mauvaise estimation des réserves d'eau futures peut avoir des conséquences néfastes.

« Si nous surévaluons la vitesse de recharge des réserves d'eau, par exemple, et que nous transmettons les résultats de cette évaluation aux décideurs, ceux-ci pourraient adopter des politiques susceptibles d'aboutir à une situation où les eaux souterraines seraient prélevées plus vite qu'elles se ne rechargent », explique-t-il. Les eaux souterraines – c'est à dire

les eaux contenues dans la couche de roche perméable située sous la surface terrestre – sont une des principales sources d'eau potable pour la majorité de la population éthiopienne. « Il s'ensuivrait une forte diminution des réserves d'eau souterraine disponibles, ce qui pourrait provoquer l'abandon de puits, voire des pénuries d'eau potable. »

À l'inverse, une sous-évaluation pourrait conduire à l'adoption de politiques plus strictes que nécessaire en matière d'eau ou influencer les décisions relatives au développement, notamment freiner l'expansion urbaine en raison du manque de ressources en eau.

Tricia Stadnyk, professeur associée en ingénierie hydraulique à l'Université du Manitoba (Canada), explique que, pour les études sur 100 ans ou plus, il a été très difficile d'obtenir des résultats précis avec les modèles de bilan hydrique ne reposant pas sur les isotopes. « De nombreux modèles proposent une très bonne simulation du débit des sources, des rivières et des autres masses d'eau mais sont très mauvais pour évaluer l'évapotranspiration, dit-elle, faisant référence au processus par lequel l'eau s'évapore depuis la surface de la terre et est transférée à l'atmosphère par la transpiration des végétaux. C'est extrêmement problématique pour les prévisions des changements climatiques, qui reposent fortement sur les données de l'évapotranspiration. »

Au fur et à mesure que les températures tendent vers des extrêmes sous l'effet des changements climatiques, le taux d'évapotranspiration augmente. Plus l'évapotranspiration est élevée, moins il y a d'eau à la surface de la terre, et inversement. Cela influence l'ensemble du cycle hydrologique annuel et peut conduire à des extrêmes imprévisibles : trop peu d'eau, synonyme de sécheresse, ou trop d'eau, d'inondation.

Aucun climat n'est à l'abri de ces changements. Tant le Canada, où plus de 60 % de la masse terrestre est composée d'une forme de pergélisol - sol gelé - et où l'on dénombre quatre saisons distinctes, que l'Éthiopie, où la plupart du territoire connaît un climat tropical et où la température reste plus ou moins constante tout au long de l'année, peuvent être touchés.

Le modèle peut être ajusté de manière à tenir compte de ces conditions diverses, ce qui le rend universel. Les scientifiques de plusieurs pays collaborent avec l'AIEA pour apprendre à utiliser le modèle de bilan hydrique reposant sur les isotopes et d'autres modèles en vue d'améliorer



la gestion des ressources en eau et pour recevoir un appui en la matière. En Éthiopie, par exemple, un projet de coopération technique de trois ans concernant l'étude du bassin supérieur de l'Awash - un vaste réservoir d'eau souterraine assurant l'approvisionnement en eau potable de plus de 2,6 millions de personnes - est en cours de lancement. D'autres pays, comme le Canada, établissent ou ont établi des réseaux d'échantillonnage des isotopes en vue d'obtenir des résultats plus précis avec des modèles comme celui de l'AIEA.

Le modèle de bilan hydrique de l'AIEA reposant sur les isotopes aide les experts à prédire de manière exacte et fiable l'impact que les changements climatiques auront sur les ressources en eau à très long terme.

(Photo : L. Toro/AIEA)

Le modèle de bilan hydrique de l'AIEA reposant sur les isotopes

Les scientifiques ont recours au modèle de bilan hydrique de l'AIEA reposant sur les isotopes pour simuler et estimer l'impact à long terme des changements climatiques sur la circulation et la disponibilité de l'eau tout au long du cycle hydrologique - de l'air à la surface de la terre, puis dans le sol, et ainsi de suite. Le modèle est réajusté et son processus de validation amélioré tous les mois sur la base du bilan de masse isotopique de chaque composant du bilan hydrique.

Mis en service en 2015, le logiciel *open source* du modèle est convivial et comprend des outils de prétraitement, de modélisation et d'analyse destinés à faciliter l'intégration des données et la visualisation et l'analyse des résultats. Il est compatible avec divers ensembles de données locaux et mondiaux relatifs, notamment, au climat, à la végétation, aux précipitations, à l'écoulement de l'eau, à la topographie et au sol. Les informations isotopiques utilisées pour ajuster le modèle et valider ses résultats proviennent généralement de données recueillies au niveau local et de bases de données mondiales, comme le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations de l'AIEA (GNIP, voir page 18) et le Réseau mondial de mesure des isotopes dans les cours d'eau (GNIR).





Être à la hauteur

L'AIEA évalue la qualité des analyses de l'eau des laboratoires

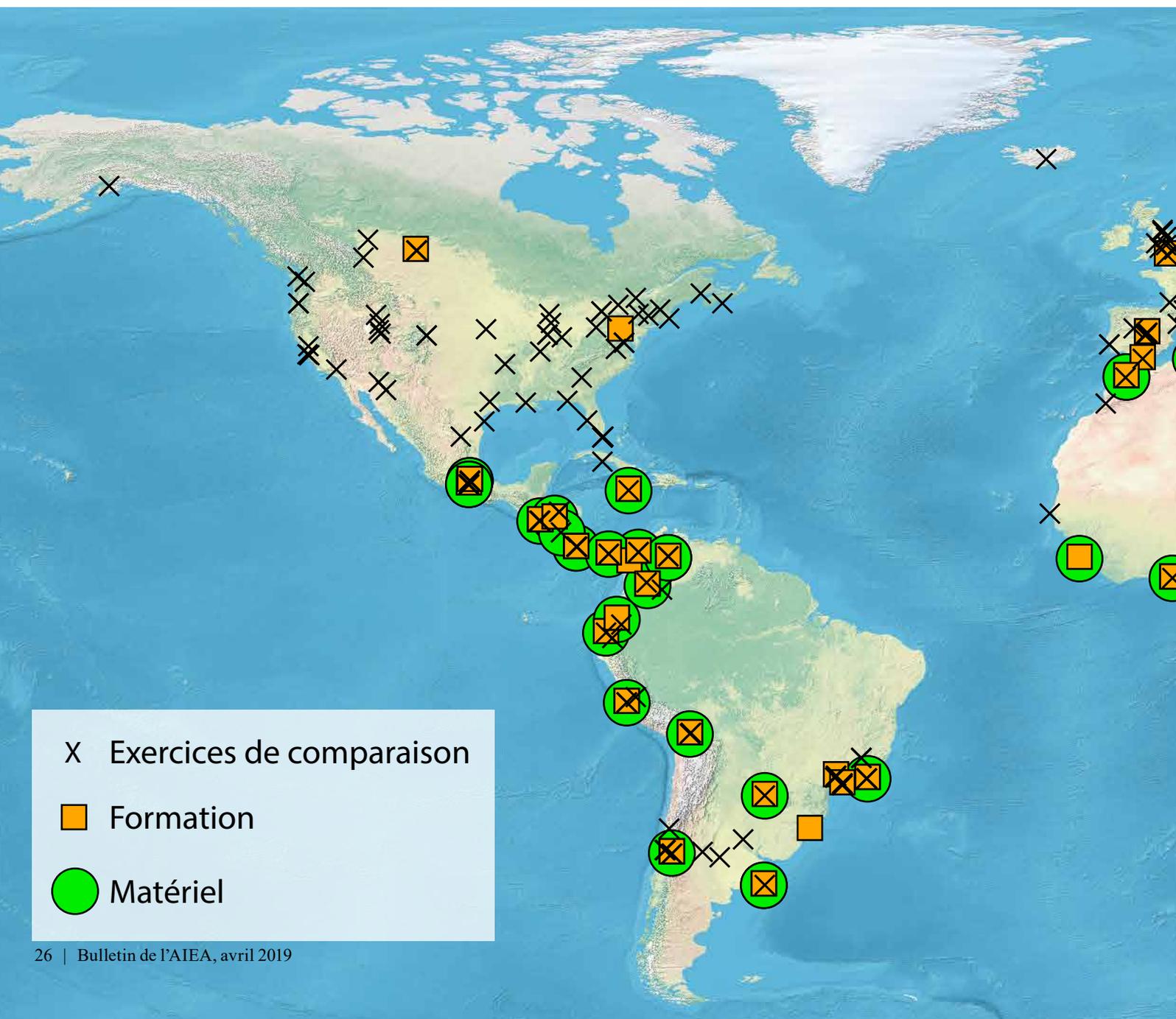
Par Laura Gil

Votre analyse chimique de l'eau est-elle excellente, bonne, moyenne ou insuffisante ? Les scientifiques peuvent le déterminer par comparaison. Depuis 30 ans, l'AIEA effectue des comparaisons interlaboratoires concernant l'hydrologie isotopique entre des centaines de laboratoires et des tests de compétence en la matière à l'échelle mondiale.

« La qualité des mesures est essentielle dans toutes les disciplines scientifiques, dit Luis González Hita, technicien en hydrologie à l'Institut mexicain de technologie hydrique. L'hydrologie isotopique n'échappe pas à la règle. Des données

certifiées exactes et fiables nous donnent une base solide pour convaincre les responsables politiques. »

Les hydrologues isotopiques étudient les ressources en eau à l'aide de données isotopiques. Les informations issues de leurs travaux sont cruciales pour l'élaboration de stratégies et de politiques de protection de l'eau. Tous les quatre ans environ, plus de 300 laboratoires d'hydrologie isotopique participent à la comparaison interlaboratoires organisée par l'AIEA à l'échelle mondiale pour tester leur compétence.



La comparaison des résultats avec les échantillons de l'AIEA, provenant d'un large éventail d'eaux du monde entier, aide le personnel de chaque laboratoire à déceler les lacunes de leurs analyses à y remédier et à garantir l'exactitude et la précision des données qu'ils produisent.

Il est encore plus pertinent d'effectuer régulièrement des comparaisons de nos jours : avec l'évolution rapide de la technologie, les méthodes et les instruments d'hydrologie isotopique deviennent moins onéreux et plus accessibles. Ces avantages accroissent cependant le risque d'erreur car les personnes qui débutent dans ce domaine ont souvent une formation moins poussée.

« De nos jours, surtout avec les méthodes au laser, la technologie fait une grande partie du travail, dit

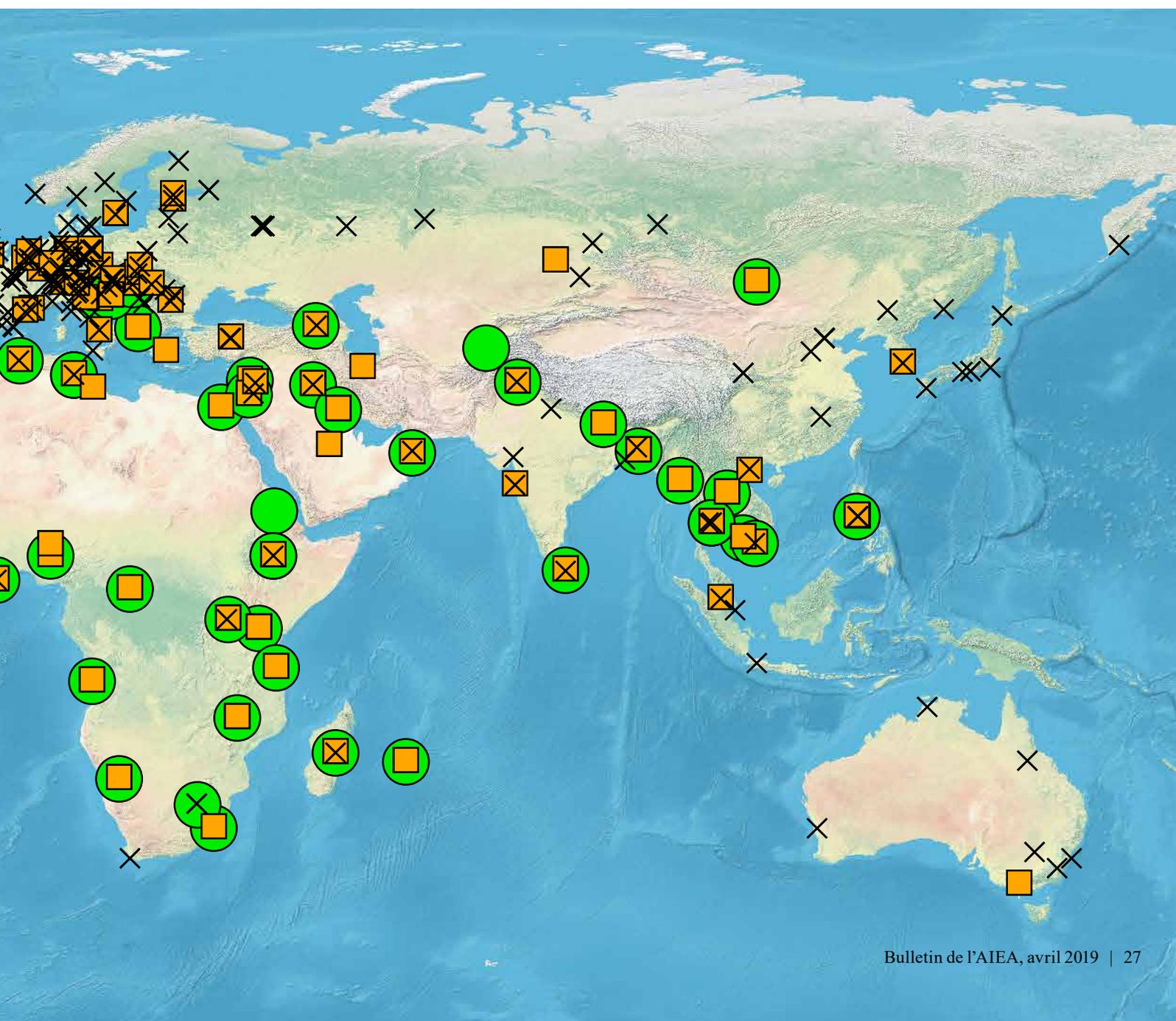
M. González Hita. Pour effectuer les évaluations, les scientifiques s'appuient donc davantage sur les méthodes et moins sur les compétences ».

Viser l'excellence

Il existe deux grands projets de comparaison interlaboratoires. L'un est la comparaison interlaboratoires des isotopes de l'eau (WICO), qui consiste à tester la capacité des laboratoires de mesurer les concentrations de deutérium (^2H) et d'oxygène 18 (^{18}O) dans des échantillons d'eau. Une connaissance précise de ces concentrations permet aux scientifiques de déterminer l'âge et l'origine des eaux (voir page 4).

Carte des villes qui ont participé à des comparaisons interlaboratoires (WICO & TRIC) depuis 2016, des lieux où l'AIEA a formé des experts en hydrologie isotopique depuis 2007 et de ceux où elle a fait don d'instruments laser isotopiques depuis 2007 dans le cadre de son programme de coopération technique.

(Source : AIEA)



L'autre est l'intercomparaison internationale de la teneur en tritium (TRIC), qui porte sur la capacité des laboratoires de mesurer la concentration du tritium (^3H), radio-isotope naturel, dans l'eau. Cet exercice permet de vérifier la précision et l'exactitude de ces mesures, qui servent à déterminer la vitesse de renouvellement des eaux et à étudier les eaux de moins de 60 ans (voir page 4). La dernière intercomparaison de ce type a été réalisée en 2018, avec une participation record de 90 laboratoires.

« Le déroulement des comparaisons interlaboratoires est simple, explique Leonard Wassenaar, Chef du Laboratoire d'hydrologie isotopique de l'AIEA basé à Vienne (Autriche). Nous préparons et vérifions soigneusement des échantillons d'eau avant de les envoyer aux différents laboratoires. Ceux-ci les analysent et nous envoient leurs résultats, que nous comparons avec les valeurs de référence de l'AIEA. Pour finir, nous compilons les résultats anonymement dans un rapport général destiné à la communauté scientifique et en parallèle nous envoyons à chaque laboratoire un rapport individuel détaillé dans lequel nous formulons des suggestions d'amélioration et des recommandations. »

Les rapports que l'AIEA établit au terme de chaque exercice contiennent des recommandations fondées sur l'observation qui aideront les laboratoires à perfectionner leurs méthodes et à améliorer leur performance. Ils aident également les experts de l'AIEA à déceler les lacunes et à cibler l'assistance qu'ils apportent, notamment en formant le personnel de laboratoire dans le cadre du programme de coopération technique de l'AIEA.

La vigilance à l'épreuve

La dernière intercomparaison WICO, réalisée en 2016 avec la participation de 235 laboratoires, est la plus grande comparaison interlaboratoires concernant des isotopes stables jamais organisée à l'échelle mondiale. Ses résultats ont paru dans la revue scientifique *Rapid Communications in Mass Spectrometry* en novembre 2017.

Lors de cet exercice, Leonard Wassenaar et son équipe ont introduit une nouveauté.

« Nous avons ajouté du méthanol à l'un des échantillons d'eau pour tester la vigilance des laboratoires face à des contaminants interférents - sans les prévenir, bien sûr, explique-t-il. Comme de nombreux laboratoires ne l'ont pas décelé, nous avons conçu quelques stratégies pour les aider à détecter la présence dans l'eau de contaminants interférents qui pourraient fausser les résultats. »

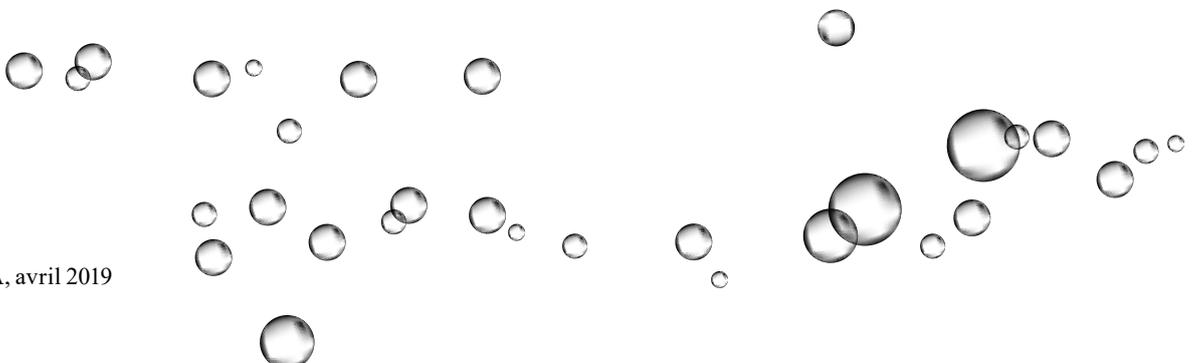
La plupart des laboratoires participant à l'intercomparaison WICO de 2016 ont obtenu des résultats acceptables à excellents pour l'analyse des isotopes de l'oxygène et près de la moitié d'entre eux pour l'analyse du deutérium. En revanche, 5 à 6 % ont obtenu des résultats insuffisants, qui, selon Leonard Wassenaar, pourraient être dus à l'augmentation rapide du nombre d'instruments dans les laboratoires, notamment de lasers bon marché, surtout dans les laboratoires les moins expérimentés.

« Nous avons conclu que ces mauvais résultats tenaient probablement à des "inconnues connues" non quantifiables, dit Léonard Wassenaar. Des erreurs dans les feuilles de calcul Excel ou un instrument dont l'état laisse à désirer peuvent expliquer pourquoi des laboratoires obtiennent de mauvais résultats alors qu'ils semblent tout faire correctement. De telles erreurs, humaines ou non, sont courantes mais pas toujours évidentes du point de vue des laboratoires. »

Il peut s'agir d'erreurs liées aux connaissances ou aux compétences, comme l'expérience de l'opérateur, d'erreurs de traitement des données de base, du non-respect du protocole de mesure, de l'altération d'échantillons ou du dysfonctionnement des instruments d'analyse.

Selon des études récentes parues dans la revue *Accreditation and Quality Assurance*, les erreurs humaines pourraient compter pour beaucoup dans la qualité insuffisante des analyses géochimiques. Les résultats de l'enquête menée auprès des laboratoires participants à l'issue de l'intercomparaison WICO de 2016 tendent à confirmer que les erreurs humaines, techniques et instrumentales sont les principales causes d'insuffisance qualitative des analyses des isotopes de l'eau.

« La découverte d'erreurs conduit à des ajustements. Il importe de savoir quand nos résultats sont fiables et quand ils ne le sont pas », dit González Hita. Son laboratoire au Mexique a obtenu de très bons résultats au dernier test WICO. « L'exercice WICO de 2016 nous a permis de confirmer que nous réalisons des analyses de bonne qualité. Il est aussi utile que les pays voisins le sachent, car ils peuvent faire appel à nos services et nous pouvons partager nos meilleures pratiques. »



La gestion de l'eau dans les zones urbaines : le rôle de l'hydrologie isotopique et les enseignements tirés de la crise du Cap

Par Jodie Miller

La crise de l'eau qui a frappé Le Cap (Afrique du Sud) en 2017 et 2018 a été l'occasion de mesurer le rôle de l'hydrologie isotopique dans le maintien de l'intégrité des réseaux urbains d'approvisionnement en eau. L'intégrité des ressources en eau est fondamentale pour la viabilité à long terme de l'économie en Afrique australe ; pour la préserver, il est nécessaire de comprendre le lien entre climat et utilisation de ces ressources, et les incidences socioéconomiques de ce lien. Le bilan hydrique d'une région, à savoir le rapport entre arrivées et sorties d'eau, a d'importantes répercussions socioéconomiques, notamment sur la capacité d'approvisionnement des centres urbains, de réduction de la pauvreté et de protection des réserves alimentaires et énergétiques, ainsi que sur le développement des compétences scientifiques nécessaires pour étayer les stratégies locales de gestion de l'eau.

Ces dernières années, ces questions sont devenues brûlantes avec la grave sécheresse qui a sévi au Cap, ville de 3,8 millions d'habitants située à la pointe sud de l'Afrique. En raison de précipitations plus faibles que la moyenne entre 2014 et 2017, Le Cap s'est trouvé en stress hydrique extrême lors de l'été austral 2017-2018. La ville puise la majorité de ses ressources dans six réservoirs d'eaux de surface, d'une capacité totale de 828 991 millions de litres. En mars 2018, les réserves totales de ces installations sont passées en-dessous du seuil de 20 %, leur plus bas niveau jamais enregistré ; le plus grand réservoir, celui de Theewaterskloof, ne contenait plus que 13,5 % de sa capacité de 480 188 millions de litres. On a annoncé à plusieurs reprises l'imminence d'un « Day Zero », jour où la ville couperait l'approvisionnement en eau pour pouvoir maintenir ses infrastructures les plus critiques, comme les hôpitaux. Pour faire face à cette situation, les autorités ont demandé à tous les habitants de réduire leur consommation d'eau à seulement 50 litres par personne et par jour.

En fin de compte, la ville a réussi à éviter le « Day Zero », car les efforts collectifs déployés ont permis de faire durer les réserves jusqu'à l'arrivée des pluies hivernales. Cependant, la crainte d'une fermeture des réseaux municipaux d'approvisionnement a transformé les modes de consommation et la valeur accordée à l'eau par les habitants, et provoqué un vrai changement des habitudes. Dans le même temps, la question de savoir comment un grand centre urbain peut préserver sa sécurité hydrique et trouver des ressources complémentaires à court terme a soulevé d'importants problèmes scientifiques, notamment sur la façon de suivre et de mesurer les contributions relatives de nombreuses sources d'apport différentes aux réseaux d'approvisionnement. Le dessalement, le recyclage des eaux ménagères, la collecte



Jodie Miller est Professeure associée au Département des sciences de la Terre à l'Université de Stellenbosch, en Afrique du Sud. Ses travaux portent principalement sur des projets d'hydrologie isotopique au Mozambique, en Namibie et en Afrique du Sud. Vice-présidente de l'Association internationale de géochimie (IAGC) et figure de proue de

la Plateforme d'infrastructures de recherche en biogéochimie au Département sud-africain de la science et de la technologie, elle participe à un projet de recherche coordonné de l'AIEA sur l'hydrologie isotopique appliquée aux zones urbaines.

directe des eaux de pluie et le prélèvement d'eaux souterraines sont autant de manières de compléter les réserves d'eaux de surface de nombreux réseaux municipaux à diverses échelles. Cependant, elles peuvent compromettre la qualité de l'eau. À l'heure de la diversification croissante des flux entrants, la gestion de la quantité et de la qualité de l'eau demande de nouvelles approches et de nouveaux outils scientifiques pour mettre au point des stratégies fondées sur les meilleures pratiques.

L'hydrologie isotopique en zone urbaine

L'étude des isotopes stables de l'eau fait partie des outils scientifiques permettant de suivre les sources des différentes entrées du réseau municipal. L'hydrologie isotopique repose essentiellement sur l'étude et les applications des isotopes de l'hydrogène et de l'oxygène naturellement présents dans le cycle de l'eau.

Dans un contexte d'urbanisation à grande échelle et de croissance démographique, l'hydrologie isotopique s'est progressivement imposée ces dernières années comme un outil permettant de comprendre les processus à l'œuvre dans l'approvisionnement en eau des zones urbaines. Le principe fondamental de l'hydrologie isotopique appliquée aux zones urbaines consiste à relever les « empreintes », ou caractéristiques isotopiques de chaque arrivée dans le réseau hydrique urbain, afin de suivre chaque composante dans l'ensemble du système. Ces informations peuvent servir à la planification de politiques de gestion de l'eau à long et à court terme portant notamment sur la surveillance des contributions relatives, des temps de séjour au sein du réseau, ainsi que



Les précipitations moyennes depuis 2014 ont fait chuter de manière critique le niveau d'eau du barrage de Theewaterskloof, dans la province du Cap-occidental.

(Photo : A. Silva Garduno/AIEA)

des fuites et des pertes qui en résultent dans le système, et sur la gestion de la pollution ou de la contamination.

Dans la ville de Stellenbosch, qui abrite l'université du même nom et se trouve au cœur des principaux domaines viticoles du pays, on a analysé des échantillons d'eau du robinet provenant de logements privés pour déterminer les rapports isotopiques de l'oxygène 18 (^{18}O) et du deutérium (^2H). Les résultats montrent à quel point l'hydrologie isotopique urbaine parvient à mettre en évidence les fluctuations à l'œuvre dans le réseau hydrique urbain. Alors que l'eau que nous voyons sortir du robinet

a un aspect uniforme, les rapports isotopiques permettent de rendre compte des augmentations et des diminutions, ainsi que de comportements similaires ou divergents.

Essentiellement, les isotopes fournissent l'empreinte digitale de chaque segment du réseau local d'approvisionnement en eau : la source, l'usine de traitement et les informations sur sa durée de séjour dans le réseau de distribution. Aux quatre coins de la planète, les responsables de la gestion de l'eau cherchent des solutions pour approvisionner durablement des centres urbains en expansion, et l'hydrologie isotopique devient progressivement un outil essentiel de leur panoplie.

Jodie Miller prélève un échantillon d'eau dans le Cap-occidental.

(Photo : A. Silva Garduno/AIEA)



Cartographie isotopique de la pollution et de la réalimentation des eaux souterraines

Par Joel Podgorski, Michael Berg et Rolf Kipfer

La croissance démographique, la surexploitation des réserves d'eau, l'utilisation des terres et les changements climatiques font qu'il est de plus en plus difficile d'obtenir des eaux souterraines de qualité pour la consommation, l'industrie et l'agriculture. À l'échelle mondiale, la moitié de l'eau potable et 43 % de l'eau utilisée pour l'irrigation proviennent des réserves souterraines mais les aquifères situés près de la surface terrestre sont facilement contaminés par les engrais et les pesticides, les déversements de produits chimiques et les eaux usées. En outre, la surexploitation et le prélèvement incontrôlé de l'eau des aquifères peuvent entraîner une baisse rapide du niveau d'eau et provoquer ainsi une perte de ressources.

Des cartes de la vulnérabilité des aquifères peuvent aider les gestionnaires de l'eau à protéger et à préserver les eaux souterraines en leur indiquant les zones particulièrement sensibles à la contamination et à la surexploitation, éclairant ainsi les politiques de gestion de l'eau et les mesures d'assainissement. Elles sont également primordiales pour la réalisation de l'objectif de développement durable n° 6 (ODD n° 6) : garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau gérés durablement, en particulier à l'eau potable (cible 6.1), et assurer la gestion intégrée des ressources en eau (cible 6.5).

Vulnérabilité des aquifères

D'un point de vue technique, il existe plusieurs façons d'évaluer la vulnérabilité des aquifères à la pollution et à la surexploitation. Autrefois, on utilisait les caractéristiques géologiques de base, les données de forage et les informations hydrologiques régionales mais celles-ci sont souvent imprécises ou inexactes, ou même simplement absentes. Des modèles informatiques complexes ont aussi été utilisés mais ils nécessitent des données précises et pâtissent souvent de coûts élevés et du manque de données, et se limitent donc généralement à des études portant sur de petites zones.

Des indicateurs chimiques et des analyses statistiques peuvent être utilisés pour faire le lien entre les données environnementales disponibles et la vulnérabilité des eaux souterraines. C'est le cas du nitrate, polluant issu essentiellement de l'activité agricole, qui peut être mesuré facilement et à faible coût. Pour élaborer des cartes prévisionnelles fiables et précises de la vulnérabilité des eaux souterraines, il faut disposer de données sur sa présence ou sur l'indicateur de vulnérabilité dans la zone considérée.



Joel Podgorski, Michael Berg et Rolf Kipfer travaillent au Département des ressources aquatiques et de l'eau potable (W+T) de l'Institut fédéral suisse des sciences et technologies de l'eau (Eawag).

L'Eawag est un institut helvétique de recherche sur l'eau qui s'intéresse aux concepts et aux technologies permettant de gérer de manière durable les milieux aquatiques et l'eau en tant que ressource. En collaboration avec des universités, d'autres instituts de recherche, des organismes publics, le secteur industriel et des organisations non-gouvernementales, l'Eawag œuvre à harmoniser les intérêts écologiques, économiques et sociaux en matière d'utilisation de l'eau.

Cartographie en ligne

Pour démontrer l'efficacité de la cartographie statistique de la vulnérabilité des aquifères, on a analysé une nouvelle fois les données d'une carte de vulnérabilité du Canada sur la plateforme gratuite d'évaluation des eaux souterraines en ligne [Groundwater Assessment Platform (GAP), www.gapmaps.org]. Une carte prévisionnelle indiquant avec précision les probabilités de forte vulnérabilité des aquifères a ainsi pu être établie sans devoir collecter une grande quantité de données sur toute la zone étudiée.

Utilisation du tritium pour cartographier la vitesse de réalimentation des eaux

Le tritium est un radio-isotope présent naturellement en quantité infime dans l'eau de pluie à cause d'une interaction du rayonnement cosmique dans la haute atmosphère. Lors des essais nucléaires en surface effectués entre 1952 et 1962, du tritium a été libéré en grande quantité dans le cycle hydrologique, devenant de ce fait un indicateur mesurable de la vitesse de réalimentation des eaux souterraines contemporaines. Sa concentration dans l'eau de pluie a depuis lors retrouvé son niveau naturel à l'échelle mondiale mais nous pouvons encore détecter sa présence avec précision à l'aide d'outils analytiques de pointe.

Un des principaux avantages du tritium (^3H) en matière de cartographie est que, comme il est l'un des éléments de base de la molécule d'eau ($^1\text{H}^3\text{HO}$), il est présent dans l'eau de pluie. Toute quantité détectable dans d'autres éléments du cycle hydrologique (rivières, lacs, eaux souterraines) indique



qu'ils contiennent de l'eau de pluie tombée récemment et donc que l'eau examinée date de quelques dizaines d'années. On peut ainsi déterminer directement si les aquifères sont susceptibles d'être contaminés par l'eau de pluie et les cartographier, même si les eaux souterraines n'ont jamais été contaminées.

Les méthodes de cartographie statistique de la vulnérabilité des aquifères au moyen du tritium ne sont pas encore utilisées à grande échelle car le tritium n'est généralement pas pris en compte dans les études des eaux souterraines et que cette analyse reste coûteuse. D'autres indicateurs de la qualité de l'eau et d'autres paramètres isotopiques faciles à obtenir peuvent être utilisés pour cartographier la vulnérabilité. Par exemple, le carbone 14, la composition isotopique stable de l'eau (^2H , ^{18}O), le nitrate et le chlore peuvent aussi servir à évaluer l'âge des eaux souterraines ou à déterminer si elles ont été exposées à la contamination.

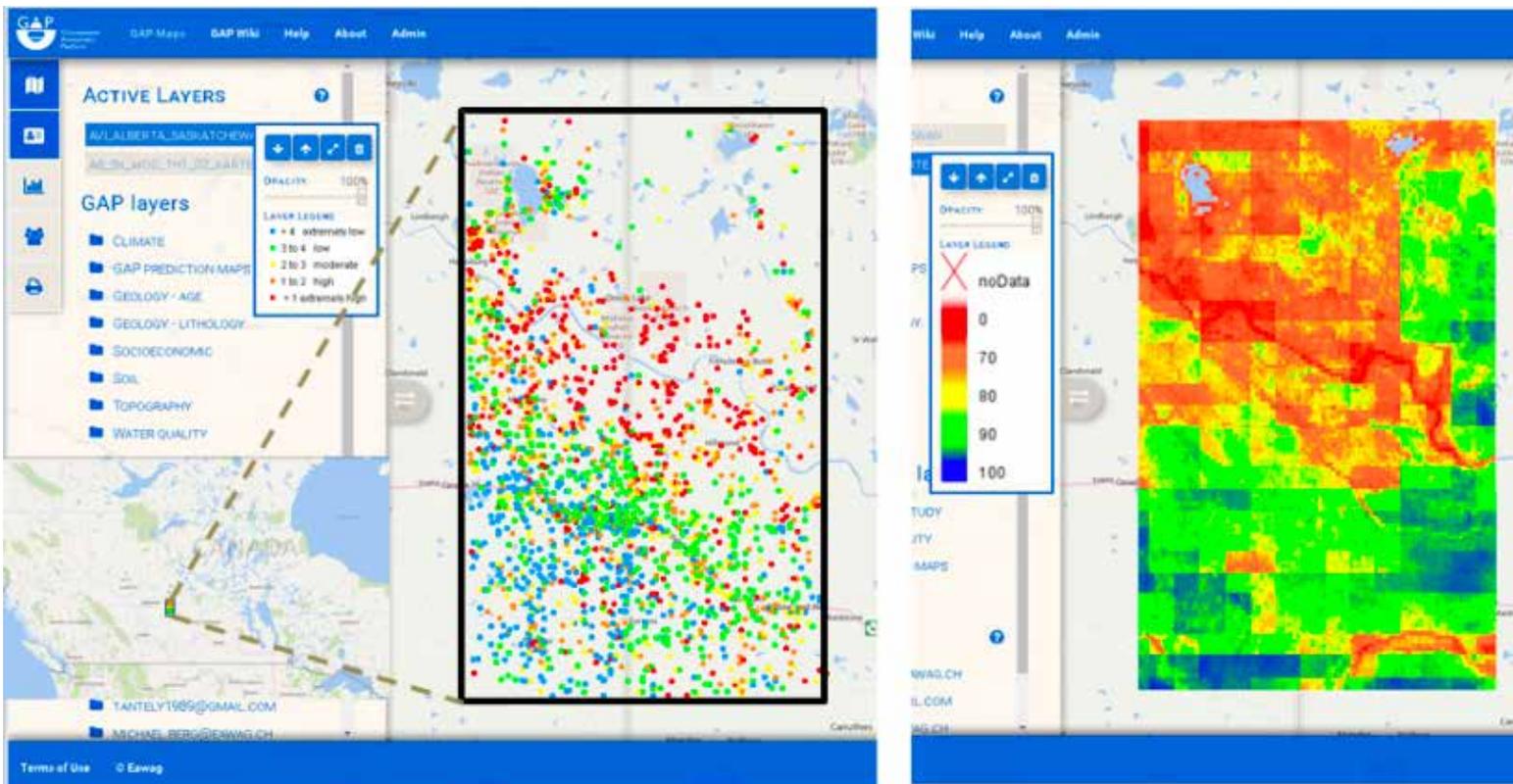
La cartographie statistique en ligne de la vulnérabilité des aquifères et de la vitesse de réalimentation des eaux souterraines au moyen d'isotopes et de produits chimiques constitue une avancée considérable et une application pratique du tritium et des traceurs isotopiques naturels associés.

Comme la cartographie géostatistique décrite ci-dessus, les ensembles de données mondiaux exhaustifs de l'AIEA sur le ^3H , le ^2H et le ^{18}O offrent de grandes possibilités face aux problèmes de quantité et de qualité des eaux souterraines et des eaux de surface à l'échelle mondiale. En coopération avec l'Institut fédéral suisse des sciences et technologies de l'eau (Eawag), l'AIEA s'emploie depuis peu à évaluer et à cartographier toutes les ressources d'eau potable de la planète sur la base de données factuelles. La cartographie isotopique devrait aussi aider les experts du monde entier à gérer les eaux souterraines de manière équilibrée et durable.

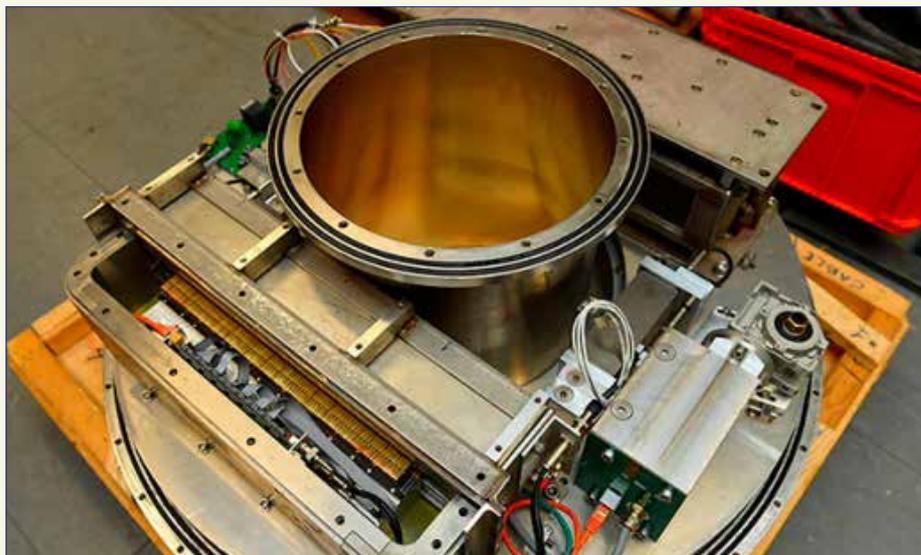
Cet article a été rédigé en collaboration avec des spécialistes de l'hydrologie isotopique de l'AIEA.

Une étude sur l'indice de vulnérabilité des aquifères de l'ouest du Canada (à gauche) a été comparée à une nouvelle carte de régression logistique de ces indices sur la plateforme en ligne GAP (à droite). Les zones les plus vulnérables apparaissent en rouge et les zones moins vulnérables ou bien protégées contre la contamination superficielle en vert.

(Image : Eawag)



Garanties : un nouvel appareil aide l'AIEA à vérifier le combustible nucléaire usé



Composants à l'intérieur du tomographe à émission gamma passive, qui sert à vérifier le combustible nucléaire usé. (Photo : D. Calma/AIEA)

Dans tous les États ayant un accord de garanties généralisées en vigueur, l'AIEA cherche à vérifier que toutes les matières nucléaires restent affectées à des activités pacifiques. Pour ce faire, elle utilise des mesures techniques appelées « garanties ». Un nouveau tomographe à émission gamma passive doit lui permettre de vérifier combien il y a de barres (ou d'aiguilles) de combustible dans les assemblages de combustible nucléaire usé.

Contrairement à d'autres outils de vérification, comme le dispositif numérique d'observation de l'effet Tcherenkov ou le dispositif de test par attributs du combustible usé, le tomographe permet de confirmer qu'il ne manque

pas d'aiguilles dans un assemblage de combustible usé placé dans un conteneur fermé. Il facilite considérablement l'application des garanties dans les centrales nucléaires, les installations d'entreposage immergées et les usines d'encapsulation des dépôts géologiques. D'après Tim White, expert en technologie à l'AIEA, l'utilisation de la tomographie à émission gamma passive pour vérifier les matières nucléaires sera « un ajout précieux aux outils dont dispose l'AIEA dans le domaine des garanties ».

Au terme de leur vie utile dans un réacteur, les barres de combustible sont stockées et finalement mises au rebut ou, dans

certains cas, retraitées. Pour garantir à la communauté internationale que les États respectent leurs obligations en matière de non-prolifération, il est essentiel de vérifier que les matières nucléaires présentes dans ces barres ne sont pas détournées des utilisations pacifiques.

Le tomographe détecte la présence d'uranium ou de plutonium en effectuant simultanément trois mesures : le comptage brut neutronique et gamma, la spectrométrie gamma et l'imagerie par tomographie des positions des aiguilles de combustible usé. Il ne lui faut que cinq minutes, plus une pour le traitement et l'analyse des données. Ainsi, la tomographie à émission gamma passive « fournit aux inspecteurs un point de données supplémentaire », explique Tim White. « Elle donne une idée plus complète des activités et renforce le processus de vérification. »

L'AIEA commence tout juste à intégrer la tomographie à émission gamma passive à ses activités de garanties. Mise à l'essai dans les piscines d'entreposage de combustible usé de trois centrales nucléaires, elle peut maintenant servir aux activités de vérification des garanties et être utilisée sur le terrain par les inspecteurs des garanties. La Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom) s'est également déclarée intéressée par l'utilisation de cette technologie aux fins d'activités de vérification et plusieurs pays pourraient suivre.

— Par Matt Fisher

Le choix et l'évaluation du site d'une centrale nucléaire, principaux thèmes d'un atelier de l'AIEA en Ouzbékistan

L'Ouzbékistan, dernier pays en date à se lancer dans l'électronucléaire, a entamé le processus de sélection d'un site pour la construction d'une centrale nucléaire et entend délivrer une autorisation d'implantation en septembre 2020, ont confirmé des responsables locaux. Il fait partie de la trentaine de pays qui envisagent ou prévoient d'inclure l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique ou qui œuvrent activement dans ce sens.

En février 2019, à la demande du Gouvernement ouzbek, l'AIEA et Uzatom, l'agence nationale pour l'énergie nucléaire récemment créée, ont organisé à Tashkent un atelier sur les aspects liés à la sûreté et les autres aspects à prendre en considération

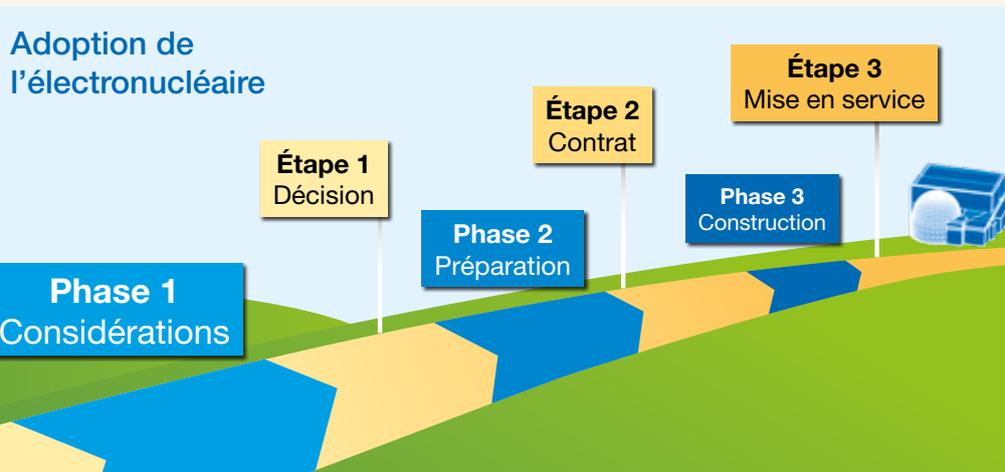
dans le choix et l'évaluation du site d'une centrale nucléaire.

L'atelier, auquel ont participé l'organisme de réglementation nucléaire Uzatom et d'autres organismes nationaux compétents, couvrait avant tout les services d'examen de la sûreté de l'AIEA, les normes de sûreté et les autres ressources utiles.

« L'adoption de l'électronucléaire suppose un engagement durable en faveur de la sûreté nucléaire, et ce dès le moment où la décision de se lancer est prise, indique Greg Rzentkowski, directeur de la Division de la sûreté des installations nucléaires de l'AIEA. La mise en place d'un cadre juridique et réglementaire efficace et

la réalisation d'une évaluation adéquate des sites potentiels d'une installation nucléaire préalablement à la sélection sont deux étapes importantes au début du processus. Les normes de sûreté de l'AIEA offrent des orientations claires à cet égard, et nous encourageons tous les pays à les suivre. »

L'approche par étapes de l'AIEA concernant l'élaboration d'un programme électronucléaire a été présentée lors de l'atelier. Le thème du site et des installations auxiliaires est l'une des 19 questions liées à l'infrastructure nucléaire qui ont été définies dans le cadre de cette approche comme devant être prises en considération lors de l'élaboration d'un programme électronucléaire.



L'approche par étapes relative à l'électronucléaire est une méthode complète par étapes destinée à aider les pays qui envisagent ou planifient la construction de leur première centrale nucléaire. (Image : AIEA)

Conformément à l'approche par étapes, l'AIEA offre des services intégrés concernant la sûreté, la sécurité, le cadre juridique et réglementaire, la mise en valeur des ressources humaines, la planification des interventions d'urgence et les garanties, entre autres. Elle organise notamment des examens par des pairs et des missions consultatives, comme les examens intégrés de l'infrastructure nucléaire et les services d'examen de site et de la conception basée sur les événements externes.

— Par Ayhan Altinyollar

Comment les techniques nucléaires aident à nourrir la population chinoise



Technicien préparant des échantillons en vue de tester la sécurité sanitaire des aliments. L'utilisation des techniques nucléaires fait partie intégrante des travaux de recherche agronomique de l'Académie chinoise des sciences agricoles. (Photo : M. Gaspar/AIEA)

Avec 19 % de la population mondiale mais seulement 7 % des terres arables de la planète, la Chine se heurte à une question délicate : comment nourrir une population croissante et de plus en plus aisée tout en protégeant les ressources naturelles ? Au cours des dernières décennies, les agronomes chinois ont eu de plus en plus recours aux techniques nucléaires et isotopiques dans le cadre de la production végétale. En coopération avec l'AIEA et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), ils aident maintenant les experts de pays d'Asie et d'autres continents à mettre au point de nouvelles variétés de végétaux au moyen de l'irradiation.

Alors que la recherche sur l'utilisation des techniques nucléaires dans l'agriculture relève souvent de la compétence d'agences nucléaires indépendantes de l'institut de recherche agricole national, en Chine, ces travaux sont intégrés dans les activités de l'Académie chinoise des sciences agricoles (CAAS) et de ses homologues provinciaux. De ce fait, les résultats obtenus peuvent être mis à profit immédiatement.

Ainsi, la deuxième variété de blé mutant la plus cultivée en Chine, le Luyuan 502, a été mise au point par l'Institut des sciences des cultures de la CAAS et l'Académie des sciences agricoles du Shandong au moyen de la sélection par mutation induite par l'espace (voir l'encadré « En savoir

plus »). Luxiang Liu, directeur général adjoint de l'Institut, explique que cette variété a un rendement de 11 % supérieur à celui de la variété classique et qu'elle est plus résistante à la sécheresse et aux principales maladies. Elle est cultivée sur plus de 3,6 millions d'hectares - superficie presque équivalente à celle de la Suisse - et est l'une des 11 variétés de blé mise au point pour sa tolérance accrue au sel et à la sécheresse, la qualité de son grain et son rendement.

« En étroite coopération avec l'AIEA et la FAO, la Chine a mis sur le marché plus de 1 000 variétés de mutants au cours des 60 dernières années, et est à l'origine du développement d'un quart des mutants actuellement répertoriés dans la base de données FAO/AIEA sur les variétés de mutants produites dans le monde », indique Sobhana Sivasankar, chef de la Section de la sélection des plantes et de la phytogénétique de la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture. « Les nouvelles méthodes d'induction de mutations et de sélection de mutant à haut débit mises au point à l'Institut servent de modèle à des chercheurs du monde entier », ajoute-t-elle.

Les scientifiques de l'Institut utilisent des accélérateurs de faisceaux d'ions lourds, des rayons cosmiques et des rayons gamma ainsi que des produits chimiques pour induire des mutations dans toute une série de cultures, notamment le blé, le riz, le maïs, le soja et les légumineuses. « Les techniques nucléaires sont au cœur de nos travaux et participent pleinement au développement de variétés de plantes en vue de l'amélioration de la sécurité alimentaire », fait remarquer Luxiang Liu.

Par ailleurs, l'Institut est devenu un contributeur majeur du programme de coopération technique de l'AIEA au fil des ans : plus de 150 cultivateurs de plus de 30 pays ont bénéficié de cours et de bourses à la CAAS.

« L'agence indonésienne de l'énergie nucléaire, la BATAN, et la CAAS s'efforcent actuellement de trouver de nouveaux moyens de collaborer dans le domaine de la sélection par mutation et les chercheurs indonésiens cherchent à tirer des enseignements de l'expérience de la Chine », indique Totti Tjptosumirat, chef du Centre d'application de la technologie des isotopes et des rayonnements de la BATAN. Il ajoute que la diffusion active d'informations sur les activités de sélection des plantes par mutation de la Chine et la promotion de ces activités favoriserait la recherche agronomique partout en Asie.

De la sécurité sanitaire à l'authenticité des aliments

Plusieurs autres instituts de la CAAS utilisent des techniques dérivées du nucléaire et des techniques isotopiques dans leurs travaux de recherche-développement et participent à des projets de coopération technique et de recherche coordonnée de l'AIEA. L'Institut des normes de qualité et des techniques de test des produits agricoles a mis au point un protocole visant à détecter le miel frauduleux au moyen de l'analyse isotopique. Chen Gang, qui dirige les travaux de recherche fondés sur les techniques isotopiques à l'Institut, explique qu'une grande quantité du « miel » vendu en Chine serait produit de manière artificielle dans des laboratoires, et non par des abeilles dans des ruches. Le protocole est donc un outil précieux pour lutter contre la fraude. Il ajoute qu'un programme

permettant de déterminer l'origine géographique du bœuf au moyen d'isotopes stables a également été mis en place.

Les chercheurs de l'Institut utilisent des techniques isotopiques pour vérifier que les aliments sont propres à la consommation et que le lait et les produits laitiers sont authentiques. Ces travaux s'inscrivent dans le prolongement de projets de recherche coordonnée et de coopération technique de l'AIEA menés de 2013 à 2018. « Après avoir bénéficié d'une assistance pendant plusieurs années, nous sommes maintenant pleinement autonomes », souligne Chen Gang.

Vers une meilleure efficacité nutritionnelle

Plusieurs instituts de la CAAS utilisent les isotopes stables pour étudier l'absorption, le transfert et le métabolisme des nutriments chez les animaux. Les résultats de ces travaux servent à optimiser la composition des aliments et le programme d'alimentation du bétail. « Le traçage isotopique offre une plus grande sensibilité que les méthodes d'analyse classiques, ce qui est particulièrement avantageux pour étudier l'absorption des micronutriments, des vitamines, des hormones et des médicaments », explique Dengpan Bu, professeur à l'Institut des sciences animales.

Si la Chine maîtrise parfaitement de nombreuses techniques nucléaires, elle fait appel à l'AIEA et à la FAO dans divers domaines : l'industrie laitière chinoise, par exemple, se heurte constamment à un faible taux d'absorption des protéines des vaches laitières. Ces ruminants absorbent moins de la moitié des protéines contenues dans leur alimentation, le reste se retrouvant dans l'urine et les excréments. « Non seulement cela représente une perte



Des scientifiques chinois cherchent à utiliser des techniques dérivées du nucléaire pour mieux comprendre le métabolisme du bétail et accroître la quantité d'azote que les vaches tirent du fourrage, comme ici, dans une ferme près de Beijing.

(Photo : M. Gaspar/AIEA)

pour l'éleveur, mais en plus une forte teneur en azote du fumier est nocive pour l'environnement », déplore Dengpan Bu. Le traçage de l'azote ingéré par les animaux dans leur organisme à l'aide d'isotopes aiderait à améliorer l'efficacité de l'azote, car il permettrait d'ajuster la composition de l'alimentation du bétail. Cela serait particulièrement intéressant étant donné que la consommation de produits laitiers en Chine, qui correspond actuellement à un tiers de la moyenne mondiale par personne, continue d'augmenter. « Nous faisons appel à l'expertise de la communauté internationale, par l'intermédiaire de l'AIEA et de la FAO, pour résoudre ce problème. »

— Par Miklos Gaspar

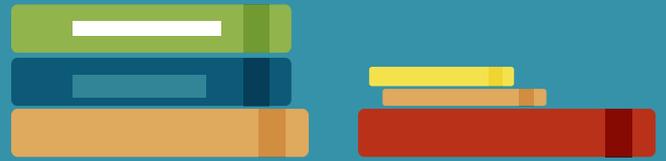
EN SAVOIR PLUS

Sélection par mutation induite par l'espace

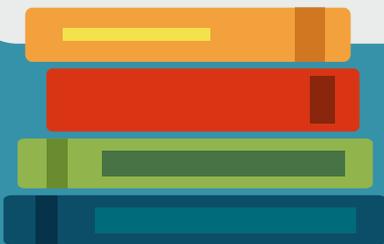
L'irradiation provoque une mutation qui entraîne des variations génétiques aléatoires, lesquelles donnent naissance à des plantes ayant de nouveaux caractères utiles. La sélection par mutation n'implique aucune transformation génétique mais consiste à exploiter le matériel génétique de la plante et à imiter le processus naturel de mutation spontanée, moteur de l'évolution. Les rayonnements permettent aux scientifiques de réduire considérablement le temps nécessaire à la mise au point de variétés de végétaux nouvelles et améliorées.

La sélection par mutation - ou mutagenèse - induite par l'espace consiste à envoyer les graines dans l'espace, où les rayons cosmiques, plus puissants, provoquent une mutation. Des satellites, des navettes et des ballons de haute altitude sont utilisés à cet effet. Cette méthode a notamment pour avantage de présenter un plus faible risque d'endommager les plantes que l'irradiation gamma sur terre.

Des milliers de publications de l'IAEA gratuites en ligne



IAEA
International Atomic Energy Agency
Atoms for Peace and Development



www.iaea.org/books

sales.publications@iaea.org

Conférence internationale sur
**les changements
climatiques et le rôle de
l'électronucléaire**

**7-11 octobre 2019,
Vienne (Autriche)**

Organisée par



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique
L'atome pour la paix et le développement

#Atoms4Climate

CN-275



Lisez cette publication et d'autres numéros du Bulletin de l'AIEA en ligne sur www.iaea.org/bulletin
Pour de plus amples informations sur l'AIEA et les travaux qu'elle mène, rendez-vous sur le site www.iaea.org,

suivez-nous sur



ou consultez le site h2o.iaea.org