

Les techniques isotopiques en hydrologie dans les pays du Sahel

Un projet régional pour le Sénégal, le Mali, le Niger et le Cameroun permet aux scientifiques d'en savoir davantage sur les modestes ressources en eau du Sahel

par
Jean-François
Aranyosy,
Didier Louvat
et Mokdad
Maksoudi

Les récentes périodes de sécheresse qui ont affecté la région sahélienne durant les deux dernières décennies ont mis en relief la précarité des réserves en eau de surface ainsi que la nécessité de faire, de façon plus systématique, appel aux ressources en eaux souterraines. Suivant cette constatation, et conformément aux recommandations de la Décennie internationale de l'eau, de vastes programmes d'exploitation des eaux souterraines ont été entrepris dans toute la frange sahélienne. En quelques années, des milliers de forages ont été implantés, notamment dans le cadre de nombreux programmes d'«hydraulique villageoise».

Pendant, les nappes souterraines, activement exploitées, démontrèrent dans bien des cas leur vulnérabilité aussi bien sur le plan qualitatif que quantitatif. Il s'avéra donc nécessaire de mettre en œuvre, parallèlement au programme d'exploitation, des études globales pour la reconnaissance des ressources en eau dans les pays concernés. Ces études doivent prendre en compte tous les aspects de l'hydrologie et de l'hydrogéologie afin de parvenir à mettre au point des modèles de gestion basés sur une connaissance la plus complète possible des caractéristiques des aquifères.

C'est dans ce contexte que l'AIEA a entrepris, dès le début des années 80, ses premières activités en hydrogéologie au Mali, au Niger et au Sénégal, dans le cadre de ses programmes de coopération technique. Elles concernaient en premier lieu des études locales d'aquifères utilisant les isotopes de l'environnement. Ces études se révélèrent particulièrement utiles pour l'obtention d'informations spécifiques telles que la mise en évidence de communications entre nappes, les relations entre les eaux de

surface et les eaux souterraines, l'existence ou l'absence de recharge actuelle. Par ailleurs, l'AIEA a mis en place les premières infrastructures pour l'application des techniques de traçage artificiel en hydrologie et l'utilisation de l'instrumentation nucléaire en hydrosédimentologie.

La nécessité de coordination des activités scientifiques développées dans le cadre de ces projets bilatéraux se révéla progressivement du fait que, premièrement, la circulation «horizontale» des informations restait très faible malgré la similitude des problèmes hydrologiques et hydrogéologiques rencontrés; deuxièmement, les frontières politiques ne suivent généralement pas les limites des bassins hydrologiques et le même aquifère peut être partagé par plusieurs pays; troisièmement, les infrastructures coûteuses mises en place par l'AIEA dans certains pays se devaient d'être utilisées à l'échelle régionale.

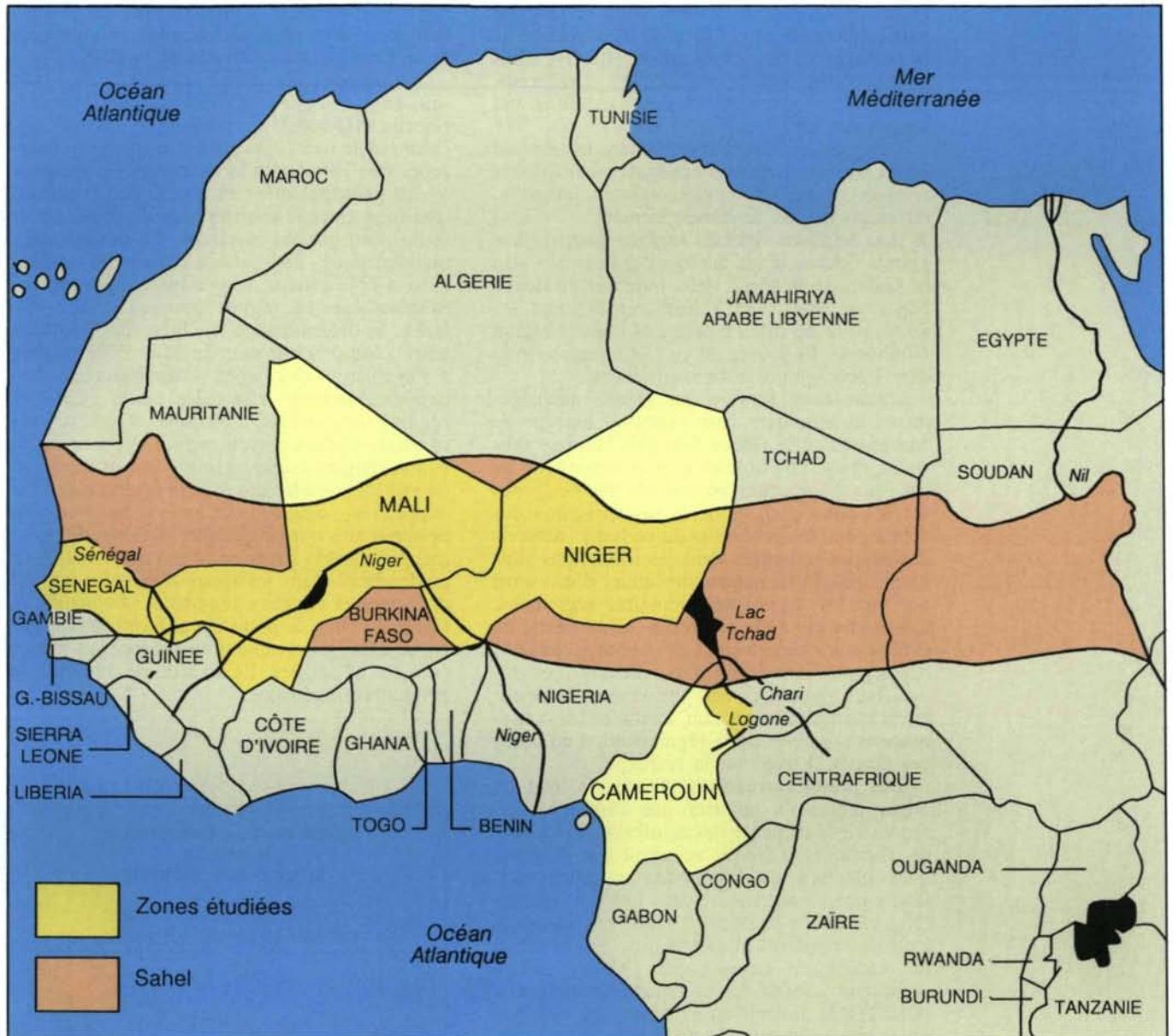
Le démarrage, il y a quatre ans, du projet régional africain sur le développement des techniques isotopiques et nucléaires en hydrologie dans les pays du Sahel répondit à ces préoccupations. Les objectifs principaux de ce projet sont les suivants: continuer et élargir les études en cours dans les pays participants; renforcer la formation du personnel; faciliter les échanges d'informations sur les différentes études réalisées; favoriser la coopération entre les différents instituts impliqués dans ces études; consolider les infrastructures mises en place par l'AIEA et développer leur utilisation dans la région.

Au bout de quatre ans, le projet est parvenu, grâce à la collaboration active de toutes les contreparties, à des résultats très satisfaisants. Nous en rappelons ici les grandes lignes.

M. Aranyosy est un expert régional de l'AIEA en poste à Dakar (Sénégal); M. Louvat est membre de la Section d'hydrologie isotopique de l'AIEA et M. Maksoudi est membre de la Division des programmes de coopération technique de l'AIEA. M. Aranyosy est l'auteur des photos qui illustrent cet article.

Les thèmes communs d'étude

En hydrologie, les tentatives de modélisation pour la gestion des ressources en eaux souter-



Dans la frange sahélienne, les précipitations sont irrégulières et varient entre 50 et 500 mm par an. Elles alternent avec de longues périodes de sécheresse et les eaux superficielles sont peu abondantes. Il existe une source d'eau douce permanente dans de vastes formations sédimentaires aquifères qui se sont remplies dans le passé pendant les périodes humides qu'a connues l'Afrique septentrionale. De nos jours, ces réservoirs naturels sont prospectés et étudiés, souvent à l'aide des techniques isotopiques, comme c'est le cas dans le cadre du projet régional de l'AIEA intéressant le Sénégal, le Mali, le Niger et le Cameroun.

Par une chaleur accablante, une équipe de chercheurs du projet prélève des échantillons de sable dunaire dans la région de Bilma (Est Niger), en vue de l'analyse isotopique de l'eau interstitielle qui permettra de calculer les pertes d'eau par évaporation à partir de la nappe, à travers la zone non saturée.

raines en zone aride et semi-aride se heurtent particulièrement aux difficultés d'estimation de la recharge et de l'évaporation effective ainsi qu'à la connaissance sommaire des caractéristiques hydrodynamiques et des conditions aux limites des aquifères.

Ces problèmes sont abordés dans le cadre du projet régional à travers des études thématiques communes qui ont atteint, suivant les pays, différents degrés de développement.

● **Les relations eaux de surface-nappes.** Les grands fleuves et les quelques grands lacs (lac de Guiers au Sénégal, delta intérieur du fleuve Niger au Mali, lac Tchad) représentent les seules eaux de surface pérennes dans la région sahélienne. Ils jouent de ce fait un grand rôle dans l'économie traditionnelle locale.

La mise en service des grands aménagements hydrauliques (par exemple, barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal) favorise sans aucun doute une utilisation plus rationnelle de ces eaux. Cependant, on sait très peu de choses sur les conséquences de la régularisation des débits pour les processus de recharge naturels des nappes contenues dans les formations alluvionnaires du lit majeur des cours d'eau ainsi que sur les nappes sédimentaires régionales. Les études en cours se proposent de mettre en évidence les mécanismes de recharge naturels des nappes des formations alluviales et des aquifères régionaux des formations sédimentaires qui les jouxtent afin d'estimer les conséquences possibles de la régularisation du cours des grands fleuves sur la recharge.

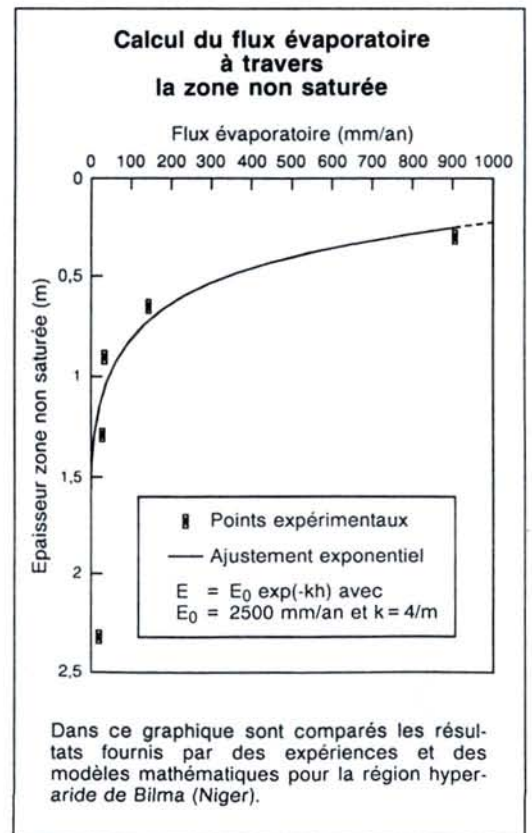
Les premiers résultats obtenus le long du Niger tendent à montrer que l'influence du fleuve sur la recharge des aquifères à la hauteur de Tombouctou (Mali) ne serait que de quelques dizaines de kilomètres au maximum, tandis qu'elle est encore plus faible à Niamey (Niger), où le lit mineur paraît pratiquement isolé des aquifères alluvionnaires. Au Sénégal, les études en cours avec l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM) ont mis en évidence une isolation quasi totale entre le lac de Guiers et les aquifères qui le jouxtent.

● **Les transferts d'eau dans la zone non saturée.** Ces études sont essentiellement basées sur l'interprétation des profils chimiques et isotopiques de l'eau de rétention du sol entre la surface et la nappe phréatique. L'application de ces méthodes a surtout été développée au Sénégal et au Niger en collaboration avec le British Geological Survey d'Angleterre et le Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique d'Orsay (Université Paris XI, France).

Estimation de l'infiltration efficace. Si la recherche du pic de tritium thermonucléaire ne peut pratiquement plus être appliquée dans les zones tempérées humides (car celui-ci a généralement atteint la nappe), la méthode est cependant encore très utile dans les zones arides et semi-arides où l'infiltration est faible et la zone non saturée (ZNS) très épaisse. Les recherches en cours dans le nord du Sénégal l'ont notamment mis en évidence à 25 mètres de profon-

deur. Les calculs d'infiltration efficace concordent avec ceux résultant du bilan en chlorures entre l'eau de pluie et celle de la ZNS.

Estimation des pertes évaporatoires. On sait, depuis les études théoriques et les expériences effectuées en laboratoire ou sur des colonnes de sédiments placés en condition naturelle, que l'évaporation concentre les isotopes lourds principalement au niveau de la zone de transition entre le transfert liquide dominant et le transfert gazeux dominant. La modélisation mathématique des profils d'isotopes stables dans la ZNS conduit à une estimation des pertes évaporatoires en régime permanent. Par ailleurs, la détermination du bilan en chlorures entre l'eau de pluie et celle de la ZNS conduit à l'évaluation des lames d'eau infiltrées. Les expérimentations effectuées dans diverses régions semi-arides d'Afrique et les récents résultats obtenus dans la région hyper-aride de Bilma (Niger) montrent que cette évaporation décroît très rapidement avec la profondeur de la nappe (voir la figure). La lame d'eau évaporée ne serait plus que de quelques dizaines de millimètres quand la nappe se situe à deux mètres de profondeur. Dans les zones d'exutoire naturel des grandes nappes régionales, la meilleure façon d'éviter la perte de millions de mètres cubes d'eau par évaporation consisterait donc à pomper et utiliser l'eau afin de rabattre le niveau piézométrique.



● **Les eaux «très anciennes» et la paléohydrologie.** Dans la zone sahélienne, d'énormes ressources en eaux souterraines sont stockées dans les grands aquifères régionaux. Les premières études isotopiques ont mis en évidence, dans une grande partie de ces aquifères, des eaux fossiles dont la période de recharge correspond à des âges supérieurs à 40 000 ans (limite d'utilisation du carbone 14), eaux que l'on qualifie de «très anciennes». L'étude de ces aquifères nécessite donc l'emploi de nouvelles techniques faisant appel à des isotopes de très longue période (chlore 36, isotopes de l'uranium) et des éléments marqueurs des conditions paléohydrologiques tels que les gaz rares.

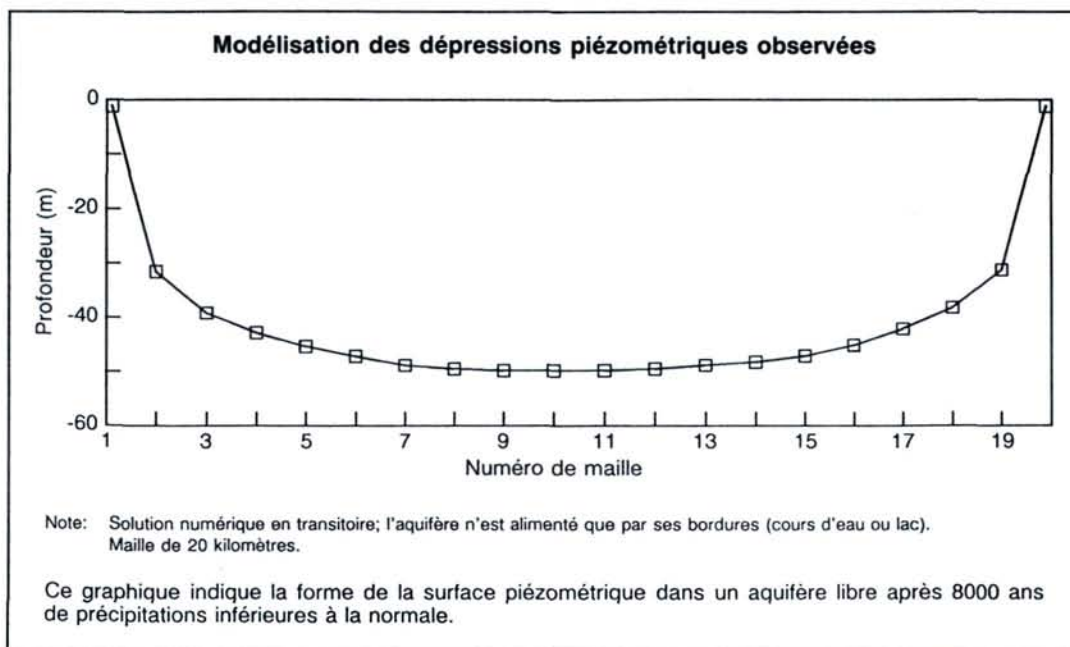
L'utilisation du chlore 36 pour la datation des eaux très anciennes est favorisée par sa durée de vie très longue (période de $3,01 \times 10^5$ ans), par la solubilité très grande des chlorures et leur caractère conservatif. Son application nécessite cependant une connaissance approfondie de la géochimie de l'aquifère du fait des différentes sources de production (cosmique, thermonucléaire, subsurface et profonde). Dans des conditions géochimiques favorables, la connaissance de l'activité initiale de l'uranium 234 (période de $2,5 \times 10^5$ ans) permet l'application de la formule classique de datation par décroissance radioactive. La dissolution des gaz rares (argon, xénon, krypton et néon) dans les eaux d'infiltration dépend essentiellement de la température ambiante. La concentration qui en résulte reste ensuite théoriquement constante du fait de l'inertie chimique de ces éléments. Leur dosage sur les eaux fossiles permet donc de reconstituer les conditions climatiques qui prévalaient au moment de la recharge des aquifères.

L'utilisation de ces techniques est en cours par les collaborateurs africains du projet, en association avec les laboratoires européens spécialisés (Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique d'Orsay, School of Chemistry de l'Université de Bath, Royaume-Uni). Elle concerne l'étude des aquifères du Maastrichtien (au Sénégal) et du Continental intercalaire (Mali, Niger).

● **L'origine des dépressions piézométriques.** La découverte des grandes dépressions piézométriques remonte aux années 50, lors des premières investigations hydrogéologiques en Afrique. Depuis, de nombreux cas ont été décrits tout au long de la frange sahélienne: ce sont, par exemple, les nappes du Ferlo au Sénégal, du fossé de Nara, du Gondo, de l'Azaouad, au Mali, du Trarza en Mauritanie, du Kadzell au Niger, de la plaine des Yaérés (région du lac Tchad) au Cameroun.

Jusqu'à présent, aucune des diverses théories présentées pour l'explication de ce phénomène n'a rencontré l'unanimité. La discussion, cependant, n'est pas d'ordre purement académique, car la gestion à long terme impose le choix d'un schéma conceptuel de circulation et la connaissance des conditions aux limites de ces grands aquifères.

Plusieurs études sont en cours sur ce thème dans le cadre du projet régional. Les résultats préliminaires obtenus au Sénégal, au Mali et au Cameroun semblent mettre en évidence l'influence prépondérante d'un déficit entre l'infiltration et la reprise évapotranspiratoire. Un modèle mathématique de simulation prenant en compte cette hypothèse a été mis au point, dans le cadre du projet, en collaboration avec un enseignant-chercheur sénégalais et permet



de restituer de façon satisfaisante la forme des dépressions piézométriques observées (voir la figure).

Hydrologie et hydrosédimentologie

Hydrologie. Les pays du Sahel sont caractérisés par un réseau hydrographique très réduit; seuls les très grands cours d'eau (fleuves Niger, Sénégal, Logone, Chari) sont pérennes, tandis que des crues violentes et sporadiques empruntent pendant «l'hivernage» (saison des pluies, de juin à septembre) les marigots à sec le reste de l'année. Ce caractère entraîne des difficultés notables pour la mesure des débits liquides.

Le Mali, où le réseau des petits cours d'eau non pérennes est sans doute le plus important, fut le premier à bénéficier de l'introduction des techniques de traçage artificiel pour la mesure des débits liquides. Il dispose maintenant d'une équipe compétente et de tous les matériels nécessaires pour la réalisation des opérations de terrain. Cette équipe, seule unité spécialisée

dans ce domaine dans la région, est à même aujourd'hui d'intervenir à l'extérieur et de former les techniciens des autres pays.

Plusieurs ateliers et stages de formation sur le terrain ont été organisés au Mali à l'intention des ingénieurs et des techniciens partenaires du projet régional (voir l'encadré).

Hydrosédimentologie. Les cours d'eau sahéliens transportent des masses considérables de sédiments. Ceux-ci se déposent dans les retenues de surface en réduisant d'autant leur capacité de stockage et leur durée de vie. L'évaluation de ces transports sédimentaires par les méthodes classiques est rendue difficile du fait du régime torrentiel des cours d'eau.

Afin de contribuer à la résolution de ce problème, l'AIEA a doté le Mali d'un laboratoire d'hydrosédimentologie comportant une unité classique et une unité d'instrumentation nucléaire. Celle-ci comprend une jauge de tassement pour la mesure des vitesses de sédimentation (mesures en laboratoire); une jauge pour la mesure *in situ* des sédiments en suspension (particulièrement adaptée pour la cartographie des dépôts sédimentaires dans les retenues et canaux); une jauge pour la mesure *in situ* (et l'enregistrement automatique continu) de la concentration des sédiments en suspension dans les cours d'eau.

Le laboratoire, maintenant opérationnel, a deux fonctions. Il réalise des études pour le compte de la Direction de l'hydraulique et pour des organismes extérieurs, et assure la formation théorique et pratique d'étudiants en fin de cycle à l'Ecole nationale d'ingénieurs de Bamako.

Echanges régionaux d'informations

La tenue régulière des réunions scientifiques et d'ateliers régionaux constitue le moyen privilégié pour l'échange des expériences, la divulgation des résultats et pour la formation des ingénieurs des différents organismes nationaux impliqués dans le projet. Notons par exemple à ce sujet:

- L'atelier d'hydrologie de Bamako (août 1987) sur les techniques de jaugeage des cours d'eau par la méthode de traçage, qui a permis de former 15 ingénieurs et techniciens du Mali, du Niger et du Sénégal;

- Le séminaire d'hydrologie et d'hydrogéologie isotopiques de Niamey (novembre 1988), regroupant 38 participants provenant de huit pays. La présentation de 24 communications a permis de faire le point sur le développement des techniques isotopiques dans la région et de donner de nombreux exemples d'application;

- Le cours régional de Dakar (juin 1989) sur l'application des techniques isotopiques pour la mise en valeur des ressources en eau, organisé par l'AIEA et l'UNESCO, qui a accueilli dix participants associés au projet régional;

- Les deux stages de formation de longue durée en hydrologie et en hydrosédimentologie organisés au Mali en 1990 et 1991;

- L'atelier régional d'hydrosédimentologie nucléaire de Bamako (décembre 1990), qui assura la formation de deux ingénieurs par pays participant.

L'échange de techniciens et d'ingénieurs-chercheurs s'est également développé depuis le début de 1990, avec notamment: une série de conférences sur la sédimentologie nucléaire faites à Dakar par un expert malien; la participation d'un chercheur sénégalais à une mission de recherche sur le terrain au Niger; la tenue à Dakar d'un stage de formation en analyse des données géographiques et de cartographie automatique, dirigé par un scientifique nigérien.

Perspectives

Suivant les recommandations de sa première réunion de coordination (Bamako, décembre 1989), le projet s'attache maintenant à développer:

- le soutien à l'équipement et au fonctionnement des infrastructures, de façon à augmenter progressivement l'autonomie analytique de la région et à privilégier une utilisation régionale des laboratoires mis en place;

- le soutien à la formation et à la documentation par la multiplication des échanges de techniciens entre les pays membres et par une participation accrue des collaborateurs aux ateliers, séminaires et conférences régionaux;

- les moyens financiers des activités par une augmentation de la contribution propre de l'AIEA et par la recherche de contributions d'autres organismes internationaux et/ou de coopérations bilatérales.

C'est dans cette optique que quatre nouveaux projets de coopération technique ont été approuvés par l'AIEA en 1991 pour le Mali, le Sénégal et le Niger, dans le cadre des activités du projet régional. Ils permettront notamment, d'une part, de mettre en œuvre des techniques de traçage en hydrologie au Sénégal et au Niger



Dans la région du Ferlo (Nord Sénégal), l'approvisionnement en eau se fait le plus souvent par des puits de 60 à 100 mètres de profondeur. La recherche hydrologique vise en particulier à déterminer si les nappes souterraines sont ou non rechargées par les pluies.

et de continuer cette activité au Mali; d'autre part, de renforcer les différents laboratoires et de développer leur utilisation régionale.

Ainsi, le laboratoire de carbone 14 installé par l'AIEA à Niamey va être doté d'un nouveau compteur à scintillateur liquide qui lui permettra très prochainement d'assurer l'analyse des échantillons prélevés dans la région pour l'hydrologie et l'archéologie. De son côté, le laboratoire d'hydrosédimentologie nucléaire de Bamako pourra intervenir dans des études hors du Mali, tandis que le laboratoire des sols de l'Université de Dakar, doté d'une ligne d'extraction par distillation sous vide, traitera des échantillons auparavant envoyés en Europe.

En ce qui concerne la recherche et la formation, quatre nouveaux ateliers régionaux sont d'ores et déjà programmés: le premier sur l'étude de la zone non saturée (Dakar, novembre 1991); le deuxième sur la préparation et le dosage du carbone 14 (Niamey, 1992); le troisième sur l'hydrochimie (Yaoundé, 1992); le quatrième sur la modélisation mathématique en hydrogéologie (Dakar). Par ailleurs, une action de recherche régionale pour l'évaluation du taux de recharge et d'évaporation des aquifères libres en zone sahélienne a été proposée à un financement extérieur.



savoir: le Sénégal, Département de géologie de l'Université de Dakar, et Division des études et aménagements du Ministère de l'hydraulique; le Mali, Ministère de l'hydraulique et de l'énergie, et Ecole nationale d'ingénieurs de Bamako; le Niger, Département de géologie de l'Université de Niamey, et Direction des ressources en eau du Ministère de l'hydraulique; le Cameroun, Institut de recherches géologiques et minières de Yaoundé. Ainsi, hormis ces principales contreparties, le projet a bénéficié notamment de la collaboration des projets hydrauliques du programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) au Mali, au Niger et

Sous la direction d'un spécialiste malien, un stagiaire s'entraîne à la mesure de la dilution de traceurs du transport de sédiments dans le bassin du Dourou, au Mali.

Le détecteur, logé dans le mur de protection à l'arrière plan, permet d'enregistrer en continu les concentrations de sédiments en suspension transportées pendant les crues.

Une collaboration fructueuse

La réalisation de ces objectifs, à partir de moyens financiers relativement limités, aurait pu paraître une gageure si elle n'avait pas été essentiellement basée sur une coopération étroite avec les différents organismes nationaux, bilatéraux ou internationaux et les projets existants dans le domaine de l'hydrologie dans les pays concernés. Le projet a été appuyé, en particulier, par les principales contreparties, à

Activités	Sénégal		Mali		Niger		Cameroun	
Etude des aquifères	Cap vert, Horst Ndiass	(1)	Aquifères discontinus du socle			Mts du Mandara	(2)	
	Casamance	(1)	Bougoni, Kolokani	(1)	Liptako, Aïr	(1)		
	Ferlo	(2)	Aquifères régionaux (Continental terminal et Continental intercalaire)			Plaine Yaérés	(2)	
	Sénégal oriental	(3)	Nara, Azaouad Gondo	(2) (1)	Irhazer Niger oriental	(1) (2)		
Relations eaux surfaces-nappes	Casamance Fleuve Sénégal	(2) (2)	Fleuve Niger Delta intérieur	(2) (3)	Fleuve Niger Niamey	(2) (2)	Plaine alluviale	
Zone non saturée	Louga Ferlo	(2) (2)	Azaouad	(2)	Niamey Bilma	(2) (3)	Yaérés	(3)
Eaux très anciennes	Casamance Ferlo	(2) (2)	Nord Azaouad	(2)	Irhazer	(2)		
Dépressions piézométriques	Ferlo	(2)	Nara, Azaouad	(2)	Kadzell	(3)		
Activités spécifiques	Etude de la matière organique (tourbes)		Hydrologie de surface		Etude des nitrates			
Laboratoires	Zone non saturée Chimie des eaux	(2) (3)	Chimie des eaux Hydrosédimentologie	(1) (2)	Chimie des eaux Carbone 14	(1) (2)	Chimie des eaux	(2)
Séminaires, ateliers, stages de formation	Hydrologie isotopique Zone non saturée atelier Modèle mathématique atelier	(1) (3) (3)	Hydrologie atelier Hydrologie formation Sédimentologie atelier Sédimentologie formation	(1) (2) (3) (3)	Hydrologie isotopique Hydrochimie atelier Carbone 14 atelier Carbone 14 formation	(1) (3) (3) (3)		
Nouvelles activités	Emploi de traceurs artificiels	(3)			Emploi de traceurs artificiels Kori Téloua	(3)		

Note: Les chiffres entre parenthèses indiquent les travaux achevés (1), en cours (2) et prévus (3).

Activités du projet régional sahélien

au Sénégal, du Centre canadien de recherche pour le développement international (CRDI), du Fonds français d'assistance et de coopération techniques (FACT), de l'Institut universitaire suisse pour les études et le développement (IUED) et de l'Office français de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM).

Partant d'une revue exhaustive des problèmes hydrologiques et hydrogéologiques dans la région et des possibilités d'apport des techniques nucléaires dans ces domaines, le projet a sélectionné une série de thèmes de recherche d'intérêt commun. D'autres activités ont été développées en fonction de leur intérêt et des potentialités locales (voir le tableau).

En dehors des activités propres du projet, la contribution de celui-ci à la réalisation des programmes scientifiques en cours a consisté à

fournir des équipements et des analyses isotopiques, des services d'experts et de consultants, et à octroyer des bourses de formation. La coordination régionale, tout aussi importante, a été facilitée par la présence de l'expert résident et par de fréquents échanges d'informations techniques. Elle s'est notamment concrétisée par la publication et la diffusion des résultats scientifiques obtenus, par l'échange de professeurs, d'ingénieurs ou de techniciens spécialisés entre les pays participants, ainsi que par l'organisation régulière de stages de formation, d'ateliers et de séminaires régionaux.

Grâce à ces activités, entre autres, le projet aide les scientifiques et les ingénieurs des pays du Sahel à mettre en place l'infrastructure technique nécessaire à la reconnaissance et à la gestion efficaces des précieuses ressources en eau de leur région.