

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY

Natural Environment Research Council

TECHNICAL REPORT

Hydrogeology Series

WD/91/11R

RECHARGE OF GROUNDWATER IN SENEGAL

SEMINAR ON THE RESULTS OF ODA PROJECT

W M EDMUNDS

Wallingford British Geological Survey 1990

This report has been generated from a scanned image of the document with any blank pages removed at the scanning stage.
Please be aware that the pagination and scales of diagrams or maps in the resulting report may not appear as in the original

SEMINAR ON THE RESULTS OF ODA PROJECT 'RECHARGE OF GROUNDWATER IN SENEGAL'

INTRODUCTION

During the course of this project it was apparent that considerable interest was being generated in the results and applications due to the wide concerns over the lengthy drought of 1968-1986 and its effect on water supplies. The project had also gained a relatively high profile by the visit of the President to UK and also by the awareness of our work by the Ministry of Rural and Hydraulic Development.

In discussion with the British Embassy in Dakar it was agreed to hold a seminar at the Novotel Dakar to help disseminate the results to a wide local audience of scientists, engineers, administrators and politicians. Since the ODA/BGS project also had links with other related research in Senegal scientists from ORSTOM and other agencies were invited. The results also had direct relevance to the relief and voluntary agencies and so workers from NGO's were invited also, notably World Vision and Oxfam. A full list of invitees was drawn up by the British Embassy in conjunction with the University of Dakar.

The British Geological Survey was responsible for the printing of invitation cards and for defining the scientific programme but all other local arrangements were handled by the British Embassy in Dakar.

PROGRAMME

The final scientific programme is given in Appendix 1. The main presentations were given by W M Edmunds, C B Gaye and J-Ch Fontes who were involved directly in the three-part project. The objective was to give a brief introduction to the objectives of the BGS/ODA project and then to place Senegal and the recent drought in the context of the Sahel region as a whole. This gave an opportunity to introduce some of the earlier results of British and French work in the region which helped to explain some of the methodology used in the present project as well as demonstrating that geochemical techniques have been progressively developed by

our two teams in recent years for the solving not only of recharge problems but also the characterisation of water resources as a whole.

The main presentation of the BGS project results was dealt with in one session after the lunch break. In order to give the simplest explanation of the study a summary sheet (4 pages of A4 - Appendix 2) was prepared in English and French and distributed to all participants. This presentation was followed by discussion from the floor.

The final part of the seminar consisted of a series of short presentations by colleagues also working on projects linked in some way to the BGS project and from whom we had benefitted by collaboration. Dr Aranyossy from the IAEA mission in Senegal had been involved in isotopic work in the West African Sahel and especially in tritium sampling/analysis from our project area. Dr Dreyfus from ORSTOM had been studying nitrogen uptake and release in the semi-arid environment and had worked with us on the role of acacia trees in fixing nitrogen in the research area. Peter Smith from ODA, currently on tour in Senegal, provided the link with the utilisation of water in rural areas, especially the need for water conservation in relation to social and economic factors. This study highlighted the need to define precise water usage and abstraction as part of the water balance.

The seminar was opened by His Excellency Mr C A K Cissoko, the Minister of Rural and Hydraulic Development, the opening session presided over by the Dean of the Faculty of Science of the University of Dakar and introduced by H M Ambassador. A reception for all participants was offered in the evening by H M Ambassador.

Each participant was invited to submit an abstract for the meeting and these are included in Appendix 3 of this report.

IMPRESSIONS

The choice of Novotel for the meeting offered a relatively prestigious setting for the seminar and in general the arrangements for the day passed off smoothly. The early start of the seminar was caused by the programme of the Minister and this

caused some confusion over media coverage of the event. Fortunately the press (TV and photographers) arrived to cover most of the Minister's speech. The seminar was therefore covered in the main evening news bulletins and the TV were able to weave this material in with earlier material from the President's visit to UK as well as with material obtained by earlier video coverage of our project. By all accounts this was a good piece of publicity. Coverage was also achieved by the Soleil and, I believe, other local newspapers.

The seminar was attended by about 100 people of whom about 60 remained throughout the day for the technical sessions. The small room led to an informal atmosphere suited to discussion. Visual aids worked well and in addition posters of the project were mounted on the wall to provide additional information.

The range of participants was excellent and good informal discussions were held during the breaks as well as in the evening reception. I am convinced that we managed to get the essential technical points across as well as demonstrating that our work was well integrated into the total effort on water resources in Senegal. Not least the links between the University and the Ministries were strengthened by the seminar. There are also now, I think, good ties between the French and British teams working on environmental and water problems as a result of our project which should enable new work to be built on this experience.

Appendix 1



Département de Geologie
de la Faculté des Sciences
de l'Université Cheikh
Anta Diop de Dakar
et
Le British Geological
Survey



SEMINAIRE DE PRESENTATION DES
RESULTATS DU PROJET DE RECHERCHE
SUR
LA REALIMENTATION DES NAPPES AU
SENEGAL

Hotel Novotel, Dakar

6eme décembre 1990

SEMINAIRE DE PRESENTATION DES RESULTATS DU PROJET DE
RECHERCHE

LA REALIMENTATION DES NAPPES AU SENEGAL

Novotel Dakar 6 décembre

PROGRAMME

08.00 – 08.30 Accueil et inscription des participants

08.30 – 09.00 Séance d'ouverture

- Représentant M. le Recteur de l'Université C.A. Diop
- Son Excellence M. l'Ambassadeur de Grande Bretagne
- Son Excellence M. Cheikh A.K. Cissoko, Ministre du
Developpement Rurale et l'Hydraulique

09.00 – 09.30 Pause café

9.30 – 12.00 La réalimentation des nappes

Introduction au projet du BGS et de l'UCAD W M Edmunds, British Geological Survey

La réalimentation des nappes et la palaeorecharge dans les pays semi – arides W M Edmunds

Application des techniques géochimiques et isotopiques à l'évaluation des ressources en eau de la bande sahélienne J – Ch Fontes, Université Paris – Sud

Le cadre du Sénégal dans la bande sahélienne, son hydrogéologie et les problèmes de la réalimentation des nappes aquifères C.B. Gaye, Université C.A. Diop de Dakar

12.00 – 12.30 Discussion

12.30 – 14.00 Déjeuner

- 14.00 – 15.30 Résultats du projet du BGS et conclusions W M Edmunds
- Contributions de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar et de l'Université Paris Sud C B Gaye
J – Ch Fontes
- 15.30 – 16.00 Pause café
- 16.00 – 17.15 Projets liés
- Utilisation des isotopes en hydrologie dans les pays du Sahel J F Aranyossy, IAEA (PNUD),
Dakar
- Les acacias et la zone non – saturée B Dreyfus, ORSTOM (Dakar)
- Consommation prévisionnelle et consommation réelle en milieu rural au Sénégal P G S Smith, Overseas Development
Administration, British Embassy,
Dakar
- 17.15 – 17.45 Discussion
- 17.45 – 18.00 Séance de clôture
- 18.30 Réception offerte par SEM l'Ambassadeur de Grande – Bretagne

Origines et historique de la réalimentation des nappes en régions semi-arides

W.M. EDMUNDS
British Geological Survey, Wallingford, UK

Dans beaucoup de régions semi-arides, où la pluviométrie se situe entre 200 et 500 mm/an, on peut mettre en doute la capacité de la pluie à réalimenter les aquifères, tant à l'échelle régionale que locale. Par ailleurs, il est probable que les oscillations des caractéristiques climatiques et de la distribution des pluies observées sur une période de 10 à 1000 ans, donnent lieu à des recharges intermittentes, quelle que soit la région considérée.

L'utilisation de méthodes géochimiques (basées sur les rapports de solutés et d'isotopes), fournissent un moyen de comprendre l'historique des recharges. Des exemples sont donnés par les études préliminaires entreprises à Chypre (où les précipitations annuelles sont de 450 mm) montrant comment les eaux interstitielles de la zone non-saturée ont été utilisées pour estimer la réalimentation directe et établir l'historique des recharges. Ces méthodes, après avoir été développées et améliorées, ont également été utilisées au Sénégal.

Une étude a également été menée dans la région du Butana, au Soudan, où la pluviométrie annuelle est d'environ 200 mm. Il peut être montré que la recharge directe est très basse dans cette région (4 mm/an), en partie à cause de la richesse des sols en argile. Cependant, une réalimentation localisée a lieu le long des oueds, et cela constitue la seule source de renouvellement qui soit capable de soutenir le développement rural. A l'heure actuelle, les populations nomades et sédentaires prélèvent, de manière continue, l'eau des puits profonds. Il est possible de montrer que ces nappes sont fossiles (datant de 7000 ans) et de nos jours, sont en exploitation à façon minier. La seule source de réalimentation alternative, est fournie par le Nil.

Enfin, un exemple est donné des conditions de recharge de nappes fossiles dans le nord de la Lybie. De nos jours, cette région est complètement aride (avec une pluviométrie inférieure à 50 mm) et la réalimentation des nappes y est arrêtée. L'eau du sous-sol est en cours, d'exploitation, en particulier pour le projet du 'Great-Man-Made-River'. L'exploration de

cette région a révélé que le gros des ressources en eaux souterraines est vieux de plus de 20000 ans et est actuellement exploité. Dans la meme région, cependant, des recharges récentes ont été mises en évidence par l'étude des signatures chimiques et isotopiques des eaux souterraines superficielles et profondes. Ces observations peuvent être mises en relation avec les conditions climatiques du passée, correspondant à des intermèdes humides de l'Holocène, où la réalimentation directe, ainsi que la réalimentation des oueds, peuvent être reconnues.

Application des techniques géochimiques et isotopiques à
l'évaluation des ressources en eau de la bande sahélienne.

J .Ch. FONTES
Universite de Paris-Sud

Laboratoire d'Hydrologie
et de Geochime Isotopique

Les aquifères du Sahel se présentent essentiellement sous trois aspects:
1) nappes alluviales actuelles et anciennes liées au réseau de surface
présent et à ses extensions passées, 2) nappes discontinues des régions de
socle ou de roches dites à perméabilité de fracture et dont
l'emmagasinement est généralement dû à un manteau d'altérites et de
colluvions poreuses, 3) nappes profondes, le plus souvent captives, des
bassins sédimentaires.

Le premier type d'aquifère est étudié dans le système de nappes liées au
réseau du Chari/Logone et au lac Tchad d'une part ainsi qu'à la zone du
paléodelta intérieur du Niger d'autre part. Il est montré que la recharge
des nappes libres ou semi-confinées, s'effectue après des degrés variables
d'évaporation en fonction des crues majeures du réseau. Les différents
réservoirs souterrains ne sont pas homogénéisés, sauf dans la cas de
systèmes alimentés par une recharge à travers un couvert dunaire et les
différentes périodes de recharge restent enregistrées dans la teneur en ^{14}C
du carbone dissous des eaux. Ces recharges sont d'âge récent à holocène
moyen dans le cas des nappes de la cuvette du Tchad; elles sont strictement
holocènes et débutent dès le retour à des conditions humides dans
le cas du système lié aux paléocrues du Niger (Fontes et al., 1991). Dans
ce dernier cas, il est possible d'attribuer les précipitations à un
mécanisme comparable aux lignes de grains qui auraient remonté en latitude
d'environ 300 ou 400 km lors du maximum humide holocène (vers environ 9000
a B.P.)

Le deuxième type d'aquifère peut être caractérisé dans les zones du liptako
nigérien (Ousmane et al., 1983) ou dans les régions à affleurements gréseux
du Mali (Dinçer et al., 1983). Les caractéristiques principales sont une
alimentation aisée par les précipitations ou les crues des parties amont
des réseaux qui se trouvent au contact des affleurements fracturés. Les
différents réservoirs sont bien distincts mais chacun d'eux est homogénéisé
par l'effet dispersif des zones poreuses superficielles. Les eaux sont
récentes (quelques années) mais, en certain cas, peuvent atteindre quelques
siècles de temps de séjour moyen. Le datage des eaux souterraines est en
ce cas un élément essentiel d'une gestion prévisionnelle des ressources.

Le troisième type est illustré par l'exemple du système multi-couches de la plaine de l'Irazher au Niger (Joseph, 1990; Andrews et al., à paraître). Les eaux sont anciennes, pratiquement pas ou peu renouvelées et résultent d'un héritage qui englobe au moins deux périodes humides. Elles doivent être considérées comme des ressources minières.

EVALUATION DE LA REALIMENTATION DES NAPPES AQUIFERES AU SENEGAL

Projet de recherche commun entre le British Geological Survey et l'Université Dakar, avec la coopération de l'Université de Paris Sud.
Financement par l'Overseas Development Administration (RU)

W.M. EDMUNDS
British Geological Survey, Wallingford, UK

INTRODUCTION

Dans les régions arides et semi-arides à travers le monde, les eaux souterraines constituent pratiquement les seules ressources pérennes pour l'approvisionnement en eau.

Les nappes phréatiques et les nappes profondes qui se sont constituées au cours des différentes époques, ont pu être réalimentées pendant les périodes climatiques les plus humides.

Dans certaines régions, la pluviométrie actuelle est si faible que l'on a souvent tendance à considérer qu'elle ne permet plus une réalimentation des nappes.

La baisse quasi-continue des niveaux piézométriques que l'on observe dans beaucoup de zones semi-arides, prouve que les aquifères de ces régions sont pour la plupart surexploitées et que les prélèvements dépassent les entrées; par conséquent on procède à une exploitation de type minier de ces ressources en eau. La sécheresse dramatique de ces dernières années au Sahel a mis en évidence la nature précaire du cycle de l'eau dans cette région, comme dans les pays limitrophes des déserts.

OBJECTIFS

Le présent projet a pour objectif de fournir une meilleure évaluation du taux de réalimentation des nappes superficielles au Sénégal. Les méthodes conventionnelles d'estimation de l'infiltration, basées sur l'application de formules incluant la précipitation, l'évaporation et différentes constantes, sont dans l'ensemble d'une application très délicate, voire inadéquate, dans les régions semi-arides où les facteurs pluviométriques sont très variables. C'est pourquoi, nous tentons de mettre au point dans le cadre de ce projet, des techniques améliorées, basées sur l'étude de

certaines propriétés chimiques et isotopiques de l'eau de pluie et des eaux interstitielles de la zone non saturée, dont l'application a été un succès dans différentes régions du monde.

CONCLUSIONS

1. Techniques géochimiques pour l'estimation de la recharge

Le Sénégal offre un environnement idéal pour l'étude de la recharge et des changements climatiques sur le bilan des eaux. Au cours de ce projet, toute une gamme de techniques géochimiques ont été mises en oeuvre pour étudier les problèmes liés à la réalimentation des nappes et à la qualité de l'eau, mais aussi pour étudier les changements climatiques récents que l'on peut tracer dans les eaux interstitielles préservées dans la zone non-saturée. Les techniques géochimiques s'étendent des méthodes isotopiques sophistiquées à l'utilisation de solutés relativement communs, comme le chlorure. Les deux types de mesures ont été utilisés dans cette étude, et sont supportés par d'autres données chimiques. Les rapports en isotopes stables de l'oxygène ($\delta^{18}O$) et de l'hydrogène (δD) sont utilisés pour étudier la molécule d'eau, afin de déterminer le degré d'évaporation de l'eau de pluie, à la fois dans les zones non-saturées. Les chlorures d'origine atmosphérique sont ajoutés aux sols et sont lessivés dans les profils de la zone non-saturée. A la différence de l'eau, le chlorure est conservé dans le profil (c.a.d. qu'il n'est pas perdu par évaporation ou transpiration). En mesurant la concentration en chlorure des eaux interstitielles, en relation avec celle de l'eau de pluie, on peut déterminer la recharge.

Basé sur l'expérience acquise dans d'autres régions du Sahel (à Chypre et au Soudan), ce projet a mis au point la procédure d'échantillonnage de la zone non-saturée. Cette méthodologie est simple et économique, s'appuie sur l'utilisation de la tarière ou des puits traditionnels, et peut être appliquée de manière extensive dans les formations non consolidées. L'échantillonnage et l'analyse des eaux ont été partagés entre les deux équipes du Sénégal et du Royaume Uni. L'utilisation des techniques microanalytiques a permis la détermination de toute une gamme d'éléments réactifs et non-réactifs, qui fournissent une meilleure connaissance des changements liés à la qualité des eaux. Tout au long du projet, l'accent à

été placé sur le développement de méthodes géochimiques qui soient simples, reproductibles et applicables en terrains isolés.

2. Réalimentation des nappes aquifères

Des profils de 10 à 35 m de profondeur ont été obtenus dans la zone de Louga, au nord-ouest du Sénégal, où la pluviométrie annuelle, pendant les 18 ans qui s'étendent de 1969 à 1987, n'était que de 223 mm, à comparer avec les 356 mm correspondant à la moyenne à long terme. Un site de recherche d'environ 1 km² a été établi dans une région assez homogène de dunes fixes, à l'ouest de Louga, afin de déterminer la recharge directe pour des sites individuels, ainsi que la variabilité spatiale de la recharge. On a complété sept profils pour lesquels on a obtenu les concentrations en chlorures moyennes des eaux interstitielles. Les valeurs s'étendent de 23 à 114 mg/l Cl, avec une moyenne de 81.2-48.0 mg/l Cl. On observe donc, à l'intérieur d'une zone peu étendue, des variations considérables de la chimie que l'on peut attribuer aux quantités d'argile présentes dans les sols, ainsi qu'à l'étendue de la végétation. La recharge directe (Rd) peut être calculée à l'aide de la relation

$$Rd = P.Cp/Cs$$

~

dans laquelle P est la pluviométrie moyenne, Cp est la concentration moyenne due chlorure dans les précipitations et Cs est la concentration moyenne du chlorure dans les eaux interstitielles. Si l'on choisit une valeur de 310 mm pour P, soit la moyenne approximative des 60 dernières années, et une valeur de 2.8 mg/l Cl pour Cp, la gamme des valeurs pour la recharge au site de Louga, varie de 7.6 à 36 mm par an, avec une moyenne de 10.5 mm. Les techniques de profil géochimique peuvent fournir des estimations de recharge, aussi bien pour un site individuel, que pour toute une région, par l'intégration des données relatives à plusieurs profils.

En comparaison des méthodes traditionnelles, la méthode des chlorures présente un autre avantage. En effet, la concentration en chlorure moyenne du profil représente la recharge moyenne pour une période s'étendant sur plusieurs années, en général plusieurs décades dans le cas du nord-est du Sénégal. Cela est en contraste avec les méthodes traditionnelles, pour lesquelles on obtient les résultats à l'échelle quotidienne. La méthode des chlorures agit donc comme une station pluviométrique cumulative.

D'autres profils forés dans le nord-ouest du Sénégal donnent une meilleure indication de la recharge dans cette région. Deux sites au nord de Louga ont donné des valeurs de 50 et 230 mg/l Cl correspondant, respectivement, à des recharges de 17 et 4.6 mm/an. Plus au nord, près de Mpal, des valeurs plus faibles de la recharge, aux environs de 1 mm, sont indiquées par de hautes concentrations en chlorures. Cette recharge plus faible témoigne probablement de la présence de sols plus argileux dans cette région, en comparaison avec la zone centrale dans laquelle les dunes de sable sont mieux développées.

Dans la région de Louga, les résultats obtenus à partir des profils ont été confirmés par les concentrations en chlorures mesurées dans la nappe phréatique. Les échantillons prélevés dans les puits traditionnels représentent l'eau qui à juste atteint la nappe. Il existe une bonne corrélation entre ces résultats et ceux obtenus à partir des profils. Dans la cas présent, on peut montrer que les chlorures sont fournis presque exclusivement par l'atmosphère, et ne proviennent en aucun cas de la formation géologique. En conséquence, les deux types de données, que ce soit les profils ou les échantillons des puits, peuvent être utilisés pour l'estimation de la recharge. La carte régionale des chlorures permet d'obtenir des estimations pour l'entièreté de la nappe phréatique. Dans la région de Louga, la recharge est estimée à $13000 \text{ m}^3 \text{ km}^2/\text{an}$. Cependant, dans la zone de Mpal, les estimations régionales varient par un ordre de magnitude, à $1100 \text{ m}^3 \text{ km}^2/\text{an}$.

Dans la zone de Kaolack-Nioro, on a obtenue des estimations de la recharge dans l'aquifère du 'Continental Terminal', à partir de 4 profils. Ces derniers ont des concentrations de chlorures moyennes de 63 mg/l et des taux de recharge de 64 mm.

Des recherches menées en parallèle par nos collègues de l'IAEA, ont déterminé le tritium dans l'eau de la zone non-saturée pour la région de Louga. Ces données fournissent une vérification indépendante de la méthode des chlorures pour l'estimation de la recharge.

3. La Recharge et l'histoire de l'environnement

L'information contenue dans les profils peut être utilisée, par l'intermédiaire de la valeur moyenne, pour estimer la recharge correspondant à plusieurs décennies. En plus de cela, chaque profil garde une trace de l'évolution du climat et de l'environnement. Les chlorures, ainsi que les autres ions, sont transférés vers la nappe à la façon d'un piston, à des vitesses variant de 10 à 100 cm/an. On peut grâce à cela calibrer chaque profil chronologiquement, en supposant que l'entièreté des chlorures provient de l'atmosphère.

Dans certains profils, il est possible de reconnaître l'histoire de la sécheresse sahélienne (1969-1986) par une zone de salinité plus élevée. Les teneurs en isotopes stables (oxygène $\delta^{18}\text{O}$ et hydrogène δD) mesurées dans les profils, confirment que les zones de salinité plus élevées résultent de l'évaporation dans le sol. L'histoire de ces événements est gardée en mémoire dans le profil. Dans d'autres endroits, les renseignements sont moins clairs, et l'on considère qu'une redistribution dans le profil a été induite par la végétation. L'observation de ces profils remonté à 100 ans, et l'on peut penser que l'étude de ces données permettrait de comprendre les effets des changements du climat et de l'environnement pour des périodes de temps variant de la décennie au siècle et peut-être au millénaire.

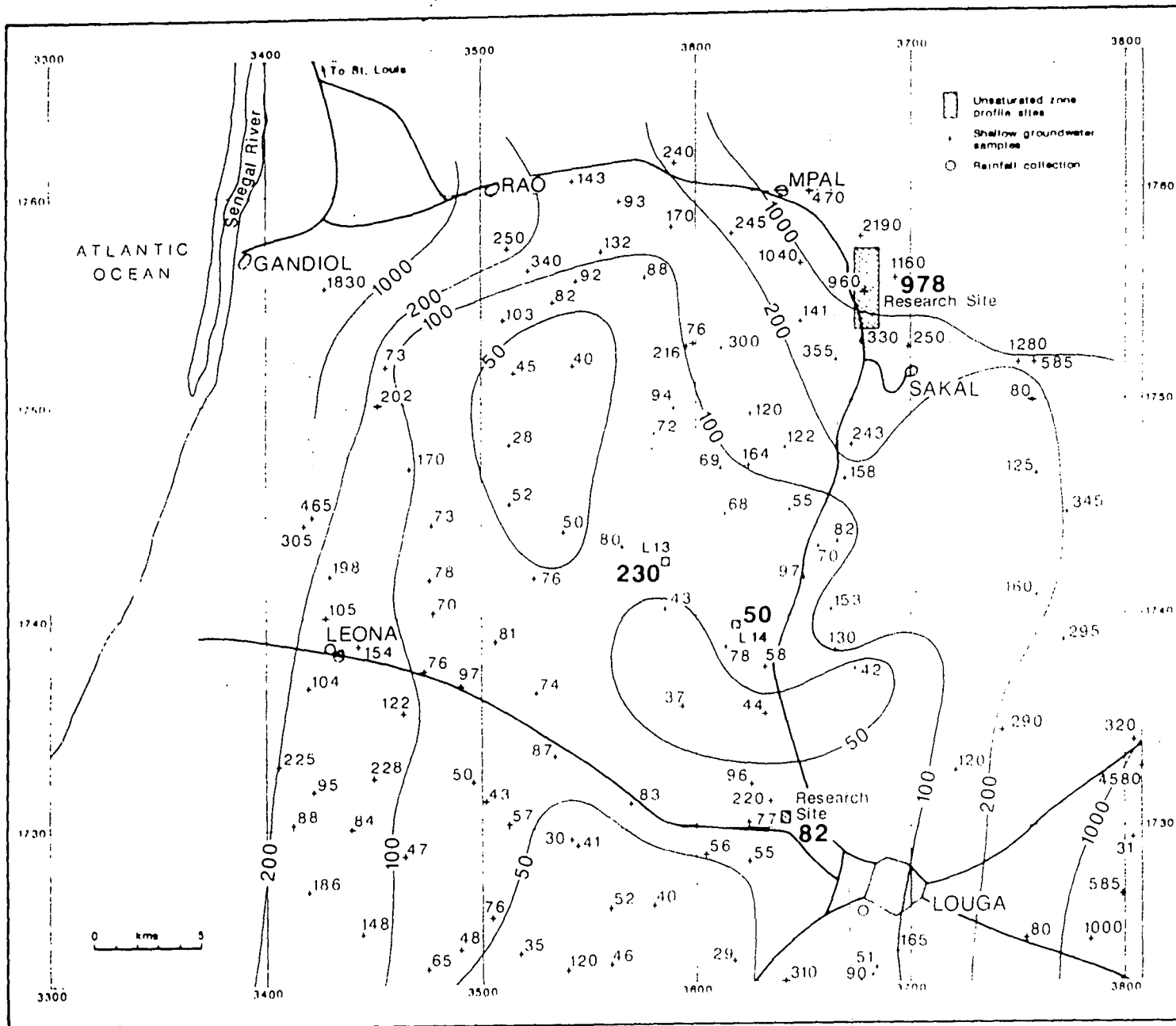
La qualité des eaux

En plus de l'estimation de la recharge, les concentrations en nitrates de la zone non-saturée (et saturée) fournissent des informations importantes sur la qualité des eaux rurales. Des concentrations élevées en nitrates, souvent supérieures à 10 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$, ont été trouvées dans les nappes superficielles. On peut expliquer ces valeurs à l'aide des données obtenues dans la zone non-saturée et présentées ci-dessus. L'incidence de la pollution minérale d'origine humaine apparaît comme négligeable. Les eaux que l'on extrait de la nappe à l'heure actuelle, datent de 60 à 100 ans. Les eaux de la zone non-saturée sont généralement acides (pH 4.5-6.5), sauf près de la côte ou vers l'est, où l'on trouve des calcaires. Les eaux souterraines à bas pH donnent lieu à des concentrations élevées en fer (pres de Léona), en aluminium, ainsi qu'en d'autres métaux.

Table x. Mean annual recharge at Louga research site

PROFILE NAME	INTERVAL i (m)	MEAN RAINFALL P	MEAN CHLORIDE IN RAINFALL C _p	MEAN CONC. OF CHLORIDE IN PROFILE C _{s_i}	MEAN ANNUAL RECHARGE R _d
LOUGA 2	1.5 -16.0*	290	2.8	27.9	29.1
LOUGA 3	2.5 -25.0*	290	2.8	81	10.1
	2.5 - 4.5	290	2.8	61	13.1
	4.5 - 9.0	290	2.8	134	6.1
	9.0 -25.0	290	2.8	70	11.6
LOUGA 5	1.5 -12.5*	290	2.8	73	11.1
LOUGA 6	1.0 -13.5*	290	2.8	80	10.1
LOUGA 11	1.0 -15.5*	290	2.8	115	7.1
	1.0 -14.0	290	2.8	89	9.1
	14.0 -15.5	290	2.8	340	2.4
LOUGA 12	1.0 -14.0*	290	2.8	175	4.6
	1.0 - 4.5	290	2.8	503	1.6
	4.5 -14.0	290	2.8	54	15.0
LOUGA 18	1.5 -35.5*	290	2.8	23.6	34.4
	1.5 - 6.3	290	2.8	6.1	133.0
	6.25-11.5	290	2.8	34.5	23.5
	11.5 -18.5	290	2.8	25.1	32.4
	18.5 -27.5	290	2.8	14.9	54.4
	27.5 -31.5	290	2.8	42.7	19.0

* +



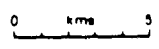
HYDROCHEMICAL DISTRIBUTION OF CHLORIDE - LOUGA AREA

345 Cl in mg l^{-1}

—100— Isochlors

230 Mean value of chloride for the unsaturated zone

- Unsaturated zone profile sites
- Shallow groundwater samples
- Rainfall collection



UTILISATION DES ISOTOPES EN HYDROLOGIE DANS LES PAYS
DU SAHEL

J.F. ARANYOSSY

Agence International Energie Atomique
(AIEA), PNUD Dakar

L'évaluation de la recharge des nappes et des pertes évaporatoires reste l'un des problèmes hydrologiques majeurs, commun à tous les pays arides et semi-arides. Dans le cadre des activités du projet régional AIEA "sur l'application des techniques nucléaires en hydrologie dans les pays du Sahel", deux méthodologies sont actuellement utilisées afin de contribuer à l'estimation des ces paramètres: (1) calcul du flux évaporatoire diffus à travers le sol par modélisation des profils en isotopes lourds dans la zone non saturée (ZNS): (2) évaluation de la recharge à partir de la recharge à partir de la localisation du pic d'activité en tritium dû aux expériences thermonucléaires atmosphériques.

L'interprétation des profils en isotopes lourds dans la ZNS concerne la région hyper-aride de Bilma (extrême-Est du Niger) où les caractéristiques hydrogéologiques et climatiques assurent des conditions idéales d'évaporation en régime permanent, conformes au modèle théorique de Barnes et Allison (1983).

Si la recherche du "pic de tritium" ne peut plus être appliquée dans les zones humides (car celui-ci a généralement atteint la nappe), cette méthode peu être cependant encore utile dans les régions arides et semi-arides. En effet, dans les secteurs à surface piézométrique profonde où les flux nets mis en jeu ont des valeurs très faibles (et sont en-cesti inaccessibles par la mesure des paramètres hydrodynamiques) on peut espérer retrouver, dans l'eau interstitielle de la ZNS, la marque du pic d'activité provenant de l'infiltration des précipitations du début des années 60. C'est ce qui est tenté dans la région semi-aride du Nord Sénégal où la nappe se situe à plus de 35 m de profondeur. Un premier profil effectué en 1989 montre en effet une augmentation significative de la teneur en tritium entre 15 et 20 m de profondeur. Un second profil de 34 m de profondeur est en cours d'analyse. En cas de résultats favorables, l'étude sera complétée par la recherche du pic de Cl-36 provenant des explosions thermonucléaires marines. Cette application permettrait une double vérification de l'infiltration efficace durant les trois dernières décennies.

RECHERCHES COMPLEMENTAIRES SUR LES VEGETAUX PHREATOPHYTES.

RESULTATS RECENTS SUR LA FIXATION BIOLOGIQUE DE L'AZOTE

PAR L'ACACIA ALBIDA DANS LA REGION DE LOUGA

Nicolas DUPUY, Bernard DREYFUS ; ORSTOM

Cheikh B. GAYE, Jean François ARANYOSSY ; UNIVERSITE Cheikh Anta Diop.

Nous avons récemment découvert dans la région de Louga que d'importantes populations de bactéries vivaient en profondeur au niveau des nappes phréatiques sous les *Acacia albida* (Kad en Ouolof). Ces microorganismes sont des bactéries fixatrices d'azote, appelées *Rhizobium*, étroitement associées aux racines profondes de l'*Acacia albida*, qui, chez cette espèce phréatophyte, peuvent atteindre 35 à 40 m.

Contrairement aux autres arbres sahéliens, l'*Acacia albida* présente la particularité unique de porter ses feuilles en saison sèche et de les perdre en début de la saison des pluies. Dans l'Afrique sahélienne, ce rythme de feuillaison inversé explique son utilisation traditionnelle par les pasteurs et les paysans : les troupeaux disposent pendant la longue saison sèche d'un excellent fourrage aérien et les cultures de saison des pluies bénéficient d'un sol enrichi en éléments nutritifs par la chute des feuilles.

On savait déjà que le jeune plant d'*Acacia albida* possède l'avantage de transformer directement l'azote de l'air en engrais azoté, grâce aux nodules fixateurs d'azote formés sur ses jeunes racines par les *Rhizobium*. Cette symbiose commune à de nombreuses autres légumineuses, permet au jeune arbre de disposer d'un engrais naturel et à la bactérie symbiotique de consommer les produits de la photosynthèse fournis par les feuilles.

Cependant, on pensait généralement que la fixation biologique de l'azote par l'arbre adulte n'intervenait que très faiblement dans l'amélioration des sols.

La découverte des *Rhizobium* en profondeur permet donc pour la première fois d'expliquer les propriétés fertilisantes de l'*Acacia albida* et l'augmentation importante des teneurs en azote du sol sous cet arbre. Le rôle de la fixation biologique de l'azote au niveau des nappes dans le cycle de l'azote, et en particulier dans l'accumulation des nitrates sera discuté.

CONSOMMATION PREVISIONELLE ET CONSOMMATION REELLE EN MILIEU RURAL
AU SENEGAL

P.G.S. SMITH

Overseas Development Administration, British Embassy, Dakar

Parmi les données prises en compte pendant l'élaboration d'un projet pour l'approvisionnement en eau, la consommation par habitant est un des plus importants. Les dimensions de tous les éléments individuels dépendent de cela, et il y a des conséquences importants pour d'autres aspects tel que l'entretien et la maintenance, les coûts, les cotisations, etc.

Ce bref exposé présente des observations obtenus pendant les deux dernières années, sur l'utilisation de l'eau dans l'ensemble des villages concernés par un tel projet. On remarque des divergences importants entre les prévisions et ces observations. Ceci pourrait engendre des conséquences sur la définition des critères à utiliser dans les projets futurs, et les choix d'investissement.

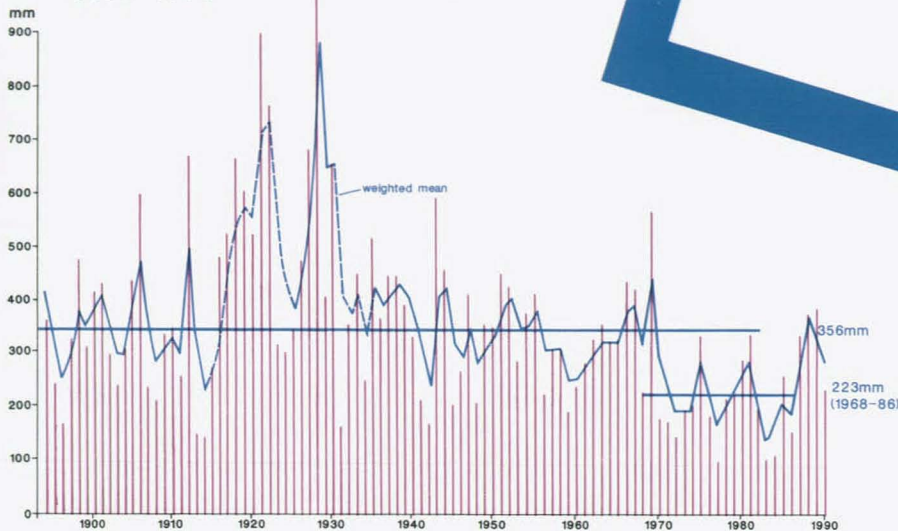
Les observations de la quantité réelle de l'eau consommée démontrent que celle-ci est nettement inférieure à la quantité prévisionnelle. Au lieu d'être mis en marche pour, par exemple, dix heures par jour (300 hrs/mois), la majorité des moteurs ne marchent que pour 40 à 100 hrs/mois. La raison la plus importante qui explique cette situation est une consommation par habitant inférieure aux prévisions pour la consommation domestique. Les consommations par le bétail et pour la maraîchage constituent la principale utilisation de l'eau. Egalement, il y a des divergences saisonnières importants, surtout dans les villages où l'élevage est une activité importante, et en plus si la population pratique la maraîchage.

Cet exposé recherche les causes pour la consommation réduite ainsi constatée, y compris les éléments financier, technique, et sociologique. La nécessité pour la sensibilisation et la formation des villageois est à souligner.

En effet des réponses appropriées devraient être apportées quant au comportement des consommateurs. Dans le contexte d'un financement assez limité, la capacité des moyens d'exhaure inutilisée actuellement est une perte importante, qui aurait pu être utilisée pour la construction d'un plus grand nombre de projets à petite échelle. Cela répondrait mieux, peut être, aux besoins de la population rurale. Ceci constituerait en même temps une occasion d'utiliser une technologie plus appropriée et plus facile, avec des avantages pour l'entretien et la maintenance. D'ailleurs, sur le plan économique, il semble que les villageois, du moins pour certaines zones, n'ont pas la même appréciation de l'eau que les concepteurs des projets.

ESTIMATION OF RECHARGE TO AQUIFERS IN SENEGAL

Rainfall at St. Louis
1893-1990

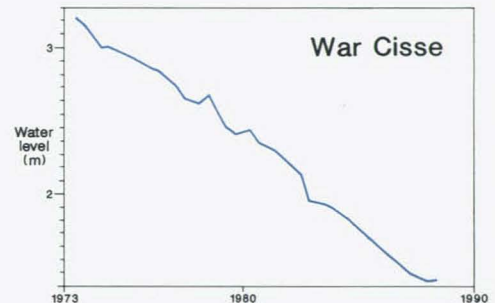


Record of the Sahel drought (1968-86) in Senegal (left) and declining phreatic groundwater levels at Ware Cisse, northern Senegal

The Problem: lower rainfall—falling water tables.

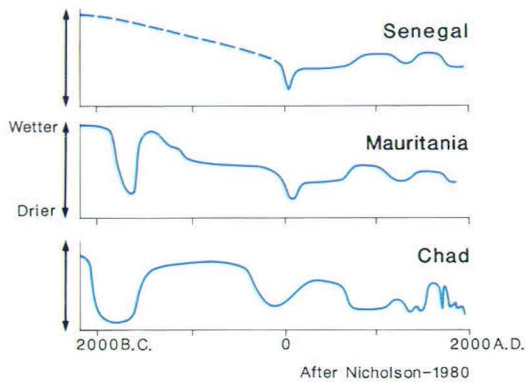
In semi-arid regions of the world groundwater is likely to be the only perennial source of water supply. Some aquifers may only have been recharged by rain falling during wetter climatic periods and groundwater is effectively being mined. Elsewhere present day rainfall may be too low under certain conditions to provide significant replenishment. What therefore is the amount of groundwater that can be safely and sustainably abstracted? Recent research in Senegal has developed a simple yet powerful geochemical technique for estimating both the current recharge and the recharge history. This makes use of the chemical and isotopic information contained in the water of the unsaturated zone.

This project has been set against the recent catastrophic Sahel drought which in Senegal resulted in an 18-year period with a 36% fall in rainfall. At the same time there has been a steady decline in water levels, typically 0.1-0.2 metres per year. This has presented serious problems particularly to villagers who rely on water supplies from traditional wells.

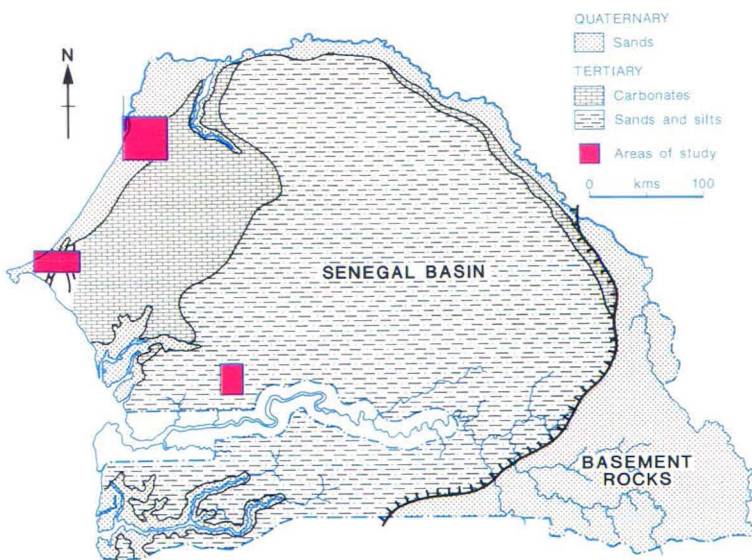
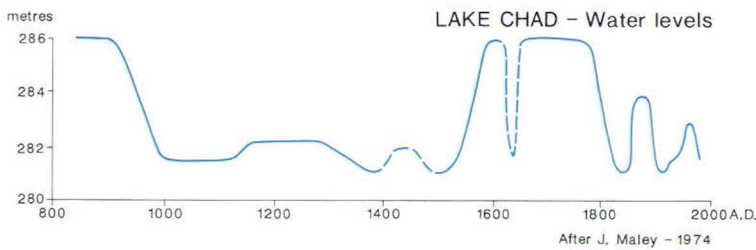


Climatic history of West Africa in historic times

It has been possible to construct a history of climate change before rainfall records began by studies of the geological record. Careful study of lake and marine sediments, fauna (diatoms, shells etc) and archaeological records by various scientists has enabled the sequence of wetter and drier episodes of past millennia to be reconstructed. Wetter periods correspond to times of significant groundwater recharge.



Climatic changes in Senegal during the past four millennia set against the detailed record for Lake Chad, shown in more detail below



Simplified geological map of Senegal with sites of present investigations. Sandy superficial deposits (Quaternary) overlie much of the country

Senegal

Senegal has undergone important climatic changes in the past millennia and the excellent record of lake levels of Lake Chad may be used to supplement the relatively incomplete record for West Africa. The significantly wetter climate of the 17th and 18th centuries is confirmed from historical journals, in which mangrove swamps and former lakes are reported in the vicinity of the Senegal River. The geology of Senegal is dominated by a sedimentary basin. Many sandy sediments in the basin as well as overlying dune sands are ideal for sampling in the present investigations.



Sampling the unsaturated zone using hand-auger

Methods of investigation

Profiles of sand have been obtained by one of two methods 1) using a lightweight hand auger, 2) by sampling dug wells being constructed for water supply by government teams or non-governmental organisations. The auger technique is rapid and relatively cheap and profiles up to 35 m have been obtained, some to the water table. The water in these samples, taken at 25 or 50 centimetre intervals, is extracted by elutriation or centrifugation for chemical analysis, and by distillation for the investigation of stable isotope ratios (oxygen and hydrogen). Moisture contents were also recorded.

The small volumes of water obtained (5–10 millilitres) are sufficient for measurement not only of chloride but for a substantial range of other elements using ICP emission spectrometry, which provide information on geochemical evolution, past environments and recharge history.

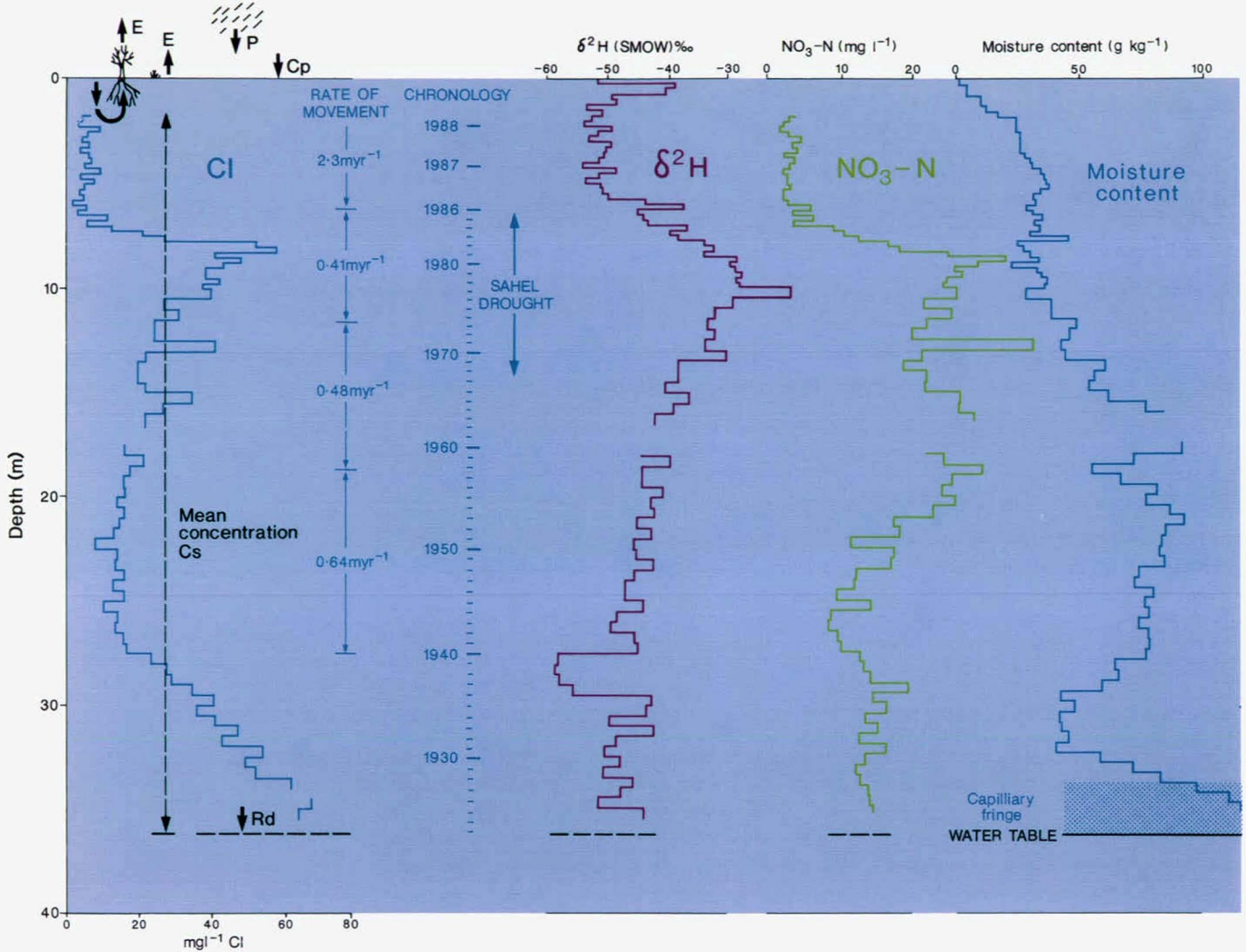
Water samples were also obtained from shallow wells in the vicinity of the research area. These provide a regional assessment of groundwater chemistry concentrations which enable improved estimates of recharge (using chloride) to be made as well as studying quality problems associated with the use of traditional wells.

Geochemical profiles in water in the unsaturated zone

Interpretation of profiles

The chemical information in the pore waters can be interpreted to give 1) recharge estimates, 2) recharge history, 3) water quality and potential pollution problems.

Chemical profiles of water in the unsaturated zone



Estimation of recharge

One of 13 profiles from the Louga area is used to illustrate the technique. This profile reached the water table at 36 m. The surface runoff in this sandy terrain is negligible and the direct recharge (R_d) may be calculated from the equation:

$$R_d = PC_p / C_s$$

where P is the relevant mean annual precipitation, C_p is the mean chloride in rainfall and C_s is the mean chloride in the profile. In this example $R_d = 45$ mm.

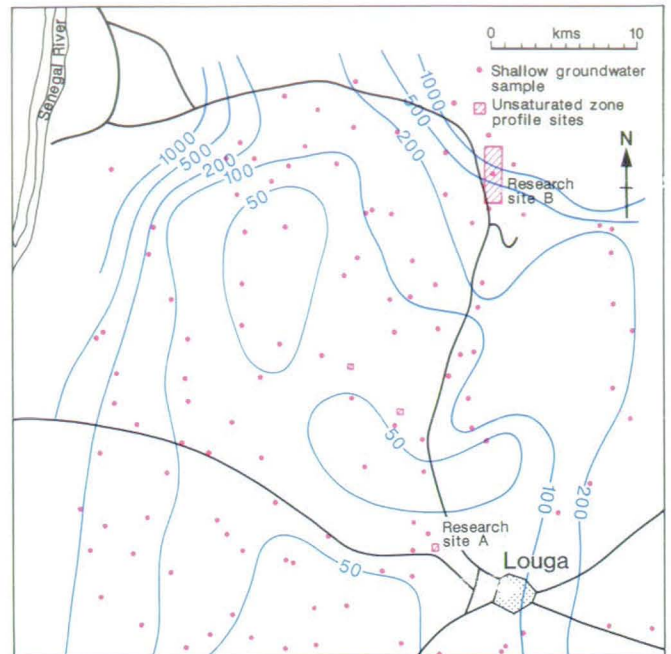
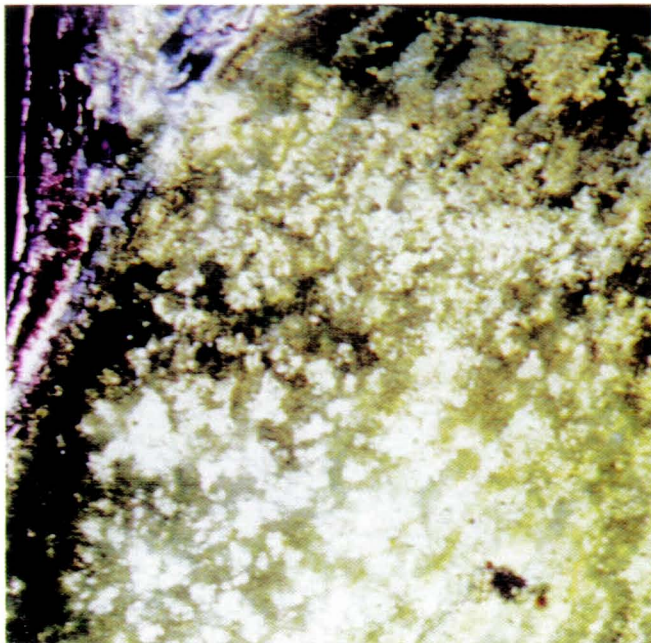
Recharge history

Using the moisture content it is then possible to calculate the rate of downward movement and thence the residence time. The recharge estimate derived above is an average for a 60 year period, i.e. the water now entering the aquifer fell as rain in about 1930. The

oscillations of chloride show that the recharge rate has not been constant. The period of Sahel drought can be seen as a zone of high chloride concentrations. This is also emphasized by the less negative values for δ^2H which show that the water from this period is enriched in the heavy isotope, deuterium, as a result of greater evaporation during the drought. Other profiles with higher chloride concentrations and/or from greater depths may enable the recharge history over periods up to two thousand years (or more) to be determined.

Water quality

The chemical analyses provide further information on inputs to the aquifer (both natural and man-made). Of interest here are the high concentrations of nitrate. These values often in excess of 10 milligrams/litre NO_3-N , are unrelated to pollution but arise from natural fixation by plants or micro-organisms, with subsequent concentration by evaporation.



LANDSET 4 Photograph (9.2.86) of north-west Senegal and region sampled in the water quality and recharge study. Cultivated areas stand out white around villages in contrast with natural vegetation (green). On the map contours of chloride concentration (blue) in waters from shallow wells are used to compare with profile data and to estimate recharge at a regional scale. Research sites show in red

Recharge on a regional scale

The techniques developed here enable long-term recharge estimates to be made at one point on the map. Measuring recharge for an area is one of the most difficult problems in hydrogeology—not least as a result of spatial variability due to changes in vegetation, soil type and texture, slope etc. The geochemical techniques nevertheless enable a number of points within a region to be assessed and integrated. Within the one square kilometre control area A west of Louga, 7 profiles gave a mean Cs of 82 milligrams per litre of chloride, corresponding to a long-term recharge of 13 mm per year. The variability as measured by the standard deviation (± 42 milligrams per litre) is consistent with the present and recent vegetation contrasts within the sand dune areas.

Fortunately the regional recharge rates can be cross-checked using the chloride concentrations in water samples from below the water table, taken from traditional wells. The chloride map (above) suggests relatively high recharge in the central region, but much lower recharge in the north and east where changes to a less permeable lithology occur. Since chloride is only derived from atmospheric sources, the regional map can be used to produce areal estimates of recharge. For area A the recharge to groundwater is estimated at 13 000 cubic metres per square kilometre but in area B is considered to 1100 cubic metres per square kilometre of more brackish water. Overall this area has very favourable recharge characteristics. Natural recharge far exceeds domestic water used by traditional village methods (some 300 million litres per square kilometre per year), even during a drought when recharge may be halved. The falling water tables in Senegal are most likely to be due to the short-term low rate of recharge seen by the aquifer, exacerbated by natural leakage or abstraction from deeper aquifers; a more precise water balance is still required.

Reference

EDMUNDS, W M, DARLING, W G and KINNIBURGH, D G. 1988. Solute profile techniques for recharge estimation in semi-arid and arid terrain. pp 139–157 in: I Simmers (ed.). *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. D Reidel.

Further enquiries:

Hydrogeology Research Group
British Geological Survey
Maclean Building
Crowmarsh Gifford
Wallingford, Oxon OX10 8BB
Tel: 0491-38800 Telex: 849365

or

Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université Cheikh Anta Diop. Dakar. Senegal.

This study has been carried out in collaboration with the Université de Paris-Sud.

Funding for British Geological Survey (BGS) research into recharge estimation is provided by the Overseas Development Administration (ODA). BGS is a component body of the Natural Environment Research Council (NERC)



Département de Géologie
de la Faculté des Sciences
de l'Université Cheikh
Anta Diop de Dakar
and
British Geological Survey

