



MAURITANIE



SÉNÉGAL

Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel

RAF/7/011

BASSIN
SÉNÉGALO-MAURITANIEN

2017

NOTE D'ORDRE RÉDACTIONNEL

Le présent rapport n'est pas une publication officielle de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Son contenu n'a pas fait l'objet d'un examen officiel par l'AIEA. Les opinions exprimées ne reflètent pas nécessairement celles de l'AIEA ni de ses États Membres. L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique de la part de l'AIEA, aucune prise de position quant au statut juridique de ces pays ou territoires, ou de leurs autorités et institutions, ni quant au tracé de leurs frontières. La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'AIEA.

RAPPORT DU PROJET RÉGIONAL DE COOPÉRATION TECHNIQUE APPUYÉ PAR L'AIEA RAF/7/011

BASSIN SÉNÉGALO-MAURITANIEN

CONTREPARTIES:

M. Mouhamadou Doudou FALL (Sénégal)

M^{me} Ndeye Khoudia Sarr FALL (Sénégal)

M. Brahim Labatt HMEYADE (Mauritanie)

M. Sidi Haiba BACAR (Mauritanie)

EXPERT:

M. Yves TRAVI (France)

**Reproduit par l'AIEA
Vienne (Autriche) 2017**

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1. Problèmes d'eau spécifiques dans le bassin cible	1
1.2. Études sur les isotopes et l'hydrochimie réalisées précédemment dans la zone cible et résultats	2
1.3. Objectifs du projet RAF/7/011 dans le bassin cible	4
2. SITES D'ÉTUDE	5
2.1. Localisation, topographie générale	5
2.2. Climatologie	6
2.3. Hydrologie	8
2.4. Types de végétation et utilisation des sols	10
2.5. Géologie et hydrogéologie	12
2.6. Approvisionnement en eau et gestion des ressources en eau dans le bassin	15
3. OBTENTION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉE	17
4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	21
4.1. Caractérisation chimique et isotopique générale	21
4.2. Recharge des systèmes aquifères des deux côtés du fleuve Sénégal	27
4.3. Salinisation: processus généraux et localisation de la limite dans l'aquifère du Maastrichtien	33
5. CONCLUSIONS	38
6. RÉFÉRENCES	42
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	44
ANNEXES	45

1. INTRODUCTION

1.1. Problèmes d'eau spécifiques dans le bassin cible

Le bassin sénégal-mauritanien, qui s'étend en partie sur la Mauritanie, le Sénégal, la Gambie et la Guinée Bissau, est le plus grand bassin de la marge atlantique du nord-ouest de l'Afrique et couvre environ une superficie de plus de 300 000 km². Il se situe approximativement entre 10° (limite sud) et 21° (limite nord) de latitude nord.

Le bassin est constitué de trois systèmes aquifères principaux qui contiennent des ressources en eaux souterraines exploitées : i) le système aquifère superficiel qui couvre de manière souvent discontinue la totalité du bassin, ii) le système aquifère intermédiaire, qui comprend des formations de carbonate éocènes et paléocènes et iii) le système aquifère profond. Ce dernier, datant principalement du Maastrichtien, couvre la quasi-totalité du bassin sédimentaire et a un potentiel hydrogéologique variable. C'est le seul aquifère transfrontière commun au Sénégal, à la Gambie, à la Mauritanie et à la Guinée-Bissau. Le projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA est le premier à tenter de régler des questions hydrogéologiques communes.

Malheureusement, même si des contacts et des échanges ont été établis avec les autorités de la Gambie et de la Guinée Bissau, il n'a pas été possible de mettre en place un projet conjoint avec ces deux pays, car ils ne sont pas membres de l'AIEA. Par conséquent, seuls le Sénégal et la Mauritanie ont officiellement participé au projet. En outre, vers le nord, à la frontière avec la Mauritanie, l'aquifère du Maastrichtien n'est pas véritablement exploité parce que son eau est de très mauvaise qualité et que la conductivité hydraulique y est très faible. Le projet vise donc principalement à étudier et à évaluer les problèmes communs plutôt qu'à étudier et à gérer le même aquifère.

Les principaux problèmes hydrologiques bien connus des zones arides ou semi-arides sont notamment la recharge, la paléorecharge et la salinisation. La recharge peut résulter d'une infiltration directe de précipitations, d'une infiltration latérale d'eau fluviale ou d'eau de crue, ou de fuites ascendantes d'aquifères profonds. On retrouve ces trois différents cas au Sénégal et en Mauritanie. Dans ce contexte, le fleuve Sénégal, qui sépare les deux pays, peut jouer un rôle déterminant en reconstituant les aquifères frontaliers des deux pays. L'infiltration actuelle ou ancienne d'eau de mer (ce cas se présente en Mauritanie et au Sénégal) ou le mélange avec

des eaux profondes connées (ce cas se présente au Sénégal) peut être à l'origine de la salinisation. L'eau peut également être concentrée par évaporation. Il est démontré depuis longtemps que les techniques isotopiques peuvent se révéler très utiles pour s'attaquer à ces problèmes, en particulier quand elles sont combinées avec des données hydrogéologiques et hydrochimiques.

1.2. Études sur les isotopes et l'hydrochimie réalisées précédemment dans la zone cible et résultats

De nombreuses études sur les isotopes et l'hydrochimie ont été menées au Sénégal depuis les années 1970, contre seulement quelques-unes en Mauritanie. Il s'agit de travaux universitaires (thèse, publications, rapports...) ou de projets AIEA/ONU, parfois réalisés conjointement.

Travaux universitaires

Les principaux travaux menés sont notamment les suivants :

Pour le Sénégal : Thèse de Gaye (1980, 1990), thèse de Faye A. (1983, 1994), thèse de Diagana (1994), thèse de Travi (1988), thèse de Sarr (2000), thèse de Faye S. (2005), thèse de Diaw M. (2008) et thèse de Madioune Diakher (2012).

Pour la Mauritanie : Thèse de Semega (1995), thèse de Mohamed (2012).

Projets réalisés précédemment appuyés par l'AIEA, l'ONU ou d'autres organismes internationaux dans la zone cible

-

- Sénégal

Projet du Programme des Nations Unies pour le développement (Fonds spécial), SEN 9 (1972) appuyé par l'AIEA. Ce projet a pour objet d'étudier les isotopes de l'environnement : « Studies/Establishment of a Master Plan for Water Supply and Sewerage for the city of Dakar ». Cette première étude, menée à proximité de la ville de Dakar, a permis de mettre en évidence le caractère hétérogène de la recharge dans l'aquifère superficiel et le rôle de barrière joué par certaines failles à la limite de la structure du Horst de Ndiass.

Numéro de contrat de recherche 9862/RB : « Étude des isotopes du milieu dans les principaux aquifères du bassin sédimentaire du Sénégal » (1981-1983). Cette étude a été menée par le Département de géologie de l'Université de Dakar. Des isotopes stables de la molécule d'eau, du tritium et du carbone 13/carbone 14 ont été utilisés dans le cadre de cette première étude

isotopique mondiale. Des échantillons ont été prélevés dans environ 130 sites des différents aquifères du bassin sédimentaire du Sénégal.

Projets nationaux appuyés par l'AIEA, SEN/002 (1984) et SEN/003 (1987). Ces projets étaient axés sur certains sous-bassins en particulier : la partie ouest du bassin du fleuve Sénégal, située autour du Horst de Ndiass, et le sous-bassin de la Casamance. Ces deux projets permettent de mieux préciser les conditions de recharge des aquifères superficiels (recharge directe résultant d'une infiltration de précipitations et de fuites ascendantes de l'aquifère profond du Maastrichtien).

Projets nationaux de coopération technique appuyés par l'AIEA, SEN/8/005 et SEN/8/006 (2002-2005). L'étude hydrogéologique de l'aquifère profond du Maastrichtien a fourni de nouvelles données hydrochimiques et isotopiques permettant de mieux comprendre la structure de l'aquifère et l'écoulement des eaux souterraines, et leur impact sur la minéralisation.

Projet régional appuyé par l'AIEA, RAF/8/012 (1987-1992). Quatre pays (Sénégal, Mali, Niger et Cameroun) ont participé au projet intitulé « Développement des techniques isotopiques en hydrologie dans les pays du Sahel ». Ce projet appuie les études menées dans le cadre du projet SEN/8/003 de l'AIEA en étendant la zone étudiée aux aquifères de roche dure situés dans l'est du Sénégal et à l'aquifère du Continental Terminal situé dans la plaine centrale de Ferlo. L'interconnexion entre les eaux fluviales (fleuve Sénégal) et les eaux souterraines locales a également été évaluée, de même que l'infiltration de précipitations dans la zone non saturée.

Projet modèle régional, RAF/8/022 (phase I) (1995-1998). Quatre pays ont participé à ce projet : l'Égypte, l'Éthiopie, le Maroc et le Sénégal. Le projet visait à appliquer des techniques isotopiques en menant en parallèle d'autres études hydrogéologiques pour résoudre des problèmes pratiques liés au développement et à la gestion optimale des ressources en eaux souterraines. L'objectif au Sénégal était d'avoir un impact socioéconomique significatif sur l'approvisionnement en eau de plus de 1,5 million de personnes dans la région de Dakar, principalement autour des aquifères du Horst de Ndiass.

-

- **Mauritanie**

Projet national appuyé par l'AIEA, MAU/8/002. Le projet intitulé « Utilisation des techniques d'hydrologie isotopique pour l'étude de l'aquifère de Trarza et des aquifères discontinus du sud

de la Mauritanie » a été mené entre 2007 et 2010. Il visait à caractériser et à gérer l'un des principaux aquifères du pays, l'aquifère Trarza, situé dans le bassin côtier de la Mauritanie. Il avait pour objet d'améliorer les informations disponibles sur les ressources en eau dans la région et, ce faisant, d'améliorer la capacité à prendre des décisions concernant l'endroit où extraire l'eau de façon efficace et la façon de l'extraire. Le projet, qui faisait appel à des techniques isotopiques classiques, a permis de différencier et de caractériser les différents niveaux des aquifères (environ 100 échantillons ont été prélevés pour procéder à des analyses des isotopes stables, 60 pour des analyses du tritium et 20 pour des analyses de $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$).

1.3. Objectifs du projet RAF/7/011 dans le bassin cible

Compte tenu de la situation hydrogéologique dans le bassin sénégal-mauritanien, les objectifs du projet doivent être divisés en deux catégories : les objectifs communs et les objectifs spécifiques.

La Mauritanie est particulièrement préoccupée par la recharge des aquifères superficiels situés dans la plaine de Trarza et dans les régions de Boulanouar, de Benichab et de Brakna, ainsi que par le problème de l'eau salée provenant principalement d'infiltrations actuelles ou anciennes d'eau de mer.

Au Sénégal, la partie ouest de l'aquifère profond (Maastrichtien) est largement surexploitée, ce qui entraîne l'épuisement des eaux souterraines et la dégradation de la qualité de celles-ci et posent de graves problèmes pour l'approvisionnement en eau de Dakar. Dans ce contexte, la Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau (DGPPE), qui est responsable des eaux souterraines, a prévu de transférer les eaux souterraines de la partie est du bassin vers la partie ouest et mené des études en vue de mieux définir la limite entre l'eau salée et l'eau douce dans l'aquifère profond. Il était prévu que les données hydrochimiques et isotopiques permettent d'obtenir des informations pertinentes, tout comme l'étude hydrogéologique classique. De plus, l'explication de l'origine et de l'évolution de l'eau salée est un défi intéressant à relever d'un point de vue scientifique.

L'intérêt géographique et pratique commun se trouve autour du fleuve Sénégal, qui peut réalimenter les aquifères (Quaternaire/Continental Terminal et Maastrichtien côté Sénégal, et Quaternaire/Continental Terminal et Éocène côté Mauritanie). La paléorecharge a déjà fait l'objet d'études par le passé (Travi, 1988, et Faye, 1994), mais les conclusions présentées sur

la base des isotopes stables restent hypothétiques, car, à ce jour, des échantillons peuvent être prélevés dans seuls quelques puits forés pour l'analyse au ^{14}C qui permet de dater l'eau du fleuve s'écoulant vers le bassin. De nouveaux puits ayant été forés, cette question pourrait être réexaminée dans le cadre du projet des deux côtés du fleuve.

2. SITES D'ÉTUDE

2.1. Localisation, topographie générale

Le bassin du fleuve Sénégal est délimité au nord par la dorsale précambrienne Reguibat, au Maroc, et au sud par le bassin Bové, en Guinée (fig. 3). À l'est, il est séparé du Bassin de Taoudéni par des roches précambriennes de la chaîne des Mauritanides qui sont apparues avec l'orogénèse hercynienne au Paléozoïque supérieur (Bellion, 1987).

Le paysage sénégalais se compose principalement de plaines sableuses vallonnées de l'ouest du Sahel qui montent jusqu'aux pieds des collines dans le sud-est (fig. 1). La frontière nord est formée par le fleuve Sénégal. On trouve d'autres fleuves au sud, notamment les fleuves Gambie et Casamance.

La Mauritanie, qui s'étend sur une superficie de 1 030 700 kilomètres carrés, a un relief généralement plat composé de vastes plaines arides traversées occasionnellement par des crêtes et des affleurements de falaises. Elle est bordée par l'océan Atlantique Nord et se situe entre le Sénégal et le Sahara occidental. Près des trois quarts du pays se trouvent en zones désertiques ou semi-désertiques. Les plateaux diminuent progressivement vers le nord-est jusqu'au désert El Djouf (*Empty Quarter*), une vaste région de grandes dunes de sable qui se fond dans le désert du Sahara. À l'ouest, entre l'océan et les plateaux, plaines argileuses (regs) alternent avec dunes de sable (ergs) (fig. 1). Compte tenu de ces conditions morphologiques et climatiques, la Mauritanie ne possède aucun cours d'eau permanent, à l'exception du Gorgol, un affluent temporaire du fleuve Sénégal (rive droite). En période de fortes pluies, cette rive droite est également alimentée par un ruissellement considérable provenant des régions mauritaniennes de Guidimakha et de l'Aftout, qui sont arrosées par un réseau hydrographique très dense. En dehors de ces régions, le réseau hydrographique est peu développé et dispersé ; il ne se jette pas dans l'océan et est en partie bloqué par des sédiments et des dépôts éoliens.

Du sud au nord, la zone d'étude (examinée) s'étend de la partie sud du bassin du fleuve Sénégal jusqu'à environ 21° de latitude nord (partie nord du bassin sénégal-mauritanien).

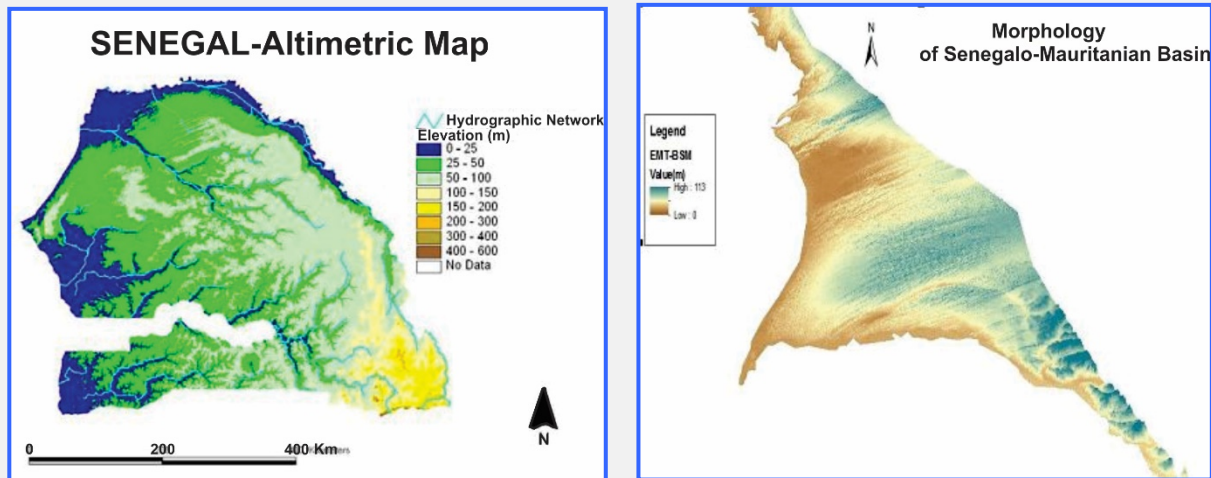


Figure 1 : Cartes de la topographie du Sénégal et de la Mauritanie

2.2. Climatologie

Le Sénégal bénéficie d'un climat tropical caractérisé par une chaleur agréable tout au long de l'année avec des saisons sèches et humides bien définies grâce aux vents du nord-est en hiver et aux vents du sud-ouest en été. La saison sèche (de novembre à avril) est dominée par l'harmattan, un vent chaud et sec. À Dakar, les précipitations annuelles (environ 600 mm) ont lieu entre juin et octobre, lorsque les températures moyennes maximales et minimales sont respectivement de 30 °C et 24,2 °C ; de décembre à février, les températures moyennes maximales et minimales sont respectivement de 25,7 °C et 18 °C (64,4 °F). Les températures sont plus élevées à l'intérieur des terres que le long de la côte (par exemple, les températures moyennes quotidiennes pour le mois de mai à Kaolack et à Tambacounda sont respectivement de 30 °C et 32,7 °C (90,9 °F), contre 23,2 °C à Dakar) et les précipitations augmentent sensiblement vers le sud, dépassant 1 500 mm par an dans certaines régions. Dans la partie la plus septentrionale du pays, le climat est chaud et presque désertique, dans la partie centrale, il est chaud et semi-aride, et dans la partie la plus méridionale, il est tropical humide et sec (fig. 2).

En Mauritanie, le climat se caractérise par des températures extrêmes et par des précipitations faibles et irrégulières. Les températures ne varient que légèrement au cours d'une année, mais on peut enregistrer des écarts de température très importants au cours d'une même journée. L'harmattan, un vent chaud, sec et souvent chargé de poussière provenant du Sahara souffle tout au long de la saison sèche. C'est le vent dominant, bien que des alizés océaniques balayent l'étroite bande côtière. La Mauritanie se divise en quatre zones écologiques : la zone saharienne, la zone sahélienne, la vallée du fleuve Sénégal et la zone côtière. Les pluies tombent

essentiellement pendant la courte saison des pluies (appelée hivernage), de juillet à septembre, et les précipitations annuelles moyennes varient de 500 à 600 millimètres dans l'extrême sud jusqu'à moins de 100 millimètres dans les deux tiers nord du pays.

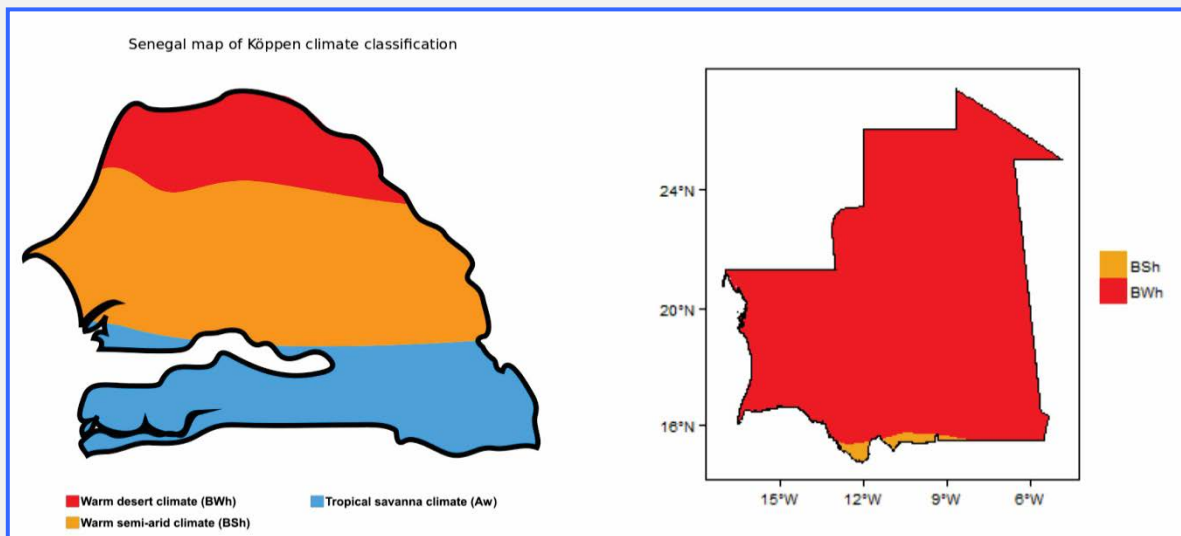


Figure 2 : Cartes climatiques du Sénégal et de la Mauritanie conformément à la classification de Köppen (Madioune et al., 2016 et Upton et Ó Dochartaigh, 2016).

La variation des précipitations dans l'espace et dans le temps et les paramètres climatiques sont illustrés dans la figure 3.

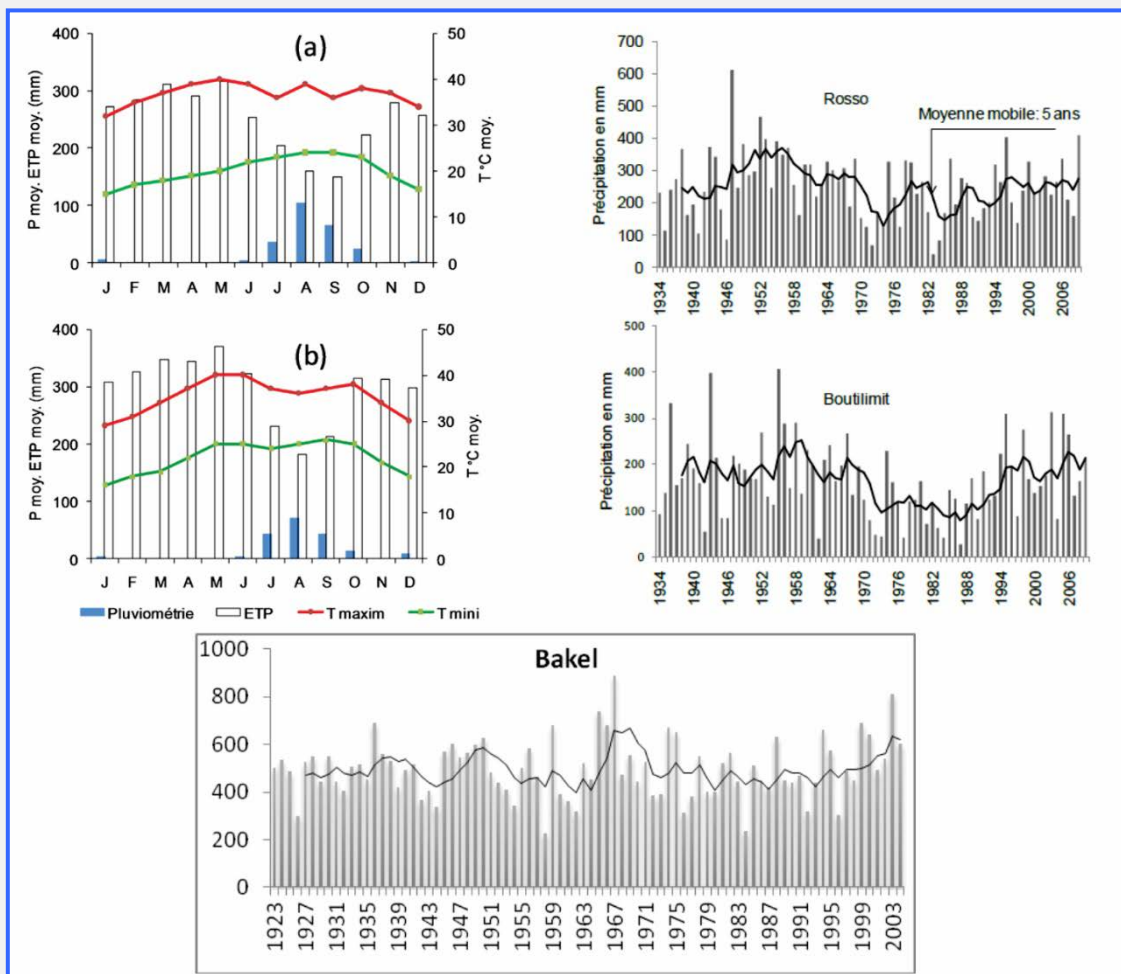


Figure 3 : Paramètres météorologiques observés dans les stations de Rosso, de Boutilimit et de Bakel

2.3. Hydrologie

Les ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal (340 000 km²) sont partagées entre le Mali, le Sénégal et la Mauritanie. Une partie importante de l'eau du fleuve provient des hauts plateaux humides de la Guinée. À l'embouchure, près de la ville de Saint-Louis, le débit annuel moyen est de 732 m³/s, soit un volume total de 23 milliards de m³ d'eau par an, avec des fluctuations annuelles importantes allant de 8 à 45 milliards de m³. Généralement, la période des inondations se situe entre juillet et octobre. Après cette période, le débit diminue rapidement et devient très faible (débit mensuel moyen minimal de 9 m³/s en mai).

On constate que l'eau est utilisée à des fins très diverses de chaque côté de la vallée (Mauritanie au Nord et Sénégal au Sud). Certaines utilisations revêtent un caractère traditionnel et existaient déjà avant l'arrivée des infrastructures, tandis que d'autres, plus modernes, sont apparues dans le cadre du processus de planification globale du développement des ressources en eau (avec la mise en service des barrages de Diama et de Manantali).

En Mauritanie, les ressources en eau de surface renouvelables sont estimées à environ 11 km³/an et proviennent principalement du fleuve Sénégal et de petits barrages situés au sud et au centre du territoire. Au début des années 1920, le volume d'eau extrait était estimé à environ 1 700 M m³ (88 % destinés à l'irrigation, 9 % destinés à un usage domestique et 3 % destinés à des activités industrielles).

Du côté du Sénégal, le fleuve Sénégal alimente le lac de Guiers, qui peut stocker environ 500 M m³ et approvisionner Dakar en eau à hauteur d'environ 120 000 m³/an. Les aquifères alluviaux sont en partie composés d'argile et de sable fin (dépôts post-nouakchottiens), d'alluvions grossières et graveleuses, et de sable argileux datant de l'Ogolien et du Quaternaire ancien et moyen. L'aquifère alluvial est le lit principal du fleuve et son débit varie en fonction de celui du fleuve.

L'historique du développement et de l'évaluation des ressources en eaux souterraines du bassin du fleuve Sénégal peut se résumer en deux périodes, avant et après la mise en service des barrages (fig. 4). Au début du développement de la vallée, différentes études effectuées au plan local ont été réalisées pour caractériser le fonctionnement hydrodynamique et le mode de recharge de l'aquifère alluvial. Elles ont notamment porté sur la situation du delta (Audibert, 1970) et de la vallée (BRGM, 1964 et 1965 ; IRAT, 1965 et 1967 ; Illy, 1973 ; Saos et al., 1984) avant la mise en service des barrages et montré qu'il existait une relation complexe entre le fleuve Sénégal et le système aquifère.

Des études menées par la suite après la mise en service des barrages (Bonkel, 1989 ; USAID/OMVS, 1990 ; EQUSEN, 1990/1991 ; Diao, 1992 ; Diagana, 1994 ; Dieng, 1997 ; Touzi, 1998 ; Diaw, 2008) ont confirmé ces liens réciproques et mis en évidence les effets possibles des ressources en eau de surface sur les eaux souterraines et sur la sensibilité de celles-ci aux changements climatiques, ainsi que les problèmes de gestion pouvant en résulter.

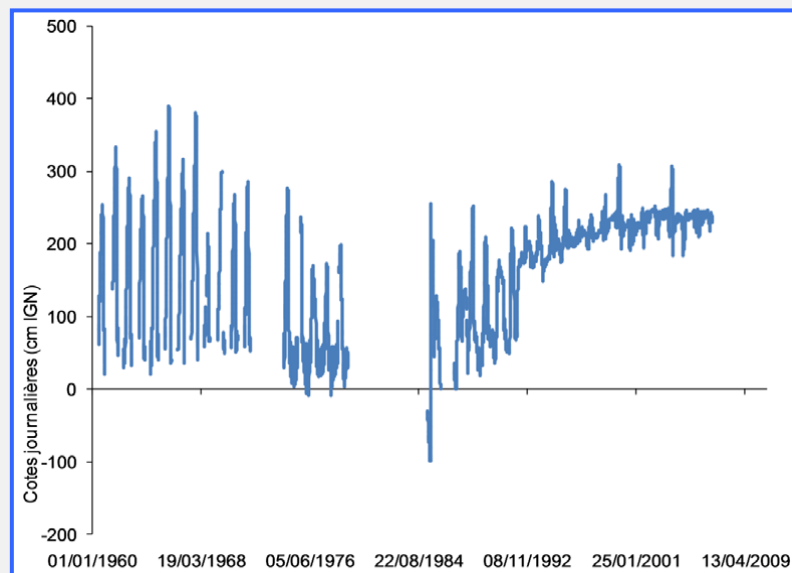


Figure 4 : Évolution du fleuve Sénégal avant et après la construction du barrage Diama (1989) (Mohamed, 2012)

2.4. Types de végétation et utilisation des sols

En 2000, les savanes, les zones boisées et les forêts couvraient encore plus des deux tiers du Sénégal (fig. 5)

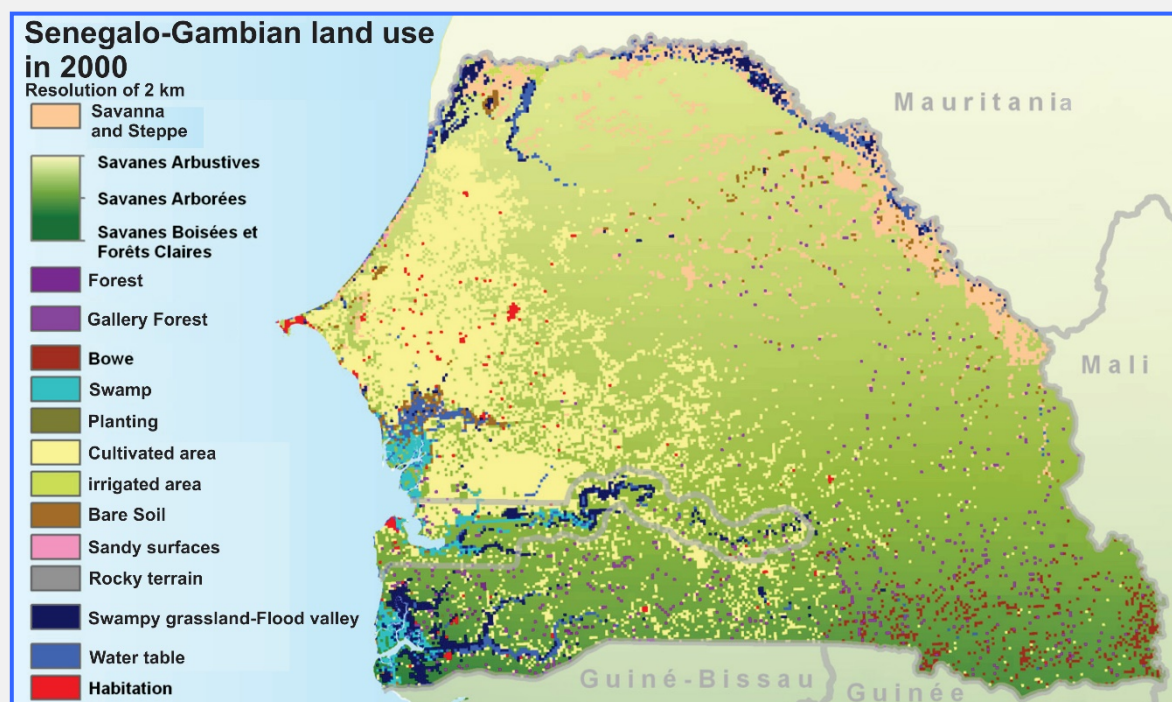


Figure 5 : Végétation et utilisation des sols dans la partie sénégalaise du bassin (carte de l'utilisation et de l'occupation des sols en Afrique de l'Ouest, Service géologique des États-Unis, Madioune et al., 2016)

En Mauritanie, des ceintures de végétation naturelle correspondant au régime pluviométrique s'étendent d'est en ouest : on trouve notamment des forêts tropicales le long du fleuve Sénégal alors que le sud-est du pays se caractérise par la brousse et la savane. Le centre et le nord du pays sont uniquement couverts d'un désert de sable.

Les surfaces sableuses ont augmenté, passant d'environ 46 000 km² à environ 64 000 km² dans les régions sahélienne et saharo-sahélienne de Mauritanie (soit une augmentation de 37 %). La forte sécheresse survenue pendant les années 1970 et 1980 a joué un rôle majeur dans ce changement de l'occupation des sols. Les dunes de sable et les zones sableuses plates, qui étaient auparavant stabilisées par une couverture végétale composée de plantes herbacées et d'arbustes, sont devenues mobiles et actives (fig. 6).

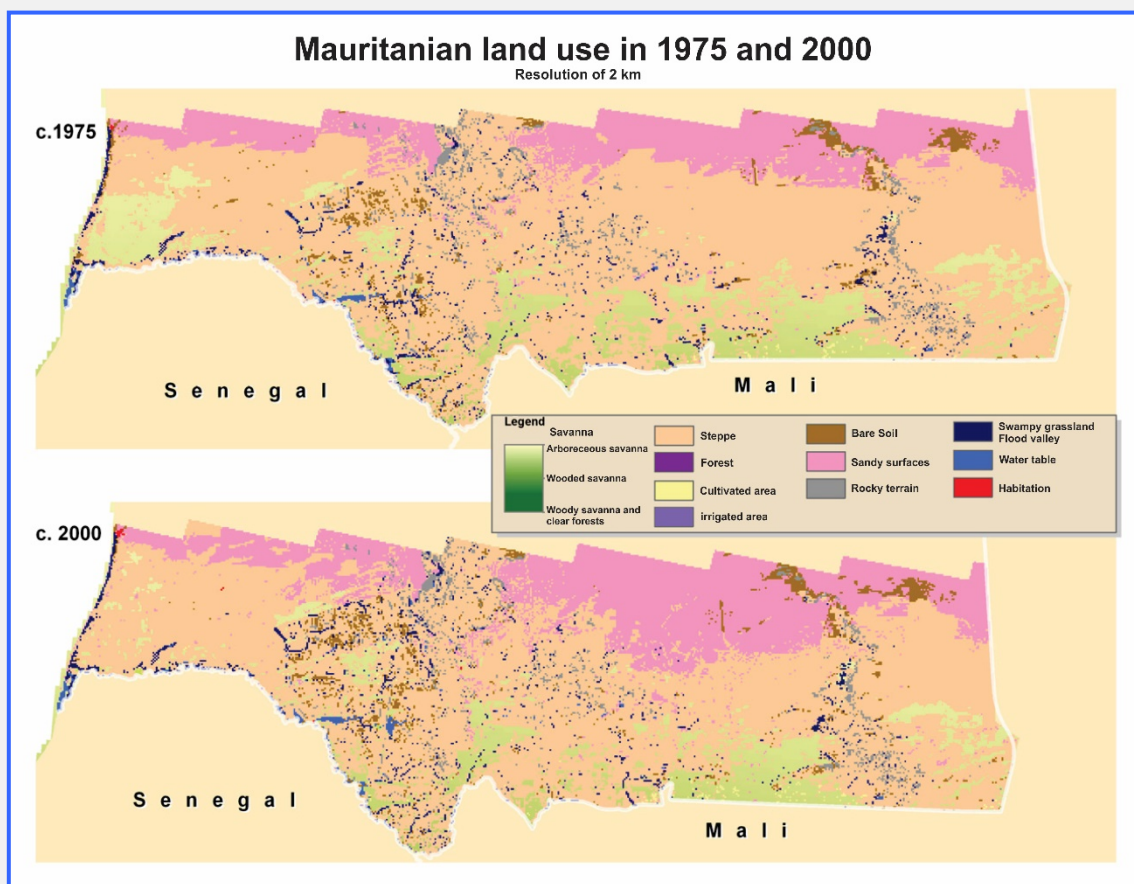


Figure 6 : Utilisation des sols dans la partie mauritanienne du bassin
(carte de l'utilisation et de l'occupation des sols en Afrique de l'Ouest,
Service géologique des États-Unis, 2013)

2.5. Géologie et hydrogéologie

Comme indiqué ci-dessus, le bassin sénégal-mauritanien est constitué de trois principaux systèmes aquifères qui contiennent des ressources en eaux souterraines exploitées (Madioune et al., 2016).

1) Le système aquifère superficiel (Quaternaire et Continental Terminal) couvre de manière discontinue la totalité du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien. Il est principalement constitué de sable et d'argile sableuse en proportions variables. Les aquifères sont intergranulaires et les couches sableuses sont celles qui contiennent le plus d'eau souterraine. Ce système comprend les aquifères suivants :

- Au Sénégal : l'aquifère infrabasaltique (sous le basalte), l'aquifère de Thiaroye, l'aquifère du littoral Nord, l'aquifère alluvial, l'aquifère du Continental Terminal et l'aquifère de l'Oligo-Miocène ;
- En Mauritanie : l'aquifère de Boulanouar (3 000 km²), l'aquifère de Benichab (1 200 km²) et l'aquifère de Trarza (20 000 km²) (fig. 7). L'aquifère alluvial s'étend sous les deux pays, des deux côtés du fleuve Sénégal.

Le système aquifère superficiel est situé au-dessus des dépôts plus consolidés de l'Éocène, du Paléocène et du Maastrichtien. Son épaisseur varie entre 0 et 150 m et la profondeur de la nappe phréatique peut aller de quelques mètres à 72,5 m.

Les paramètres des aquifères du système superficiel sont généralement les suivants :

- Perméabilité : de 1×10^{-5} à $8,9 \times 10^{-4}$ m/s
- Transmissivité : de 8,64 à 1 728 m²/jour
- Coefficient de stockage : de 0,01 à 0,15
- Rendement du puits : de 50 à 183 m³/h

On sait que certaines zones sont contaminées par les nitrates.

2) **Le système aquifère intermédiaire** est constitué de formations éocènes et paléocènes et principalement de calcaire, souvent karstique ou affecté par des failles. L'aquifère de l'Éocène est exploité dans la partie centre-ouest du Sénégal et le long du fleuve Sénégal.

L'aquifère du Paléocène se trouve principalement dans l'ouest du Sénégal, autour de Pout. Ces aquifères constituent l'une des principales sources d'eau potable de Dakar. L'épaisseur du système aquifère intermédiaire varie entre 40 et 120 m et la profondeur de la nappe phréatique peut aller de quelques mètres à 102,5 m.

Les paramètres des aquifères du système intermédiaire sont généralement les suivants :

- Perméabilité : de 1×10^{-5} à $2,5 \times 10^{-8}$ m/s
- Transmissivité : de 1,728 à 9 504 m²/jour
- Coefficient de stockage : de 0,05 à 0,10
- Rendement du puits : de 54 à 300 m³/h

La teneur en fer, en fluorure et en sel est élevée dans la partie centre-ouest du Sénégal et on constate des intrusions d'eau de mer dans les zones côtières.

3) **Le système aquifère profond**, datant principalement du Maastrichtien, s'étend sur l'ensemble du bassin sénégal-mauritanien et se compose généralement de sable, d'argile sableuse et de grès calcaire. Le stockage et l'écoulement des eaux souterraines sont en grande partie intergranulaires. Cet aquifère constitue la principale source d'approvisionnement en eau souterraine du Sénégal. Ce système est transfrontière mais n'est pas exploité en Mauritanie en raison de la faible conductivité hydraulique et de la salinité élevée. L'épaisseur du système aquifère profond est d'environ 250 m, la profondeur de la nappe peut aller de quelques mètres à 140 m et celle du puits, de 25 à 680 m. Ce système est généralement très productif, bien que les propriétés de l'aquifère varient selon les caractéristiques locales (lithologie, épaisseur, etc.) (fig. 8). De manière générale, l'aquifère est confiné, sauf à l'est et à l'ouest.

Les paramètres des aquifères du système profond sont généralement les suivants :

- Perméabilité : 1×10^{-5} m/s
- Transmissivité : de 0,95 à 65 2578 m²/jour
- Coefficient de stockage : de 1×10^{-4} à 6×10^{-4} dans la partie centre-ouest
- Rendement du puits : de 80 à 362 m³/h

La recharge provient de l'infiltration directe des eaux de pluie ou de l'infiltration indirecte des eaux fluviales et elle est estimée à environ 103×10^6 m³/an dans le système aquifère profond du Maastrichtien. Elle a lieu principalement dans la partie ouest du Horst de Diass, où les formations affleurent en surface, et au contact avec des formations du socle et des formations non-consolidées dans la partie sud-est du Sénégal.

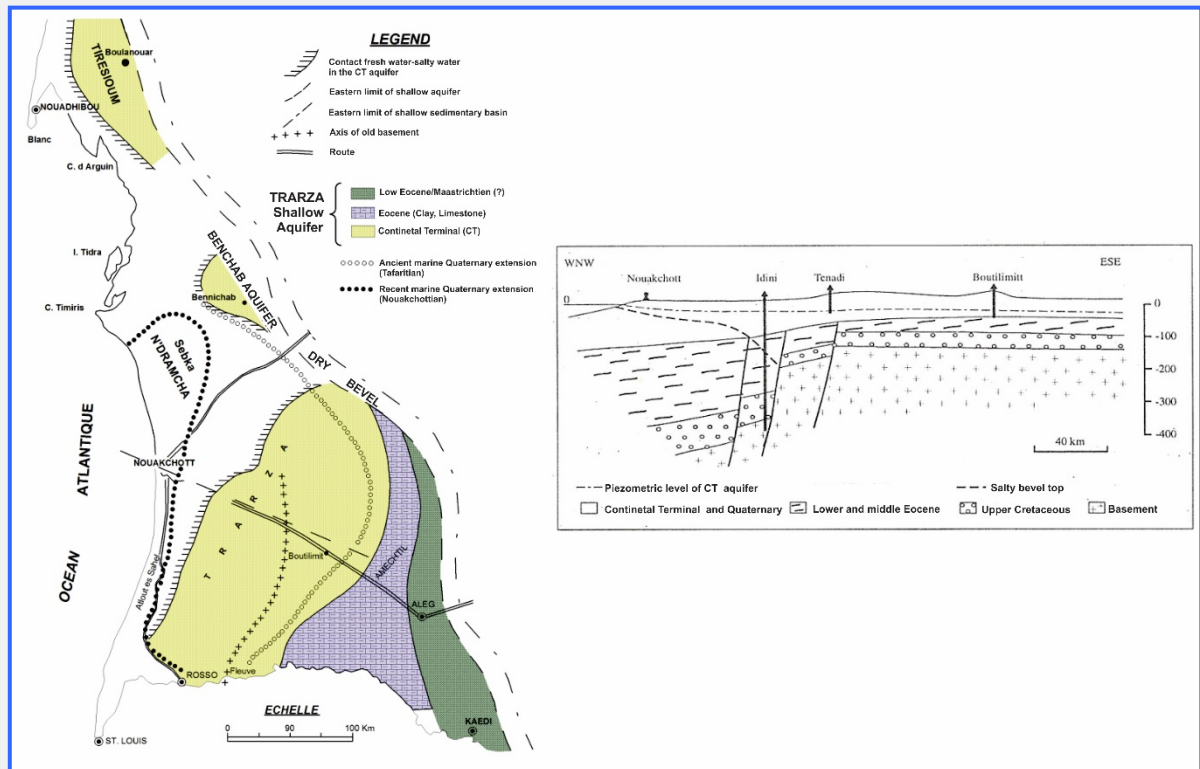
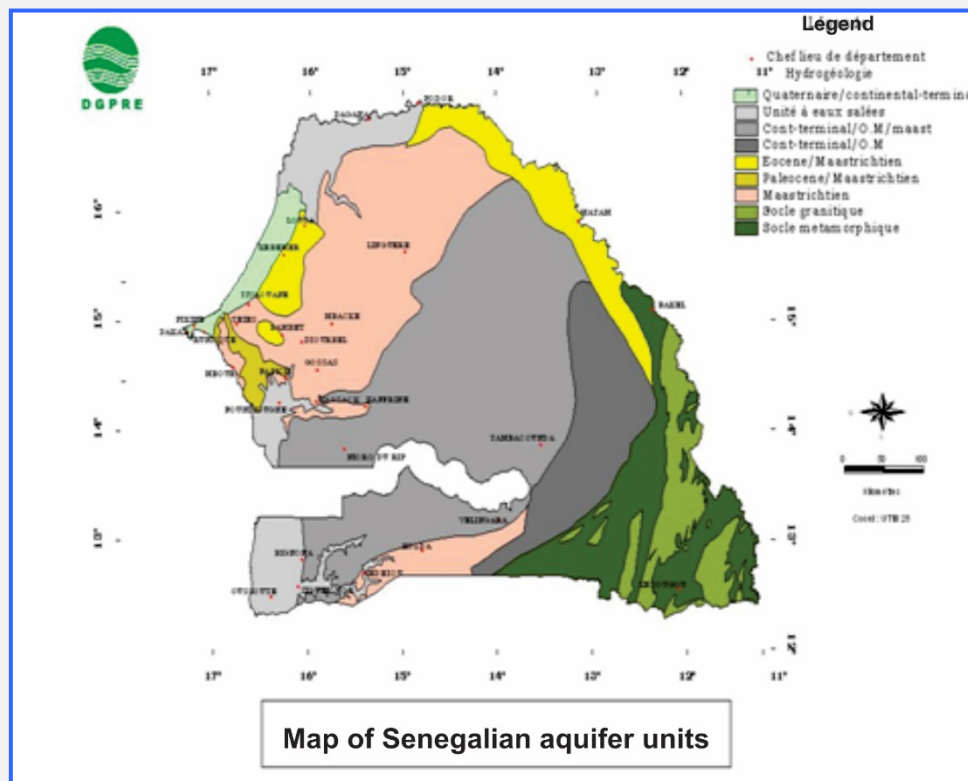


Figure 7 : Carte hydrogéologique de la partie mauritanienne du bassin sénégal-mauritanien et de la section transversale sud-sud-ouest /ouest-nord-ouest



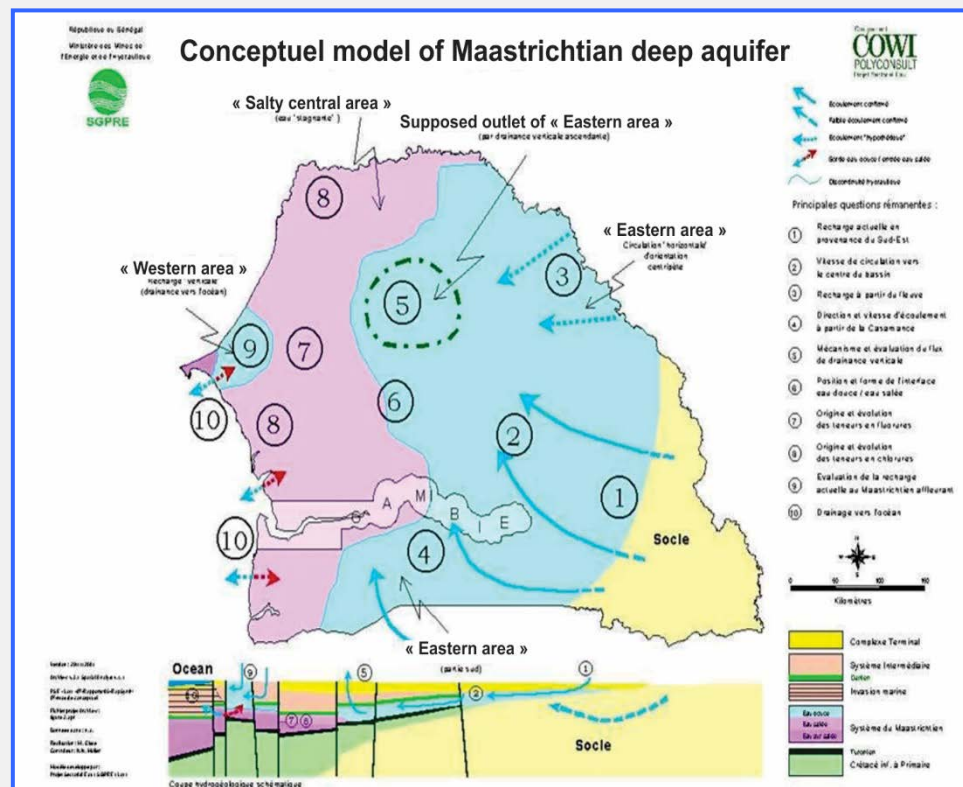


Figure 8 : Carte hydrogéologique et modèle conceptuel de l'aquifère profond dans la partie sénégalaise du bassin sénégal-mauritanien

Les ressources en eaux souterraines diminuent localement en raison de la surexploitation. La teneur en fer, en fluorure et en sel est élevée dans la partie centre-ouest du Sénégal. On constate des intrusions d'eau de mer dans les zones côtières, mais la salinité élevée est souvent imputable aux eaux salées datant de très longtemps (eau connée).

2.6. Approvisionnement en eau et gestion des ressources en eau dans le bassin

Le Sénégal et la Mauritanie disposent de ressources importantes en eaux souterraines, mais l'offre et la demande ne sont pas équitablement réparties. Certaines eaux souterraines sont surexploitées, ce qui entraîne un épuisement des eaux souterraines. Ce phénomène a été observé dans les aquifères du Palaeocène et du Maastrichtien du système du Horst de Diass. La Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau (DGPRES) est responsable de la gestion des eaux souterraines et des eaux de surface au Sénégal, et notamment de la politique relative à l'eau. Des permis sont nécessaires pour effectuer des forages et capter de l'eau. À l'heure actuelle, les eaux souterraines des zones vulnérables ne bénéficient d'aucune protection

juridique et l'évacuation des eaux ne fait pas l'objet de contrôles. Des données montrent qu'en 2008, on dénombrait au moins 7 000 sources d'eaux souterraines au Sénégal (puits forés et puits de grand diamètre creusés à la main), et l'on disposait de registres géologiques pour environ 1 400 puits forés existants (tableau 1). Le niveau des nappes phréatiques est surveillé deux fois par an : avant et après la saison des pluies. Ces opérations sont financées par le Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement.

La **qualité des eaux souterraines** est mesurée deux fois par an : avant et après la saison des pluies. Ces opérations sont financées par le Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement. Il arrive que des ONG, des chercheurs ou d'autres personnes poursuivent les recherches sur la qualité des eaux pour mieux la comprendre.

Tableau 1 : **Retraits d'eau souterraine au Sénégal** (source : Banque mondiale)

Retraits annuels d'eau douce (2013)	2,611 millions de m ³
Retraits annuels d'eau douce pour l'agriculture	92,98 %
Retraits annuels d'eau douce pour usage domestique	4,412 %
Retraits annuels d'eau douce pour l'industrie	2,611 %
Population rurale ayant accès à une source d'eau améliorée	60,3 %
Population urbaine ayant accès à une source d'eau améliorée	92,5 %

Ces données sont recueillies et conservées par la Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau (DGPPE) et la Société nationale des eaux du Sénégal (SONES).

En Mauritanie, il existe une base de données sur les points d'eau dans laquelle sont répertoriés près de 14 000 forages et puits traditionnels et modernes, mais qui contient peu d'éléments d'information complémentaires (registres géologiques et enregistrements des niveaux des nappes phréatiques). En 2005, la Société nationale de l'eau (SNDE) a fourni des mesures concernant 500 forages : 400 pour la région de Trarza et 100 pour la région de Brakna (tableau 2).

Tableau 2 : **Retraits d'eau souterraine en Mauritanie** (source : Banque mondiale)

Retraits annuels d'eau douce (2013)	1,350 millions de m ³
Retraits annuels d'eau douce pour l'agriculture	90,6 %
Retraits annuels d'eau douce pour l'usage domestique	7,1 %

Retraits annuels d'eau douce pour l'industrie	2,4 %
Population rurale ayant accès à une source d'eau améliorée (2012)	47,7 %
Population urbaine ayant accès à une source d'eau améliorée (2012)	52,3 %

3. OBTENTION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE UTILISÉE

Pour la Mauritanie, trois campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en 2013, 2014 et 2015. Des échantillons ont été prélevés dans les aquifères du Continental Terminal/Quaternaire et de l'Éocène aux endroits indiqués sur la figure 9. Au total, 156 échantillons d'eau souterraine, quatre échantillons d'eau de surface et quatre échantillons d'eaux de pluie (campagne de 2014 menée à Nouakchott et Kaedi) ont été prélevés et conditionnés de manière adéquate pour que l'on puisse procéder à des analyses des produits chimiques, des isotopes stables et du tritium. Les échantillons ont été envoyés pour analyse au laboratoire LRAE de l'École nationale d'ingénieurs de Sfax (ENIS), en Tunisie. Neuf échantillons (prélevés lors de la campagne de 2015) ont été envoyés au Centre de recherche isotopique de Groningen pour que l'on procède à des analyses de ^{14}C .

Les données ont été traitées à l'aide des logiciels ArcGis, MapInfo, Diagramme et PHREEQC, puis étudiées conjointement et comparées aux anciennes données du projet national appuyé par l'AIEA (MAU/8/002).

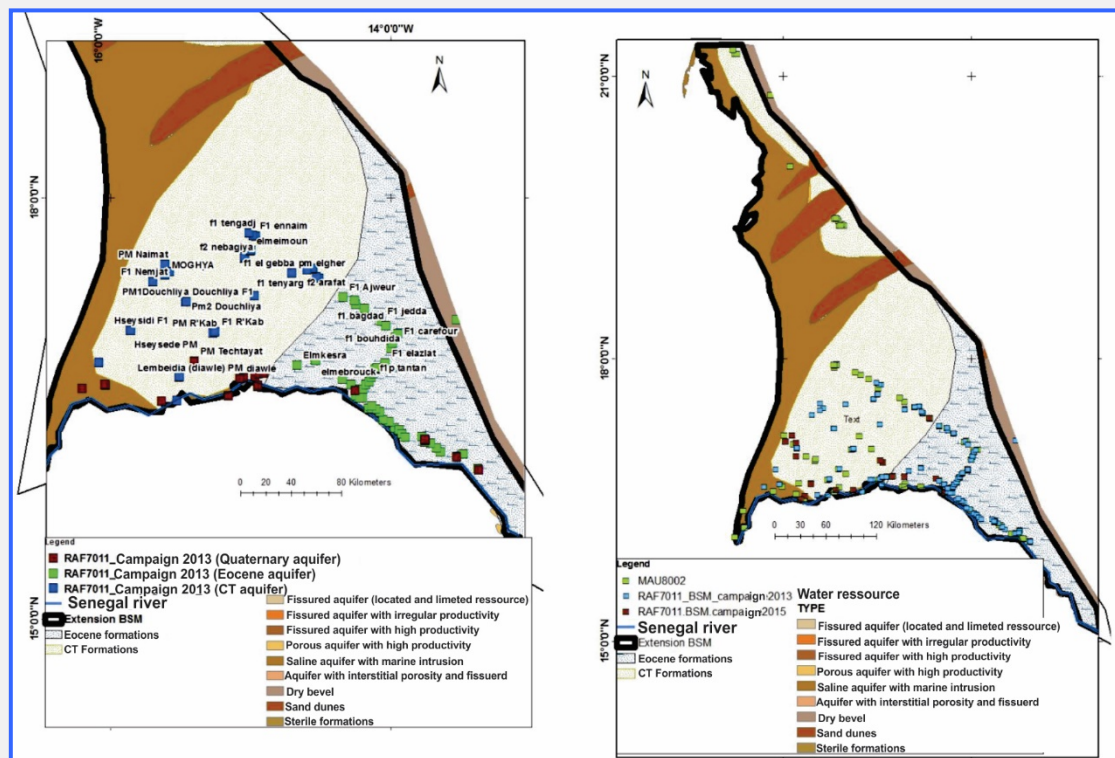


Figure 9 : Localisation des points d'échantillonnage dans la partie mauritanienne du bassin sénégalo-mauritanien

Pour le Sénégal, deux grandes campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en novembre 2013 et en juin 2016. La zone globale étudiée apparaît dans la figure 10. Deux secteurs ont été sélectionnés pour tenter de résoudre le problème de la limite de salinisation dans la partie centrale du bassin et celui de la recharge et de la paléorecharge le long du fleuve Sénégal, dans le nord-est du bassin. Les endroits où ont été prélevés les échantillons pour les deux campagnes sont indiqués avec précision dans les figures 11 et 12. L'objectif de la deuxième campagne était de vérifier si la teneur chimique et isotopique avait éventuellement changée en raison d'une éventuelle recharge par des eaux de pluie et/ou d'eau du fleuve Sénégal, ou en raison d'une paléorecharge par le fleuve Sénégal.

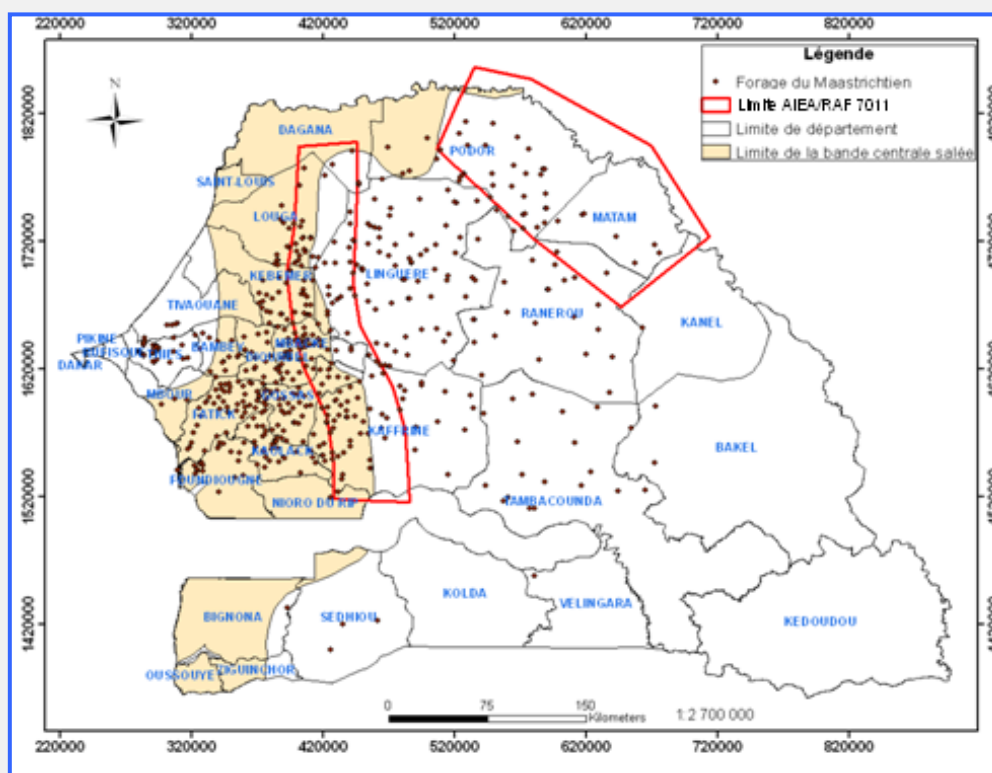


Figure 10 : Zone d'échantillonnage dans la partie sénégalaise du bassin sénégalo-mauritanien

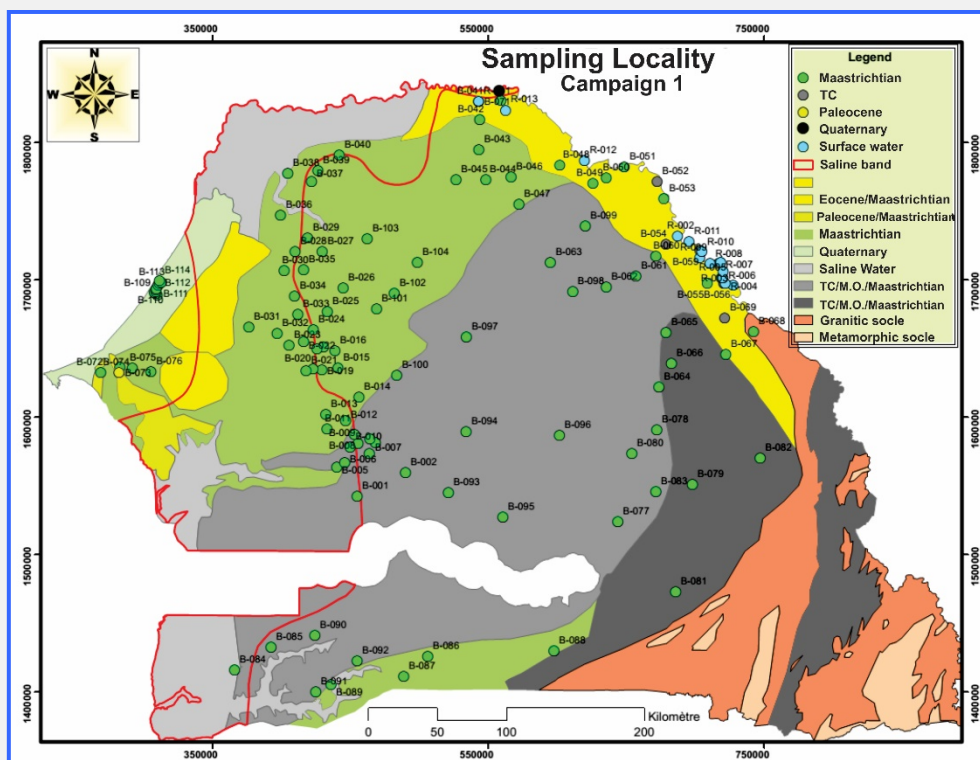


Figure 11 : Points d'échantillonnage dans la partie sénégalaise du bassin sénégalo-mauritanien

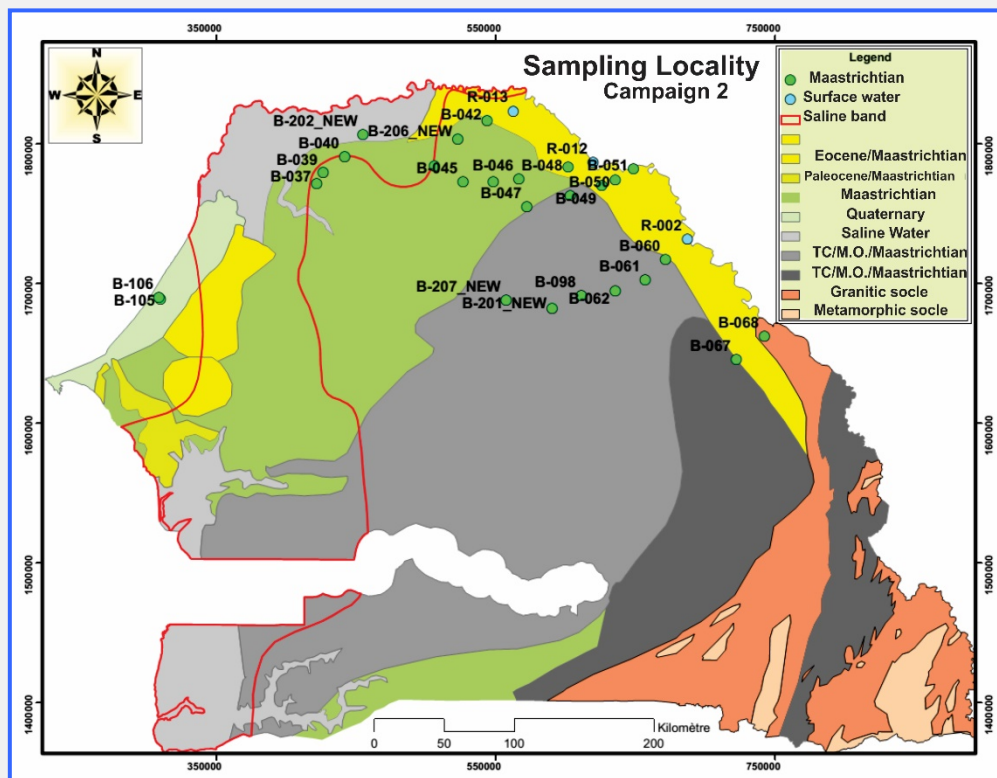


Figure 12 : Points d'échantillonnage de la deuxième campagne dans la partie sénégalaise du bassin sénégalo-mauritanien

Les paramètres physico-chimiques classiques (pH, conductivité électrique et température) ont été mesurés in situ. Des échantillons ont été prélevés pour procéder à des analyses des produits chimiques, des isotopes stables et du tritium pendant les deux campagnes, et on a aussi effectué des analyses de ^{14}C pendant la deuxième campagne. On a notamment analysé les éléments en trace F, Fe (concentration totale) et Br. Les éléments Li et B ont également été analysés pour certains échantillons de l'aquifère du Maastrichtien, près de la limite de salinité, pour essayer de caractériser l'eau connée. Les échantillons de la première campagne ont été envoyés au laboratoire du CNESTEN, à Rabat (Maroc), et ceux de la deuxième, au laboratoire LRAE, à Sfax (Tunisie). Les analyses de ^{14}C (26) ont été réalisées au Centre de recherche isotopique de l'Université de Groningen (Pays-Bas). Les données ont été traitées à l'aide des logiciels ArcGis, MapInfo, Diagramme et PHREEQC.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1. Caractérisation chimique et isotopique générale

Partie mauritanienne du bassin

La répartition des points d'eau dans le diagramme de Piper (fig. 13) montre que, côté cation, l'eau contient un mélange de carbonate et de sodium et les trois systèmes aquifères évoluent de façon relativement similaire. En revanche, ces systèmes aquifères évoluent de façon assez différente côté anion. Les points de l'aquifère du Quaternaire ont évolué entre les membres extrêmes HCO_3^- et Cl^- et ceux de l'aquifère de l'Éocène sont plus influencés par le membre extrême SO_4^{2-} . Pour l'aquifère du Continental Terminal, la quasi-totalité des eaux souterraines est dominée par la teneur en Cl^- et légèrement influencée par le SO_4^{2-} .

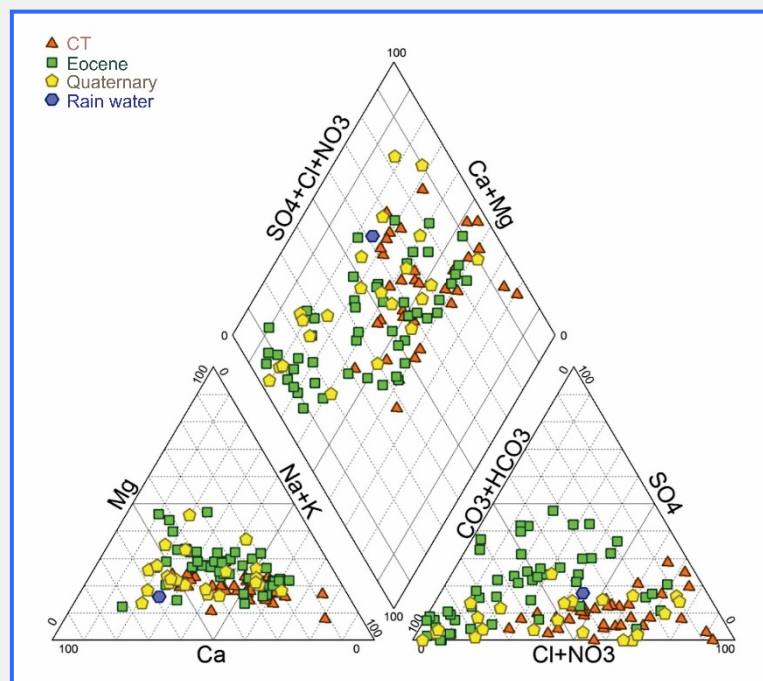


Figure 13 : Diagramme de Piper des eaux souterraines mauritaniennes (première campagne)

D'autres explications des processus chimiques sont nécessaires étant donné l'endroit où les échantillons ont été prélevés et la direction de l'écoulement. De manière générale, les points d'échantillonnage de l'aquifère du Quaternaire ont été prélevés à proximité du fleuve Sénégal, alors que ceux des aquifères du Continental Terminal et de l'Éocène ont non seulement été prélevés le long du fleuve, mais aussi le long de lignes reliant le fleuve et la partie centrale de la plaine de Trarza.

L'évolution des teneurs en calcium et en HCO_3^- montre clairement qu'il y a une saturation en calcite à environ 500 mg/l de matières dissoutes totales. On peut constater que la teneur en Ca continue d'augmenter, surtout pour les échantillons de l'Éocène et certains échantillons du Quaternaire. La teneur en Na et la teneur totale en matières dissoutes augmentent proportionnellement, comme le montre le diagramme de Piper, ce qui s'explique davantage par un mélange avec de l'eau de mer ou par une dissolution d'évaporites probablement facilitée par un processus d'évaporation, plutôt que par un processus d'échange de cations (fig. 14).

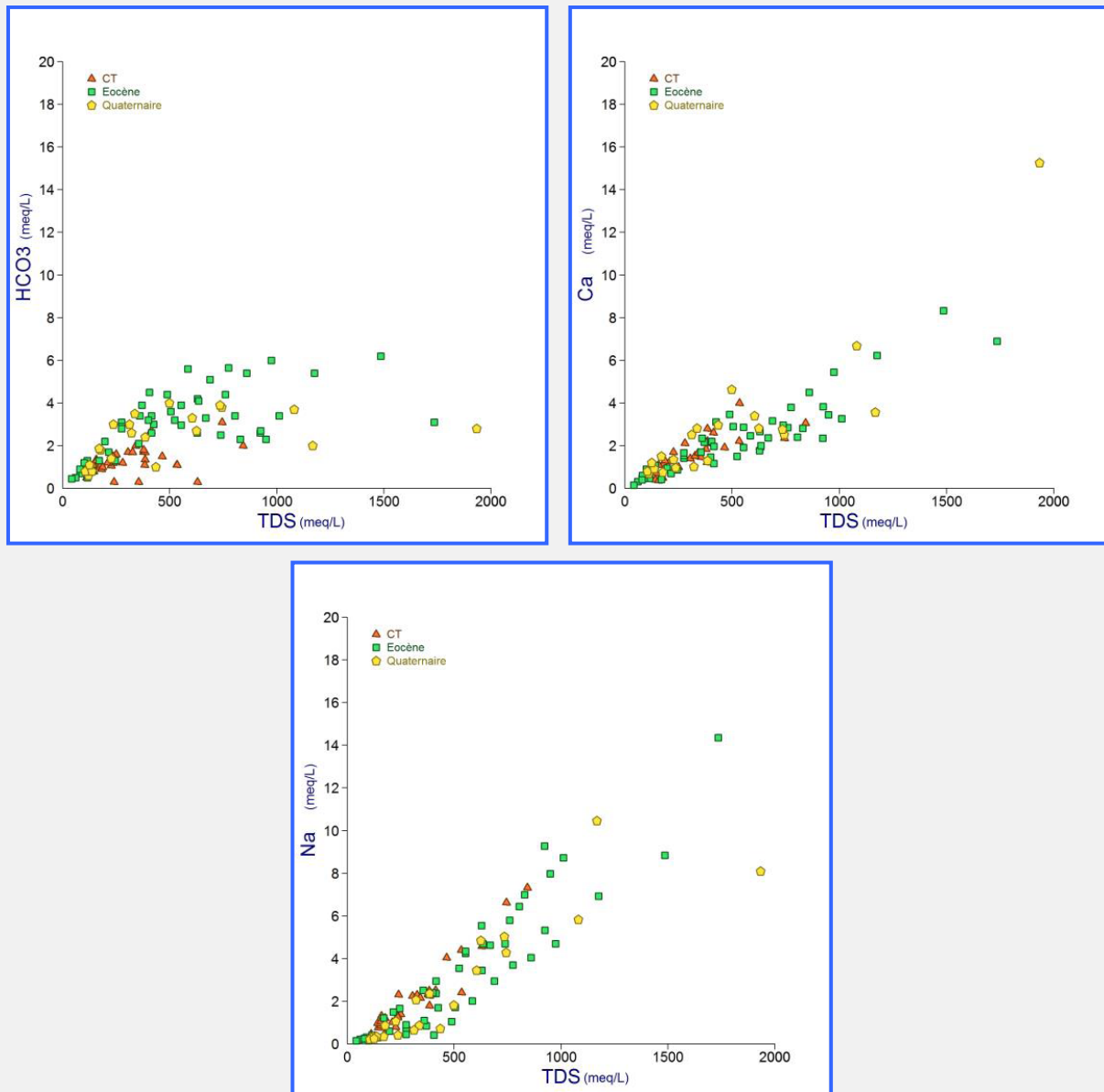


Figure 14 : Relation entre certains éléments majeurs (Ca^{2+} , Na^+ et HCO_3^-) et les matières dissoutes totales (MDT)

La composition des isotopes stables de l'eau souterraine varie de façon relativement importante, passant de -6,5 ‰ à +1 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de -10 ‰ à -43 ‰ pour $\delta^2\text{H}$. Les données relatives aux isotopes stables présentées dans le diagramme montrent clairement l'influence notable d'un

processus d'évaporation. Ce processus affecte principalement les eaux souterraines de l'aquifère du Quaternaire.

L'intersection de la pente de l'évaporation et de la droite des eaux météoriques mondiales se produit à une valeur d'environ -6,2 ‰, qui, comme indiqué plus bas, semble relativement proche de la signature des précipitations.

Néanmoins, certaines eaux de l'Éocène légèrement moins appauvries et situées à proximité de la droite des eaux météoriques mondiales pourraient provenir du fleuve.

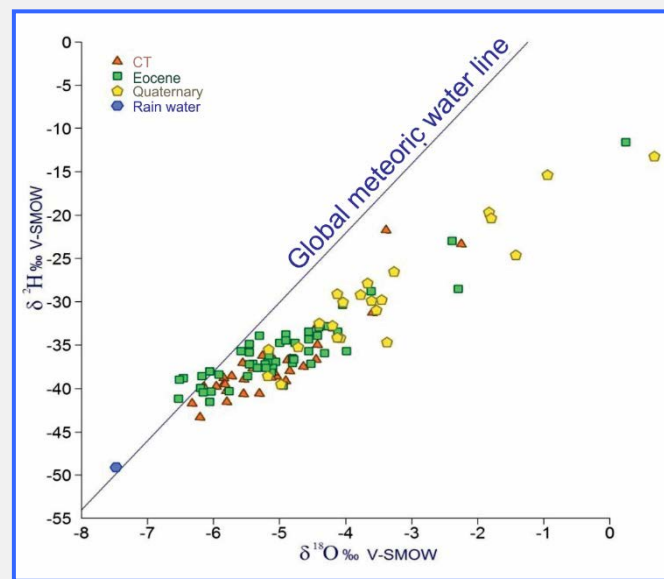


Figure 15 : Teneur en isotopes stables dans le diagramme $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$

Bien que la figure 15 montre clairement l'influence notable d'un processus d'évaporation, le rôle dominant de ce dernier n'apparaît pas distinctement dans le diagramme mettant en relation Cl^- et $\delta^{18}\text{O}$ (fig. 16), qui est généralement utilisé pour caractériser les processus de salinisation. En particulier, certains points de l'aquifère du Continental Terminal ne correspondent pas dans les deux diagrammes. Cela fera l'objet de plus amples discussions dans la partie consacrée à la salinisation, qui se penche notamment sur la relation entre Na^+ et Cl^- .

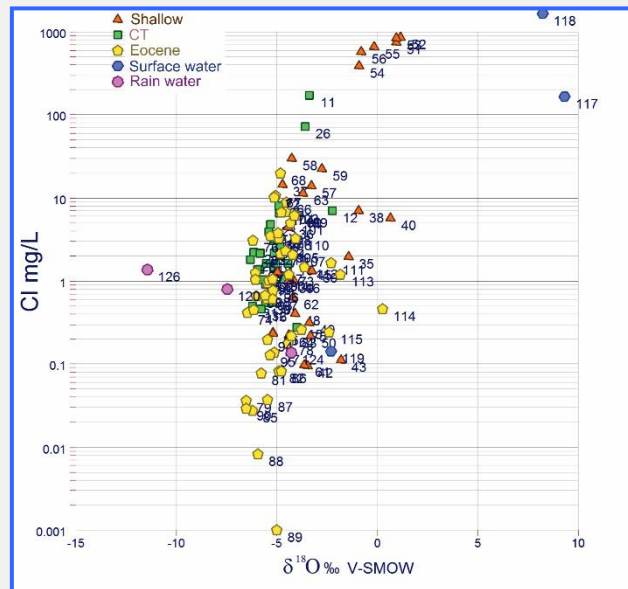


Figure 16 : Relation entre les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en Cl^-

Partie sénégalaise du bassin

Conformément au processus bien connu de minéralisation que l'on observe le long de la trajectoire d'écoulement (depuis la zone de recharge de l'ouest) dans l'aquifère du Maastrichtien (Travi, 1988 ; Faye, 1994), les points d'eau évoluent et passent d'une dominance de $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ à une dominance de $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ et enfin à une dominance de Na^+/Cl^- (figure 17).

Cette évolution chimique reflète le processus d'échange de cations (Ca/Na amplifié par la saturation en calcite) et la présence d'eau connée dans la partie ouest, où la minéralisation des anions est fortement dominée par du Cl^- . Le fait que certaines eaux contiennent du SO_4^{2-} montre qu'il y a une dissolution des minéraux évaporitiques présents de façon discontinue dans l'aquifère Maastrichtien dans la partie centrale du bassin.

Les deux diagrammes de la figure 18 confirment clairement l'évolution hydrochimique présentée ci-dessus, ainsi que l'évolution régulière du type $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ vers le type $\text{Na}^+/\text{HCO}_3^-$ et le changement important vers le type NaCl .

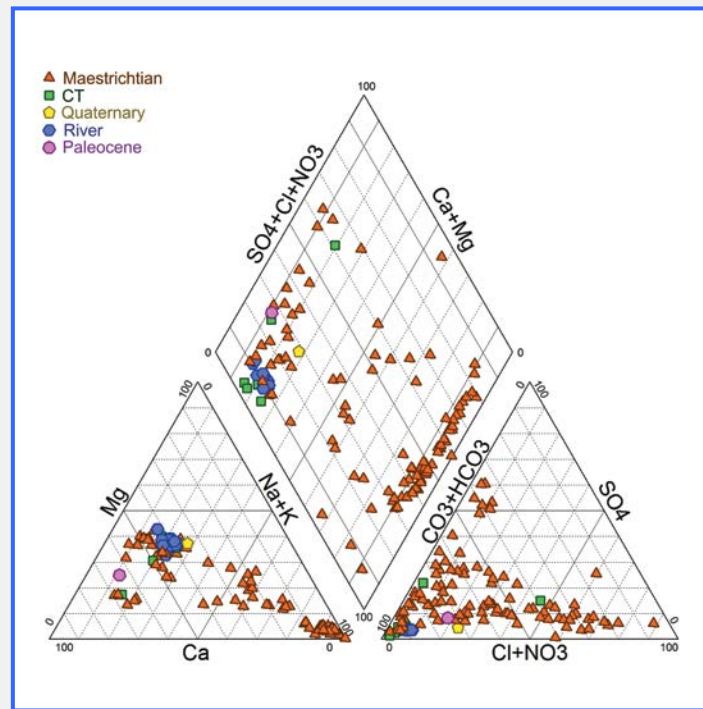


Figure 17 : Diagramme de Piper des eaux souterraines sénégalaises (principalement de l'aquifère du Maestrichtien)

Les données relatives aux isotopes stables présentées dans les figures 19 et 20 montrent que les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ varient considérablement. En outre, la figure 19 montre qu'il n'existe pas de lien entre les deux paramètres, ce qui exclut la possibilité d'une influence notable du processus d'évaporation. Les valeurs plus élevées correspondant aux parties est et nord du bassin semblent correspondre à la signature isotopique du fleuve Sénégal (légèrement évaporé) en période de crue (figure 20).

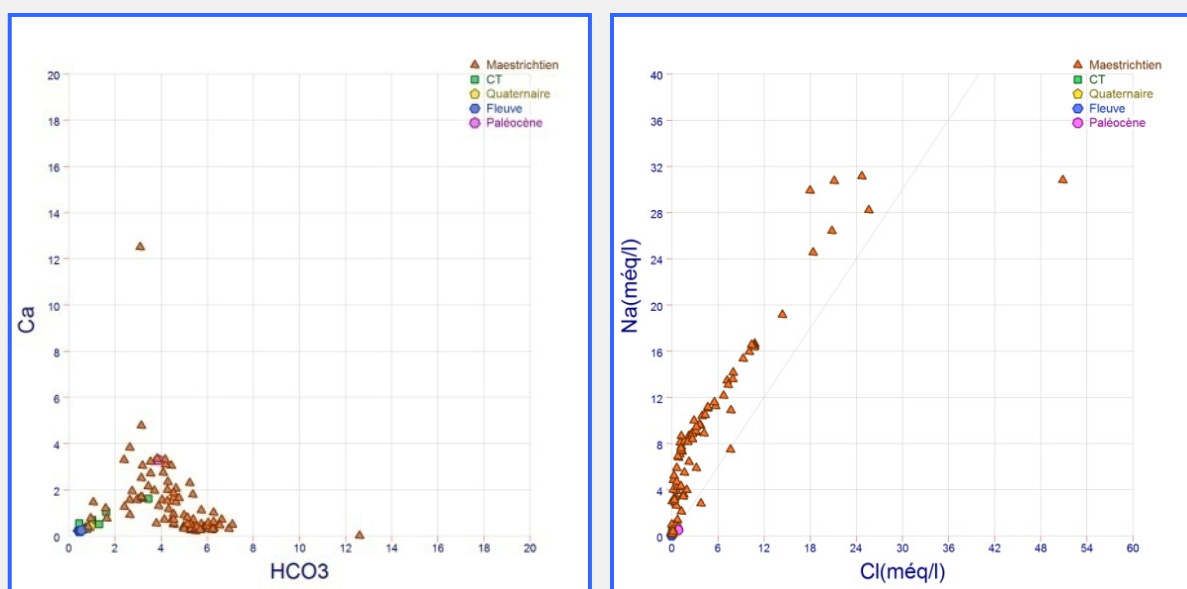


Figure 18 : Relation entre les teneurs en Ca^{2+} et en HCO_3^- et entre les teneurs en Na^+ et en Cl^-

Les échantillons d'eaux souterraines du centre-ouest du bassin se situent sur une ligne de tendance se trouvant en dessous de la droite des eaux météoriques, ce qui est caractéristique des eaux souterraines anciennes du nord de l'Afrique. Compte tenu de la position des échantillons de l'aquifère du Continental Terminal (points verts), ce graphique suggère également fortement que cet aquifère est rechargé par une fuite ascendante de l'aquifère du Maastrichtien dans la partie centrale du bassin.

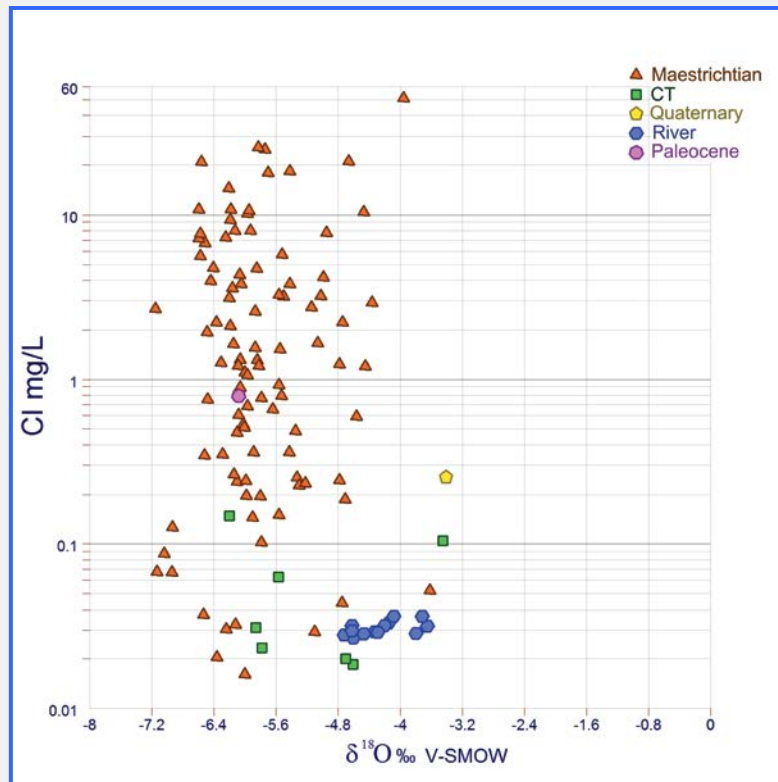


Figure 19 : Relation les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en Cl

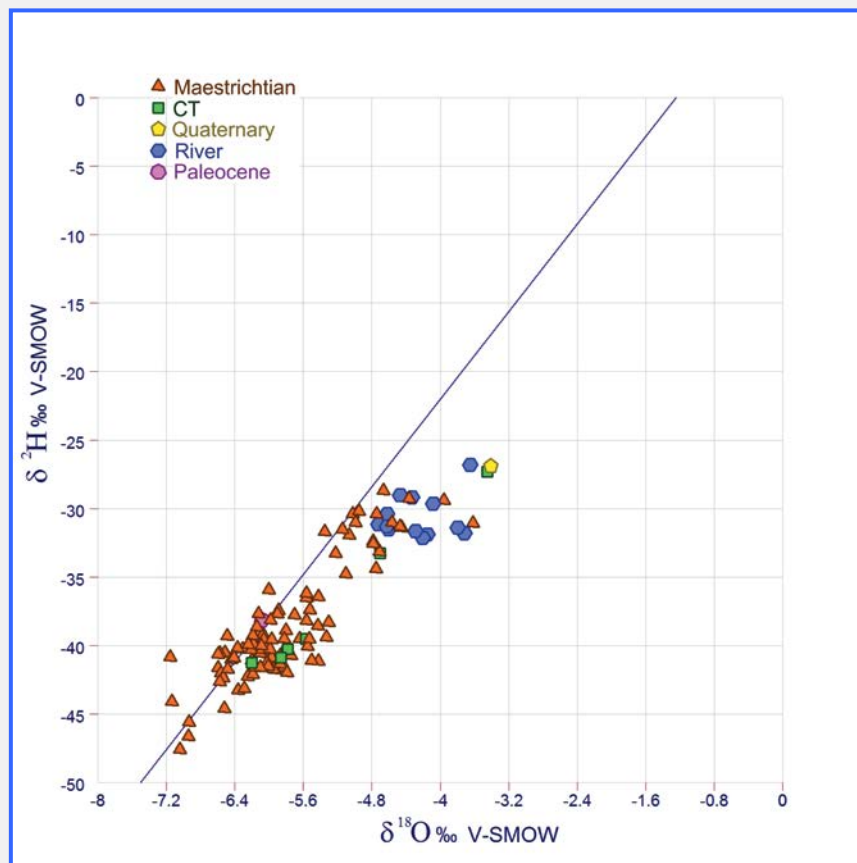


Figure 20 : Teneurs en en isotopes stables de la partie sénégalaise du bassin

4.2. Recharge des systèmes aquifères des deux côtés du fleuve Sénégal

Signature isotopique

- La teneur en isotopes stables des précipitations autour du fleuve Sénégal a été mesurée par le passé, notamment en 1981 à Richard Toll (Travi et al., 1987) et en 2010 à Rosso et à Idini (Mohamed, 2012) et des données actuelles ont été obtenues dans le cadre du présent projet. À Idini (partie centrale du bassin mauritanien), sur la base de cinq épisodes de fortes précipitations (août et septembre), les valeurs isotopiques mesurées vont de -5,93 ‰ à -6,13 ‰ et de -37,9 ‰ à -40,2 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ respectivement. À Rosso (près du fleuve Sénégal) sur la base de dix épisodes de fortes de précipitations (juillet, août et septembre), les valeurs isotopiques mesurées vont de -0,49 ‰ à -7,99 ‰ et de -3,6 ‰ à -60,7 ‰ pour ^{18}O et ^2H respectivement. La valeur moyenne pondérée de $\delta^{18}\text{O}$ est de -6 ‰ à Idini et de -4,5 ‰ à Rosso. En 1981, à Richard Toll, les valeurs moyennes pondérées de $\delta^{18}\text{O}$ étaient de -5,38 ‰ et de -5,83 ‰ pour les précipitations de juillet et d'août respectivement.

- La teneur en isotopes stables du fleuve Sénégal a déjà été étudiée par le passé (Illy, 1972, Diagana, 1994), mais il arrive bien souvent que la période d'échantillonnage ne soit pas connue ou qu'elle ne soit pas représentative, car les teneurs en isotopes stables varient considérablement entre la saison sèche et la saison humide. La recharge des aquifères se produit essentiellement en période de crue. En conséquence, seules les données recueillies pendant la saison des pluies et juste après sont prises en compte. Le personnel sénégalais ayant participé au projet a prélevé des échantillons dans le fleuve Sénégal en novembre 2013 et à la fin du mois de juin 2016 (voir la localisation des points d'échantillonnage dans les figures 11 et 12). Les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ varient de -4,72 ‰ à -3,34 ‰, alors que celles en $\delta^2\text{H}$ varient de 32,1 ‰ à 22,2 ‰.

Ainsi, pour étudier les éventuelles recharges d'eau souterraine par infiltration de précipitations et/ou d'eau fluviale, il faut tenir compte du fait que la signature en isotopes stables des précipitations est considérablement plus faible que celle du fleuve Sénégal. Il faut toutefois garder à l'esprit que, par le passé, la teneur en isotopes stables de l'eau du fleuve était peut-être plus faible qu'actuellement, ce qui montre qu'il y a eu des changements de la signature isotopique des précipitations régionales au cours du Pléistocène supérieur et de l'Holocène inférieur.

Les concentrations en tritium ont également été mesurées dans le cadre du projet. La teneur en tritium de l'eau du fleuve Sénégal prélevée au nord-est du bassin du Sénégal varie de 3,2 à 3,4 unités. Les précipitations collectées à Kaedi, dans la même zone, varient de 2,7 à 6,3 unités.

Recharge des eaux souterraines du côté sénégalais du fleuve Sénégal

Si l'on exclut les échantillons prélevés à proximité du fleuve Sénégal et les échantillons B-202 et B-040, la signature en isotopes stables ne correspond pas à la signature actuelle de l'eau du fleuve Sénégal. Il convient de noter que même la signature de l'échantillon B-051 datant de l'époque actuelle correspond à celle des précipitations actuelles. Les échantillons B-202 et B-040 datent de l'époque actuelle. La signature en isotopes stables la plus élevée pour ces échantillons pourrait s'expliquer par une recharge récente par le Lac de Guiers probablement renforcée par la mise en service du barrage de Diama. La signature légèrement évaporée (figure 21) appuie également cette hypothèse.

À l'échelle annuelle, on n'observe aucun changement significatif entre le premier échantillonnage (novembre 2013) et le deuxième (juin 2016), ce qui donne à penser que le

fleuve Sénégal n'alimente pas considérablement l'aquifère du Maastrichtien dans cette zone (figure 21).

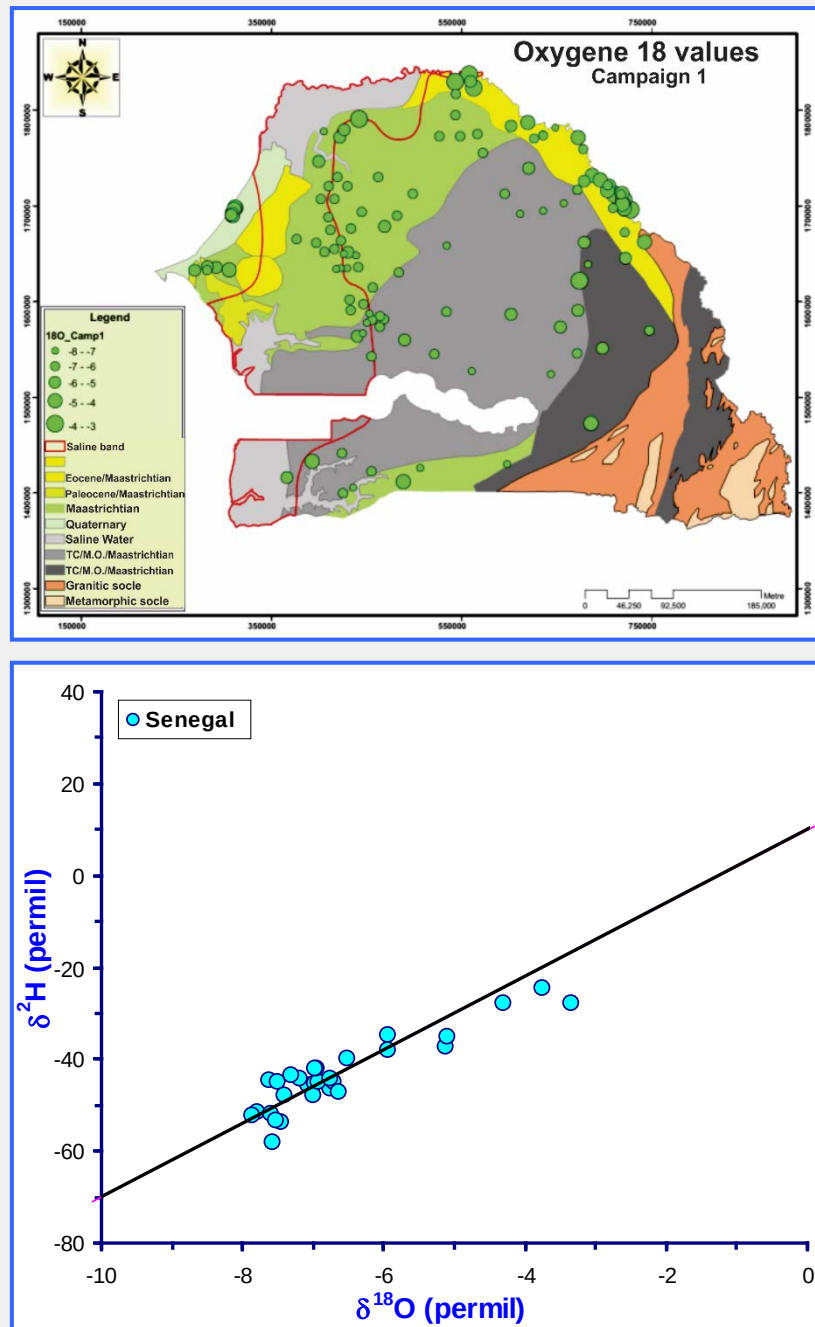


Figure 21 : Répartition spatiale des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ (1^{ère} campagne) et diagramme de la deuxième campagne pour les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et en $\delta^2\text{H}$ (côté nord-est).

La quasi-totalité des échantillons d'eau souterraine sur lesquels on a procédé à des analyses de ^{14}C (modèle de Fontes et Garnier) montre clairement qu'une recharge a eu lieu au Pléistocène supérieur (temps de transit entre 20 000 et 35 000 ans) et que l'eau s'écoule en direction du nord-ouest. L'estimation de l'âge des premiers points de deux profils (13 000 et 18 000 ans), qui pourraient correspondre à un mélange d'eaux souterraines du Pléistocène et

d'eaux souterraines d'une époque plus récente, corrobore l'hypothèse précédemment formulée (Travi, 1988) selon laquelle une recharge par le fleuve Sénégal aurait eu lieu à deux endroits à l'Holocène. La teneur en tritium, dont la valeur est inférieure au seuil de de détection, suggère qu'une recharge a eu lieu à l'Holocène, comme il a été constaté dans la partie occidentale du bassin, située dans la zone du Horst de Ndiass (Travi, 1988). Néanmoins, cette contribution est relativement faible et le débit des eaux souterraines s'explique principalement par la recharge qui a eu lieu dans le sud-est, le long des roches du socle du « Sénégal oriental ».

Le profil le plus au sud (B-068 et B-067) montre une recharge actuelle et une recharge ayant eu lieu à l'Holocène (5 000 ans, Holocène supérieur). Compte tenu de ce temps de transit et des 25 km qui séparent les deux forages, il est possible d'estimer que le ^{14}C se déplace à une vitesse d'environ 5 m/an (fig. 22 et 23).

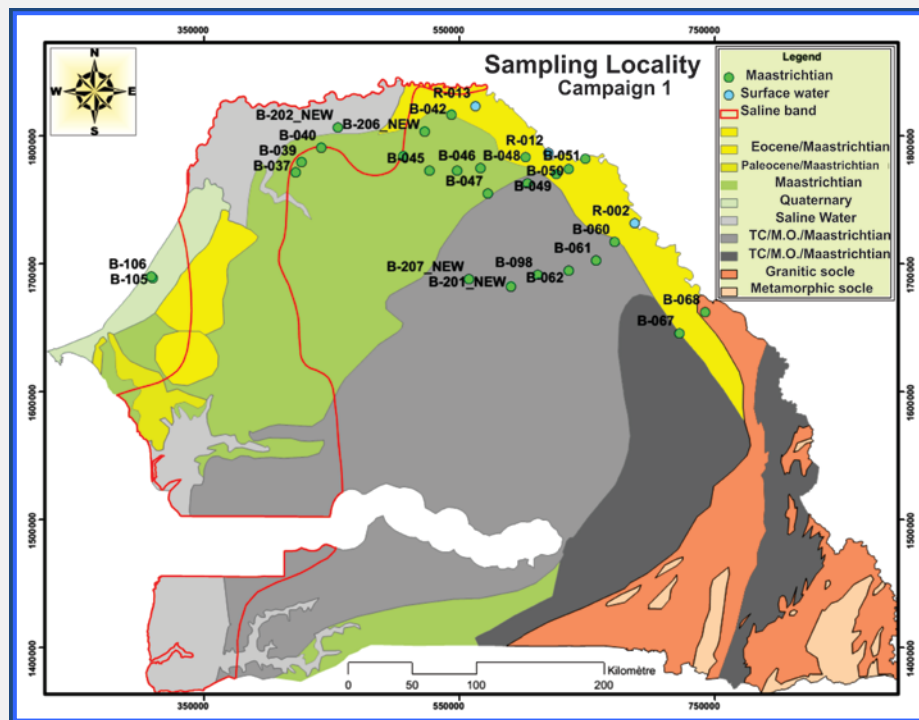


Figure 22 : Points d'échantillonnage pour datations en ^{14}C le long de certaines voies d'écoulement.

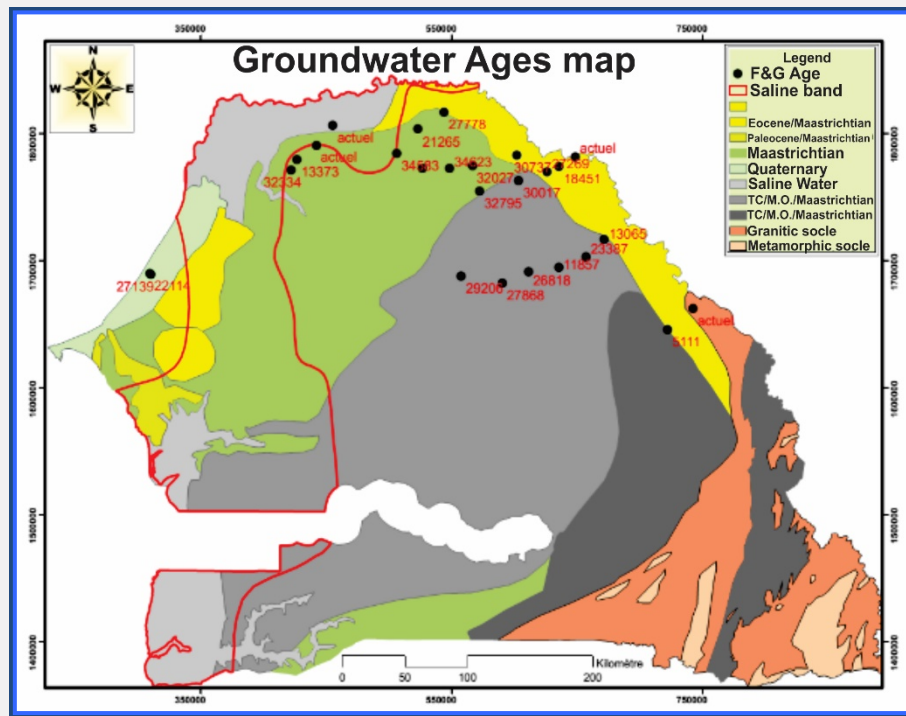


Figure 23 : Temps de transit du ^{14}C corrigés à l'aide du modèle de Fontes et Garnier

Recharge des eaux souterraines du côté mauritanien du fleuve Sénégal

Les isotopes stables sont très hétérogènes (fig. 15) et tous les échantillons de l'aquifère du Quaternaire contiennent plus ou moins d'eau évaporée. Certaines eaux souterraines des aquifères du Continental Terminal et de l'Éocène présentent également une signature évaporée. Cela montre qu'il y a des infiltrations par des eaux de surface (oued, lac, petits affluents du fleuve Sénégal ou étangs).

Il semble y avoir deux lignes d'évaporation et les valeurs des isotopes stables observées sur le diagramme mettant en relation ^{18}O et ^2H mettent en évidence deux signatures isotopiques, en particulier pour l'aquifère de l'Éocène. Cela suggère que toutes les eaux souterraines pourraient provenir des précipitations ou du fleuve Sénégal. Le fait que les teneurs en tritium diminuent de façon irrégulière entre le fleuve et le centre du bassin (figure 24) vient appuyer cette hypothèse. Il convient de noter que l'aquifère du Quaternaire et une partie de l'aquifère du Continental Terminal sont rechargés par les précipitations actuelles ou par l'eau fluviale (figure 25). En revanche, les systèmes aquifères profonds (du Continental Terminal et de l'Éocène) sont rechargés par des eaux plus anciennes. Un calcul approximatif effectué à l'aide d'un modèle piston permet de déterminer que 44 % des eaux souterraines du Continental Terminal et 40 % des eaux souterraines de l'Éocène ont été rechargées avant 1961, alors que

toutes les eaux souterraines peu profondes (principalement celles de l'aquifère du Quaternaire) ont été rechargées après cette date.

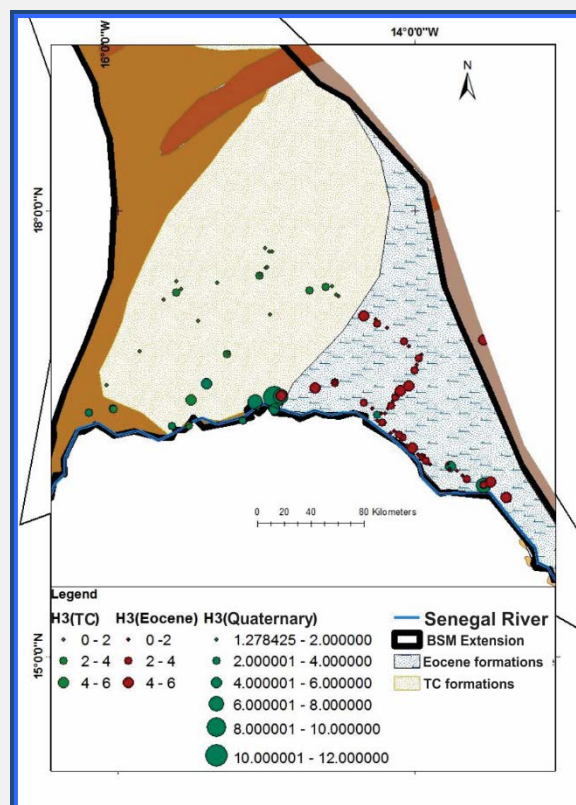


Figure 24 : Évolution de la teneur en tritium dans la partie mauritanienne du bassin sénégal-mauritanien

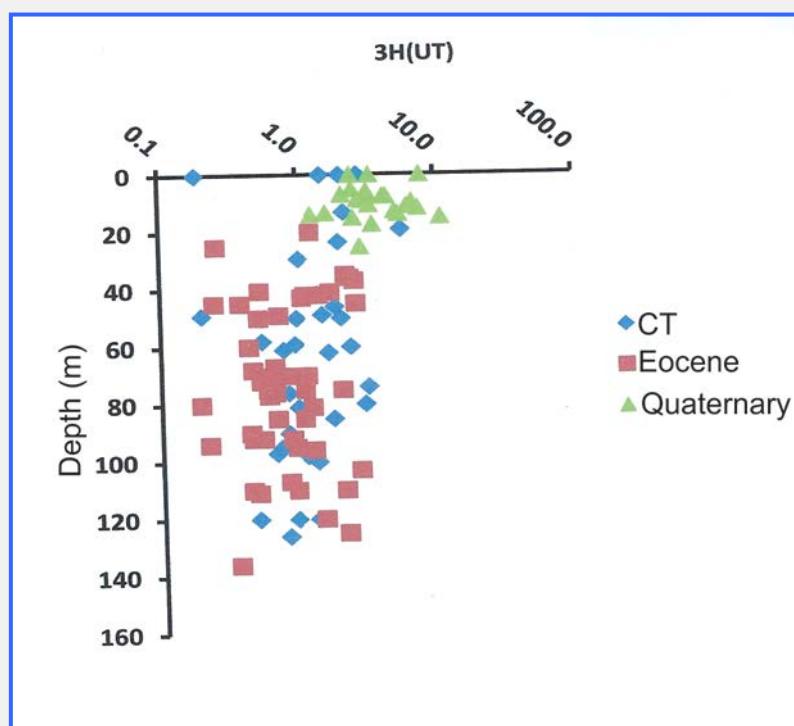


Figure 25 : Teneur en tritium et profondeur des eaux souterraines

Neuf analyses de radiocarbone ont été effectuées. Il en ressort que le pourcentage de carbone moderne des aquifères du Continental Terminal et du Quaternaire (6 échantillons) varie entre 56 et 76 % et celui de l'aquifère de l'Éocène (3 échantillons), entre 25 et 52 %. Les teneurs en $\delta^{13}\text{C}$ indiquent clairement qu'il y a eu une dilution de carbone. Les analyses de carbone corrigées à l'aide du modèle de Fontes et Garnier, qui semble le plus approprié pour ces systèmes aquifères, montrent qu'une recharge a eu lieu récemment, excepté dans deux échantillons de l'aquifère de l'Éocène. On estime que les eaux souterraines de ces deux échantillons datent respectivement de plus de 100 ans et d'environ 2 800 ans, ce qui montre que certaines eaux souterraines anciennes se trouvent dans la partie profonde de l'aquifère de l'Éocène, qui a été rechargée pendant la période humide de l'Holocène supérieur.

On peut tenter de calculer le taux de recharge en utilisant la formule simple suivante : taux de recharge = porosité x profondeur / âge. Dans ce cas précis, la formule fournit des valeurs de recharge très faibles qui sont corroborées par d'autres estimations. Le taux est évalué à environ 5 % des eaux de pluie annuelles (Mohamed, 2012), en utilisant des paramètres du bilan hydrologique et des variables hydrodynamiques. Cette constatation confirme l'hypothèse selon laquelle l'infiltration latérale du fleuve Sénégal est une source importante de recharge de l'aquifère.

4.3. Salinisation : processus généraux et localisation de la limite dans l'aquifère du Maastrichtien

Le diagramme mettant en relation la teneur en $\delta^{18}\text{O}$ et la conductivité électrique (fig. 26) confirme que la partie centrale de l'aquifère présente une gamme relativement étendue de valeurs d' $\delta^{18}\text{O}$, comme cela a déjà été observé précédemment (fig. 19 et 20). En outre, l'excès en deuterium confirme la présence d'eaux souterraines très anciennes. Il convient de noter que les teneurs en isotopes stables sont relativement plus élevées que celles observées dans les eaux souterraines profondes des bassins continentaux de l'est. Cela pourrait s'expliquer par la proximité de l'océan Atlantique et, au niveau local, par un mélange possible avec de l'eau piégée résultant de prélèvements excessifs.

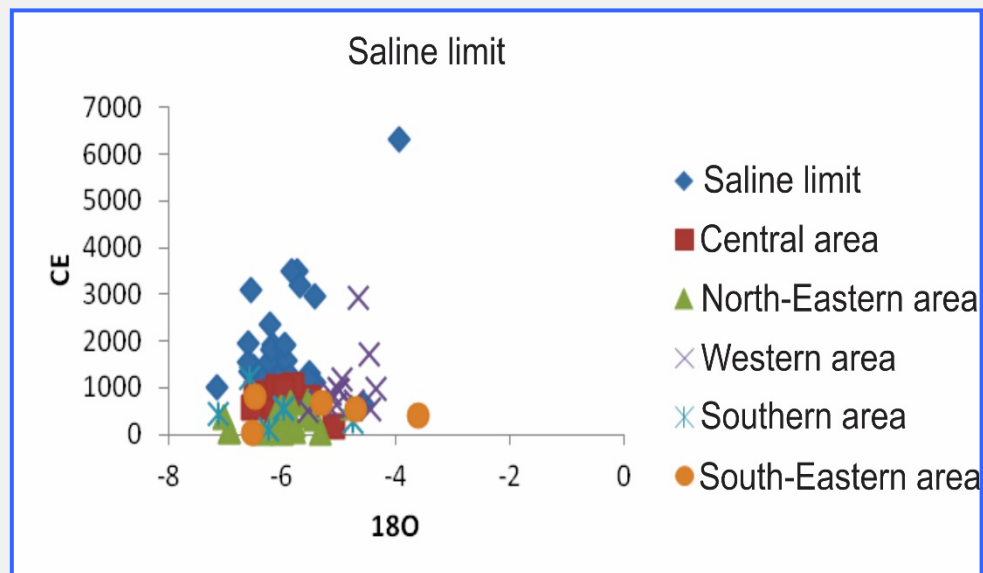


Figure 26 : Diagramme mettant en relation la teneur en $\delta^{18}\text{O}$ et la conductivité électrique (CE) dans l'aquifère du Maastrichtien

La cartographie des nouvelles données chimiques permet de délimiter plus clairement la zone saline de l'ouest du bassin. Cependant, la figure 27 montre clairement que la limite pourrait être mieux définie et délimitée en utilisant essentiellement un chlorure et un bromure. Enfin, les concentrations de bore et de fluorure, souvent considérées comme de bons indicateurs, semblent, dans ce cas, davantage liées aux sédiments argileux marins qu'à la présence d'eaux souterraines salines (voir la carte à l'annexe III).

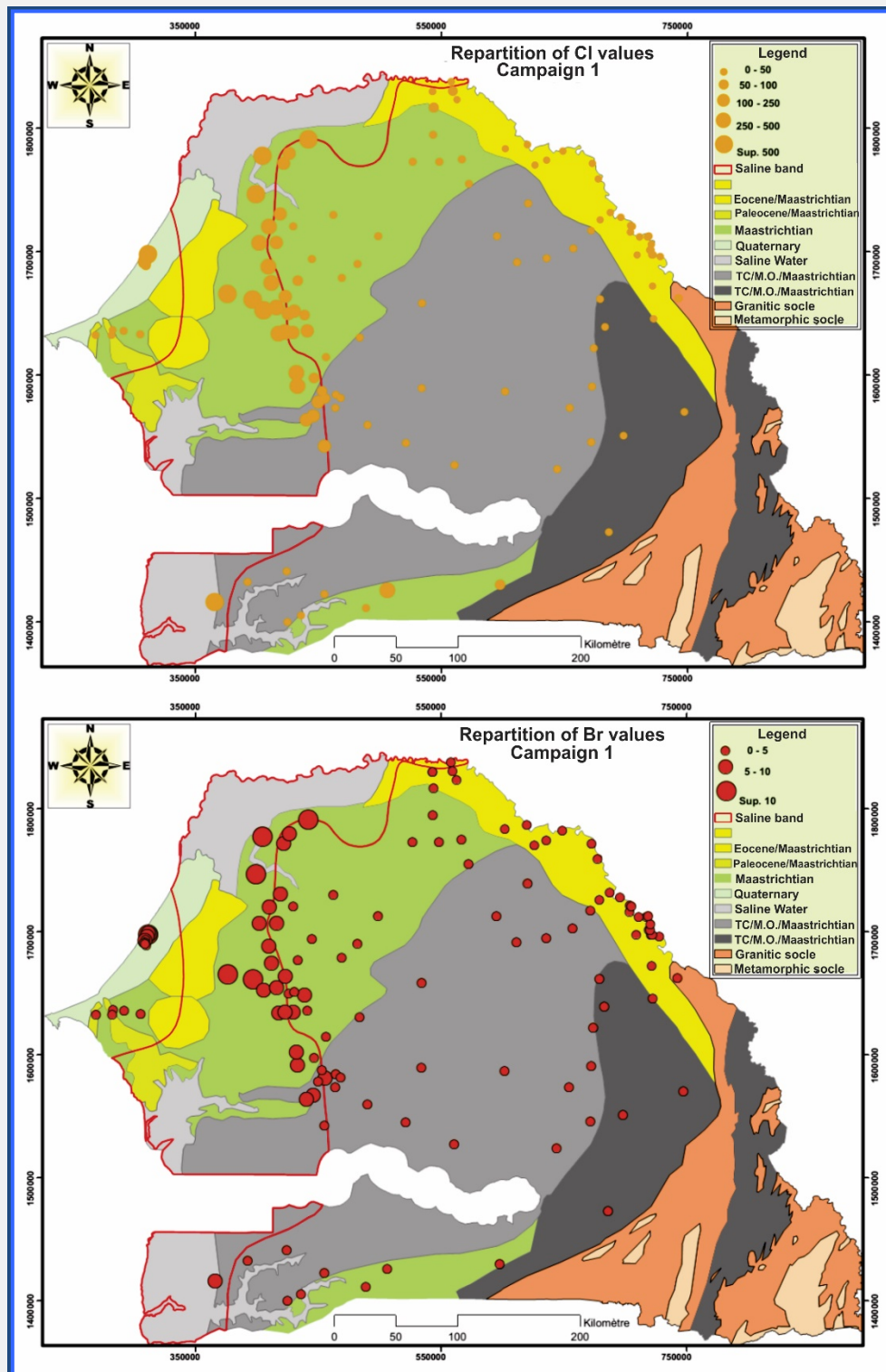


Figure 27 : Cartes de la répartition du chlorure et du bromure dans l'aquifère du Maastrichtien

En Mauritanie, le diagramme mettant en relation Cl^- et $\delta^{18}\text{O}$ montre clairement l'influence notable d'un processus d'évaporation, comme cela a déjà observé (figures 15 et 16). Cependant, le rapport $\text{Cl}^- / \delta^{18}\text{O}$, qui est généralement utilisé pour caractériser les processus de salinisation, n'indique pas clairement un rôle dominant de ce processus. Cela est confirmé par la

comparaison de la minéralisation totale et des différents niveaux d'évaporation. Il ressort des graphiques de cette figure que les teneurs élevées ne sont pas principalement liées au processus d'évaporation, bien que l'évaporation des eaux de surface avant et pendant leur infiltration ait également fortement influencé la signature géochimique.

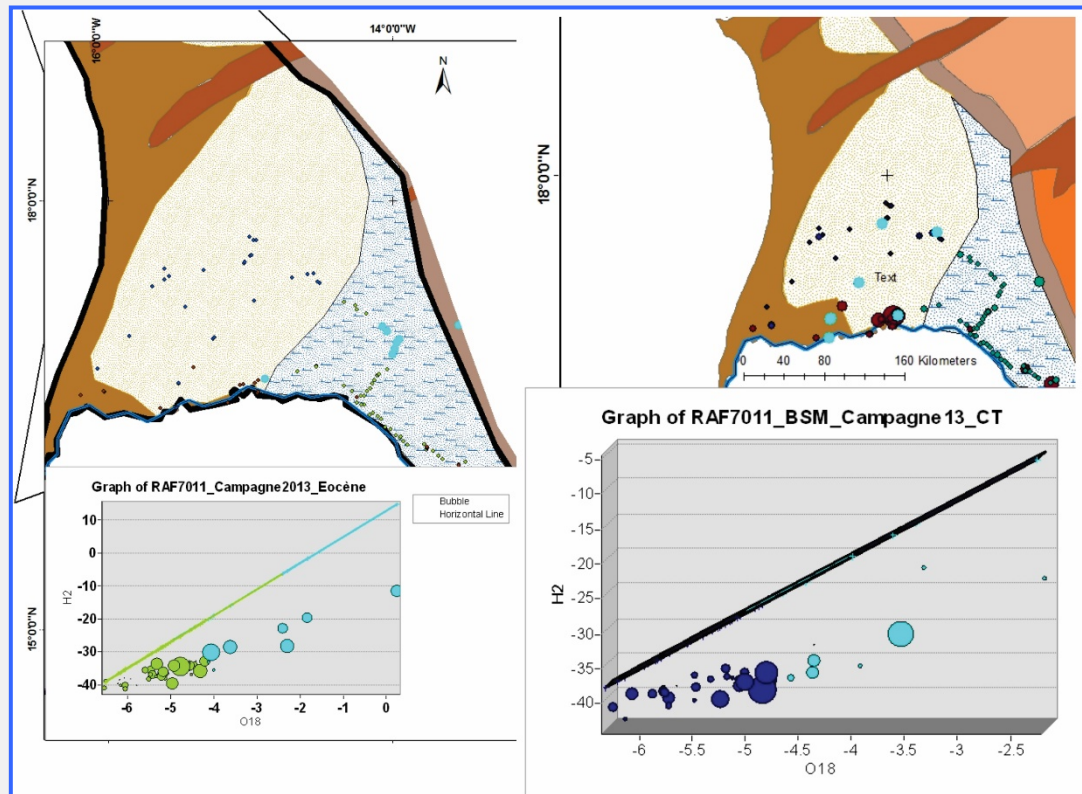


Figure 28 : Localisation des échantillons d'eau évaporée et comparaison de différents niveaux d'évaporation avec la minéralisation totale dans les aquifères du Continental Terminal et de l'Éocène.

Les mécanismes de cette salinisation sont clairement déterminés à travers le rapport Na^+/Cl^- comme le montre la figure 29. Deux phénomènes, à savoir la dissolution des halites et le mélange avec de l'eau de mer, contribuent indéniablement à l'augmentation de la minéralisation.

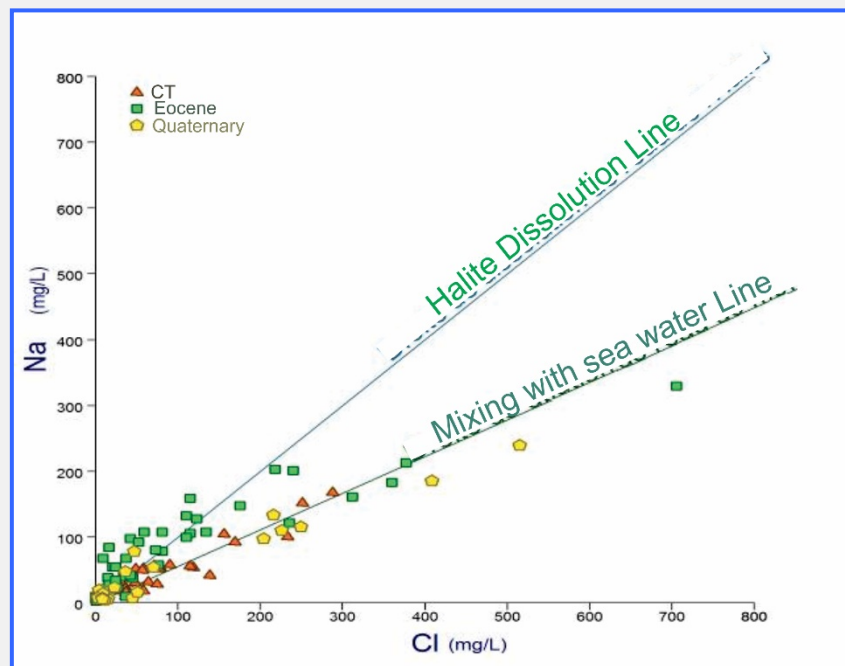


Figure 29 : Diagramme mettant en relation les teneurs en Cl et en Na dans le système aquifère mauritanien

En Mauritanie, il est bien connu que la qualité des eaux souterraines est influencée dans une large mesure par les résidus des transgressions du Quaternaire. Dans l'aquifère de l'Éocène, la salinisation résulte principalement de la dissolution de dépôts de sel plutôt que du mélange avec de l'eau salée. En revanche, dans les systèmes aquifères du Quaternaire et du Continental Terminal, le phénomène dominant, qui est localement facilité par l'évaporation, est le mélange avec de l'eau de mer. Il convient de noter que des mélanges de ce type pourraient se produire régulièrement lors de l'intrusion d'eau de mer dans le fleuve Sénégal et ses affluents. Ce phénomène s'est poursuivi jusqu'à l'époque actuelle et a probablement été stoppé par la construction du barrage de Diama.

5. CONCLUSIONS

Les deux grands sujets abordés dans ce projet sont la recharge et la salinisation. Les principales constatations des études menées sur le terrain et en laboratoire à l'aide de méthodes chimiques et isotopiques, ainsi que les interprétations décrites dans ce rapport, pourraient se résumer comme suit :

- Nouvelles informations capitales concernant la recharge et la paléorecharge ainsi que l'écoulement des eaux souterraines dans la partie est et nord-est de l'aquifère du Maastrichtien, au sud du fleuve Sénégal (Sénégal). Le fleuve Sénégal n'a pas été une source importante de recharge et n'y a contribué que faiblement au cours de l'Holocène supérieur.
- Nouvelles informations sur les conditions et les mécanismes de recharge des aquifères superficiels (Quaternaire, Continental Terminal et Éocène) situés au nord du fleuve Sénégal (Mauritanie). On distingue clairement les recharges verticales par infiltration d'eaux de pluie et les recharges latérales par infiltration d'eaux du fleuve.
- Nouvelles informations concernant la limite géographique des eaux souterraines salines dans la partie centrale de l'aquifère du Maastrichtien au Sénégal, laquelle limite a été mieux définie grâce à des traceurs de Cl et de Br. On soupçonne fortement les eaux piégées d'être à l'origine du processus de salinisation, mais cette hypothèse doit être examinée de manière plus approfondie.
- Détermination claire des deux principales voies de minéralisation, à savoir la dissolution d'évaporites et le mélange avec de l'eau de mer. L'évaporation contribue dans une large mesure à renforcer ce processus.

Un aspect tout aussi important est le fait que le projet a permis de valider et de compléter considérablement les bases de données chimiques et isotopiques du Sénégal et de la Mauritanie. Au Sénégal, un volume important de données isotopiques était déjà disponible, mais la nouvelle étude a porté sur deux domaines relativement peu connus :

- i) À l'est et au nord-est du bassin, on a découvert des eaux souterraines du Pléistocène supérieur, ce qui atteste du rôle majeur de la recharge par infiltration de précipitations à

l'extrême sud-est du bassin, le long de la limite des roches du socle. Les données de ^{14}C indiquent également que les recharges à partir du fleuve Sénégal sont très limitées (celui-ci a probablement légèrement contribué à ce processus pendant l'Holocène supérieur).

ii) Dans le centre-ouest du bassin, la limite de salinité a été clairement définie à l'aide de traceurs de Cl et de Br. Les concentrations élevées de bore et de fluorure dans cette zone ne sont pas directement liées à la présence d'eau salée, mais très probablement à la nature du réservoir (argiles marines).

En Mauritanie, les données chimiques et isotopiques sont plus rares et le projet a permis d'étendre la densité du réseau, en particulier dans les systèmes aquifères de Trarza et de Brakna. De plus, la base de connaissances a été considérablement améliorée en ce qui concerne les processus de recharge et de salinisation :

- i) L'aquifère du Quaternaire et une partie de celui du Continental Terminal sont rechargés à partir des eaux de pluie actuelles ou du fleuve Sénégal. Les systèmes aquifères plus profonds contiennent de l'eau relativement plus ancienne, et des eaux de l'Holocène supérieur ont été trouvées dans l'aquifère de l'Éocène. Les isotopes stables et radioactifs ont donné à penser que le fleuve Sénégal jouait un rôle prédominant en ce qui concerne la recharge.

- ii) Les données relatives aux isotopes stables et les diagrammes à deux variables chimiques montrent clairement que l'augmentation de la minéralisation est due principalement à la dissolution d'évaporites et/ou au mélange avec l'eau de mer, qui est souvent lié à l'intrusion d'eau de mer dans l'aquifère du Quaternaire. L'évaporation importante des eaux de surface avant et pendant leur infiltration a fortement influencé la signature géochimique.

Recommandations

Au Sénégal, le renforcement de la connaissance de l'aquifère du Maastrichtien constitue le principal défi à relever concernant l'approvisionnement en eau de l'aquifère du Maastrichtien. L'exploitation de celui-ci augmente considérablement sans un plan de gestion rationnel, car les études disponibles sont relativement fragmentaires et ne donnent que les capacités dans certaines zones. Il faut modéliser d'urgence cet aquifère dans son ensemble en tenant compte

des aspects paléohydrologiques afin d'assurer une gestion appropriée des eaux souterraines à l'avenir.

Le projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA a apporté une contribution significative à cet égard, mais d'autres informations sont nécessaires pour atteindre cet objectif, à savoir :

- Des informations fiables sur la recharge actuelle de l'aquifère à sa limite nord (autour du Lac de Guiers) et à sa limite sud (en Guinée-Bissau).
- Des informations sur la nature exacte et l'évolution de la zone saline du centre-ouest.
- Des informations complémentaires sur la paléohydrologie dans la zone centrale.

À cette fin, les recommandations suivantes ont été formulées :

- Il faudrait continuer à utiliser les méthodes isotopiques classiques (isotopes stables, tritium et ^{14}C) pour résoudre le problème de recharge autour du Lac de Guiers. À cet effet, il faudrait installer un réseau piézométrique autour du lac et créer une station d'échantillonnage (ou deux, si possible) sur le fleuve Sénégal (Réseau GNIR de l'AIEA ?) pour mieux connaître la signature isotopique du fleuve.
- Il conviendrait d'étudier la zone centrale de manière plus approfondie à l'aide d'autres isotopes radioactifs permettant de déterminer des temps de passage plus longs, ainsi que des éléments chimiques en trace. À cet égard, le bore et le lithium semblent être de bons indicateurs de la présence d'eau piégée et pourraient être davantage utilisés pour étudier les fuites ascendantes des parties profondes du système. Ces études devraient toutefois se fonder sur une nouvelle synthèse globale de toutes les données isotopiques recueillies dans le cadre de nombreux projets appuyés par l'AIEA et de travaux universitaires et souvent interprétées de manière fragmentaire.
- Enfin, il faudrait engager une collaboration avec les autorités de Guinée-Bissau responsables de la gestion de l'eau afin d'étudier (à l'aide d'isotopes stables et radioactifs) la zone de recharge située à l'extrême sud de l'aquifère du Maastrichtien.

En Mauritanie, il est essentiel de quantifier les ressources disponibles des aquifères de Trarza et de Brakna pour assurer un approvisionnement durable en eau. À cette fin, il est essentiel de mieux connaître la recharge et l'étendue de la zone de salinité pour pouvoir ensuite modéliser ces aquifères.

Le projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA a apporté une contribution significative à cet égard pour le Sénégal. Il est recommandé de poursuivre les études isotopiques, à condition qu'elles soient liées à un réseau piézométrique fiable, car l'intégration des données isotopiques, géochimiques et hydrodynamiques permettra d'obtenir les meilleurs résultats possibles.

Avant de lancer de nouveaux projets dans les deux pays, il est vivement recommandé de procéder à une évaluation globale des ressources en eaux souterraines à l'aide de l'approche IWAVE.

6. RÉFÉRENCES

Audibert M. (1970), Delta du fleuve Sénégal : Étude hydrogéologique, Projet hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal. Tome III : Hydrogéologie, Tome IV : Drainabilité, Rapport projet AFR/REG-61. FAO/OERS.

Bellion Y. (1987), Histoire géodynamique postpaléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudéni, Iullemmeden, Tchad). Thèse d'État sciences, Université d'Avignon et des pays du Vaucluse, 296 p., 126 Fig. et 213 Tab.

Bonkel A. (1989), Étude de la répartition des paramètres hydrochimiques des eaux souterraines de l'aquifère alluvial situé en rive droite du fleuve Sénégal entre Keur-Macène et Dagana. Mémoire IST, Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Diao S.M. (1992), Étude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal (Secteur Rosso - Dagana - Lac de Guiers). Rapport de DEA, Département de géologie, Faculté des sciences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 71 p.

Diagana A. (1994), Études hydrogéologiques dans la vallée du fleuve Sénégal de Bakel à Podor : relations eaux de surface/eaux souterraines. Thèse de doctorat 3^e cycle, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 127 p. et annexes.

Diaw M. (2008), Approche hydrochimique et isotopique de la relation eau de surface/nappe et du mode de recharge dans l'estuaire et la basse vallée du fleuve Sénégal. Thèse de 3^e cycle, Université de Dakar, 210 p.

Dieng B. (1987), Paléohydrologie et hydrogéologie quantitative du Sénégal, Essai d'application des anomalies observées, Thèse de l'École des mines de Paris, 168 p.

EQUESEN (1993), Environnement et qualité des eaux souterraines. Projet CEE TS 20198 F EDB - Rapport de synthèse Tome 4.

Faye A. (1983), Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du horst de Ndiass et de ses environs (Sénégal occidental). Thèse de 3^e cycle, Université de Dakar, 160 p., 74 fig., 10 tab.

Faye A. (1994), Recharge et paléorecharge des aquifères profonds du bassin du Sénégal, Apport des isotopes stables et radioactifs de l'environnement et implication paléohydrologique et paléoclimatique. Thèse de doctorat ès Sciences, Université de Dakar, 185 p.

Faye S. (2005), Apport des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum. Thèse de Doctorat d'État, ès Sciences, Université Cheik Anta Diop, Dakar.

Gaye CB. (1980), Étude hydrogéologique hydrochimique et isotopique de la nappe aquifère infra basaltique de la presqu'île du Cap-Vert (Sénégal). Thèse de 3^e cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 131 p.

Gaye CB. (1990), Étude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies, et de décharge évaporatoire des aquifères libres, sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Thèse de doctorat d'état, Département de géologie, Faculté des sciences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 243 p.

Illy P. (1973), Étude hydrogéologique de la vallée du fleuve Sénégal. Projet hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal, Rapport 65061, Dakar, OMVS, 58 p.

Madioune, D.H. (2012), Étude hydrogéologique du système aquifère du horst de Diass en condition d'exploitation intensive (bassin sédimentaire sénégalais) : apport des techniques de télédétection, modélisation, géochimie et isotopie. Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Faculté des sciences appliquées, Université de Liège, 325 p.

Madioune D.H., Mall I., Faye S., Crane E., Upton K., Ó Dochartaigh B.É. (2016), Africa Groundwater Atlas. Hydrogeology of Senegal.

Mohamed A.S. (2012), Approches hydrodynamiques et géochimique de la recharge de la nappe du Trarza, Sud-ouest de la Mauritanie. Thèse IRD, Université Paris Sud, 148 p. et annexes.

OMVS/USAID (1990), Rapport de synthèse hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal. Projet.

OMVS/USAID 625-0958. Eaux souterraines. Rapport final. Dakar, Sénégal. Volume II, p. 63 et Annexes.

Saos J.L., Kane A., Carn M., Gac J.Y. (1984), Persistance de la sécheresse au Sahel : invasion marine exceptionnelle dans la vallée du fleuve Sénégal. 10^e réunion annuelle, Sciences de la terre, Bordeaux, p. 499.

Sarr, B. (2000), Contribution à l'étude hydrogéologique des aquifères de l'Ouest du bassin du Sénégal. Thèse de doctorat 3^e cycle. Faculté des sciences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 128 p. et annexes.

Semega B.M. (1999), Interaction physico-chimiques des eaux de la nappe côtière du Trarza à Idini et le long du littoral sud, Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, 235 p.

Upton K., Ó Dochartaigh B.É. (2016), Africa Groundwater Atlas. Hydrogeology of Mauritania.

Touzi S. (1998), Formalisation des échanges fleuve-nappe en présence de zones d'inondation : cas de la régularisation des crues du fleuve Sénégal. Mém. DEA « Sci. de l'Eau dans l'Environnement Continental », ENGREF, Paris, 100 p.

Travi Y., Gac J. Y., Fontes J. C., Fritz B. (1987), Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal, Géodynamique, 2 (1), 43-53.

Travi Y. (1988), Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères fluorés du bassin du Sénégal. Origine et conditions de transport du fluor dans les eaux souterraines. Thèse de doctorat ès Sciences, Université de Paris Sud, 190 p. ; Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal, hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines, mémoire en sciences de la géologie, n° 95, 1993, 155 p.

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CT : Continental Terminal

CE : Conductivité électrique

ENIS : École nationale d'ingénieurs de Sfax

GNIR : Réseau mondial de mesure des isotopes dans les cours d'eau

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique

MAU : Mauritanie

Q : Quaternaire

BSM : Bassin sénégal-mauritanien

MDT : Matières dissoutes totales

DGPRES : Direction de la gestion et de la planification des ressources en eau

ANNEXES

Annexe I - Données de terrain et données hydrochimiques et isotopiques produites dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA. Tous les résultats des analyses sont rassemblés dans un modèle fourni séparément.

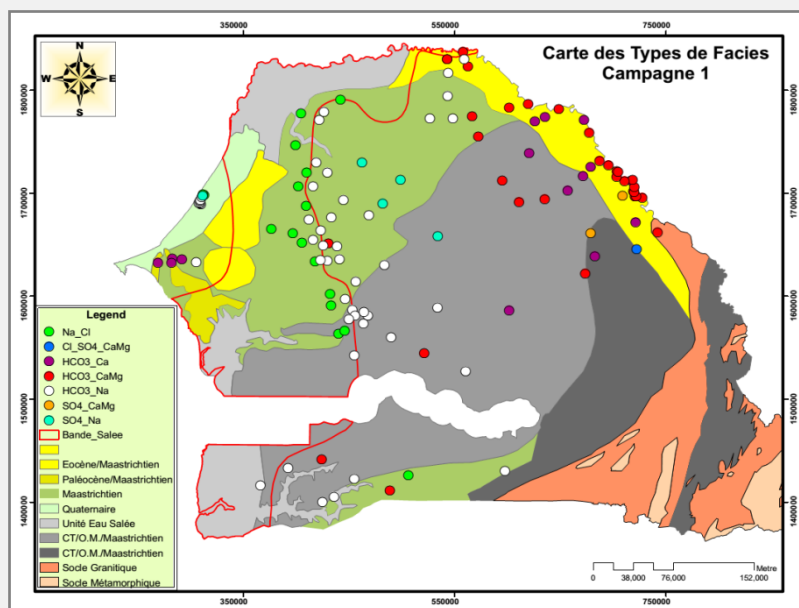
Annexe II - Calcul des temps de passage du ^{14}C pour la partie nord-est du bassin sénégalais (logiciel Diagramme)

Nom	T °C	pH	TAC (meq/l)	A ¹⁴ C	Erreur	δ ¹³ C	δ ¹³ C	A ¹⁴ C	Matrice		brut	Tamers	Pearson	Mook	F & G	AIEA	Evans	Olive	eg_c	d ¹³ Ceq	
									δ ¹³ C	A ¹⁴ C											
B037	36,1	7,79	6,00	1,27	0,3	-11,250	-19	100	0	0	36095	30622	31762	35480	32334	35416	31291	29228	-8,9	-17,80	-12,49
B039	34,7	7,62	3,80	8,86	0,3	-8,590	-19	100	0	0	20036	14681	13473	17815	13373	17223	12667	13042	-9,1	-15,15	-12,46
B040	34,2	6,94	4,30	9,47	0,3	-2,040	-19	100	0	0	19486	15191	1038	9404	actuel	4822	actuel	11147	-9,1	-7,50	-13,54
B042	35,3	7,96	4,55	2,68	0,3	-12,870	-19	100	0	0	29921	24368	26701	30215	27778	30409	26387	23139	-9,0	-19,58	-12,35
B044	36,8	7,41	4,05	1,16		-12,990	-19	100	0	0	36844	31690	33700	36954	34623	37307	33379	29623	-8,8	-19,15	-12,85
B045	36,9	7,54	4,50	1,24		-13,620	-19	100	0	0	36293	31001	33541	36759	34655	37141	33266	29228	-8,8	-19,91	-12,73
B046	36,4	7,62	4,50	1,35		-11,490	-19	100	0	0	35590	30231	31432	35039	32027	35066	30981	28600	-8,9	-17,90	-12,62
B047	36,9	7,2	4,30	1,38		-12,690	-19	100	0	0	35408	30556	32072	35230	32795	35672	31725	27824	-8,8	-18,54	-13,16
B048	35,9	7,42	3,90	1,62		-11,780	-19	100	0	0	34083	28920	30131	33618	30737	33798	29716	26872	-8,9	-18,04	-12,76
B049	37,4	7,41	5,05	0,94		-5,250	-19	100	0	0	38582	33427	27949	33583	27269	31516	25895	31363	-8,8	-11,36	-12,91
B050	33,8	6,94	3,6	4,52		-8,230	-19	100	0	0	25600	21308	18683	22429	18451	22496	17839	17256	-9,2	-13,72	-13,51
B051	32,1	6,14	0,55	84,6		-4,110	-19	100	0	0	1386	actuel	actuel	actuel	actuel	actuel	actuel	actuel	-9,4	-6,37	-16,74
B060	36,1	7,24	3,9	8,98		-8,450	-19	100	0	0	19925	15010	13226	17301	13065	16880	12351	12419	-8,9	-14,43	-13,03
B061	37,9	6,9	3	3,18		-10,320	-19	100	0	0	28507	24286	23461	26639	23387	26995	22845	20059	-8,7	-15,40	-13,92
B062	37	6,6	2,6	9,18		-7,730	-19	100	0	0	19743	16397	12308	15378	11857	15901	11243	9778	-8,8	-11,85	-14,88
B067	39,3	6,34	2,1	32,6		-11,710	-19	100	0	0	9259	6738	5257	7120	5111	8700	4785	actuel	-8,5	-14,64	-16,07
B068	33,1	6,48	2,05	93,6		-12,850	-19	100	0	0	549	actuel	actuel	actuel	actuel	1178	actuel	actuel	-9,3	-16,65	-15,20

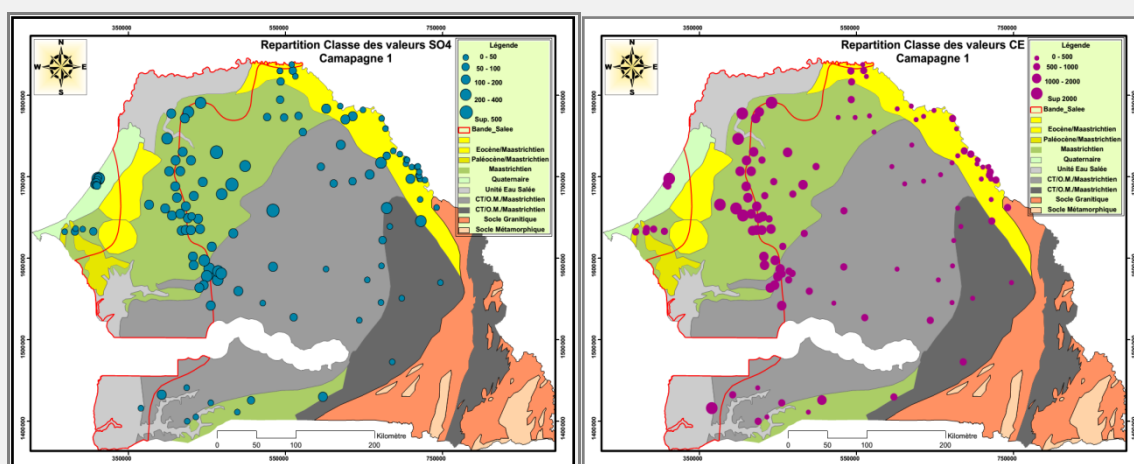
GESTION INTEGREE ET DURABLE DES SYSTEMES AQUIFERES ET DES BASSINS PARTAGES DE LA REGION DU SAHEL

B098	37,3	6,9	3	2,1		-10,320	-19	100	0	0	31937	27720	26892	30081	26818	30465	26288	23483	-8,8	-15,45	-13,88
B105	43	8,11	4,7	0,89		-4,970	-19	100	0	0	39034	33426	27948	34084	27139	31158	25234	32309	-8,1	-10,99	-13,06
B106	42	8,25	5,15	1,37		-4,290	-19	100	0	0	35468	29827	23166	29945	22114	26437	19846	28777	-8,2	-10,44	-12,96
B201	37,4	6,69	2,6	1,97		-11,000	-19	100	0	0	32466	28836	27947	30663	27868	31514	27426	23040	-8,8	-15,44	-14,56
B202	32,4	6,81	4,3	51		-7,800	-19	100	0	0	5562	1626	actuel	1763	actuel	2113	actuel	actuel	-9,4	-12,98	-13,83
B203	36,9	7,7	3,1	1,27		-13,720	-19	100	0	0	36095	30676	33403	36659	34583	37004	33136	29170	-8,8	-20,14	-12,61
B204	37,4	7,24	3,1	1,88		-12,430	-19	100	0	0	32852	27932	29344	32551	30017	32911	28969	25353	-8,8	-18,30	-13,14
B205	34,3	7,64	4,55	5,49		-12,290	-19	100	0	0	23993	18623	20391	23966	21265	24169	20043	17015	-9,1	-18,91	-12,41
B206	37,4	6,86	3,3	1,8		-11,650	-19	100	0	0	33212	29097	29168	32083	29206	32735	28718	24600	-8,8	-16,65	-14,00

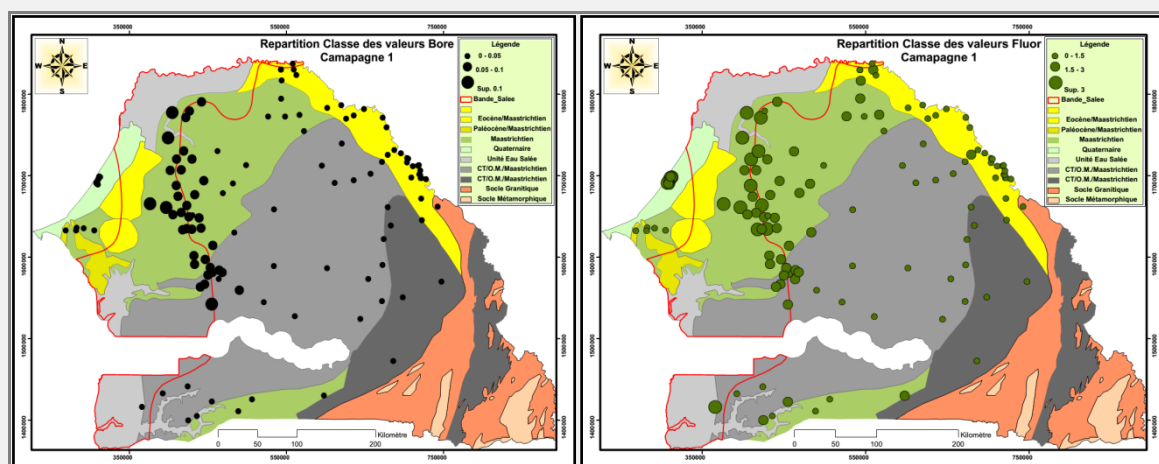
Annexe III - Cartes de la répartition spatiale des variables hydrochimiques-isotopiques pertinentes



Faciès chimiques dans l'aquifère du Maastrichtien (Sénégal)



Cartes de la répartition de SO₄ et de la conductivité électrique le long de la limite de salinité dans l'aquifère du Maastrichtien au Sénégal



Cartes de la répartition de bore et de fluorure le long de la limite de salinité dans l'aquifère du Maastrichtien