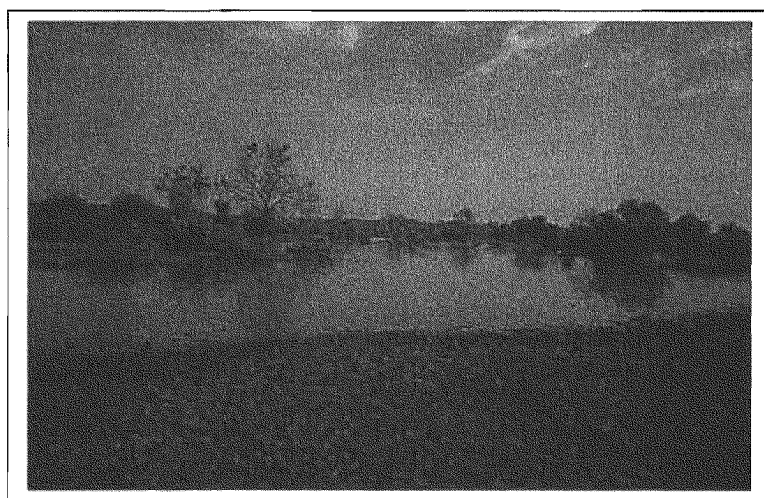


Travail de Fin d'Etudes présenté en vue de l'obtention du
Diplôme d'Etudes Supérieures en Gestion Intégrée des Ressources Hydriques
Orientation : Gestion des Bassins Hydrographiques

Année académique 2002/2003

**Estimation des taux de recharge de nappe en zone semi-aride
par la méthode du bilan des chlorures (MBC) :**

*Impact de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en Cl⁻ dans les
précipitations et application à deux grands bassins sédimentaires au Sahel.*



Août 2003

Rapport présenté par

Geoffrey CHANTRY

Sous la direction de :

Guillaume Favreau

Yves Travi

Coordonnées

Institutions impliquées dans ce travail

Institut de Recherche pour le Développement (IRD)

911, Avenue Agropolis
BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5 (France)
Tél : +3 (0) 4 67 41 61 00
Fax : +33 (0) 4 67 41 63 30
http://www.mpl.ird.fr

Maison des Sciences de l'Eau (MSE)

300, avenue du Professeur Emile Jeanbrau
34095 Montpellier (France)
Tél : +33 (0) 4 67 14 90 90
Fax : +33 (0) 4 67 14 90 87
http://www.msem.univ-montp2.fr

Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon (LHA)

Responsable : Bernard Blavoux
Faculté des Sciences
33, rue Louis Pasteur
84000 Avignon
Tél : +33 (0) 4 90 14 44 80
Fax : +33 (0) 4 90 14 44 89
Courriel : *lab.geo@univ-avignon.fr*
http://www.univ-avignon.fr/recherch/labhydro.html

Institutions coordinatrices du D.E.S. en Gestion Intégrée des Ressources Hydriques (GIRH) : orientation « Gestion des bassins hydrographiques »

Fondation Universitaire Luxembourgeoise (F.U.L.)

185, avenue de Longwy
B-6700 Arlon (Belgique)
Tél : +32 (0) 63 23 08 11
Fax : +32 (0) 63 23 08 97
Courriel : *accueil@ful.ac.be*
http://www.ful.ac.be

Unité de recherche « Eau et Environnement »

Responsable : Dr. Paul Vander Borght
Tél : +32 (0) 63 23 08 51
Fax : +32 (0) 63 23 08 00
Courriel : *vdborght@ful.ac.be*

Université de Liège (ULg)
Coordinateur du DES : Jean-Pierre Thomé
Institut de Zoologie
Bât. L1 Ecologie
22, quai Van Beneden
B-4020 Liège
Tél : +32 43 67 66 68
Fax : +32 43 67 56 13
Courriel : JP.Thome@ulg.ac.be
<http://www.ulg.ac.be>

Responsables du stage

Guillaume Favreau
IRD – UMR Hydrosociences – MSE
911, Avenue Agropolis
BP 64501, 34394 Montpellier cedex 5 (France)
Tél : +33 (0) 4 67 14 90 12
Fax : +33 (0) 4 67 14 47 74
Courriel : Guillaume.Favreau@msem.univ-montp2.fr

Yves Travi
Laboratoire d'Hydrogéologie – Université d'Avignon
33, rue Louis Pasteur
84000 Avignon
Tél : +33 (0) 4 90 14 44 88
Fax : +33 (0) 4 90 14 44 89
Courriel : Yves.Travi@univ-avignon.fr

J'adresse tout d'abord mes plus vifs remerciements à Guillaume Favreau, directeur de ce stage, pour son suivi et ses précieux conseils prodigués tout au long de ce travail ainsi qu'à Yves Travi pour son accueil chaleureux au sein de son laboratoire d'analyses et son suivi durant les deux semaines nécessaires à l'analyse de mes échantillons.

Je tiens également à remercier, Gaëlle Gaultier et Sylvain Massuel pour les renseignements qu'ils m'ont généreusement fournis, toute l'équipe du laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon et plus particulièrement Roland Simler pour ses connaissances dans le fonctionnement de l'appareillage utilisé pour mes analyses, Hélène Lubes qui a bien voulu prendre sur son temps pour vérifier mes traitements de données ainsi que mes parents et amis pour leur soutien moral et logistique au cours de la réalisation de ce travail.

Table des matières

RÉSUMÉ.....	2
INTRODUCTION.....	3
PRÉSENTATION DES STRUCTURES D'ACCUEIL DU STAGE	4
1. LA MAISON DES SCIENCES DE L'EAU	4
1.1 <i>L'UMR Hydrosiences Montpellier</i>	4
1.2 <i>MEVHYSA</i>	5
2. LE LABORATOIRE D'HYDROGÉOLOGIE DE L'UNIVERSITÉ D'AVIGNON	5
SUJET DU STAGE ET OBJECTIFS	6
PRÉSENTATION DES SITES D'ÉTUDES	7
1. LA SITUATION GÉOGRAPHIQUE.....	7
2. LES RESSOURCES EN EAU AU NIGER	7
3. LE SUD-OUEST DU NIGER.....	8
4. LE BASSIN DU LAC TCHAD.....	9
ESTIMATION DE LA RECHARGE DES AQUIFÈRES PAR LA MÉTHODE DU BILAN DES CHLORURES (MBC).....	10
1. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE	10
2. LIMITATIONS DE LA MÉTHODE.....	12
3. PROBLÉMATIQUE ÉTUDIÉE ET OBJECTIFS DU STAGE	12
PRÉSENTATION DU TRAVAIL.....	14
1. ORGANISATION ET RÉPARTITION DU TRAVAIL.....	14
2. APPAREILLAGE UTILISÉ POUR LES ANALYSES	15
1. <i>Principe de la chromatographie ionique en phase liquide</i>	15
2. <i>L'appareillage</i>	16
3. TRAITEMENT DES DONNÉES, RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	20
CONCLUSION	27
BIBLIOGRAPHIE.....	30
ANNEXES.....	32

Résumé

La Maison des Sciences de l'Eau (MSE), située à Montpellier, est un institut de recherche rassemblant des unités de chercheurs issus de l'UM2 (Université Montpellier II), de l'IRD et du CNRS et travaillant sur les problèmes de ressource et de qualité des eaux continentales. Parmi ces unités, l'UMR Hydrosociétés Montpellier étudie les impacts climatiques et anthropiques des hydrosystèmes méditerranéens et tropicaux en s'attachant principalement à la caractérisation et à la modélisation des processus régionaux mis en jeu.

C'est au sein de l'équipe MEVHYSA⁽¹⁾ (MEcanismes de la Variabilité HYdrologique en zone Semi-Aride), une des composantes de l'UMR Hydrosociétés, qu'il m'a été offert la possibilité d'effectuer mon stage. Cette équipe de chercheurs travaille actuellement au Niger près de Niamey sur l'évolution hydrologique d'une zone de 8000 km² constituée de multiples petits bassins endoréiques subissant une anthropisation croissante et s'attache tout particulièrement à caractériser de manière aussi précise que possible la recharge des aquifères de cette région.

Le Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon (LHA), impliqué dans différents programmes « Nord-Sud » de coopération et de formation à la recherche, effectue principalement des recherches sur le traçage naturel chimique et isotopique des eaux continentales dans le but de mieux appréhender les transferts hydrodynamiques au sein de milieux différents. La connaissance de ces transferts est primordiale et constitue un élément indispensable dans la protection et la gestion des ressources en eau souterraine.

La méthode du bilan des chlorures (MBC) est une des méthodes d'estimation de la recharge des nappes les plus couramment utilisées dans les régions arides et semi-arides. Sa fiabilité est cependant limitée à cause notamment de la grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations en chlorures dans les précipitations de ces régions. Le travail demandé a consisté à analyser l'impact de cette variabilité sur plusieurs sites de deux bassins sédimentaires au Niger - le bassin des Iullemmeden (site de Niamey) et le bassin du lac Tchad (sites de Diffa et N'Guigmi) - afin de permettre d'augmenter la précision des estimations de recharge des aquifères par cette méthode.

Mon stage a débuté par deux semaines de recherches bibliographiques à la MSE qui m'ont permis de me familiariser avec la méthode MBC. Afin de compléter ma liste de données, j'ai poursuivi mon stage au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon pour analyser quelques 200 échantillons d'eau. A cette occasion, j'ai pu me servir d'appareillages de chromatographie ionique en phase liquide qui m'ont permis d'élargir mes connaissances dans ce domaine.

Mon travail a confirmé la grande variabilité spatio-temporelle des concentrations en chlorures dans les pluies des régions sahéliennes et a pu mettre au jour la nécessité de considérer un nombre d'années plus important que celui généralement utilisé dans les études hydrologiques incluant la méthode MBC. L'analyse des données indique que sept années consécutives sont nécessaires pour obtenir une erreur raisonnable (précision à 10% près) sur l'apport réel en chlorures par les pluies. L'applicabilité de la méthode MBC dans la région de Niamey demeure en outre difficile du fait de l'hydrologie complexe de la région. Par contre, l'estimation obtenue à Diffa et N'Guigmi corrobore les taux de recharge obtenus par d'autres méthodes.

(1) <http://www.mpl.ird.fr/hydrologie/mevhysa>

Introduction

La gestion des ressources en eau dans les régions arides et semi-arides constitue un facteur de développement très important pour les populations locales. Des pays comme le Niger, dont l'unique source d'eau disponible n'est souvent représentée que par des nappes d'eau souterraine vulnérables à la pollution et sujettes à la diminution, ont besoin d'informations à la fois locales et précises sur leurs ressources hydriques afin d'instaurer une politique de gestion efficace et durable.

Ce besoin s'en trouve actuellement amplifié par des épisodes de sécheresses récurrents depuis les années 60 (baisse de 20 à 30% de la pluviométrie) et par la démographie croissante de certaines régions (supérieure à $3\%.an^{-1}$) qui, par le biais de ses activités anthropiques (extension des cultures, déboisement,...), modifie le comportement hydrologique des sols, accroît les besoins en eau et perturbe durablement les bilans hydrologiques de ces régions.

Les conditions climatiques particulières des régions arides et semi-arides (évaporation potentielle largement supérieure aux précipitations) ainsi que les modes de recharges singuliers qui y sont rencontrés (recharges indirectes et ponctuelles) rendent inadéquates les méthodes les plus couramment employées en milieu tempéré et dont l'estimation de la recharge des aquifères est basée sur le bilan des masses d'eaux.

Les hydrogéologues se voient donc contraints d'utiliser des méthodes s'affranchissant le plus possible des mesures de quantités d'eau. De ce point de vue, la méthode du bilan des chlorures apparaît être une méthode extrêmement intéressante pour les zones de climat sahélien. De plus, la simplicité de son principe, sa facilité de mise œuvre et son faible coût en font un outil très utile pour la gestion locale de la ressource et rendent cette méthode particulièrement compatible aux attentes de pays disposant de moyens modestes (cas de la majorité des pays sahéliens). Cette méthode, très attractive, est déjà actuellement un des outils les plus couramment utilisés dans l'estimation de la recharge des nappes dans ces régions.

Afin d'évaluer au mieux les taux de recharge, l'équipe MEVHYSA recourt souvent à l'utilisation de plusieurs méthodes convergentes mais indépendantes (et dont la méthode MBC fait partie). Le recoupement de ces méthodes empêche une utilisation « aveugle » de la méthode MBC et permet de garder un esprit critique sur ses limites d'applicabilité. Par exemple, malgré les nombreuses études déjà réalisées, la détermination des flux de recharge par la MBC reste encore entachée de nombreuses incertitudes. Parmi celles-ci, l'incertitude liée à l'estimation précise de l'apport en chlorures par les pluies semble d'importance car la variabilité spatio-temporelle des teneurs en Cl⁻ dans les précipitations est si grande en climat sahélien qu'elle oblige les hydrogéologues à considérer plusieurs saisons de précipitations dans leurs calculs afin d'atténuer l'effet des saisons extrêmes. Ce nombre d'années à prendre en compte n'est cependant pas clairement défini et la majorité des études se basent sur un nombre arbitraire de trois années de mesures.

La présente étude s'attache donc à caractériser l'impact de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en Cl⁻ dans les précipitations en vue de préciser la caractérisation et l'estimation de la recharge des aquifères dans les zones semi-arides.

Présentation des structures d'accueil du stage

Le déroulement de mon stage a porté sur deux institutions de recherche différentes : la partie de documentation (recherches bibliographiques), de recherche proprement dite (traitement des données, analyse des résultats et discussions) et de rédaction du rapport ont été réalisées à la Maison des Sciences de l'Eau à Montpellier. Les analyses chimiques des échantillons de terrains ont été effectuées au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon.

1. La Maison des Sciences de l'Eau

La Maison des Sciences de l'Eau (MSE) est un institut de recherche situé à Montpellier sur le campus universitaire de Montpellier II – CNRS ⁽¹⁾.

Son ambition première est de permettre à des institutions de recherche telles que l'UM2 (Université Montpellier II), l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) de mettre en commun une partie de leurs moyens et de leurs compétences dans le domaine des sciences de l'eau pour renforcer le potentiel de recherche montpellierain dans ce secteur et permettre la mise en place d'un véritable réseau de recherche consacré aux problèmes de ressource et de qualité des eaux continentales. La MSE joue donc un rôle moteur dans les activités de « l'Institut Languedocien de Recherche sur l'Eau et l'Environnement » (ILEE), créé en 2003 par le Ministère de la Recherche français.

Possédant également un laboratoire d'analyses, la MSE, grâce à sa capacité d'expertise, a également pour ambition d'être un interlocuteur privilégié des collectivités locales et de tous les autres acteurs, publics et privés, travaillant dans le secteur de l'eau.

Le bâtiment accueille actuellement une centaine de chercheurs ainsi qu'une trentaine de doctorants et stagiaires français ou étrangers répartis entre plusieurs unités de recherche de l'IRD et l'UMR Hydrosiences Montpellier qui est une unité mixte de chercheurs de l'UM2, du CNRS et de l'IRD.

1.1 L'UMR Hydrosiences Montpellier

Les travaux développés au sein de cette unité portent sur l'étude des impacts climatiques et anthropiques des hydrosystèmes méditerranéens et tropicaux. Ces travaux tentent de s'intégrer dans le cadre du développement durable et s'intéressent surtout à la caractérisation et à la modélisation des processus régionaux mis en jeu. Ils s'articulent autour de quatre grands axes d'études qui se subdivisent eux-mêmes en différents thèmes de recherches :

- Axe 1 : les processus biogéochimiques et les risques écologiques.
- Axe 2 : les milieux karstiques et fissurés.
- Axe 3 : l'impact de la variabilité hydrologique sur les ressources en eau.
- Axe 4 : les risques hydrologiques liés aux aléas extrêmes.

Les principaux objectifs visés par l'UMR Hydrosiences Montpellier sont, d'une part, de dynamiser et d'optimiser les réflexions mutuelles de ses différents départements en les plaçant au sein d'un cadre commun de recherches sur les problématiques de l'eau et en permettant les convergences d'intérêt et, d'autre part, de contribuer à la structuration des nombreuses compétences locales et régionales dans le domaine de l'eau.

(1) <http://www.maisondeleau.org/umrhydro.php3>

C'est au sein de l'équipe MEVHYSA, une des composantes de l'axe 3 de l'UMR, qu'il m'a été offert la possibilité d'effectuer ce travail.

1.2 MEVHYSA

L'équipe MEVHYSA (MEcanismes de la Variabilité HYdrologique en zone Semi-Aride) est impliquée dans plusieurs projets d'études au Mali, en Tunisie ou au Niger (Programme PNRH, Projet ACI, HYCHAM...). Au Niger, les recherches concernent la région de Niamey où est étudiée l'évolution hydrologique d'une zone de 8000 km² constituée de multiples petits bassins endoréiques subissant une anthropisation croissante. Les travaux qui y sont menés visent essentiellement à décrire, à quantifier et à modéliser les processus impliqués dans le ruissellement de l'eau de pluie à la surface du sol, et in fine, quantifier la recharge de la nappe phréatique.

Les différents travaux s'attachent tout particulièrement à prendre en compte des interactions entre processus à des échelles spatiales très différentes (métriques à kilométriques) tant en surface qu'au niveau de la nappe phréatique.

Guillaume Favreau, chargé de recherche à MEVHYSA, m'a proposé le sujet de recherche et s'est chargé de mon encadrement pendant la durée de mon stage.

2. Le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon

Toute la partie analytique nécessaire à la réalisation de ce travail a été effectuée au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon (LHA)⁽¹⁾.

Ce laboratoire poursuit ses activités de recherche sur le traçage naturel chimique et isotopique des eaux continentales. Ses travaux consistent à expérimenter les traceurs naturels les plus appropriés pour l'étude hydrocinématique des transferts dans différents milieux caractéristiques et représentatifs. La connaissance de ces transferts est primordiale car elle constitue un processus majeur dans la protection et la gestion des ressources en eau souterraine. Les applications que le laboratoire tire de ses recherches sont très nombreuses : elles portent par exemple sur l'identification des mécanismes d'écoulements de crue des bassins versants, l'étude du rôle joué par les forêts dans les écoulements de crue et d'étiage (programme européen FOREX), l'impact d'un changement climatique et des actions anthropiques sur les aquifères côtiers en Europe (programme européen PALAEAUX), le fonctionnement des aquifères karstiques méditerranéens (zones vulnérables, évolution...), l'origine et la datation des eaux profondes de grands bassins sédimentaires (Aquitaine, Sénégal, Tchad) et l'étude de la circulation des eaux souterraines minérales, thermales ou carboniques.

Le laboratoire est également impliqué dans différents programmes « Nord-Sud » de coopération et de formation à la recherche (Maroc, Tchad, Ethiopie, Burkina-Faso).

Depuis 1992, l'équipe du laboratoire assure la formation d'un DESS en hydrologie et environnement, DESS actuellement le plus réputé en France dans ce domaine. Les analyses chimiques qu'il m'a été donné de réaliser ont été effectuées sous la responsabilité du Pr. Yves Travi, directeur de ce DESS.

Les renseignements utiles concernant les structures d'accueil du stage et les coordonnées du personnel des différentes institutions impliquées dans ce stage sont fournis dans les premières pages du document.

(2) <http://www.univ-avignon.fr/research/labhydro.html>

Sujet du stage et objectifs

Sujet

Le stage réalisé à la MSE de Montpellier est un stage orienté vers la recherche scientifique (il était prévu à l'origine pour un DEA). Intitulé « *Estimation des taux de recharge de nappe en zone semi-aride par la méthode du bilan des chlorures (MBC) : impact de la variabilité spatio-temporelle des teneurs en Cl⁻ dans les précipitations et application à deux grands bassins sédimentaires au Sahel* », il a essentiellement consisté à analyser la variabilité spatio-temporelle des teneurs en chlorures dans les précipitations pour permettre d'améliorer les estimations de la recharge de nappes en zone semi-aride.

Objectifs

Le Niger fait partie des nations les moins développées au monde. Pays semi-aride actuellement à faibles besoins hydriques (la consommation ménagère de la population y est de l'ordre de 10 à 30 l.hab⁻¹.j⁻¹ contre plus de 250 l.hab⁻¹.j⁻¹ en Europe), il doit actuellement faire face à une augmentation démographique considérable dans certaines régions (3,1%.an⁻¹ en 2001⁽¹⁾) qui provoque un développement important des cultures irriguées et des besoins en eau.

La ressource en eau dans ces régions devient très vite un enjeu de développement capital et vital dont la gestion doit nécessairement être réalisée de manière intégrée et efficiente. Cette matière, déjà largement développée au sein l'IRD, est également reprise par MEVHYSA pour mener à bien ses recherches dans ce pays. A travers ses travaux, elle essaie de mieux comprendre le fonctionnement des aquifères pour permettre aux institutions locales de pouvoir gérer, à terme, leurs propres ressources en eau (cette implication de la population locale est déjà effective à l'heure actuelle grâce à la formation de chercheurs et par la présence de collaborateurs permanents sur le terrain).

Plusieurs méthodes d'estimation de la recharge des aquifères ont déjà été employées par l'équipe de MEVHYSA dans les régions de Niamey et du bassin du lac Tchad mais l'incertitude des taux de recharges obtenus dans ces régions semi-arides reste élevée.

Le sujet de ce stage, visant à préciser la caractérisation et l'estimation de la recharge d'aquifères en zone aride et semi-aride, s'intègre bien dans une politique de meilleure gestion intégrée de la ressource en eau des pays en zone sahélienne. Le premier site se situe au sud-ouest du Niger, dans une région où le niveau de la nappe phréatique augmente depuis 40 ans mais où la pression anthropique sur le milieu s'accroît fortement alors que le second site, localisé au sud-est du Niger, est peu peuplé mais voit le niveau de sa nappe diminuer d'année en année.

(1) <http://www.worldbank.org>

Présentation des sites d'études

1. La situation géographique

Le Niger, situé au cœur de l'Afrique de l'ouest, est entouré de sept pays limitrophes : le Mali au nord-ouest, le Burkina-Faso à l'ouest, le Bénin au sud, le Nigeria au sud et sud est, le Tchad à l'est, la Libye et l'Algérie au nord. Pays continental dépourvu d'accès à la mer, les régions arides ou semi-arides occupent 80% des 1 333 000 km² de superficie du pays. Niamey, la capitale, est localisée à l'extrémité sud-ouest du pays, en plein cœur de la bande sahélienne.

Le premier site d'étude couvre une superficie de 8000 km² et se situe juste à l'est de Niamey. Le second site est localisé dans le sud-est du Niger et couvre un territoire de 200000 km² situé au nord-ouest du lac Tchad dans la région de Diffa et N'Guigmi (figure 1).



Figure 1 : Localisation des principales villes du Niger et des bassins sédimentaires des Iullemmeden et du Tchad.

2. Les ressources en eau au Niger

Les précipitations au Sahel sont essentiellement régies par le FIT (Front InterTropical) qui sépare deux courants circulatoires atmosphériques opposés. L'alizé boréal, prédominant généralement de novembre en décembre, provient du Sahara et apporte un air chaud et sec au-dessus du Niger alors que l'alizé austral est particulièrement actif entre juin et septembre et apporte un climat beaucoup plus frais et humide, en provenance du golfe de Guinée. L'antagonisme créé par ces deux masses d'air engendre des courants convectifs qui se traduisent sur le terrain par des pluies intenses, de courtes durées, de grandes variabilités spatiales et de forte répartition saisonnière.

Les précipitations décroissent généralement du sud vers le nord et d'ouest en est. Les relevés pluviométriques effectués à Niamey, Diffa et N'Guigmi indiquent des précipitations moyennes annuelles respectives de 567 mm, 240 mm et 184 mm dont 90% tombent généralement entre juin et septembre.

L'évaporation potentielle est très importante car les températures sont élevées (moyenne annuelle de 29°). A Niamey, l'ETP annuelle oscille entre 2500 et 3800 mm contre 2500 mm dans la région du lac Tchad.

Sur les sites d'études, ce sont les nappes phréatiques qui constituent l'essentiel de la ressource en eau car les cours d'eau permanents sont inexistants. La recharge des aquifères n'est pas diffuse mais ponctuelle : les conditions topographiques (relief relativement plat), pédologiques (sols sablo-argileux) et climatiques actuelles (variabilité spatiale, temporelle et saisonnière des précipitations, forte évaporation...) défavorisent l'écoulement continu permanent au profit du ruissellement temporaire de type hortonien. Ce ruissellement permet la formation de mares endoréiques temporaires dans les dépressions du relief qui agissent comme des zones d'infiltration préférentielle de l'eau, constituant ainsi les sites principaux de recharge de la nappe sous-jacente. Pour MARTIN-ROSALES et LEDUC (2003), les infiltrations représentent de l'ordre de 85-90% du volume d'une mare.

3. Le Sud-Ouest du Niger

La région de Niamey étudiée présente un relief relativement homogène constitué de plateaux latéritiques de 255 à 265 mètres d'altitude et de deux vallées fossiles (le Dallol Bosso et le Kori de Dantiandou) aujourd'hui partiellement ensablées et dont les altitudes les plus basses oscillent entre 190 et 215 mètres. Ces deux anciennes vallées ne sont plus fonctionnelles actuellement : seules quelques mares temporaires s'y forment encore pendant la saison des pluies.

Les aquifères, situés généralement entre 10 et 70 m de profondeur, sont localisés dans des formations sableuses, argileuses, grés-argileuse ou parfois oolithiques ferrugineuses d'âge éocène moyen à pliocène. Ces couches lithologiques correspondent au dernier épisode sédimentaire du bassin intracontinental des Iullemmeden qui englobe toute la région du sud-ouest Niger. Cet ensemble lithologique, de structure relativement simple, n'a que peu d'influence en tant que tel sur la dynamique locale des nappes phréatiques.

La végétation naturelle consiste essentiellement en des formations végétales ouvertes d'allure linéaire et espacées régulièrement par un sol nu. Ce sont les « brousses tigrées », dans lesquelles les arbres et arbustes n'excèdent en général pas 5 à 8 mètres de hauteur. Malheureusement, la région, d'une densité de 25 hab.km⁻², connaît actuellement une croissance démographique importante (taux de croissance de 3,3%.an⁻¹) qui induit une recrudescence de la pression anthropique sur l'occupation du sol. Le déboisement à des fins énergétiques ou pastorales réduit de manière très importante le couvert végétal au profit de l'installation de sols dénudés ou de la mise en culture des terres (du mil le plus souvent).

Bien que les précipitations des dernières décennies tendent à indiquer une période relativement sèche, la nappe de la région monte. La raison est que le déboisement intensif opéré par les populations locales modifie le bilan hydrologique du site. La plus grande superficie de sols mis à nu favorise la formation des mares endoréiques (zones d'infiltration) et diminue l'évapotranspiration due aux plantes, ce qui conduit à des taux de recharge de la nappe plus importants que dans le passé.

4. Le bassin du Lac Tchad

Dans la région du lac Tchad, le relief présente une grande homogénéité : le point bas, situé à 275 m d'altitude, étant le lac et les points hauts les massifs crétacés de Termit et Agadem (500 m d'altitude). Les sols sont surtout représentés par des dépôts quaternaires alluviaux ou éoliens, sablo-limoneux et quelquefois argileux.

Si la végétation naturelle est relativement comparable à celle du sud-ouest du pays, la pression anthropique est par contre bien moins importante qu'à Niamey. Le taux de croissance est de l'ordre de $1\%.an^{-1}$ pour une densité de population de $1,5\text{ hab.km}^{-2}$. Ces populations du sud-est Niger ont essentiellement des activités agropastorales orientées vers l'élevage.

Le Lac Tchad connaît actuellement une période de récession très importante suite à la période relativement sèche qui y sévit depuis la fin des années 60, passant en 40 ans d'une surface de 25000 km^2 à moins de 1350 km^2 (COE et FOLEY, 2001). Le réseau hydrographique de la région se résume à la partie nigérienne du lac, presque constamment asséchée depuis quelques années, à une rivière non permanente (le Komadougou Yobé) alimentant le lac et à de nombreuses mares endoréiques. La nappe phréatique de la région se rencontre entre 1 et 55 m de profondeur et présente un léger écoulement en direction de la zone du lac (GAULTIER et al., 2003).

Les taux de recharges entre les deux régions sont donc forts différents : les études de LEDUC *et al.* (1996, 1998 et 2000) indiquent qu'à Niamey l'infiltration atteignant la nappe varie entre 25 et 50 mm.an^{-1} pour une pluie annuelle d'environ 560 mm alors qu'au lac Tchad les taux de recharges n'atteignent que 2 ou 3 mm.an^{-1} pour des précipitations annuelles dépassant rarement 350 mm.

Estimation de la recharge des aquifères par la méthode du bilan des chlorures (MBC)

1. Présentation de la méthode

La méthode habituelle pour estimer la recharge d'un aquifère consiste à faire son bilan hydrologique : l'estimation de la quantité d'eau infiltrée dans le sol permettant d'obtenir son taux de recharge. Si cette méthode est largement utilisée dans nos pays tempérés, elle est bien moins adaptée aux contrées arides de type sahélien car elle rencontre deux problèmes majeurs.

Premièrement, l'évaporation potentielle est beaucoup plus élevée qu'en climat tempéré : avec des cumuls annuels d'environ 2000 mm, elle dépasse très largement les précipitations (500 mm.an^{-1}) et il en ressort que les taux de recharge de ces nappes sont toujours faibles (de l'ordre du mm ou de la dizaine de mm.an^{-1}). Si l'on applique la méthode usuelle du bilan des masses d'eau, on détermine le taux de recharge en soustrayant la fraction de l'eau évaporée des précipitations. On soustrait donc deux grands nombres pour en obtenir un petit (puisque les deux nombres sont du même ordre de grandeur). Il s'ensuit que le taux de recharge obtenu de cette manière est très peu sûr car une légère erreur de mesure sur un des grands nombres induira une erreur très importante sur la réponse (une erreur de 100% n'est pas rare).

Deuxièmement, la méthode classique du bilan des masses d'eaux s'utilise en cas de recharge directe de la nappe. Or, en zone semi-aride, ce sont souvent les mares endoréiques qui constituent le mode principal de recharge de l'aquifère (SIMMERS et al., 1997). Ces zones temporaires d'infiltration constituent un système de restitution indirecte de l'eau à la nappe dont la variabilité spatio-temporelle et le mode de recharge ponctuel sont difficilement pris en compte par cette méthode.

Dans ce type d'environnement, il importe donc d'utiliser des méthodes permettant d'estimer la recharge d'un aquifère en s'affranchissant le mieux possible des mesures de quantités d'eau. A ce titre l'utilisation des traceurs ioniques, isotopiques stables ou radioactifs s'avère très utile.

L'utilisation du chlorure (Cl^-) comme traceur présente de nombreux avantages (HERCZEG et EDMUNDS, 2000) :

- C'est un élément ubiquiste présent dans toutes les eaux naturelles.
- Il est peu absorbé par les plantes.
- Il est fortement soluble, ne cristallisant qu'à des concentrations très élevées.
- Il fait partie des éléments persistants ce qui signifie qu'il n'a pas tendance à être impliqué dans les réactions géochimiques du sol ou de la nappe phréatique.
- Son cycle géochimique est proche de celui de l'eau à l'exception qu'il n'est pas impliqué dans le processus d'évaporation. Lorsque de l'eau s'évapore, le Cl^- reste dans la solution résiduelle et s'y concentre proportionnellement à la quantité d'eau évaporée.

Il en ressort que le chlorure est un élément persistant et stable doté d'une mobilité proche de la mobilité des molécules d'eau. Suite à un événement pluvieux, l'eau contenant la signature enrichie en chlorure va quitter la zone d'évapotranspiration du sol (zone

comprise entre la surface du sol et l'extrémité de la zone racinaire des plantes) et transporter cette signature vers l'aquifère. Celle-ci peut alors être utilisée pour estimer la perte nette en eau comparée aux précipitations et, de là, en déduire le montant de la recharge.

Qu'en est-il de la méthode proprement dite ?

D'après WOOD (1999), la méthode du bilan des chlorures repose sur le même principe que le bilan des masses d'eau : les précipitations (P) peuvent être évaporées (E), subir un ruissellement de surface (Q) ou s'infiltrer dans le sol pour contribuer à la recharge (R) de l'aquifère.

$$P = E + R + Q$$

En faisant les hypothèses que le seul apport de Cl^- est dû aux précipitations et qu'il n'y a aucun lessivage de chlorure hors du système, les concentrations en Cl^- peuvent être incluses dans l'équation précédente :

$$P[\text{Cl}^-]_p = E[\text{Cl}^-] + R[\text{Cl}^-]_{es} + Q[\text{Cl}^-]_{rui}$$

Où $[\text{Cl}^-]_p$ = la concentration en Cl^- dans les précipitations, $[\text{Cl}^-]_{es}$ = la concentration en Cl^- dans l'eau du sol sous la zone racinaire et $[\text{Cl}^-]_{rui}$ = la concentration en Cl^- dans l'eau de ruissellement.

Comme le chlorure n'est pas impliqué dans le processus d'évaporation, le terme $E[\text{Cl}^-]$ est nul. La recharge de l'aquifère devient alors :

$$R = (P[\text{Cl}^-]_p - Q[\text{Cl}^-]_{rui}) / [\text{Cl}^-]_{es}$$

Dans la région étudiée ici aucun ruissellement n'atteint de rivière exoréique: le terme $Q[\text{Cl}^-]_{rui}$ est négligeable. La recharge de l'aquifère en un lieu déterminé peut alors être estimée par la formule suivante :

$$R = P[\text{Cl}^-]_p / [\text{Cl}^-]_{es}$$

Avec R = le taux de recharge de la nappe (mm.an^{-1}) ; P = le taux moyen annuel des précipitations (mm.an^{-1}) ; $[\text{Cl}^-]_p$ = la concentration moyenne pondérée en Cl^- des eaux de pluie (mg.l^{-1}) ; $[\text{Cl}^-]_{es}$ = la concentration moyenne en Cl^- de l'eau interstitielle du sol (mg.l^{-1}).

La méthode présente l'avantage d'être peu coûteuse : une analyse des chlorures coûte en effet de l'ordre de 2,5€ contre 100€ pour les analyses isotopiques (^{14}C , ^3H , ^2H ou ^{18}O). Elle est également fort simple d'utilisation, ne nécessitant que la connaissance des précipitations, des teneurs en chlorure dans celles-ci et dans l'aquifère et demeure donc par la même occasion relativement indépendante du mode de recharge de la nappe phréatique (recharge diffuse ou bien indirecte). Elle est donc bien adaptée aux zones de climat sahélien où les précipitations sont dotées d'une grande variabilité spatio-temporelle et où les recharges sont fréquemment limitées à quelques dépressions concentrant les flux de ruissellement.

Déjà très polyvalente, la méthode a connu quelques développements récents, tel le couplage de la méthode avec des SIG qui lui ont encore permis d'élargir son spectre

d'application. La méthode du bilan des chlorures est couramment utilisée dans de nombreux pays plus ou moins arides tels que l'Australie, l'Arabie Saoudite, Israël, ou certaines régions des Etats-Unis (HERCZEG et EDMUNDS, 2000). Elle commence même à être utilisée en Europe comme en témoigne les travaux récents effectués avec cette méthode dans la plaine alluviale du Pô en Italie (LO RUSSO *et al.*, 2003).

2. Limitations de la méthode

Si la méthode est très polyvalente et très simple, le succès de son application dépend avant tout des hypothèses suivantes (BROMLEY *et al.*, 1997 ; HERCZEG et EDMUNDS, 2000) :

1. Que la concentration en chlorures dans les précipitations a été constante dans le temps et que celle-ci est représentée par la concentration moyenne mesurée $[Cl^-]_p$ à partir des échantillons disponibles.
2. La source de chlorure ne peut provenir que des précipitations. Les apports anthropiques (industries, fertilisants, faeces), géologiques (évaporites,...) ou éoliens doivent demeurer en quantités négligeables.
3. Le Cl^- ne doit pas intervenir dans les réactions biogéochimiques du système.
4. Le flux d'eau principal doit passer à travers la matrice du sol et ne doit pas court-circuiter sa traversée en passant par des grosses zones d'infiltrations préférentielles (en cas de recharge diffuse).
5. Il ne peut y avoir de fuites d'eau hors du système étudié ni d'apports extérieurs autres que les précipitations.
6. Le chlorure ne peut pas être remanié ou recyclé dans le bassin versant.

Ces restrictions expliquent bien évidemment que la méthode ne puisse être utilisée partout. Il serait par exemple illusoire de vouloir estimer la recharge des aquifères par le bilan de masse des chlorures dans des régions fortement industrialisées, sujettes à une agriculture d'irrigation en milieu aride ou présentant d'importants dépôts évaporitiques dans ses sols.

3. Problématique étudiée et objectifs du stage

Si toutes ces conditions restrictives se comprennent aisément, la première hypothèse fait cependant apparaître un problème relativement complexe concernant la représentativité de la concentration moyenne en chlorures ($[Cl^-]_p$) à utiliser dans l'équation générale de recharge de la nappe.

La méthode du bilan des chlorures a la caractéristique importante d'intégrer la recharge de plusieurs années de pluies sur un site donné. Il est clair que l'eau présente dans un aquifère est la résultante d'un mélange d'eau qui s'infiltré et d'eau déjà présente dans le réservoir et qui provient de pluies antérieures. Selon le temps de résidence de son eau, une nappe phréatique intègre donc la signature chimique de précipitations vieilles de plusieurs dizaines, voire centaines d'années.

Il est possible d'estimer la recharge d'une nappe en ne prenant que les données en chlorures des précipitations récoltées sur une seule année mais, si cette année correspond à un événement exceptionnel en terme de concentrations en chlorures dans les eaux de pluies, le taux de recharge obtenu ne sera pas représentatif de la quantité d'eau réellement

infiltrée dans le réservoir. Une année de précipitations anormalement enrichie en chlorures donnera une estimation excessive du taux de recharge et vice versa.

Par contre, si les données sont prises sur plusieurs années, l'effet des années extrêmes est fortement atténué car on précise une valeur moyenne bien plus stable dans le temps. Il en ressort une estimation de la recharge plus précise qu'auparavant. Bien évidemment, il existe une limite où la prise en compte d'années supplémentaires n'améliore plus beaucoup la précision sur la valeur $[Cl]_p$.

Ceci démontre qu'une des sources principales d'incertitude, en appliquant cette technique, tient donc dans la connaissance de la chimie des pluies des périodes précédentes.

Les hydrogéologues ont résolu ce problème en considérant qu'un minimum de 3 années de données pluviométriques est nécessaire pour obtenir des estimations fiables (EDMUNDS et GAYE, 1994) mais ce choix demeure avant tout fort subjectif car il n'est basé sur aucune étude chiffrée. Ces mêmes auteurs signalent par ailleurs que : « ... *data are available for 3 years, and the accuracy of the recharge estimates depends strongly on the reliability of the rainfall record. Errors are estimated to be within 30% using data for rainfall measured in the project area over the 3 year period. The increase in the precision of the method clearly improves with the increasing number of rainfall sites used and with the length of record.* » (EDMUNDS et GAYE, 1994). Ces auteurs estiment donc que les erreurs peuvent être de l'ordre de 30% en ne prenant que 3 années de mesures (à noter que les auteurs n'expliquent pas de quelle façon ils ont estimés ce chiffre de 30% d'erreur). Ils préconisent donc d'utiliser de plus longues séries de données tout en se gardant bien d'avancer un chiffre.

Le premier objectif scientifique de ce stage, a donc été de préciser quelque peu le nombre d'années à prendre en compte lors de l'application de la méthode en comparant les teneurs en Cl⁻ dans les eaux de pluies de différentes années et en comparant les résultats aux données de nappes.

Le second objectif a été de vérifier l'applicabilité de la méthode MBC sur deux sites d'études de situations hydrogéologiques différentes, en regardant si les estimations des recharges MBC obtenues concordaient avec les estimations isotopiques et hydrodynamiques antérieures obtenues avec d'autres méthodes.

Présentation du travail

1. Organisation et répartition du travail

Mois	Semaines	Activités principales
Juin	1	Accueil Recherches bibliographiques Détermination du contenu du stage
	2	Recherches bibliographiques Encodage des échantillons et de certaines données
	3	Analyse des échantillons au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon
	4	
Juillet	1	Encodage des résultats d'analyses
	2	Traitement des données
	3	Traitement des données
	4	Rédaction du rapport
Août	1	Vérification des résultats du traitement des données Recherches bibliographiques
	2	Recherches bibliographiques
	3	Rédaction du rapport
	4	Rédaction du rapport Correction du rapport

Tableau 1 : Récapitulatif du calendrier de mon stage et des principales activités réalisées.

Mon stage a commencé début juin à la MSE de Montpellier par une phase de recherche bibliographique d'environ deux semaines. Celle-ci m'a permis d'approfondir mes connaissances sur le fonctionnement hydrologique de la zone sahéenne, de découvrir les spécificités propres des régions de Niamey et du bassin du Lac Tchad mais également de parfaire mes connaissances sur la méthode MBC.

Après cette première prise de contact avec mon sujet de travail, Guillaume Favreau m'a expliqué quelle était la problématique sur laquelle il voulait que je travaille, quels étaient les objectifs scientifiques de ce stage et qu'elle était à plus long terme l'importance de la gestion des ressources en eau pour le Sahel.

Afin de compléter les données déjà existantes, Guillaume Favreau m'a également chargé d'effectuer les analyses des teneurs en chlorures et bromures des échantillons d'eau de pluies non encore analysés.

Le tri et le classement de ces échantillons n'ont pas été réalisés sans quelques difficultés. En effet, n'ayant pas effectué moi-même la phase d'échantillonnage (celle-ci étant laissée à des personnes sur place en permanence), j'ai dû réaliser l'inventaire des analyses à faire sur base des étiquettes des échantillons et des rapports d'échantillonnages. Mais les inscriptions sur certaines étiquettes étaient parfois ambiguës et les rapports d'échantillonnages ne concordaient pas toujours parfaitement avec les échantillons ce qui m'a alors obligé à interroger directement les responsables des échantillonnages afin d'éviter toute erreur. J'ai également dû me résoudre à abandonner une série entière d'échantillons d'un autre site car les étiquettes y étaient devenues totalement illisibles (encre effacé).

La MSE ne disposant pas de l'appareillage nécessaire à une analyse fine des chlorures et des bromures dans les eaux de pluies, c'est au Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon (LHA) et sous la direction d'Yves Travi que je me suis rendu pour réaliser mes analyses. A cette occasion, j'ai pu découvrir et utiliser une technique de mesure analytique particulière : la chromatographie ionique en phase liquide. Cette partie du stage est présentée au point 2 du présent chapitre.

Deux semaines m'ont été nécessaires pour effectuer plus de 200 analyses chromatographiques dont les résultats sont cités en annexes.

Durant le mois de juillet, je me suis essentiellement attaché au traitement des données récoltées et au commencement de la rédaction du rapport. Je n'ai pas rencontré de réelles difficultés pour traiter mes informations car, afin de répondre au mieux à ses attentes, Guillaume Favreau m'avait donné quelques consignes quant aux traitements de données qu'il voulait voir figurer dans mon rapport. Toute cette partie de mon travail ainsi que les résultats qui en découlent sont détaillés au point 3 de ce chapitre.

Le début du mois d'Août s'est vu consacré à une recherche bibliographique d'environ deux semaines qui m'a permis d'établir un inventaire des études antérieures sur le sujet. Cet inventaire, repris en annexes, m'a ensuite servi à vérifier la pertinence et l'intérêt des résultats de mon travail. Je dois cependant signaler que cet inventaire n'est pas exhaustif : il m'a en effet manqué du temps pour réunir toutes les références nécessaires à la récolte des informations. La principale raison est que j'ai commencé cette recherche un peu trop tardivement car la bibliothèque de la MSE, ne disposant pas de toutes les publications scientifiques sur place, devait les commander ailleurs et dans des délais de réception dépassant la durée de mon stage. J'ai donc remplacé les données manquantes dans mon inventaire par les références bibliographiques permettant de les trouver.

J'ai enfin terminé les deux dernières semaines de mon stage par l'achèvement de la rédaction de mon rapport et sa correction.

2. Appareillage utilisé pour les analyses

1. Principe de la chromatographie ionique en phase liquide

Le principe général de fonctionnement de la méthode consiste à séparer les différents ions présents dans une solution et à les détecter et les quantifier par mesure de la conductivité de cette solution.

La séparation des ions repose sur la différence d'affinités des ions intervenant lors de mécanismes d'échanges ioniques entre deux phases différentes, l'une mobile (l'eau de la solution), traversant l'autre, stationnaire (une colonne de résine échangeuse d'ions). Chaque ion, en fonction de sa taille et de sa charge, possède une affinité propre à chaque phase. La résine et la solution ont donc des capacités de fixation ou de rétention différentes pour chaque type d'ion et il existe par conséquent des résines spécifiques pour les cations ou les anions (les résines pour cations ne retenant pas les anions et vice versa).

Lorsque qu'une solution chargée ioniquement traverse une résine, les ions présents dans cette solution vont se fixer sur la phase stationnaire. Cette fixation n'est cependant pas permanente, la résine finit par restituer les différents ions à la solution au bout d'un temps qui est fonction du type de résine utilisée et des conditions d'équilibres chimiques de

chaque ion. Ceux-ci étant d'autant plus retenus qu'ils ont d'affinité avec la phase stationnaire.

En sortie de colonne, la séparation des différents cortèges d'ions est donc le résultat de deux effets contradictoires : l'entraînement des ions par la phase mobile et le ralentissement par la phase stationnaire.

Comme les différents ions sont sensés être séparés à la sortie du dispositif, il est aisé de mesurer leur teneur dans la solution à cet endroit puisque la conductivité d'ions de même nature est directement proportionnelle à leur concentration.

Pour que le conductimètre ne détecte que les ions appartenant à l'échantillon, ceux constitutifs du fluide vecteur (éluant) sont éliminés après la séparation des ions de l'échantillon grâce à une réaction acide-base réalisée dans une colonne de neutralisation.

L'éluant utilisé pour mes analyses est une solution de NaHCO_3 . Lors de son passage à travers la résine de la colonne de neutralisation, le Na^+ est piégé par la résine qui libère en retour des protons qui vont aller neutraliser les ions CO_3^{2-} et HCO_3^- en H_2O et CO_2 . Le détecteur ne voit donc passer que les anions de l'échantillon accompagnés d'un mélange d'eau et de CO_2 dissout. Pour éviter la saturation de la colonne neutralisante, celle-ci est alimentée par un fluide régénérant en H^+ constitué d'eau acidulée (eau enrichie en acide sulfurique).

2. L'appareillage

Pour la réalisation de mes analyses, deux chromatographes d'âges différents étaient à ma disposition. L'appareil le plus ancien, un « Dionex Oic Analyser » (1) couplé à un calculateur intégrateur à sortie papier (Chromjet Integrator) (2), m'a servi à analyser les teneurs en bromures de certains échantillons alors que les teneurs en chlorures ont été analysées avec l'appareillage le plus récent : un chromatographe DX 120 (3) couplé à un échantillonneur automatique (AS50 Autosampler) (4) et à un logiciel de chromatographie (Chromeleon). Les données techniques concernant ces appareils sont explicitées en annexes.

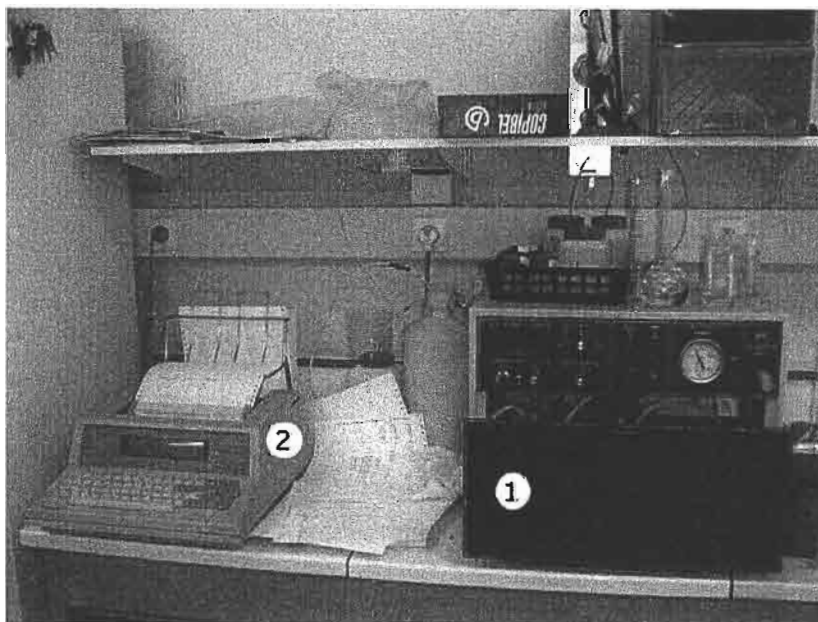


Figure 2 : (1) Chromatographe « Dionex Oic Analyser » ; (2) calculateur intégrateur « Chromjet Integrator ».

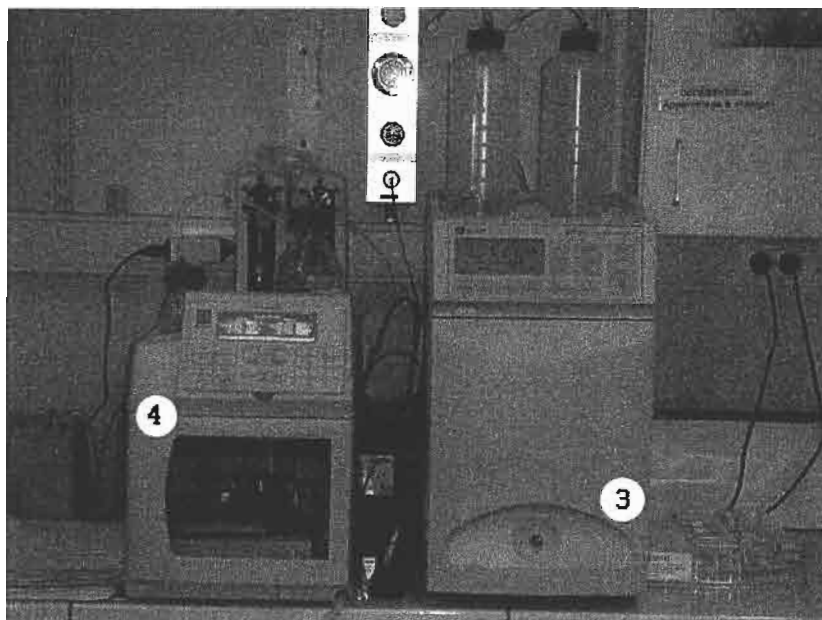


Figure 3 : (3) chromatographe « DX 120 Ion Chromatograph » ; (4) échantillonneur automatique « AS50 Autosampler ».

A. L'ancien appareillage

A côté des analyses de chlorures nécessaires à la réalisation de cette étude, Guillaume Favreau m'a également chargé de réaliser des analyses de teneurs en bromures sur certains échantillons en vue d'études ultérieures. Le Br^- dans les eaux de pluies se trouvant à des concentrations de l'ordre du ppb ($\mu\text{g.l}^{-1}$), je me suis servi du plus vieux appareil pour son dosage car, bien que de précision comparable à l'appareillage le plus récent, il permet néanmoins d'analyser des échantillons bien plus volumineux que ce dernier (1,5 ml contre 25 μl pour le nouveau modèle) ce qui lui confère une meilleure limite de détection.

J'ai particulièrement apprécié l'utilisation de cet appareil très didactique car, sur ce chromatographe, les principales manipulations doivent encore être faites à la main ce qui m'a permis d'assimiler rapidement la technique d'analyse et de comprendre aisément le fonctionnement de l'appareil résumé dans le paragraphe ci-dessous :

A la mise en route du chromatographe et du calculateur, on actionne une pompe qui fait circuler l'éluant en continu à travers tout le circuit en le mettant sous pression et on met le réservoir de régénérant sous pression d'azote pour envoyer l'eau acidulée vers la colonne de neutralisation. Une fois l'appareil stabilisé, on ramène le niveau de base de l'appareillage à zéro et on introduit à l'aide d'une seringue l'échantillon à analyser (ou l'étalon quand une calibration est nécessaire) dans une vanne d'injection. En position « load », celle-ci stocke 1,5 ml du volume injecté dans une boucle et l'excédent est envoyé directement dans une poubelle. Lorsque l'on bascule la vanne en position « inject », l'éluant passe par la boucle et pousse successivement l'échantillon à travers une précolonne (servant plus ou moins de filtre), la colonne de séparation proprement dite et la colonne de neutralisation de l'éluant. La solution poursuit ensuite son chemin et traverse la cellule de conductivité qui est reliée au calculateur intégrateur. Celui-ci se base alors sur les données d'étalonnage, les temps de sorties et les aires des différents pics pour déterminer de façon automatique la nature et la concentration des éléments présents dans la solution. L'analyse complète d'un échantillon dure environ 25 minutes.

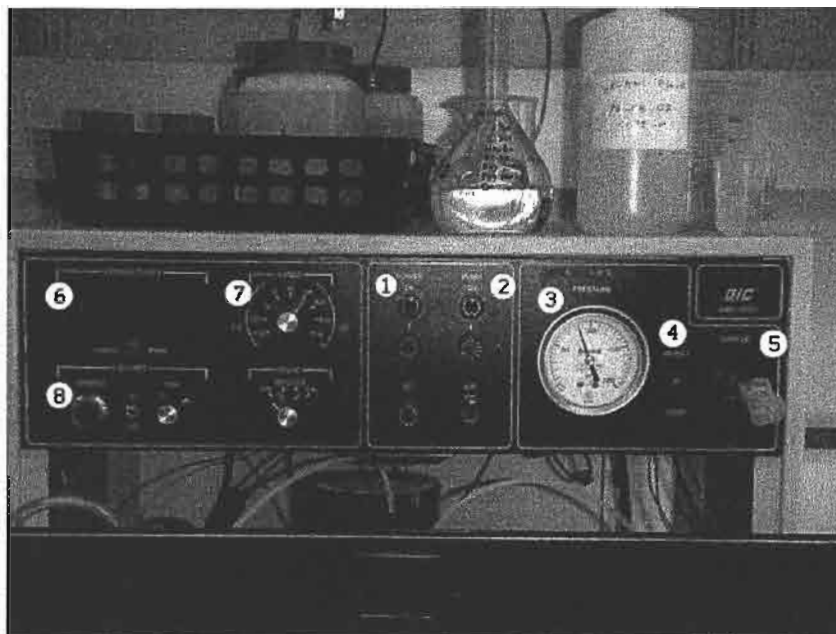


Figure 4 : **Panneau de commande du « Dionex Oic Analyser »** : (1) interrupteur de mise sous tension du chromatographe ; (2) interrupteur de mise en marche de la pompe ; (3) cadran de visualisation de la pression de l'éluant dans le circuit ; (4) interrupteur de basculement de la vanne d'injection ; (5) point de chargement de l'échantillon ; (6) affichage de la conductivité ; (7) gammes de sensibilités du conductimètre (étagée de 0,1 à 1000 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$) ; (8) bouton de remise à 0 du niveau de base.

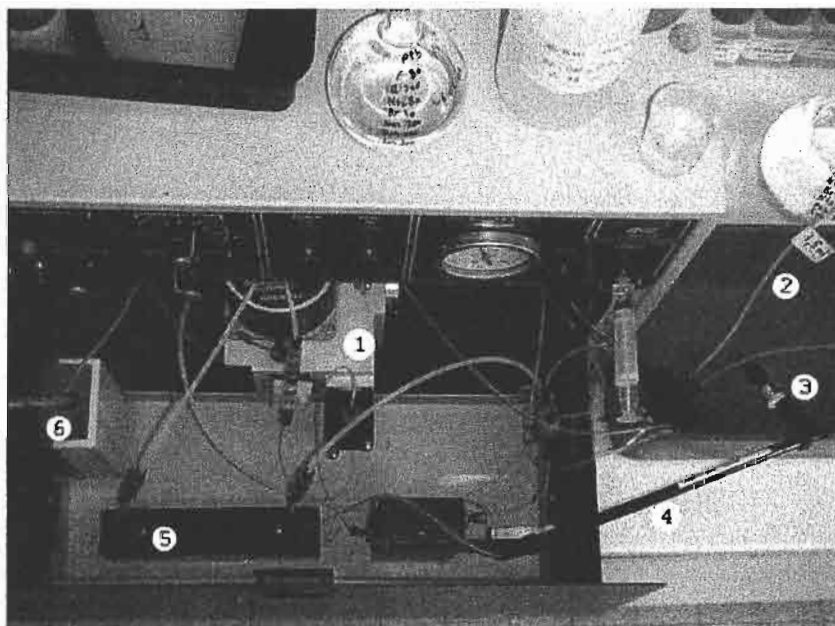


Figure 5 : **Circuit interne du « Dionex Oic Analyser »** : (1) pompe de circulation de l'éluant ; (2) boucle de stockage (1,5 ml) ; (3) précolonne ; (4) colonne de séparation ; (5) suppresseur (colonne de neutralisation de l'éluant) ; (6) conductimètre.

Afin de tester la cohérence des deux chromatographes, j'ai vérifié à plusieurs reprises les résultats des teneurs en chlorures obtenues à partir de l'analyse des mêmes échantillons sur les deux machines.

Si l'utilisation de ce chromatographe demeure très simple sur le papier, son utilisation quotidienne s'est révélée plus compliquée que je ne le pensais. A mon arrivée, il

a fallu une journée entière au technicien du laboratoire et à moi-même pour arriver à faire fonctionner la machine correctement (l'appareil n'ayant plus servi depuis plusieurs mois, de nombreux joints n'étaient plus étanches et nécessitaient des réparations). De même, il est arrivé au cours de certaines analyses que l'appareil perde sa stabilité et ceci sans raison apparente. Roland Simler, technicien du laboratoire, m'a confirmé que ce comportement était fréquent sur cette machine sans pouvoir me donner d'explication probante. La seule solution était dans ce cas là de laisser tourner la machine sur le circuit de l'éluant jusqu'à ce qu'elle retrouve sa stabilité (l'attente fut parfois de plusieurs heures). Pour cette raison, cet appareil a bénéficié d'un suivi constant et permanent de ma part.

Un autre problème de cet appareil est sa grande consommation d'échantillons. Bien que la boucle d'injection soit de 1,5 ml, il faut injecter en général une quantité plus importante pour s'assurer que l'entière de la boucle soit bien remplie par l'échantillon. De plus, au moment de l'injection, il ne faut pas introduire de bulle d'air dans le dispositif car celle-ci pourrait perturber le passage de l'échantillon dans la colonne de séparation. Si une bulle entre dans la boucle (chose se produisant les $\frac{3}{4}$ du temps), il faut l'évacuer en injectant autant d'échantillon que nécessaire (parfois plus de 15 ml). Certains de mes échantillons ont donc été trop petits pour pouvoir être analysés en bromures.

Concernant les analyses elles-mêmes, la principale difficulté a consisté à distinguer et/ou mesurer sur le chromatogramme le pic des bromures des autres pics voisins. Le pic des bromures est en effet bordé par les pics des chlorures, des nitrites et des nitrates et, dans les eaux de pluies, ces constituants sont toujours en quantité largement supérieure aux bromures d'où un problème de limite de détection et/ou de résolution de celui-ci.

La calibration du calculateur intégrateur ayant été réalisée à partir d'une solution étalon à 40 ppb de bromures, celui-ci est très souvent parvenu à repérer le bon pic de lui-même et à le calculer avec précision. Mais il est parfois arrivé qu'il ne le repère pas, m'obligeant alors à le calculer manuellement.

La limite de détection de l'appareillage est proche de 2,5 ppb. Obtenir de telles valeurs est déjà difficile car il faut pousser la sensibilité du conductimètre du chromatographe à 10 voir 3 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ ce qui engendre une instabilité de l'appareil et crée de faux signaux qui contribuent à augmenter le bruit de fond et à « noyer » le pic des bromures dans ce bruit de fond. Le calculateur repère alors toute une série de pics parasites et le chromatogramme peut devenir illisible pour les petits pics.

B : Le nouvel appareillage

Toutes les analyses de chlorures ont été réalisées avec ce chromatographe qui ne m'a pas posé de réel problème de fonctionnement. La grande innovation par rapport au modèle précédent réside dans son autonomie de fonctionnement. Je ne m'attarderai pas sur la description de cet appareil qui m'est apparu comme une véritable « boîte noire ». L'appareil est en effet très fortement automatisé et permet de traiter jusqu'à 47 échantillons successifs sans surveillance permanente du laborantin ce qui permet de réaliser les analyses de nuit ou d'effectuer d'autres analyses simultanément (ce que j'ai fait avec les analyses des bromures). Les manipulations sont réduites au minimum : il suffit d'introduire les échantillons dans l'échantillonneur automatique et de programmer le logiciel de chromatographie (volumes prélevés, étalonnage,...).

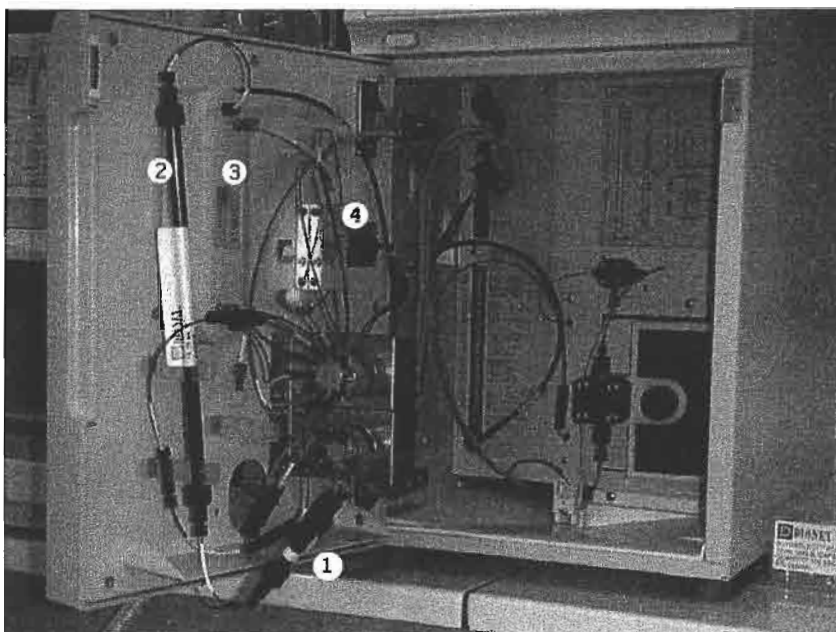


Figure 6 : **Circuit interne du DX 120** : (1) précolonne ; (2) colonne de séparation ; (3) suppresseur (colonne de neutralisation de l'éluant) ; (4) conductimètre.

L'appareil est beaucoup plus stable que l'autre chromatographe et ses temps d'analyses sont ramenés à environ 16 minutes par échantillon. Les volumes d'échantillon traités sont également beaucoup plus faibles (25 μ l). Ces faibles volumes permettent d'analyser de très petites quantités d'eau mais au détriment de la limite de détection (le DX 120 permet de descendre à des teneurs approchant 0,01 ppm). Le nouvel appareillage n'est donc pas plus précis que l'ancien mais est d'avantage automatisé, nécessite beaucoup moins de manipulations et permet donc un net gain de temps.

3. Traitement des données, résultats et discussions

Le traitement de mes données s'est déroulé en trois phases :

Disposant d'un jeu de données s'étalant sur dix années de mesures (1988, 1992 à 1995, 1997 à 2000 et 2002), j'ai tout d'abord commencé par une analyse simple des teneurs en chlorures des précipitations dans le but de vérifier s'il n'existait pas de corrélations entre les précipitations totales annuelles et les concentrations en chlorures (ceci afin de savoir s'il est possible de prédire la concentration en Cl⁻ apportée sur base de la quantité des précipitations tombant chaque année).

La littérature indiquant que les apports de chlorures en zone sahélienne semblent adopter des comportements différents et aléatoires selon les années (GONI et al., 2001), je me suis également attaché à vérifier la manière dont se sont réalisés les apports en chlorures durant les périodes de mousson des dix années à ma disposition afin de savoir si l'on retrouvait ces comportements sur les deux sites d'études.

La deuxième phase de ce travail correspondait à l'objectif principal de ce stage, à savoir, essayer de préciser le nombre d'années à prendre en compte lors du calcul du bilan de masse des chlorures afin de pouvoir donner une estimation plus fiable de la recharge. Le traitement que j'ai effectué ne correspond pas exactement à un vrai traitement statistique mais plutôt à une analyse raisonnée des données ; le but étant ici de suivre au mieux la

réalité des études de terrain. J'ai essayé de voir, à partir du plus grand jeu de données à ma disposition (site de Niamey) qu'elle était la plus grande erreur qui pouvait être commise si l'on décidait de faire une estimation de la recharge de l'aquifère de Niamey sur base de 1, 2, 3,...10 année(s).

La grande majorité des études actuelles de recharge des nappes se basant sur des campagnes de mesures effectuées sur plusieurs années consécutives, il m'a été demandé de ne pas choisir les années au hasard mais de baser mes calculs en prenant mes années de manière consécutive dans mon jeu de données (ceci également dans le soucis de coller au mieux à la réalité des études hydrologiques).

J'ai ensuite terminé la phase de traitement des données en appliquant la méthode MBC sur les deux sites d'étude afin d'y vérifier son applicabilité.

Les principaux résultats de ce travail sont présentés ci-dessous et brièvement commentés (toutes les teneurs en chlorures dans les précipitations qui ont servi au traitement des données sont figurées en annexes) :

A. Teneurs en chlorures dans les précipitations

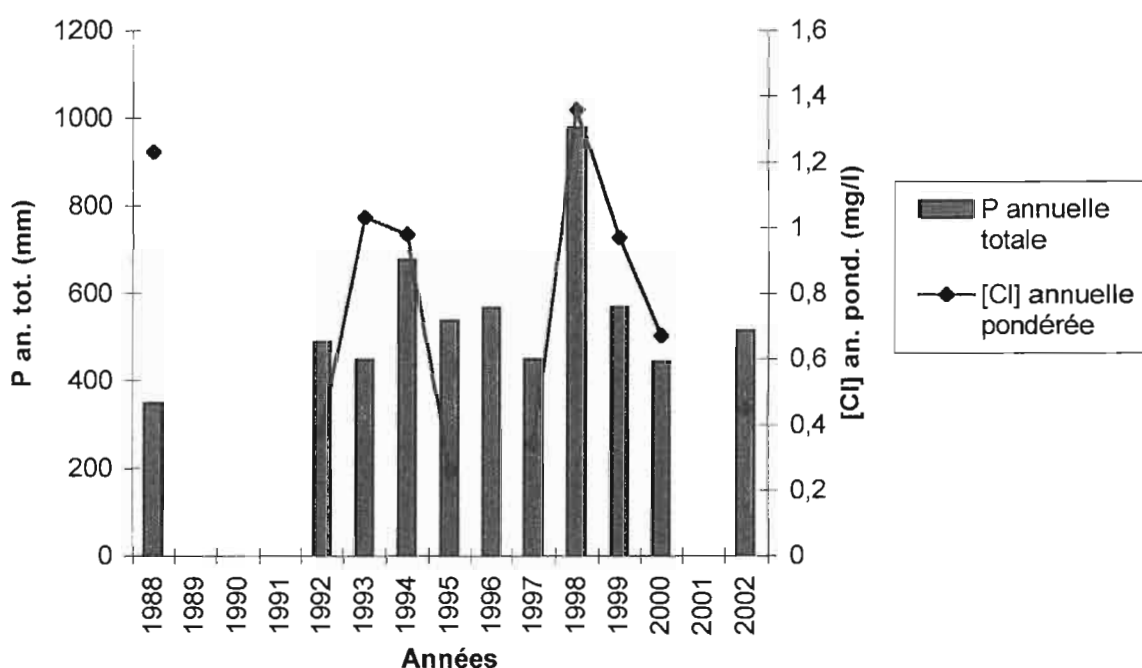


Figure 7 : Evolution de la concentration annuelle en chlorures et des précipitations totales annuelles relevées entre 1988 et 2002.

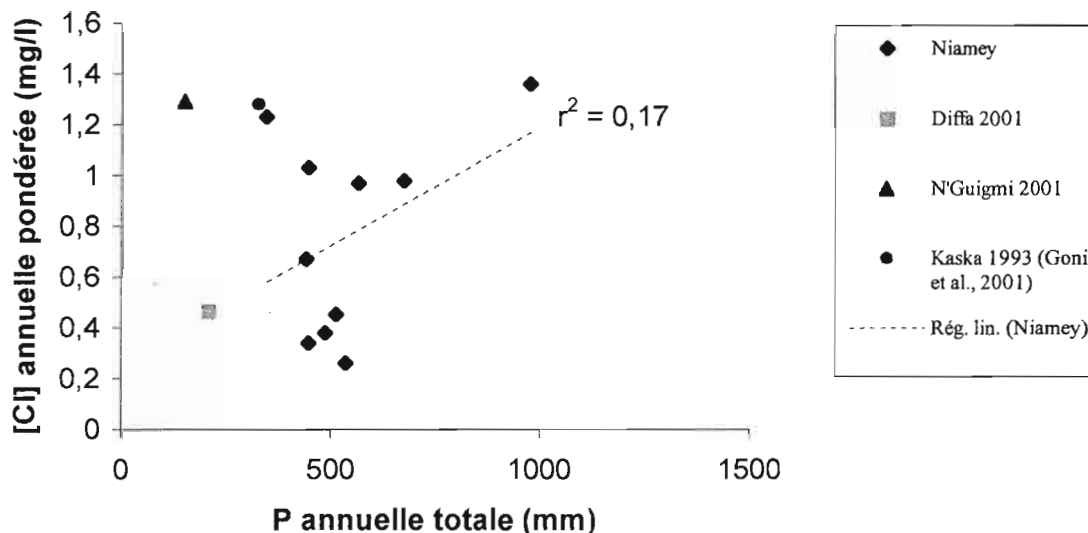


Figure 8 : **Corrélation entre la concentration annuelle en chlorures et les précipitations totales annuelles.**

Ces deux figures indiquent qu'il n'y a pas de réelle relation entre la concentration annuelle en chlorures et la quantité totale des précipitations tombant chaque année. La figure 7 montre par exemple que 1988, l'année la plus sèche, présente une teneur en Cl comparable à l'année la plus pluvieuse, 1998. De même, 1993 présente des précipitations équivalentes à l'année 1997 mais les concentrations en chlorures y sont deux fois supérieures.

La répartition des points de la figure 8 est assez hétérogène et ne semble pas indiquer une tendance quelconque. Le droite de régression linéaire qui y est tracée (à titre indicatif) présente d'ailleurs un taux de corrélation très peu significatif ($r^2 = 0,17$).

Il ressort de ces deux graphiques qu'il est à priori impossible de prédire avec précision le taux de concentration et donc la quantité potentielle de chlorures qui sera apportée par les pluies sur la simple base de la quantité des précipitations tombant chaque année.

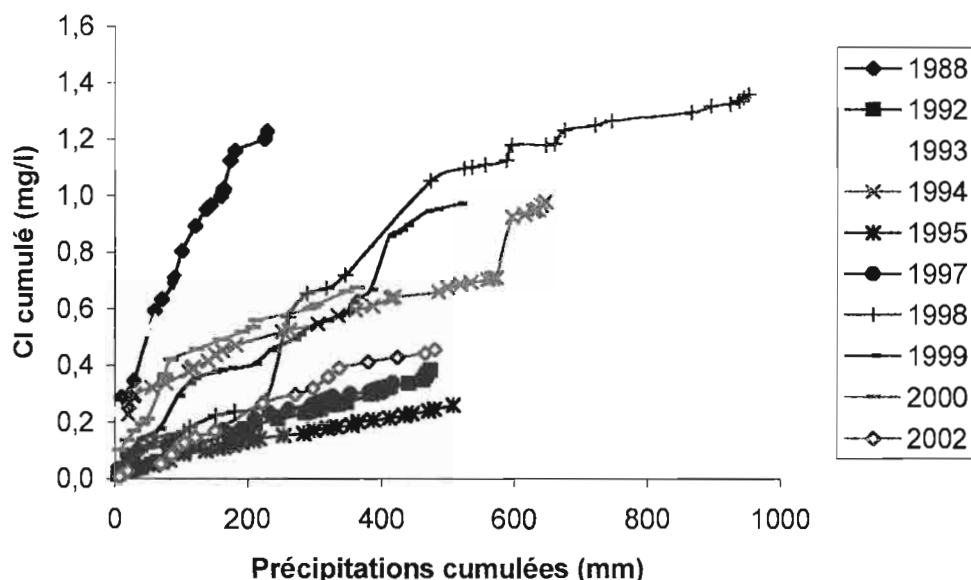


Figure 9 : **Evolution des teneurs en chlorures cumulées pondérées à Niamey.**

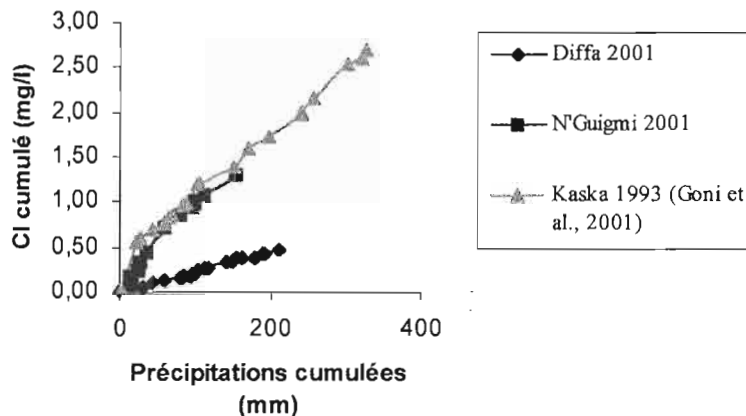


Figure 10 : Evolution des chlorures cumulés pondérés à Diffa, N'Guigmi et Kaska.

Les graphiques 9 et 10 représentent la manière dont se réalise l'apport des chlorures durant la saison des pluies sur les deux sites d'étude. Selon les années, le dépôt des chlorures adopte des comportements différents pour un même site ce qui confirme les travaux précédents sur le sujet (GONI et al., 2001).

A Niamey par exemple, les données des années 1992, 1995, 1997 et 2002 s'alignent sur des droites ce qui signifie que l'apport en chlorures se fait de manière régulière et que la concentration en Cl^- dans les eaux de pluies reste relativement constante durant l'entièreté de la saison des pluies.

A l'inverse, les résultats d'années telles que 1993, 1994, 1998 ou 2000 s'alignent sur des courbes dont le profil (forte pente initiale puis pente plus faible et constante) témoigne d'un apport en chlorures plus important en début de saison des pluies. Les premières pluies sont donc plus fortement concentrées que les pluies d'arrière saison qui acquièrent des teneurs en chlorures relativement constantes.

L'explication de ce phénomène aléatoire n'est pas encore clairement déterminée. Pour GONI et al. (2001), Les taux élevés de chlorures dans les premières pluies de saison pourraient trouver leur origine dans la présence plus importante de particules inorganiques dans ces pluies.

B. Calcul de l'erreur d'estimation due au nombre d'années considérées.

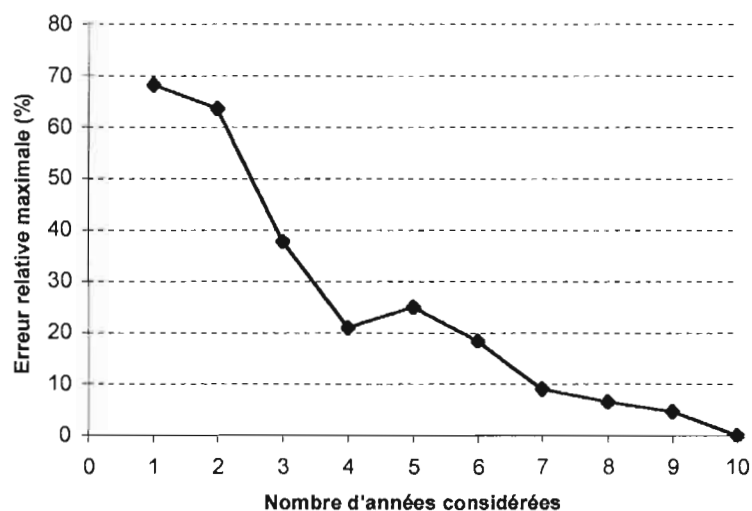


Figure 11 : Evolution de l'erreur relative maximale suivant le nombre d'années considérées (Niamey), pour 10 années d'échantillonnage.

Les estimations des apports en Cl^- ont été établies sur base du jeu de données des dix années disponibles (Niamey). Les erreurs maximales commises sur ces estimations ont été calculées de la manière suivante : l'apport en chlorures sur les dix années de précipitations a été représenté dans les calculs par une concentration moyenne pondérée pour les dix années. Cette valeur moyenne a ensuite été comparée à la concentration pondérée de chaque année prise individuellement afin de déterminer l'erreur relative maximale commise lorsque l'on choisit d'estimer la recharge d'une nappe en ne prenant que les données en chlorures des précipitations récoltées sur une seule année. Le même raisonnement a ensuite été appliqué en regardant à chaque fois qu'elle était l'erreur maximum pouvant être commise lorsque l'on intègre les données de 2, 3, 4,...10 années consécutives. Les valeurs obtenues ont permis d'établir la courbe d'erreur relative maximale en fonction du nombre d'années prises en compte.

La courbe de la figure 11 montre qu'il faut prendre en compte, sur le site d'étude, sept années consécutives au minimum pour avoir une valeur raisonnable (10% d'erreur) sur le terme $[\text{Cl}^-]_p$ de l'équation générale de la méthode. Or, comme le montre le tableau repris en annexe 3, la majorité des publications sur la méthode MBC sont réalisées sur 3 années de mesures. Comme le montre le graphique, une telle étude pourrait commettre une erreur d'estimation de près de 40% sur la recharge de l'aquifère à Niamey (EDMUNDS et GAYE (1994) estimaient cette erreur à environ 30% sur leur site d'étude). Le chiffre de sept années est donc très élevé car les hydrogéologues n'ont que rarement autant d'années de campagnes de mesures à leur disposition pour réaliser leurs estimations. Ceci démontre que les résultats de nombreuses estimations de recharge des nappes par la MBC doivent être relativisés du fait d'un nombre insuffisant d'années.

Ma démarche, bien que relativement simple, présente donc le grand intérêt de pouvoir démontrer que certaines estimations de recharge, basées sur la méthode MBC et réalisées à ce jour, peuvent être partiellement erronées par manque de données suffisantes.

Les résultats indiquent également que les taux de recharge peuvent être estimés avec une précision satisfaisante ($< 10\%$) en instaurant des campagnes de mesures étalées sur 7 ans et pas d'avantage (car le gain en précision ne justifierait plus un rallongement de ces campagnes). Ces résultats sont cependant basés sur le seul site de Niamey et le nombre optimum d'années à considérer doit être affiné par des études supplémentaires sur d'autres sites.

C : Application de la méthode MBC sur le site de Niamey.

Pour calculer la recharge annuelle de la nappe phréatique de Niamey, un taux moyen de concentration en chlorure a été déterminé à partir de mesures effectuées sur 30 puits ou forages représentatifs répartis sur le site (Favreau et al., 2002). Les valeurs moyennes de précipitation et de concentration en chlorures dans les pluies ont été obtenues en moyennant les données des dix années disponibles.

Concentration moyenne en Cl^- dans la nappe = $3,27 \text{ mg.l}^{-1}$

Concentration moyenne en Cl^- dans l'eau de pluie = $0,81 \text{ mg.l}^{-1}$

Précipitation moyenne annuelle = $544,9 \text{ l.m}^{-2}$

$$R = P \cdot [\text{Cl}^-]_p / [\text{Cl}^-]_n$$

$$R = (544,94 \cdot 0,81) / 3,27$$

$$R = 134,5 \text{ l.m}^{-2}$$

Ce taux de recharge de $134,5 \text{ mm.an}^{-1}$ est largement excessif car il dépasse de beaucoup le taux réel de recharge de la nappe à long terme qui est de $1 \text{ à } 5 \text{ mm.an}^{-1}$ (FAVREAU et *al.*, 2002). Ce dernier, obtenu par les radio-isotopes ^3H et ^{14}C et par modélisation numérique des flux (logiciel MODFLOW), est plus précis que la méthode MBC (mais aussi beaucoup plus cher) car il estime le taux de recharge à partir du renouvellement de la nappe (temps de résidence).

Une hypothèse peut être proposée pour expliquer l'imprécision de la méthode MBC sur ce site : lors du calcul du taux de recharge, il est considéré que tous les chlorures issus des précipitations s'infiltrent dans l'aquifère : la concentration des chlorures dans la nappe reflétant l'importance de l'évapotranspiration (enrichissement en Cl^- des eaux d'infiltration).

La réalité du terrain montre en fait qu'il existe des zones topographiques qui contribuent au ruissellement hortonien (pentes fortes, ravines) et d'autres qui n'y contribuent pas (replats,...). Dans ces dernières, l'eau de pluie s'évapore rapidement, privant ainsi les chlorures de toute mobilité. Le Cl^- ne peut plus atteindre la nappe et se retrouve stocké dans la zone non-saturée du sol ou repart dans l'atmosphère par déflation éolienne.

Cette fraction de chlorures n'arrivant pas dans la nappe diminue le terme $[\text{Cl}^-]_n$ de l'équation générale avec, pour effet, de surestimer le taux réel de recharge de l'aquifère.

La comparaison entre le taux réel de recharge obtenu par les radio-isotopes ($1 \text{ à } 5 \text{ mm.an}^{-1}$) et le taux obtenu par les chlorures ($134,5 \text{ mm.an}^{-1}$) montre que de l'ordre de 3 à 4 % des terrains de la région participent à l'enrichissement de la nappe en chlorures. Ceci signifie que seuls 3 ou 4 % environ de la superficie de la zone d'étude participe à la recharge de la nappe phréatique près de Niamey. Si ces résultats doivent encore être considérés avec prudence (notamment à cause de la méconnaissance actuelle de certains processus entrant en jeu dans l'hydrologie de la région), les chiffres obtenus sont comparables aux résultats de la modélisation hydrologique en cours effectuée sur la même zone d'étude (MASSUEL, com.pers., 2003).

La déflation éolienne constitue un autre facteur qui pourrait intervenir dans le bilan des chlorures à Niamey. Il est en effet possible qu'une partie des chlorures déposés sur les zones non contributrices au ruissellement soient remaniés par temps sec vers des zones contributrices. Lors de la pluie suivante, le chlorure, présent dans les particules remaniées, serait dissout et emporté avec l'eau de ruissellement en direction de la nappe. Ce phénomène conduirait à augmenter le terme $[\text{Cl}^-]_n$ et à diminuer l'estimation du taux de recharge. Mais ce facteur n'intervient pas ici car les pluviomètres utilisés à Niamey pour la récolte des précipitations sont dotés d'une ouverture permanente qui leur permet de récupérer les aérosols amenés par les vents. Le Cl^- provenant de la déflation éolienne est donc pris en compte de manière implicite dans les teneurs en chlorures des eaux de pluies des échantillons analysés.

D : Application de la méthode MBC sur le site de Diffa/N'Guigmi.

La recharge annuelle de la nappe phréatique de la région de Diffa/N'Guigmi a été calculée sur les données pluviométriques de sites de l'année 2001. Il convient donc de rester prudent quant à la validité du résultat car comme explicité ci-dessus, une estimation basée sur une seule année peut engendrer une erreur très importante (de l'ordre de 70%).

Le taux moyen de concentration en chlorure dans la nappe a été déterminé à partir de mesures effectuées sur 105 puits ou forages représentatifs répartis sur le site (Gaultier, com. pers., 2003). Les valeurs de précipitation et de concentration en chlorures dans les pluies ont été obtenues en moyennant les données des sites de Diffa et N'Guigmi.

Concentration moyenne en Cl^- dans la nappe = $38,47 \text{ mg.l}^{-1}$

Concentration moyenne en Cl^- dans l'eau de pluie = $0,81 \text{ mg.l}^{-1}$

Précipitation moyenne annuelle = $183,63 \text{ l.m}^{-2}$

$$R = P \cdot [\text{Cl}^-]_p / [\text{Cl}^-]_n$$

$$R = (183,63 \cdot 0,81) / 38,47$$

$$R = 3,88 \text{ l.m}^{-2}$$

Cette valeur est assez proche du taux estimé de recharge (2 mm.an^{-1}) obtenu par mesure de l'isotope ^{14}C (SABLJAK, 1998 ; LEDUC et al., 2000) et modélisation numérique des flux (Leduc et al., 1998). Bien que l'estimation se base sur une seule année de mesures, il faut constater que la précision obtenue est bien meilleure qu'à Niamey. L'explication ne provient pas d'une anomalie des concentrations dans les pluies car l'année 2001 possède une teneur moyenne en Cl^- à priori tout à fait normale (valeur identique à la moyenne réalisée sur dix ans à Niamey).

Selon cette première estimation, la meilleure précision de la recharge est principalement due à la plus grande concentration des chlorures dans la nappe qui semblent indiquer que le pourcentage de surface contribuant à la recharge de la nappe phréatique est bien plus important qu'à Niamey (de l'ordre de 50 %).

Conclusion

Le travail de fin d'études qu'il m'a été donné de réaliser à la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier visait essentiellement à préciser la caractérisation et l'estimation de la recharge d'aquifères en zone semi-aride. De ce fait, cette étude s'intègre pleinement dans une politique de meilleure gestion intégrée de la ressource en eau.

Le travail fourni au cours de ces trois mois de stage m'a permis de dégager les conclusions suivantes :

Les teneurs en Cl^- dans les précipitations des bassins hydrologiques de Niamey (bassin des Iullemmeden) et de Diffa/N'Guigmi (bassin du lac Tchad) sont dotées d'une variabilité si forte qu'il est impossible de prédire avec précision la quantité potentielle de Cl^- apportée à la nappe sur la simple base du volume des précipitations tombé chaque année.

La façon dont se réalise l'apport des chlorures varie également de manière aléatoire d'une année à l'autre ce qui complique encore les estimations. Ce phénomène, rencontré dans d'autres régions de la zone sahélienne, demeure encore relativement mal connu.

L'analyse des données montre, qu'à Niamey, il faut prendre en compte un minimum de sept années consécutives pour avoir une valeur raisonnable (10% d'erreur) sur le terme $[\text{Cl}^-]_p$ de l'équation générale de la méthode.

La majorité des études utilisant la méthode MBC dans des régions de mêmes caractéristiques pluviométriques que Niamey doivent être considérées avec prudence car elles utilisent un jeu de données souvent très (voir trop) limité.

Pour Niamey, la méthode du bilan des chlorures ne peut pas s'appliquer directement. L'estimation obtenue par calcul (134,5 mm de recharge par an) dépasse largement le taux réel de recharge de la nappe (1 à 5 mm.an^{-1}), ce qui pourrait s'expliquer par le fait que certaines zones topographiques du terrain ne contribuent pas au ruissellement de surface de l'eau et empêchent toute mobilité des chlorures, concourant de ce fait à fausser le bilan de masse des chlorures.

Pour Diffa et N'Guigmi, la méthode a par contre pu être vérifiée avec un taux de recharge calculé (4 mm.an^{-1}) proche du taux de recharge réel (2 mm.an^{-1}).

Du point de vue scientifique, l'intérêt majeur de ce travail réside à mon avis en ce qu'il a permis de mettre l'accent sur un problème concret et important dans les études d'estimation de recharge de nappes en zones semi-arides : la représentativité de la concentration moyenne en chlorures ($[\text{Cl}^-]_p$) utilisée dans l'équation générale de recharge de la nappe de la méthode MBC. Si les résultats de mon travail semblent assez pertinents, la masse d'informations traitées et le peu de sites étudiés ne me semblent pas suffisants que pour fournir une étude concrète et exhaustive sur le sujet. J'estime donc que mon travail doit d'avantage être considéré comme une étude offrant des pistes de réflexion à prendre en considération dans les études ultérieures et je trouve absolument opportun, voir nécessaire, de pousser plus loin les investigations dans ce domaine car la méthode du bilan des chlorures, de part sa simplicité d'utilisation, sa polyvalence, son faible coût (pour

rappel, une analyse des chlorures coûte de l'ordre de 2,5€ contre 100€ pour les analyses isotopiques) et son potentiel de développement (couplage à un SIG) en font une des méthodes les plus couramment utilisées dans les pays des régions semi-arides.

Or, nombre de pays situés en zone sahélienne connaissent actuellement ou connaîtrons dans le futur des situations critiques de leurs ressources en eau et il apparaît évident que ces pays ont besoin d'une politique de gestion sûre et efficace. Comment alors planifier au mieux une gestion à long terme si, dès le départ, on prend le risque de commettre une erreur de près de 40% sur les estimations des recharges annuelles des aquifères (en prenant le cas le plus fréquent d'études basées sur trois années de mesures) ?

Concernant le stage proprement dit, celui-ci s'est déroulé d'une manière plus que satisfaisante. Dès mon arrivée à la MSE, j'ai été très bien accueilli par Guillaume Favreau qui s'est empressé de me fournir toutes les informations dont j'avais besoin et qui m'a laissé le libre choix dans l'organisation de mon travail et la rédaction de mon rapport. De même, mon accueil au sein du Laboratoire d'Hydrogéologie de l'Université d'Avignon s'est déroulé dans une ambiance très conviviale et sympathique tout en restant fort professionnelle.

Les quelques petites difficultés auxquelles j'ai dû faire face ont été les problèmes rencontrés avec certains échantillons qui étaient devenus illisibles et que j'ai dû me résoudre à abandonner, l'utilisation parfois difficile de l'ancien chromatographe ainsi que le temps qui m'a manqué pour effectuer une recherche bibliographique exhaustive (j'ai déjà eu l'occasion d'évoquer ces problèmes précédemment).

Etant donné que seules deux personnes (Guillaume Favreau et Yves Travi) étaient concrètement impliquées dans ce stage, je n'ai pas eu à relever de problèmes majeurs de coordination et d'organisation entre les différentes parties. La seule difficulté, d'ordre organisationnel et logistique, rencontrée à cette occasion fut que l'équipe ne put me trouver un logement pour mon séjour à Avignon comme il était prévu dès le départ (elle s'y est apparemment prise trop tard) ce qui m'a contraint à improviser en logeant à l'hôtel durant mes deux semaines d'analyses.

Bien que Guillaume Favreau m'ait laissé une grande liberté dans la rédaction de mon rapport, il a néanmoins souhaité que je ne rende qu'un seul document commun pour la FUL, l'Ulg et la MSE. Si la rédaction d'un écrit unique m'a semblé être un gain de temps au premier abord, j'ai pu constater qu'il constituait une réelle difficulté de rédaction car mon stage consistait avant tout en un travail de recherche (il était prévu à l'origine pour un stage de DEA) qui se prêtait à l'obtention de résultats (d'où l'importance de ce chapitre dans mon rapport). J'ai néanmoins tenté de concilier au mieux les attentes des différentes parties.

D'un point de vue plus personnel, ce stage m'a tout d'abord permis de découvrir un nouvel outil fort intéressant pour estimer la recharge des aquifères. Bien que ma formation de géologue à l'Université de Liège et ma formation actuelle à la Fondation Universitaire Luxembourgeoise m'aient fourni un bon bagage en hydrogéologie, je n'avais pas, à mon arrivée, de connaissances suffisantes sur l'utilisation de cette méthode. Je trouve par conséquent dommage que les formations suivies durant mon cursus à l'Ulg et à la FUL ne se soient trop souvent bornées qu'à développer les techniques spécifiques aux pays tempérés sans présenter, même succinctement, les autres techniques existant dans le monde. Malgré ce manquement, je demeure bien conscient que le programme de cours du DES en « Gestion Intégrée des Ressources Hydrique, orientation : Gestion des bassins

hydrographiques » doit faire intervenir de très nombreuses matières différentes, qu'il est par conséquent déjà fort chargé et qu'il doit s'attacher en priorité à développer les matières propres aux régions tempérées. Je ferai cependant remarquer au lecteur que, si la méthode MBC était « réservée » jusqu'il y a peu aux régions arides et semi-arides, elle commence maintenant à être employée dans les pays tempérés comme en témoigne les travaux récents sur la plaine du Pô en Italie (LO RUSSO et al., 2003).

Au cours de ce stage, j'ai pu utiliser une technique de mesure analytique particulière : la chromatographie ionique en phase liquide. L'utilisation et la comparaison de deux appareillages différents m'ont permis d'appréhender de manière plus critique cette phase d'acquisition des données en me permettant de constater que les résultats obtenus dépendent non seulement des échantillons mais aussi de l'appareillage utilisé et du soin apporté par le laborantin à l'analyse proprement dite.

D'une manière générale, cette étude m'a aussi permis d'approfondir mes connaissances sur le fonctionnement hydrologique et la gestion des ressources en eaux de régions du monde trop peu étudiées au cours de ma (mes) formation(s). Je regrette néanmoins fortement de ne pas avoir eu l'opportunité d'effectuer une prospection in situ sur les deux sites d'étude. Celle-ci m'aurait en effet permis de mieux connaître la réalité du terrain et m'aurait grandement facilité la compréhension des problématiques de ces sites. J'ai dû me contenter des données de la littérature et des renseignements fournis par Guillaume Favreau et Gaëlle Gaultier pour comprendre, « en aveugle », le fonctionnement hydrologique et climatique de ces régions, d'où une certaine frustration intellectuelle de ma part vis-à-vis des résultats obtenus.

Si, comme je l'ai déjà dit au tout début de mes conclusions, le sujet et le but de ce travail de fin d'études entraient pleinement dans le cadre de la formation de mon DES, à savoir la meilleure gestion des ressources hydriques. Il faut bien constater que le travail concret réalisé pendant ces trois mois n'a pas consisté en un véritable travail de gestion de la ressource mais en un travail de recherches bibliographiques, d'analyses d'échantillons et de manipulations de données. Je n'ai donc eu que très rarement l'occasion d'appliquer ce que j'avais appris dans les cours de mon DES et, de ce point de vue, ce stage n'a pas répondu pleinement à mes attentes. Je dois cependant signaler que je le savais pertinemment avant de signer ma convention de stage puisque Guillaume Favreau m'avait déjà signifié à cette époque en quoi consisterait mon travail.

C'est donc dans le but d'élargir mes connaissances en hydrogéologie et en techniques d'analyses que j'ai choisi d'effectuer ce stage à la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier. Je peux dire que, de ce point de vue, je n'ai pas été déçu par mon travail qui a été pour moi très enrichissant et que je considère comme une expérience complémentaire à la formation que j'ai reçue tout le long de cette année 2002/2003.

Bibliographie

- BROMLEY J., EDMUNDS W. M., FELLMAN E., BROUWER J., GAZE S.R., SUDLOW J. & TAUPIN J.-D., 1997. Estimation of rainfall inputs and direct recharge to the deep unsaturated zone of southern Niger using the chloride profile method. *Journal of Hydrology*, 188-189, pp. 139-154.
- COE M. T. & FOLEY J. A., 2001. Human and natural impacts on the water resources of the Lake Chad basin. *Journal of Geophysical Research*, 106, pp. 3349-3356.
- EDMUNDS W. M. & GAYE C. B., 1994. Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the Sahel using chloride. *Journal of Hydrology*, 156, pp. 47-59.
- HERCZEG A. L. & EDMUNDS W. M., 2000. Inorganic ions as tracers. in COOK P. & HERCZEG A. L. 2000. Environmental tracers in subsurface hydrology. Kluwer Academic Publishers Group, 529 p.
- FAVREAU G., LEDUC C., MARLIN C., DRAY M., TAUPIN J.-D., MASSAULT M., LE GAL LA SALLE C. & BABIC M., 2002. Estimate of Recharge of a Rising Water Table in Semiarid Niger from ^3H and ^{14}C Modeling. *Ground Water*, 40 (2), pp. 144-151.
- GAULTIER G., MARLIN C., LEDUC C., FILLY A. & MASSAULT M., 2003. Hydrogéologie isotopique de la dépression piézométrique du Kadzell (Niger Oriental). *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS Publ. n° 278, pp. 168-173.
- GONI I.B., FELLMAN E. & EDMUNDS W.M., 2001. Rainfall geochemistry in the Sahel region of northern Nigeria. *Atmospheric Environment*, 35, pp. 4331-4339.
- LEDUC C., TAUPIN J. D., & LE GAL LA SALLE C., 1996. Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *C. R. Acad. Sci. Paris, Série II a*, 323, pp. 599-605.
- LEDUC C., SALIFOU O. & LEBLANC M., 1998. Evolution des ressources en eau dans le département de Diffa (bassin du lac Tchad, sud-est nigérien). *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS Publ. n° 252, pp 281-288.
- LEDUC C., SABLJAK S., TAUPIN J. D., MARLIN C. & FAVREAU G., 2000. Estimation de la recharge de la nappe quaternaire dans le Nord-Ouest du bassin du lac Tchad (Niger oriental) à partir de mesures isotopiques. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, 330, pp. 355-361.
- LO RUSSO S., ZAVATTARO L., ACUTIS M. & ZUPPI G. M., 2003. Chloride profile technique to estimate water movement through unsaturated zone in a cropped area in subhumid climate (Po Valley-NW Italy). *Journal of Hydrology*, 270, pp. 65-74.

- MARTIN-ROSALES W. & LEDUC C., 2003. Variabilité de la dynamique des mares temporaires dans un système endoréique semi-aride (sud-ouest du Niger). *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions*, IAHS Publ. n°278, pp 174-178.
- SABLJAK S., 1998. Hydrochimie et hydrodynamique de la nappe phréatique au Niger sud-oriental, *mémoire de DEA, université de Paris-11- Orsay, France*, 74p.
- SIMMERS I., HENDRICKX J.M.H., KRUSEMAN G.P. & RUSHTON K.P., 1997. Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. *A. A. Balkema, Rotterdam*, AIH Publ. n°19, 277 p.
- WOOD W. W., 1999. Use and Misuse of the Chloride-Mass Balance Method in Estimating Ground Water Recharge. *Ground Water*, 37 (1), pp. 2-3.

Annexes

Annexe 1

Données techniques relatives à l'appareillage de chromatographie ionique utilisé

Données techniques relatives à l'ancien appareillage :

Chromatographe : Dionex Qic Analyser

Intégrateur : Chromjet Integrato

Colonne de séparation : modèle AS14

Précolonne : modèle AG14

Volume d'injection : 1,5 ml

Pression d'azote : 4 bars

Débit de la pompe : 0,55ml.min⁻¹

Sensibilité du conductimètre : 10 ou 30 $\mu\text{S.cm}^{-1}$

Régénérant : 100 ml d'acide sulfurique 1 N pour 4 litres d'eau pure.

Eluant : Solution de Na_2CO_3 à 68g.l⁻¹ et de NaHCO_3 à 6,8g.l⁻¹ diluée 80 fois.

Solution étalon (ppb) : $\text{F}^- = 80$; $\text{Cl}^- = 200$; $\text{NO}_2^- = 80$; $\text{Br}^- = 40$; $\text{NO}_3^- = 200$; $\text{PO}_4^{3-} = 200$; $\text{SO}_4^{2-} = 200$.

Données techniques relatives au nouvel appareillage :

Chromatographe : DX 120

Echantillonneur automatique : AS 50

Colonne de séparation : modèle AS14

Précolonne : modèle AG14

Volume d'injection : 2,5 μl

Pression d'azote : 4 bars

Débit de la pompe : 1 ml.min⁻¹

Régénérant : 100 ml d'acide sulfurique 1 N pour 4 litres d'eau pure.

Eluant : Solution de Na_2CO_3 à 68g.l⁻¹ et de NaHCO_3 à 6,8g.l⁻¹ diluée 80 fois.

Solution étalon (ppm) : $\text{F}^- = 8$; $\text{Cl}^- = 20$; $\text{NO}_2^- = 8$; $\text{Br}^- = 4$; $\text{NO}_3^- = 20$; $\text{PO}_4^{3-} = 20$; $\text{SO}_4^{2-} = 20$.

Annexe 2

Résultats d'analyse effectués au laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon.

NIAMEY ORSTOM 1994 source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003				
Localité	Date	Pluie (mm)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Vol éch. (ml)
Niamey	20/04/94	21,7	6,77	10
Niamey	30/04/94	1,6	16,51	10
Niamey	13/05/94	6,1	2,41	10
Niamey	18/05/94	1,4	2,81	10
Niamey	19/05/94	27,7	0,56	10
Niamey	25/05/94	19,9	0,47	10
Niamey	05/06/94	34,7	0,76	10
Niamey	11/06/94	4,9	1,55	10
Niamey	16/06/94	1,8	1,44	10
Niamey	18/06/94	22,6	0,62	10
Niamey	20/06/94	11,2	1,33	10
Niamey	03/07/94	9,2	1,15	10
Niamey	13/07/94	19,8	0,54	20
Niamey	21/07/94	69,9	0,45	20
Niamey	22/07/94	10,7	0,31	20
Niamey	26/07/94	42,0	0,34	20
Niamey	01/08/94	30,7	0,62	20
Niamey	04/08/94	26,2	0,47	20
Niamey	06/08/94	25,2	0,37	20
Niamey	06/08/94	26,6	0,65	20
Niamey	10/08/94	5,3	0,66	10
Niamey	14/08/94	67,0	0,18	20
Niamey	15/08/94	13,4	0,73	20
Niamey	20/08/94	19,3	0,48	20
Niamey	22/08/94	15,4	0,29	20
Niamey	24/08/94	25,0	0,23	30
Niamey	25/08/94	7,0	0,30	30
Niamey	26/08/94	6,0	0,26	30
Niamey	01/09/94	24,5	5,64	20
Niamey	05/09/94	18,5	0,35	20
Niamey	09/09/94	13,0	0,51	30
Niamey	18/09/94	6,0	0,50	30
Niamey	13/10/94	6,8	1,55	30
Niamey	19/10/94	5,0	1,57	30

NIAMEY ORSTOM 1995 source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003				
Localité	Date	Pluie (mm)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Vol éch. (ml)
Niamey	15/06/95	19,9	0,75	30
Niamey	17/06/95	20,4	0,24	30
Niamey	20/06/95	19,9	0,23	30
Niamey	23/06/95	12,2	0,35	30
Niamey	25/06/95	11,7	0,40	30
Niamey	08/07/95	22,0	0,47	30
Niamey	11/07/95	32,8	0,19	30
Niamey	13/07/95	17,0	0,27	30
Niamey	16/07/95	9,0	0,27	30
Niamey	21/07/95	13,3	0,24	30
Niamey	22/07/95	12,5	0,41	30
Niamey	29/07/95	17,4	0,17	30
Niamey	01/08/95	9,4	0,32	30
Niamey	08/08/95	36,5	0,17	30
Niamey	11/08/95	30,0	0,13	30
Niamey	13/08/95	15,5	0,38	30
Niamey	15/08/95	20,6	0,14	30
Niamey	17/08/95	14,0	0,18	30
Niamey	19/08/95	21,5	0,15	30
Niamey	23/08/95	10,5	0,51	30
Niamey	24/08/95	21,6	0,20	30
Niamey	25/08/95	24,9	0,13	30
Niamey	30/08/95	21,5	0,22	30
Niamey	12/09/95	11,0	0,31	30
Niamey	15/09/95	25,1	0,18	30
Niamey	23/09/95	8,5	0,46	30
Niamey	26/09/95	29,8	0,23	30

NIAMEY ORSTOM 2000 source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003						
Localité	Date	Pluie (mm)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Br ⁻ (µg.l ⁻¹)	Sensibilité pour Br ⁻ (µS.cm ⁻¹)	Vol. éch. (ml)
Niamey	05/06/00	7,5	4,82			10
Niamey	16/06/00	12,0	1,07			10
Niamey	19/06/00	11,0	1,01			10
Niamey	21/06/00	13,5	0,67			10
Niamey	30/06/00	6,0	1,16	5,59	10	30
Niamey	05/07/00	26,5	1,99			30
Niamey	12/07/00	1,5	2,95	13,33	30	30
Niamey	17/07/00	8,7	2,19	7,60	100	30
Niamey	19/07/00	38,5	0,33			30
Niamey	25/07/00	35,5	0,36	n.a.	30	30
Niamey	26/07/00	31,7	0,31			10
Niamey	04/08/00	14,9	0,38			30
Niamey	09/08/00	5,5	1,67	3,34	30	30
Niamey	17/08/00	80,0	0,18			30
Niamey	21/08/00	5,5	0,56			30
Niamey	24/08/00	5,0	0,68	4,14	10	30
Niamey	17/09/00	45,1	0,35	2,45	10	30
Niamey	20/09/00	15,0	0,35			30

n.a. : non assigné (le pic des bromures n'a pas été décelé).

NIAMEY ORSTOM 2002 source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003 ; filtré à 22 µm ; récipient en Nalgène						
Localité	Date	Pluie (mm)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Br ⁻ (µg.l ⁻¹)	Sensibilité pour Br ⁻ (µS.cm ⁻¹)	Vol éch (ml)
Niamey	04/06/02	7,0	0,41	n.r.		125
Niamey	11/06/02	12,5	0,81	n.a.	30	125
Niamey	14/06/02	52,0	0,23	n.r.		125
Niamey	23/06/02	15,0	1,01	n.a.	30	125
Niamey	10/07/02	13,0	1,29	n.a.	30	125
Niamey	20/07/02	6,7	0,56	n.r.		125
Niamey	26/07/02	16,5	0,55	n.r.		125
Niamey	31/07/02	29,5	0,35	n.r.		125
Niamey	14/08/02	69,0	0,68	n.a.	30	125
Niamey	26/08/02	49,5	0,29	n.r.		125
Niamey	29/08/02	27,0	0,40	n.r.		125
Niamey	09/09/02	23,0	0,84	n.a.	10	125
Niamey	13/09/02	16,5	0,88	5,77	30	125
Niamey	25/09/02	42,5	0,27	n.a.	30	125
Niamey	29/09/02	43,5	0,18	n.a.	30	125
Niamey	02/10/02	41,7	0,16	n.a.	30	125
Niamey	06/10/02	14,6	0,39	n.a.	30	125

Localité	Date	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Br ⁻ (µg.l ⁻¹)	Sensibilité pour Br ⁻ (µS.cm ⁻¹)	Vol éch (ml)
Banizoumbou	20/07/02	2,91	n.a.	10	125
Barkiawel	20/07/02	0,63	2,96	10	125
Fandouberi	20/07/02	0,81	n.a.	10	125
Kafina	20/07/02	3,56	n.a.	10	125
Koberi	20/07/02	0,23	n.r.		125
Banizoumbou	28/08/02	3,34	n.a.	30	125
Barkiawel	27/08/02	0,24	n.r.		125
Fandouberi	27/08/02	1,49	18,55	30	125
Koberi	27/08/02	0,55	7,7	30	125

n.a. : non assigné (le pic des bromures n'a pas été décelé).

n.r. : non réalisé (l'analyse n'a pas été effectuée car les teneurs ont été suspectées trop faibles que pour être détectées).

Echantillons PNRH Niger 2002					
source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003					
Nappe : 9 échantillons en complément des 11 analysés en 2001					
Localité	Date	Filtrage (μm)	Cl^- (mg.l^{-1})	Br^- ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	Sensibilité ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
Banikané	01/08/02	0,45	1,21	6,58	30
Boula Kouara Tegui	27/08/02	0,45	0,67	13,96	30
Komakoukou forage	01/08/02		1,01	n.a.	30
Oura Tondi	25/07/02	0,22	0,93	7,49	10
Tokobinkani Peul	01/08/02		2,44	19,46	30
Tondi Banda forage	27/08/02		0,66	6,16	30
Tondi Kiboro	28/08/02	0,45	2,05	22,83	30
Youloua forage	01/08/02	0,45	1,45	12,26	30
Sourgourou forage solaire	27/08/02	0,22	1,93	14,02	30
Eaux de surface : 3 échantillons proches de pluviomètres					
Localité	Date	Filtrage (μm)	Cl^- (mg.l^{-1})	Br^- ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	Sensibilité ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
Berkiawel mare	20/07/02	0,22	1,76	17,71	10
Fandou Beri Kori	20/07/02	0,45	0,31	1,75	10
Kafina mare	20/07/02	0,45	0,63	6,18	10
Tests pluies (blancs d'eau distillée ultrapure)					
	Date		Cl^- (mg.l^{-1})	Br^- ($\mu\text{g.l}^{-1}$)	Sensibilité ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)
ech 1	03/10/02		n.a	n.r.	n.r.
ech 2	03/10/02		0,06	n.r.	n.r.
ech 3	03/10/02		0,08	n.r.	n.r.

n.a. : non assigné (le pic des bromures n'a pas été décelé).

n.r. : non réalisé (l'analyse n'a pas été effectuée car les teneurs ont été suspectées trop faibles que pour être détectées).

Lac Tchad ; Diffa 2001
source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003

Localité	Date	Pluie (mm)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Vol éch (ml)
Diffa	04/06/2001	0,60	5,48	30
Diffa	12/06/2001	0,25	4,5	30
Diffa	16/06/2001	29,30	0,38	30
Diffa	23/06/2001	12,50	0,48	30
Diffa	06/07/2001	15,60	0,31	30
Diffa	08/07/2001	21,80	0,28	30
Diffa	15/07/2001	2,50	0,61	30
Diffa	19/07/2001	0,70	1,64	30
Diffa	21/07/2001	3,80	0,24	30
Diffa	24/07/2001	6,30	0,46	30
Diffa	28/07/2001	3,80	0,6	30
Diffa	31/07/2001	3,00	0,52	30
Diffa	02/08/2001	2,40	1,38	30
Diffa	07/08/2001	1,00	5,11	30
Diffa	11/08/2001	8,40	0,56	30
Diffa	12/08/2001	6,40	0,26	30
Diffa	19/08/2001	23,30	0,53	30
Diffa	22/08/2001	7,50	0,39	30
Diffa	27/08/2001	5,00	0,82	30
Diffa	31/08/2001	2,00	0,62	30
Diffa	02/09/2001	7,00	0,29	30
Diffa	03/09/2001	17,50	0,14	30
Diffa	08/09/2001	10,00	0,65	30
Diffa	13/09/2001	3,00	0,99	30
Diffa	20/09/2001	17,80	0,32	30

Précipitations cumulées					
Localité	Prélèvements	Date	Pluies (mm)	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Vol éch (ml)
Diffa	1 ^e quinzaine	14 au 30/05	3,0	8,01	30
Diffa	2 ^e quinzaine	Prélev : 17/06 01 au 16/06	32,2	0,95	30
Diffa	3 ^e quinzaine	Prélev : 01/07 18 au 01/07	12,5	0,89	30
Diffa	4 ^e quinzaine	02 au 15/07	37,4	0,24	30
Diffa	5 ^e quinzaine	Prélev : 31/07 19 au 28/07	18,6	0,69	30
Diffa	6 ^e quinzaine	01 au 16/08	18,2	0,77	30
Diffa	7 ^e quinzaine	20 au 31/08	37,8	0,54	30
Diffa	8 ^e quinzaine	Prélev : 18/09 02 au 16/09	37,5	0,89	30
Diffa	9 ^e quinzaine	22/10/2001	17,8	1,11	30

Lac Tchad ; N'Guigmi 2001

Source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003

Localité		Date	Pluie (mm)	Cl⁻ (mg.l⁻¹)	Vol éch (ml)
N'Guigmi	1e pluie	14/05/01	12,30	1,10	30
N'Guigmi	2e pluie	15/06/01	1,20	9,62	30
N'Guigmi	3e pluie	16/06/01	0,40	4,23	30
N'Guigmi	4e pluie	18/06/01	2,00	1,38	30
N'Guigmi	5e pluie	23/06/01	9,10	0,99	30
N'Guigmi	6e pluie	01/07/01	1,20	10,25	30
N'Guigmi	7e pluie	21/07/01	9,10	1,96	30
N'Guigmi	8e pluie	23/07/01	24,60	1,78	30
N'Guigmi	9e pluie	31/07/01	19,30	1,01	30
N'Guigmi	10e pluie	02/08/01	16,50	0,92	30
N'Guigmi	11e pluie	19/08/01	3,50	1,70	30
N'Guigmi	12e pluie	24/08/01	1,40	3,07	30
N'Guigmi	13e pluie	02/09/01	12,50	0,74	30
N'Guigmi	14e pluie	04/09/01	0,70	1,85	30
N'Guigmi	15e pluie	13/09/01	42,00	0,78	30

Précipitations cumulées					
Localité		Date	Pluie (mm)	Cl⁻ (mg.l⁻¹)	Vol éch (ml)
N'Guigmi	1 ^e quinzaine	28/05/01	12,30	4,60	30
N'Guigmi	2 ^e quinzaine	29/06/01	12,70	8,17	30
N'Guigmi	4 ^e quinzaine	04/08/01	69,50	3,33	30
N'Guigmi	5 ^e quinzaine	02/09/01	17,40	15,12	30
N'Guigmi	6 ^e quinzaine	19/09/01	42,70	7,72	30

Annexes 3

Inventaires des études antérieures sur la méthode MBC

Auteur(s)	Date de publication	Région d'étude	Nombre d'années considérées
ALLISON et HUGHES	1978	Australie	/ (formule empirique de Hutton, 1976)
ALLISON et HUGHES	1983	Australie (sud)	/ (Blackburn, com. pers., 1979)
BAZUHAIR et WOOD	1996	Arabie Saoudite (ouest)	10
BROMLEY et al	1997	Niger (sud)	1
BRUNNER et al.	2002	Botswana	Voir Gieske 1992
COOK et al.	1989	Australie (sud)	Non spécifié
COOK et al.	1992	Chypre	3
		Sénégal	3
DETTINGER	1989	Nevada (USA)	3
EDMUNDS et al.	1991	Sénégal (nord)	3
EDMUNDS et al.	1992	Soudan (Abu Delaig)	3
EDMUNDS et GAYE	1994	Sénégal	3
EDMUNDS et al.	1999	Nigeria (lac Tchad)	3
EDMUNDS et al.	2002	Nigeria (NE)	8
ERIKSSON et KHUNAKASEM	1969	Israël	Voir Yaalon et Katz 1962/ estimé à partir d'une carte des dépôt en CI
FLINT et al.	2002	Nevada (USA)	Non spécifié
GAYE et EDMUNDS	1996	Sénégal (NO)	3
GONI et al	2001	Nigeria (NE)	5
LO RUSSO et al.	2003	Italie	1
MACFARLANE et al.	2000	Colorado et Kansas	13
SCANLON	1991	Texas (USA)	/ (déterminé par calcul)
SCANLON	2000	Texas (USA)	2
SHARMA et HUGHES	1985	Australie (ouest)	Voir Hingston et Gailitis 1976
SUKHIJA et al	1988	Inde	6
TSIABABA SELAOLO	1998	Botswana	4 10?
VARNI et al.	1999	Argentine	3
Walker et al.	1991	Australie (sud)	Voir Blackburn et McLeod 1983
WOOD et SANFORD	1995	Texas/Nouveau Mexique	2
WOOD et al.	1997	Texas/Nouveau Mexique	2

Bibliographie relative à l'inventaire des études antérieures **sur la méthode MBC**

- ALLISON G. B. & HUGHES M. W., 1978. The use of environmental chloride and tritium to estimate total local recharge to an unconfined aquifer. *Aust. J. Soil Res.*, 16, pp. 181-195.
- ALLISON G. B. & HUGHES M. W., 1983. The use of natural tracers as indicators of soil water movement in temperate semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 60, pp. 157-173.
- BAZUHAIR A. S. & WOOD W. W., 1996. Chloride mass-balance method for estimating ground water recharge in arid areas: examples from western Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, 186, pp. 153-159.
- BROMLEY J., EDMUNDS W. M., FELLMAN E., BROUWER J., GAZE S.R., SUDLOW J. & TAUPIN J.-D., 1997. Estimation of rainfall inputs and direct recharge to the deep unsaturated zone of southern Niger using the chloride profile method. *Journal of Hydrology*, 188-189, pp. 139-154.
- BRUNNER P., EUGSTER M., BAUER P. & KINZELBACH W., 2002. Getting the Spatial Pattern of Recharge from Remote Sensing and Flux Estimates from the Chloride Method. *IAHS conf., Prague 2002*, pp. 1-6
- COOK P. G., WALKER G. R. & JOLLY I. D., 1989. Spatial variability of groundwater recharge in a semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 111, pp. 195-212.
- COOK P. G., EDMUNDS W. M. & GAYE C. B., 1992. Estimating Paleorecharge and Paleoclimate From Unsaturated Zone Profiles. *Water Resources Research*, 28 (10), pp. 2721-2731.
- DETTINGER M. D., 1989. Reconnaissance estimates of natural recharge to desert basins in Nevada, U.S.A., by using chloride-balance calculations. *Journal of Hydrology*, 106, pp. 55-78.
- EDMUNDS W. M. & GAYE C. B. & FONTES J.-C., 1991. A record of climatic and environmental change contained in interstitial waters from the unsaturated zone of northern Senegal, paper presented at International Symposium on the Use of Isotopes in Water Resources Development, *Int. At. Energy Agency, Vienna, March 1991*, pp.533-549.
- EDMUNDS W. M. & DARLING W. G., KINNIBURGH D. G., KOTOUB S. & MAHGOUB S., 1992. Sources of recharge at Abu Delaig, Sudan. *Journal of Hydrology*, 131, pp. 1-24.
- EDMUNDS W. M. & GAYE C. B., 1994. Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the Sahel using chloride. *Journal of Hydrology*, 156, pp. 47-59.

- EDMUNDS W. M., FELLMAN E. & GONI I. B., 1999. Lakes, groundwater and paleohydrology in the Sahel of NE Nigeria: evidence from hydrochemistry. *Journal of the Geological Society, London*, 156, pp. 345-355.
- EDMUNDS W. M. FELLMAN E., GONI I. B. & PRUDHOMME C., 2002. Spatial and temporal distribution of groundwater recharge in northern Nigeria. *Hydrogeology Journal*, 10, pp. 205-215. B., 1994.
- ERIKSSON E. & KHUNAKASEM V., 1969. Chloride concentration in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain.). *Journal of Hydrology*, 7, pp. 178-197.
- FLINT A. L., FLINT L. E., KWICKLIS E. M., FABRYKA-MARTIN J. T. & BODVARSSON G. S., 2002. Estimating recharge at Yucca Mountain, Nevada, USA: comparison of methods. *Hydrogeology Journal*, 10, pp. 180-204.
- GAYE C. B. & EDMUNDS W. M., 1996. Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal. *Environmental Geology*, 27, pp. 246-251.
- GONI I. B., FELLMAN E. & EDMUNDS W. M., 2001. Rainfall geochemistry in the Sahel region of northern Nigeria. *Atmospheric Environment*, 35, pp. 4331-4339.
- LO RUSSO S., ZAVATTARO L., ACUTIS M. & ZUPPI G. M., 2003. Chloride profile technique to estimate water movement through unsaturated zone in a cropped area in subhumid climate (Po Valley-NW Italy). *Journal of Hydrology*, 270, pp. 65-74.
- MACFARLANE P. A., CLARK J. F., DAVISSON M. L., HUDSON G. B. & WHITTEMORE D. O., 2000. Late-Quaternary Recharge Determined from Chloride in Shallow Groundwater in the Central Great Plains. *Quaternary Research*, 53, pp. 167-174.
- SCANLON B., 1991. Evaluation of moisture flux from chloride data in desert soils. *Journal of Hydrology*, 128, pp. 137-156.
- SCANLON B., 2000. Uncertainties in estimating water fluxes and residence times using environmental tracers in an arid unsaturated zone. *Water Resources Research*, 36 (2), pp. 395-409.
- SHARMA M. L. & HUGHES M. W., 1985. Groundwater recharge estimation using chloride, deuterium and oxygen-18 profiles in the deep coastal sands of western Australia. *Journal of Hydrology*, 81, pp. 93-109.
- SUKHIJA B. S., REDDY D. V., NAGABHUSHANAM P. & CHAND R., 1988. Validity of the environmental chloride method for recharge evaluation of coastal aquifers, India. *Journal of Hydrology*, 99 (3-4), pp. 349-366.
- SELAOLO E. T., 1998. Tracer studies and groundwater recharge assessment in the eastern fringe of the Botswana Kalahari. The Lelhakeng-Bothapatlou Area. Academisch Proefschrift. Printing & Publishing Company Botswana (Pty) Limited. 229 p.

- VARNI M., USUNOFF E., WEINZETTEL P. & RIVAS R., 1999. Groundwater recharge in the Azul Aquifer, central Buenos Aires Province, Argentina. *Physics and chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24 (4), pp. 349-352.
- WALKER G. R., JOLLY I. D. & COOK P. G., 1991. A new chloride leaching approach to the estimation of diffuse recharge following a change in land use. *Journal of Hydrology*, 128, pp. 49-67.
- WOOD W. W. & SANFORD W. E., 1995. Chemical and Isotopic Methods for Quantifying Ground-Water Recharge in a Regional, Semiarid Environment. *Ground Water*, 33 (3), pp. 458-468.
- WOOD W. W., RAINWATER K. A. & THOMPSON D. B., 1997. Quantifying Macropore Recharge: Examples from a Semi-Arid Area. *Ground Water*, 35 (6), pp. 1097-1105.

Annexes 4

Données relatives aux teneurs en chlorures des pluies et des nappes

NIAMEY 1988					
probablement l'ancienne implantation IRD à Niamey près de l'Hôtel Terminus source : CLGLS (DEA 1990)					
DATE	mm	P cumul.	Cl- (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ⁻²)	masse Cl cumul. (mg.m ⁻²)
13/06/1988	11,1	11,1	5,90	65,49	65,49
2/07/1988	19,2	30,3	0,70	13,44	78,93
8/07/1988	31,5	61,8	1,80	56,70	135,63
13/07/1988	10,5	72,3	0,90	9,45	145,08
1/08/1988	19,5	91,8	0,70	13,65	158,73
2/08/1988	0,2	92,0	20,80	4,16	162,89
10/08/1988	10,7	102,7	2,00	21,40	184,29
13/08/1988	20,3	123,0	1,00	20,30	204,59
21/08/1988	16,5	139,5	0,80	13,20	217,79
22/08/1988	6,4	145,9	0,50	3,20	220,99
24/08/1988	14,8	160,7	0,50	7,40	228,39
25/08/1988	3,4	164,1	1,20	4,08	232,47
2/09/1988	1,0	165,1	1,90	1,90	234,37
3/09/1988	9,6	174,7	2,40	23,04	257,41
6/09/1988	6,5	181,2	1,30	8,45	265,86
10/09/1988	43,5	224,7	0,20	8,70	274,56
14/09/1988	1,6	226,3	1,10	1,76	276,32
24/09/1988	2,6	228,9	2,00	5,20	281,52
P ann. totale:	348,4	(555,8 à l'aéroport selon DMN)			
[Cl] annuel pondéré :	1,23	sur %	66	de P ann.	
P avril tot :	-	[Cl] avril pond. :	-		
P mai tot :	-	[Cl] mai pond. :	-		
P juin tot :	-	[Cl] juin pond. :	5,90		
P juillet tot :	-	[Cl] juillet pond. :	1,30		
P août tot :	-	[Cl] août pond. :	0,95		
P septembre tot :	-	[Cl] sept. pond. :	0,76		
P octobre tot :	-	[Cl] oct. pond. :	-		

NIAMEY ORSTOM 1992

source : JDTaupin (com pers. 1997, 2002)

DATE	mm	P cumul.	Cl- (mg/L)	masse Cl mg/m ²	masse Cl cumul. mg/m ²
28/05/1992	6,1	6,1	1,10	6,71	6,71
5/06/1992	20,8	26,9	0,28	5,82	12,53
7/06/1992	7,0	33,9	0,36	2,52	15,05
13/06/1992	5,5	39,4	0,36	1,98	17,03
20/06/1992	3,6	43,0	0,28	1,01	18,04
24/06/1992	14,7	57,7	0,39	5,73	23,78
28/06/1992	8,3	66,0	0,57	4,73	28,51
30/06/1992	40,9	106,9	0,36	14,72	43,23
9/07/1992	1,2	108,1	3,88	4,66	47,89
11/07/1992	12,4	120,5	0,60	7,44	55,33
13/07/1992	3,7	124,2	0,88	3,26	58,58
18/07/1992	49,0	173,2	0,31	15,19	73,77
22/07/1992	20,8	194,0	0,31	6,45	80,22
26/07/1992	2,3	196,3	1,28	2,94	83,16
27/07/1992	14,9	211,2	0,50	7,45	90,61
28/07/1992	34,5	245,7	0,24	8,28	98,89
31/07/1992	40,0	285,7	0,24	9,60	108,49
2/08/1992	5,8	291,5	0,37	2,15	110,64
4/08/1992	9,7	301,2	0,24	2,33	112,97
5/08/1992	8,7	309,9	0,31	2,70	115,67
8/08/1992	15,2	325,1	0,43	6,54	122,20
10/08/1992	10,3	335,4	0,12	1,24	123,44
12/08/1992	13,1	348,5	0,24	3,14	126,58
22/08/1992	36,0	384,5	0,37	13,32	139,90
23/08/1992	1,0	385,5	0,43	0,43	140,33
24/08/1992	0,5	386,0	0,83	0,42	140,75
25/08/1992	9,7	395,7	0,31	3,01	143,75
25/08/1992	2,9	398,6	0,66	1,91	145,67
26/08/1992	2,0	400,6	0,55	1,10	146,77
27/08/1992	8,8	409,4	0,43	3,78	150,55
28/08/1992	1,9	411,3	0,60	1,14	151,69
29/08/1992	2,6	413,9	0,72	1,87	153,56
30/08/1992	27,8	441,7	0,18	5,00	158,57
7/09/1992	21,1	462,8	0,25	5,28	163,84
10/09/1992	3,3	466,1	1,90	6,27	170,11
12/09/1992	1,9	468,0	2,62	4,98	175,09
15/09/1992	5,3	473,3	1,00	5,30	180,39
15/09/1992	1,4	474,7	0,43	0,60	180,99
P ann. total :	488,2				
[Cl] annuel pondéré :	0,38	sur %	97	de P ann.	
P avril tot :	5,9	[Cl] avril pond. :	-		
P mai tot :	14,6	[Cl] mai pond. :	1,10		
P juin tot :	100,9	[Cl] juin pond. :	0,36		
P juillet tot :	178,8	[Cl] juillet pond. :	0,37		
P août tot :	153,9	[Cl] août pond. :	0,32		
P septembre tot :	34,1	[Cl] sept. pond. :	0,68		
P octobre tot :	-	[Cl] oct. pond. :	-		

NIAMEY ORSTOM 1993 source : JD Taupin (com pers. 2002) + Y Travi (com.pers.2002)						
Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ⁻²)	masse Cl cumul. (mg.m ⁻²)	Vol éch (ml)
27/04/1993	5,5	5,5	16,30	89,65	89,65	10
1/06/1993	17,3	22,8	5,70	98,61	188,26	10
13/06/1993	24,6	47,4	0,14	3,44	191,70	10
7/07/1993	15,3	62,7	0,68	10,40	202,11	10
18/07/1993	39,2	101,9	1,23	48,22	250,32	10
21/07/1993	16,6	118,5	0,55	9,10	259,42	10
30/07/1993	19,6	138,1	0,98	19,21	278,63	10
2/08/1993	27,3	165,4	0,29	7,92	286,55	10
5/08/1993	21,0	186,4	0,44	9,24	295,79	10
7/08/1993	12,2	198,6	0,41	5,00	300,79	10
9/08/1993	21,4	220,0	0,35	7,49	308,28	10
13/08/1993	12,2	232,2	0,37	4,51	312,79	10
17/08/1993	34,2	266,4	0,49	16,76	329,55	10
19/08/1993	0,9	267,3	0,79	0,71	330,26	10
21/08/1993	43,0	310,3	0,27	11,61	341,87	10
31/08/1993	5,2	315,5	0,38	1,98	343,85	10
2/09/1993	22,6	338,1	0,50	11,30	355,15	10
13/09/1993	5,3	343,4	1,55	8,22	363,36	10
19/09/1993	20,5	363,9	0,55	11,28	374,64	10
P ann. total :	447,2					
[Cl] annuel pondéré :	1,03	sur %	81	De P ann.		
P avril tot :	5,5	[Cl] avril pond. :	16,30			
P mai tot :	0,5	[Cl] mai pond. :	-			
P juin tot :	71,2	[Cl] juin pond. :	2,44			
		[Cl] juillet pond.				
P juillet tot :	133,4	:	0,96			
P août tot :	182,9	[Cl] août pond. :	0,37			
		[Cl] sept. pond.				
P septembre tot :	53,7	:	0,64			
P octobre tot :	-	[Cl] oct. pond. :	-			

NIAMEY ORSTOM 1994

source : JDTaupin (com pers. 2002) + YTravi (com.pers.2002) + analyses G Chantry (2003)

Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ⁻²)	masse Cl cumul. (mg.m ⁻²)	Vol éch (ml)
20/04/94	21,7	21,7	6,77	146,91	146,91	10
30/04/93	1,6	23,3	16,51	26,42	173,33	10
13/05/94	6,1	29,4	2,41	14,71	188,03	10
18/05/94	1,4	30,8	2,81	3,93	191,96	10
19/05/94	27,7	58,5	0,56	15,51	207,47	10
25/05/94	19,9	78,4	0,47	9,35	216,83	10
05/06/94	34,7	113,1	0,76	26,37	243,20	10
11/06/94	4,9	118,0	1,55	7,60	250,79	10
16/06/94	1,8	119,8	1,44	2,59	253,38	10
18/06/94	22,6	142,4	0,62	14,01	267,40	10
20/06/94	11,2	153,6	1,33	14,90	282,29	10
03/07/94	9,2	162,8	1,15	10,58	292,87	10
13/07/94	19,8	182,6	0,54	10,69	303,56	20
21/07/94	69,9	252,5	0,45	31,46	335,02	20
22/07/94	10,7	263,2	0,31	3,32	338,34	20
26/07/94	42,0	305,2	0,34	14,28	352,62	20
01/08/94	30,7	335,9	0,62	19,03	371,65	20
04/08/94	26,2	362,1	0,47	12,31	383,96	20
06/08/94	25,2	387,3	0,37	9,32	393,29	20
06/08/94	26,6	413,9	0,65	17,29	410,58	20
10/08/94	5,3	419,2	0,66	3,50	414,08	10
14/08/94	67,0	486,2	0,18	12,06	426,14	20
15/08/94	13,4	499,6	0,73	9,78	435,92	20
20/08/94	19,3	518,9	0,48	9,26	445,18	20
22/08/94	15,4	534,3	0,29	4,47	449,65	20
24/08/94	25,0	559,3	0,23	5,75	455,40	30
25/08/94	7,0	566,3	0,30	2,10	457,50	30
26/08/94	6,0	572,3	0,26	1,56	459,06	30
01/09/94	24,5	596,8	5,64	138,18	597,24	20
05/09/94	18,5	615,3	0,35	6,48	603,71	20
09/09/94	13,0	628,3	0,51	6,63	610,34	30
18/09/94	6,0	634,3	0,50	3,00	613,34	30
13/10/94	6,8	641,1	1,55	10,54	623,88	30
19/10/94	5,0	646,1	1,57	7,85	631,73	30
P ann.totale: 675,5 [Cl] annuel pondéré : 0,98 sur % 96 de P ann.						
P avril tot : 23,6 [Cl] avril pond. : 7,44						
P mai tot : 55,6 [Cl] mai pond. : 0,79						
P juin tot : 73,5 [Cl] juin pond. : 0,87						
P juillet tot : 162,7 [Cl] juillet pond. : 0,46						
P août tot : 273,8 [Cl] août pond. : 0,40						
P septembre tot : 72,5 [Cl] sept. pond. : 2,49						
P octobre tot : 13,80 [Cl] oct. pond. : 1,56						

NIAMEY ORSTOM 1995 source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003						
Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Vol éch (ml)
15/06/95	19,9	19,9	0,75	14,93	14,93	30
17/06/95	20,4	40,3	0,24	4,90	19,82	30
20/06/95	19,9	60,2	0,23	4,58	24,40	30
23/06/95	12,2	72,4	0,35	4,27	28,67	30
25/06/95	11,7	84,1	0,40	4,68	33,35	30
08/07/95	22,0	106,1	0,47	10,34	43,69	30
11/07/95	32,8	138,9	0,19	6,23	49,92	30
13/07/95	17,0	155,9	0,27	4,59	54,51	30
16/07/95	9,0	164,9	0,27	2,43	56,94	30
21/07/95	13,3	178,2	0,24	3,19	60,13	30
22/07/95	12,5	190,7	0,41	5,13	65,26	30
29/07/95	17,4	208,1	0,17	2,96	68,22	30
01/08/95	9,4	217,5	0,32	3,01	71,22	30
08/08/95	36,5	254,0	0,17	6,21	77,43	30
11/08/95	30,0	284,0	0,13	3,90	81,33	30
13/08/95	15,5	299,5	0,38	5,89	87,22	30
15/08/95	20,6	320,1	0,14	2,88	90,10	30
17/08/95	14,0	334,1	0,18	2,52	92,62	30
19/08/95	21,5	355,6	0,15	3,23	95,85	30
23/08/95	10,5	366,1	0,51	5,36	101,20	30
24/08/95	21,6	387,7	0,20	4,32	105,52	30
25/08/95	24,9	412,6	0,13	3,24	108,70	30
30/08/95	21,5	434,1	0,22	4,73	113,49	30
12/09/95	11,0	445,1	0,31	3,41	116,90	30
15/09/95	25,1	470,2	0,18	4,52	121,42	30
23/09/95	8,5	478,7	0,46	3,91	125,33	30
26/09/95	29,8	508,5	0,23	6,85	132,18	30
P ann.totale: 537,1 [Cl] annuel pondéré : 0,26 sur % 95 de P ann. P avril tot : 3,8 [Cl] avril pond. : P mai tot : 1,4 [Cl] mai pond. : P juin tot : 87,7 [Cl] juin pond. : 0,40 P juillet tot : 127,3 [Cl] juillet pond. : 0,28 P août tot : 209,4 [Cl] août pond. : 0,20 P septembre tot : 107,5 [Cl] sept. pond. : 0,25 P octobre tot : [Cl] oct. pond. :						

NIAMEY ORSTOM 1997

source : Gaultier(com pers. 2000) + YTravi (com.pers.2002)

Date	mm	P cumul.	Cl- (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ⁻²)	masse Cl cumul. (mg.m ⁻²)	Vol éch (ml)
31/03/1997	5,7	5,7	2,56	14,59	14,59	125
5/05/1997	13,7	19,4	1,44	19,73	34,32	125
28/05/1997	17,5	36,9	0,40	7,00	41,32	125
2/06/1997	44,0	80,9	0,19	8,36	49,68	125
4/06/1997	11,0	91,9	0,41	4,51	54,19	125
10/06/1997	5,0	96,9	0,19	0,95	55,14	125
13/06/1997	68,0	164,9	0,23	15,64	70,78	125
7/07/1997	45,5	210,4	0,36	16,38	87,16	125
10/07/1997	22,5	232,9	0,42	9,45	96,61	125
28/07/1997	28,9	261,8	0,17	4,91	101,52	125
5/08/1997	34,5	296,3	0,20	6,90	108,42	125
8/08/1997	8,0	304,3	0,39	3,12	111,54	125
23/08/1997	7,8	312,1	0,26	2,03	113,57	125
27/08/1997	8,0	320,1	0,37	2,96	116,53	125
30/08/1997	8,1	328,2	0,42	3,40	119,93	125
31/08/1997	26,2	354,4	0,14	3,67	123,60	125
1/09/1997	28,0	382,4	0,13	3,64	127,24	125
4/09/1997	6,8	389,2	0,40	2,72	129,96	125
7/09/1997	8,5	397,7	0,27	2,30	132,26	125
6/10/1997	19,0	416,7	0,41	7,79	140,05	125
P ann. total : 449,5 [Cl] annuel pondéré : 0,34 sur % 93 de P ann. P avril tot : 6,7 [Cl] avril pond. : 2,56 P mai tot : 36,5 [Cl] mai pond. : 0,86 P juin tot : 130,8 [Cl] juin pond. : 0,23 [Cl] juillet pond. P juillet tot : 104,0 : 0,32 P août tot : 98,6 [Cl] aout pond. : 0,24 [Cl] sept. pond. P septembre tot : 49,1 : 0,20 P octobre tot : - [Cl] oct. pond. : 0,41						

NIAMEY ORSTOM 1998 source : Gaultier(com pers. 2000) + YTravi (com.pers.2002)						
Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Vol éch (ml)
29/04/1998	34,5	34,5	2,40	82,80	82,80	10
4/05/1998	15,8	50,3	1,69	26,70	109,50	10
27/05/1998	10,0	60,3	1,44	14,40	123,90	10
5/06/1998	5,0	65,3	2,86	14,30	138,20	10
8/06/1998	40,4	105,7	0,51	20,60	158,81	10
25/06/1998	8,8	114,5	1,31	11,53	170,33	10
30/06/1998	38,9	153,4	1,05	40,85	211,18	10
8/07/1998	27,0	180,4	0,48	12,96	224,14	10
19/07/1998	47,0	227,4	0,80	37,60	261,74	10
20/07/1998	33,5	260,9	8,30	278,05	539,79	10
22/07/1998	27,8	288,7	2,93	81,45	621,24	10
26/07/1998	29,1	317,8	0,56	16,30	637,54	10
28/07/1998	28,5	346,3	1,61	45,89	683,42	10
1/08/1998	126,7	473,0	2,50	316,75	1000,17	20
3/08/1998	52,0	525,0	0,80	41,60	1041,77	20
5/08/1998	11,3	536,3	0,45	5,09	1046,86	20
13/08/1998	20,2	556,5	0,46	9,29	1056,15	20
14/08/1998	32,6	589,1	0,47	15,32	1071,47	20
15/08/1998	7,0	596,1	7,12	49,84	1121,31	20
19/08/1998	51,5	647,6	0,04	2,06	1123,37	20
22/08/1998	13,5	661,1	0,30	4,05	1127,42	20
28/08/1998	15,0	676,1	2,99	44,85	1172,27	20
3/09/1998	45,5	721,6	0,36	16,38	1188,65	20
6/09/1998	25,2	746,8	0,61	15,37	1204,03	20
6/09/1998	119,0	865,8	0,24	28,56	1232,59	20
8/09/1998	29,0	894,8	0,76	22,04	1254,63	20
15/09/1998	28,5	923,3	0,20	5,70	1260,33	20
18/09/1998	13,5	936,8	0,88	11,88	1272,21	10
27/09/1998	7,2	944,0	1,41	10,15	1282,36	10
29/09/1998	7,5	951,5	1,41	10,58	1292,93	10
P ann. total :	978,2					
[Cl] annuel pondéré :	1,36	sur %	97	de P ann.		
P avril tot :	35,6	[Cl] avril pond. :	2,40			
P mai tot :	33,2	[Cl] mai pond. :	1,59			
P juin tot :	94,1	[Cl] juin pond. :	0,94			
P juillet tot :	279,3	[Cl] juillet pond. :	2,45			
P août tot :	259,1	[Cl] aout pond. :	1,48			
P septembre tot :	276,9	[Cl] sept. pond. :	0,44			
P octobre tot :	-	[Cl] oct. pond. :	-			

NIAMEY ORSTOM 1999

source : Gaultier (com pers. 2000) + YTravi (com.pers.2002)

Date	mm (l.m ⁻²)	P cumul.	Cl- (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Vol éch (ml)
24/06/1999	29,0	29,0	1,28	37,12	37,12	10
28/06/1999	7,9	36,9	4,28	33,81	70,93	10
4/07/1999	31,3	68,2	0,63	19,72	90,65	10
9/07/1999	28,2	96,4	2,10	59,22	149,87	10
11/07/1999	16,0	112,4	1,42	22,72	172,59	10
14/07/1999	7,8	120,2	1,17	9,13	181,72	10
19/07/1999	30,0	150,2	0,41	12,30	194,02	10
21/07/1999	8,5	158,7	0,37	3,15	197,16	10
23/07/1999	15,0	173,7	0,28	4,20	201,36	10
25/07/1999	35,9	209,6	0,21	7,54	208,90	10
1/08/1999	22,7	232,3	1,10	24,97	233,87	10
3/08/1999	7,5	239,8	0,61	4,58	238,45	10
6/08/1999	29,0	268,8	0,52	15,08	253,53	10
10/08/1999	7,5	276,3	1,20	9,00	262,53	10
13/08/1999	26,5	302,8	0,79	20,94	283,46	10
20/08/1999	14,5	317,3	0,27	3,92	287,38	10
22/08/1999	18,0	335,3	0,55	9,90	297,28	10
24/08/1999	12,7	348,0	0,35	4,45	301,72	10
26/08/1999	7,5	355,5	2,52	18,90	320,62	10
3/09/1999	7,0	362,5	1,50	10,50	331,12	10
6/09/1999	20,2	382,7	0,65	13,13	344,25	10
9/09/1999	28,5	411,2	3,45	98,33	442,58	10
11/09/1999	8,0	419,2	0,70	5,60	448,18	10
14/09/1999	8,5	427,7	0,63	5,36	453,53	10
20/09/1999	8,4	436,1	1,09	9,16	462,69	10
21/09/1999	31,0	467,1	0,83	25,73	488,42	10
22/09/1999	14,3	481,4	0,24	3,43	491,85	10
25/09/1999	35,5	516,9	0,27	9,59	501,43	10
P ann. total :	567,3					
[Cl] annuel pondéré :	0,97	sur %	91	de P ann.		
P avril tot :	1,4	[Cl] avril pond. :	-			
P mai tot :	2,5	[Cl] mai pond. :	-			
P juin tot :	37,1	[Cl] juin pond. :	1,92			
P juillet tot :	184,1	[Cl] juillet pond. :	0,80			
P août tot :	175,2	[Cl] aout pond. :	0,77			
P septembre tot :	161,5	[Cl] sept. pond. :	1,12			
P octobre tot :	5,5	[Cl] oct. pond. :	-			

NIAMEY ORSTOM 2000

source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003

Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Vol éch (ml)
05/06/00	7,5	7,5	4,82	36,15	36,15	10
16/06/00	12,0	19,5	1,07	12,84	48,99	10
19/06/00	11,0	30,5	1,01	11,11	60,10	10
21/06/00	13,5	44,0	0,67	9,05	69,15	10
30/06/00	6,0	50,0	1,16	6,96	76,11	30
05/07/00	26,5	76,5	1,99	52,74	128,84	30
12/07/00	1,5	78,0	2,95	4,43	133,27	30
17/07/00	8,7	86,7	2,19	19,05	152,32	30
19/07/00	38,5	125,2	0,33	12,71	165,02	30
25/07/00	35,5	160,7	0,36	12,78	177,81	30
26/07/00	31,7	192,4	0,31	9,83	187,63	10
04/08/00	14,9	207,3	0,38	5,66	193,29	30
09/08/00	5,5	212,8	1,67	9,19	202,48	30
17/08/00	80,0	292,8	0,18	14,40	216,88	30
21/08/00	5,5	298,3	0,56	3,08	219,96	30
24/08/00	5,0	303,3	0,68	3,40	223,36	30
17/09/00	45,1	348,4	0,35	15,79	239,14	30
20/09/00	15,0	363,4	0,35	5,25	244,39	30

P ann.totale:	443,5			
[Cl] annuel pondéré :	0,67	sur %	82	de P ann.
P avril tot :	1,0	[Cl] avril pond. :		
P mai tot :	1,0	[Cl] mai pond. :		
P juin tot :	49,5	[Cl] juin pond. :	1,52	
P juillet tot :	146,5	[Cl] juillet pond. :	0,78	
P août tot :	164,5	[Cl] aout pond. :	0,32	
P septembre tot :	81,0	[Cl] sept. pond. :	0,35	
P octobre tot :		[Cl] oct. pond. :		

NIAMEY ORSTOM 2002 source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003						
Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ⁻²)	masse Cl cumul. (mg.m ⁻²)	Vol éch (ml)
04/06/02	7,5	7,50	0,41	3,08	3,08	125
11/06/02	12,5	20,0	0,81	10,13	13,20	125
14/06/02	52,0	72,0	0,23	11,96	25,16	125
23/06/02	15,0	87,0	1,01	15,15	40,31	125
10/07/02	13,0	100,0	1,29	16,77	57,08	125
20/07/02	6,7	106,7	0,56	3,75	60,83	125
26/07/02	16,5	123,2	0,55	9,08	69,91	125
31/07/02	29,5	152,7	0,35	10,33	80,23	125
14/08/02	69,0	221,7	0,68	46,92	127,15	125
26/08/02	49,5	271,2	0,29	14,36	141,51	125
29/08/02	27,0	298,2	0,40	10,80	152,31	125
09/09/02	23,0	321,2	0,84	19,32	171,63	125
13/09/02	16,5	337,7	0,88	14,52	186,15	125
25/09/02	42,5	380,2	0,27	11,48	197,62	125
29/09/02	43,5	423,7	0,18	7,83	205,45	125
02/10/02	41,7	465,4	0,16	6,67	212,12	125
06/10/02	14,6	480,0	0,39	5,69	217,82	125
P ann.totale:	514,5					
[Cl] annuel pondéré :	0,45	sur %	93	de P ann.		
P avril tot :	0,5	[Cl] avril pond. :				
P mai tot :	6,0	[Cl] mai pond. :				
P juin tot :	96,0	[Cl] juin pond. :	0,46			
P juillet tot :	68,0	[Cl] juillet pond. :	0,61			
P août tot :	148,0	[Cl] août pond. :	0,50			
P septembre tot :	123,5	[Cl] sept. pond. :	0,42			
P octobre tot :	72,50	[Cl] oct. pond. :	0,22			

Lac Tchad ; Diffa 2001
source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003

Date	mm	P cumul.	Cl (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Cl pondéré cumulé (mg.l ⁻¹)	Vol éch (ml)
04/06/2001	0,60	0,6	5,48	3,29	3,29	0,02	30
12/06/2001	0,25	0,85	4,5	1,13	4,41	0,02	30
16/06/2001	29,30	30,15	0,38	11,13	15,55	0,07	30
23/06/2001	12,50	42,65	0,48	6,00	21,55	0,10	30
06/07/2001	15,60	58,25	0,31	4,84	26,38	0,12	30
08/07/2001	21,80	80,05	0,28	6,10	32,49	0,15	30
15/07/2001	2,50	82,55	0,61	1,53	34,01	0,16	30
19/07/2001	0,70	83,25	1,64	1,15	35,16	0,17	30
21/07/2001	3,80	87,05	0,24	0,91	36,07	0,17	30
24/07/2001	6,30	93,35	0,46	2,90	38,97	0,18	30
28/07/2001	3,80	97,15	0,6	2,28	41,25	0,20	30
31/07/2001	3,00	100,15	0,52	1,56	42,81	0,20	30
02/08/2001	2,40	102,55	1,38	3,31	46,12	0,22	30
07/08/2001	1,00	103,55	5,11	5,11	51,23	0,24	30
11/08/2001	8,40	111,95	0,56	4,70	55,94	0,26	30
12/08/2001	6,40	118,35	0,26	1,66	57,60	0,27	30
19/08/2001	23,30	141,65	0,53	12,35	69,95	0,33	30
22/08/2001	7,50	149,15	0,39	2,93	72,87	0,34	30
27/08/2001	5,00	154,15	0,82	4,10	76,97	0,36	30
31/08/2001	2,00	156,15	0,62	1,24	78,21	0,37	30
02/09/2001	7,00	163,15	0,29	2,03	80,24	0,38	30
03/09/2001	17,50	180,65	0,14	2,45	82,69	0,39	30
08/09/2001	10,00	190,65	0,65	6,50	89,19	0,42	30
13/09/2001	3,00	193,65	0,99	2,97	92,16	0,44	30
20/09/2001	17,80	211,45	0,32	5,70	97,86	0,46	30

Précipitations cumulées (Dame-Jeanne)

Date	mm	P cumul.	Cl (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Vol éch (ml)
1e quinzaine 14 au 30/05	3	3	8,01	24,03	24,03	30
2e quinzaine 01 au 16/06	32,2	35,2	0,95	30,59	54,62	30
3e quinzaine 18 au 01/07	12,5	47,7	0,89	11,13	65,75	30
4e quinzaine 02 au 15/07	37,4	85,1	0,24	8,98	74,72	30
5e quinzaine 19 au 28/07	18,6	103,7	0,69	12,83	87,56	30
6e quinzaine 01 au 16/08	18,2	121,9	0,77	14,01	101,57	30
7e quinzaine 20 au 31/08	37,8	159,7	0,54	20,41	121,98	30
8e quinzaine 02 au 16/09	37,5	197,2	0,89	33,38	155,36	30
9e quinzaine 22/10/2001	17,8	215	1,11	19,76	175,11	30

Lac Tchad ; N'Guigmi 2001

source : analyses Geoffrey Chantry, juin 2003

Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ²)	masse Cl cumul. (mg.m ²)	Cl pondéré cumulé (mg.l ⁻¹)	Vol éch (ml)
14/05/01	12,30	12,30	1,1	13,53	13,53	0,09	30
15/06/01	1,20	13,50	9,62	11,544	25,074	0,16	30
16/06/01	0,40	13,90	4,23	1,692	26,766	0,17	30
18/06/01	2,00	15,90	1,38	2,76	29,526	0,19	30
23/06/01	9,10	25,00	0,99	9,009	38,535	0,25	30
01/07/01	1,20	26,20	10,25	12,3	50,835	0,33	30
21/07/01	9,10	35,30	1,96	17,836	68,671	0,44	30
23/07/01	24,60	59,90	1,78	43,788	112,459	0,72	30
31/07/01	19,30	79,20	1,01	19,493	131,952	0,85	30
02/08/01	16,50	95,70	0,92	15,18	147,132	0,94	30
19/08/01	3,50	99,20	1,7	5,95	153,082	0,98	30
24/08/01	1,40	100,60	3,07	4,298	157,38	1,01	30
02/09/01	12,50	113,10	0,74	9,25	166,63	1,07	30
04/09/01	0,70	113,80	1,85	1,295	167,925	1,08	30
13/09/01	42,00	155,80	0,78	32,76	200,685	1,29	30

Précipitations cumulées

	Date	mm	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	Vol éch (ml)
1e quinzaine	28/05/01	12,30	4,6	30
2e quinzaine	29/06/01	12,70	8,17	30
4e quinzaine	04/08/01	69,50	3,33	30
5e quinzaine	02/09/01	17,40	15,12	30
6e quinzaine	19/09/01	42,70	7,72	30

Kaska 1993
Source : Goni et al. (2001)

Date	mm	P cumul.	Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	masse Cl (mg.m ⁻²)	masse Cl cumul. (mg.m ⁻²)	Cl pondéré cumulé (mg.l ⁻¹)
01/06/93	3,00	3,00	2,3	6,9	6,9	0,04
26/06/93	17,50	20,50	4,6	80,5	87,4	0,56
05/07/93	7,50	28,00	0,8	6	93,4	0,60
09/07/93	15,50	43,50	1	15,5	108,9	0,70
13/07/93	15,70	59,20	0,7	10,99	119,89	0,77
20/07/93	0,90	60,10	3,6	3,24	123,13	0,79
22/07/93	5,40	65,50	1,3	7,02	130,15	0,84
23/07/93	5,20	70,70	0,6	3,12	133,27	0,86
27/07/93	12,00	82,70	1,3	15,6	148,87	0,96
29/07/93	6,50	89,20	0,7	4,55	153,42	0,98
02/08/93	13,00	102,20	2,4	31,2	184,62	1,18
04/08/93	2,10	104,30	1,5	3,15	187,77	1,21
05/08/93	49,50	153,80	0,6	29,7	217,47	1,40
09/08/93	18,70	172,50	1,6	29,92	247,39	1,59
15/08/93	25,30	197,80	0,9	22,77	270,16	1,73
19/08/1993	42,70	240,50	0,9	38,43	308,59	1,98
22/08/1993	1,60	242,10	1,9	3,04	311,63	2,00
24/08/1993	15,20	257,30	1,6	24,32	335,95	2,16
27/08/1993	47,10	304,40	1,2	56,52	392,47	2,52
31/08/1993	17,40	321,80	0,7	12,18	404,65	2,60
5/09/1993	5,50	327,30	2,6	14,3	418,95	2,69