



HAL
open science

Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la Région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques

Abdel Kader Hassane Saley

► **To cite this version:**

Abdel Kader Hassane Saley. Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la Région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques. Géochimie. Université Paris Saclay (COmUE); Université Abdou Moumouni, 2018. Français. NNT : 2018SACLS192 . tel-02089629

HAL Id: tel-02089629

<https://theses.hal.science/tel-02089629>

Submitted on 4 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques

Cotutelle internationale de thèse de doctorat entre l'Université Paris-Saclay et
l'Université Abdou Moumouni préparée à l'Université Paris-Sud et à
l'Université Abdou Moumouni de Niamey

École doctorale n°579 sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et
géosciences (SMEMAG) à l'Université Paris-Sud
Spécialité de doctorat : structure et évolution de la terre et des autres planètes

École doctorale sciences de la vie et de la terre (SVT) à l'Université Abdou
Moumouni de Niamey
Spécialité de doctorat : hydrogéologie

Thèse présentée et soutenue à Orsay, le 18 juillet 2018, par

Abdel Kader HASSANE SALEY

Composition du Jury :

Christelle MARLIN Professeur, Université Paris-Sud (GEOPS)	Présidente
Jean Patrice Roger JOURDA Professeur, Université Félix Houphouet Boigny (STRM)	Rapporteur
Corinne LE GAL LA SALLE Professeur, Université de Nîmes (GIS)	Rapporteur
Moussa BOUKARI Professeur, Université d'Abomey-Calavi (FAST)	Examineur
Pierre DESCHAMPS Docteur, Université Aix-Marseille (CEREGE)	Examineur
Boureima OUSMANE Professeur, Université Abdou Moumouni (FAST)	Directeur de thèse
Jean-Luc MICHELOT Docteur, Université Paris-Sud (GEOPS)	Directeur de thèse

UNIVERSITÉ PARIS-SUD
École doctorale n°579
Sciences mécaniques et énergétiques,
matériaux et géosciences (SMEMAG)
*Spécialité de doctorat : structure et évolution
de la terre et des autres planètes*

UNIVERSITÉ ABDOU MOUMOUNI
École doctorale
Sciences de la vie et de terre
(SVT)
Spécialité de doctorat : hydrogéologie

THESE DE DOCTORAT

Présentée pour obtenir le grade de Docteur en Sciences de l'Université Paris-Saclay et le
grade de Docteur en Sciences de l'Université Abdou Moumouni de Niamey par

Abdel Kader HASSANE SALEY

Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques

Soutenue le 18 juillet 2018, à Orsay

Composition du Jury :

Christelle MARLIN Professeur, Université Paris-Sud (GEOPS)	Présidente
Jean Patrice Roger JOURDA Professeur, Université Félix Houphouet Boigny (STRM)	Rapporteur
Corinne LE GAL LA SALLE Professeur, Université de Nîmes (GIS)	Rapporteur
Moussa BOUKARI Professeur, Université d'Abomey-Calavi (FAST)	Examineur
Pierre DESCHAMPS Docteur, Université Aix-Marseille (CEREGE)	Examineur
Boureima OUSMANE Professeur, Université Abdou Moumouni (FAST)	Directeur de thèse
Jean-Luc MICHELOT Docteur, Université Paris-Sud (GEOPS)	Directeur de thèse

Dédicace

A mes parents,

A ma fille Amira, et son jeune frère Amar

A mon épouse,

A mes frères et sœurs notamment Djamila HASSANE SALEY,

A ma belle-famille,

A la famille de mon père,

A la famille de ma mère,

A mes amis,

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cet ouvrage,

Je dédie avec fierté et reconnaissance ce travail

Que DIEU vous bénisse.

Allahoumma Amine

Remerciements

*C'est avec un cœur rempli de joie, que je tiens aujourd'hui, au terme de ce travail, de dure labeur, à adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes physiques et/ou morales qui n'ont aménagées, de près ou de loin, aucun effort pour faire de cette étude une réussite. Mais avant, permettez-moi, de remercier très sincèrement deux personnes clés de la réussite dudit travail, deux personnes qui ont cru en moi en accordant leurs confiances, leurs disponibilités, ainsi que les moyens nécessaires à la réalisation de cette étude. Je parle ici, de mes deux directeurs de thèse : Monsieur **OUSMANE Boureïma**, Professeur, enseignant chercheur à l'Université Abdou Moumouni de Niamey, avec qui on a initié les travaux de cette thèse courant l'année 2014 et Monsieur **MICHELOT Jean-Luc**, Directeur de Recherche au CNRS, enseignant chercheur à l'Université Paris-Sud, qui par sa collaboration et sa détermination sans faille a fait de cette thèse une cotutelle internationale, entre l'Université Paris-Saclay et l'Université Abdou Moumouni de Niamey.*

*Au-delà d'un encadrement scientifique de qualité bien sûr, M. **MICHELOT Jean-Luc**, et M. **OUSMANE Boureïma**, ont toujours su prendre le temps et aux moments opportuns de m'écouter, m'encourager et me prodiguer des sages conseils. Je ne saurais trouver les mots qui vous méritent pour vous témoigner toute ma gratitude, nonobstant, veuillez recevoir en ces lignes, l'expression de ma très haute admiration mes très chers inoubliables Directeurs.*

*Je voudrais également, adresser mes remerciements à Mme **MARLIN Christelle**, Professeur, enseignante à l'UPSud qui m'a honoré en acceptant de présider le jury de ma thèse et à tous les membres du jury, qu'ils trouvent ici l'expression de ma très profonde gratitude.*

A PARIS-SUD,

*Permettez-moi, de remercier Mme **DURAND Véronique**, Maître de conférences, enseignante chercheuse à l'Université Paris-Sud, avec qui j'ai passé des heures, des jours, voire des semaines incalculables, dans le but de l'élaboration d'un modèle hydrogéologique du bassin des Iullemeden. Merci beaucoup chère Véronique tout en espérant que dans un proche avenir nous parviendrons à faire tourner ce fameux modèle.*

*Je tiens également, à remercier Mme **MARLIN Christelle**, Professeur, enseignante chercheuse à l'Université Paris-Sud, avec qui j'ai passé aussi des heures, pour regarder ensemble mes données chimiques et même isotopiques, merci pour cette marque d'attention. Merci également à M. **CALMELS Damien**, Maître de conférences, enseignant chercheur à l'Université Paris-Sud, d'avoir accepté de faire partir de mon comité de thèse.*

Ce travail de thèse n'aurait pu se faire sans bien sûr la collaboration d'une équipe dynamique, disponible et conviviale, à savoir l'équipe IDREau, composée des femmes et des hommes dynamiques, où j'adresse mes remerciements de manière générale à tous et spécifiquement :

- A Mme **QUANTIN Cecile**, Professeur, enseignante chercheuse à l'Université Paris-Sud ;
- A M. **MONVOISIN Gaël**, Ingénieur, pour sa complicité et sa participation dans les travaux d'analyse des éléments chimiques des échantillons d'eau dans le cadre de cette étude ;
- A Mme **NORET Aurélie**, Ingénieur, pour sa collaboration et sa participation aux analyses des isotopes stables de la molécule d'eau de mes échantillons d'eau ;
- A M. **MASSAULT Marc**, Ingénieur, pour sa collaboration et sa participation aux analyses des isotopes stables et radioactifs du carbone. Au passage je remercie toute l'équipe du Centre d'Énergie Atomique (CEA) qui a bien voulu collaborer et faire des analyses du ^{14}C une réussite ;
- A Mme **SAINTENOY Albane**, Maître de conférences, enseignante chercheuse à l'Université Paris-Sud, pour le temps passé ensemble pour la réalisation des ACP sur mes données chimiques, merci beaucoup pour la disponibilité ;
- A Mme **GIBERT Elisabeth**, Directrice de recherche, enseignante chercheuse à l'Université Paris-Sud ;
- A M. **NOUET Julius**, Ingénieur d'étude, à l'Université Paris-Sud, merci pour ta disponibilité.

En définitif je dirai merci du fond du cœur à toute l'équipe GEOPS, en premier à M. **QUIDELLEUR Xavier** et à M. **CHASSEFIERE Eric** pour l'accueil chaleureux et la considération réservée à mon égard, de passage merci à Mme **THI Kim Ngan Ho**, Mme **ROCK Chantal** et Mme **LESAGE Catherine**.

A AIX-MARSEILLE,

Je remercie depuis le CEREGE, M. **DESCHAMPS Pierre**, Chargé de recherche, à l'Université d'Aix-Marseille pour, dans un premier temps avoir accepté de faire partir de mon comité de thèse mais aussi et surtout de nous avoir permis, l'accès à leur laboratoire au CEREGE pour réaliser nos analyses en Chlore-36. Veuillez trouver par ces écrits toute ma gratitude mon cher Pierre.

Au NIGER,

Mes remerciements vont à l'égard de M. **SANDAO Issoufou**, Maître assistant, enseignant chercheur à l'Université Abdou Moumouni de Niamey, avec qui j'ai commencé les travaux de terrain sur l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la Région de Tahoua en fin 2013, dans le cadre du Projet PEAMU-SPEN-2013. Un grand merci à vous cher SANDAO.

Comment pourrais-je oublier spécialement, le Professeur **ZIBO Garba**, Recteur de l'Université de Dosso au Niger, M. **KONATE Moussa**, M. **SOUMAÏLA Amadou**, M. **LIBORE YACOUBA Ahmed**, M. **HAROUNA Moussa**, M. **NAZOUMOU Yahaya**, M. **GAYA Sahirou**, Mme **ALZOUMA Kadi**, etc. tous Enseignants chercheurs à Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Abdou Moumouni de Niamey. Ils ont su tout au long de ce travail, me remonter le moral et me prodiguer des sages conseils. Merci énormément à vous mes chers enseignants.

Mes remerciements vont également à tout le personnel de la Faculté des Sciences et Techniques, Enseignants chercheurs, PAT, et spécialement à tous les Enseignants du département de Géologie, de la Faculté des Sciences et Technique de l'Université Abdou moumouni de Niamey.

Je remercie de passage, tout le personnel du projet PANGIRE, avec qui j'ai passé des moments conviviaux, durant ces trois dernières années.

Je tiens à remercier mes collègues doctorants et doctorantes, avec qui on échangeait, discutais de plusieurs thématiques dans le seul but de faire avancer nos travaux de thèse, mais aussi une façon de se soutenir dans ces durs moments.

*J'exprime toute ma gratitude, à mes amis, frères et sœurs, et spécialement à mon unique grande sœur, Mme. **Djamila HASSANE SALEY**, et son mari **M. Moctar MOUSSA** pour leurs conseils qui m'ont beaucoup donné du courage, de l'espoir et beaucoup réconforté dans mes moments difficiles.*

Cette étude, a bénéficié de plusieurs soutiens dont entre autres :

- *le **Gouvernement Français**, par le biais de l'Ambassade de France au Niger, qui m'a accordé tout au long de cette étude une bourse de vingt-deux mois pour mes 3 années de thèse, c'est-à-dire durant mes vingt-deux mois de séjours en France, merci infiniment ;*
- *la **Direction des relations internationales** de l'Université Paris-Sud, qui a cofinancé mes frais de subsistance, ici à Paris, afin de me permettre d'atteindre le seuil exigé par l'Université Paris-Sud pour prétendre s'inscrire en année de thèse, dans cette université de renommé international, veuillez trouver ici toute ma gratitude ;*
- *le **Laboratoire GEOPS**, qui a pris en charge les coûts liés aux analyses chimiques et isotopiques, vous avez toutes mes remerciements ;*
- *la **Société de Patrimoine des Eaux du Niger (SPEN)**, qui a également participé financièrement à l'aboutissement de la première campagne d'échantillonnage d'eau dans le cadre de cette étude de thèse, merci beaucoup ;*
- *le **Laboratoire CEREGE**, au nom de M. DESCHAMPS Pierre, qui a pris en charge les coûts liés aux analyses du Chlore-36, merci sincèrement ;*
- *l'**Institut National des Sciences de l'Univers (INSU-CNRS)**, pour leur participation dans la réalisation des analyses carbone-14 dans le cadre du service national de l'INSU*
- *la **Faculté des Sciences et Techniques** de l'Université Abdou de Moumouni de Niamey, qui nous a accordé un véhicule et un chauffeur, lors de notre première campagne d'échantillonnage d'eau de forage, dans la Région de Tahoua, merci.*

***Amira** ou **Mimichou** comme tu aimes qu'on t'appelle, et **Amar**, me voilà enfin arrivé à la fin de cette longue période d'absence. Sachez à présent que, je me consacrerai corps et âme pour votre éducation, qui me tient énormément à cœur, In Sha ALLAH. Je compte beaucoup sur votre complicité mes chouchous pour l'accomplissement d'une telle tâche.*

*Je ne saurais terminer, sans exprimer toute ma satisfaction, à ma chère et tendre **Mariama HAMID BONKANO**, ma compagne de galère, quant aux comportements exemplaires dont tu as fait preuve et ton amour sans faille, tout au long de cette épreuve, nfois merci à toi mère de mes enfants.*

Orsay, le 18 juillet 2018

Table des matières

Dédicace	III
Remerciements	V
Table des matières	IX
Liste des figures	XVII
Sigles et abréviations.....	XXVII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES	5
1.1. SUR LE NIGER.....	5
1.1.1. Localisation et cadre administratif	5
1.1.2. Population et principales activités économiques.....	5
1.1.3. Climat.....	7
1.1.4. Relief.....	11
1.1.5. Hydrographie.....	11
1.1.6. Aperçu sur la géologie.....	12
1.1.6.1. Formations cristallines et cristallophylliennes	12
1.1.6.1.1. Liptako nigérien	13
1.1.6.1.2. Damagaram-Mounio et Sud-Maradi	13
1.1.6.1.3. Massif de l’Aïr	14
1.1.6.1.4. Ténéré de Tafassassef.....	14
1.1.6.2. Formations sédimentaires.....	14
1.1.6.2.1. Bassin des Iullemeden	14
a. Bassin de Tin Séririne-Irhazer.....	16
b. Bassin des Iullemeden <i>stricto sensu</i>	16
i. Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H).....	17
ii. Dépôts marins du Crétacé supérieur	18
iii. Dépôts du Paléocène-Eocène	18
iv. Continental Terminal	20
v. Dépôts quaternaires	20
1.1.6.2.2. Bassin tchadien.....	21
a. Bassin d’Agadem.....	21
b. Bassin de Bilma.....	21
c. Bassin du Djaddo.....	22
d. Bassin du Lac Tchad <i>stricto sensu</i>	22
1.1.7. Hydrogéologie.....	22
1.1.7.1. Aquifères discontinus.....	22

1.1.7.1.1. Liptako Nigérien	22
1.1.7.1.2. Damagaram-Mounio et Sud Maradi.....	23
1.1.7.1.3. Massif de l'Air	23
1.1.7.1.4. Ténéré de Tafassassef.....	24
1.1.7.2. Aquifères continus.....	24
1.1.7.2.1. Bassin des Iullemeden	24
a. Aquifères du bassin du Tin Séririne	24
b. Aquifères du bassin de Tim Mersoï	24
c. Aquifères du bassin des Iullemeden <i>stricto sensu</i>	25
i. Aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien.....	25
ii. Aquifères du Crétacé supérieur marin	27
iii. Aquifères du Paléocène marin	27
iv. Aquifères du Continental Terminal.....	27
1.1.7.2.2. Bassin tchadien.....	28
1.2. SUR LA REGION DE TAHOUA, ZONE D'ETUDE	30
1.2.1. Localisation et cadre administratif de la zone d'étude	30
1.2.2. Cadre socioéconomique	31
1.2.2.1. Milieu humain	31
1.2.2.2. Activités économiques	31
1.2.3. Relief	31
1.2.4. Sols et végétation	32
1.2.4.1. Sols	32
1.2.4.2. Végétation	32
1.2.5. Hydroclimatologie.....	32
1.2.5.1. Climat	32
1.2.5.2. Pluviométrie	33
1.2.5.3. Température	33
1.2.5.4. Humidité relative de l'air (Hygrométrie)	34
1.2.5.5. Hydrographie.....	34
1.2.6. Aperçu géologique	36
1.2.7. Hydrogéologie.....	38
1.2.7.1. Aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien.....	38
1.2.7.2. Aquifères du Crétacé Supérieur Marin.....	38
1.2.7.3. Aquifères du Paléocène Marin	38
1.2.7.4. Aquifères du Continental Terminal.....	39
1.2.7.5. Aquifères quaternaires.....	39
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES.....	41

2.1. CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATIQUES DE LA ZONE D'ETUDE.....	41
2.1.1. Matériel	41
2.1.2. Méthodes de traitement des paramètres climatiques.....	41
2.2. HYDROGEOLOGIE DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/ HAMADIEN	43
2.2.1. Matériel	43
2.2.1.1. Données	43
2.2.1.1.1. Données hydrogéologiques	43
2.2.1.1.2. Fonds cartographiques.....	43
2.2.1.1.3. Fonds documentaires.....	43
2.2.1.2. Outils	44
2.2.1.2.1. Appareils de diagraphie.....	44
2.2.1.2.2. Pompes utilisées	44
2.2.2. Méthodes	45
2.2.2.1. Etablissement des logs et coupes litho-stratigraphiques	45
2.2.2.2. Diagraphie	46
2.2.2.3. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du CI/H....	47
2.2.2.3.1. Développement du forage	47
2.2.2.3.2. Essais de pompage par paliers (courte durée)	48
2.2.2.3.3. Essais de pompage de longue durée	48
2.2.2.4. Traitement des données	49
2.2.2.4.1. Etablissement des cartes piézométriques	49
2.2.2.4.2. Etablissement des logs lithostratigraphiques et coupes géologiques	51
2.2.2.4.3. Etablissement de modèle hydrogéologique avec Processing Modflow (V.5.3.1)	51
a. Schéma hydrogéologique du modèle.....	52
b. Maillage.....	52
2.3. HYDROCHIMIE DES EAUX DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN	55
2.3.1. Matériel	55
2.3.1.1. Données physicochimiques	55
2.3.1.2. Outils	55
2.3.1.2.1. Flacons et bouteilles d'échantillonnage	55
2.3.1.2.2. Petits équipements de terrain.....	56
2.3.1.2.3. Equipements de laboratoire pour la chimie.....	56
2.3.1.2.4. Logiciels	57
2.3.2. Méthodes	57
2.3.2.1. Campagnes et techniques d'échantillonnage d'eau.....	58

2.3.2.1.1. Campagne d'échantillonnage d'eau	58
2.3.2.1.2. Choix des points d'eau à échantillonner	59
2.3.2.1.3. Techniques d'échantillonnage d'eau destinée aux analyses physicochimiques	60
2.3.2.1.4. Quantité d'eau prélevée pour les analyses chimiques	61
2.3.2.2. Techniques de dosage des éléments chimiques	61
2.3.2.3. Traitement des données chimiques	64
2.3.2.3.1. Balance ionique	64
2.3.2.3.2. Représentations graphiques (Piper, Stiff, et Schöeller Berkloff)	65
2.3.2.3.3. Matrice de corrélation entre les éléments physicochimiques	65
2.3.2.3.4. Rapports caractéristiques	66
2.3.2.3.5. Indices de saturation	67
2.3.2.3.6. Dureté de l'eau	67
2.3.2.3.7. Aptitude des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien aux différents usages	68
a. Consommation humaine et animale	69
b. Irrigation	70
i. Carbonate de sodium résiduel ou residual sodium carbonate (RSC)	70
ii. Taux d'adsorption du sodium ou Sodium Adsorption Ratio (SAR)	70
iii. Diagramme de Wilcox	72
2.4. HYDROLOGIE ISOTOPIQUE DES EAUX DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN	73
2.4.1. Matériel	73
2.4.1.1. Données isotopiques	73
2.4.1.2. Outils	73
2.4.1.2.1. Flacons et bouteilles d'échantillonnage	73
2.4.1.2.2. Equipements de laboratoire pour les dosages isotopiques	73
2.4.2. Méthodes	74
2.4.2.1. Campagnes et techniques d'échantillonnage d'eau	74
2.4.2.1.1. Campagne d'échantillonnage d'eau	74
2.4.2.1.2. Techniques d'échantillonnage d'eau destinée aux analyses isotopiques (^{18}O , ^2H , ^{13}C , ^{14}C , et ^{36}Cl)	75
2.4.2.1.3. Quantité d'eau prélevée pour les analyses isotopiques	75
2.4.2.2. Techniques de dosage des éléments isotopiques	75
2.4.2.2.1. Isotopes stables de l'eau (2H et ^{18}O)	75
2.4.2.2.2. Isotope stable et radioactif du carbone (^{13}C et ^{14}C)	76
a. Extraction du carbone inorganique total dissous (CITD) (^{13}C et ^{14}C)	76
b. Graphitisation (^{14}C) et mesure de la teneur en ^{13}C	77

c. Mesure de la teneur en ^{14}C	78
2.4.2.2.3. Isotope radioactif du chlore-36 (^{36}Cl)	78
a. Préparation chimique du chlorure contenu dans les échantillons d'eau souterraine	79
b. Mesure de l'activité de chlore par AMS	79
2.4.2.3. Traitement des données isotopiques.....	81
2.4.2.3.1. Généralités sur les isotopes	81
2.4.2.3.2. Isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H).....	84
2.4.2.3.3. Isotopes du carbone (^{13}C et ^{14}C).....	86
2.4.2.3.4. Isotopes du Chlore-36 (^{36}Cl)	88
2.4.2.3.5. Détermination des vitesses d'écoulement des eaux souterraines	90
2.4.2.3.6. Analyse en Composantes Principales (ACP)	91
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	93
3.1. CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATIQUES DE LA ZONE D'ETUDE	93
3.1.1. Pluviométrie	93
3.1.1.1. Précipitations moyennes annuelles.....	93
3.1.1.2. Evolution interannuelle des hauteurs annuelles des précipitations	94
3.1.1.3. Hauteurs moyennes mensuelles	95
3.1.1.4. Nombre de jours de pluie	96
3.1.2. Température	97
3.1.3. Humidité relative de l'air	98
3.1.4. Vent	99
3.1.5. Indice d'aridité	100
3.2. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES ET LITHOLOGIQUES DES AQUIFERES DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN.....	101
3.2.1. Profondeurs totales des forages.....	101
3.2.2. Lithologie et épaisseur du réservoir	102
3.2.3. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Continental Intercalaire/ Hamadien	106
3.2.3.1. Débits (Q) et débits spécifiques (Qsp)	106
3.2.3.2. Transmissivité (T)	107
3.2.3.3. Perméabilité (K)	108
3.2.3.4. Coefficient d'emmagasinement (S).....	110
3.2.3.5. Niveaux statiques (NS).....	110
3.2.3.6. Surface piézométrique et sens d'écoulement des nappes.....	111
3.2.4. Tentative de modélisation hydrogéologique	113
3.2.4.1. Conditions aux limites.....	114
3.2.4.2. Tests calage du modèle	114

3.2.4.3. Hypothèses, problèmes rencontrés et conclusion.....	115
3.3. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN ET PROCESSUS DE MINERALISATION DES EAUX	
.....	116
3.3.1. Paramètres physiques (t°, pH et CE).....	116
3.3.1.1. Température	116
3.3.1.2. pH.....	117
3.3.1.3. Conductivité	118
3.3.2. Paramètres chimiques.....	122
3.3.2.1. Balances ioniques.....	122
3.3.2.2. Teneurs en cations.....	122
3.3.2.3. Teneurs en anions.....	122
3.3.2.4. Représentations graphiques des teneurs ioniques (Piper, Schöeller Berkaloff et Stiff)	123
3.3.3. Matrices de corrélation entre les éléments physico-chimiques.....	127
3.3.4. Processus de la minéralisation.....	128
3.3.4.1. Origine des bicarbonates et des cations majeurs.....	128
3.3.4.2. Origine des chlorures et des bromures	131
3.3.4.3. Origine des sulfates	134
3.3.4.4. Indice de saturation	135
3.3.5. Aptitudes des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien aux différents usages ...	138
3.3.5.1. Consommation humaine et animale	138
3.3.5.1.1. Paramètres organoleptiques.....	138
3.3.5.1.2. Paramètres physiques	138
3.3.5.1.3. Paramètres chimiques.....	139
3.3.5.2. Irrigation.....	147
3.3.5.2.1. Salinité totale.....	147
3.3.5.2.2. Sodium d'adsorption ratio (SAR)	147
3.3.5.2.3. Pourcentage en sodium.....	148
3.3.5.2.4. Carbonates de sodium résiduel (RSC)	149
3.4. CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES DES EAUX DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN	
.....	151
3.4.1. Teneurs en isotopes du carbone (¹³ C et ¹⁴ C) du carbone inorganique total dissous (CITD) et datation des eaux par ¹⁴ C.....	151
3.4.1.1. Teneur en carbone-13 du CITD	151
3.4.1.2. Teneur en carbone-14 (¹⁴ C) des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien	152
3.4.1.3. Relation entre activités ¹⁴ C et teneurs en ¹³ C.....	154
3.4.1.4. Datation des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien par le carbone-14 (¹⁴ C)	

.....	155
3.4.1.5. Relation entre âges bruts et TAC	157
3.4.1.6. Comparaison entre les vitesses déduites des teneurs en ^{14}C et celles déduites de la loi de Darcy	157
3.4.2. Isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$)	160
3.4.2.1. Pluies du Niger et de la sous-région.....	160
3.4.2.2. Eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien	164
3.4.2.2.1. Teneurs en isotopes stables des eaux souterraines du Continental Hamadien	164
3.4.2.2.2. Teneurs en isotopes stables des eaux souterraines du Continental Intercalaire	165
3.4.2.3. Comparaison entre la composition isotopique des eaux souterraines du Continental Intercalaire/Hamadien et celle des précipitations.....	166
3.4.3. Teneurs en chlore 36	174
4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	177
4.1. CONCLUSION.....	177
4.2. PERSPECTIVES RECOMMANDATIONS.....	183
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	185
ANNEXE	199
Résumé	251
Summary	252

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du Niger	5
Figure 2 : Evolution annuelle de la population du Niger de 2004 à 2012 (INS-Niger, 2014) ...	6
Figure 3 : Circulation atmosphérique en Afrique de l’Ouest et position saisonnière des masses d’air (Morel, 1981 cité par Guéro 2003)	7
Figure 4 : Carte des principales stations pluviométriques synoptiques du Niger	8
Figure 5 : Nombre de jours de pluie dans les principales stations pluviométrique synoptiques du Niger (INS-Niger, 2014)	8
Figure 6 : Pluviométrie annuelle des principales stations pluviométriques du Niger pour la période de 2011 à 2013 (INS-Niger, 2014).....	9
Figure 7 : Zones agroclimatiques du Niger (DMN-Niger, Pluviométrie moyenne annuelle 1975-2004)	10
Figure 8 : Variation des isohyètes au Sud Niger de 1950 à 1985 ; Les isohyètes sont tracées pour la période « humide » (1950-1967) et la période de sécheresse (1968-1985)	10
Figure 9 : Carte du relief du Niger	11
Figure 10 : Réseau Hydrographique du Niger	12
Figure 11 : Limite Géologique du bassin d’Iullemeden (d’après carte géologique du Niger, J.Greigert et R.Pougnnet, 1965).....	15
Figure 12 : Extension des Transgressions Marines du Crétacé Supérieur au Cénozoïque dans le bassin des Iullemeden (Greigert, 1966a ; Abdoukarim, 1988 ; Monfort, 1997; Miko, 1999)	19
Figure 13 : Coupes géologique dans le bassin des Iullemeden au Niger (source : Greigert, 1966a - modifié).....	26
Figure 14 : Carte des différents aquifères du sous-bassin d’Iullemeden (Margat et al, 2006). 28	
Figure 15 : Localisation de la zone d’étude	30
Figure 16 : Variation des températures moyennes mensuelles sur 50 ans (1951 à 2000).....	33
Figure 17 : Réseau hydrographique et différents sous bassin de la zone d’étude	35
Figure 18 : Carte Géologique de la Région de Tahoua	37
Figure 19 : Carte des aquifères dans la Région de Tahoua	40
Figure 20 : Carte de distribution des différents forages échantillonnés au cours de la première campagne (septembre 2016).....	59
Figure 21 : Carte de distribution des différents points d’eau échantillonnés au cours de la	

première campagne (mai 2017).....	60
Figure 22 : Schéma de la ligne d'extraction de CO ₂ de l'Université Paris-Sud 11 (Orsay).....	77
Figure 23 : Relation entre les valeurs $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ de l'eau météorique qui subit l'évaporation, la vapeur issue de cette eau et l'eau résiduelle, représentée par la droite d'évaporation, comparée à la relation entre les eaux atmosphériques et les précipitations représentées par la droite des eaux météoriques (Fig. 23). La vapeur d'eau relativement « légère » (appauvrie) quitte le réservoir eau (flèche blanche) provoquant un enrichissement de l'eau résiduelle (flèche grise) ; (AIEA, 2008).	85
Figure 24 : Evolution des pluies moyennes annuelles regroupées par décennie	94
Figure 25 : Variation annuelle des hauteurs de pluies dans la région de Tahoua pour la période de 1951 à 2010	95
Figure 26 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de Birni N'Konni et de celle de Tahoua sur 60 ans (1951 à 2010)	96
Figure 27 : Variation du nombre de jours de pluie en fonction des années, de la région de Tahoua (Source : DMN-Niger, données Pluviométriques journalières sur la période allant de 1951 à 2010).....	97
Figure 28 : Variation des températures moyennes annuelles par décennies (1951 à 2000) dans la région de Tahoua	98
Figure 29 : Variation des températures moyennes mensuelles (1951 à 2000) dans la région de Tahoua.....	98
Figure 30 : Evolution des moyennes mensuelles minima et maxima de l'humidité relative (région de Tahoua, année 2016).....	99
Figure 31 : Evolution des vitesses moyennes mensuelles du vent de la région de Tahoua (2016)	99
Figure 32 : Carte des courbes isohypses des profondeurs équipées des forages captant le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	102
Figure 33 : Coupes types de forages avec corrélations litho stratigraphiques dans la région de Tahoua (direction Sud vers Nord).....	104
Figure 34 : Coupes types de forages avec corrélations litho stratigraphiques dans la région de Tahoua (direction SW-NE)	105
Figure 35 : Histogramme des débits spécifiques Qsp dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	106
Figure 36 : Carte de distribution spatiale des débits spécifiques Qsp dans le système aquifère	

du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	107
Figure 37 : Carte de distribution spatiale des valeurs de transmissivité dans le Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	108
Figure 38 : Histogramme des perméabilités dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	109
Figure 39 : Carte de distribution spatiale des valeurs de perméabilité dans le Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	109
Figure 40 : Histogramme de profondeurs des niveaux statiques dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	111
Figure 41 : Carte piézométrique du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	112
Figure 42 : Spatialisation des limites des formations du Continental Intercalaire/Hamadien, celles du Crétacé moyen à supérieur et les formations du Continental Terminal dans le bassin des Iullemeden.....	113
Figure 43 : Coupe géologique suivant le profil Est-Ouest dans le bassin des Iullemeden	114
Figure 44 : Coupe géologique suivant le profil Nord-Sud dans le bassin des Iullemeden	114
Figure 45 : Carte de distribution spatiale des valeurs de température des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	117
Figure 46 : Carte de distribution spatiale des valeurs de pH des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	118
Figure 47 : Relation entre la conductivité électrique et la température des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien	119
Figure 48 : Relation entre la conductivité électrique et le total des cations des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien	120
Figure 49 : Carte de distribution spatiale des valeurs de conductivité des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	121
Figure 50 : Faciès chimique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	123
Figure 51 : Diagramme de Schöeller Berkaloff des eaux du Continental Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua).....	124
Figure 52 : Diagramme de Schöeller Berkaloff des eaux du Continental Intercalaire captif et libre du bassin des Iullemeden (Tahoua).....	125
Figure 53 : Représentation spatiale de la composition chimique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua) à partir de la	

méthode de Stiff	126
Figure 54 : Relation entre $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$ vs $[Na^+ + K^+ - Cl^-]$ des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	131
Figure 55 : Relation entre $[Br^-]$ vs $[Cl^-]$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	132
Figure 56 : Relation entre $[HCO_3^-]$ et $[Cl^-]$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	133
Figure 57 : Relation entre SO_4^{2-} et Ca^{2+} dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	134
Figure 58 : Relation entre SO_4^{2-} et Fe dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	135
Figure 59 : Relation entre ISdolomite vs IScalcite dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	137
Figure 60 : Répartition spatiale des teneurs en nitrates des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	140
Figure 61 : Répartition spatiale des teneurs en nitrates des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	141
Figure 62 : Répartition spatiale des teneurs en nitrites des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	142
Figure 63 : Répartition spatiale des teneurs en fer des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	143
Figure 64 : Répartition spatiale des teneurs en fluor des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	144
Figure 65 : Répartition spatiale de la dureté des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	146
Figure 66 : Indices SAR vs conductivité électrique à 25°C dans le diagramme de Richards (1954), des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Tahoua)	148
Figure 67 : Pourcentage de sodium vs conductivité électrique à 25°C dans le diagramme de Wilcox (1948), des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Tahoua)	149
Figure 68 : Répartition spatiale des carbonates de sodium résiduel des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	150
Figure 69 : Histogramme de répartition des teneurs en ^{13}C des nappes du système aquifère du	

Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	151
Figure 70 : Histogramme de répartition des activités en ^{14}C des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	152
Figure 71 : Distribution spatiale des activités de carbone-14 des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	153
Figure 72 : Relation entre l'activité en ^{14}C et $\delta^{13}\text{C}$ des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	154
Figure 73 : Age brut des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua).....	155
Figure 74 : Distribution spatiale des âges bruts des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua) et directions des flux des eaux souterraines.....	156
Figure 75 : Relation entre les âges bruts et le TAC des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	157
Figure 76 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mensuelles dans les précipitations collectées à Niamey (station AIEA-IRD), période de 1992 à 1999 excepté 1996 et de 2009 à 2016 (Source : http://www-naweb.iaea.org/naweb/ih/IHS_resources_isohis.html).....	160
Figure 77 : Droites des eaux météoriques pour quelques stations AIEA de la sous-région ..	161
Figure 78 : Relation entre hauteurs et teneurs isotopiques des précipitations de Niamey (AIEA)	163
Figure 79 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ dans les pluies des mois de juin à septembre (IRD, Niamey), période de 1992 à 1999 excepté 1996 et la période de 2009 à 2016.....	164
Figure 80 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux du Continental Hamadien de la région de Tahoua	165
Figure 81 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux du Continental Intercalaire de la région de Tahoua	165
Figure 82 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua) et les précipitations au Niger	166
Figure 83 : Carte du bassin des Iullemeden avec les différents cours d'eau temporaires.....	169
Figure 84 : Distribution spatiale des teneurs en ^{18}O des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	170
Figure 85 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et activité ^{14}C des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	171
Figure 86 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ vs profondeur équipée des points d'eau de l'aquifère du	

Continental Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua).....	172
Figure 87 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ vs profondeur équipée des points d'eau de l'aquifère du Continental Intercalaire du bassin des Iullemeden (Tahoua).....	172
Figure 88 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ vs distance des points d'eau par rapport à la zone de recharge de l'aquifère du Continental Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	173
Figure 89 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ vs distance des points d'eau par rapport à la zone de recharge de l'aquifère du Continental Intercalaire du bassin des Iullemeden (Tahoua).....	173
Figure 90 : Relation entre les teneurs en ^{36}Cl et l'inverse des teneurs en Cl^-	175
Figure 91 : Projection des variables dans le plan factoriels F_1 (Dim ₁) x F_2 (Dim ₂).....	181
Figure 92 : Projection des individus dans le plan factoriels F_1 (Dim ₁) x F_2 (Dim ₂)	182

Liste des tableaux

Tableau 1 : Production annuelle de l'élevage, de la pêche et de l'agriculture au Niger pour la période allant de 2011 à 2013 (INS-Niger, 2014).....	6
Tableau 2 : Les aquifères du bassin tchadien dans le secteur du Niger oriental (Greigert, 1967 et 1978 ; OSS, 2006).....	29
Tableau 3 : Relation entre indice d'aridité et types de climat selon De Martonne (De Martonne, 1926).....	42
Tableau 4 : Classification des eaux en fonction de leur dureté calcique et magnésique.....	68
Tableau 8 : Abondance et symbole des isotopes stable de l'eau, du carbone et du chlore (AIEA, 2008).....	81
Tableau 9 : Indice d'aridité de la Région de Tahoua sur 50 ans (1951 à 2000).....	100
Tableau 10 : Indice d'aridité de la zone d'étude	100
Tableau 11 : Bilan hydrique (m^3/s) des trois couches du modèle (CT, CMS, et CI/H).....	115
Tableau 12 : Données statistique des paramètres physiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	116
Tableau 13 : Matrice de corrélation sur les paramètres physiques et ions majeurs des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	127
Tableau 14 : Rapport $Ca_2 + Mg_2 + -HCO_3 - +SO_4_2 -$ vs $Na + K + -Cl -$ pour les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Tahoua)	130
Tableau 15 : Valeur du rapport $Br -/Cl -$ massique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (n.a : teneur de Br inférieure à la limite de detection) ...	132
Tableau 16 : Indices de saturation de la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien	136
Tableau 17 : vitesses d'écoulement déduites à partir de la loi de Darcy	159
Tableau 18 : vitesses d'écoulement déduites des teneurs en ^{14}C	159
Tableau 19 : Teneurs isotopiques moyennes annuelles pondérées des précipitations (Niger)	162
Tableau 20 : Teneurs isotopiques moyennes annuelles des précipitations pondérées par hauteur d'eau de la bande sahélienne de l'Afrique de l'Ouest (Mali, Nigéria et Tchad).....	162
Tableau 21 : Teneurs en ^{36}Cl des échantillons d'eau du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua.	174

Liste des planches

Planche 1 : Analyse des cuttings pour l'élaboration des logs et coupes lithostratigraphiques	46
Planche 2 : Opération de diaggraphie (Tahoua).....	47
Planche 3 : Opération des essais de pompage dans le Continental Intercalaire/Hamadien	49
Planche 4 : Flacons et bouteilles d'échantillonnage.....	55
Planche 5 : Campagne d'échantillonnage d'eau dans l'aquifère Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)	58
Planche 6 : Spectromètre d'absorption laser LGR Laser	76
Planche 7 : Ligne d'extraction du CO ₂ à gauche et celle de graphitisation du carbone à droite	77
Planche 8 : Ligne d'analyse de l'activité du ¹⁴ C (ARTEMIS, Saclay)	78
Planche 9 : Schéma du système High Voltage Engineering (HVE) 5 MV AMS, Spectromètre de Masse par Accélérateur (CEREGE)	80

Sigles et abréviations

AEP : Adduction d'Eau Potable

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique

BP : Before Present

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière

CEA : Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies alternatives

CEDR : Convention internationale sur l'Elimination de toutes formes de Discrimination Raciale

CH : Continental Hamadien

CI : Continental Intercalaire

CI/H : Continental Intercalaire/Hamadien

CT : Continental Terminal

DHUSA : Direction de l'Hydraulique Urbaine, Semi-urbaine et de l'Assainissement

DMN – Niger : Direction de la Météorologie Nationale du Niger

DRHAT : Direction Régionale de l'Hydraulique et de l'Assainissement de Tahoua

DRX : Diffraction des Rayons X

FIT : Front Intertropical

IGNN : Institut Géographique National du Niger

IHP : International Hydrological Programme

INS-Niger : Institut National de la Statistique du Niger

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MEELD : Ministère de l'Eau, de l'Environnement, et de la Lutte contre la Désertification

MHA : Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement

MNT : Modèle Numérique de Terrain

OIE : Office International de l'Eau

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre – Mer

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

PEAMU : Projet Eau et Assainissement en Milieu Urbain

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

PS : Polarisation Spontanée

SAI : Système Aquifère d'Iullemeden

SEEN : Société d'Exploitation des Eaux du Niger

SPEN : Société de Patrimoine des Eaux du Niger

UNESCO : United Nations Educational Scientific and Cultural Organization

USGS : United State Geological Survey

WGS : World Geodetic System

INTRODUCTION

INTRODUCTION

A l'échelle du globe, 97% des masses d'eau sont salées, dans les océans et les mers, tandis que l'eau douce, essentielle à la vie et à l'activité humaine, ne représente qu'environ 3% de celles-ci (Gleick et al., 1996 ; Gleick, 2010). Cette eau douce est répartie entre les glaciers (2,25%) peu accessibles, et celle d'accès plus facile correspondant aux eaux souterraines, rivières, lacs, etc., avec pour 0,75%. Dans cette eau facilement accessible, les eaux souterraines représentent le plus grand pourcentage, environ 0,74% des réserves totales d'eau sur terre, contre 0.01% pour les eaux de surface. Ceci permet aisément de comprendre l'enjeu majeur représenté par les eaux souterraines, dans un contexte de croissance démographique fulgurante et de fort développement des secteurs industriels et agricoles, basés en grande partie sur l'utilisation des nappes d'eau souterraine. Dans de nombreuses régions du monde, le recours aux ressources en eau souterraine est de plus en plus privilégié suite à la dégradation de la qualité des eaux de surface, liée aux activités anthropiques d'une part, et en conséquence de périodes de sécheresse récurrentes qui les ont durement affectées d'autre part. Le Niger, d'une superficie de 1 267 000 km², est partagé entre cinq principaux bassins sédimentaires (bassins des Iullemeden, du Bilma, du Djaddo, du Tamesna, et du Tchad) qui renferment dans leurs sous-sols d'importantes ressources en eau souterraine. On peut citer, de manière succinct, de bas en haut : les aquifères du Paléozoïque, les aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H), les aquifères du Continental Terminal (CT) et les aquifères du Quaternaire. La zone d'étude, la région de Tahoua, située au cœur du bassin des Iullemeden abrite quatre nappes principales, de bas en haut : les nappes des aquifères multicouches du Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H, sur lesquelles porte cette étude), les nappes du Crétacé moyen et supérieur et du Paléocène (présentes par endroits), les nappes du Continental Terminal (présentes dans la partie sud-ouest de la région de Tahoua), et enfin les nappes alluviales, rencontrées localement dans les principales vallées de la région (Abalak-Afala, Badaguichiri, Bagga, Maggia, Tadis et la Tarka). Le système aquifère du CI/H, d'une extension totale d'environ 466 000 km² (OSS, 2006), se présente en nappe libre et captive dans la zone d'étude. Affectées, des années 1950 à nos jours, par des sécheresses récurrentes (Sircoulon, 1976 ; Paturel et al., 1997 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Ozer et al., 2005, 2010), la zone d'étude est actuellement confrontée à un sérieux problème de dégradation de la qualité des nappes phréatiques en liaison avec les activités anthropiques et la croissance démographique, ces dernières années, du secteur industriel.

En dehors de l'usine de cimenterie de Malbaza qui date des années 1960, sont en cours d'installation celle de Keita, l'usine d'exploitation du charbon de Salkadamna, celle de Kao, et d'autres, qui exigent d'énormes quantités d'eau pour le refroidissement des moteurs et le traitement des minerais. C'est pourquoi, depuis le début du 21^{ème} siècle, le nombre des forages profonds captant le CI/H, qui était resté limité jusqu'à cette période dans la région, a considérablement augmenté, pour atteindre plusieurs centaines, avec un débit d'exploitation actuel estimé à plus de 1.5 m³/s. Même si ces prélèvements sont sans grande conséquence sur la réserve actuelle du système aquifère du bassin des Iullemeden, globalement estimé à environ 2000 km³ (OSS, 2017), de par sa sollicitation croissante, pour l'alimentation en eau potable (Greigert, 1978 ; Amadou et al, 2014, OSS, 2017) d'une population qui augmente (INS, 2014) de manière exponentielle, pour l'abreuvement du bétail, pour les besoins en eau des industries extractives qui se multiplient, pour l'irrigation qui commence à être utilisée, rend nécessaire une gestion qualitative et quantitative durables de quoi permettre aux générations futures de s'en servir. En effet, la rareté des ressources en eaux de surface, les débits dérisoires ou/et la mauvaise qualité des eaux des nappes phréatiques (nappes du Crétacé supérieur, voire celles du Continental Terminal), rendent les ressources du CI/H essentielles dans la région de Tahoua.

Malgré les travaux et études déjà menés sur le système aquifère du CI/H (Greigert, 1965 – 1966a – 1978 ; Dodo, 1992 ; Guero, 2003 ; Guero et al, 2003 ; OSS, 2006 – 2007 – 2008 – 2011 – 2017 ; MEELD, 2010 ; DRHA/T, 2008 ; MHA, 2014 ; SPEN, 2015 ; Barrat, 2016 ; etc.), les connaissances sur la structure et le fonctionnement de ce système aquifère restent encore très insuffisantes. Ceci est attesté par les récents travaux de l'OSS (2017), qui indiquent que le niveau actuel de connaissance du "Système Aquifère d'Iullemeden" (les zones de recharge, les débits sortant, les ressources disponibles et les caractéristiques d'écoulement, etc.), est très incertain.

L'objectif principal que s'est fixé cette étude, est de contribuer à l'amélioration de l'état des connaissances sur le fonctionnement des aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien, pour faire face aux aléas climatiques d'une part, mais aussi et surtout aux pressions multiples exercées sur cette ressource d'autre part. Atteindre un tel objectif général nécessite de viser un certain nombre d'objectifs spécifiques :

- étudier les caractéristiques lithologiques des réservoirs du système aquifère du CI/H dans la région de Tahoua ;

- étudier les caractéristiques hydrodynamiques, y compris l'approfondissement des connaissances de la piézométrie des aquifères du CI/H ;
- déterminer les mécanismes régissant la minéralisation (origine des ions majeurs) des eaux ;
- apprécier l'aptitude des eaux du CI/H aux différents usages (domestiques, agricoles, voire industriels) ;
- identifier les zones et les périodes de recharge, évaluer les temps de résidence et les vitesses d'écoulement des eaux du CI/H dans la zone d'étude ;
- permettre d'alimenter une base de données, qui puisse servir de guide aux prises de décisions, en vue d'une gestion durable et rationnelle des ressources en eaux du système aquifère du CI/H dans la région de Tahoua.

Pour atteindre ces objectifs, cette étude a fait appel à une méthodologie fondée sur une approche couplée, hydrogéologique, hydrogéochemie et isotopique.

Ce manuscrit de thèse comporte trois chapitres. Un premier chapitre (I) est consacré aux généralités sur le Niger et sur la zone d'étude. On y traite plus précisément de la situation géographique et socio-économique du Niger et de la zone d'étude, ainsi que du contexte climatique, géologique et hydrogéologique du bassin des Iullemeden et des aquifères du CI/H. Le deuxième chapitre (II) est consacré à la présentation du matériel et des méthodes utilisés lors des opérations de terrain (foration, diagraphie, essais de pompage, et campagne d'échantillonnage d'eau) et au laboratoire (dosage des éléments chimiques et analyses isotopiques : ^2H , ^{18}O , ^{13}C , ^{14}C et ^{36}Cl), ainsi que pour le traitement des données. Dans le chapitre III, portant sur les résultats et leur discussion, il sera question dans un premier temps de la caractérisation hydroclimatique de la zone d'étude, suivie de la caractérisation lithologique et hydrodynamique du système aquifère du CI/H, de la caractérisation hydrochimique des eaux du CI/H et enfin de leur caractérisation isotopique. En guise de conclusion, nous tentons une synthèse des principales informations acquises et propose quelques perspectives pour améliorer leur portée.

CHAPITRE I :

GENERALITES

CHAPITRE I : GENERALITES

1.1. SUR LE NIGER

1.1.1. Localisation et cadre administratif

Le Niger, vaste d'environ 1 267 000 km², est un pays sahélien enclavé (sans débouché sur la mer), situé en Afrique de l'Ouest. Il est localisé entre 11°30' et 23°30' de latitude Nord et 0° et 16° de longitude Est. Il est entouré par l'Algérie et la Libye au Nord, le Tchad à l'Est, le Nigeria et le Bénin au Sud, et enfin à l'Ouest par le Burkina Faso et le Mali (Fig. 1). Sur le plan administratif, le territoire nigérien est divisé en huit régions : Agadez, Diffa, Dosso, Maradi, Niamey (où se trouve la capitale du même nom du pays), Tahoua, Tillabéry, et enfin Zinder.

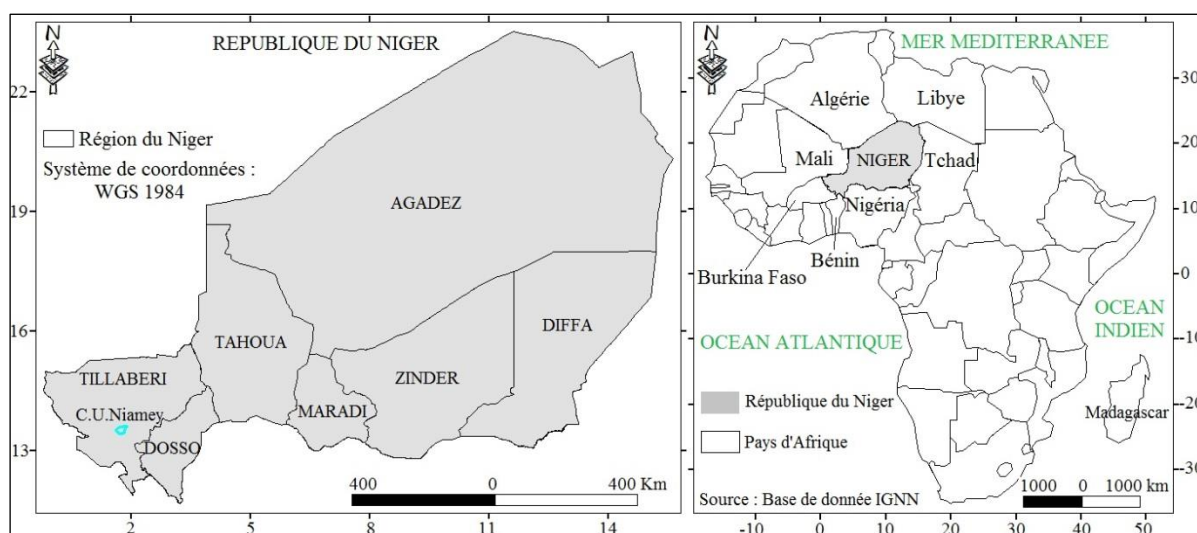


Figure 1 : Localisation du Niger

1.1.2. Population et principales activités économiques

La population du Niger est estimée à 17 138 707 habitants (décembre 2012), dont 8 518 818 hommes (49,71%) et 8 619 889 femmes (50,29%), avec un taux d'accroissement intercensitaire annuel moyen de 3,9% pour la période allant de 2001 à 2012 (INS, 2014).

Le graphe de la figure 2 montre la croissance soutenue de cette démographie au cours de ces dernières années (2004-2012), dans un pays qui reste en voie de développement, avec un taux d'alphabétisation inférieur à 35%, d'après la carte du monde montrant le taux d'alphabétisation par pays, indiqué par le Programme des Nations Unis pour le Développement (PNUD, 2013) au Niger.

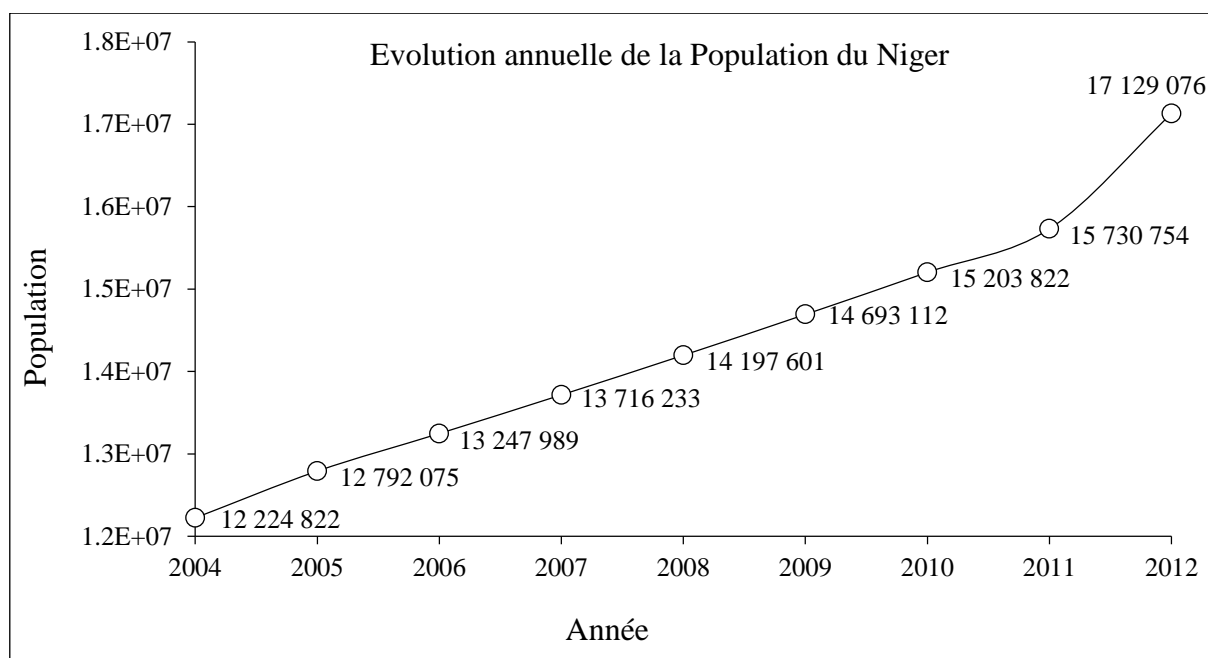


Figure 2 : Evolution annuelle de la population du Niger de 2004 à 2012 (INS-Niger, 2014)

Le Niger, bien qu'étant un vaste pays ne présente pas une grande diversité ethnique. Seulement neuf groupes ethniques composent sa population, d'après le rapport du ministère de la justice du Niger, présenté conformément à l'article 9 de la Convention internationale sur l'Elimination de toutes formes de Discrimination Raciale (CEDR, 2012) à savoir : Haoussa (53%), Zarma-Sonrhaï (21,2%), Touaregs (10,4%), Peulh (9,9%), Kanouri (4,4%), Toubou (0,4%), Arabe (0,3%), Gourmantché (0,3%), et autres, y compris les naturalisés (0.2%).

Les principales activités économiques des populations du Niger sont l'agriculture, l'élevage, le commerce et la pêche (Tableau 1).

Tableau 1 : Production annuelle de l'élevage, de la pêche et de l'agriculture au Niger pour la période allant de 2011 à 2013 (INS-Niger, 2014)

Production annuelle	Cheptel (en milliers de têtes)	Production de la pêche (en tonne)	Production agricole (en millier de tonnes)
2011	36 326	10 279	5 326
2012	37 835	10 408	6 864
2013	39 413	9 419	6 061

1.1.3. Climat

Le climat du Niger est contrôlé par une alternance de deux masses d'air (Morel, 1981 cité par Guéro 2003 ; Ousmane, 1988 ; Biémi, 1992 ; Saley, 2003) :

- Harmattan, vent chaud et sec, qui souffle du Nord et Nord-Est vers le Sud et Sud-Ouest ;
- Mousson, vent froid et humide, en provenance de l'Atlantique au Sud et circulant vers le Nord-Est.

Le contact entre ces deux masses d'air, au sol, est appelé Front Intertropical (FIT). Son déplacement détermine le régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest, et particulièrement au Niger (Fig. 3).

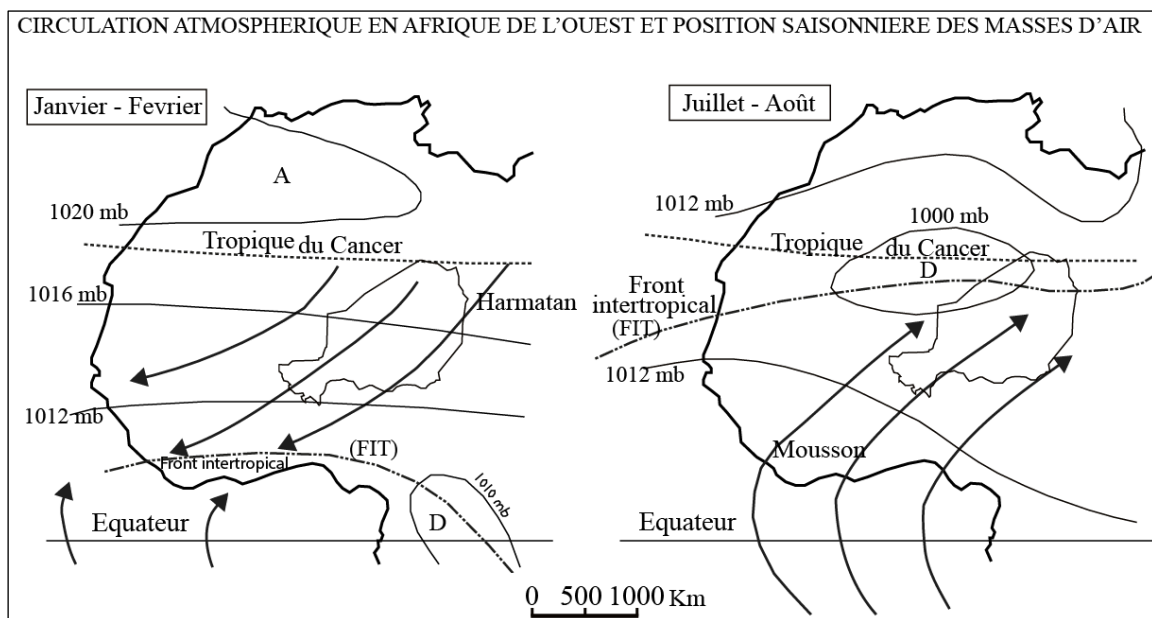


Figure 3 : Circulation atmosphérique en Afrique de l'Ouest et position saisonnière des masses d'air (Morel, 1981 cité par Guéro 2003)

Ainsi, la période d'octobre à mai correspond à la saison sèche où dominent les vents chauds et secs venant du Sahara, tandis que de fin mai jusqu'en début octobre, c'est la saison des pluies, où dominent les vents froids et humides venant de l'Atlantique. Le nombre de jours de pluie annuels enregistrés au niveau des différentes stations synoptiques implantées dans les grandes villes du pays (Fig. 4), montre une répartition inégale dans le temps et dans l'espace. Pour la période allant de 2011 à 2013, c'est la station de Gaya qui enregistre le plus grand nombre de jours de pluie et celle de Bilma, qui montre le plus faible (Fig. 5).

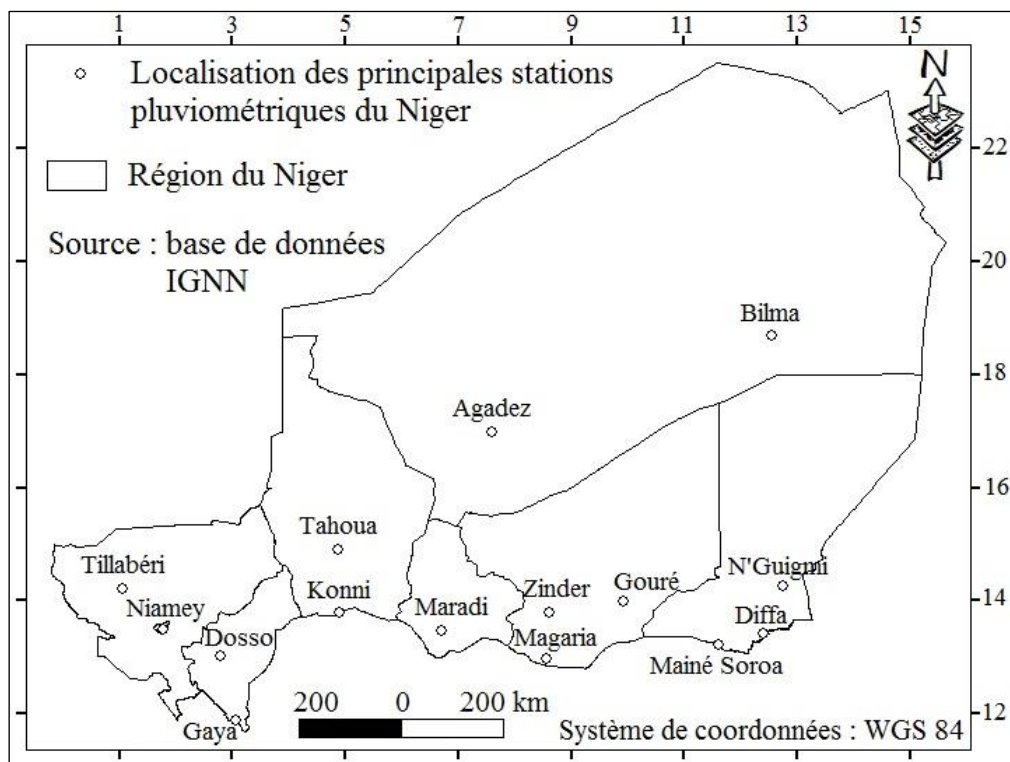


Figure 4 : Carte des principales stations pluviométriques synoptiques du Niger

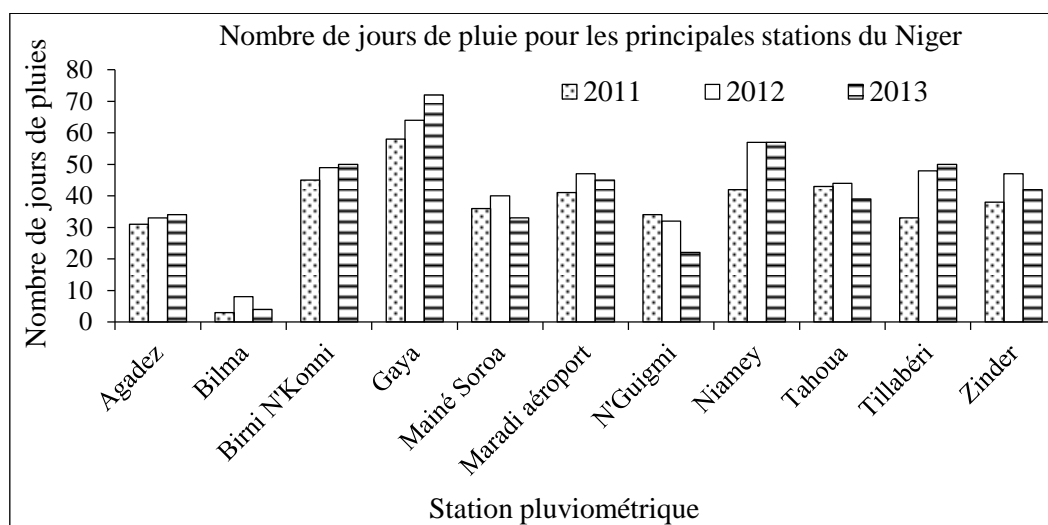


Figure 5 : Nombre de jours de pluie dans les principales stations pluviométrique synoptiques du Niger (INS-Niger, 2014)

On note que les précipitations moyennes annuelles pour ces mêmes stations synoptiques et pour les mêmes années 2011, 2012 et 2013 sont liées au nombre de jours de pluie, en comparant les deux graphiques (Fig. 5 et Fig. 6). Ces précipitations sont aussi inégalement réparties dans le temps et dans l'espace (Fig. 6).

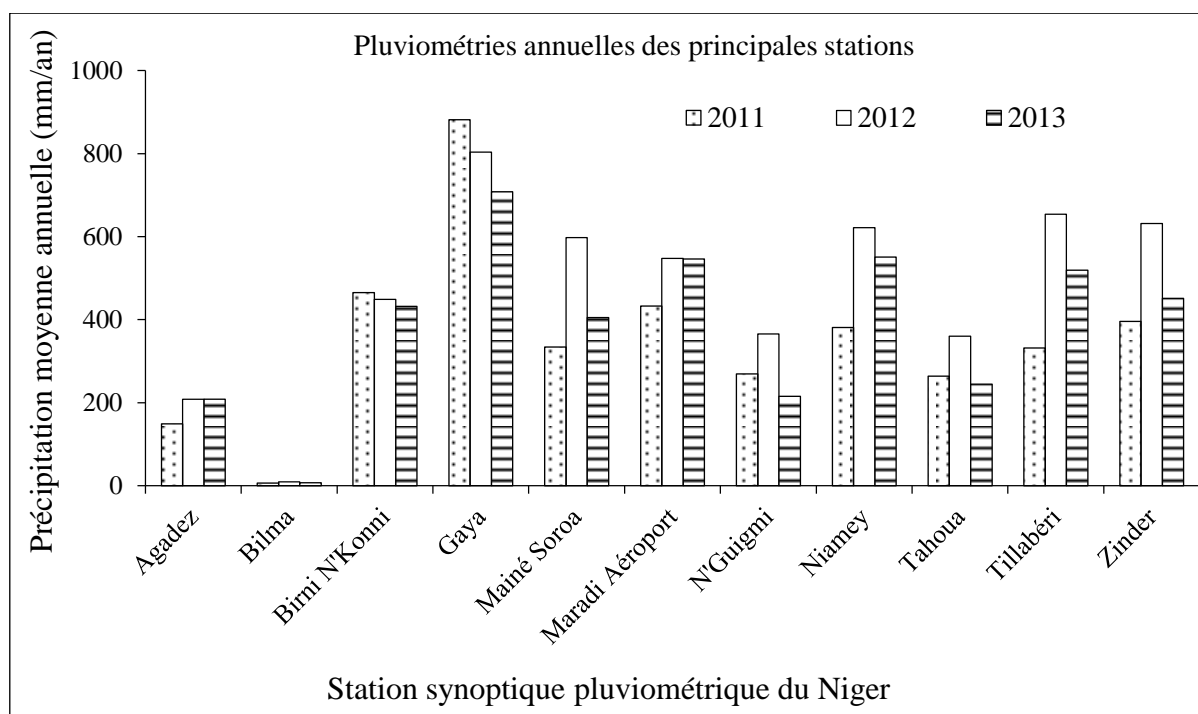


Figure 6 : Pluviométrie annuelle des principales stations pluviométriques du Niger pour la période de 2011 à 2013 (INS-Niger, 2014)

La station synoptique de Bilma, reçoit la plus petite quantité de précipitation (Fig. 6), avec une moyenne annuelle sur une période de trois années (2011, 2012 et 2013) de 8 mm. A l’opposé, la station synoptique de Gaya est la plus arrosée avec une précipitation moyenne annuelle de 798 mm pour la même période (INS-Niger, 2014).

Le Niger, présente donc une grande diversité climatique, avec du Nord au Sud, quatre grandes zones climatiques (Fig. 7) :

- une zone saharienne au Nord, caractérisée par un cumul pluviométrique annuel inférieur à 150 mm, avec des saisons de pluie ne dépassant pas un mois par année ;
- une zone sahélo-saharienne, située entre les isohyètes 150 à 300 mm, avec une forte activité pastorale ;
- une zone sahéenne, qui concentre l’essentiel des activités agricoles au Niger, avec une pluviométrie annuelle comprise entre 300 à 600 mm ;
- enfin une zone soudanienne, située au Sud du parallèle 13°10’ Nord avec un cumul pluviométrique interannuel supérieur à 600 mm.

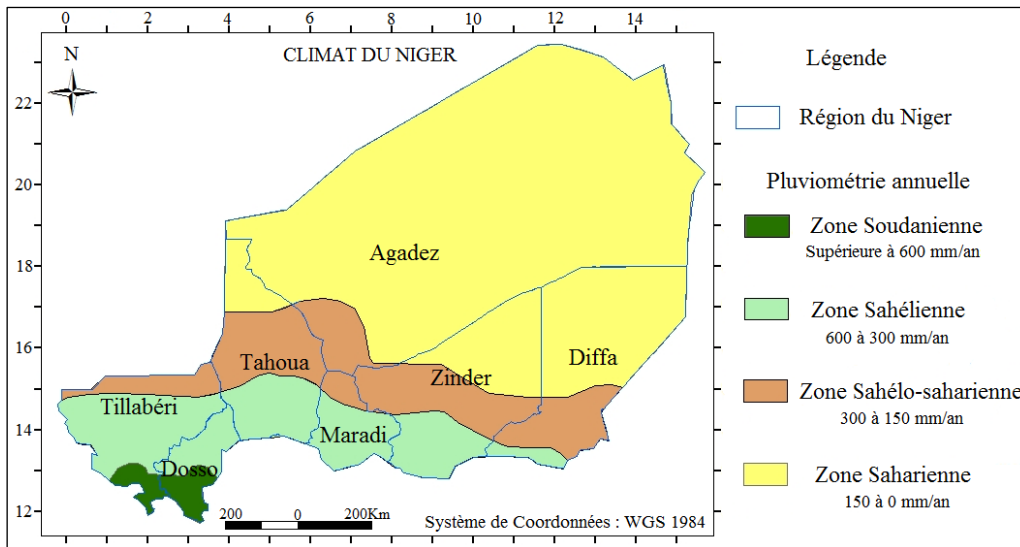


Figure 7 : Zones agroclimatiques du Niger (DMN-Niger, Pluviométrie moyenne annuelle 1975-2004)

Le Niger, comme les autres pays du Sahel, a connu des années 1960 à nos jours plusieurs crises majeures de sécheresse, dues aux baisses chroniques des précipitations (Sircoulon, 1976 ; Ousmane, 1988 ; Paturel et *al.*, 1997 ; Ardoin-Bardin, 2004 ; Ozer et *al.*, 2005, 2010). Ce phénomène a engendré le déplacement des isohyètes du Nord vers le Sud (Fig. 8).

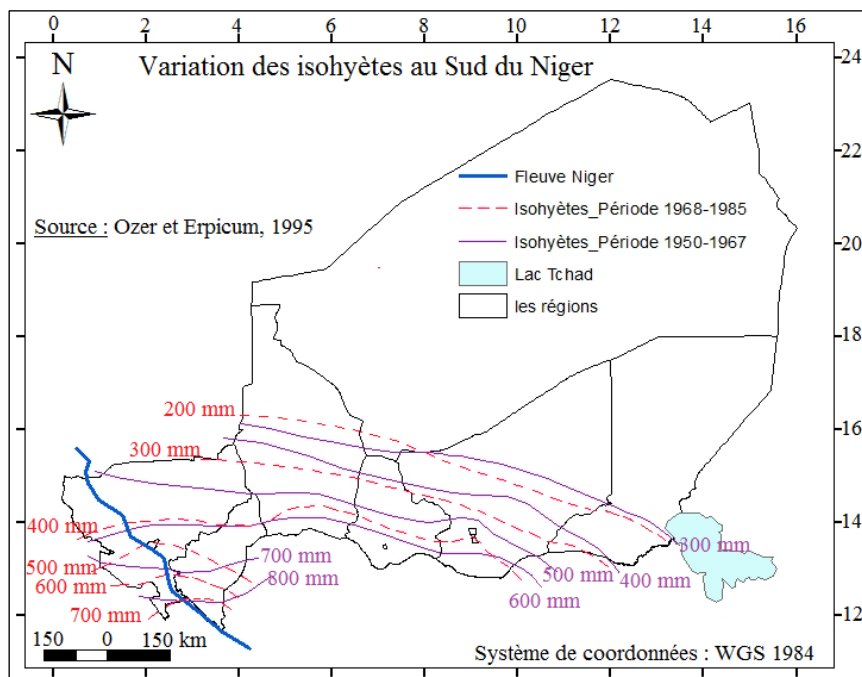


Figure 8 : Variation des isohyètes au Sud Niger de 1950 à 1985 ; Les isohyètes sont tracées pour la période « humide » (1950-1967) et la période de sécheresse (1968-1985)

1.1.4. Relief

Morphologiquement, le Niger se présente comme une très vaste pénélaine ancienne, avec une altitude moyenne d'environ 350 mètres.

Il est dominée néanmoins par quelques points culminants dans le massif de l'Aïr qui s'étend sur environ 300 km du Nord au Sud et sur environ 200 km d'Est en Ouest, dont par exemple : le Mont Bagzame d'environ 2 022 mètres d'altitude, le massif de Djaddo, avec le Mont Toummo de 1 022 mètres d'altitude. Ces deux massifs sont séparés par le désert du Ténéré et le grand erg de Bilma (Fig. 9).

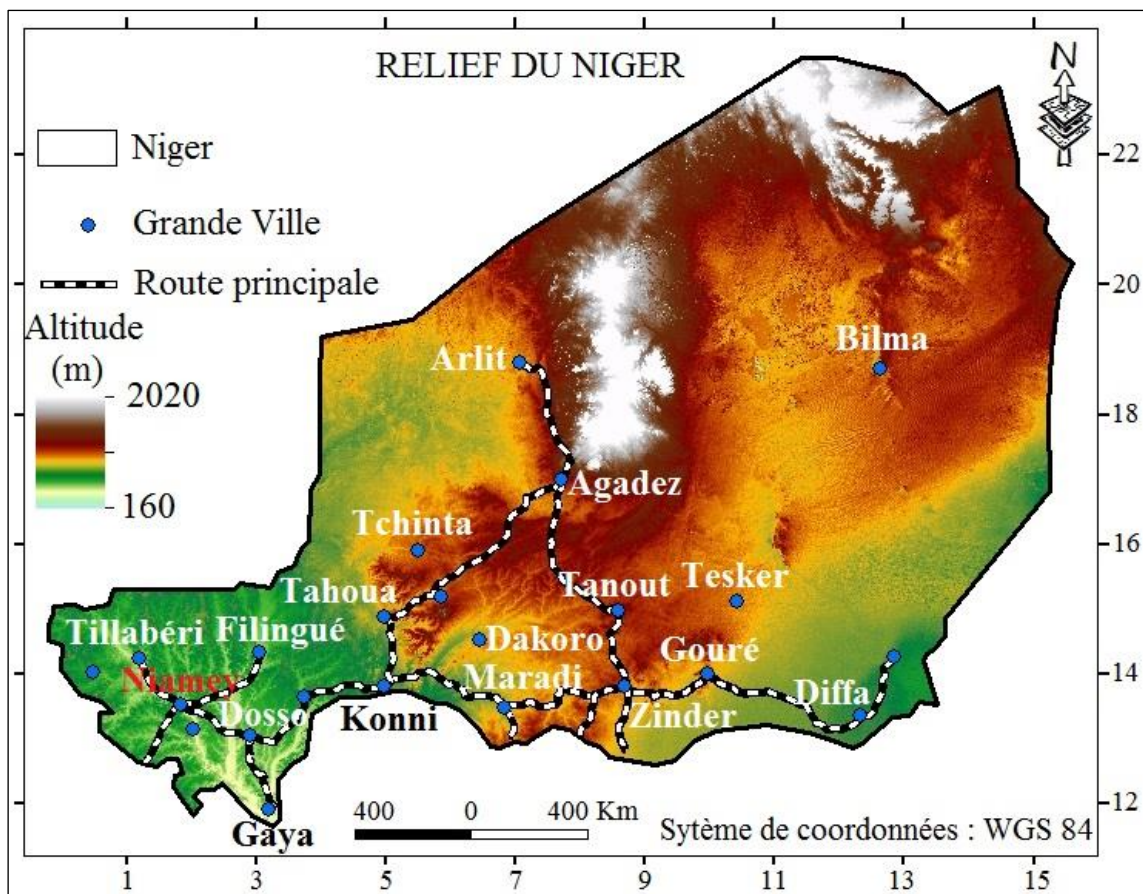


Figure 9 : Carte du relief du Niger

1.1.5. Hydrographie

Le réseau hydrographique du Niger, faiblement développé, à cause de l'aridité actuelle sur une grande partie du pays (Fig. 10), comprend essentiellement :

- le fleuve Niger, long de 4 200 km dont 550 km sur le territoire Nigérien, prenant sa source dans le massif du Fouta Djallon en Guinée. Il est le troisième grand fleuve d'Afrique, après le Congo, long de 4 700 km et le Nil, long de 6 671 km ;

- les affluents de la rive droite du fleuve Niger : la Mékrou, la Tapoa, le Diamangou, le Goroubi, la Sirba, le Dargol, et le Goroual ;
- la Komadougou Yobé ;
- les lacs, cours d'eau et mares dont les principaux sont : le lac Tchad, la mare de Madarounfa, la mare de Tabalak et de Guidimouni.

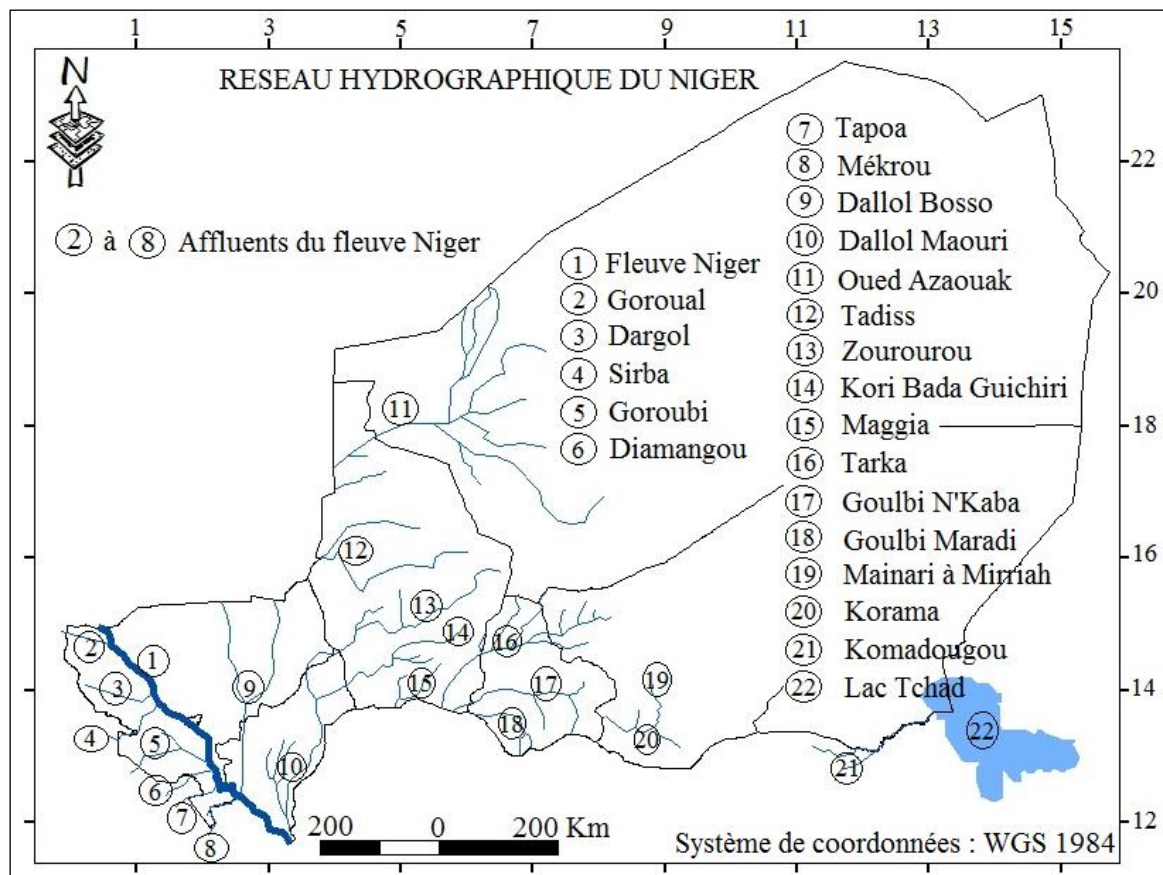


Figure 10 : Réseau Hydrographique du Niger

1.1.6. Aperçu sur la géologie

La géologie du Niger, est caractérisée par deux principales unités morpho-structurales et lithologiques : les formations de socle cristallophyllien d'une part et les formations sédimentaires d'autre part.

1.1.6.1. Formations cristallines et cristallophylliennes

Elles affleurent dans quatre secteurs géographiques du pays : le Liptako nigérien à l'Ouest du pays, au Nord et Nord-Est l'Aïr et le Ténéré de Tafassasset, au Sud et Sud-Est, le socle du Sud-Marad et du Damagaram-Mounio.

1.1.6.1.1. Liptako nigérien

Le socle du Liptako, appartenant au dorsal de Man (Domaine Baoulé-Mossi), est constitué par des formations précambriennes d'âge protérozoïques (Machens, 1973 ; Ousmane, 1988).

Plusieurs études géologiques, géophysiques et hydrogéologiques ont été effectuées dans ce domaine du Liptako (Dupuis et al., 1991 ; Abdou et al., 1998 ; Soumaïla, 2000 ; Soumaïla et al., 2004 ; Soumaïla et Konaté, 2005), à cause des importants minerais qu'il renferme d'une part (minerai d'or, généralement), mais aussi à cause de la nature discontinue des aquifères qu'il abrite (Ousmane, 1988). Ces roches se composent de deux séries géologiques (Machens, 1973 ; Ousmane, 1988 ; Dupuis et al., 1991) :

- **la série volcano-sédimentaire** : composées des sédiments, des méta-sédiments, des méta-volcano-sédiments et des méta-volcano-plutoniques ;
- **le massif plutonique** : il occupe près de 60% de la superficie du Liptako. Il s'agit des granites concordants (syntectoniques et tardi-tectoniques) et des granites discordants (post-tectoniques anciens et post-tectoniques ultimes) (Machens, 1973).

1.1.6.1.2. Damagaram-Mounio et Sud-Maradi

Remobilisés au cours de l'orogénèse pan-africaine et cratonisés depuis 500 à plus ou moins 100 Ma, les formations du socle cristallin et cristallophylien du massif de Damagaram-Mounio et du Sud-Maradi sont des appendices des boucliers targui et nigérien (Bessoles et Trompette, 1980 ; Ousmane, 1988).

Les principales unités lithologiques par secteur sont réparties comme suit (Faure, 1951 cité par Ousmane 1988 ; Black, 1967 ; Mignon, 1970 ; Ousmane, 1978) :

- **le Damagaram-Mounio** : composé par des formations métamorphiques (des gneiss à silicates calciques, des quartzites très plissées et souvent affectées par plusieurs décrochements, et enfin des micaschistes très altérables), des granites anciens (des granites porphyroïdes calco-alcalins, des granites calco-alcalins et enfin des granites à 2 micas et granites à biotites) et pour finir des granites jaunes (des granites à riébeckite, des syénites, des microsyténites, des rhyolites, des trachytes de tufs volcaniques et des brèches variées) ;
- **le Sud-Maradi** : comprend des roches métamorphiques (des schistes à chlorites et à séricites, des micaschistes des gneiss et des leptynites) et des granites anciens (des granodiorites et granites calco-alcalins, traversés par plusieurs filons de quartz, de pegmatites et microgranites).

1.1.6.1.3. Massif de l'Aïr

Le massif de l'Aïr, partie intégrante du domaine poly-cyclique du bouclier targui, dont la structure géologique est fortement liée à l'histoire orogénique panafricaine (Kennedy, 1974 cité par Joseph, 1990 ; Ousmane, 1988 ; Kroner, 1980 et Black, 1984, cité par Guero, 2003).

Il est constitué géologiquement par des formations métamorphiques éburnéennes (à savoir des gneiss, des amphibolites, des cipolins et des quartzites), des granitoïdes précambriens et des complexes subvolcaniques et volcaniques d'âge paléozoïques à structures annulaire.

Du point de vu structural, le massif de l'Aïr a été affecté par trois grandes familles d'accidents d'importance décroissante : N 135, 80 et 45 (Joseph, 1990). Outre ces grandes familles d'accidents, d'importantes émissions volcaniques ont été mise en place le long de ces accidents majeurs et sont généralement liées à la phase d'extension crétacée (Cantagret et Karche, 1983, cité par Guero, 2003) et aux phases tardives tertiaires et quaternaires (Poucllet et Durand, 1983, cité par Guero, 2003).

1.1.6.1.4. Ténéré de Tafassassef

Le Ténéré de Tafassasset, est composé par des roches granitoïdes et des séries métamorphiques appartenant au Précambrien. Il couvre une superficie d'environ 40 000 km² et est entièrement masqué par environ une dizaine de mètres de sable désertique.

1.1.6.2. Formations sédimentaires

Deux grands bassins sédimentaires couvrent le territoire nigérien : le bassin des Iullemeden à l'Ouest et le bassin du Lac Tchad (bassin tchadien) dans la partie orientale du pays.

1.1.6.2.1. Bassin des Iullemeden

Le bassin des Iullemeden, de manière générale, est localisé grossièrement entre 1° et 9° de longitude Est et 10° et 21° de latitude Nord. Décrit pour la première fois par H. Radier (1957), le bassin des Iullemeden est encadré par (Fig. 11) :

- le Bouclier targui (Massif du Hoggar en Algérie et ses prolongements méridionaux : l'Adrar des Iforas au Mali et l'Aïr au Niger) au Nord ;
- le Fossé de Gao ou détroit soudanais au Nord-Ouest ;
- le Bouclier de Man (Liptako-Gourma) à l'Ouest ;
- le Bouclier nigérien au Sud et le fossé de Maiduguri au Nigéria au Sud-Est ;
- enfin le Graben de Tefidet-Kafra-Ténéré-Termit à l'Est.

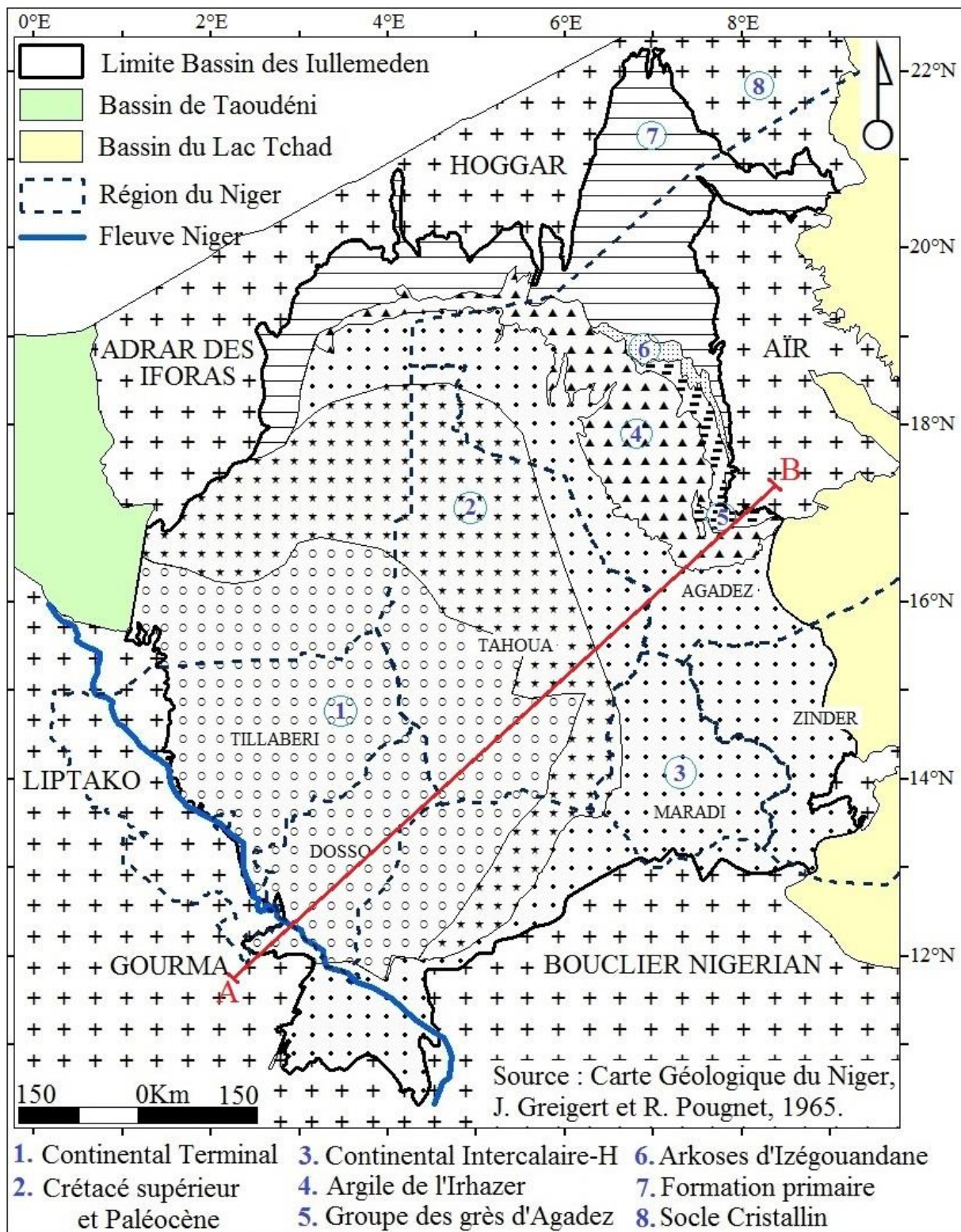


Figure 11 : Limite Géologique du bassin d'Iullemeden (d'après carte géologique du Niger, J.Greigert et R.Pognet, 1965)

A l'Ouest, ce bassin communique avec celui du Taoudéni-Tanezrouft (partagé entre le Mali et l'Algérie) par le Graben de Gao («détroit de Gao»).

A l'Est, il est séparé du bassin du lac Tchad (cuvette tchadienne) par le seuil du Damergou, de direction NNO/SSE, entre le massif de l'Air au Nord et celui du Damagaram au Sud. Ce seuil constitue également la ligne de partage des eaux souterraines, et la limite orientale dudit bassin.

D'une superficie totale d'environ 510 000 km², ce grand bassin des Iullemeden est partagé entre plusieurs pays, faisant de lui un bassin transfrontalier et dont environ 64% de la superficie se trouve sur le territoire nigérien. Il est reparti comme suit :

- 64,3% au Niger, soit 327 900 km² ;
- 20,4% au Mali, soit 104 000 km² ;
- 13,2% au Nigéria, soit 67 100 km² ;
- et accessoirement 1,7% au Bénin, soit 8 800 km² et 0,4% en Algérie, soit 2 200 km².

Le bassin des Iullemeden au sens large comprend deux parties : le bassin de Tin Séririne-Irhazer partagé entre l'Algérie et le Niger et le bassin des Iullemeden *structo sensu* partagé entre le Mali, le Niger, le Nigéria et accessoirement le Bénin.

a. Bassin de Tin Séririne-Irhazer

Le bassin de Tin Séririne-Irhazer, correspond à la partie nord du bassin des Iullemeden et est comblé par les formations allant du Cambrien au Crétacé inférieur :

- **Primaire**, composé du bas en haut par les grès de Timesgueur, en discordance majeure sur le socle suggarien ; les schistes à Graptolites d'âge gothlandien ; les grès d'Idekel ; les grès de Touaret ; les grès de d'Amesgueur, surmontés par les grès de Farazekat ; les grès de Guezouma et grès de Tarat ; et enfin les arkoses d'Izegouande ;
- **Trias et Jurassique**, constitué par les grès d'Agadez ;
- **Crétacé inférieur** correspondant aux argilites de l'Irhazer.

b. Bassin des Iullemeden *stricto sensu*

Du Trias inférieur jusqu'au Cénomaniens inférieur, la sédimentation est restée continentale sur toute l'étendue du bassin des Iullemeden (domaine fluvio-lacustre et deltaïque).

Au Crétacé supérieur, plus précisément du Cénomaniens supérieur jusqu'au tardi-Maastrichtien (Greigert, 1966a ; Boudouresque, et al., 1982) interviennent respectivement quatre transgressions marines, qui envahissent une grande partie du territoire nigérien, et au-delà des frontières nigériennes jusqu'à la république malienne à l'Ouest et celle du Nigéria au Sud (Fig. 12).

Le bassin des Iullemeden *stricto sensu* correspond à la partie sud du bassin des Iullemeden, et renferme, de la base au sommet, les formations des séries sédimentaires du Continental Intercalaire/Hamadien (groupe du Tegama), les formations des dépôts marins du Crétacé supérieur, et celles du Paléocène-Eocène, les formations des dépôts continentaux cénozoïques (Continental Terminal) et enfin au sommet, les formations des dépôts quaternaires s'étalant sur une importante superficie.

i. Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H)

Les formations des séries du Continental Intercalaire/Hamadien, du bassin des Iullemeden, définies par Kilian (1931 cité par Guero, 2003) pour la première fois, correspondent à l'ensemble des formations détritiques postérieures aux derniers dépôts marins du Primaire (Carbonifère) et antérieures à la première transgression marine du Secondaire (Cénomanién supérieur).

Selon Miko (1999), qui ne partage pas du tout la même vision que Kilian, affirme que les formations des séries du Continental Intercalaire correspondent tout simplement au groupe de Tégama, d'âge néocomien à albien (Crétacé inférieur sommital) et attribue les formations du Continental Hamadién au Crétacé supérieur. Ainsi, on distingue du bas en haut :

- les grès du Tégama (Néocomien à Albien). Ils se présentent sous forme des grès grossiers friables ou de sables à galets de quartz et à stratifications entrecroisées. On note aussi la présence des bois silicifiés et des restes de dinosauriens, de crocodiliens, de chéloniens et de poissons (Greigert, 1966a). Ils se présentent de différentes manières en fonction des zones :
 - ✓ dans le Ténéré du Tamesna, le Tégama se présente avec des calcaires gréseux à la base, surmontés des grès de type Tégama décrits ci-dessus ;
 - ✓ dans la partie nord Damergou, partie est du bassin, le Tégama comprend (Faure, 1962 et Joulia, 1996, cité par Guero, 2003), des grès grossiers, à bois silicifiés de faciès Tégama à la base, puis suivent successivement la série d'El Rhak, la série d'Echkar et la série de Farak ;
- les dépôts continentaux du Crétacé supérieur (Continental Hamadién). Constitués essentiellement par des grès grossiers plus ou moins argileux, ils sont rencontrés dans la partie sud et nord-ouest du bassin des Iullemeden. Ces dépôts, n'ont pas été touchés par les transgressions marines du Crétacé supérieur qu'on rencontre dans la partie centrale et Nord du bassin (Greigert, 1966a ; Kogbé, 1979, cité par Guero, 2003) et correspondent à des dépôts fluvio-lacustre et deltaïques.

ii. Dépôts marins du Crétacé supérieur

Les dépôts marins du Crétacé supérieur, sont caractérisés par quatre transgressions (T_1 , T_2 , T_3 et T_4) marines (Fig. 12) les unes chevauchantes sur les autres (Guero, 2003) :

- la première (T_1), d'âge allant du Cénomaniens supérieur au Turonien inférieur avec pour dépôts des argiles grises ou vertes et des grès à néolobites vibrayeani, à efflorescences salines et filons de gypse, qui sont surmontés par des grès et grès calcaire glauconieux à gastéropodes et nigericeras (200m). Au Turonien inférieur, on note l'apparition des premiers nigericeras, suivie d'une légère régression marquée par des argiles à gypse ;
- la deuxième transgression (T_2), présente des dépôts de calcaires blancs (Greigert, 1966a). Selon Alzouma (1982), on identifie des argiles gypsifères avec des nodules calcaires et des niveaux très glauconieux dans cette série ;
- au Sénonien Inférieur, survient également la troisième transgression (T_3) avec des dépôts argileux fossilifères (30m). Outre des alternances de calcaires marins à débris de foraminifères et d'huîtres, de calcaires continentaux à gastéropodes, ostracodes et de vertébrés dinosauriens ont été identifiés (Greigert, 1966a) ;

Pour toutes ces trois premières transgressions, la mer a pénétré le continent par le Nord-Est.

- la dernière transgression du Crétacé (T_4), quant à elle, désobéit à cette règle et la mer pénètre le continent par le nord-ouest pendant le Maastrichtien par le détroit soudanais et met en place des argiles, siltites, des sables à débris de vertébrés crocodiliens, et des marnes fossilifères dans l'Ader Douchi.

iii. Dépôts du Paléocène-Eocène

Les dépôts du Paléocène-Eocène, constitués par des calcaires, des marno-calcaires, des marnes et des schistes argileux, sont issus de la transgression marine (T_5) du Paléocène-Yprésien qui suit le même mode de pénétration que la transgression T_4 (Guero, 2003).

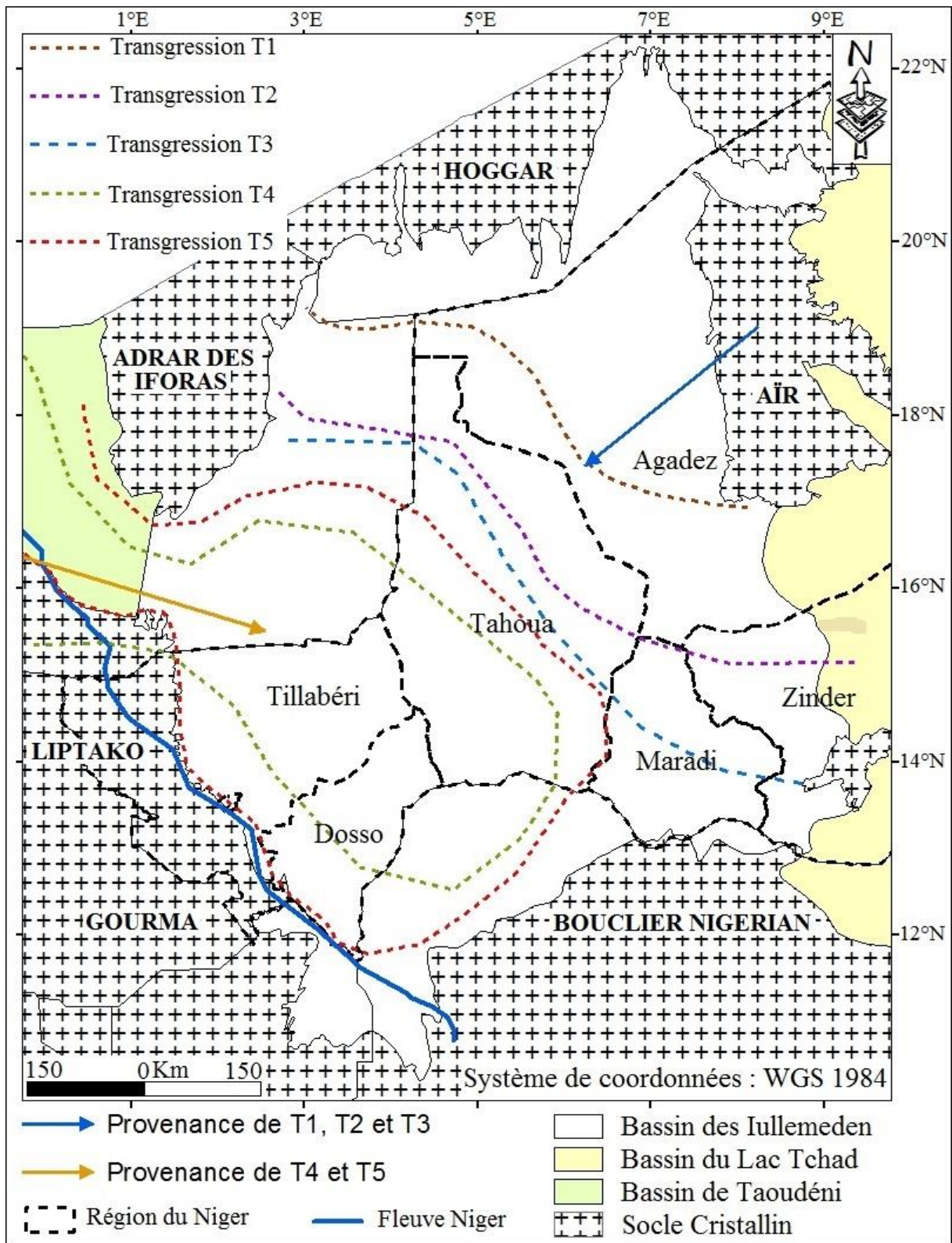


Figure 12 : Extension des Transgressions Marines du Crétacé Supérieur au Cénozoïque dans le bassin des Iullemeden (Greigert, 1966a ; Abdoukarim, 1988 ; Monfort, 1997 ; Miko, 1999)

iv. Continental Terminal

Le Continental Terminal, selon Kilian (1931 cité par Guero, 2003), désigne les formations détritiques quartzo-kaoliniques à faciès sidérolitiques d'âge post-Eocène moyen et anté-Quaternaire, déposées en discordance stratigraphique (Guero, 2003). Selon Greigert (1966), les dépôts du Continental Terminal comportent trois séries, du bas en haut, la série sidérolitique de l'Ader Doutchi (CT₁), les argilo-sableux à lignites (CT₂) et les grès argileux constituant le sommet (CT₃), (Daddy Gaoh, 1993) :

- la série sidérolitique ou Continental Terminal 1 (CT₁) de l'Ader Doutchi, (Daddy Gaoh, 1993) présente à sa base des argiles noires plus ou moins feuilletées et des marnes. Elle devient au centre des niveaux sableux plus ou moins sablo-argileuse et affleure sous forme de séries ferrugineuses à niveau argileux à oolithes ou pisolithes ferrugineuses. Parfois, on y trouve également des débris végétaux transformés en charbon et des cristaux de pyrite. D'une épaisseur de 50 mètres à l'affleurement, elle atteint environ 90 mètres dans les environs de Dogon Doutchi (Guero, 2003) ;
- le Continental Terminal 2 (CT₂) est composé par des argiles bariolées jaunes, brunes, vertes et violettes, donnant une teinte sombre à ces formations, due certainement à la présence de matière organique. On note également des alternances de niveau sableux, argileux et silts argilo-sableux à passages de lignite. D'une profondeur de 100 mètres au environ de Doutchi, ces formations affleurent dans toute la moitié Nord du domaine Continental Terminal avec une présence notoire de pyrite ;
- le Continental Terminal 3 (CT₃) ou grès argileux du moyen-Niger est la troisième et la dernière série du Continental Terminal. Il est constitué par des grès argileux, des argiles sableuses et des sables argileux passant à des silts sablo-argileux ou des argiles silteuses. A sa base les formations surtout argileuses présentent une coloration sombre bariolée (bleue, grise ou verte), en dessous desquelles apparaissent souvent des débris végétaux, quelque fois transformés en charbon. Cette coloration varie du rouge rouille au jaune dans sa partie supérieure, où on note également parfois des oolithes ferrugineuses ou des grès ferrugineux formant un cuirassement à l'affleurement. La puissance de cette série peut atteindre les 190 mètres vers Dogon Doutchi.

v. Dépôts quaternaires

Les dépôts quaternaires couvrent une grande partie du bassin et se présentent comme suit (Greigert, 1966a) :

- dans la partie sud-est du bassin, des alluvions anciennes caillouteuses des vallées de Goulbi (40 m), constituées par des graviers, galet de quartz et des sables fin plus ou moins argileux ;
- les alluvions des Dallols Bosso et Maouri, récents sablo-argileux (40 m) ;
- les dunes fixées recouvrant indifféremment les formations sous-jacentes crétacées et tertiaires, occupant la majeure partie du bassin ;
- dans la partie nord du bassin, les dunes vives de la région du Tamesna ;
- enfin les alluvions des vallées du Niger et de la rivière de Sokoto.

1.1.6.2.2. Bassin tchadien

Le bassin du Lac Tchad, également appelé bassin du Niger oriental, est un grand bassin sédimentaire endoréique constitué par quatre sous-bassins d'âge primaire à tertiaire. Il s'agit du bassin d'Agadem, du bassin de Bilma, celui du Djado, et enfin le bassin du Lac Tchad *stricto sensu*.

D'une superficie d'environ 1 500 000 km², le bassin tchadien s'étend en grande partie en territoire tchadien, mais aussi sur la partie orientale du territoire nigérien, dans la partie nord-est du Nigéria et enfin dans la partie nord du Cameroun. Issu de l'accumulation d'une série essentiellement continentale, le bassin tchadien est constitué par les formations suivantes :

- grès argileux du Continental Intercalaire ;
- argiles du Crétacé supérieur ;
- sables du Continental Terminal ;
- argiles du Pliocène ;
- et enfin les sables du Plio-Quaternaire.

a. Bassin d'Agadem

Il représente la partie septentrionale du bassin du Lac Tchad (bassin tchadien) et regorge des formations équivalentes à celles du bassin de Bilma. Il s'agit, du Continental Intercalaire, le Crétacé marin, le Continental Hamadien, le Continental Terminal et pour finir au sommet, les dépôts quaternaires.

b. Bassin de Bilma

Le bassin de Bilma, affecté par d'importants accidents majeurs (plis et failles), d'une épaisseur totale d'environ 2 000 mètres, est composé par des formations d'âge crétacé.

On peut citer entre autre les formations du Continental Intercalaire et du Continental Hamadien, séparées par des formations marines du Crétacé.

c. Bassin du Djaddo

Les formations du bassin du Djaddo, se présentent avec une épaisseur d'environ 2 000 mètres. Elles reposent sur le socle cristallin et cristallophyllien d'âge pharusien, qui affleure à l'Est (Tibesti).

De la base au sommet on distingue les formations sédimentaires suivantes :

- formations d'âges cambro-dévonien, essentiellement sableuses, des grès grossiers à fins, des argiles gréseuses et gypseuses ;
- formations carbo-permiennes, composées par des grès, des argiles et des calcaires ;
- les grès nubien (Manguéni (650 m)), attribués au Continental Intercalaire dans le passé, mais qui semblent appartenir au Continental Hamadien selon Greigert (1968).

d. Bassin du Lac Tchad *stricto sensu*

Le bassin du Lac Tchad *stricto sensu*, qui constitue la dernière série du grand bassin tchadien se compose par les formations du Continental Intercalaire, celles du Continental Terminal, des formations du Pliocène, et des dépôts quaternaires.

1.1.7. Hydrogéologie

Le Niger est un pays riche du point de vue hydrogéologique. Il possède des quantités d'eau souterraine, contenues essentiellement dans les deux grands bassins sédimentaires du pays et dans les aquifères de socle, en plus faible quantité.

Les principaux systèmes aquifères du Niger sont :

- les aquifères du Paléozoïque ;
- les aquifères du Continental Intercalaire/Continental Hamadien ;
- les aquifères du Continental Terminal et du Pliocène ;
- et enfin les aquifères du Quaternaire.

1.1.7.1. Aquifères discontinus

1.1.7.1.1. Liptako Nigérien

Les réservoirs des aquifères du socle du Liptako, sont constitués par des horizons fracturés, fissurés et/ou altérés des formations granitoïdes et métamorphiques du socle précambrien, et des quartzites de l'Infracambrien. Ils sont caractérisés (Ousmane, 1988 et 2012) par des :

- taux de réussite de forages : 63 à 84 % (formations granitoïdes) et 91 à 98 % (roches vertes) ;
- profondeurs de captage : variant de 27 à 103,8 mètres dans les granitoïdes (moyenne de 50 m) et 26 à 81 mètres, pour les roches vertes (moyenne de 60 mètres) ;
- puissances d'altération : 2,5 à 29 mètres (granitoïdes) et 7,5 à 60 m (roches vertes) ;
- profondeurs moyennes des arrivées d'eau : 29,4 mètres dans les granitoïdes et de 46 mètres dans les roches vertes ;
- niveaux piézométriques : de 1,8 à 30,7 mètres dans les granitoïdes et 4,4 à 20,7 mètres dans les formations schisteuses ; avec des conductivités électriques de 100 à 7380 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- débits moyens : variant de 2,6 à 4,1 m^3/h dans les granitoïdes (maximum de 20 m^3/h) et 1,7 à 3,6 m^3/h pour les roches vertes (maximum de 9 m^3/h) ;
- pH variant de 5,6 à 7,8, avec des températures de l'eau qui varient entre 28 à 32°C.

1.1.7.1.2. Damagaram-Mounio et Sud Maradi

Constitués par des roches métamorphiques et des granites précambriens ou paléozoïques, les réservoirs des aquifères discontinus du socle du Damagaram-Mounio et du Sud-Maradi, présentent les caractéristiques hydrogéologiques suivantes (Ousmane, 1988 et 2012) :

- profondeurs moyennes du niveau statique de 16,5 mètres dans le Damagaram-Mounio et 11,8 mètres dans le Sud-Maradi ;
- taux de réussite d'environ 66% dans les formations discontinues du Damagaram-Mounio et 60% dans le Sud-Maradi ;
- profondeurs optimales des captages d'environ 60 mètres dans le Damagaram-Mounio et 58 mètres dans le Sud-Maradi ;
- débits moyens de l'ordre de 2 m^3/h dans le Sud-Maradi et dans les granites sains du Damagaram-Mounio, et dépassent 5 m^3/h pour des profondeurs supérieures ;
- valeurs de la conductivité électrique des eaux sont comprises entre 100 et 650 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le Damagaram-Mounio et entre 80 et 610 dans le Sud-Maradi.

1.1.7.1.3. Massif de l'Air

Faiblement peuplé, à cause de sa nature désertique, le secteur du Massif de l'Air est surtout dominé par l'utilisation et l'exploitation des aquifères alluviaux des Koris, et les eaux de ruissellement en saison de pluie par les populations, ce qui fait que les aquifères dudit massif sont peu connus jusqu'à nos jours.

1.1.7.1.4. Ténéré de Tafassassef

Totalement déserte, la zone du Ténéré de Tafassasset est exempte de toute activité humaine. Le socle cristallin y est recouvert d'environ une dizaine de mètres de sable avec une absence notoire de point d'eau.

1.1.7.2. Aquifères continus

1.1.7.2.1. Bassin des Iullemeden

Le contexte hydrogéologique du bassin des Iullemeden, se caractérise par la présence de trois sous-bassins. Chacun de ces sous-bassins abrite un système aquifère multicouche en son sein et présentent des caractéristiques spécifiques.

Il s'agit du système aquifère du bassin du Tin Séririne, rencontré dans la partie nord du Niger, le système aquifère du bassin de Tim Mersoï et enfin le système aquifère du bassin des Iullemeden *stricto sensu*, couvrant la partie sud et sud-ouest du territoire nigérien.

a. Aquifères du bassin du Tin Séririne

Situés dans la partie nord du pays, le système aquifère du Tin Séririne comprend les aquifères suivants (AMMAN, 2013) :

- les séries gréseuses du Cambro-Ordovicien, avec un réservoir constitué par des grès grossiers, d'une épaisseur d'environ 100 mètres et des débits spécifiques inférieurs à 0,8 m³/h/m ;
- les grès d'Idekel et de Touaret, d'âge dévonien inférieur, sont caractérisés par des grès fins et des argiles sableuses d'une épaisseur d'environ 146 mètres, avec des débits spécifiques qui varient entre 0,05 et 0,5 m³/h/m ;
- les grès d'Amesgueur et de Farazekat, d'âge dévonien supérieur sont composés de deux horizons gréseux séparés par une couche argileuse. Les horizons gréseux présentent des épaisseurs respectives de 40 mètres et 80 mètres, avec des débits spécifiques de l'ordre de 0,3 m³/h/m.

b. Aquifères du bassin de Tim Mersoï

Ces aquifères sont bien connus au Niger, du fait de leur position géographique en zone minière à Arlit. Trois horizons perméables composent le système aquifère du Tim Mersoï à savoir du bas en haut (SCETAGRI, 1985 ; AMMAN, 2013) :

- la nappe du Guézouman, caractérisée par des transmissivités généralement faibles ($1,5 \cdot 10^{-6}$ à $1,8 \cdot 10^{-4}$ m²/s), des coefficients d'emménagement voisins de $4,5 \cdot 10^{-5}$.

D'une épaisseur de 30 à 70 mètres, les formations du Guézouman reposent directement sur les argilites du Talak (100 à 200 mètres) et sont surmontées par les formations gréseuses à silteuses imperméables du Tchinezogue ;

- la nappe du Tarat, peu perméable (environ $7,8.10^{-7}$ à $1,2.10^{-4}$ m/s) avec des transmissivités qui varient entre $7,4.10^{-5}$ et $1,1.10^{-3}$ m²/S et un coefficient d'emmagasinement de l'ordre de 10^{-5} . La nappe du Tarat, est limitée à l'Ouest par la grande faille d'Arlit ;
- la nappe d'Izégouande, contenue dans des lentilles de dimensions parfois modestes de grès arkosiques, d'après les quelques tests réalisés dans le Nord Arlit.

c. Aquifères du bassin des Iullemeden *stricto sensu*

Le bassin des Iullemeden est un puissant système aquifère multicouche qui s'étend du Cambrien au Quaternaire, dans lequel les aquifères communiquent entre eux par drainance à travers les formations semi-perméable et les failles profondes.

Leurs principales aires d'alimentation sont les surfaces à nappe libre, rencontrées dans sa partie est et sud-est. Les principaux exutoires quant à eux, sont constitués par le fleuve Niger et certaines aires d'évapotranspiration.

i. Aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien

Le nom Continental Intercalaire/Hamadien, ici, regroupe toutes les formations continentales postérieures aux argiles d'Irhazer et antérieures au Paléocène dans le bassin des Iullemeden au Niger. Appelé parfois « Grès du Tégama », il est à noter que ce système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien est sans relation avec le Continental Intercalaire saharien, au Nord.

L'aquifère est mis en charge dans sa partie centrale, avec localement des zones d'artésianisme, par des formations marines du Crétacé moyen à supérieur et/ou celles du Continental Terminal et libre sur ses bordures Nord, Est et Sud.

Cet aquifère constitue le plus grand système aquifère multicouche connu dans le bassin des Iullemeden au Niger. Son niveau piézométrique croit des zones captives aux zones libres, avec des profondeurs de captage pouvant aller jusqu'à plus de 800 mètres.

Le volume d'eau emmagasiné est si important qu'1 mètre de rabattement libérerait entre 13 et 15 milliard de m³ d'eau, mais avec un faible taux de renouvellement (Margat et al., 2006).

Au Niger, le mur du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, selon le profil SW-NE (Greigert, 1966a) est constitué par des formations d'âge primaire et des dépôts antérieurs au Crétacé du Continental Intercalaire (Fig. 13). Voir le profil A-B sur la figure 11.

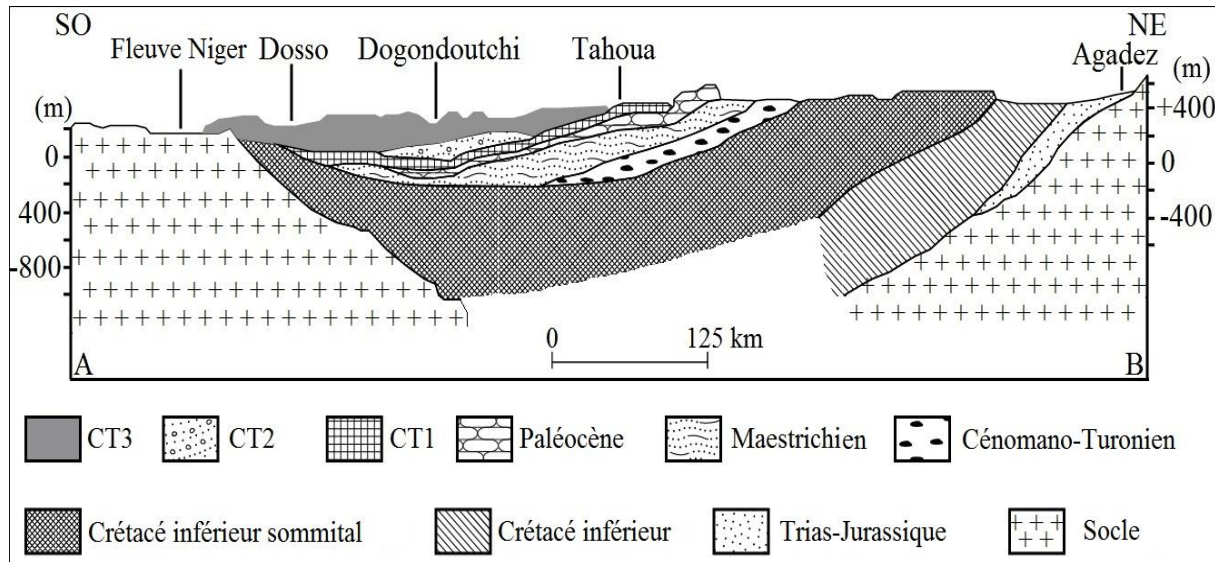


Figure 13 : Coupes géologique dans le bassin des Iullemeden au Niger (source : Greigert, 1966a - modifié)

Le toit de l'aquifère, quant à lui, est semi-perméable sur une grande partie et est constitué par les formations du Crétacé moyen et supérieur. Par contre, il affleure aux extrémités de l'aquifère et la nappe se vidange dans la vallée du fleuve Niger dans la localité de Gaya et le Sud de la province de Sokoto.

Selon Greigert (1978), les levés géologiques du CEA donnent à l'aquifère du Continental Intercalaire dans l'Ouest du Niger une puissance de 800 mètres au point 6°E-16°N. Vers l'Ouest et le Sud-Ouest de ce point, on note une augmentation de l'épaisseur du réservoir pour atteindre environ 1000 mètres au forage pétrolier de Cambretum, près de la faille occidentale. Au Sud de ce point (6°E-16°N), c'est une diminution qui apparaît pour donner une épaisseur de 340 mètres à Bengou au Niger avant de devenir nulle au Sud-Kandi au Bénin.

Du point de vue lithologique, le réservoir du Continental Intercalaire/Hamadien, est constitué par des dépôts fluviaux, lacustres et deltaïques (grès grossiers, moyens et fin, des sables plus ou moins argileux et des argiles).

ii. Aquifères du Crétacé supérieur marin

Les aquifères du Crétacé supérieur marin sont localisés dans des bancs calcaires du Turonien avec des débits de plusieurs m³/h et des profondeurs faibles (200 à 300 mètres) comparativement aux aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien.

Ils se présentent avec des niveaux piézométriques qui varient entre 20 et 60 mètres de profondeur.

iii. Aquifères du Paléocène marin

Les aquifères du Paléocène, n'existent que dans la région de Tahoua (Greigert, 1978). Ils sont d'origine marine et sont intercalés entre deux couches imperméables de schistes papyracés d'une vingtaine de mètres chacune. On les reconnaît par leurs caractéristiques hydrogéologiques médiocres et la nature de leurs eaux très chargées en sels.

iv. Aquifères du Continental Terminal

Le Continental Terminal, tout comme le Continental Intercalaire/Hamadien (Fig. 14), est un grand système aquifère multicouche dans lequel trois aquifères sont identifiés (CT₁, CT₂ et CT₃). Dans la partie centrale, les deux premiers du bas en haut (CT₁ et CT₂) sont captifs et le troisième affleurant est libre.

D'une superficie d'environ 198 000 km², les aquifères du Continental Terminal s'étendent sur les régions de Dosso, Tahoua et Tillabéry, correspondant à la partie sud et sud-ouest du territoire nigérien et on distingue du bas en haut le :

- Continental Terminal 1 (CT₁), captif dans sa plus grande partie sauf aux périphéries où il est libre. D'une superficie de 76 000 km² avec des niveaux piézométriques très faibles, les aquifères du CT₁ sont artésiens dans certaines zones du pays (Dallols Bosso et Maouri, ainsi que la partie sud du département d'Ouallam) ;
- Continental Terminal 2 (CT₂), également captif avec des écoulements NW-SE et NE-SW et des niveaux piézométriques inférieurs à 10 mètres dans les Dallols, mais assez profonds (30 à 60 mètres) ailleurs, voire souvent à plus de 80 mètres sur les plateaux. Son importance réside dans le fait qu'il présente des grands débits et des profondeurs de captage assez faibles (80 à 150 mètres) ;
- Continental Terminal 3 (CT₃), d'une superficie de 102 000 km², libre dans son ensemble et présent sur une grande partie du bassin Tahoua.

Les écoulements sont de direction NW-SE et NE-SW avec un volume exploitable estimé à 5 000 km³ et des profondeurs de captage très faibles.

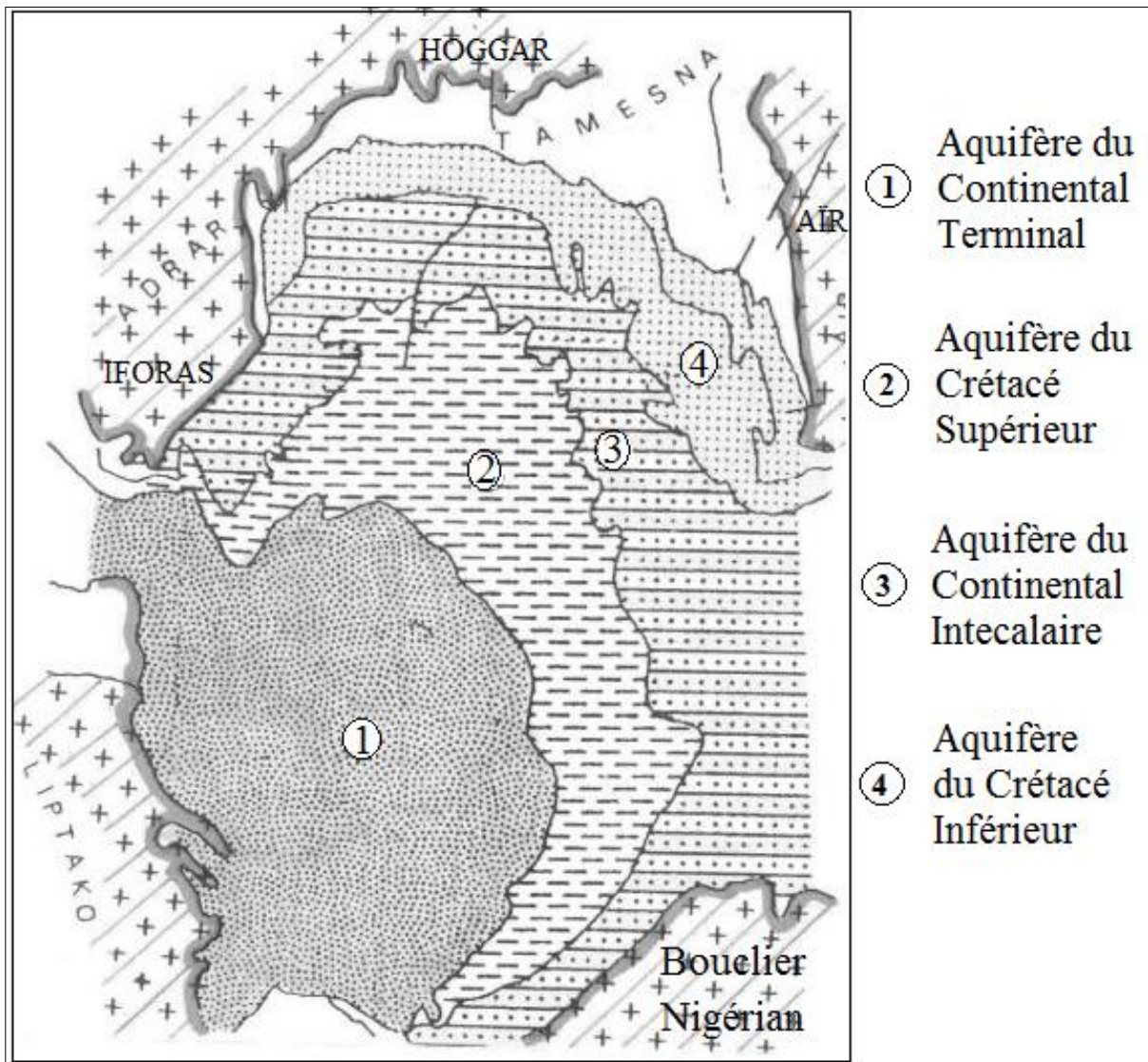


Figure 14 : Carte des différents aquifères du sous-bassin d'Iullemeden (Margat et al, 2006)

1.1.7.2.2. Bassin tchadien

L'hydrogéologie du bassin du Tchad dans le secteur, bien sûr du Niger oriental, se résume dans le tableau 2 donnant, les informations sur les différents aquifères qui le composent, la nature des différentes formations et les caractéristiques et limites de chacun de ces quatre sous bassins.

Tableau 2 : Les aquifères du bassin tchadien dans le secteur du Niger oriental (Greigert, 1967 et 1978 ; OSS, 2006)

Sous-bassins	Aquifères	Formations	Contraintes et limitations	
			Spécifiques	Communes
Djaddo	Paléozoïque	Cambrien, Dévonien, Viséen	Eau soumise à l'évaporation dans la zone affleurant de l'aquifère. Source et points d'eau affleurant menacés d'ensablement.	Zone désertique, densité de la population très faible. Recharge locale insignifiante. Absence de cadre local de valorisation.
		Namurien	Faible débit des forages	
	Continental Intercalaire	Grès de Nubie	Faible débit des forages	
Bilma	Continental Intercalaire	Formations de Dibella et d'Achegour	Salinisation progressive des eaux du fait de l'évaporation. Sources et points d'eau affleurant menacés d'ensablement.	
	Continental Hamadien	Formations de Seguedine et de Bilma		
Agadem-Termit	Crétacé	Grès	Formations peu connues	
Lac Tchad	Pliocène	Pliocène	Eaux fossiles et corrosives. Grandes profondeurs de forage (250 à 350 m). Artésianisme.	Eaux localement très salées. Zone en voie de désertification.
	Quaternaire	Manga	Aquifère tributaire de la pluviométrie, du régime de la Komadougou et du retrait du Lac Tchad. Sables très fins	Densité de la population relativement faible
		Korama	Tributaire de la fossilisation des cours d'eau l'alimentant, et du déficit pluviométrique. En épuisement au niveau du captage de l'AEP de Zinder	

1.2. SUR LA REGION DE TAHOUA, ZONE D'ETUDE

1.2.1. Localisation et cadre administratif de la zone d'étude

La zone d'étude, la région de Tahoua, a une superficie d'environ 114 425 km² et s'inscrit entre 13°20' et 18°40' de latitude Nord et entre 3°50' et 7° de longitude Est. Sur le plan administratif, elle est limitée par la région d'Agadez au Nord, celles d'Agadez et de Maradi à l'Est, la République Fédérale du Nigéria au Sud, les régions de Dosso et de Tillabéry, et enfin la République du Mali à l'Ouest (Fig. 15). Elle est composée par douze départements : Abalak, Bagaroua, Birni N'Konni, Bouza, Illéla, Keita, Madaoua, Malbaza, Tahoua, Tassara, Tchintabaraden, et Tillia.

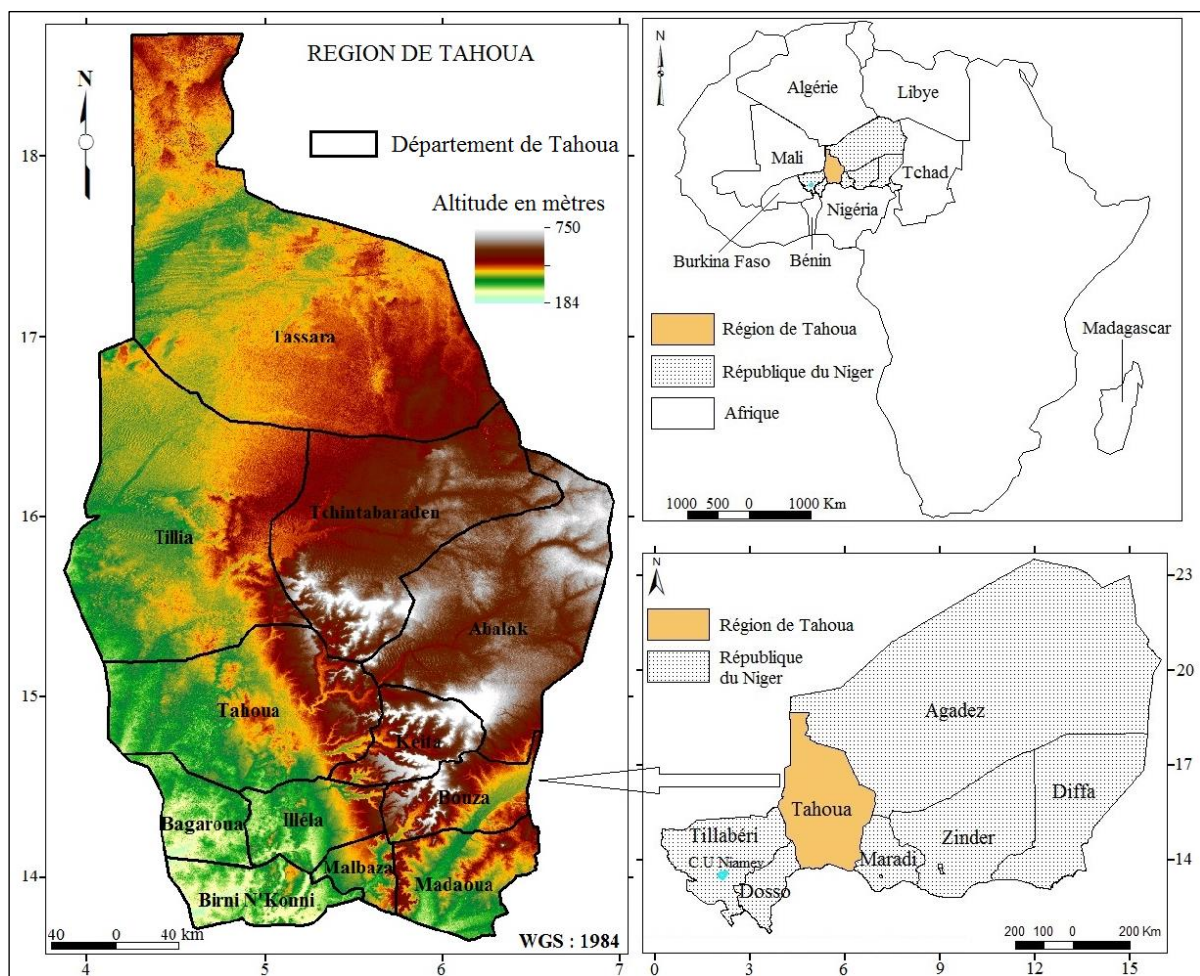


Figure 15 : Localisation de la zone d'étude

1.2.2. Cadre socioéconomique

1.2.2.1. Milieu humain

La population de la région de Tahoua est estimée à 3 328 365 habitants (décembre 2012), dont 1 660 934 hommes et 1 667 431 femmes, avec un taux d'accroissement intercensitaire annuel moyen de 4,6% pour la période allant de 2001 à 2012 (INS-Niger, 2014).

Cette population, est caractérisée par une grande diversité ethnique. Les Haoussa peuplant sa bande sud sont majoritaires, suivis des Touaregs au Nord, puis des Peuls et des Arabes.

Les langues les plus couramment parlées sont l'Haoussa, le Tamasheq et le Fulfuldé.

Sur le plan religieux, l'Islam est pratiqué par plus de 90% des populations de cette zone.

1.2.2.2. Activités économiques

Trois principales activités économiques caractérisent la région de Tahoua :

- **le commerce**, pratiqué sur l'ensemble de la région, par un grand nombre de personnes sans distinction de sexe ni d'âge ;
- **l'agriculture**, pratiquée dans la bande sud de la région (zone sahélienne) caractérisée par des pluviométries comprises entre 300 et 600 mm/an et la présence d'énormes vallées qui ne sont actives que pendant la saison des pluies ;
- **et l'élevage**, pratiqué dans la bande nord (zone sahélo-saharienne) caractérisée par des pluviométries comprises entre 150 à 300 mm/an, voire moins.

1.2.3. Relief

Morphologiquement, la région de Tahoua est caractérisée par deux grands ensembles :

- les zones de plaine, à pente faible, rencontrées dans la partie sud et nord de la région, plus précisément dans le département de Birni N'Konni, au Sud-Est du département de Madaoua, à l'Ouest de celui d'Illéla et de Tahoua, et enfin au Nord dans le Tamesna et l'Azaouagh ;
- les zones de plateau, à pente élevée, sont surtout localisées dans le département de Bouza, de Keita et de Tchintabaraden, présentant des altitudes moyennes pouvant dépasser 700 mètres. Le point culminant est estimé à 750 mètres d'altitude (Fig. 15).

1.2.4. Sols et végétation

1.2.4.1. Sols

La région de Tahoua est recouverte par des sols de type très varié.

On distingue entre autre :

- les sols de type ferrugineux, rencontrés sur les plateaux, où affleurent les formations du Continental Terminal ;
- les lithosols, occupant les parties hautes des vallées, et des affleurements rocheux ;
- les sols hydromorphes, caractéristiques des cuvettes, piégés sur les plateaux ;
- les sols des versants et piémonts, rencontrés aux pieds des plateaux ;
- et enfin, les sols des vallées et des plaines alluviales, rencontrés dans les vallées de Taddis, de Badaguichiri, de Keita, de la Maggia et de la Tarka.

1.2.4.2. Végétation

Le couvert végétal de la région de Tahoua est évidemment en rapport avec le climat et en particulier avec la pluviométrie. Ainsi, on distingue trois types de steppes du Sud au Nord :

- au Sud, jusqu'à l'isohyète 350 mm/an, **la steppe arborée** est constituée de nombreux épineux, quelques palmiers, et euphorbes ;
- dans la zone sahélo-saharienne, vers les isohyètes 200 mm/an, on rencontre **la steppe arbustive** à graminées annuelles ;
- au Sud de la zone saharienne et au-delà, **la steppe à graminées vivaces** fait son apparition, avant de laisser la place à une absence quasi-totale de végétation vers l'extrême Nord de la région de Tahoua.

1.2.5. Hydroclimatologie

1.2.5.1. Climat

On retrouve dans la région de Tahoua trois grandes zones climatiques du Nord au Sud :

- la zone saharienne, au Nord du parallèle 17° de latitude Nord, caractérisée par un cumul pluviométrique annuel inférieur à 150 mm, et des saisons de pluie très courtes (moins d'un mois) ;
- la zone sahélo-saharienne, localisée entre 15° et 17° de latitude Nord et est caractérisée par un cumul pluviométrique annuel compris entre 150 à 300 mm ;
- enfin la zone sahélienne, au Sud du quinzième parallèle de latitude Nord. C'est une zone à forte activité agricole, avec une pluviométrie annuelle élevée, comprise entre 300 à 600 mm.

1.2.5.2. Pluviométrie

Dans le cadre de sa collecte de données pluviométrique, et afin de se doter d'une bonne représentativité des données, le service météorologique du Niger a implanté plusieurs stations pluviométriques dans les villes et quelques villages du Niger en général et de la région de Tahoua en particulier.

Parmi toutes les stations de Tahoua, deux seulement constituent des stations synoptiques, c'est-à-dire permettant de mesurer en même temps plusieurs phénomènes atmosphériques (précipitation, température, vent, humidités, etc.). C'est pourquoi, dans cette étude, seules les données issues de ces deux stations synoptiques de ladite région ont été utilisées. Il s'agit précisément de la station synoptique de Tahoua-ville et de celle de la ville de Birni N'Konni.

1.2.5.3. Température

Les températures moyennes mensuelles de la ville de Tahoua, varient de 22,82° à 36,25°C, avec une moyenne de 29,54°C ($\sigma= 0,74$) pour la période (1951 à 2000). Ces valeurs élevées de température, font classer le Niger parmi les régions les plus chaudes de l'Afrique sahélienne comme Bamako (29°C), Dakar (25°C), N'Djamena (29°C), (Ousmane, 1988). La variation des températures moyennes mensuelles (Fig. 16), laisse observer deux maxima, mai (36,25°C) et octobre (30°C), puis deux minima, août (27,7°C) et janvier (22,8°C).

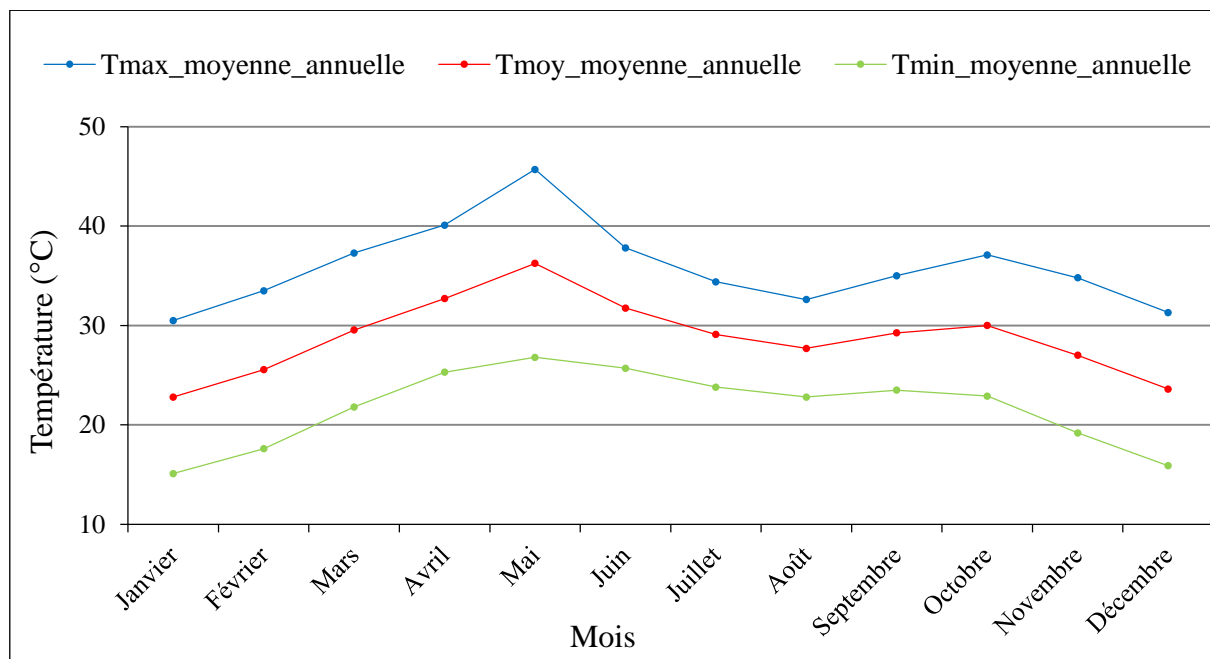


Figure 16 : Variation des températures moyennes mensuelles sur 50 ans (1951 à 2000)

1.2.5.4. Humidité relative de l'air (Hygrométrie)

La région de Tahoua, à l'image des autres régions du Niger, présente une hygrométrie ou humidité relative de l'air qui est régulée par les deux masses d'air connues au Niger. Il s'agit d'harmattan qui est un vent chaud et sec et la mousson, qui est humide. Ces deux éléments, sont dès lors à la base de la variation de l'humidité relative de l'air dans la région de Tahoua au cours de l'année d'une part, au cours des saisons, voire au cours d'une journée.

Dans le département de Birni N'Konni et celui de Madaoua, se trouvant dans la partie sud de la région de Tahoua, le mois d'août correspond au mois où, l'humidité relative atteint sa plus forte valeur (maximum). Son minimum est observé au cours des mois de février à mars.

Par contre, dans la partie nord de la région, on assiste à des maxima qui peuvent s'étendre selon les années entre août à décembre ou bien août à janvier. Les minima quant à eux, sont au nombre de deux et correspondent surtout pour le premier au mois d'avril et d'octobre à novembre pour le second.

1.2.5.5. Hydrographie

Le réseau hydrographique est composé de larges vallées, d'importance stratégique pour les riverains. Les plus importantes se retrouvent dans la bande Sud de Tahoua : la vallée de la Tarka, la vallée de la Maggia, la vallée de Badaguichiri, la vallée de Keita-Bagga (vallée de Zourourou), la vallée d'Abalak-Afala, et enfin la vallée du Tadiss et celle de l'Azaouak, situées respectivement au centre et au Nord de ladite région. Elles ne sont actives que pendant la saison pluvieuse excepté le Tadiss qui est en cours de fossilisation (Fig. 17).

On note également la présence de plusieurs mares temporaires et permanentes dans cette région (DRHAT, 2008), entre autres, la mare d'Alléla, la mare de Fari, la mare Tounfatin, la mare de Bagga, la mare de Kao, la mare d'Eroup, la mare de Tabalak (plus grande mare de la région).

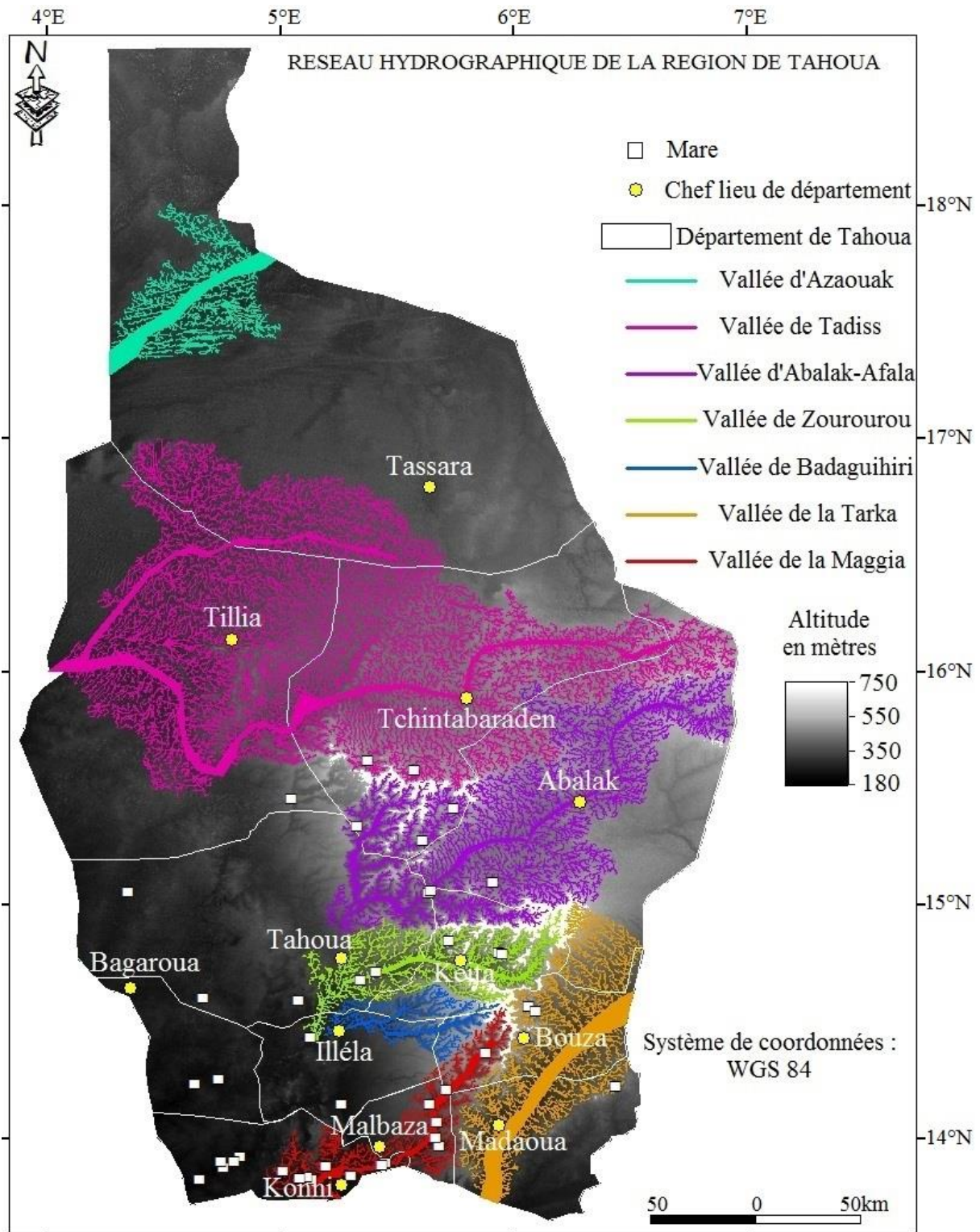


Figure 17 : Réseau hydrographique et différents sous bassin de la zone d'étude

1.2.6. Aperçu géologique

Le contexte géologique de la région de Tahoua, est marquée par une grande diversité de formation géologique, localisées dans des grands bassins sédimentaires (Fig. 18).

Cette diversité, permet de distinguer dans la région, cinq ensembles sédimentaires, du bas en haut les :

- **dépôts continentaux du Crétacé** : Continental Intercalaire (Grès du Tégama d'âge Néocomien à Albien), constitués par des dépôts fluviatiles, lacustres et deltaïques, essentiellement des grès, des sables argileux et des argiles, on note aussi la présence des bois silicifiés et des restes de dinosauriens, de crocodiliens.
Au-dessus et au Sud de ce Continental Intercalaire se trouve, le Continental Hamadien (Crétacé supérieur), constitué essentiellement par des Grès grossiers plus ou moins argileux, rencontrés dans la partie sud de la région ;
- **dépôts marins du Crétacé supérieur** : ils s'agissent plus précisément des formations du Cénomaniens, Turonien et Sénonien. Composées d'argiles, de grès calcaires, de calcaires blancs, d'argiles gypsifères, d'alternances calcaires marines à débris de foraminifères et d'huîtres, et calcaires continentaux à gastéropodes, ostracodes et vertébrés dinosauriens et de marnes fossilifères ;
- **dépôts marins du Paléocène-Eocène** : constitués par des calcaires, des marno-calcaires à operculinoïdes, des marnes et des schistes argileux, de faible profondeur (Guero, 2003) ;
- **dépôts continentaux cénozoïques** : ils correspondent aux dépôts du Continental Terminal, à savoir : le Continental Terminal 1 (CT₁), le Continental Terminal 2 (CT₂), et enfin le Continental Terminal 3 (CT₃). Quant à la dernière formation à savoir le CT₃, elle n'est présente que sur une petite portion de la région de Tahoua. Elle est observée de façon très modeste dans les départements de Birni N'Konni, Illéla, Tahoua et Bagaroua. selon (Kilian, 1931 cité par Guero, 2003), le Continental Terminal désigne toutes les formations détritiques quartzo-kaoliniques à faciès sidérolitiques d'âge post-Eocène moyen et anté-Quaternaire ;
- **enfin les dépôts quaternaires** : ils sont constitués par des dunes fixées recouvrant indifféremment les formations sous-jacentes crétacées et tertiaires, des dunes vives dans la partie nord de la région, et d'alluvions des vallées de la région de Tahoua (Guero, 2003).

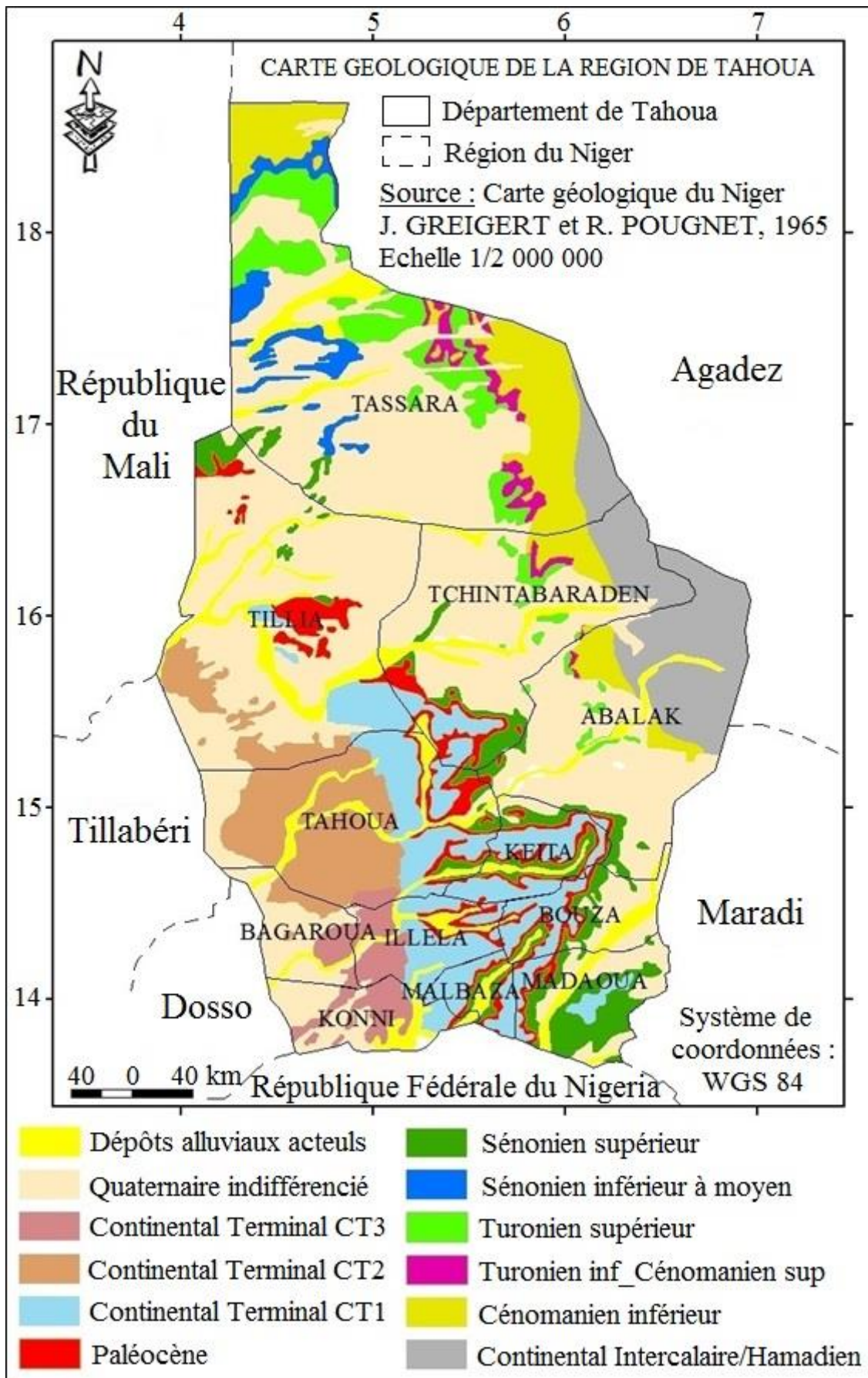


Figure 18 : Carte Géologique de la Région de Tahoua

1.2.7. Hydrogéologie

L'hydrogéologie de la région de Tahoua se présente également avec cinq unités aquifères conformément à sa géologie, les unes plus importantes que les autres. On distingue du bas en haut : les aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H), les aquifères du Crétacé supérieur marin, les aquifères paléocènes, les aquifères du Continental Terminal (CT), et enfin les aquifères quaternaires (Fig. 19).

1.2.7.1. Aquifères du Continental Intercalaire/Hamadien

Ils constituent la ressource en eau souterraine la plus exploitée pour l'alimentation en eau potable de la population de Tahoua, du bétail et des industries extractives. Ils sont libres à l'Est de l'axe Tassara-Abalak et peuvent être captés à moins de 100 mètres de profondeur avec des niveaux statiques d'environ 75 mètres. Par contre, ces aquifères sont captifs sur l'ensemble de la région à l'Ouest du même axe Tassara-Abalak.

Ils se présentent avec des profondeurs de captage qui augmentent de plus en plus vers l'Ouest pour atteindre plus de 800 mètres dans la commune de Takanamat (département de Tahoua). Un niveau statique qui varie localement d'environ 200 mètres de profondeur à jaillissant vers le champ de captage de la SEEN de Birni N'Konni.

Les plus importants débits sont connus dans la partie sud de la région, avec des débits pouvant atteindre $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, des transmissivités de l'ordre de $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ contrairement à la partie nord à faible transmissivité, de l'ordre de $1 \cdot 10^{-3}$ à $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et des débits inférieurs à $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Deux principaux sens d'écoulement ont été identifiés pour les eaux dans le Continental Intercalaire/Hamadien, l'un de direction Est-Ouest et l'autre évoluant du Nord vers le Sud à Sud-Ouest.

1.2.7.2. Aquifères du Crétacé Supérieur Marin

Les aquifères du Crétacé supérieur marin, d'extension limitée, captage moins profond, débits dérisoires et une forte minéralisation faisant d'eux des aquifères non sollicités.

1.2.7.3. Aquifères du Paléocène Marin

Les aquifères du Paléocène, ils sont connus dans des couches calcaires, d'extension limitée, captage moins profond et des débits faibles. Cependant ils peuvent constituer des aquifères importants quand ils sont implantés en proximité d'une vallée, en présence des nappes alluviales au toit des calcaires ou en contacte d'une karstification importante.

Chimiquement, les eaux paléocènes se classent en deux familles : bicarbonatée calcique en proximité d'une nappe alluviale et sulfaté sodique près ou loin des zones d'alimentation (Greigert, 1978).

1.2.7.4. Aquifères du Continental Terminal

Les aquifères du Continental Terminal (CT), à système aquifères multicouches, subdivisé en trois horizons aquifères CT₁ et CT₂ captifs et CT₃ libre. Seules les nappes du CT₁ et CT₂ sont exploitables sur la région de Tahoua, avec des débits pouvant atteindre 25 m³.h⁻¹ dans le département de Bagaroua (CT₂), voire plus dans celui de Birni N'Konni (CT₁).

Chimiquement on note la présence des teneurs élevées en fer dans les eaux du secteur de Bagaroua captant bien sûr les nappes du CT₂.

1.2.7.5. Aquifères quaternaires

Il s'agit des nappes alluviales contenues dans les alluvions et colluvions de la vallée de la Tarka, de la vallée de la Maggia, de la vallée de Bada Guichiri, de la vallée de Keita, et enfin de la vallée de Tadiss.

Les aquifères du Quaternaire, présentent un intérêt particulier dans la bande Sud de la région. Ils sont de faible profondeur de captage (inférieurs à 10 mètres souvent), et conviennent pour les plantes irriguées.

Malheureusement, ces dernières années, ils sont très menacés du fait de l'utilisation intensive d'engrais chimique et pesticides comme moyen de fertilisation des terres agricoles.

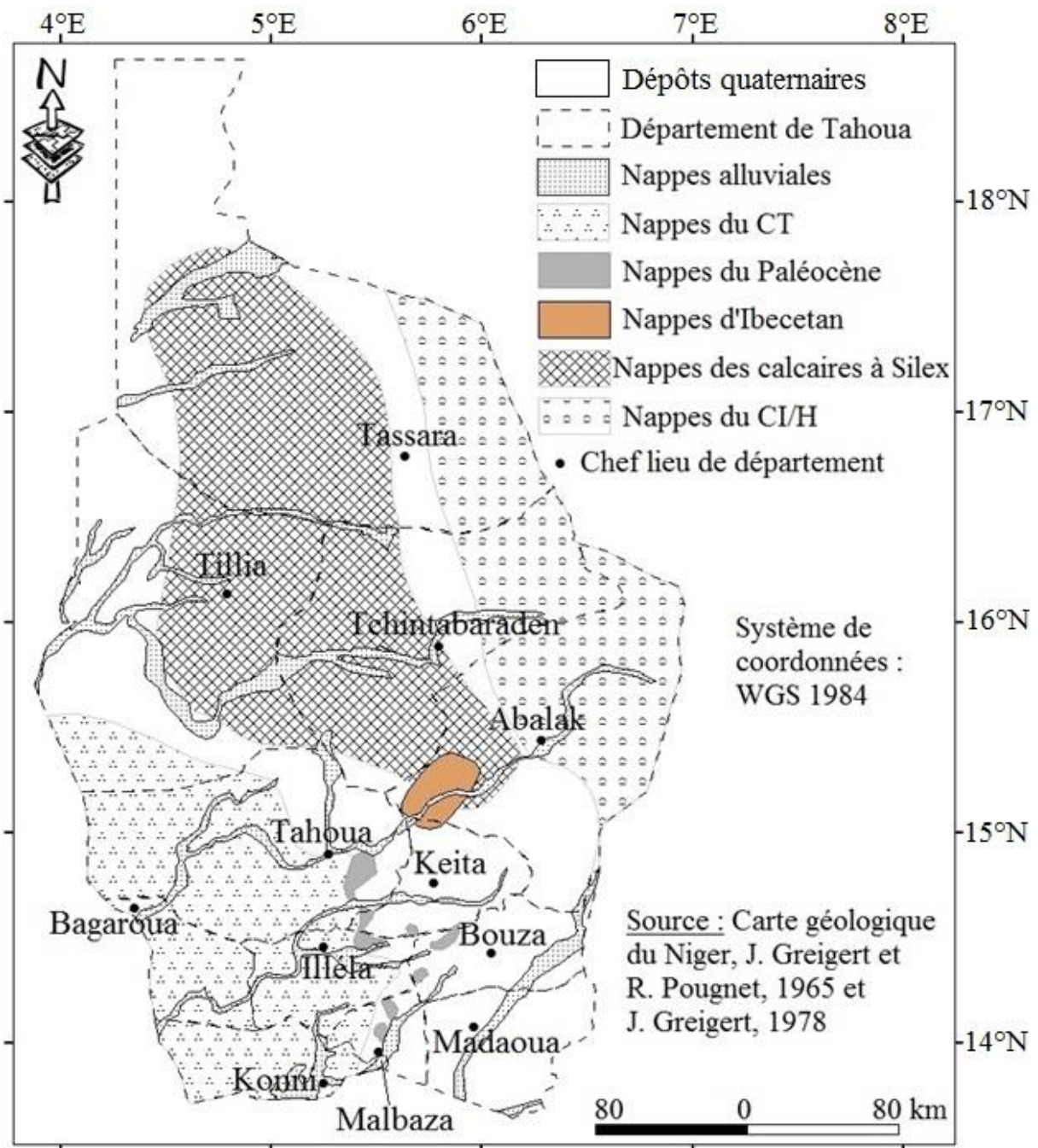


Figure 19 : Carte des aquifères dans la Région de Tahoua

CHAPITRE II :
MATERIEL ET METHODES

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

2.1. CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

2.1.1. Matériel

Le matériel climatique (données climatiques) porte sur :

- les hauteurs journalières de pluies, de 1951 à 2012, de la station synoptique de Tahoua-ville et de celle de Birni N'Konni ;
- le nombre de jours de pluie par an, de 1951 à 2012, de la station synoptique de Tahoua-ville et de celle de Birni N'Konni ;
- les températures journalières (minimales et maximales), de 1950 à 2007, excepté les mesures de 2001 et 2002, de la station synoptique de Tahoua-ville ;
- l'humidité relative moyenne mensuelle de l'air (minimale et maximale), de l'année 2016, de la station de Tahoua-ville ;
- enfin, la vitesse et la direction moyenne mensuelle des vents pour l'année 2016, au niveau de la station synoptique de Tahoua-ville.

2.1.2. Méthodes de traitement des paramètres climatiques

Le traitement des données climatiques a été fait en grande partie à base du tableur Excel 2010 et du logiciel d'analyse statistique 'Statistica'. Ce tableur et ce logiciel ont permis d'une part :

- de déterminer les hauteurs moyennes mensuelles et moyennes annuelles des précipitations ;
- d'élaborer des graphiques montrant les variations spatio-temporelles des hauteurs moyennes des précipitations ;
- d'élaborer des graphiques montrant l'évolution de la température moyenne sur un intervalle de 50 ans (1951 à 2000) ;
- d'établir des diagrammes ombrothermiques, mettant en relation les précipitations mensuelles et les températures mensuelles de la zone d'étude ;

et d'autre part, de tracer des graphiques de variation temporaire et spatiale sur l'ensemble de la zone d'étude.

L'indice d'aridité I, a été calculé grâce à l'équation de De Martonne (De Martonne, 1926), qui permet la caractérisation du degré d'aridité dans une zone donnée. Il est obtenu à partir de l'équation (1) ci-dessous :

$$I = \frac{P}{(T+10)} \quad (1)$$

Avec,

I = indice d'aridité de De Martonne,

P = précipitation moyenne annuelle (mm),

T = température moyenne annuelle en °C.

La classification de l'indice d'aridité de De Martonne permet d'identifier plusieurs types de climat (Tableau 3).

Tableau 3 : Relation entre indice d'aridité et types de climat selon De Martonne (De Martonne, 1926)

Classement de l'indice d'aridité	Types de climat
I < 5	Région hyperaride
5 < I < 10	Région aride
10 < I < 20	Région semi-aride
20 < I < 30	Région semi-humide
30 < I < 55	Région humide

2.2. HYDROGEOLOGIE DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/ HAMADIEN

2.2.1. Matériel

2.2.1.1. Données

Les données utilisées de cette étude sont très diverses. Il s'agit, entre autres : des données hydrogéologiques, des fonds cartographiques, des fonds documentaires, des données géologiques, des données de diagraphie, des données d'essai de pompage, et des paramètres hydrodynamiques.

2.2.1.1.1. Données hydrogéologiques

Les données géologiques et hydrodynamiques concernent :

- plus de trois cents données de forages d'eau (coordonnées géographiques, débit maximal, niveau statique, rabattement, etc.), repartis sur l'ensemble de la région de Tahoua. Tous captent les nappes du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua ;
- plus de soixante-dix coupes techniques et lithologiques de forages d'eau de la zone ;
- une quarantaine de fiches de diagraphie avec les mesures des paramètres dont la résistivité, le gamma ray et le log de polarisation spontanée (PS).

2.2.1.1.2. Fonds cartographiques

Les fonds cartographiques concernent :

- les cartes topographiques IGNF au 1/200000 des départements d'Abalak, de Bagaroua, de Birni N'Konni, de Tahoua et de Tchintabaraden, datant de 1963 ;
- la carte géologique de la République du Niger, au 1/2 000 000 d'après J. Greigert et R. Pougnet (1965), éditée par BRGM Paris-France ;
- la carte des systèmes aquifères du Niger, Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement du Niger ;
- le modèle numérique de terrain (MNT) du Niger (téléchargé sur le site de l'USGS), avec une résolution de 30 mètres ;
- les cartes thématiques issues des rapports des travaux antérieurs.

2.2.1.1.3. Fonds documentaires

Les fonds documentaires sont constitués :

- des rapports de thèse et articles scientifiques portant sur la même thématique dans la zone d'étude, au Niger et ailleurs ;
- des documents généraux et méthodologiques portant sur le contexte géologique et hydrogéologique de la zone d'étude et du bassin en général ;
- de rapport technique des travaux de réalisation de vingt-quatre forages profonds en 2010, dans le cadre du projet d'hydraulique villageoise dans la région de Tahoua ;
- de rapport technique des travaux de réalisation, d'équipement et de raccordement de vingt forages, gros diamètres, en 2015, dans le cadre du projet de renforcement et d'extension des réseaux d'AEP dans dix-huit centres secondaires de la SPEN au Niger ;
- des rapports techniques de campagne de réalisation des ouvrages hydrauliques dans la zone d'étude, dans la région d'Agadez, de celle de Dosso et de Maradi.

2.2.1.2. Outils

Plusieurs outils ont été utilisés au cours des différentes activités de terrain. Il s'agit entre autres de : appareils de diagraphie et pompes.

2.2.1.2.1. Appareils de diagraphie

Les équipements utilisés pour l'enregistrement des logs diagraphiques sur le terrain se résument à :

- une sonde PS, Résistivité couplée à un Gamma-Ray, longueur 2,5 mètres ;
- un appareil de mesure électronique MicroLogger II ;
- un treuil avec 1600 mètres de câble métallique ;
- un transformateur 220V/12V ;
- un variateur de vitesse et inverseur de sens de marche du moteur du treuil ;
- un ordinateur avec prise USB.

2.2.1.2.2. Pompes utilisées

Les opérations de soufflage et des essais de pompage de courte et de longue durée ont été réalisées en utilisant les outils suivants :

- un compresseur Atlas Copco XRVS 455 et XRHS 385 sur camion, d'une capacité maximale de 300 mètres, en 8''1/2 ;
- un servicing de colonne double tube, pour le développement et le pompage des petits forages, de moins de 200 mètres de profondeur ;

- des pompes de marque GRUNDFOS, entièrement en acier inoxydable AISI 304, prévues pour fonctionner en triphasé 400V-50Hz, démarrage direct, utilisées pour pomper les forages à gros débits.

2.2.2. Méthodes

L'approche méthodologique adoptée dans cette étude consiste à :

- élaborer des cartes isohypses des profondeurs équipées des forages, des logs litho-stratigraphiques et établir des corrélations entre ces derniers pour faire ressortir les profondeurs moyennes de captage, les épaisseurs moyennes et l'agencement des différents réservoirs, les zones d'affleurement et les limites d'extension des aquifères, enfin définir la stratigraphie des couches forées. Ceci passe par le suivi permanent sur le terrain des opérations de foration et de diagraphie, et le traitement des données ;
- élaborer des cartes piézométriques, basées sur l'inventaire exhaustif des mesures des niveaux statiques, afin de déterminer les sens d'écoulement des eaux du CI/H ;
- caractériser les paramètres hydrodynamiques et comprendre les mécanismes contrôlant la circulation des eaux et l'hétérogénéité des débits spécifiques des réservoirs du CI/H, ce qui exige nécessairement la réalisation des opérations d'essai de pompage de courte (paliers de 2 heures) et de longue (48 à 72 heures) durée ;
- construire un modèle hydrogéologique pour tester les temps de transfert des eaux du système aquifère du CI/H et faire des comparaisons avec les différents temps de séjours obtenus par la datation ^{14}C et ^{36}Cl pour ces mêmes eaux du CI/H.

2.2.2.1. Etablissement des logs et coupes litho-stratigraphiques

Au cours des réalisations des forages d'eau dans la région de Tahoua (Planche 1), les débris des différentes couches forées sont récupérés, mètre par mètre. Ces derniers sont classés *in-situ* sous forme de tas (cuttings) dans des sachets plastiques, et/ou des casiers métalliques, dans l'ordre de succession des couches traversées. Le but de l'utilisation de ces casiers métalliques ou sachets plastiques, consiste à garantir une bonne protection des cuttings contre les poussières, une éventuelle erreur dans l'ordre de classement ou encore pour des utilisations ultérieures.

Tout au long de l'opération de forage, ces cuttings sont analysés macroscopiquement mètre par mètre *in-situ*. Leurs caractéristiques minéralogiques (observées macroscopiquement) et litho stratigraphiques sont étudiées. A la fin de cette phase d'analyse macroscopique des cuttings, des logs lithologiques du terrain foré sont dressés, pour chaque forage.

Les logs litho stratigraphiques, une fois élaborés, renseignent sur la nature des différentes couches (argiles, calcaires, sables, grès, etc.) qui composent les terrains forés.

Ils permettent également une bonne identification des couches réservoirs.

Cependant, un bon log doit prendre en compte les enregistrements diagraphiques, ainsi que les mesures des vitesses de foration enregistrées pour chaque type de couche forée. Ce fut le cas dans cette étude, d'où la fiabilité des logs et coupes élaborés dans le cadre de ces travaux de thèse.

Suivant des profils donnés, des corrélations ont été faites entre les logs litho stratigraphiques ainsi réalisés. Ces corrélations ont permis de faire ressortir les éventuelles relations qui pourraient exister entre les différentes couches et différents réservoirs du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la zone d'étude.

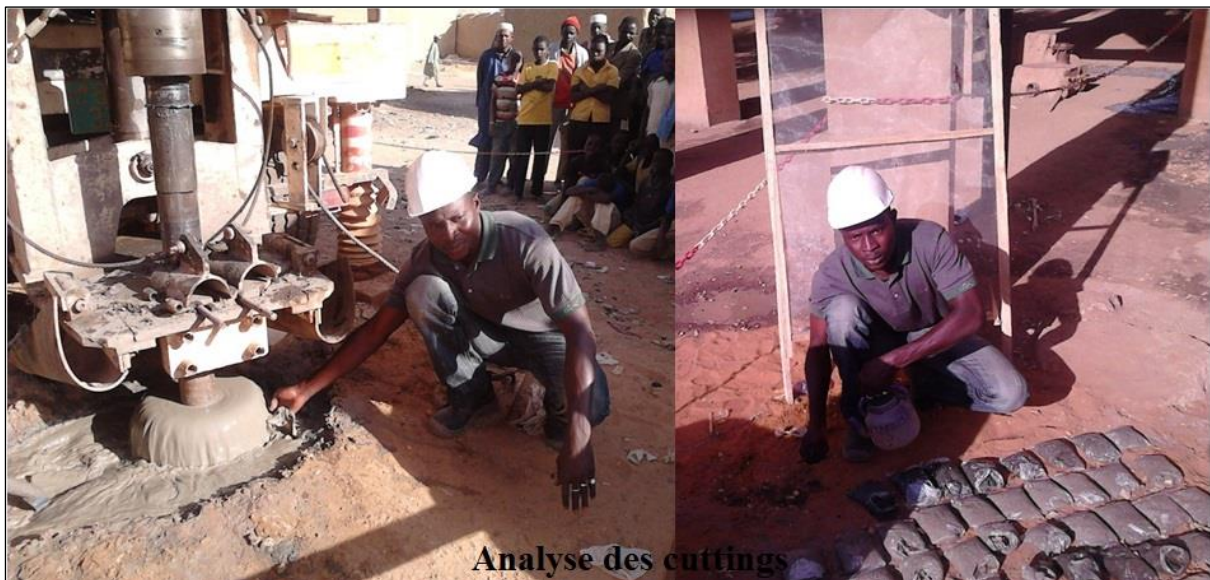


Planche 1 : Analyse des cuttings pour l'élaboration des logs et coupes lithostratigraphiques

2.2.2.2. Diagraphie

La diagraphie, ou "logging", est une technique d'enregistrement continu des paramètres physiques (résistivité, radioactivité naturelle (gamma ray), polarisation spontanée) dans un forage en fonction de la profondeur.

Les opérations de diagraphie (Planche 2), menées dans le cadre de cette étude ont été réalisées à la fin de la foration (on parle de diagraphie différée). Le principe, consiste à descendre dans le trou du forage avant tubage, l'outil de mesure, sonde connectée à un câble électrique. La stabilité de ce dernier, à l'intérieur du trou, est assurée par le fluide de foration.

L'importance des opérations de diagraphie est liée à la localisation des différentes zones productrices d'eau avec une grande précision. Ceci permet donc, de pouvoir définir un bon plan de captage du forage (position des crépines et pied de casing pour les ouvrages profonds). En outre, les informations issues de la diagraphie couplées aux informations des cuttings permettent la réalisation de bons logs litho-stratigraphiques.



Planche 2 : Opération de diagraphie (Tahoua)

2.2.2.3. Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères du CI/H

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères passe tout d'abord par des opérations de développement du forage d'eau dans un premier temps, suivi par des opérations d'essais de pompage de courte durée et de longue durée.

2.2.2.3.1. Développement du forage

Le développement d'un forage est une opération qui consiste à mettre en production le forage d'eau, après son équipement. C'est une phase indispensable dans l'exécution d'un forage, car permettant les différentes opérations de nettoyage de l'ouvrage au niveau de la zone de captage. Elle est destinée entre autres à :

- prévenir un colmatage prématuré et stabiliser la formation autour du forage ;
- "exciter" le réservoir ;
- améliorer la productivité du forage et obtenir une eau claire et exempte de sable.

Il existe plusieurs procédés de développement d'un forage d'eau. Dans le cadre de cette étude, le procédé de développement utilisé est le surpompage.

Il consiste à pomper par paliers successifs de débits croissants, jusqu'à ce que, le régime final corresponde à la capacité maximale des matériels utilisés (pompes, groupes électrogènes ou toutes autres sources d'énergie).

Les autres procédés de développement sont le développement par pompage alterné (arrêts brusques et redémarrages), et le développement par traitement chimique (à l'acide ou aux poly-phosphates).

2.2.2.3.2. Essais de pompage par paliers (courte durée)

Les essais de pompage par paliers ont été réalisés par des paliers discontinus de 2 heures chacun à débit constant par palier. Les rabattements et les débits sont mesurés au fur et à mesure du pompage et cela jusqu'à la fin du palier et de même pour les paliers suivants.

A la fin de chaque palier de 2 heures de pompage, un arrêt d'une durée de 2 heures également est observé, pour permettre de suivre la remontée du niveau d'eau. Le niveau d'eau d'un puits ou d'un forage, correspond tout simplement à la distance, du sol au plan d'eau. On parle de niveau statique (NS) quand ce dernier est en équilibre naturel dans un ouvrage (piézomètre, forage ou puits) d'après Castany (2000).

Quatre paliers ont été réalisés pour chaque forage avec des débits croissants (Q débit du premier palier, $Q_1 = 2Q$ débit du deuxième palier, $Q_2 = 3Q$ débit du troisième palier et $Q_3 = 4Q$ débit du quatrième palier.).

A la fin de chaque palier, le débit du palier suivant est réglé automatiquement et ainsi de suite jusqu'à la fin des quatre paliers. Ceci permet d'éviter toutes perturbations éventuelles du palier suivant. Les essais de pompage par palier permettent un accès à des données comme le rabattement maximal, le débit maximal, les pertes de charge linéaires et quadratiques, le débit spécifique, etc. Ce dernier (débit spécifique) étant le débit que peut fournir un aquifère par mètre de rabattement, constitue de ce fait un paramètre très efficace pour l'évaluation de la productivité des nappes.

2.2.2.3.3. Essais de pompage de longue durée

L'essai de pompage (longue durée) est exécuté avec un seul palier et à débit constant pendant des nombreuses heures, voire des jours (Planche 3). La durée des pompages effectués dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua, varie en fonction des profondeurs des forages : de 48 heures par forage, pour les forages de profondeur inférieure ou égale à 400 mètres de profondeur, et de 72 heures par forage pour les forages de profondeur supérieure à 500 mètres de profondeur.

Ces durées ne sont pas très souvent respectées, à cause des incidents qui peuvent surgir (panne brusque sur la pompe ou le groupe électrogène). La remontée du niveau d'eau dans le forage est observée pendant une durée d'au moins 12 heures après arrêt du pompage pour chaque forage.



Planche 3 : Opération des essais de pompage dans le Continental Intercalaire/Hamadien

Les données des neuf essais de pompage de courte et de longue durée, réalisés au cours de cette étude, dans la région de Tahoua, dans le cadre du projet eau et assainissement en milieu urbain (PEAMU – SPEN – 2015) ont été traitées par la méthode semi-logarithmique de Jacob (annexe 8 et 9).

2.2.2.4. Traitement des données

2.2.2.4.1. Etablissement des cartes piézométriques

La principale source d'alimentation en eau potable de la région de Tahoua est constituée par les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, à partir de forages pompés presque en continu.

Ceci s'explique par la rareté des eaux de surface et des eaux souterraines de faible profondeur, qui ne peuvent satisfaire une demande qui croit de façon fulgurante.

C'est pourquoi il est difficile, voire impossible d'arrêter le pompage d'un forage dans la zone, d'observer un temps de remontée du niveau statique de l'eau, et de prétendre le mesurer. D'autre part, l'absence d'orifice de mesure (forages fermés et non équipés d'un trou de mesure) ne permet pas d'effectuer des campagnes piézométriques efficaces sur une telle zone d'étude, ne disposant pas de piézomètres.

C'est pourquoi, cette étude a dû se contenter des mesures piézométriques réalisées, au cours des opérations d'essais de pompage effectuées à la réalisation des forages. On note, d'après la carte piézométrique du Continental Intercalaire/Hamadien (Greigert, 1978) pour le bassin des Iullemeden, complétée par Margat (1982), et partiellement par Bonnier et al. (1992) cité par l'OSS (2007), et les données piézométriques de Guero (2003), de très faibles variations du niveau piézométrique.

Pour être plus précis, il a été comparé des mesures piézométriques effectuées sur des forages deux à deux, situés dans un même champ de captage et proche l'un de l'autre (moins de 50 mètres), dans plusieurs champs de captage, mesuré (le niveau statique) à des périodes différentes (années 1960 à 1970 pour les premiers et années 2000 à 2010 pour les seconds points d'eau). A l'issue de cette comparaison, il s'avère que la différence du niveau d'eau dans les forages réalisés pendant les années 60 et ceux réalisés pendant les années postérieures à 2000 ou même 2010, ne dépasse pas trois mètres dans l'ensemble.

Ainsi, au vu de tout ce qui précède, les calculs des côtes piézométriques du système aquifère Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua ont été faits sur la base des anciennes et des nouvelles mesures de niveau statique, pour avoir une bonne couverture piézométrique. Les côtes piézométriques sont obtenues, par la différence entre les altitudes des points d'eau (obtenues à partir des MNT, avec une résolution de 30 mètres) et les valeurs de leurs niveaux statiques.

La zone d'étude est vaste (114 425 km² environ), sans nivellement, et, pour la plupart des points d'eau, les côtes ne sont pas disponibles. Aussi, il a été nécessaire de faire recours à des sites et logiciels comme, Earthexplorer et ArcGis, pour pouvoir générer les valeurs d'altitudes pour tous les forages dont les longitudes et latitudes sont bien connues.

Pour se faire, la démarche suivante a été adoptée :

- enregistrement sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov/>, en premier lieu :

- ✓ zoom sur la zone d'étude ; dans "data sets", choisir les coordonnées des quatre points qui englobent la zone d'étude ;
- ✓ dans "digital elevation", choisir "ASTER global DEM" ;
- ✓ et enfin télécharger tous les DEM (Digital Elevation Map).
- sur ArcMap :
 - ✓ effectuer le mosaïquage des différents DEM :
"data management tools" -> "raster" -> "raster data set" -> "mosaic to new raster" ;
 - ✓ après le mosaïquage, introduire toutes les coordonnées (longitudes et latitudes) dans le logiciel ;
 - ✓ demander au logiciel de générer toutes les altitudes correspondantes à chaque point de coordonnées (X, Y) par la méthode suivante :
"arctoolbox" -> "3D analyst tools"-> "functional surface" -> "add surface info".

2.2.2.4.2. Etablissement des logs lithostratigraphiques et coupes géologiques

L'établissement des logs litho-stratigraphiques des différents forages passe tout d'abord par le traitement macroscopique des cuttings issus des différents forages, des logs de diagraphie et l'étude des vitesses de foration des différentes couches traversées, avant de recourir aux logiciels.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs logiciels ont été utilisés pour élaborer des logs lithostratigraphiques, dont, entre autres, les logiciels 'Forages' et/ou Adobe Illustrator. Après la réalisation des logs litho-stratigraphiques, des corrélations ont été réalisées entre ces différents logs, suivant des profils donnés, et c'est le logiciel de dessin Adobe Illustrator CS6 qui a été utilisé pour cette tâche. Le logiciel de cartographie ArcGis 10.2.2 a été utilisé, quant à lui, pour les calculs de distance séparant les différents logs lithostratigraphiques retenus pour les corrélations.

2.2.2.4.3. Etablissement de modèle hydrogéologique avec Processing Modflow (V.5.3.1)

La construction d'un modèle hydrogéologique dans cette étude, a pour but de tester les temps de transfert des eaux dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien et faire des comparaisons avec les différents temps de séjours obtenus par la datation ^{14}C et ^{36}Cl pour ces eaux.

La démarche adoptée pour ce travail comprend plusieurs étapes dont entre autres :

- la définition du nombre de couche que doit comporter le modèle ;
- la discrétisation de l'espace à simuler et la construction d'une grille représentative ;
- la définition des paramètres physiques (géométrie des couches, et conditions aux limites) ;
- la préparation des données hydrogéologiques d'entrée et de référence (alimentation, piézométrie, pompage, et perméabilité) ;
- enfin, les tests de calage.

a. Schéma hydrogéologique du modèle

La structure générale adoptée pour ce nouveau modèle, comprend trois (3) couches de caractéristiques hydrogéologiques bien différentes, contrairement au modèle de l'OSS (2008) basé sur deux couches, séparées par une couche quasiment imperméable : deux couches aquifères sans discontinuité hydraulique au sein de chacune d'elles et une troisième couche localement aquifère (les formations du Crétacé supérieur marin et du Paléocène), intercalée entre les deux premières couches aquifères. Ces trois couches se disposent de la façon suivante du haut en bas, comme suit.

Complexe Continental Terminal (couche 1)
Complexe Crétacé supérieur marin (couche 2)
Continental Intercalaire/Hamadien (couche 3)

b. Maillage

La zone modélisée, le bassin des Iullemeden, est un grand bassin sédimentaire transfrontalier, partagé entre le Niger, le Nigeria et le Mali principalement (y compris le Benin et l'Algérie) avec une superficie de l'ordre de 510.000 Km², et une réserve globale estimée à environ 2000 Km³ (OSS, 2017).

Elle est discrétisée dans cette étude en une grille de 200 x 200 mailles, représentant un maillage carré régulier de 5 x 5 km comme pas de longueur, soit au total 40.000 mailles carrées pour l'ensemble de la grille. La particularité de ce modèle comparativement à celui élaboré par OSS (2008) réside d'une part au faible pas de maille utilisé à savoir 5 x 5 km, contre 10 x 10 km pour l'OSS, d'autre part à l'importance des données qui sont instructives dans ce nouveau modèle.

Ainsi pour chaque couche prise individuellement, nous avons le nombre de mailles suivant :

- Complexe Continental Terminal : 8 587 mailles ;
- Complexe Crétacé Supérieur marin : 10 466 mailles ;
- Continental Intercalaire/Hamadien : 18 299 mailles.

Le bassin des Iullemeden, en dehors de sa gigantesque superficie, présente une structure et une géométrie extrêmement compliquées. La construction de la géométrie du modèle a été très laborieuse. Nous avons travaillé sur plusieurs logiciels, avec des étapes longues et complexes, de multiples essais corrigés, sans arriver à un résultat satisfaisant.

La complexité de la géométrie du bassin à modéliser (Iullemeden) a fait que, la création de la géométrie des couches et des conditions aux limites, et de la grille du modèle du bassin des Iullemeden, a été rendu possible grâce au couplage du logiciel ArcGis et Surfer. Le fichier grille modèle, est ensuite exporté vers le logiciel Matlab, où, il est converti en matrices, pour être utiliser sur Modflow.

Sur Pmwin, un nouveau modèle est créé à travers "New Model" et dans "Grid" -> "Mesh Size" une dimension (nombre de couches, nombre de colonnes et largeur de chaque colonne, nombre de lignes et largeur de chaque ligne) est définie pour le modèle. Le modèle, ici, comprend trois couches, avec 200 colonnes de 5 km de large chacune, 200 lignes de 5 km de large chacune.

Dans l'onglet "options", puis "Environment", la position de la grille et la taille de feuille de travail sont renseignées, avant de définir le type de nappe (libre et/ou confinée) dans "Grid" -> "Layer type".

Les conditions aux limites, peuvent être renseignées dans "Grid" -> "Boundary conditions" -> "IBOUND (Modflow) ".

Dans cette étude, c'est plutôt la méthode de tableur matrix qui a été utilisée, comme évoquée ci-haut.

Elle consiste à modifier la valeur des cellules représentées non pas sous forme de grille mais sous forme de tableur. Le tableur matrix étant déjà élaboré sur Matlab, il ne reste plus qu'à l'importer sur Modflow suivant l'onglet "Value" -> "Matrix". Les altitudes du haut et du bas des couches étant déjà renseignées dans Modflow à travers la géométrie du bassin élaborée par interpolation grâce aux logiciels ArcGis et Surfer, alors il ne reste plus qu'à renseigner à présent les charges hydrauliques initiales.

Les charges hydrauliques initiales sont renseignées dans l'onglet "Parameters" -> "Initial Hydraulic Heads" -> "Horizontal Hydraulic Conductivity" et pour finir, la simulation Modflow est lancée à travers : "models" -> "MODFLOW" -> "run".

2.3. HYDROCHIMIE DES EAUX DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN

2.3.1. Matériel

Le matériel, utilisé dans le cadre de cette étude, comprend l'ensemble des données bibliographiques et celles recueillies sur le terrain et au laboratoire après analyses des différents échantillons d'eau.

2.3.1.1. Données physicochimiques

Les données physicochimiques portent sur cinquante-neuf échantillons pour lesquels sont analysés des ions majeurs, ainsi que des dosages de fer total, de fluorure et des nitrites.

2.3.1.2. Outils

Il s'agit, entre autres, des flacons et bouteilles d'échantillonnage, des petits équipements de terrain et de laboratoire et les logiciels.

2.3.1.2.1. Flacons et bouteilles d'échantillonnage

L'échantillonnage d'eau de forages ou de puits, destiné à des analyses physicochimiques au laboratoire, est une étape critique. La réussite d'une telle opération dépend en grande partie des différents outils utilisés pour l'échantillonnage et du respect du protocole de prélèvement. C'est pourquoi dans cette étude, divers flacons et bouteilles bien adaptés ont été utilisés (Planche 4), entre autres :

- des flacons en polyéthylène de 125 mL, pour les analyses des anions et des cations lors de la première campagne d'échantillonnage d'eau (septembre 2016) ;
- des piluliers en verre ambré de 10 mL, pour les analyses des ions majeurs au cours de la deuxième campagne d'échantillonnage d'eau (mai 2017).



Planche 4 : Flacons et bouteilles d'échantillonnage

2.3.1.2.2. Petits équipements de terrain

Les petits équipements utilisés *in situ* au cours des différentes campagnes d'échantillonnage d'eau de forages et de puits sont composés :

- d'un pH-mètre portatif, de mesure du pH et de la température de l'eau, de type WTW 330i ;
- d'un conductimètre portatif, de mesure de la conductivité de l'eau, de type WTW 330i ;
- des filtres de 0,45 micromètres de diamètre de pore, pour filtrer toutes les eaux de puits et de forages destinées aux analyses des ions majeurs ;
- des glacières (thermos et glaces), pour la conservation dans de meilleures conditions des échantillons d'eau, très rapidement acheminés au laboratoire GEOPS, pour les analyses chimiques ;
- d'un bécher pour le prélèvement d'eau, destiné à la détermination des paramètres physiques de l'eau (pH, t°, CE), *in situ* ;
- des fiches de notes et des questionnaires adressés à certaines personnes ressources ;
- des solutions d'acide sulfurique concentré : deux à trois gouttes de cette dernière ont été versées dans chaque échantillon destiné aux analyses des cations, en prévention des éventuelles variations des concentrations initiales qui pourraient subvenir dans certaines eaux ;
- des seringues et des filtres, pour filtrer les eaux des échantillons destinés à l'analyse des ions majeurs ;
- du ruban adhésif, pour fermer hermétiquement les bouchons des flacons et piluliers, afin de limiter les échanges avec le milieu extérieur, et une éventuelle contamination dans les glacières ;
- d'un GPS portatif, pour retrouver les chemins sur le terrain, mais surtout pour prendre les coordonnées géographiques des différents points d'eau échantillonnés.

2.3.1.2.3. Equipements de laboratoire pour la chimie

Les analyses chimiques, dans le cadre de cette thèse ont été réalisées au laboratoire Géosciences Paris-Sud (GEOPS) de l'Université Paris-Sud, et les équipements utilisés sont les suivants :

- un spectromètre d'absorption atomique : AAS 240 FS de marque Varian, pour les dosages de cations ;

- un chromatographe ionique de marque Dionex, dont la colonne de séparation est constituée par une résine échangeuse d'anions, pour le dosage des anions ;
- des petits outils de laboratoire (indicateur coloré, bécher, agitateur magnétique, burette graduée, chronomètre, gants, lunettes, etc.) ;
- des solutions chimiques de laboratoire (solutions d'acide chlorhydrique, d'acide nitrique, etc.).

2.3.1.2.4. Logiciels

Après la phase de collecte de données et les analyses chimiques au laboratoire, plusieurs outils informatiques et logiciels ont été utilisés pour le traitement de ces dernières.

Parmi ces logiciels, on peut retenir :

- des logiciels d'hydrochimies PhreeqC et « Diagrammes », développé par le laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon-France, pour le traçage des diagrammes de Piper, Schöeller Berkloff, Stiff, et les calculs des indices de saturation vis-à-vis de la calcite, de la dolomite, du gypse, de la halite, ainsi que le calcul de la balance ionique des différents échantillons d'eau ;
- des logiciels d'analyse statistique « R i386 3.3.1 » et « Statistica », pour effectuer les analyses statistiques ;
- des logiciels de dessin « Adobe Illustrator CS6 », « photo Filtre 7 » et « Paint », pour retoucher les graphiques ;
- des logiciels de cartographie « ArcMap 10.2.2 », et « Surfer 10.1 », pour l'élaboration des différentes cartes ;
- des logiciels de références bibliographiques « EndNote, Zotero » ;
- des logiciels de modélisation « Processing Modflow » ;
- et « Matlab ».

2.3.2. Méthodes

Elle consiste à caractériser les faciès chimiques des eaux, comprendre les mécanismes régissant la minéralisation des eaux et évaluer l'aptitude de ces eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien aux différents usages. Ceci, après des campagnes d'échantillonnage d'eau sur des forages et des puits captant le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, en dosant les cations et des anions majeurs contenus dans ces échantillons.

2.3.2.1. Campagnes et techniques d'échantillonnage d'eau

2.3.2.1.1. Campagne d'échantillonnage d'eau

Dans le cadre de cette étude, deux campagnes d'échantillonnage d'eau ont été réalisées (Planche 5). La première a concerné l'ensemble de la zone d'étude et a porté uniquement sur des forages d'adduction d'eau potable (AEP) en septembre 2016. Ces échantillons ont été destinés aux analyses physicochimiques (température, pH, conductivité, cations et anions majeurs).

La deuxième campagne a été réalisée presque un an après la première campagne d'échantillonnage d'eau, précisément en mai 2017. Cette deuxième campagne a concerné aussi bien des forages que des puits captant le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la zone.

Contrairement à la première campagne, qui a portée sur l'ensemble de la région, la deuxième a été effectuée en tenant compte des deux principaux sens d'écoulement des eaux dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua. Seuls des points situés autour de ces deux principales lignes d'écoulement ont été concernés. La première campagne a concerné trente points d'eau et la deuxième vingt-neuf. Le but de cette deuxième campagne d'échantillonnage était de pouvoir faire une comparaison entre les résultats des analyses chimiques des deux campagnes, voir s'il y a une variation quelconque des teneurs chimiques.



Planche 5 : Campagne d'échantillonnage d'eau dans l'aquifère Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

2.3.2.1.2. Choix des points d'eau à échantillonner

Compte tenu, du nombre important des ouvrages captant le système aquifère du CI/H dans la Région, de l'étendue de la zone d'étude, et des faibles moyens financiers disponibles pour mener cette étude, le choix des points d'eau d'échantillonnage pour la première campagne visant à couvrir l'ensemble de la zone d'étude (Fig. 20) est basé sur les critères suivants :

- diviser toute la région d'étude en mailles carrées de 55x55 km ;
- prendre un seul point d'eau au sein de chaque maille ;
- au cas où plusieurs points d'eau se trouvent à l'intérieur d'une même maille, la priorité est accordée au point d'eau pour lequel, les informations hydrodynamiques sont les plus complètes ou les plus précises ;
- en cas d'inaccessibilité à un forage sur le terrain, lié à des difficultés techniques (absence de groupe électrogène ou toutes autres sources d'énergie et/ou pompe en panne), le forage est remplacé par le forage le plus proche de ce dernier. Ce cas, est surtout rencontré dans la partie de l'extrême Nord de la zone d'étude, qui est une zone désertique, nomade et dont la plupart des habitants n'a pas recours aux forages pour ses besoins en eau pendant la saison de pluie.

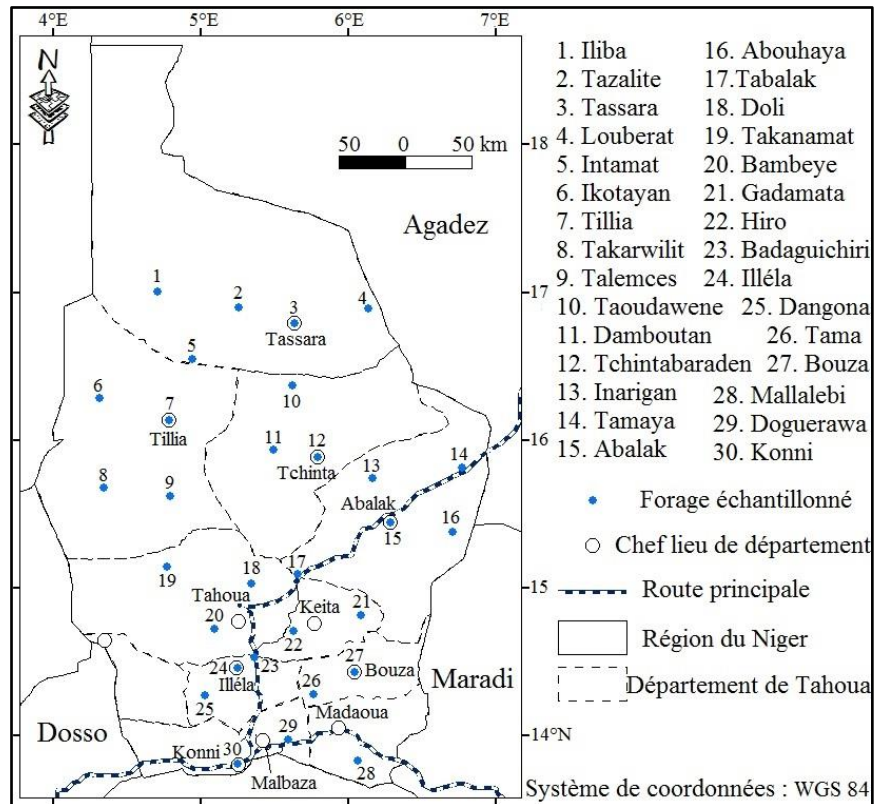


Figure 20 : Carte de distribution des différents forages échantillonnés au cours de la première campagne (septembre 2016)

La deuxième campagne d'échantillonnage d'eau, quant à elle, a concerné 29 points d'eau (Fig. 21), certains (15) ayant déjà été prélevés lors de la première campagne.

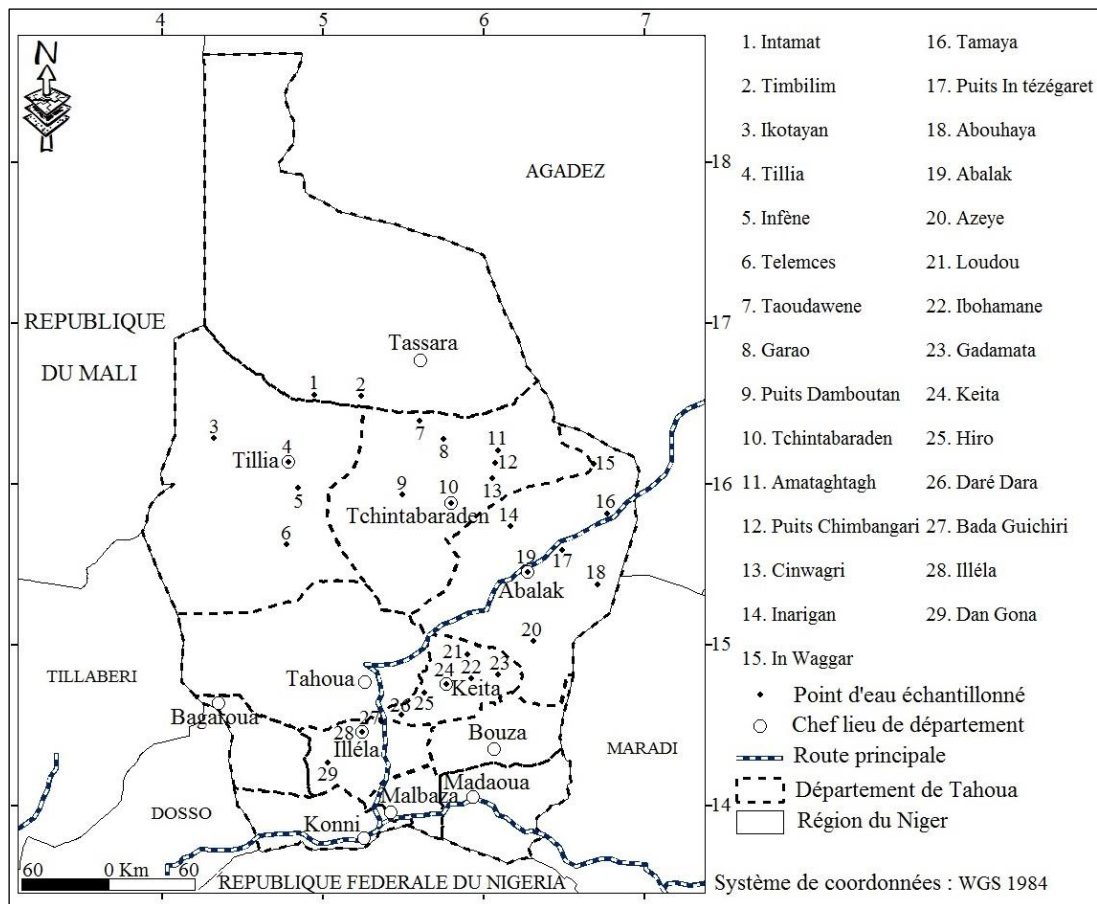


Figure 21 : Carte de distribution des différents points d'eau échantillonnés au cours de la première campagne (mai 2017)

2.3.2.1.3. Techniques d'échantillonnage d'eau destinée aux analyses physicochimiques

Il s'agit ici des différentes techniques mises en œuvre au moment du prélèvement des échantillons d'eau. Tous les échantillons ont été prélevés au niveau des robinets placés à la tête du forage, à l'exception, évidemment, des forages dépourvus de ces robinets de prélèvement. Pour ces derniers, les prélèvements ont été effectués dans les conduites à la proximité du forage. Pour les puits, il a été utilisé des puisettes. Par ailleurs, les précautions suivantes ont été observées :

- pour les forages (Garao et Timblim) et les puits (puits d'In tézégaret) qui étaient en arrêt plus ou moins long, un temps de pompage de 20 à 30 minutes a été observé avant le prélèvement de l'échantillon. Ceci permettait d'évacuer l'eau se trouvant dans les colonnes d'exhaure et celles stagnantes dans le forage ou le puits ;

- le nom du site, la date, l'heure de prélèvement, et le type d'analyse à faire avec l'échantillon ont été inscrits sur chaque flacon et pilulier avec un feutre indélébile ;
- les informations citées précédemment ont été reportées sur un carnet de terrain, avant d'être saisies dans un tableur Excel en fin de journée ;
- le récipient contenant l'eau, servant aux mesures des paramètres physiques (pH, t, CE et TDS au cours de la deuxième campagne), est lavé au préalable trois fois avec l'eau à échantillonner ;
- les flacons et piluliers sont rincés trois fois avec l'eau à échantillonner avant le prélèvement des échantillons ;
- les échantillons destinés aux analyses des éléments majeurs (cations et anions) ont été filtrés au moyen d'un filtre de 0,45 micromètre de diamètre de pore ;
- les flacons et les piluliers, remplis complétement et fermés hermétiquement, sont scellés avec du ruban adhésif.

2.3.2.1.4. Quantité d'eau prélevée pour les analyses chimiques

Pour les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques, les flacons utilisés pour prélever à chaque point d'eau sont :

- un flacon polyéthylène de 125 mL, pour analyse des anions ;
- un flacon polyéthylène de 125 mL, pour l'analyse des cations. Deux à trois gouttes d'acide sulfurique ont été versées dans chacun de ces flacons, en prévention des éventuelles variations de certains éléments.

2.3.2.2. Techniques de dosage des éléments chimiques

Le dosage, des ions majeurs et en traces (fer, nitrites, fluorures et bromures) des échantillons collectés dans cette étude, a été réalisé à l'Université Paris-Sud, au laboratoire de Géoscience Paris-Sud (GEOPS).

L'appareil, ayant servi au dosage des cations majeurs et du fer total, est le spectromètre d'absorption atomique. Avant les opérations de dosage, les échantillons dont la conductivité électrique est inférieure à 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ont été dilués, 5 fois, et ceux dont la conductivité électrique est supérieure à 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 10 fois, afin de respecter les gammes de mesures. Ces dilutions ont évidemment été réalisées en utilisant de l'eau ultrapure, mais sans prendre de précaution pour l'oxygène dissous, ce qui a perturbé les espèces sensibles au potentiel rédox : s'il était présent, Fe^{2+} a été oxydé en Fe^{3+} .

La spectrométrie d'absorption atomique permet le dosage des éléments chimiques par absorption des radiations atomiques en phase vapeur.

Le principe est le suivant : la solution contenant les cations majeurs et le fer à doser est aspirée à travers un capillaire et dirigée vers le nébuliseur. Les nuages de gouttelettes ainsi formés sont pulvérisés à très grande vitesse à travers une chambre où s'éliminent les grosses gouttes grâce à une bille brise-jet. Après dissociation thermique dans la flamme, on note une absorption des radiations incidentes fournies par la lampe à cathode creuse qui émet le spectre de l'élément que l'on veut doser. Ce dosage par absorption a permis de déterminer, ainsi, les concentrations en Ca, Mg, Na, K, Fe, en mg/L.

Les erreurs maximales observées sur la série, pour les teneurs en Ca, Mg, Na, K et Fe, sont respectivement 8,7%, 3,6%, 4,6%, 4,8% et 8,8% pour les échantillons issus de la première campagne et respectivement 8,9%, 5,8%, 6,7% et 6,8% pour ceux issus la deuxième campagne d'échantillonnage d'eau.

Les dosages des teneurs en SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , F^- et Br^- , ont été réalisés sans dilution sur une chromatographie ionique de marque Dionex (ICS 1000), dont la colonne de séparation est constituée par une résine échangeuse d'anions. Quelques microlitres de l'échantillon à analyser sont injectés en tête de colonne. La migration des différentes espèces est ensuite assurée par l'éluant basique injecté par la pompe. En sortie de colonne, chaque élément, ainsi séparé, donne un signal de conductivité, détectable par un conductimètre. Un étalonnage préalable avec des solutions dont les concentrations sont connues, va permettre de déterminer les temps de rétention des différents éléments. Une courbe de calibration est ainsi établie, pour permettre de déterminer les concentrations.

Les erreurs sur la série d'analyses, pour les teneurs en SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , F^- et Br^- et NO_2^- sont respectivement 1,2%, 3,8%, 1,2%, 1,3%, -1,2% et enfin de 3,2% pour les nitrites qui ne sont que très rarement détectables, dans les eaux issues de la première campagne (réoxydation ?) et 3,5%, 5,8%, 0,0%, 1,1% et 3,2% pour le NO_2^- , pour les eaux de la deuxième campagne.

Principe de dosage du TAC

Deux méthodes de dosage ont été utilisées pour la détermination du TAC, la première basée sur l'utilisation de la méthode de Gran (pour 4 échantillons), et la seconde faisant appel à celle de l'indicateur coloré (pour tous les 30 échantillons de la première campagne).

L'idée qui a conduit à utiliser deux méthodes, est de vérifier la précision des dosages à l'indicateur coloré par celle de Gran. Dans un premier temps, quatre échantillons (Abalak, Abouhaya, Bouza et Dan Gona), ont été dosés par la méthode de Gran, puis ces quatre échantillons sont ensuite dosés à l'indicateur coloré (vert de bromocrésol).

Les résultats du TAC obtenus par les deux méthodes ont été comparés. Ils étaient si proches qu'il a été décidé en définitive de poursuivre avec la méthode à l'indicateur coloré uniquement, pour le reste des échantillons :

- Méthode de Gran : le principe consiste à mettre dans un bécher, un volume V_0 donné (exemple $V_0 = 50$ mL dans cette étude) de la solution à doser. Ce bécher est placé sur un agitateur magnétique, et, une électrode pH est immergée dans la solution. A l'aide d'une burette graduée, une solution d'HCl, de concentration C_a connue ($C_a = 0,1$ mol/L pour cette étude), est ajoutée goutte à goutte dans la solution à doser, tout en suivant l'évolution du pH. Au-dessous du point d'équivalence ($\text{pH} \approx 4,2$), les points de mesure s'alignent dans un diagramme F_1 , appelé fonction de Gran, qui dépend, bien sûr, du volume de l'acide ajouté ($F_1 = f(V_a)$). Le volume à l'équivalence (volume d'acide qu'il a fallu ajouter à la solution pour neutraliser tous les ions bicarbonate et carbonate) est donné par l'origine de la droite passant par ces points. Ainsi la fonction de Gran est calculée par la formule (2) ci-dessous :

$$F_1 = (V_0 + V_a)(10)^{-\text{pH}} = (V_a - V_e) \cdot C_a \quad (2)$$

Avec,

V_0 : volume de la solution,

V_a : volume d'acide,

V_e : volume d'acide au point d'équivalence,

C_a : concentration de l'acide.

Quant à l'alcalinité, elle est obtenue à partir de l'équation (3) :

$$\text{Alc} = (1000 \times V_e \times C_a) \div V_0 \quad (\text{még/L}) \quad (3)$$

- Méthode d'indicateur coloré (vert de bromocrésol) : il a été mis dans un bécher un volume $V_0 = 50$ mL de la solution à doser, placé sur un agitateur magnétique.

Compte tenu du pH de nos échantillons (tous inférieurs à 8,90 unités pH), il n'est pas nécessaire de verser de la phénolphthaléine (absence des carbonates). Ainsi, il a été versé un sachet de vert de bromocrésol par échantillon puis, à l'aide d'une burette graduée, une solution d'HCl, de concentration connue ($C_a = 0,025 \text{ mol/L}$ dans cette étude), est ajoutée jusqu'à changement de couleur du vert au rose. Le volume à l'équivalence V_t (point de virage pour le bicarbonate) est ensuite noté, et la concentration en mmol/L de bicarbonate, présent dans la solution, est calculée par la formule (4) suivante :

$$HCO_3^- = (1000 \times V_t \div V_0) \times C_a \quad (4)$$

Avec,

V_0 : volume de la solution,

V_t : volume d'acide au point de virage pour HCO_3^- ,

C_a : concentration de l'acide.

La formule (4) ayant servi au calcul des concentrations en bicarbonate, s'écrit lorsque la solution contient des ions carbonates :

$$HCO_3^- = 1000 \times (V_t - V_1) \div V_0 \times C_a \quad (\text{mmol/L}) \quad (5)$$

Avec,

V_1 : volume d'acide au point de virage pour CO_3^{2-}

2.3.2.3. Traitement des données chimiques

Il existe différents types de méthode de traitement des paramètres chimiques.

2.3.2.3.1. Balance ionique

La balance ionique est un paramètre très important puisqu'elle permet de contrôler la fiabilité des résultats analytiques. En effet, L'analyse est considérée comme bonne, si la valeur de cette balance, est inférieure ou égale à $\pm 5\%$. Celle-ci est exprimée par la formule (6) suivante :

$$B_i = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100 \quad (6)$$

Avec,

Bi : erreur sur la balance ionique exprimée, en % ;

Concentrations des cations et anions, en méq/L.

2.3.2.3.2. Représentations graphiques (Piper, Stiff, et Schöeller Berkaloff)

Dans cette étude, le logiciel, « Diagrammes » de l'Université d'Avignon, a été utilisé, pour élaborer, les différents diagrammes qui sont entre autres :

- **Piper** : le diagramme triangulaire de Piper, est formé de deux petits triangles à sa base, dont l'un à gauche pour les cations et l'autre à droite pour les anions, et d'un losange, au-dessus de ces derniers. Les concentrations relatives des éléments, placées dans les triangles, sont projetées dans le losange, permettant ainsi de définir, les types de faciès chimiques des eaux analysées.

L'avantage du diagramme de Piper est sa facilité pour représenter plusieurs groupes d'analyses ;

- **Stiff** : le diagramme de Stiff permet la représentation de chaque échantillon sous forme d'un polygone. La forme géométrique du polygone dépend de la teneur des différentes espèces chimiques présentes dans l'échantillon. Ainsi la distinction du faciès de l'eau se base sur la forme du polygone. Les ions majeurs sont reportés sur des axes horizontaux de part et d'autre de l'axe vertical d'origine. Les cations sont représentés à gauche (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et Fe^{3+}) et les anions à droite (Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} et NO_3^-) ;
- **Schöeller Berkaloff** : le diagramme de Schöeller-Berkaloff, est une représentation graphique semi-logarithmique, où sont portés sur des droites parallèles les différents ions majeurs. Les teneurs, en mg/L, desdits ions majeurs sont reliés par des segments de droites dont l'allure permet de savoir si les eaux sont de la même famille. Le diagramme de Schöeller Berkaloff ne permet qu'une représentation limitée, ne pouvant dépasser plus de quatorze échantillons d'eau en même temps.

2.3.2.3.3. Matrice de corrélation entre les éléments physicochimiques

Elle permet d'examiner les corrélations (linéaires) entre plusieurs éléments, et faire ressortir les relations existantes entre ces derniers.

La signification du coefficient de corrélation "r" qui est obtenu dépend du nombre d'échantillons. Ses valeurs négatives témoignent une anti-corrélation entre les éléments en question.

2.3.2.3.4. Rapports caractéristiques

Les rapports des différents éléments chimiques entre eux permettent d'étudier l'origine de ces éléments chimiques et les processus chimiques qui se déroulent ou qui se sont déroulés au sein des eaux souterraines. Parmi les études de thèse qui ont utilisé ces rapports, on peut citer, entre autres, celles de Ousmane, 1988 ; Diene, 1995 ; Favreau, 2000 ; Guero, 2003 ; Adiaffi, 2008 ; Ndembo Longo, 2009 ; Abderamane, 2012 ; etc.

L'un des rapports caractéristiques les plus utilisés, parce qu'il s'agit du rapport de deux ions "conservés" est celui des ions bromures et chlorures. Le caractère "conservé" ou conservatif" de ces halogénures est dû au fait que leurs teneurs ne sont pas influencées par les réactions d'oxydo-réduction (Fetter, 1993 in Youssef et al, 1999) et qu'elles ne sont pas contrôlées par des minéraux ayant une faible solubilité (Louvat et al., 1999).

Ce rapport, une fois calculé, est classiquement comparé au rapport $[Br^-]/[Cl^-]$ marin qui est égal à $3,47 \cdot 10^{-3}$ (rapport massique) ou $1,57 \cdot 10^{-3}$ (rapport molaire) (Peter et al., 1999).

Le but de cette comparaison est d'avoir une idée sur l'origine des ions chlorures (Andrews et al., 1994 ; Louvat et al., 1999 ; Youssef et al., 1999 ; Lucia et al., 2001) : un rapport marin traduit souvent une dilution d'eau de mer. Si le rapport est inférieur à celui de l'eau de mer, une dissolution de halite peut être envisagée (Fontes et al., 1991 in Guero, 2003 ; Matray et Chery, 1998 in Guero, 2003). Par contre, des rapports dans les eaux souterraines supérieurs au rapport marin peuvent être expliqués par une dilution de saumures marines primaires très évoluées ou le lessivage de matière organique (Barbecot et al., 2000 ; Guero, 2003).

Le diagramme $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] vs (Na^+ + K^+ - Cl^-)$ est utilisé pour mettre en évidence les phénomènes d'échange cationique entre les eaux et les argiles présentes dans le réservoir (Kamel et al., 2009).

Pour les valeurs de $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] > 0$ et de $(Na^+ + K^+ - Cl^-) < 0$, on se trouverait dans une situation de fixation des ions Na^+ et libération des ions Ca^{2+} . Par contre, la fixation des ions Ca^{2+} et la libération des ions Na^+ prédominerait lorsque $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] < 0$ et $(Na^+ + K^+ - Cl^-) > 0$ (Abid et al., 2009 ; Petersen, 2014).

2.3.2.3.5. Indices de saturation

Les indices de saturation des eaux sont calculés pour mettre en évidence les équilibres thermodynamiques entre les solutions et les minéraux constitutifs de l'aquifère. L'indice de saturation est défini par le logarithme du rapport du produit d'activité ionique (PAI) sur le produit de solubilité (K_s), comme indiqué par la formule (7) :

$$IS = \text{Log} \frac{(PAI)}{K_s} \quad (7)$$

Avec,

PAI : Produit d'Activité Ionique des ions concernés dans la réaction de dissolution de la phase minérale considérée ;

K_s : Produit de solubilité calculé du minéral en question, et déterminé par l'équation (8) :

$$L_n K_s = \frac{(\Delta G_0)}{(RT)} \quad (8)$$

Avec,

ΔG_0 : Energie d'enthalpie libre standard de réaction, en J/mol ;

R : Constante de gaz parfait, en J/mol ;

T : Température, en K.

- si **IS** = 0, solution en équilibre, peut aussi être considéré comme saturée ;
- si **IS** > 0, solution sursaturée, des réactions de précipitation du minéral peuvent intervenir ;
- si **IS** < 0, solution sous-saturée, une mise en solution du minéral est possible.

2.3.2.3.6. Dureté de l'eau

C'est un indicateur du pouvoir de réaction de l'eau avec le savon : une eau dure exige une quantité considérable de savon pour produire de la mousse ; par ailleurs, elle provoque aussi l'entartrage des canalisations d'eau chaude, des chaudières et des appareils managers. Cette dureté de l'eau n'est pas liée à une substance uniquement, mais plutôt à divers ions métalliques polyvalents dissous. Les principaux ions responsables de la dureté dans une eau sont principalement le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) ; les ions strontium, baryum, fer, et manganèse y contribuent également (Sawyer and Mc Carty, 1967).

Elle est calculée par le titre hydrotimétrique, qui traduit la capacité de l'eau à réagir avec le savon (Yapo et al., 2010), donné par la formule (9), et exprimé en ppm de carbonate de calcium (CaCO₃) ou en degré français (°f). Un degré français (°f) est en %, sans dimension, qui équivaut à 10 mg/L de CaCO₃.

$$\text{°th} = Ca^{2+} \times \frac{CaCO_3}{Ca} + Mg^{2+} \times \frac{CaCO_3}{Mg} \quad (9)$$

Les résultats de dureté de l'eau permettent de classer celle-ci en plusieurs groupes (Tableau 4), selon Hardness-Canada.ca, consulté sur Google (healthy Canadians.gc.ca/.../water-hardness-durete-eau-eng.pdf) le 15-03-2018.

Tableau 4 : Classification des eaux en fonction de leur dureté calcique et magnésique

Nature des eaux	Valeur du °th
Eau douce	°th < 6°f
Eau modérément dure	6°f < °th < 12°f
Eau dure	12°f < °th < 18°f
Eau très dure	°th > 18°f

2.3.2.3.7. Aptitude des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien aux différents usages

L'aptitude des eaux souterraines ou leurs qualités à convenir à tel ou tel usage est fonction d'un certain nombre de paramètres (Bradaï et al., 2009 ; Gouaidia et al., 2013 ; Amadou et al., 2014 ; Bouselsal et al., 2015 ; Nouayti et al., 2015 ; Sandao et al., 2015 ; Gbombélé Soro et al., 2016). Les principaux paramètres utilisés pour contrôler la qualité d'une eau sont en général les paramètres physico-chimiques et les paramètres microbiologiques de l'eau. Cependant, ces paramètres sont à leurs tours contrôlés par plusieurs facteurs d'ordre naturel à savoir :

- la nature des roches traversées et des minéraux rencontrés au cours de la période d'infiltration ;
- le temps de contact entre l'eau et les minéraux présents dans le réservoir ;
- le temps de renouvellement de l'eau souterraine par celles d'infiltration.

Des analyses bactériologiques n'ont pas été réalisées dans cette étude, dont ce n'était pas la vocation.

Cependant, nous avons souhaité donner quelques indications sur la qualité des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien à partir des paramètres physico-chimiques que nous avons mesurés, même si certains résultats d'analyses (nitrites et fer) sont à considérer avec prudence, aucune précaution particulière n'ayant été prise pour préserver les échantillons de l'oxydation. De nombreuses études (Landreau et al., 1985 ; Lagaude et al., 1988 ; Bannoud, 2001 ; Elfil et al., 2001 ; Sadat et al., 2001 ; Hubert et al., 2002 ; Tabouche et al., 2004 ; Jordana et al., 2004 ; Guergazi et al., 2005 ; Pontié et al., 2006 ; Bricha et al., 2007 ; Lasm et al., 2008 ; WHO, 2008 ; Nezli et al., 2009 ; Derwich et al., 2010 ; N'Diaye et al., 2009 ; Rouabhia et al., 2010 ; Yapo, et al., 2010 ; WHO, 2011 ; Belghiti et al., 2013 ; Lagnika et al., 2014 ; Bouchemal et al., 2015 ; El Asslouj et al., 2015) ont traité dans le monde entier de la question d'aptitude physico-chimique des eaux souterraines aux différents usages, afin d'améliorer les conditions de vie des populations.

a. Consommation humaine et animale

La qualité des eaux, destinées à la consommation humaine et/ou animale, passe toujours par le contrôle de paramètres (organoleptique, physico-chimiques naturels, substances dites indésirables, substances toxiques, et microbiologiques.), dont les normes sont fixées par l'OMS. Dans cette étude, vu l'importance des profondeurs de captage, le contrôle des paramètres microbiologiques n'a pas été pris en compte. Seuls les paramètres physico-chimiques naturels, les paramètres indésirables et organoleptiques sont abordés dans cette étude, et ils sont confrontés aux normes OMS pour juger de l'aptitude à la consommation humaine.

Les eaux souterraines sont très généralement privilégiées pour la consommation en eau potable des populations et du bétail du fait, non seulement de leur protection par plusieurs, voire souvent des centaines, de mètres de formations géologiques contre les polluants, mais aussi pour l'importance de leurs débits spécifiques, leurs stocks, et leur pérennité, contrairement aux eaux de surface. Toutefois, au contact avec certains types de formations géologiques, ces eaux souterraines peuvent devenir non potables pour la consommation humaine, voire animale, par l'augmentation naturelle, de la teneur de certains éléments chimiques indésirables (fluor, nitrate et nitrite, fer, sulfate, etc.). Pour être considérées comme potables, ces eaux doivent impérativement répondre à un certain nombre de caractéristiques conformes à certaines normes de qualité physico-chimique et biologique de l'eau (normes OMS par exemple).

b. Irrigation

Trois critères peuvent être utilisés pour déterminer l'aptitude d'une eau à l'irrigation.

i. Carbonate de sodium résiduel ou residual sodium carbonate (RSC)

Il a été constaté que, dans les eaux à faciès chloruré, le SAR minimise de manière fréquente le risque de sodisation et d'alcalinisation de ces eaux (Gouaidia, 2013). Il convient alors de déterminer le RSC, obtenu par l'équation (10) pour avoir une idée de l'aptitude de l'eau à l'irrigation.

$$RSC = (CO_3 + HCO_3) - (Ca + Mg) \quad (10)$$

CO₃, HCO₃, Ca et Mg : concentrations en méq/L.

Le carbonate de sodium résiduel (RSC), est un paramètre très important dans le contrôle de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

Il conditionne fortement l'indice du SAR, et fait augmenter ce dernier quand il augmente, par les processus de fixation des ions carbonatés et bicarbonatés contenus dans l'eau aux ions calcium et magnésium pour précipiter. Ceci va augmenter la concentration en sodium, d'où une augmentation du SAR. La valeur du RSC, ainsi calculée, permet une classification en trois catégories des eaux souterraines (Tableau 5).

Tableau 5 : Classification de l'aptitude des eaux à l'irrigation en fonction de la valeur du RSC

Valeur du RSC	Aptitude de l'eau pour l'irrigation
] ← - 1,25]	eau de bonne qualité pour l'irrigation
] 1,25 - 2,50 [	eau de qualité moyenne pour l'irrigation
[2,50 - → [	eau salée et impropre pour l'irrigation

ii. Taux d'adsorption du sodium ou Sodium Adsorption Ratio (SAR)

Les eaux de rivière, des sources ou pompées des nappes profondes, contiennent des sels dissous qui en fonction de leur concentration peuvent affecter la qualité des sols et par la suite celles des cultures. Le sodium d'adsorption ratio ou le risque du sodium, pour l'eau d'irrigation, est un paramètre important, qui permet d'apprécier la qualité d'une eau destinée à l'irrigation.

Il est obtenu par l'équation (11).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{1/2(Ca+Mg)}} \quad (11)$$

Avec,

SAR : indice de risque du sodium ;

Na, Ca et Mg : concentrations de sodium, calcium et magnésium en méq/L.

L'indice du SAR permet d'évaluer les risques liés au sodium dans les eaux d'irrigation. Les valeurs du SAR et celles de la conductivité électrique de l'eau en permettent de déterminer les différentes classes (Tableau 6) et (Tableau 7). Une eau présentant un indice de SAR supérieur à 10, peut-être à mesure de produire une accumulation de sodium dans le sol. Le sodium agit directement au niveau de la floculation des sols argileux, et cette accumulation va entraîner une diminution de la macroporosité et donc du taux d'infiltration de l'eau dans le sol.

Tableau 6 : Classification des eaux destinées à l'irrigation, selon les valeurs de SAR et de la conductivité électrique, US Salinity Laboratory Staff, 1954 cité par Sandao, 2013).

Classe	Valeur SAR	Aptitude des eaux à l'irrigation
S1	] 0 – 10]	Eau à faible risque de salinisation, convient à tous les sols
S2	] 10 – 18]	Eau à risque moyen de salinisation, ne peut être utilisée que pour les plantes tolérantes à la salinité et pour les sols aérés (texture grossière) et perméables
S3	] 18 – 26]	Eau à fort risque d'alcalinisation, peut être utilisée que pour les plantes très tolérantes à la salinité et pour les sols bien drainés et mieux avec ajout de la matière organique
S4	] 26 – +∞]	Eau à très fort risque d'alcalinisation, non utilisable pour l'irrigation
Classe	Valeur de conductivité	Aptitude des eaux à l'irrigation
C1	] 0 – 250 µS/cm]	Conductivité faible, eau sans risque de salinisation
C2	] 250 – 750 µS/cm]	Conductivité moyenne, eau utilisable pour des plantes ayant une tolérance en sel
C3	] 750 – 2250 µS/cm]	Conductivité élevée, eau à risque élevé de salinisation, ne peut être utilisée que pour les plantes très tolérantes à la salinité et pour les sols bien drainés
C4	] 2250 – +∞ µS/cm]	Conductivité très élevée, eau non indiquée pour l'irrigation

Tableau 7 : La classification de Richards basée sur la conductivité et le S.A.R

Degré	Qualité	Classe	L'état d'utilisation
1 ^{ère}	Excellente	C1S1	Eaux utilisables sans danger pour l'irrigation pour la plus part des cultures, sur la plus part des sols.
2 ^{ème}	Bonne	C2S1 C1S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur sol.
3 ^{ème}	Admissible	C3S1 C2S3 C3S2	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainé. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4 ^{ème}	Médiocre	C4S1 C4S2 C3S3	Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels sur sol bien drainé.
5 ^{ème}	Mauvaise	C3S4 C4S3 C4S4	Eau ne convenant pas généralement à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

iii. Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox, est élaboré à partir des valeurs de la conductivité électrique ou TDS en abscisse et celles du sodium en % dans les eaux, donné par l'équation (12).

$$Na(\%) = \frac{Na}{Ca+Mg+Na+K} \times 100 \quad (12)$$

Na, Ca, Mg et K : concentrations de sodium, calcium et magnésium et potassium en méq/L.

Tout comme le SAR, le diagramme de Wilcox, permet une classification des eaux destinées à l'irrigation. Ainsi, on distingue cinq classes, selon la qualité de l'eau, selon le diagramme de Wilcox (1948), qui sont : excellente, bonne, admissible, médiocre et enfin mauvaise.

2.4. HYDROLOGIE ISOTOPIQUE DES EAUX DE L'AQUIFERE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN

2.4.1. Matériel

2.4.1.1. Données isotopiques

Les données isotopiques portent sur :

- les teneurs isotopiques des masses d'eau issues des précipitations actuelles, trouvées dans la bibliographie ;
- cinquante-neuf échantillons pour le dosage des isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O) dans le cadre de cette étude ;
- trente échantillons pour le dosage du ^{13}C , et ^{14}C dans le cadre de cette étude ;
- vingt échantillons pour le dosage du ^{36}Cl , toujours, dans le cadre de cette étude.

2.4.1.2. Outils

2.4.1.2.1. Flacons et bouteilles d'échantillonnage

Il s'agit, entre autres :

- des piluliers en verre ambré de 10 mL, pour les analyses combinées des isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H) ;
- des flacons en polyéthylène de 500 mL, pour les analyses de ^{13}C et ^{14}C ;
- des flacons en polyéthylène de 1000 mL, pour les analyses de ^{36}Cl .

2.4.1.2.2. Equipements de laboratoire pour les dosages isotopiques

Les analyses isotopiques, ont été réalisées au laboratoire Géosciences Paris-Sud (GEOPS) et au CEREGE, Université d'Aix-Marseille, et les équipements utilisés sont les suivants :

- un spectromètre d'absorption laser LGR Laser Water Isotope Analyser OA-ICOS DLT-100, pour le dosage des isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O et ^2H) ;
- une ligne d'extraction du CO_2 des échantillons d'eau, développée au laboratoire GEOPS ;
- une ligne semi-automatique de graphitisation du CO_2 , développée au laboratoire GEOPS ;
- le spectromètre de masse par accélérateur ARTEMIS 2,6 MV, instrument national opéré par le LMC14 et situé au Centre de Saclay du CEA, pour l'analyse de l'activité du ^{14}C ;

- le spectromètre de masse par accélérateur tandem 5 MV ASTER (Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques), instrument national situé au CEREGE (Aix en Provence), pour l'analyse du ^{36}Cl ;
- des solutions chimiques de laboratoire (solutions d'acide chlorhydrique, d'acide orthophosphorique, d'acide nitrique, des solutions de nitrate de baryum, nitrate d'argent, d'ammoniaque, d'acétone, etc.) ;
- de l'azote liquide, de la carboglace et de l'eau ultrapure milliQ ;
- des centrifugeuses ;
- des étuves ;
- des hottes et réfrigérateur pour la conservation des échantillons en cours de préparation chimique pour le ^{36}Cl à l'abri de la lumière ;
- un appareil pour le vortex

2.4.2. Méthodes

L'approche méthodologique consiste, à mesurer les teneurs en isotopes stables (^{18}O , ^2H) des masses d'eaux souterraines, pour mettre en évidence les mécanismes contrôlant la recharge, définir les différentes périodes et les zones de recharge des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien, mesurer les teneurs en isotopes radioactifs (^{14}C et ^{36}Cl) pour déterminer les temps moyens de résidence, ainsi que les vitesses d'écoulement des eaux du système aquifère.

Dans la bibliographie, les études portant sur les approches isotopiques, réalisés au Niger dans le domaine de l'eau, sont au nombre d'une petite vingtaine depuis une trentaine d'année. On peut citer : Ousmane, 1988 ; Joseph et al., 1989 ; Joseph, 1990 ; Taupin, 1990 ; Joseph et al., 1992 ; Joseph et al., 1994 ; Girard, 1993 ; Le Gal La Salle, 1994 ; Gallaire, 1995 ; Taupin et al., 1997 ; 1997 ; Favreau, 2000 ; Taupin et al., 2002 ; Guero, 2003 ; Taupin et al., 2003 ; Gaultier, 2004 ; Tremoy, 2012 ; Abdou Babaye, 2012 ; Sandao, 2013 ; OSS, 2017.

2.4.2.1. Campagnes et techniques d'échantillonnage d'eau

2.4.2.1.1. Campagne d'échantillonnage d'eau

Deux campagnes d'échantillonnage d'eau ont été réalisées pour les analyses isotopiques. La première (septembre 2016), a concerné trente échantillons et ont été destinés aux analyses des isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H) et des isotopes de carbone (^{13}C et ^{14}C). La deuxième campagne (mai 2017) a concerné vingt-neuf échantillons pour les isotopes stables de l'eau (^{18}O et ^2H) et vingt échantillons pour l'analyse du ^{36}Cl .

Le but de cette deuxième campagne d'échantillonnage était donc :

- de pouvoir faire une comparaison entre les résultats des analyses isotopiques (isotopes stables de l'eau) des deux campagnes, voir s'il y a une variation quelconque des teneurs en isotopes stables dans le temps ou une erreur dans les mesures ou protocole d'échantillonnage ;
- de permettre la réalisation des analyses du chlore-36.

2.4.2.1.2. Techniques d'échantillonnage d'eau destinée aux analyses isotopiques (^{18}O , ^2H , ^{13}C , ^{14}C , et ^{36}Cl)

C'est le même protocole utilisé pour échantillonner les eaux destinées aux analyses chimiques qui est observé pour échantillonner les eaux destinées aux analyses isotopiques. Cependant, pour ces échantillons destinés aux analyses isotopiques, surtout pour les isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O et ^2H), le prélèvement a été fait de façon à éviter des échanges avec l'atmosphère. Pour ce faire, le pilulier est rapproché de quelques centimètres de l'ouverture du robinet, pour être rempli, sous l'eau, débordant pendant un bon bout de temps avant de le fermer.

2.4.2.1.3. Quantité d'eau prélevée pour les analyses isotopiques

Pour les échantillons destinés aux analyses isotopiques, il a été prélevé par point d'eau les quantités suivantes :

- un à trois flacon(s) polyéthylène de 1000 mL, pour les analyses de ^{36}Cl ;
- un flacon polyéthylène de 500 mL, pour les analyses de ^{13}C et ^{14}C ;
- un pilulier en verre ambré de 10 mL, pour les analyses combinées des isotopes stables (^{18}O et ^2H).

2.4.2.2. Techniques de dosage des éléments isotopiques

2.4.2.2.1. Isotopes stables de l'eau (^2H et ^{18}O)

S'agissant du dosage des isotopes stables de la molécule d'eau, c'est un spectromètre d'absorption laser LGR (Laser Water Isotope Analyser OA-ICOS DLT-100), (Planche 6), qui a été utilisé.

Un nanovolume, de l'échantillon d'eau est vaporisé sur le trajet du faisceau laser, et les interférences créées sont proportionnelles aux rapports isotopiques $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^2\text{H}/^1\text{H}$ de l'échantillon.

Des solutions étalons sont utilisées pour la définition des droites de calibration. Les résultats bruts issus du spectromètre d'absorption laser sont à leur tour traités de façon à déterminer les teneurs en deltas pour mille d' ^{18}O et ^2H , selon l'expression (13) :

$$\delta^{18}\text{O}\text{‰} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standart}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (13)$$

Les erreurs sur la série d'analyse pour les teneurs en ^2H et en ^{18}O , sont respectivement $\pm 0,3 \text{ ‰}$ et $\pm 0,1 \text{ ‰}$.

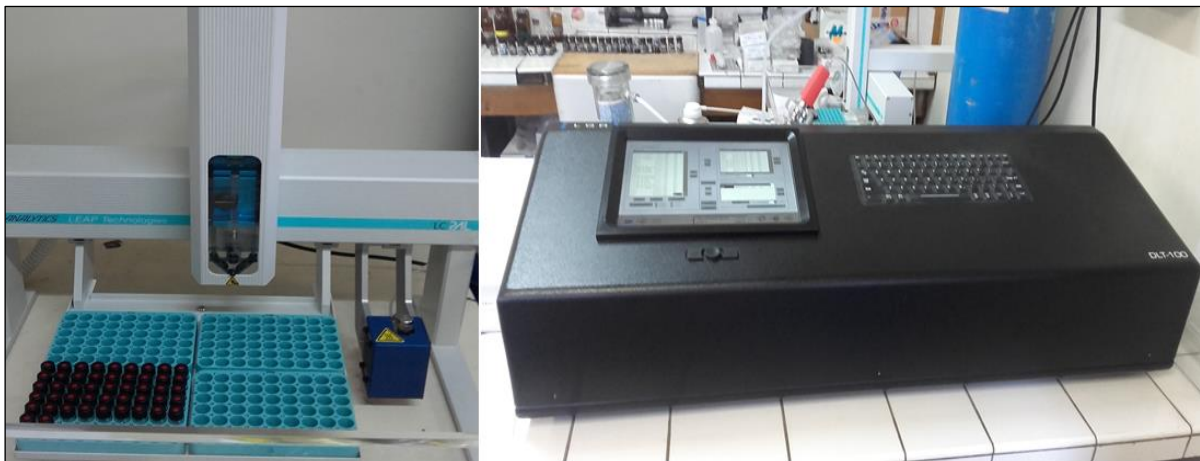


Planche 6 : Spectromètre d'absorption laser LGR Laser

2.4.2.2.2. Isotope stable et radioactif du carbone (^{13}C et ^{14}C)

L'extraction du CO_2 contenu dans les échantillons d'eau, la mesure des teneurs en ^{13}C par spectrométrie de masse (IRMS) et la préparation des graphites-cibles pour la mesure des teneurs en ^{14}C par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) ont été réalisées au laboratoire GEOPS. La mesure des teneurs en ^{14}C par SMA a été réalisée au LMC14, sur l'accélérateur ARTEMIS, dans le cadre du service national de l'INSU.

a. Extraction du carbone inorganique total dissous (CITD) (^{13}C et ^{14}C)

Le CITD a été extrait sous forme de CO_2 par attaque acide sur les échantillons d'eau souterraine, collectés au cours de la campagne de septembre 2016. Le volume nécessaire d'échantillon est défini en fonction du titre alcalimétrique complet (TAC) de l'eau à analyser :

ce volume doit contenir 5 à 6 mg de carbone pour l'analyse couplée du ^{13}C et ^{14}C . Le dosage du TAC est donc indispensable avant toute préparation pour analyse isotopique du carbone (^{13}C et ^{14}C) sur le CITD. La ligne d'extraction est présentée sur la Fig. 22 et la planche 7, photo à gauche. Le protocole détaillé est exposé en Annexe 1.

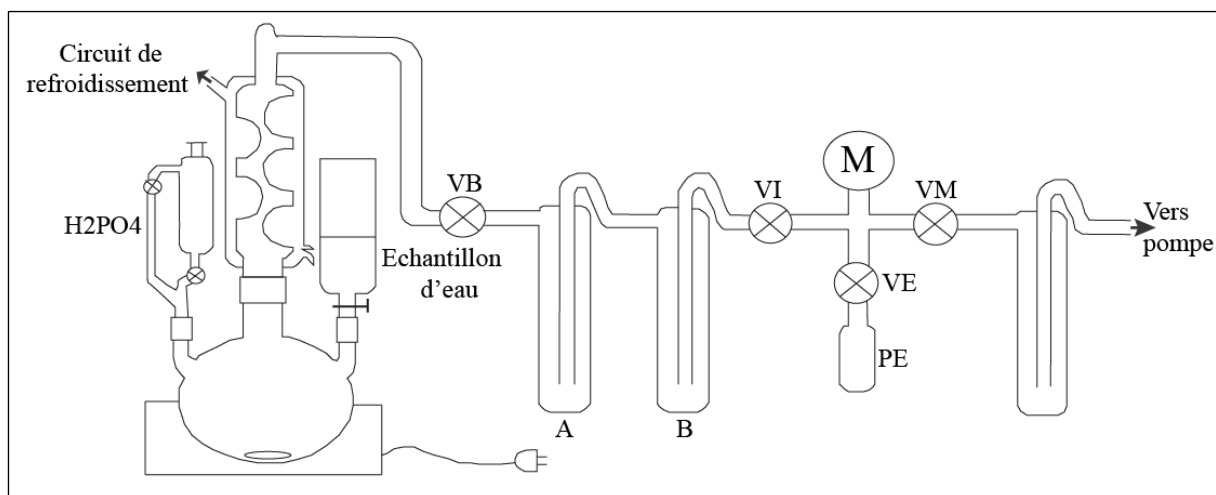


Figure 22 : Schéma de la ligne d'extraction de CO_2 de l'Université Paris-Sud 11 (Orsay)

b. Graphitisation (^{14}C) et mesure de la teneur en ^{13}C

Après extraction du CO_2 , une fraction aliquote est injectée sur la ligne de graphitisation semi-automatique. Le CO_2 réagit avec l'hydrogène à 650° pour former du carbone graphite sur un support de fer (Planche 7, photo à droite). Le reste du CO_2 est utilisé pour la mesure de la teneur en ^{13}C .



Planche 7 : Ligne d'extraction du CO_2 à gauche et celle de graphitisation du carbone à droite

c. Mesure de la teneur en ^{14}C

ARTEMIS (Planche 8) est un accélérateur dédié, installé au centre CEA de Saclay, qui permet de mesurer les teneurs en ^{14}C , d'environ 4 500 échantillons de moins d'un milligramme de C, chaque année. Nos échantillons ont été analysés dans le cadre du service national du CNRS-INSU, qui est l'un des partenaires exploitant cet instrument scientifique.



Planche 8 : Ligne d'analyse de l'activité du ^{14}C (ARTEMIS, Saclay)

L'échantillon (carbone graphite) est placé dans une source d'ions césium et soumis au bombardement par ces ions, de manière à extraire le carbone sous forme d'ions. Les ions subissent, ensuite deux phases d'accélération : une première au sortir de la source et la seconde au sein de l'accélérateur, sous l'effet d'une tension de plusieurs millions de volts, avant d'être triés par masse sous l'action d'un champ magnétique, qui dévie leurs trajectoires. À la fin, des détecteurs comptent les ions de différentes masses.

Les résultats bruts, sont ensuite corrigés, puis traités statiquement.

2.4.2.2.3. Isotope radioactif du chlore-36 (^{36}Cl)

Le dosage du ^{36}Cl sur le spectromètre de masse par accélérateur (AMS) tandem 5 MV ASTER (Accélérateur pour les Sciences de la Terre, Environnement, Risques) situé au CEREGE (Aix en Provence), se fait également en deux phases. Une première phase, qui consiste en la préparation chimique du chlorure présent dans les échantillons d'eau, et une deuxième phase qui consiste en la mesure des teneurs en ^{36}Cl par ASTER.

a. Préparation chimique du chlorure contenu dans les échantillons d'eau souterraine

L'opération principale de la préparation chimique du chlore consiste à faire précipiter au moins 2 mg de chlorure sous forme de chlorure d'argent. Cependant, du fait des faibles teneurs en chlorure de certains échantillons du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua, ceux-ci ont été "spikés". Le "spikage" consiste à ajouter du ^{35}Cl dans les échantillons ayant moins de 2 mg de chlorure, dans un litre d'eau afin d'augmenter la masse totale de précipité de chlorure d'argent.

Une étape importante consiste à séparer le chlore-36 de son isobare le soufre-36, en faisant précipiter le sulfate présent en solution, sous forme de sulfate de baryum, et en le filtrant. Si la teneur en sulfate est importante dans l'échantillon, il est conseillé de répéter plusieurs fois cette opération (deux, trois ou même quatre fois), pour évacuer le maximum de sulfates.

Un protocole détaillé est présenté en annexe 2.

b. Mesure de l'activité de chlore par AMS

Plusieurs travaux de thèse (Ménabréaz, 2012 ; Petersen, 2014 ; Bouchez, 2015) et divers articles (Klein et al., 2008 ; Finkel et al., 2013 ; Arnold et al., 2013), ont fourni assez de détails, concernant l'utilisation du spectromètre de masse par accélérateur tandem 5 MV ASTER, situé au CEREGE.

Les pastilles d'AgCl séchées, précédemment obtenues, à la fin de la préparation chimique du chlorure, sont soumises à un 'cathodage', avant d'être passées dans l'AMS. Les cathodes labellisées, au feutre et sans bouchon, sont introduites dans la source de l'AMS. Une fois que les cathodes contenant l'échantillon sont placées dans la source, sur une roue pouvant en contenir 60, le principe général de la mesure peut être résumé comme suit :

- ionisation de l'échantillon dans la source : cette phase consiste, au bombardement, de l'échantillon d'AgCl, par du césium (Cs^+), afin de produire un faisceau d'ions négatifs Cl^- ;
- accélération, du faisceau ionique résultant, au niveau de l'accélérateur tandem. Cette première accélération entraîne une séparation des isotopes en fonction de leur masse et de leur charge : ceci permet d'obtenir les rapports isotopiques ;
- au centre de l'accélérateur, le faisceau passe à travers un épilucheur gazeux, ce qui transforme, tous les ions négatifs en positifs de charge Cl^{5+} ;
- le faisceau, d'ions chargés positivement, est accéléré à nouveau, avant sa sortie du tandem ;

- juste à la sortie de l'accélérateur, les ions traversent un aimant, dont le rayon de courbure est équivalent à la trajectoire des deux isobares ^{36}Cl et ^{36}S ;
- les isotopes stables du chlore (^{35}Cl et ^{37}Cl) sont déviés de la trajectoire, avant d'être mesurés dans des cases de Faraday latérales, sous forme de courant électrique ;
- quant aux deux isobares (^{36}Cl et ^{36}S), ils sont confrontés à une feuille de nitrure de silicium, placée sur leur chemin, dans le but de les séparer. Ceci permet de débarrasser le ^{36}Cl , de son isobare ^{36}S , et de pouvoir le compter seul, atome par atome dans le détecteur à gaz ionisant ;
- après la détection, le résultat final se présente sous forme de rapports $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ et $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$. Ces rapports sont la moyenne de trois mesures de rapports d'une durée de 20 minutes chacune, effectuées par l'AMS pour chaque échantillon.

La particularité de l'AMS (Planche 9) est d'une part, liée à l'énergie mise en œuvre pour accélérer les ions, qui est ici de l'ordre de 5 MV. D'autre part, elle permet également, la séparation entre les isobares chlore-36 et soufre-36, en complément de la séparation chimique réalisée lors de la préparation, par le biais d'une feuille 'absorbeuse', impliquant une perte d'énergie différentielle de ces deux éléments.

L'analyse prend fin par le traitement des résultats bruts issus de l'AMS, à l'aide d'une série de tests, qui seront corrigés, puis traités statiquement pour écarter tout cycle de mesures non conforme.

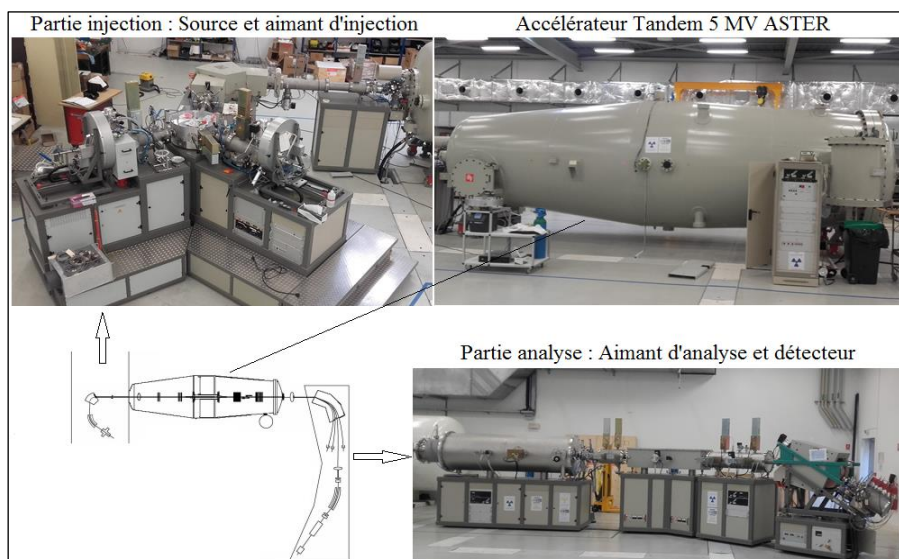


Planche 9 : Schéma du système High Voltage Engineering (HVE) 5 MV AMS, Spectromètre de Masse par Accélérateur (CEREGE)

2.4.2.3. Traitement des données isotopiques

Le mot « isotope » provient du grec *isos* « égal ou le même » et *topos* « lieu ou place », signifiant qui occupe la « même place », faisant référence à la classification chimique de la table de Mendeleïev, (Soddy, 1910, cité par Ousmane, 1988). Seront utilisés dans le cadre de cette étude, les isotopes stables de la molécule de l'eau (^2H et ^{18}O), l'isotope stable du carbone (^{13}C) et les isotopes radioactifs du carbone et du chlore, (^{14}C et ^{36}Cl).

2.4.2.3.1. Généralités sur les isotopes

Le rapport (abondance) isotopique d'un élément, correspond tout simplement, à la proportion atomique entre les différents isotopes de cet élément. La somme des abondances isotopiques est toujours égale à 100 (Tableau 8).

Tableau 5 : Abondance et symbole des isotopes stable de l'eau, du carbone et du chlore (AIEA, 2008)

Elément	Z	N	A	Abondance	Symbole
Hydrogène	1	0	1	99.985	^1H
	1	1	2	0.0155	^2H ; D
Carbone	6	6	12	98.892	^{12}C
	6	7	13	1.108	^{13}C
	6	8	14	1.2×10^{-12}	^{14}C
Oxygène	8	8	16	99.759	^{16}O
	8	9	17	0.037	^{17}O
	8	10	18	0.204	^{18}O
Chlore	17	18	35	75.63%	^{35}Cl
	17	19	36	$10^{-15} - 10^{-13}$	^{36}Cl
	17	20	37	24.47%	^{37}Cl

Ces abondances ou rapports isotopiques sont définis par l'expression (14) ci-dessous :

$$R = \frac{\text{teneur de l'isotopes rare}}{\text{teneur de l'isotopes abondant}} \quad (14)$$

Une notation en exposant peut être portée sur le rapport R, référant à l'isotope en question, par exemple :

$$^{18}R(CO_2) = \frac{[C^{18}O^{16}O]}{[C^{16}O_2]}$$

$$^{13}R(CO_2) = \frac{[^{13}CO_2]}{[^{12}CO_2]}$$

Il faut impérativement faire la différence entre le rapport isotopique, défini précédemment comme étant le rapport des nombres d'atomes de deux isotopes dans un même échantillon et la concentration isotopique d'un élément. La concentration isotopique d'un échantillon, au contraire, indique les proportions des divers isotopes d'un élément chimique particulier (ou même de plusieurs éléments) dans cet échantillon. Par exemple, pour le dioxyde de carbone (CO_2), sa composition isotopique est définie comme suit (15) :

$$\frac{(^{13}CO_2)}{[(^{13}CO_2)+(^{12}CO_2)]} = \frac{(^{13}CO_2)}{(CO_2)} = \frac{^{13}R}{(1+^{13}R)} \quad (15)$$

Les teneurs des isotopes stables sont toujours exprimées par rapport à un étalon. Pour ^{18}O et 2H , cet étalon est le V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), représentatif de la composition isotopique moyenne de l'eau océanique (Craig, 1961). La calcite d'un rostre de Bélemnite de la formation Pee Dee en Caroline du Sud est utilisée comme étalon (V-PDB) pour le ^{13}C (Craig, 1957).

Ainsi, l'unité (δ) ou part pour mille de différence relative par rapport à l'étalon est définie par l'expression (16) :

$$\delta\text{‰} = \frac{R_{éch} - R_{étalon}}{R_{étalon}} \times 10^3$$

Ou

$$\delta\text{‰} = \left(\frac{R_{éch}}{R_{étalon}} - 1 \right) \times 10^3 \quad (16)$$

Le phénomène qui modifie la composition isotopique d'un élément dans un certain composé, par le passage dudit composé d'un état physique ou une composition chimique à un autre est appelé fractionnement isotopique. On distingue deux principaux processus de fractionnement liés à la masse : l'un thermodynamique (processus à l'équilibre, cas de la condensation) et l'autre cinétique (pour certains processus hors équilibre ou irréversibles, cas de l'évaporation).

Le fractionnement thermodynamique est caractérisé par un facteur de fractionnement (α) défini par la constante d'équilibre K de la réaction d'échange entre deux phases A et B et est défini par l'équation (17) ci-dessous :

$$\alpha_{A-B} = \frac{R_A}{R_B} \quad (17)$$

Pour l'oxygène-18, par exemple, le facteur de fractionnement entre phase liquide et phase vapeur correspond à (18) :

$${}^{18}\alpha_{liq-vap} = \frac{\left(\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O}\right)_{liq}}{\left(\frac{{}^{18}O}{{}^{16}O}\right)_{vap}} \quad (18)$$

Les valeurs spécifiques pour l'oxygène et de l'hydrogène (19) et (20), sont données en fonction de la température T (Kelvin), par Majoube (1971).

$$Ln^{18}\alpha_{L/V} = -Ln^{18}\alpha_{V/L} = \frac{1,137 \times 10^3}{T^2} - \frac{0,4156}{T} - 2,0667 \times 10^{-3} \quad (19)$$

$$Ln^2\alpha_{L/V} = -Ln^2\alpha_{V/L} = \frac{24,844 \times 10^3}{T^2} - \frac{76,248}{T} + 52,612 \times 10^{-3} \quad (20)$$

Un "facteur d'enrichissement" est déterminé par la formule (21) :

$$\varepsilon(\text{‰}) = (\alpha - 1) \times 10^3 \quad \text{Ou encore} \quad \varepsilon_{A-B} \text{ ou } \varepsilon_{(A-B)} = (\alpha_{A-B} - 1) \times 10^3 \quad (21)$$

Si on remplace α_{A-B} de l'équation (17) par son expression dans l'équation (21) on peut écrire l'expression (22) :

$$\varepsilon_{A-B} = \left(\frac{R_A}{R_B - 1} \right) \times 10^3 \quad (22)$$

Ainsi, d'après l'équation (16) on a les expressions (23) et (24) :

$$\delta_A = \left(\frac{R_A}{R_{\text{étalon}} - 1} \right) \times 10^3 \quad (23)$$

$$\delta_B = \left(\frac{R_B}{R_{\text{étalon}} - 1} \right) \times 10^3 \quad (24)$$

A partir de ces équations (23) et (24), on tire R_A et R_B et, en les remplaçant dans l'équation (22), on montre que (25) :

$$\varepsilon_{A-B} = \delta_A - \delta_B \quad (25)$$

2.4.2.3.2. Isotopes stables de la molécule d'eau (^{18}O , ^2H)

Au cours du cycle de l'eau, on assiste de façon naturelle à des variations des teneurs des isotopes stables de la molécule d'eau entre deux phases (fractionnement isotopique). Les phénomènes qui sont à la base de cette modification de composition en ^{18}O et ^2H , sont essentiellement régulés par la température et correspondent tout simplement à la condensation et à l'évaporation.

A la condensation, qui est un phénomène d'équilibre thermodynamique (Sonntag et al., 1983), la composition isotopique des précipitations est contrôlée par la température qui se traduit par les effets :

- d'altitude (orographie) : $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ diminuent lorsque l'altitude augmente ;
- de saison : les teneurs des $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ varient en fonction des saisons ou des périodes d'une saison ;
- de latitude : les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ diminuent lorsque la latitude augmente ;
- de périodes climatiques ou paléoclimatiques : les nappes présentent des teneurs différentes selon les températures au moment de leur recharge ;

Les teneurs en oxygène-18 et en deutérium sont liés à la température, elles sont donc corrélées entre elles. Ainsi, il a été établi à l'échelle du globe une relation générale (Craig, 1961), souvent désignée, comme droite mondiale des eaux météoriques, dont l'équation générale (26) est :

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + d \quad (26)$$

d est l'"excès en deutérium".

Dans les régions influencées par les perturbations océaniques, cet excès en deutérium qui varie en fonction de l'origine des précipitations (Gat et Dansgaard, 1972 ; Merlivat et Jouzel, 1979), est souvent proche de 10 (Craig, 1961 et Dansgaard, 1964) et l'équation (26) peut s'écrire alors de la façon suivante (27) :

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 10 \quad (27)$$

Lorsque, le réservoir de vapeur atmosphérique est alimenté par des évaporations d'eaux continentales ou qui proviennent des mers fermées, la valeur de cet excès en deutérium peut être supérieure à 10 (Nir, 1967 ; Fontes et Zuppi, 1976). Ainsi Fontes et Zuppi (1976), ont établi pour les bassins orientaux de la Méditerranée en Italie l'équation (28) :

$$\delta^2H = 8\delta^{18}O + 14,5 \quad (28)$$

L'évaporation intervient en conditions de non équilibre à cause de l'effet cinétique lié aux processus de diffusion moléculaire (Craig et al., 1963 ; Ehhalt et al., 1963 ; Dansgaard, 1964). Elle génère des pentes entre δ^2H et $\delta^{18}O$ variables en fonction de l'humidité relative dans la phase vapeur, mais toujours inférieures (ou dans un cas limite, égales) à 8 (Fig. 23).

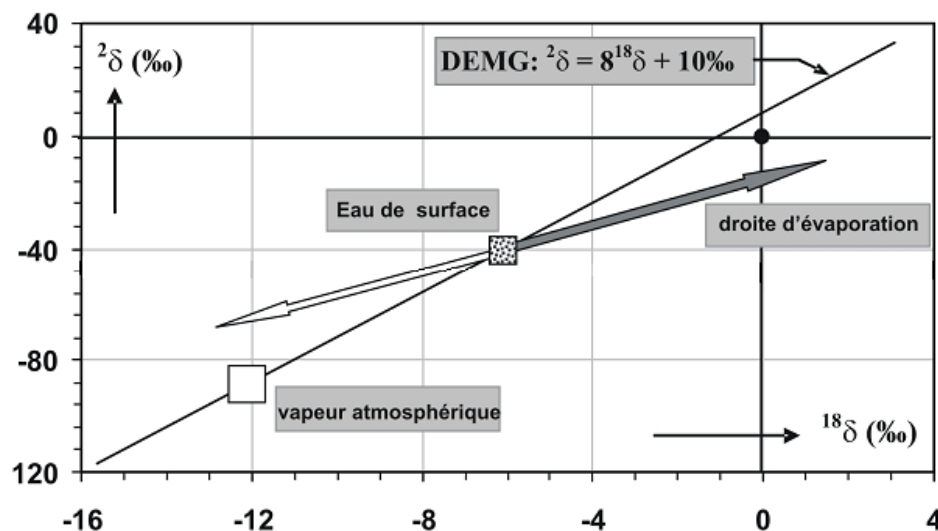
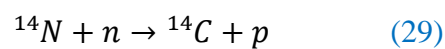


Figure 23 : Relation entre les valeurs δ^2H vs $\delta^{18}O$ de l'eau météorique qui subit l'évaporation, la vapeur issue de cette eau et l'eau résiduelle, représentée par la droite d'évaporation, comparée à la relation entre les eaux atmosphériques et les précipitations représentées par la droite des eaux météoriques (Fig. 23). La vapeur d'eau relativement « légère » (appauvrie) quitte le réservoir eau (flèche blanche) provoquant un enrichissement de l'eau résiduelle (flèche grise) ; (AIEA, 2008).

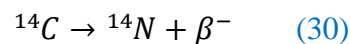
2.4.2.3.3. Isotopes du carbone (^{13}C et ^{14}C)

Les isotopes du carbone sont au nombre de trois. Deux sont stables, le carbone-12 (^{12}C) et le carbone-13 (^{13}C), avec des abondances naturelles respectives de 98,89% et de 1,108% et le troisième radioactif, le carbone-14 (^{14}C), qui se présente avec une abondance de $1,2 \cdot 10^{-12}\%$ et permet de dater les eaux souterraines jusqu'à 40-50 000 ans (AIEA, 2008).

L'isotope radioactif du carbone, ^{14}C ou radiocarbone, est un isotope cosmogénique produit naturellement (Bredehoeft et al., 1993) dans la haute atmosphère par absorption neutronique, selon l'équation (29) suivante :



Aussitôt formé, le ^{14}C s'oxyde rapidement en ^{14}CO , puis $^{14}\text{CO}_2$ et se mélange avec le CO_2 atmosphérique inactif. Une grande partie du $^{14}\text{CO}_2$ ainsi formé rejoint les océans et entre dans la composition des organismes marins. L'autre partie est incorporée dans les eaux continentales par dissolution et dans les plantes terrestres par photosynthèse. La teneur en ^{14}C reste en équilibre avec celle de l'atmosphère, tant que le système reste ouvert. Mais lorsque le système devient fermé (sans échange avec l'atmosphère), le ^{14}C décroît selon l'équation (30) :



Avec émission d'une énergie maximale β^- de 156 KeV et une période (demi-vie) de 5730 ± 40 ans (Reilly et al., 1994). L'âge d'un échantillon carboné, organique ou inorganique peut être calculé, selon l'équation (31), si l'activité initiale est connue :

$$t = \left(\frac{T_{1/2}}{\ln 2}\right) \times \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (31)$$

Avec,

t : temps passé depuis la fermeture du système ;

$T_{1/2}$: période du ^{14}C ;

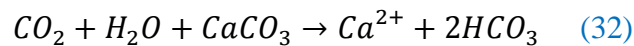
A : activité mesurée ;

A_0 : activité initiale.

Normalisées par l'activité standard (activité de l'acide oxalique NBS), ces activités sont exprimées en pmC (% modern carbon), (Mook, 1980). La teneur en ^{14}C moderne pré-industriel, retenue par convention est de 100 pmC, soit 13,56 dpm/gC (désintégrations par minute/gramme de carbone).

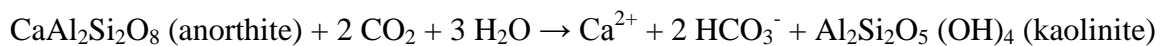
Au cours des processus d'infiltration des eaux de pluie, qui ont dissous le CO_2 de l'atmosphère et des sols (formation d'acide carbonique) peuvent dissoudre les minéraux présents dans les formations géologiques.

Si ces minéraux sont carbonatés, le carbone inorganique total dissous (CITD) dans les eaux souterraines, essentiellement sous forme de bicarbonates aura deux sources, comme montré, par exemple, par la réaction (32) :



De ces deux sources, seule celle correspondant au CO_2 contient du ^{14}C , les minéraux carbonatés étant généralement assez anciens pour ne plus en contenir. Si l'on cherche à dater les eaux qui contiennent ce CITD, il est nécessaire de tenir compte de ce phénomène de "dilution" du ^{14}C par la mise en solution de minéraux carbonatés. Plusieurs modèles de correction ont été élaborés dans ce but, entre autres ceux de Tamers, 1968 ; Fontes et Garnier, 1979 ; Pearson, 1992 ; Plummer et al., 1991 ; Plummer et al., 2003 ; etc.

Dans les aquifères non carbonatés, le CITD résulte de l'altération des silicates, par exemple, selon la réaction :



Dans les bicarbonates formés, la source du C est uniquement le CO_2 de l'atmosphère et des sols. L'âge des eaux souterraines peut donc être évalué directement à partir de la teneur en ^{14}C du CITD, par simple application de la loi de décroissance radioactive. C'est le cas du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, composé de grès et de sables, plus ou moins argileux.

2.4.2.3.4. Isotopes du Chlore-36 (^{36}Cl)

Le chlore possède également trois isotopes. Deux sont stables, le chlore-35 (^{35}Cl) et chlore-37 (^{37}Cl) avec des abondances naturelles moyennes respectives de 75,63% et 24,47% et le dernier radioactif, le chlore-36 (^{36}Cl), avec une abondance naturelle courante de l'ordre de $10^{-15} - 10^{-13}$.

Caractérisé par une longue période, de $3,01 \pm 0,04.10^5$ ans (Browne et Firestone, 1986), le ^{36}Cl peut permettre de dater des eaux souterraines très anciennes, jusqu'à environ 1 000 000 années. Outre ce potentiel de ^{36}Cl à dater des eaux très anciennes, l'ion chlorure présente de nombreux avantages dans l'étude des eaux souterraines. Il est ubiquiste, extrêmement soluble, très peu réactif et donc conservatif dans l'eau (Kazemi et al., 2006 ; Herczeg et Leaney, 2011). La production de l'isotope radioactif du chlore (^{36}Cl), a deux principales origines, naturelle et anthropogénique.

- **production naturelle du ^{36}Cl** : la production atmosphérique du ^{36}Cl ou production cosmogénique est un phénomène qui est dû à l'action des protons et neutrons cosmiques sur l'argon : spallation de ^{40}Ar ($^{40}\text{Ar}(p,sp)^{36}\text{Cl}$) à environ 96% et activation neutronique de ^{36}Ar ($^{36}\text{Ar}(n,p)^{36}\text{Cl}$), à environ 4%.

Les retombées de ^{36}Cl issues de cette production atmosphérique varient selon la latitude. Elles sont estimées à 26 atomes $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ en moyenne d'après AIEA (2008) et entre 20 et 30 atomes $\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Oeschger et al., 1969 ; Andrews et al., 1994 ; Huggle et al., 1996 ; Masarik et Beer, 1999 ; Masarik et Beer, 2009).

Cependant, une autre partie de la production naturelle de ^{36}Cl a lieu en subsurface, par l'action de neutrons thermaux (de faible énergie), majoritairement par activation neutronique de ^{35}Cl ($^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$ ou de $^{39}\text{K}(n,\alpha)^{36}\text{Cl}$) (AIEA, 2008) ou bien sous l'effet des muons issus du rayonnement cosmique.

En subsurface, la production naturelle de ^{36}Cl est donc fortement dépendante des neutrons issus des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium se trouvant dans les roches de l'aquifère.

- **production anthropogénique de ^{36}Cl** : la production anthropogénique est principalement liée aux tests thermonucléaires entrepris entre les années 1952 à 1958 dans l'Océan Pacifique Sud. Ces essais ont produit ainsi de grosses quantités de ^{36}Cl par activation neutronique du chlorure ($^{35}\text{Cl}(n,\gamma)^{36}\text{Cl}$) ; (Fabryka-Martin et al., 1987 ; Kazemi et al., 2006).

La datation, des eaux souterraines anciennes, s'intéresse aux deux sources du ^{36}Cl , à savoir la source cosmogénique et celle de la production souterraine du ^{35}Cl par activation neutronique. La première est caractérisée par $^{36}R_0$, le rapport initial $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ et la deuxième par $^{36}R_{se}$ le rapport d'"équilibre séculaire" qui dépend de la composition chimique de la roche aquifère. Ainsi, le rapport dans les échantillons d'eau souterraine (AIEA, 2008) est donné par l'équation (33) :

$$^{36}R = ^{36}R_0 e^{-\lambda t} + ^{36}R_{se} (1 - e^{-\lambda t}) \quad (33)$$

En tirant t dans l'équation (33), l'âge de l'eau est ainsi calculé par :

$$t = \frac{-1}{^{36}\lambda} \ln \left[\frac{(^{36}R - ^{36}R_{se})}{(^{36}R_0 - ^{36}R_{se})} \right] \quad (34)$$

Avec,

$$^{36}\lambda = \ln 2 / (3,2 \cdot 10^7) \text{s}^{-1};$$

R_{se} , peut être obtenu par un calcul à partir de la composition chimique de la roche aquifère, ou par des mesures directes. Pour un grès, les valeurs typiques sont voisines de $5 \cdot 10^{-15}$ (Bentley et al., 1986 ; Guendouz et Michelot, 2006).

La relation entre le rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ dans les précipitations et le taux de retombée atmosphérique est donnée par Andrews et al. (1994) par l'équation (35) :

$$F = \frac{R \times [\text{Cl}^-]_p \times P \times 10^{-3} \times N_A}{3,15 \times 10^7 \times 35,5} \quad (35)$$

Ou

$$R = \frac{F \times 3,15 \times 10^7 \times 35,5}{[\text{Cl}^-]_p \times P \times 10^{-3} \times N_A}$$

Avec

F : taux de retombée en ^{36}Cl (at. $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

R : rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ mesuré (at. at.^{-1})

$[\text{Cl}^-]_p$: concentration en chlorure des précipitations (mg L^{-1})

P : hauteur moyenne annuelle des précipitations (mm a^{-1})

N_A : nombre d'Avogadro (approximativement $6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

Ce qui revient à l'équation (36) :

$$R = \frac{1857 \cdot 10^{-15} F}{([Cl^-]_p \times P)} \quad (36)$$

2.4.2.3.5. Détermination des vitesses d'écoulement des eaux souterraines

Deux méthodes indépendantes permettent le calcul des vitesses d'écoulement des eaux souterraines : la méthode se basant sur la loi de Darcy et celle utilisant des temps calculés à partir des teneurs en traceurs naturels radioactifs.

La première correspond à l'équation (37) :

$$V = \frac{K \cdot i}{n_e} \quad (37)$$

Avec,

V : vitesse d'écoulement des eaux (m/s) ;

K : coefficient de perméabilité (m/s) ;

i : gradient hydraulique unitaire (sans unité) ;

n_e : porosité efficace (sans unité).

Dans la seconde méthode ce sont les temps de transit calculés à partir de la décroissance radioactive (^{14}C , ^{36}Cl , etc.) qui sont utilisés, avec les distances qui séparent les points de départ et d'arrivée.

Connaissant la distance qui sépare deux points et le temps de transit entre ces deux points, la vitesse est simplement calculée par l'équation (38) :

$$V = \frac{d}{\Delta t} \quad (38)$$

Avec,

d : distance séparant le point de départ et celui de l'arrivée (m) ;

Δt : différence du temps de séjour des eaux entre le point de départ et le point d'arrivée (s)

2.4.2.3.6. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique d'analyse de données qui s'intéresse à des tableaux de données rectangulaires, avec les individus en ligne et les variables quantitatives en colonne. Dans cette étude, les individus correspondent aux noms des échantillons (nom des points d'eau échantillonnés), et les variables aux différents paramètres mesurés (ions majeurs, paramètres physiques de l'eau, teneurs et activités isotopiques).

L'objectif de l'ACP consiste à faire le bilan de ressemblance entre les différentes variables et de visualiser la matrice de corrélation, à travers des représentations graphiques des différents groupes d'individus et groupes de variables. Après l'élaboration du tableau de données dans cette étude, l'Analyse en Composantes Principales est réalisée avec FactoMineR, plus précisément à l'aide de "Rcommender" (Rcmdr) sur le logiciel de statistique R.

Pour ce faire, sur R, charger la "library(Rcmdr)", en écrivant sur la première page qui s'ouvre quand on lance R, "library(Rcmdr)" puis "Entrée" du clavier.

Sur "Rcmdr", charger les "RcmdrPlugin.FactoMineR" à travers : "outils" -> "plug-ins Rcmdr" -> "ok" -> oui.

Importer les données à traiter grâce au menu "Données" -> "Importer des données" -> "depuis un fichier texte, le presse-papier ou URL" -> cochez "Tabulations" -> Ok.

Chercher l'emplacement des données -> sélectionner le tableau de donnée -> Ok.

Sur l'onglet "FactoMineR" -> ACP -> Ok.

CHAPITRE III :
RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. CARACTERISTIQUES HYDROCLIMATIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

3.1.1. Pluviométrie

3.1.1.1. Précipitations moyennes annuelles

Les précipitations moyennes annuelles (1951-2010) pour la station synoptique de Birni N'Konni à 13°48' de latitude Nord et de celle de Tahoua-ville à 14°54' de latitude Nord, respectivement 526,58 mm et 386,15 mm, montrent que la pluviosité décroît du Sud au Nord dans la région de Tahoua. À cette décroissance des moyennes annuelles liée à la latitude, s'ajoute une variation de celles-ci en fonction de l'augmentation de la longitude également (Fig. 4 et 5, chapitre I). Cette décroissance, suivant un gradient de direction Nord-Nord-Est, des hauteurs moyennes annuelles, dans la zone, s'explique par l'effet de continentalité, dû à l'appauvrissement en eau de la masse d'air porteuse de précipitation, qu'est la "mousson", au fur et à mesure de son avancée au cœur des terres et confirme les résultats antérieurs (Charre, 1974 cité par Ousmane, 1988 ; Ozer et al., 2010).

La nappe du Continental Hamadien étant captive dans la partie sud de la région de Tahoua qui enregistre les plus fortes précipitations annuelles (plus de 500 mm/an), ne profite pas d'une recharge directe de la part de ces dernières. Par contre, plus à l'Est de cette partie, dans la région de Maradi où la nappe du Continental Hamadien est libre, celle-ci peut être rechargée par les eaux de pluies à travers des vastes vallées qui jalonnent la région. Il s'agit notamment de la vallée de Goulbi N'Kaba, de celle de Goulbi Maradi, et de la vallée de la Tarka.

Le Continental Intercalaire, quant à lui, est libre dans la partie nord-est de la région de Tahoua, précisément à l'Est de l'axe Tassara-Abalak et au Nord de la latitude 15° N. Cependant, cette zone reçoit les plus faibles précipitations annuelles (moins de 200 mm/an), probablement insuffisantes pour permettre, bien qu'étant libre, une recharge significative d'une telle nappe dans une zone saharienne caractérisée par un pouvoir évaporatoire très intense.

On note, d'une manière générale que la pluviométrie décroît depuis les années 1950 (indiquée par la flèche bleue sur la figure 24) dans la région de Tahoua, voire bien avant sur l'ensemble du Niger (Ousmane, 1988), et au Sahel (Ozer, 2003), malgré la légère remontée constatée pour la période de 1991 à 2000, (flèche verte, Fig. 24) dans la région, à l'instar des autres pays du Sahel comme le Burkina Faso (Ouandaogo/Yameogo, 2008).

Après cette légère remontée, qui peut donner l'impression d'une amélioration des conditions climatiques, une nouvelle tendance à la baisse (flèche rouge, Fig. 24) pour la période 2001-2010, montre que cette amélioration n'a pas été durable.

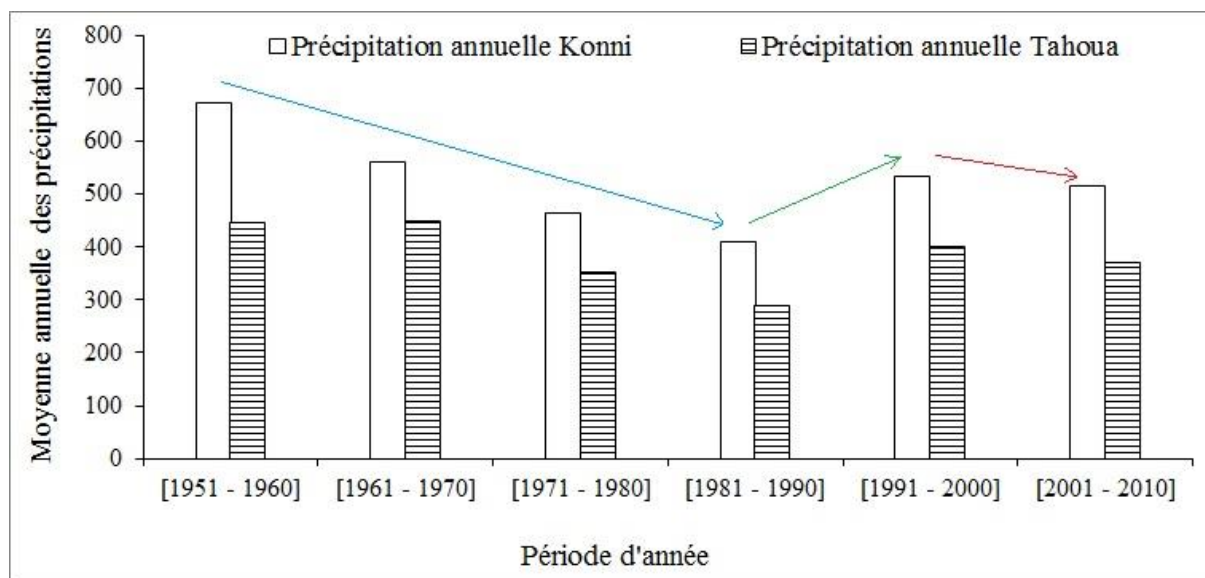


Figure 24 : Evolution des pluies moyennes annuelles regroupées par décennie

3.1.1.2. Evolution interannuelle des hauteurs annuelles des précipitations

L'analyse des hauteurs annuelles des précipitations de la région de Tahoua, à partir des stations de Tahoua-ville et de Birni N'Konni, a été possible grâce à des données journalières disponibles depuis les années 1950 au niveau des services météorologiques du Niger (annexe 3). Ces données confirment une répartition inégale des précipitations dans le temps et dans l'espace (Fig. 25) dans la région, à l'image de ce qui est observé à l'échelle du Niger (Ozer et al., 1995 ; Ozer et al., 2010).

Les courbes de la figure 25 montrent l'évolution dans le temps des précipitations annuelles, pour la période allant de 1951 à 2010, des séries d'observations de Birni N'Konni et de Tahoua-ville. La série de Birni N'Konni, présente un maximum de 990,2 mm (année 1952) et un minimum de 289,4 mm (année 1973).

Celle de Tahoua-ville montre un maximum de 635,6 mm (année 1994) et un minimum de 205,5 mm (année 2004). Plusieurs périodes excédentaires par rapport à la moyenne sont observées, alternant avec des périodes déficitaires, en particulier les deux grandes périodes déficitaires ayant marqué l'Afrique sahélienne depuis les années 1950 (Ozer et al., 2010).

La première, moins sévère que la deuxième dans la région, correspond à la période de 1971 à 1973, avec une hauteur moyenne de 335,3 mm/an pour la station de Tahoua-ville et de 259,7 mm/an pour celle de Birni N’Konni. La seconde concerne la période de 1982 à 1984, avec une hauteur moyenne pour la station de Birni N’Konni de 360,8 mm/an et 239,1 mm/an pour celle de Tahoua-ville.

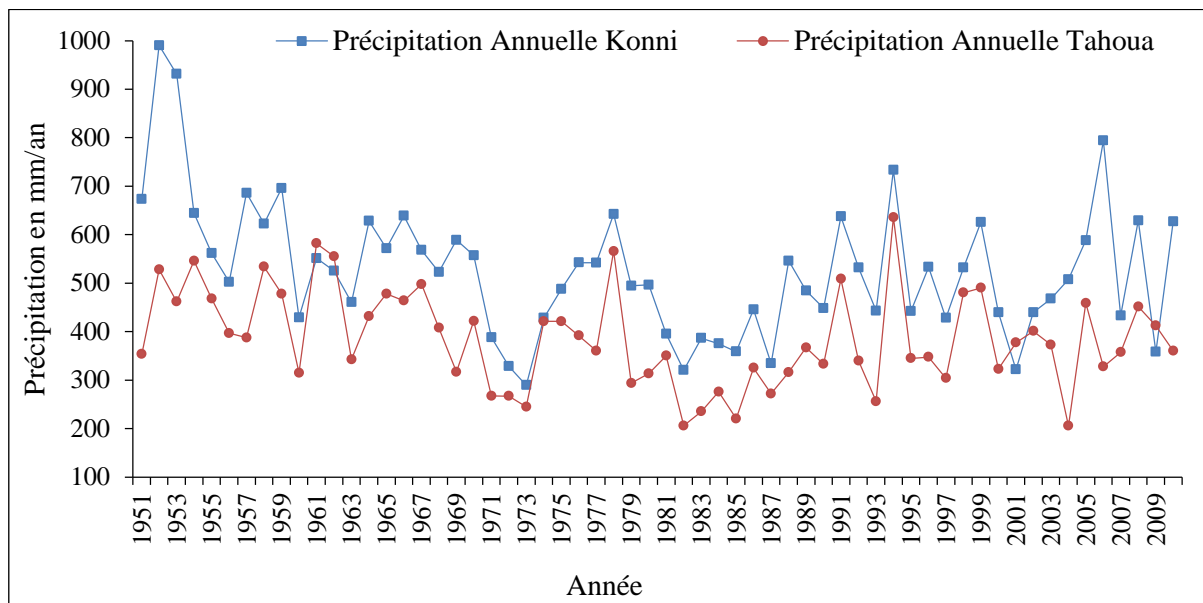


Figure 25 : Variation annuelle des hauteurs de pluies dans la région de Tahoua pour la période de 1951 à 2010

3.1.1.3. Hauteurs moyennes mensuelles

Les hauteurs moyennes mensuelles de pluie, calculées pour la station synoptique de Tahoua-ville et de celle de Birni N’Konni, pour la période allant de 1951 à 2010 (Fig. 26), montrent que le régime pluviométrique est homogène, de même que pour les autres stations du pays (Ousmane, 1988 ; Favreau, 2000 ; Guero, 2003). En effet, une seule saison pluvieuse est observée sur l’ensemble de la région, allant généralement de fin mai à début octobre, et une saison sèche entre octobre et mai, au cours de laquelle on peut observer occasionnellement des pluies. Plus de 91% des pluies tombent dans cette région entre le mois de juin et septembre, et le mois d’août est le plus arrosé, avec plus de 1/3 de la moyenne annuelle. Malgré l’existence de pluies sporadiques en saison sèche, pour la période de 1951 à 2010, le mois de décembre est rigoureusement sec au niveau de la station de Birni N’Konni et ceux de novembre, de décembre et de janvier pour la station de Tahoua-ville.

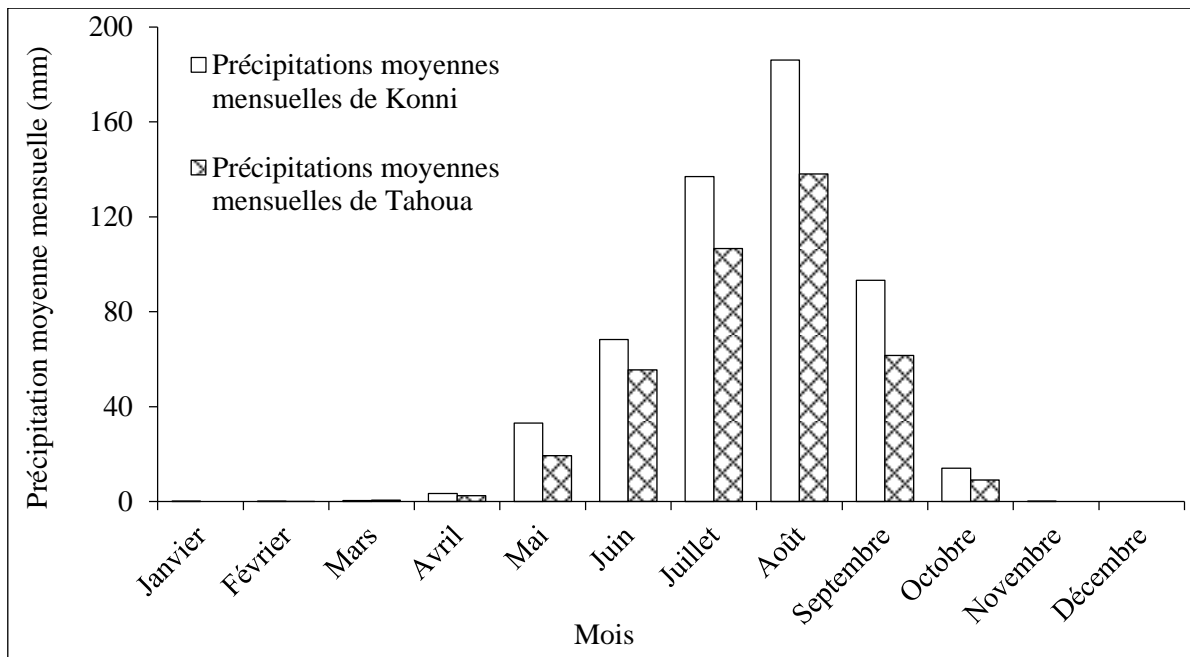


Figure 26 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de Birni N’Konni et de celle de Tahoua sur 60 ans (1951 à 2010)

3.1.1.4. Nombre de jours de pluie

Le nombre de jours de pluie annuels (Fig. 27), montre une forte variation spatio-temporelle durant la période 1951-2010. Le nombre de jours de pluie sur les trois à quatre mois que dure la saison pluvieuse, ne dépasse pas 70 jours pour chacune des deux stations synoptiques pour la période 1951-2010 (annexe 4), excepté l’année 1999 au niveau de la station de Birni N’Konni qui se distingue avec 71 jours. Pour la même période, on constate que le nombre de jours de pluie a toujours dépassé 43 jours pour la station de Birni N’Konni, excepté pour l’année 1982 (38 jours) et a toujours dépassé 39 jours pour celle de Tahoua-ville, excepté les années 1982 et 1983 (36 jours chacune).

La moyenne du nombre de jours de pluie, sur la saison pluvieuse, et toujours pour la période de 1951 à 2010, est de 54 jours au niveau de la station de Birni N’Konni et de 51 pour celle de Tahoua-ville.

Comme sur la chronique des hauteurs de précipitations annuelles, les deux grandes périodes déficitaires ayant marqué le Sahel apparaissent également, caractérisées par les plus faibles nombres de jours de pluie.

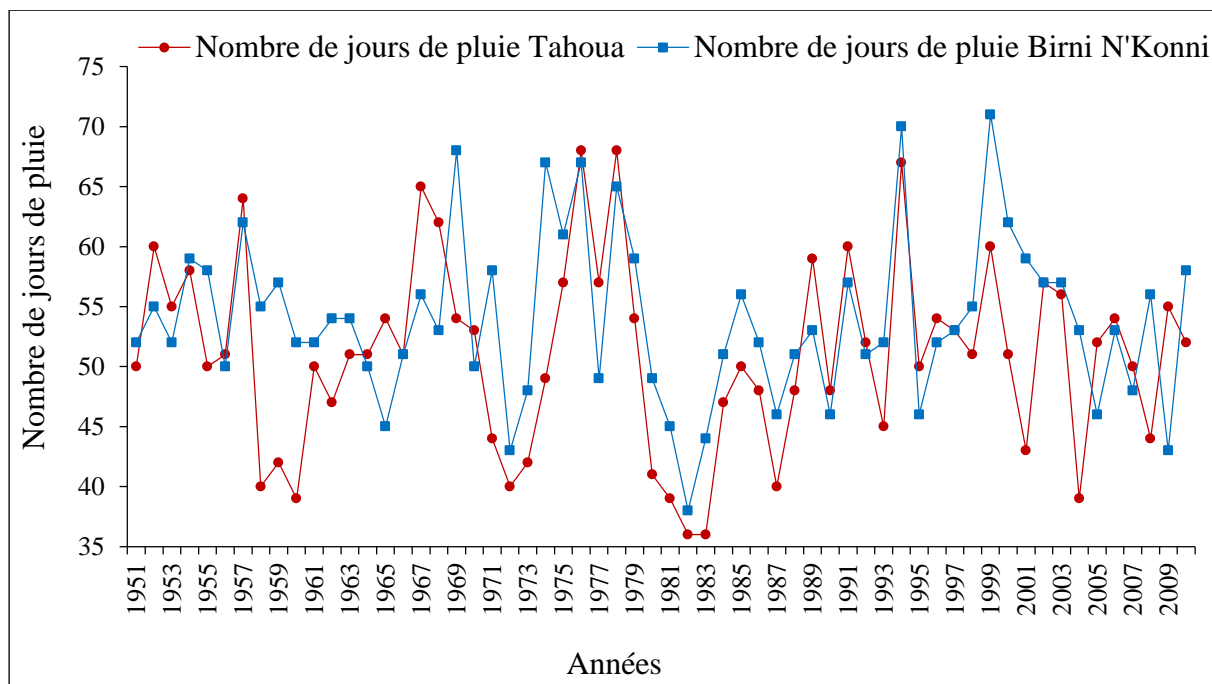


Figure 27 : Variation du nombre de jours de pluie en fonction des années, de la région de Tahoua (Source : DMN-Niger, données Pluviométriques journalières sur la période allant de 1951 à 2010)

3.1.2. Température

L'analyse des températures annuelles à la station de Tahoua-ville, pour la période allant de 1951 à 2010 (annexe 5), montre une température maximale moyenne annuelle de 36,5°C et minimale moyenne annuelle de 22,0°C. La moyenne annuelle, qui affiche une valeur de 29,3°C, classe la région de Tahoua parmi les régions les plus chaudes de l'Afrique sahélienne, comme celles de Bamako (29°C), Dakar (25°C) et N'Djamena (29°C) (Ousmane, 1988). L'analyse des températures annuelles, par décennie (Fig. 28), fait ressortir une légère augmentation de celles-ci des années 1950 à nos jours. Cet accroissement de la température pourrait surtout résulter des effets du réchauffement climatique global.

La variation des températures moyennes mensuelles dans la ville de Tahoua (Fig. 29) présente deux maxima au cours de l'année, un premier en mai avec des températures voisines de 36°C et un second en octobre qui tourne autour de 30°C. Deux minima sont également observés au cours de l'année, en août avec 27,7°C, correspondant au cœur de la saison pluvieuse dans la zone, et de décembre à janvier avec des températures de 23,6°C et de 22,8°C respectivement.

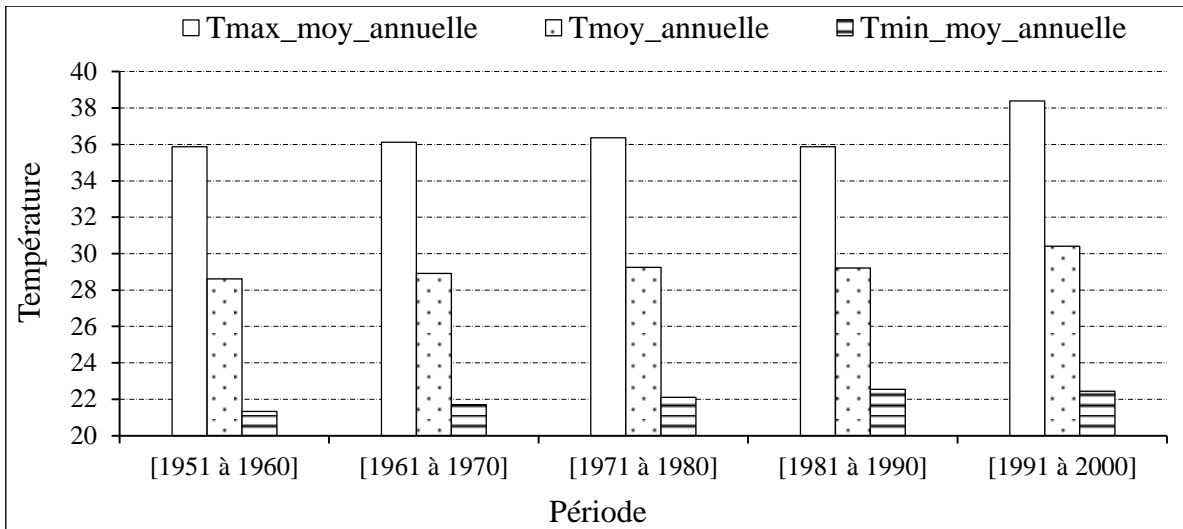


Figure 28 : Variation des températures moyennes annuelles par décennies (1951 à 2000) dans la région de Tahoua

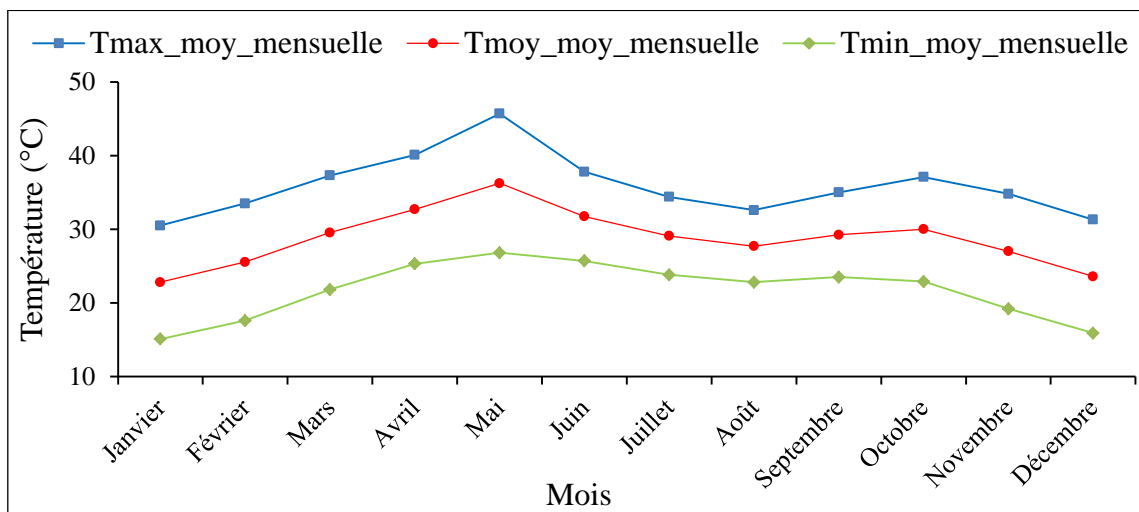


Figure 29 : Variation des températures moyennes mensuelles (1951 à 2000) dans la région de Tahoua

3.1.3. Humidité relative de l'air

Sur l'année 2016, les moyennes mensuelles de l'humidité relative de l'air de la région de Tahoua montrent logiquement une parfaite corrélation avec celles des pluies (Fig. 30). Les mois de juillet à septembre, correspondant aux mois les plus pluvieux de la saison de pluies enregistrent les humidités atmosphériques les plus élevées. Ces valeurs élevées d'humidité relative de l'air varient entre 43,8% et 47,6% pour les minima et entre 84,6% et 86,8% pour les maxima sur l'ensemble de la région.

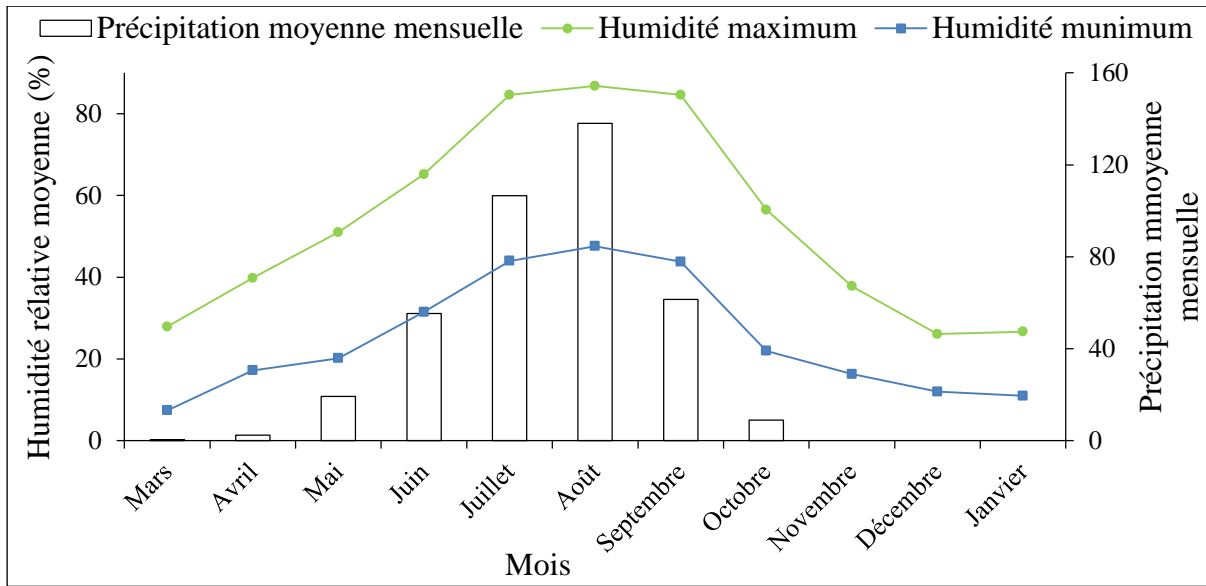


Figure 30 : Evolution des moyennes mensuelles minima et maxima de l'humidité relative (région de Tahoua, année 2016)

3.1.4. Vent

La région de Tahoua est caractérisée par deux types de vent qui alternent. Le premier chaud et sec, c'est-à-dire l'harmatan, souffle en hiver, et le deuxième, frais et humide, la mousson, intervient en été. Les vitesses des vents (Fig. 31) varient fréquemment de $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ à $5,4 \text{ m.s}^{-1}$. Décembre et janvier, correspondent aux mois ayant généralement les fortes vitesses, avec respectivement $4,8 \text{ m.s}^{-1}$ et $5,4 \text{ m.s}^{-1}$. Avril et septembre enregistrent les plus faibles vitesses du vent, avec environ $2,8 \text{ m.s}^{-1}$ (Année 2016).

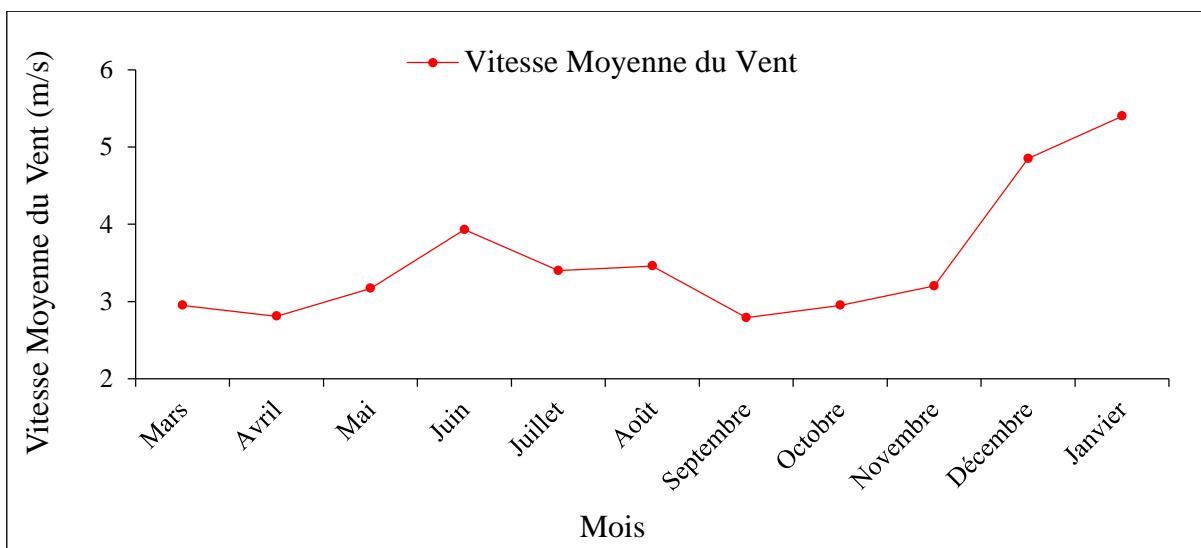


Figure 31 : Evolution des vitesses moyennes mensuelles du vent de la région de Tahoua (2016)

3.1.5. Indice d'aridité

Les indices d'aridité de De Martonne calculés pour la région de Tahoua, et pour la période 1951 à 2000 (Tableau 9), permettent d'estimer le degré d'aridité de la région. Les valeurs d'indice obtenues pour cette chronique de 1951 à 2000, varient de 4,86 à 16,43 avec une moyenne de 9,96 et un écart-type de 2,84 (n=49).

Le tableau 10 permet une classification des indices d'aridités en différents types de climat. Ainsi, 52% des indices calculés au niveau de la région de Tahoua ont des valeurs inférieures à 10 et les 48% restant des valeurs comprises entre 10 et 20. Ceci, attribue à la région de Tahoua un type de climat aride à semi-aride.

Tableau 6 : Indice d'aridité de la Région de Tahoua sur 50 ans (1951 à 2000)

Années	Indices d'aridité	Années	Indices d'aridité	Années	Indices d'aridité	Années	Indices d'aridité	Années	Indices d'aridité
1951	9,08	1961	15,55	1971	6,79	1981	8,96	1991	13,13
1952	13,74	1962	14,36	1972	6,72	1982	5,25	1992	8,89
1953	12,04	1963	8,71	1973	6,1	1983	5,87	1993	4,86
1954	14,18	1964	11,2	1974	10,85	1984	7,02	1994	16,43
1955	12,19	1965	12,31	1975	10,88	1985	5,67	1995	8,8
1956	10,23	1966	11,97	1976	10,02	1986	8,24	1996	8,82
1957	10,07	1967	12,82	1977	9,36	1987	6,9	1997	7,74
1958	13,73	1968	10,37	1978	14,49	1988	8,14	1998	12,14
1959	12,37	1969	7,88	1979	7,45	1989	9,53	1999	12,47
1960	8,13	1970	10,78	1980	7,93	1990	8,48	2000	8,27

Tableau 7 : Indice d'aridité de la zone d'étude

Indice d'aridité	Types de climat	Pourcentages présentant ces indices d'aridité
$I < 5$	Région hyperaride	2
$5 < I < 10$	Région aride	50
$10 < I < 20$	Région semi-aride	48
$20 < I < 30$	Région semi-humide	
$30 < I < 55$	Région humide	
Type de climat dans la région de Tahoua		Aride à semi-aride

3.2. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES ET LITHOLOGIQUES DES AQUIFERES DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN

3.2.1. Profondeurs totales des forages

Les profondeurs totales des forages (annexe 6) sont celles équipées dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, où deux types d'horizons poreux sont captés : le réservoir du Continental Intercalaire, libre ou captif sous le Crétacé supérieur, dans la partie nord de la zone d'étude, et celui du Continental Hamadien, captif sous le Crétacé supérieur, dans la partie sud, en dessous duquel le Continental Intercalaire est présent. Cependant, le Continental Intercalaire n'a jamais été capté dans ce secteur Sud parce que le Continental Hamadien qui est capté en premier présente de meilleurs paramètres hydrodynamiques.

La profondeur moyenne des forages dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, de la région de Tahoua est d'environ 332 mètres (n=290), avec un écart-type considérable de 218. La profondeur maximale observée dans la région est de 800 mètres au forage de Takanamat (N 4°46'13,4'' et E 15°08'33,7''), département de Tahoua. Dans la partie libre du Continental Intercalaire, à l'Est de l'axe Tassara-Abalak et au Nord du parallèle 15°N, la nappe peut être captée à moins de 100 mètres, en certains points, comme le puits P₂ d'Abalak (N 6°16'45,5'' et E 15°28'03,7''), avec 85 mètres de profondeur.

La carte des courbes isohypses des profondeurs équipées des forages (Fig. 32), dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua, montre une baisse des côtes de l'Est vers l'Ouest. Ces côtes des courbes isohypses varient précisément de 240 mètres d'altitude à l'Est de la région à -420 mètres d'altitude vers l'Ouest, conformément à la géométrie du bassin, dont la profondeur augmente de ses bordures vers le centre (Greigert, 1965, 1966a, 1978 ; Dodo, 1992).

Les profondeurs importantes de captage des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région constituent un obstacle majeur pour l'accès à ces ressources par la population locale, faute de moyen pour la réalisation, et l'entretien de forages profonds. Toutefois, elles constituent également un avantage car elles assurent une protection durable des ressources contre toute pollution d'origine anthropique.

Cependant, en zone libre, la nappe du Continental Intercalaire peut être captée par des puits, le niveau statique se situant autour de 70 mètres de profondeur.

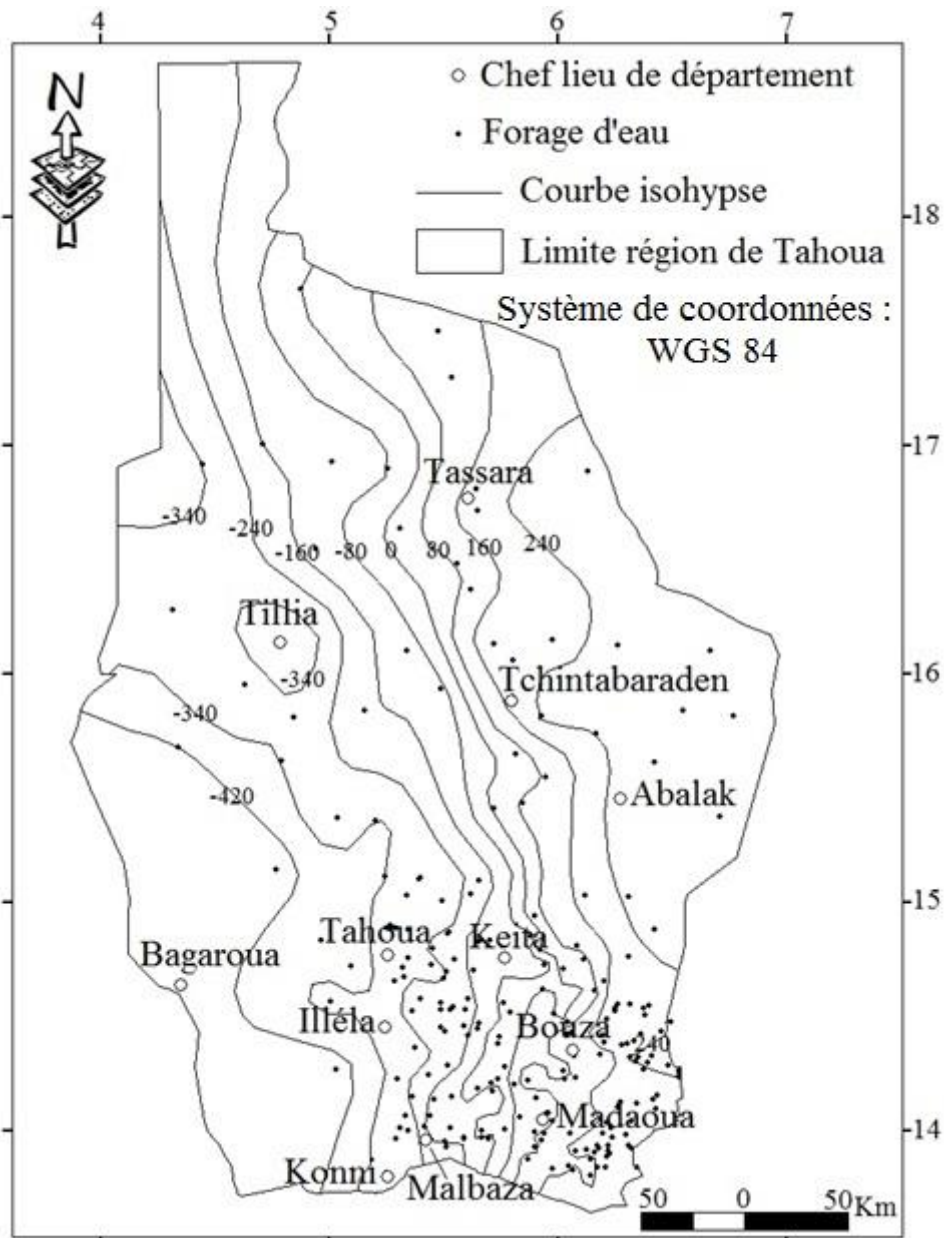


Figure 32 : Carte des courbes isohypses des profondeurs équipées des forages captant le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.2.2. Lithologie et épaisseur du réservoir

Les corrélations litho-stratigraphiques établies entre les différents logs de forages, captant le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Fig. 33 et 34) dans la région de Tahoua, montrent que les réservoirs du Continental Hamadien et du Continental Intercalaire sont mis en charge par les mêmes types de formations géologiques, celles du Crétacé moyen et supérieur. Ces corrélations mettent également en évidence l'absence du réservoir du Continental Hamadien dans la partie nord de la région de Tahoua.

Le réservoir du Continental Hamadien (Fig. 33 et 34), est constitué par des grès moyens à grossiers, des sables lavés à éléments de quartz, des sables très peu argileux et localement des silts. Ils résultent des dépôts deltaïques, fluviaux et lacustres du Crétacé moyen et constitue une seule nappe. Par contre le Continental Intercalaire présent aussi bien dans la partie nord que dans la partie sud de la région, sous le Continental Hamadien, se présente sous forme d'un système aquifère multicouche. Son réservoir est constitué principalement par des grès argileux, des argiles sableuses, des silts argileux et des argiles silteuses.

L'épaisseur moyenne du réservoir du Continental Hamadien dans la région de Tahoua, déduite à partir des logs diagraphiques et lithologiques des forages de la zone, est d'environ une cinquantaine de mètres. Quant au Continental Intercalaire, il est difficile d'estimer son épaisseur dans la région de Tahoua, non seulement à cause de son caractère multicouche, mais aussi et surtout parce que son mur n'est jamais été atteint dans la région.

Les fiches logs de forages et celles de diagraphies analysés dans cette étude sont cohérentes avec celles des investigations hydrogéologiques antérieures (Greigert, 1966a ; Greigert, 1978 ; Kogbé, 1979 cité par Guero, 2003 ; Miko, 1999 ; OSS, 2011) portant sur le bassin des Iullemeden.

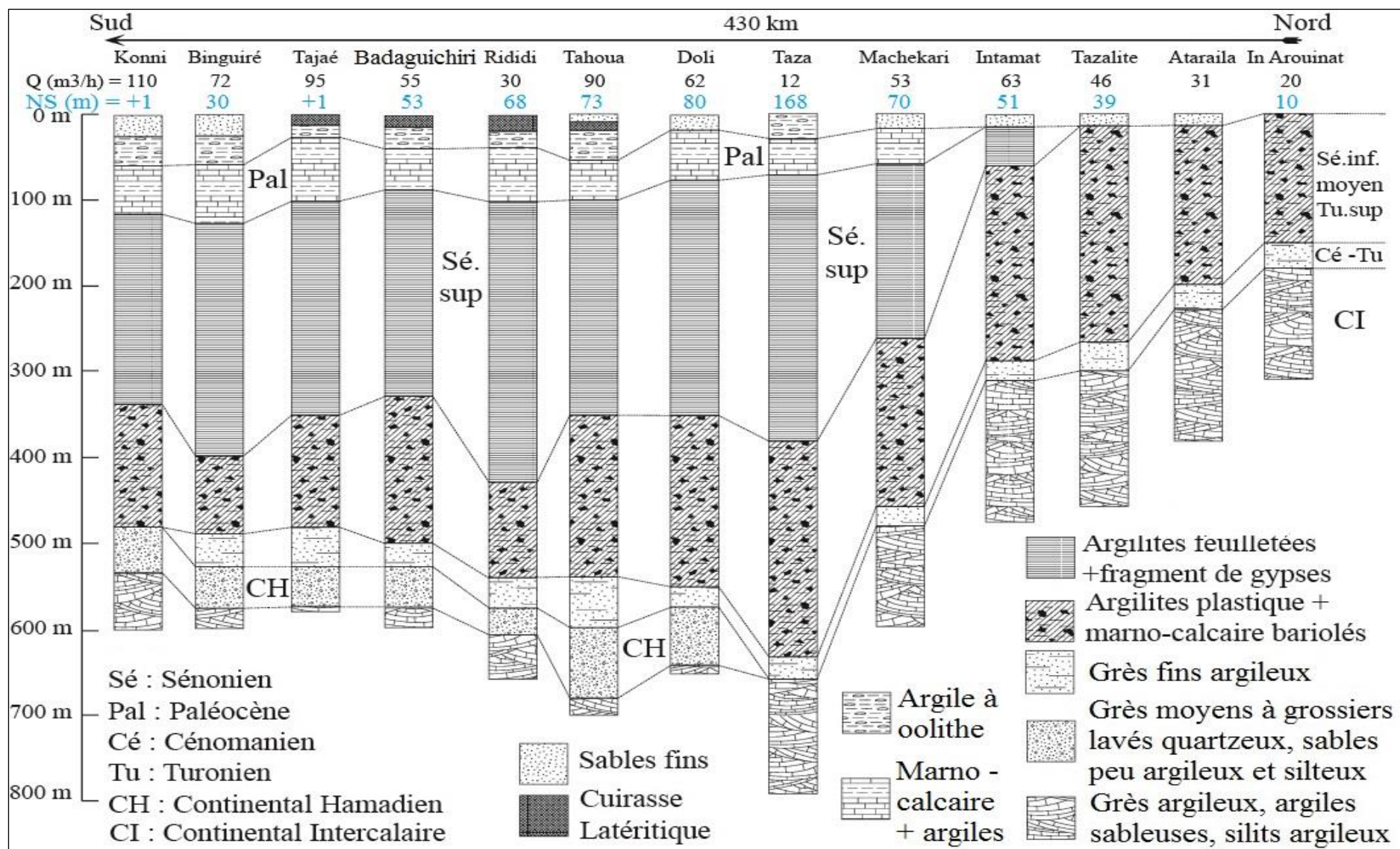


Figure 33 : Coupes types de forages avec corrélations litho stratigraphiques dans la région de Tahoua (direction Sud vers Nord)

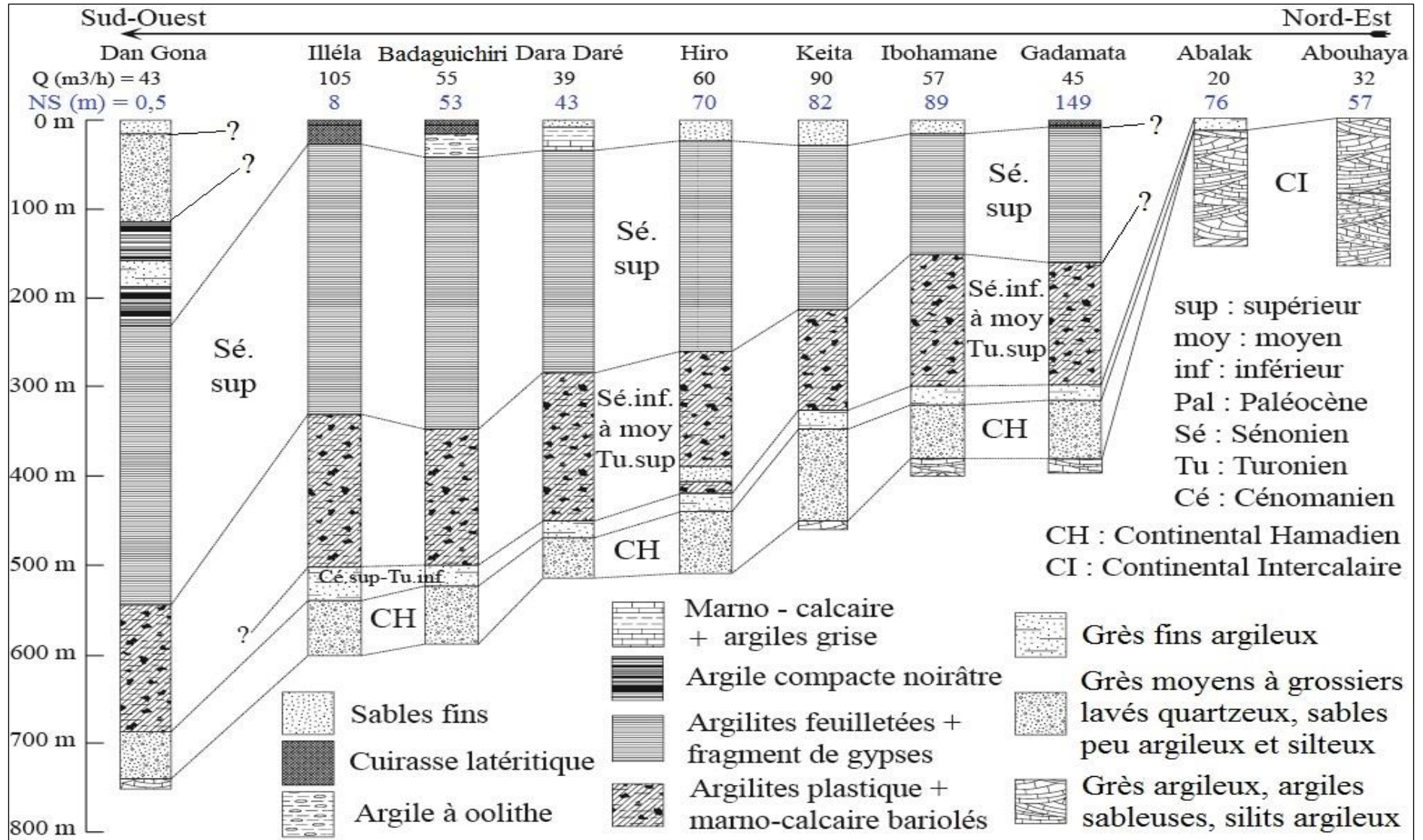


Figure 34 : Coupes types de forages avec corrélations litho stratigraphiques dans la région de Tahoua (direction SW-NE)

3.2.3. Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

3.2.3.1. Débits (Q) et débits spécifiques (Qsp)

Les débits spécifiques des nappes du Continental Intercalaire/Hamadien (Qsp), calculés après les opérations des essais de pompage, sur 120 forages dans la région de Tahoua (annexe 7 et 8), varient de $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ à $22,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, avec une moyenne de $7,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, une médiane de $6,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ et un écart-type de $4,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (n=120).

Les valeurs des débits spécifiques, regroupées par classe (Fig. 35), montrent que plus de 63% des forages du Continental Intercalaire/Hamadien présentent un débit spécifique supérieur à $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Ceci, attribue à ces nappes une très bonne productivité et confirme ainsi les résultats antérieurs obtenus dans la zone (Greigert, 1978 ; Guero, 2003 ; MEELD, 2010 ; SPEN, 2015).

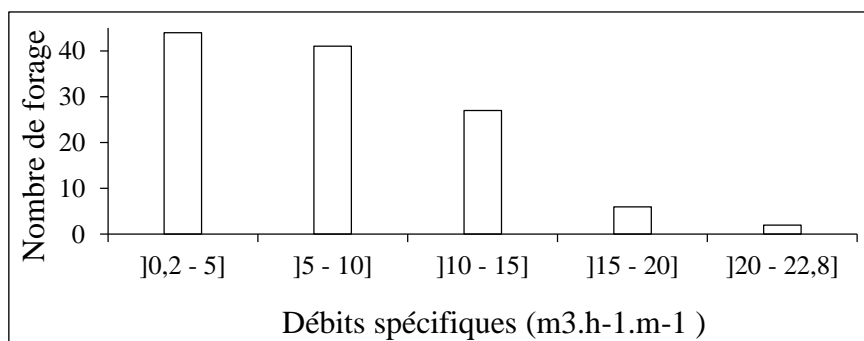


Figure 35 : Histogramme des débits spécifiques Q_{sp} dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Néanmoins, la distribution spatiale des valeurs des débits spécifiques (Fig. 36) montrent une grande hétérogénéité, reflétant ainsi la nature hétérogène de la lithologie des réservoirs des nappes. La couleur rouge (Fig. 36), représente les valeurs des débits spécifiques les plus élevées, et la couleur bleue les plus faibles valeurs. On observe néanmoins que le secteur sud de la région, où le Continental Hamadien est capté, présente les plus grandes valeurs des débits spécifiques (environ plus de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ localement), alors que la partie nord, où c'est le Continental Intercalaire qui est capté, montre des valeurs faibles.

Ceci vient confirmer les observations antérieures, sur le fait que les nappes du Continental Hamadien sont plus productives que celles du Continental Intercalaire (Greigert, 1978 ; MEELD, 2010 ; SPEN, 2015). Cette bonne productivité du CH est surtout liée à sa nature lithologique.

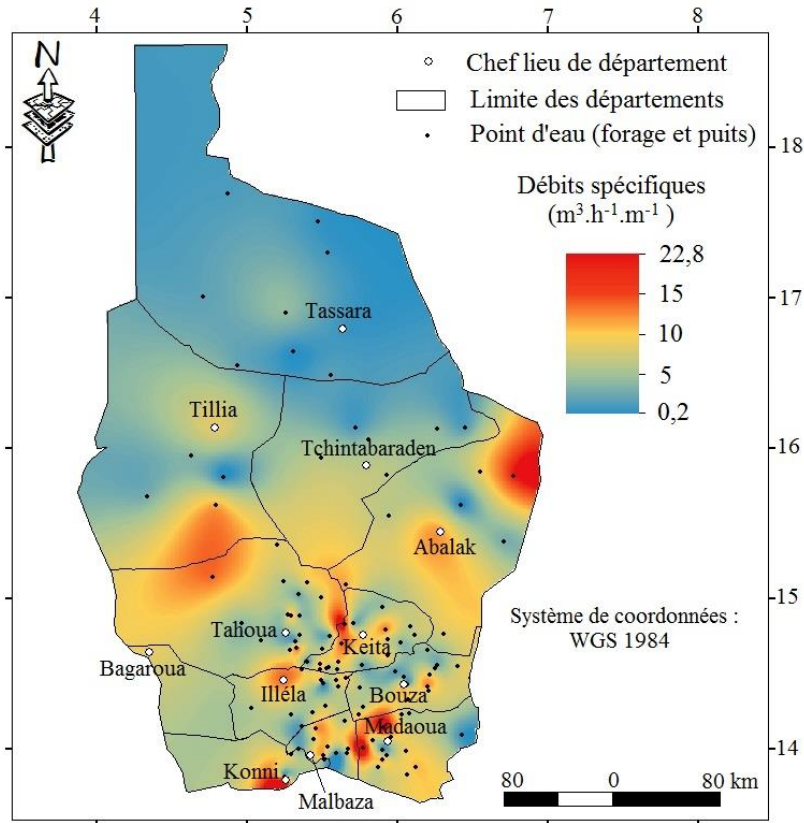


Figure 36 : Carte de distribution spatiale des débits spécifiques Q_{sp} dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.2.3.2. Transmissivité (T)

Les soixante-douze valeurs de coefficients de transmissivité collectées (annexe 7), dont neuf dans le cadre de cette étude, varient de $2 \cdot 10^{-4}$ à $2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, avec une moyenne de $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, une médiane de $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et un écart-type de $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Dans le Continental Hamadien, les valeurs de coefficients de transmissivité ($n = 60$) sont comprises entre $1 \cdot 10^{-3}$ et $2 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, avec une moyenne de $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et une médiane de $1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pour le Continental Intercalaire, ces coefficients de transmissivité varient de $2 \cdot 10^{-4}$ à $3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ($n = 12$), avec une moyenne de $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, une médiane de $25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

La répartition spatiale des différentes valeurs des coefficients de transmissivité dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien est présentée sur la figure 37. L'augmentation de la transmissivité est représentée, par la variation de couleur, du bleu au blanc, et permet ainsi d'observer que, le Continental Hamadien capté dans la partie sud de la région présente les plus fortes valeurs (moyenne de $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), supérieures d'environ un facteur 1 à 2 à celles du Continental Intercalaire (moyenne $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

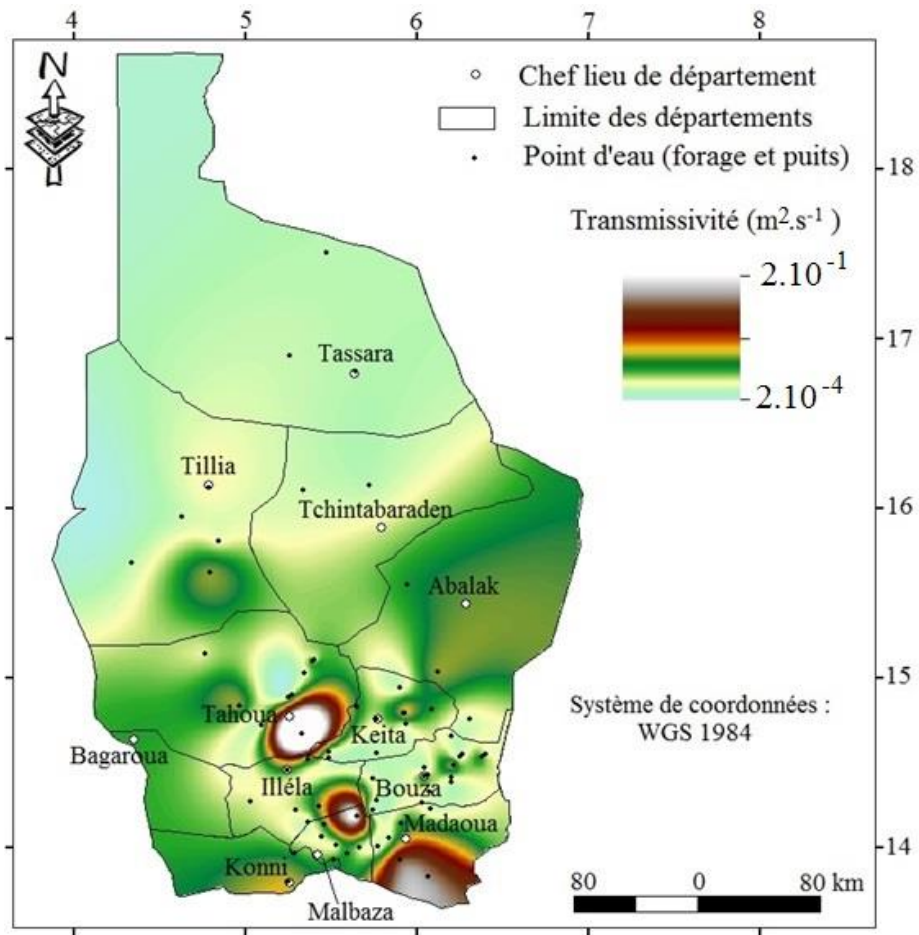


Figure 37 : Carte de distribution spatiale des valeurs de transmissivité dans le Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.2.3.3. Perméabilité (K)

Les valeurs de perméabilité varient de $6,6 \cdot 10^{-6}$ à $4,5 \cdot 10^{-3}$ m.s^{-1} , avec une moyenne de $4,4 \cdot 10^{-4}$ m.s^{-1} , une médiane de $2,3 \cdot 10^{-4}$ m.s^{-1} et un écart-type de $7,6 \cdot 10^{-4}$ m.s^{-1} ($n=72$). Ces valeurs de perméabilité (annexe 10) montrent une hétérogénéité à l'échelle de la région. Cependant, plus de 74% des ouvrages, dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, présentent des perméabilités de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m.s^{-1} (Fig. 38), caractéristiques de ce type de réservoir, sableux à gravillons, les 26% restant caractérisant un milieu limoneux.

La répartition spatiale des valeurs de perméabilité (Fig. 39), où la variation de couleur, du blanc au bleu, indique une diminution, montre que, dans la région de Tahoua, les valeurs de perméabilité décroissent du Sud vers le Nord. Cette diminution, est due à la nature lithologique du réservoir capté, composé essentiellement des grès moyens à grossiers pour le Continental Hamadien (au Sud) et des grès argileux et argiles silteuses pour le Continental Intercalaire (au Nord).

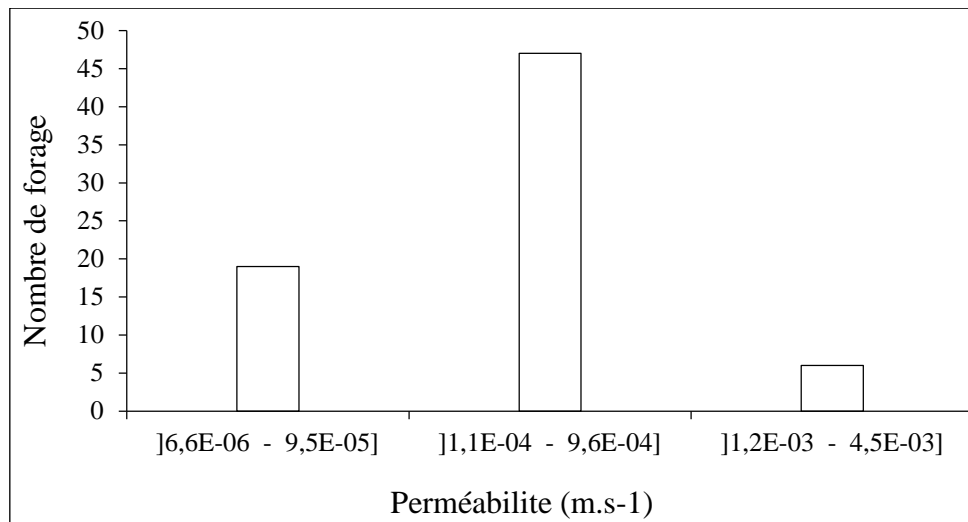


Figure 38 : Histogramme des perméabilités dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

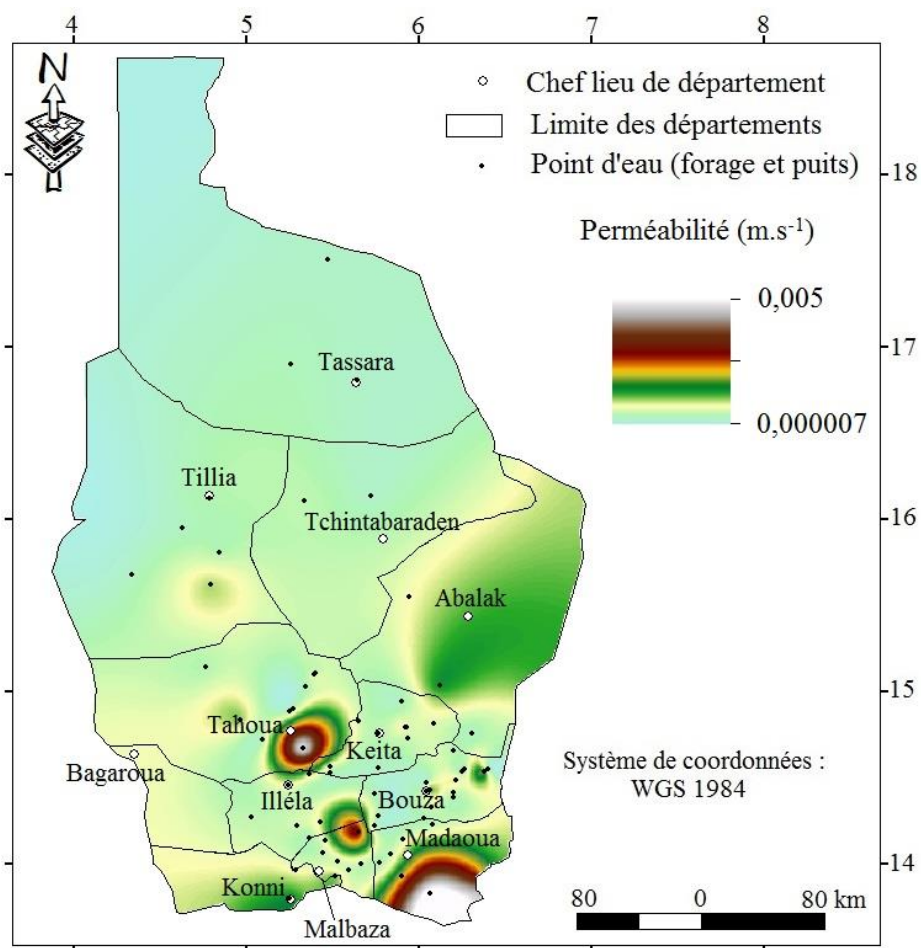


Figure 39 : Carte de distribution spatiale des valeurs de perméabilité dans le Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.2.3.4. Coefficient d'emménagement (S)

Seulement, huit valeurs de coefficient d'emménagement ont été collectées au cours de cette étude. Cette rareté de données est liée à celle des piézomètres dans la zone, car le coefficient d'emménagement d'un aquifère est déterminé à partir de la quantité d'eau libérée pour une perte de charge donnée (Castany, 2000). Il faut alors nécessairement un piézomètre à proximité du forage en pompage pour mesurer la variation de charge hydraulique occasionnée par la quantité d'eau libérée.

Les valeurs de coefficient d'emménagement collectées varient entre $1,5.10^{-5}$ et $2,4.10^{-2}$, avec une moyenne de $7,4.10^{-3}$, qui n'a pas grand sens.

En effet, d'après Castany (2000), le coefficient d'emménagement est compris entre 0,2 et 0,01 pour les nappes libres, et entre 0,001 et 0,0001, voire moins, pour les nappes captives. Les valeurs collectées montrent que, dans la région de Tahoua, le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien est capté aussi bien en captif (au centre et à l'Ouest de la région) qu'en libre (à l'Est de la région), et confirme les corrélations établies entre des logs lithostratigraphiques dans cette étude, ainsi que les études antérieures sur la région (Greigert, 1966a ; Greigert, 1978 ; OSS, 2007).

3.2.3.5. Niveaux statiques (NS)

Mis à part les aires de jaillissement reconnues dans la région de Tahoua (Greigert, 1978), à savoir le secteur localisé entre $13^{\circ}50'$ et $14^{\circ}50'$ de latitude Nord et 4° et $4^{\circ}7'$ de longitude Est, les départements de Birni N'Konni, Illéla et Malbaza et la frontière entre le Niger et le Mali, un peu au Nord de la latitude 17° Nord, le niveau statique dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, varie de 0,06 à 266 mètres de profondeur, avec une moyenne de 66 mètres ($n = 170$), une médiane de 60 mètres et un écart-type de 42 mètres. Plus de 60% des niveaux statiques sont supérieurs à 50 mètres de profondeur (Fig. 40), témoignant ainsi de l'importante profondeur des niveaux statiques dans la région. Cette profondeur des niveaux statiques est surtout liée aux altitudes importantes qui caractérisent certains endroits de la région, comme le secteur de Bouza, Keita, le Sud de Tchintabaraden et la partie est du département de Tahoua.

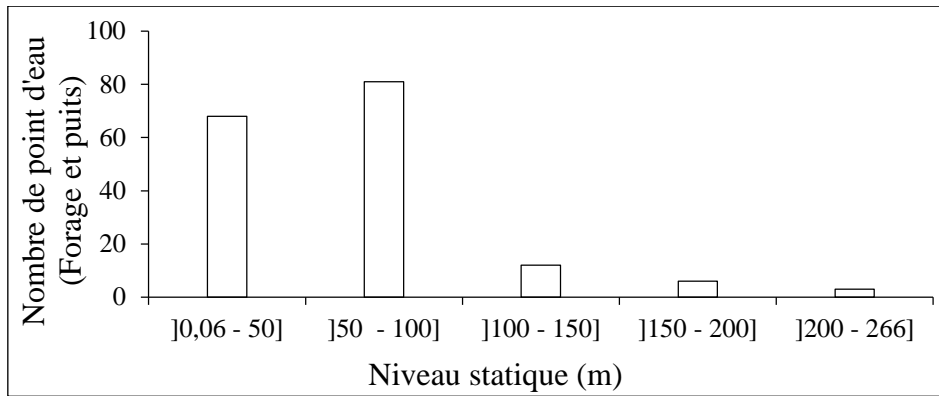


Figure 40 : Histogramme de profondeurs des niveaux statiques dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.2.3.6. Surface piézométrique et sens d'écoulement des nappes

La carte de la surface piézométrique (Fig. 41), des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua, réalisée pour cette étude, à l'instar de celles du bassin des Iullemeden (Greigert, 1978 ; Margat, 1982 ; Bonnier, et al., 1992 cité par OSS, 2007), montre des surfaces piézométriques simples et régulières. Ceci s'explique par le fait que les nappes du Continental Intercalaire et celles du Continental Hamadien sont mises en charge par les mêmes types de formations, le Crétacé moyen et supérieur, comme le montre les corrélations litho stratigraphiques des logs des forages captant le système aquifère (Fig. 33 et 34).

Les courbes isopièzes (Fig. 41), obtenues par « Kringage ordinaire » grâce à « Géostatistical analyst » sur Arcmap diminuent d'altitude de l'Est vers l'Ouest de 390 mètres à 280 mètres, donnant ainsi aux eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua deux principaux sens d'écoulement. L'un de direction Est vers Ouest, au Nord du parallèle 15° de latitude Nord et le second de direction Nord-Est à Sud-Ouest, au Sud du même parallèle 15° de latitude Nord. Ces deux directions concourent vers un seul même exutoire, le fleuve Niger.

Dans la plupart des secteurs du Nord de la région, la surface piézométrique des nappes profondes du Continental Intercalaire est au-dessus de celles des nappes superficielles (Crétacé supérieur), favorisant ainsi, la construction des forages-puits, c'est-à-dire un puits alimenté par un forage. Ces forages-puits sont surtout observés dans quelques localités du département de Tassara.

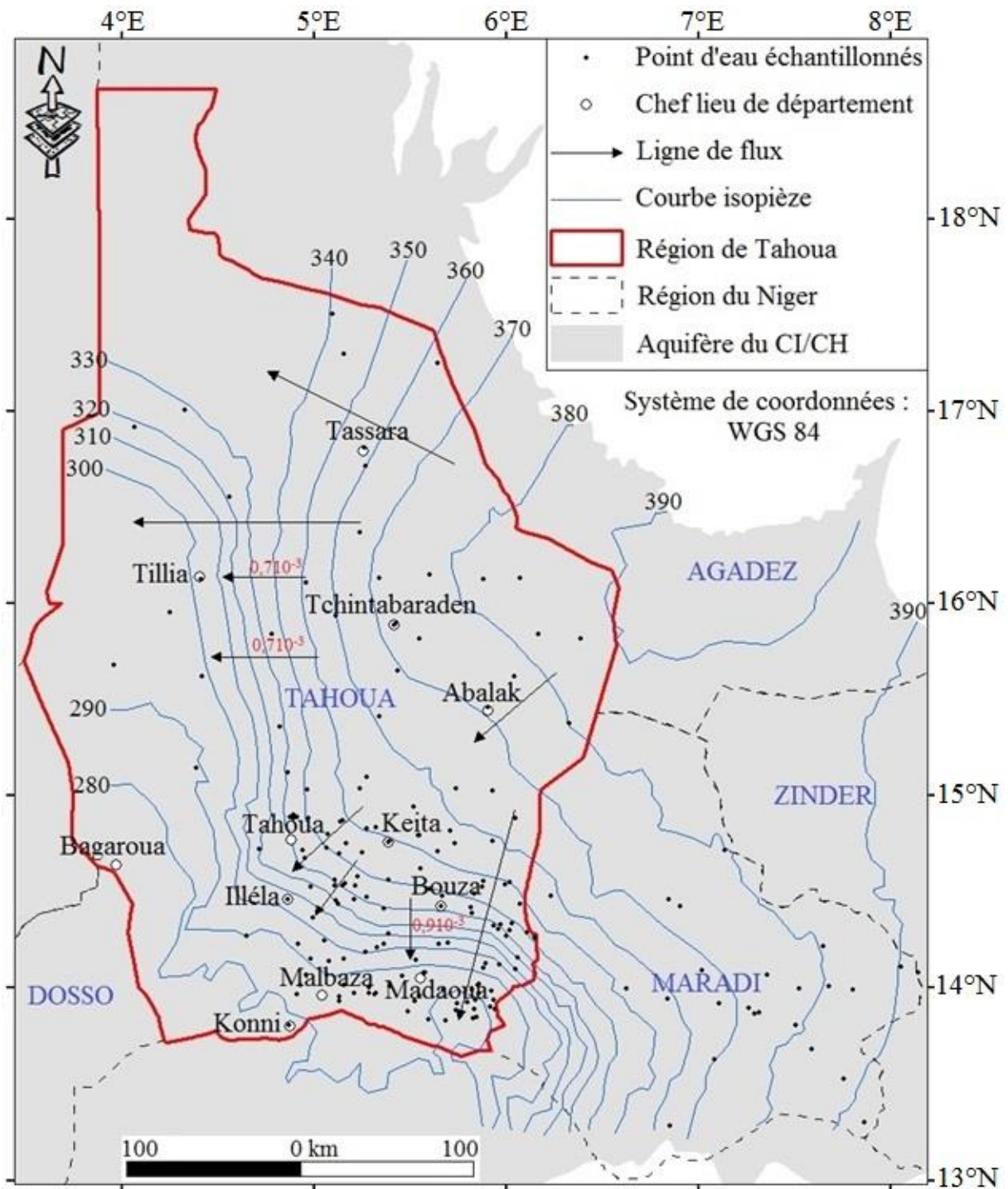


Figure 41 : Carte piézométrique du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.2.4. Tentative de modélisation hydrogéologique

L'OSS, dans le cadre de ses travaux sur le Système Aquifère du bassin des Iullemeden (SAI), a réalisé un modèle hydrogéologique pour ce bassin. Nous avons tenté d'avoir accès à ce dernier (modèle) pour l'améliorer, en lui intégrant des données nouvelles, mais malheureusement sans succès. Le modèle qu'on a tenté de réaliser dans cette étude est assez proche de celui de l'OSS, tant du point de vue de la géométrie que des paramètres hydrogéologiques, mais un peu différent sur quelques points dont le pas de longueur des mailles, le nombre de couche, etc. (voir partie méthodologie).

La géométrie du modèle avec toutes ses composantes à savoir : les différentes couches, les rivières (ou drains) et l'exutoire sont représentés par les figures 42, 43, et 44.

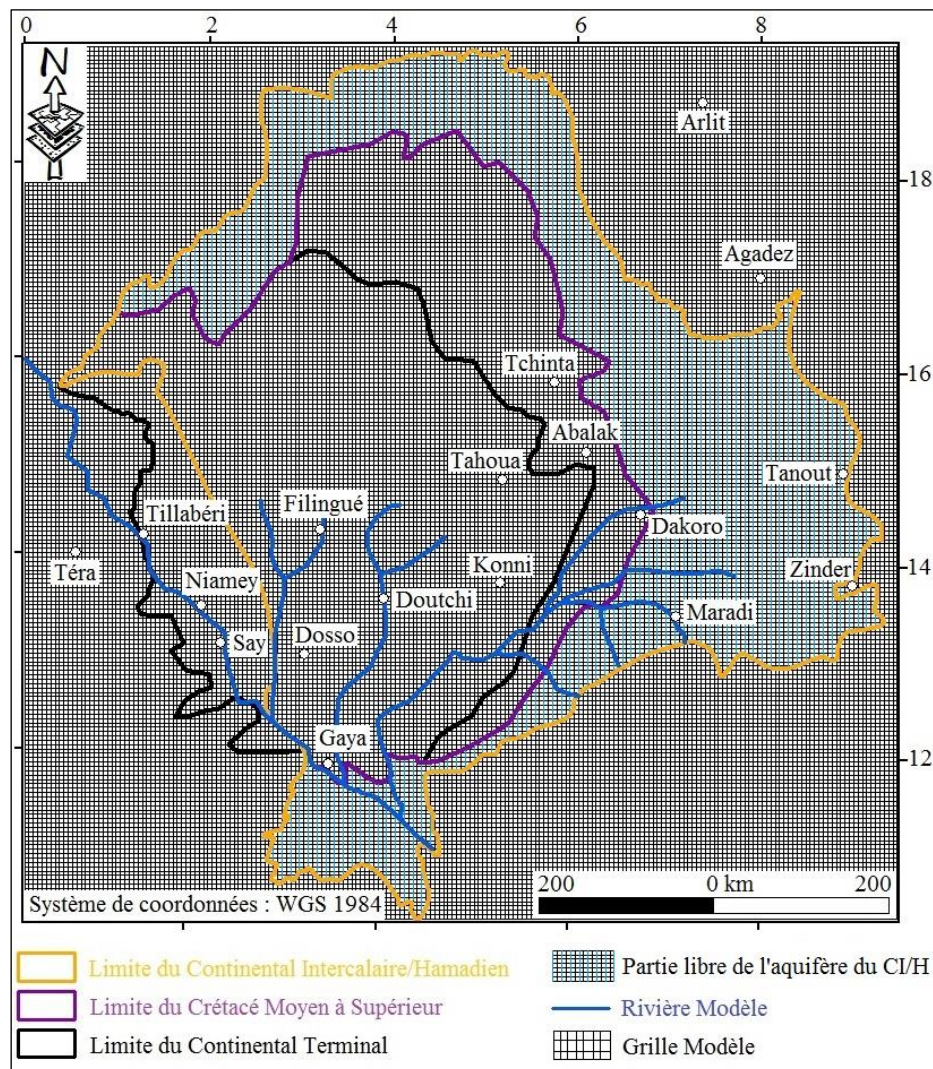


Figure 42 : Spatialisation des limites des formations du Continental Intercalaire/Hamadien, celles du Crétacé moyen à supérieur et les formations du Continental Terminal dans le bassin des Iullemeden

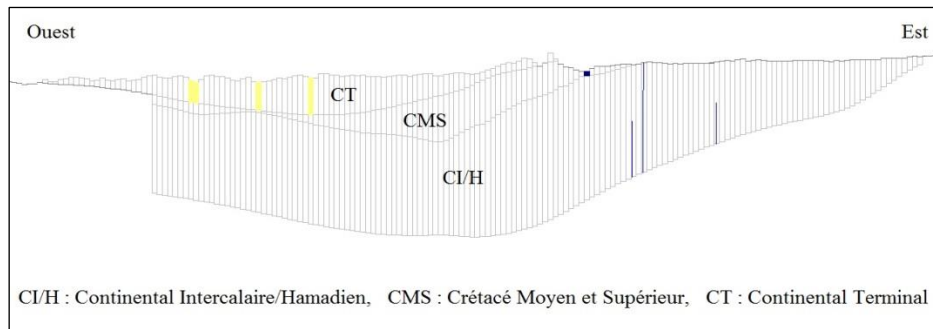


Figure 43 : Coupe géologique suivant le profil Est-Ouest dans le bassin des Iullemeden

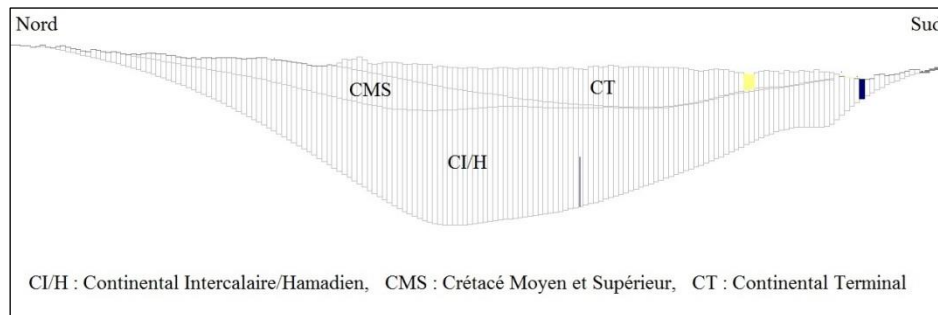


Figure 44 : Coupe géologique suivant le profil Nord-Sud dans le bassin des Iullemeden

3.2.4.1. Conditions aux limites

Les conditions aux limites de ce nouveau “modèle” sont largement différentes de celles de l’OSS (2008), en ce qui concerne les positions des rivières, les drains, etc.

Les paramètres comme la recharge sont hypersensibles à caler. Pour le modèle de l’OSS (2008) on ignore totalement les valeurs qu’ils ont utilisées pour caler la recharge.

Les perméabilités sont considérées comme homogènes au sein de chaque couche et ont été calées comme suit :

- pour la couche du Continental Terminal, $K_1=10^{-4}$ m/s ;
- pour la couche du Crétacé moyen et supérieur, $K_2=10^{-6}$ m/s ;
- pour la couche du Continental Intercalaire/Hamadien, $K_3=10^{-3}$ m/s

3.2.4.2. Tests calage du modèle

Le calage du modèle paraît au départ quasi-impossible, mailles sèches et/ou charges complètement aberrantes. Deux tests de calage ont été réalisés pour ce modèle :

- le premier avec une recharge de 300 mm/an, soit $9,51.10^{-9}$ m/s, considérée homogène sur l’ensemble de la couche. On observe des mailles sèches pour toutes les trois couches (C_1 , C_2 , et C_3), sauf dans certaines zones ;

- le deuxième test de calage avec une recharge de 500 mm/an, soit environ $1,58.10^{-8}$ m/s, considérée également homogène pour chacune des trois couches. Mailles également sèches en majorité, mais on note la présence des zones avec une charge hydraulique raisonnable (valeur inférieure à zéro), à proximité des charges hydrauliques imposées. Par contre, vers les bordures du modèle les charges sont aberrantes.

On note des différences notables entre le modèle 1 (premier test de calage) et le modèle 2 (deuxième test de calage). La charge hydraulique du modèle 1 semble supérieure à celle du modèle 2, ce qui n'est pas logique. Le bilan hydrique (m^3/s) pour les trois couches est présenté dans le tableau 11, et montre clairement un bilan non équilibré, avec une sortie d'eau par les rivières beaucoup plus importante que les entrées par la recharge.

Tableau 8 : Bilan hydrique (m^3/s) des trois couches du modèle (CT, CMS, et CI/H)

	Recharge	Entrée charge imposée	Sortie charge imposée	Sortie drains
Couche 1 (CT)	$1,8.10^2$	$1,7.10^{-1}$	$2,9.10^4$	$4,7.10^2$
Couche 2 (CMS)	$2,7.10^2$	$7,1.10^{-1}$	$1,5.10^1$	
Couche 3 (CI/H)	$5,3.10^2$	$8,4.10^1$	$2,3.10^3$	
Total	$9,8.10^2$	$8,5.10^1$	$3,4.10^4$	$4,7.10^2$

3.2.4.3. Hypothèses, problèmes rencontrés et conclusion

Les problèmes rencontrés sont énormes, et les hypothèses pour les expliquer ne sont pas bien claires. On peut supposer entre autres que les deux points suivants sont à l'origine du bilan en eau déficitaire :

- Le fait que la couche 3 ne soit pas directement connectée à la rivière (fleuve Niger), principal exutoire du système aquifère ;
- La géométrie de la couche 1 (Continental Intercalaire/Hamadien) présente des épaisseurs nulles à proximité de la rivière.

A l'avenir, nous allons tenter de résoudre ces problèmes de géométrie en rajoutant des points. Nous espérons que cela nous permettra d'équilibrer le bilan hydrique et, ainsi, de simuler des valeurs de piézométrie proches de celles observées. Une fois le modèle calé, nous pourrons l'utiliser pour calculer des temps de transfert.

Après cette tentative de modélisation hydrogéologique, nous aborderons la caractérisation hydrochimique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien.

3.3. CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN ET PROCESSUS DE MINERALISATION DES EAUX

3.3.1. Paramètres physiques (t°, pH et CE)

L'étude des paramètres physiques des eaux du système aquifère du CI/H du bassin des Iullemeden dans la région de Tahoua a porté sur 58 échantillons d'eau, excepté le 59^{ème} (puits de Damboutan, ne captant pas le CI), (annexe 11), prélevés dans des ouvrages hydrauliques (forages et puits), dont les résultats statistiques sont regroupés (Tableau 12).

Tableau 9 : Données statistique des paramètres physiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Variabes	Nombre d'échantillon	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
t (°C)	58	38,72	32	48,5	4,51
pH (unité pH)	58	7,49	6,14	8,90	0,74
CE (µS/cm)	58	310,93	47,4	1462	243,61

3.3.1.1. Température

Les températures des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien varient de 32 à 48,5°C (n=58). Les températures les plus basses sont observées dans la partie est de la région (Fig. 45), où la nappe est libre. Ces "faibles" valeurs, autour de 33°C, sont voisines des valeurs moyennes observées en surface dans l'atmosphère dans les régions arides et semi-arides, à savoir 15 à 35°C (Ousmane, 1988 ; Daddy Gaoh, 1998 ; Favreau, 2000).

Au centre et vers la partie ouest de la région, on constate une augmentation des valeurs de la température, qui peut atteindre 48,5°C au forage profond d'Infene (Fig. 45). Ces fortes valeurs de température dans ces parties centrales et ouest de la région font que les eaux dans ces secteurs ne peuvent pas être utilisées en l'état après leur pompage pour certains besoins domestiques et/ou agricoles.

A l'instar des profondeurs équipées des forages, on constate une augmentation des valeurs de la température des eaux, représentée par la variation de couleur du violet au marron (Fig. 45), de l'Est vers l'Ouest dans la région de Tahoua. Ceci s'explique par le fait que l'élévation de la température des eaux souterraines est fonction de l'augmentation des profondeurs de captage, entraînant l'échauffement des réservoirs lié au gradient géothermique (Castany, 2000).

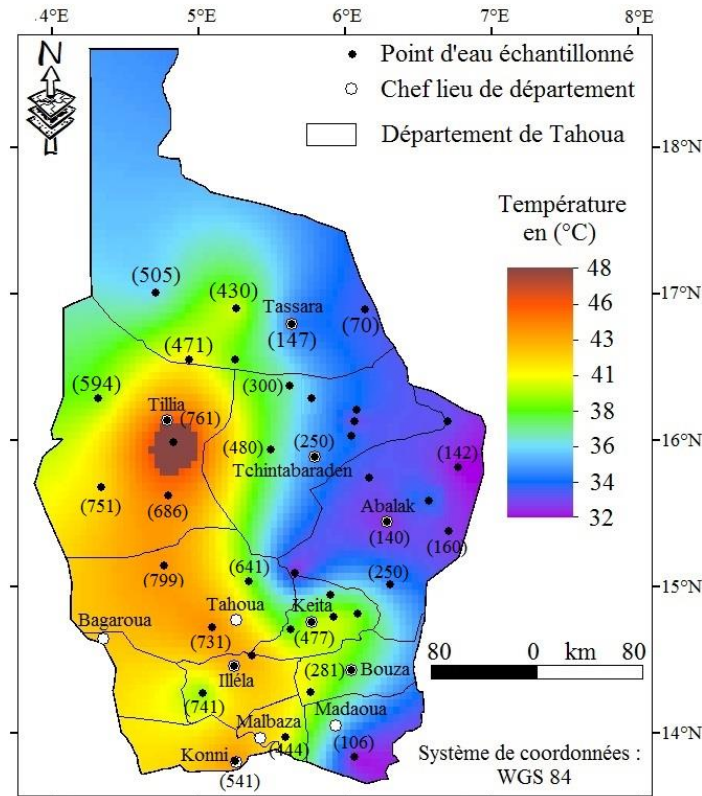


Figure 45 : Carte de distribution spatiale des valeurs de température des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.3.1.2. pH

Les pH des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua sont compris entre 6,14 et 8,90 unités pH (n=58).

Ils varient de 6,14 à 8,87, avec une moyenne de 7,12 pour les eaux captées dans la partie libre du Continental Intercalaire, et de 6,42 à 7,67 avec une moyenne de 7,08, pour les nappes du Continental Hamadien, et de 7,20 à 8,90 avec une moyenne de 8,13 pour les eaux captées dans la partie captive du Continental Intercalaire.

Dans ces réservoirs de nature silicatée, il semble logique que dans la partie libre, en système ouvert, le CO₂ issu de l'atmosphère et des sols maintienne les pH acides et que, lorsque le système devient fermé (captivité), l'hydrolyse des silicates consomme des protons et le pH croît (Bourrié, 1976 cité par Ouandaogo/Yameogo, 2008). Le caractère plus basique des eaux du Continental Intercalaire captif peut être dû à une hydrolyse plus poussée des silicates que dans les eaux du Continental Hamadien.

Les plus faibles valeurs de pH sont donc observées dans la zone à nappe libre (partie nord-est de la région de Tahoua), mais aussi dans le secteur Sud à Sud-Ouest de la région de Tahoua, dans le Continental Hamadien (Fig. 46).

Ce caractère neutre à acide donne aux eaux du Continental Hamadien une nature corrosive vis-à-vis des équipements de forage et des conduites d'eau. C'est pourquoi l'utilisation de matériels d'équipement en aciers inoxydables ou en plastiques PVC est nécessaire dans ce secteur.

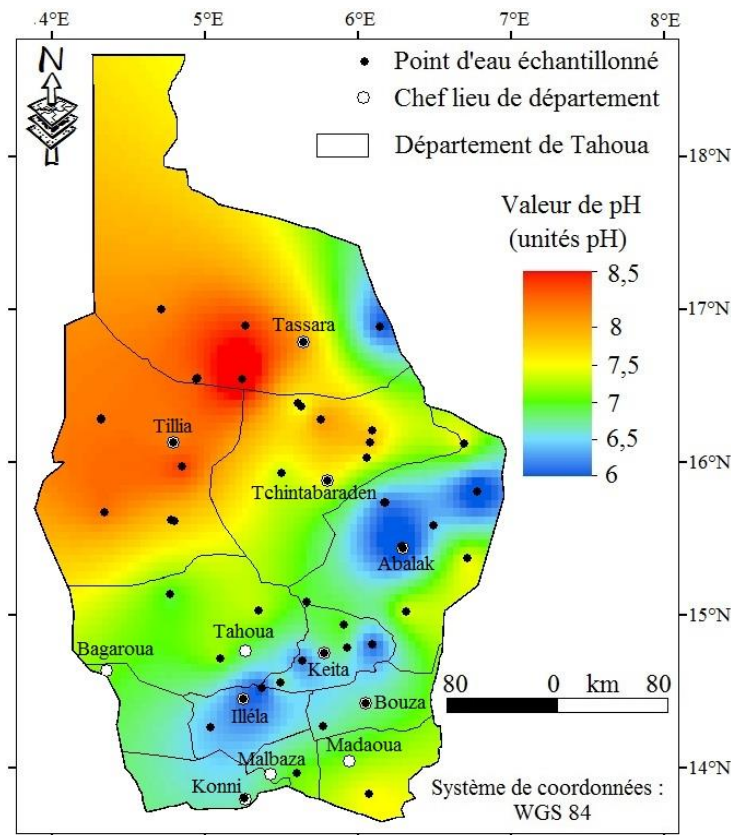


Figure 46 : Carte de distribution spatiale des valeurs de pH des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.3.1.3. Conductivité

Les valeurs de la conductivité des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien sur l'ensemble de la zone d'étude varient de 47 à 1462 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (n=58), mais restent généralement faibles puisqu'elles sont pour la quasi-totalité des points d'eau inférieures à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Seul le forage d'Infène, avec une conductivité de 1462 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se distingue nettement.

Il n'existe pas de relation simple entre la conductivité et la température (Fig. 47). En revanche, on observe, comme attendu, une parfaite corrélation entre les valeurs de conductivité et celles de la somme des ions en solution (Fig. 48), montrant la cohérence entre les mesures de terrain et les analyses de laboratoire.

1C : Première campagne d'échantillonnage d'eau (forage uniquement), 2C : Deuxième campagne d'échantillonnage d'eau (forage et puits)

NB : ce n'est pas le même appareillage de mesure des paramètres physiques de l'eau qui est utilisé pour les deux campagnes d'échantillonnage

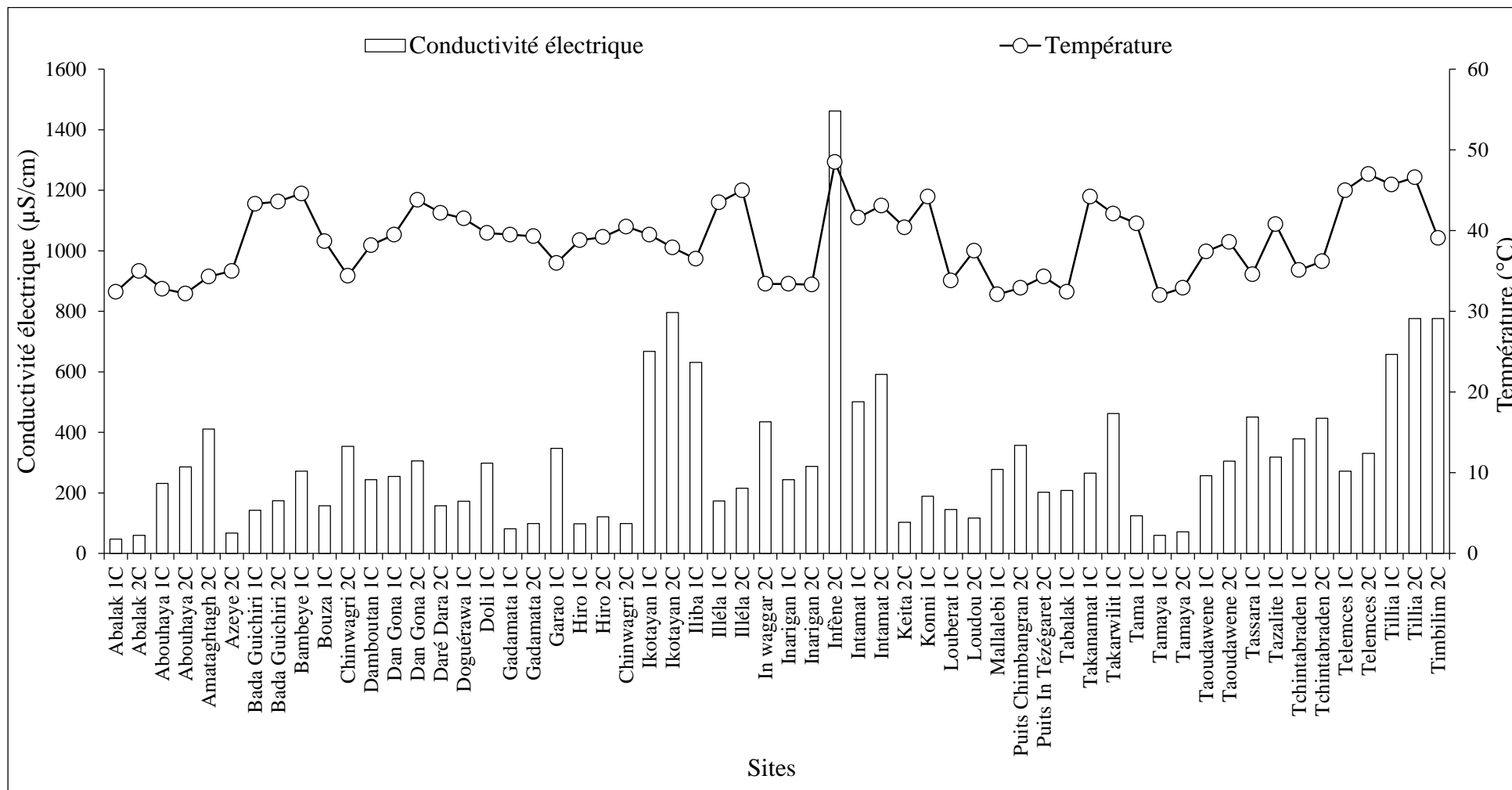


Figure 47 : Relation entre la conductivité électrique et la température des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

1C : Première campagne d'échantillonnage d'eau (forage uniquement), 2C : Deuxième campagne d'échantillonnage d'eau (forage et puits)

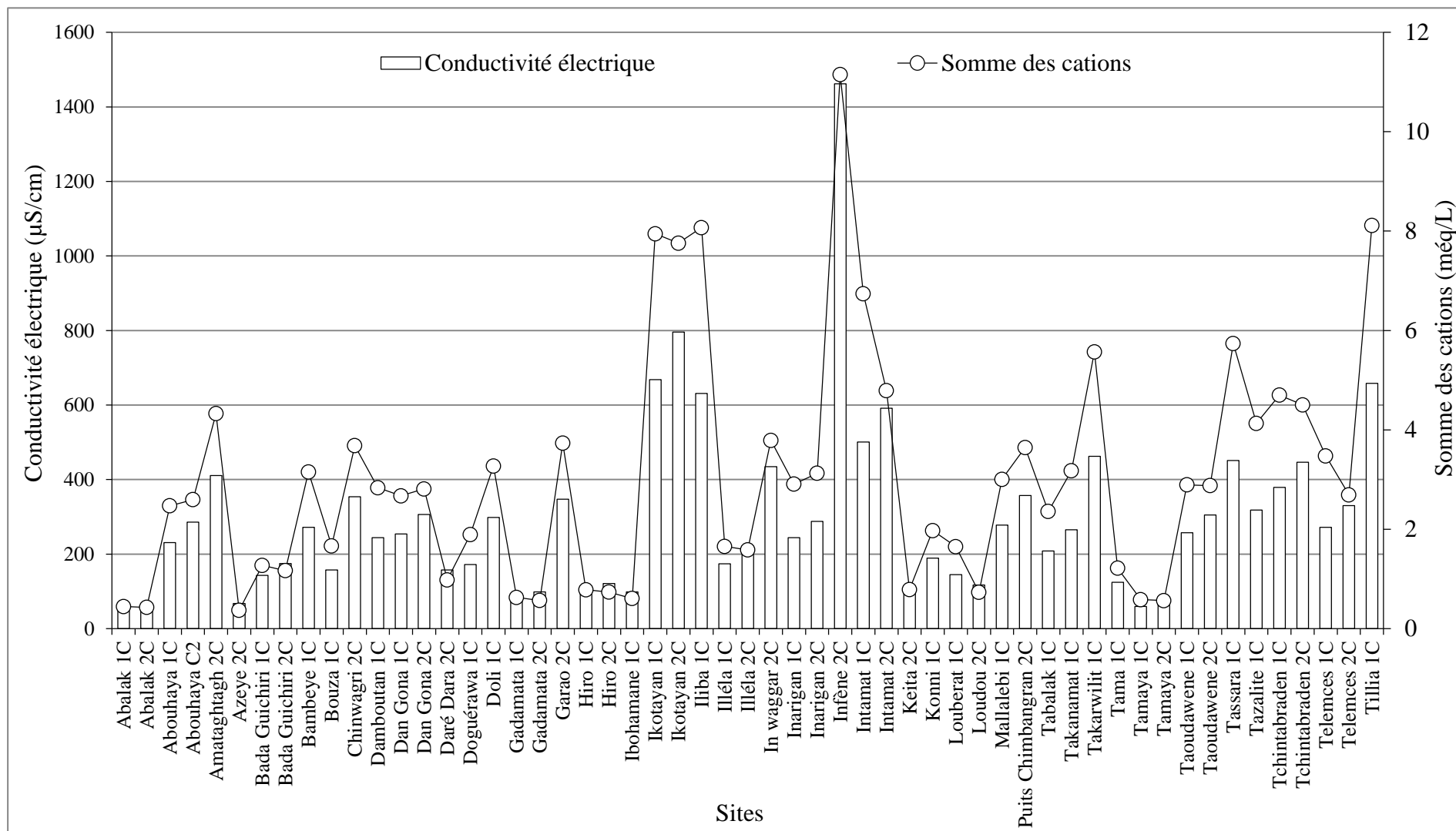


Figure 48 : Relation entre la conductivité électrique et le total des cations des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

La répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique sur l'ensemble de la zone d'étude (Fig. 49), permet de distinguer une différenciation entre la partie nord (Continental Intercalaire) de la région, dominée par des valeurs de conductivité importantes, en particulier à l'Ouest, et la partie sud (Continental Hamadien), caractérisée par des valeurs de conductivité plus faibles avec un passage progressif.

Cette différenciation des valeurs de la conductivité électrique des eaux du CI/H entre la partie nord à nord-ouest et celle du sud de la région de Tahoua est essentiellement liée à une différence de temps d'interaction eau-roche. Ce dernier (temps) est plus important dans le CI au Nord que dans le CH au Sud. Ceci est corroboré par les valeurs de pH des eaux et les âges ^{14}C obtenus pour ces eaux que nous verrons dans le chapitre portant sur les isotopes.

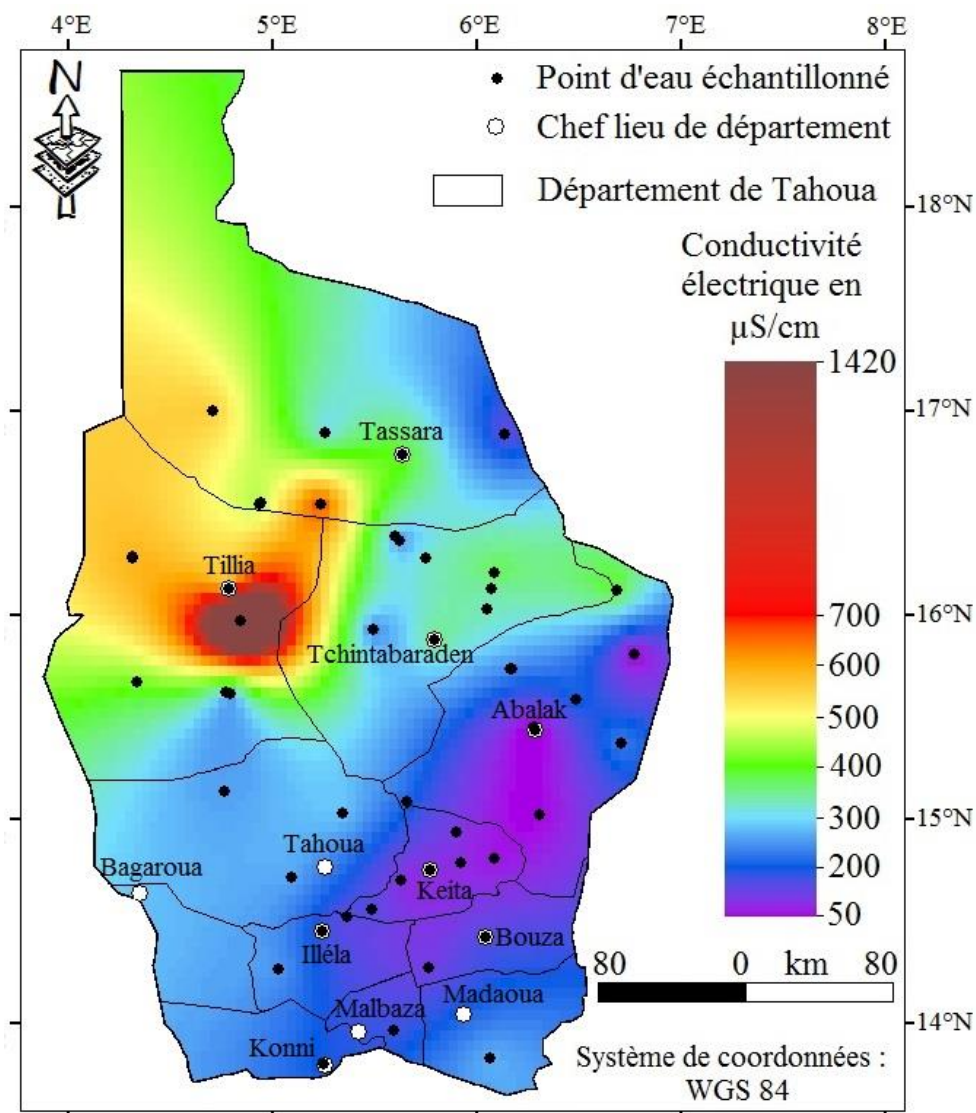


Figure 49 : Carte de distribution spatiale des valeurs de conductivité des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.3.2. Paramètres chimiques

3.3.2.1. Balances ioniques

Les balances ioniques ne dépassent pas $\pm 5\%$ et sont donc correctes (annexe 13).

La principale source d'erreur concerne probablement le dosage des bicarbonates, qui a été effectué par la méthode utilisant les indicateurs colorés, puis au laboratoire quelques semaines après les prélèvements.

3.3.2.2. Teneurs en cations

Les teneurs en cations majeurs des trente échantillons d'eau de forage, de la campagne de septembre 2016, en méq/L (annexe 13), montrent que les ions sodiums sont largement dominants sur l'ensemble des cations. Ils représentent un pourcentage de plus 65% de la charge cationique dissoute suivis du calcium avec un pourcentage de 18%. L'ordre d'abondance général est donc : $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ pour l'ensemble des échantillons du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien.

De manière plus détaillée, on note plusieurs sous-ordres d'abondance pour les cations, sans doute à mettre en relation avec la nature lithologique des différents réservoirs et les degrés d'évolution des interactions eau-roche :

- $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$, pour les eaux échantillonnées dans le Continental Hamadien captif (n = 12) ;
- $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$, pour les eaux échantillonnées dans le Continental Intercalaire captif (n = 13) ;
- et $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$, pour les eaux échantillonnées dans le Continental Intercalaire libre (n = 5).

3.3.2.3. Teneurs en anions

Les teneurs en anions majeurs montrent une prédominance à 100% des ions bicarbonates. Ils sont suivis par les sulfates. Les ions chlorures et nitrates sont représentés à des faibles pourcentages. Les eaux du système aquifère Continental Intercalaire/Hamadien présentent ainsi l'ordre d'abondance anionique suivant : $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$.

D'après l'abondance des teneurs en cations et anions majeurs, dont les valeurs statistiques sont représentées (annexe 12 et 13), on observe que les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, dans la région de Tahoua présentent des faciès chimiques plutôt mixtes : bicarbonaté sodique, calcique à calco-magnésien.

3.3.2.4. Représentations graphiques des teneurs ioniques (Piper, Schöeller Berkaloff et Stiff)

- **Diagramme de Piper**

Le diagramme de Piper (Fig. 50), au niveau du triangle des anions, confirme que toutes les eaux prélevées sont, sans exception, des eaux bicarbonatées. Cependant, on note une tendance vers le pôle sulfaté pour les eaux du Continental Hamadien captif (flèche rouge) et, peut-être pour certaines eaux du Continental Intercalaire vers le pôle chloruré (flèche noire).

Le triangle des cations quant à lui suggère l'existence de trois groupes d'eau de composition chimique différente. Un premier groupe (triangle rouge), composé avec environ 77% des eaux sodique et correspond aux eaux de la partie captive des nappes du Continental Intercalaire, un deuxième groupe mixte, basé au cœur du triangle de cations, regroupant des eaux du Continental Intercalaire libre et captif et celles du Continental Hamadien, et enfin un troisième groupe (cercle noir), constitué par des eaux essentiellement calcique, comprenant également des eaux du Continental Intercalaire libre et captif et celles du Continental Hamadien.

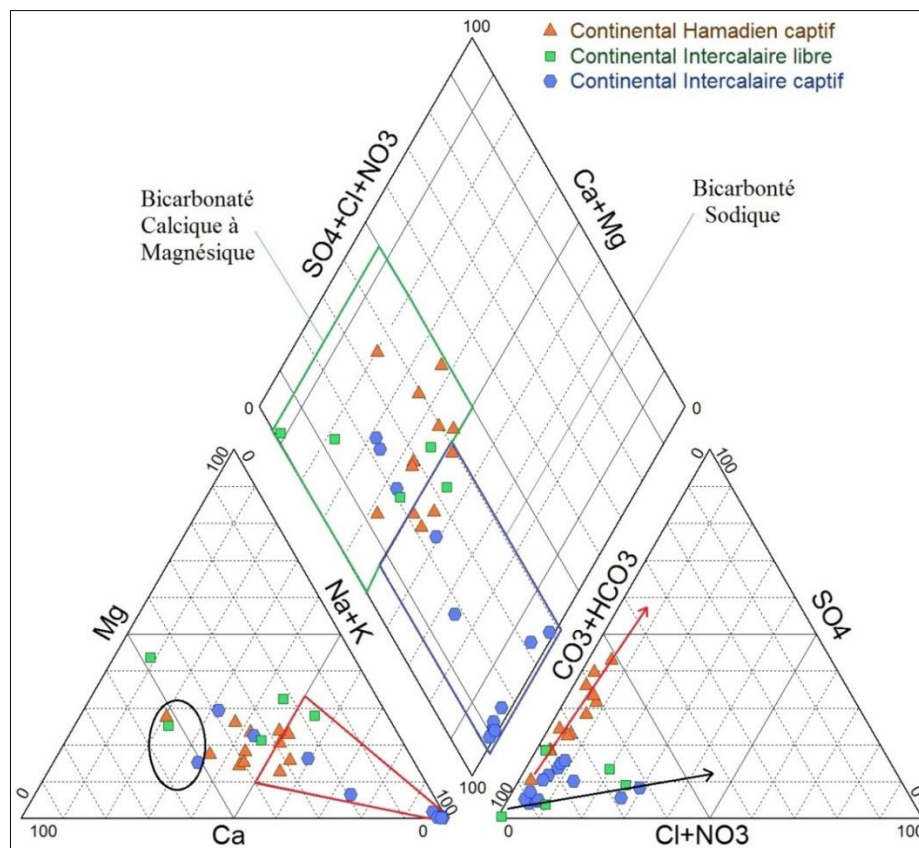


Figure 50 : Faciès chimique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

- **Diagramme de Schöeller Berkaloff**

Les tracés obtenus sur le diagramme de Schöeller Berkaloff (Fig. 51), pour les eaux du Continental Hamadien du bassin des Iullemeden, région de Tahoua, montrent un pic pour les anions (bicarbonates), et deux pics pour les cations, (calcium et Na+K), confirmant ainsi, le faciès bicarbonaté calcique et sodique pour ces eaux. L'allure quasiment parallèle des segments de droites sur la même figure, suggère que les eaux du Continental Hamadien subissent toutes les mêmes processus de minéralisation.

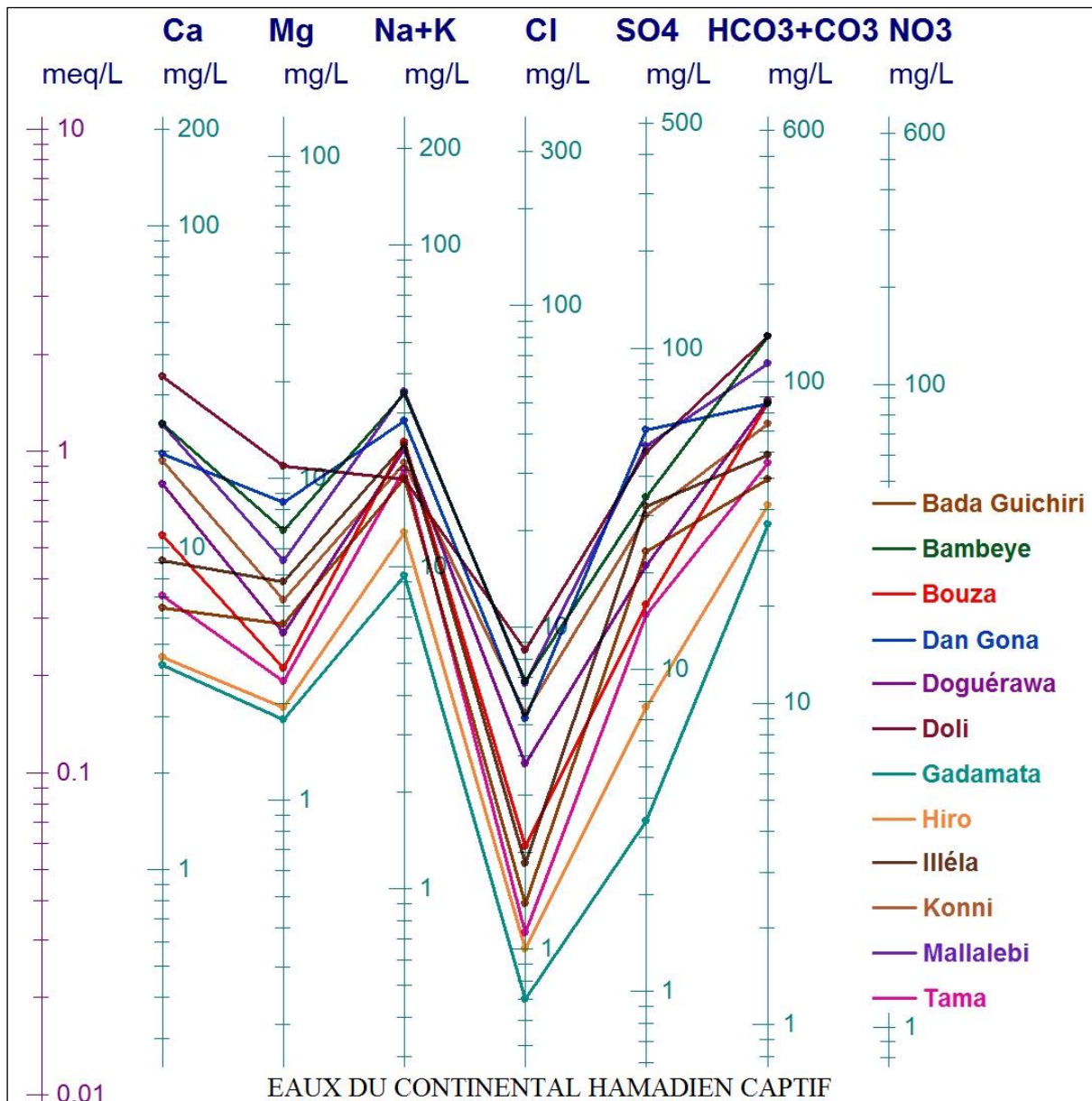


Figure 51 : Diagramme de Schöeller Berkaloff des eaux du Continental Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Pour les eaux du Continental Intercalaire captif, l'allure des segments de droites (Fig. 52a), montrent un pic pour les anions (bicarbonates) et un pic pour les cations (Na+K), correspondant à leur faciès bicarbonaté sodique. Enfin, pour les eaux du Continental Intercalaire libre (Fig. 52b), si un pic se dégage pour les anions (HCO_3^-), il n'en est pas de même pour les cations, ce qui correspond à un faciès mixte (Ca, Mg, Na+K).

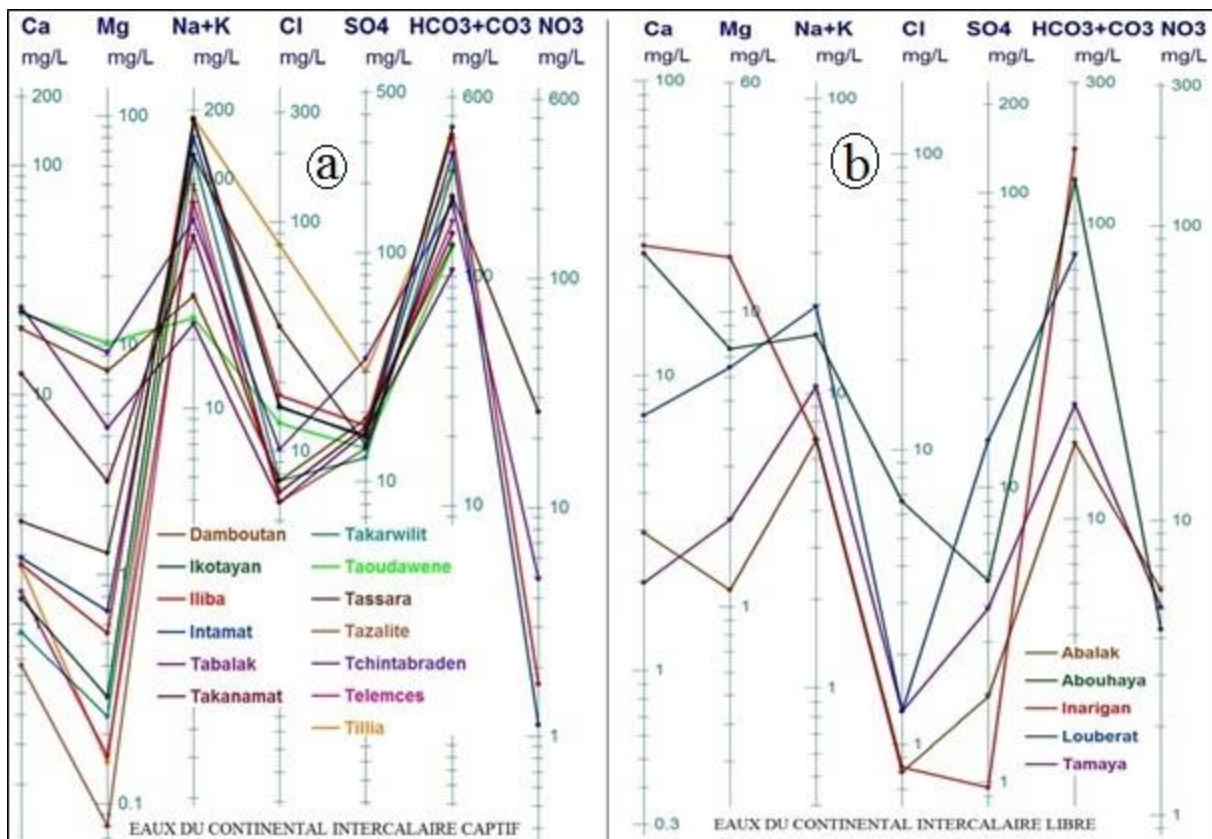


Figure 52 : Diagramme de Schöeller Berkaloff des eaux du Continental Intercalaire captif et libre du bassin des Iullemeden (Tahoua)

- **Diagramme de Stiff**

La représentation des hexagones issus du diagramme de Stiff (Fig. 53) confirme évidemment les faciès déjà déterminés et permet en outre de visualiser leur répartition spatiale. Ainsi les échantillons du Continental Intercalaire à nappe captive, à faciès bicarbonaté sodique, localisés dans la partie nord à nord-ouest de la zone d'étude, se distinguent des échantillons du Continental Intercalaire à nappe libre et de ceux du Continental Hamadien à faciès bicarbonaté calcique à calco-magnésien, localisés respectivement dans la partie nord-est et sud de la région.

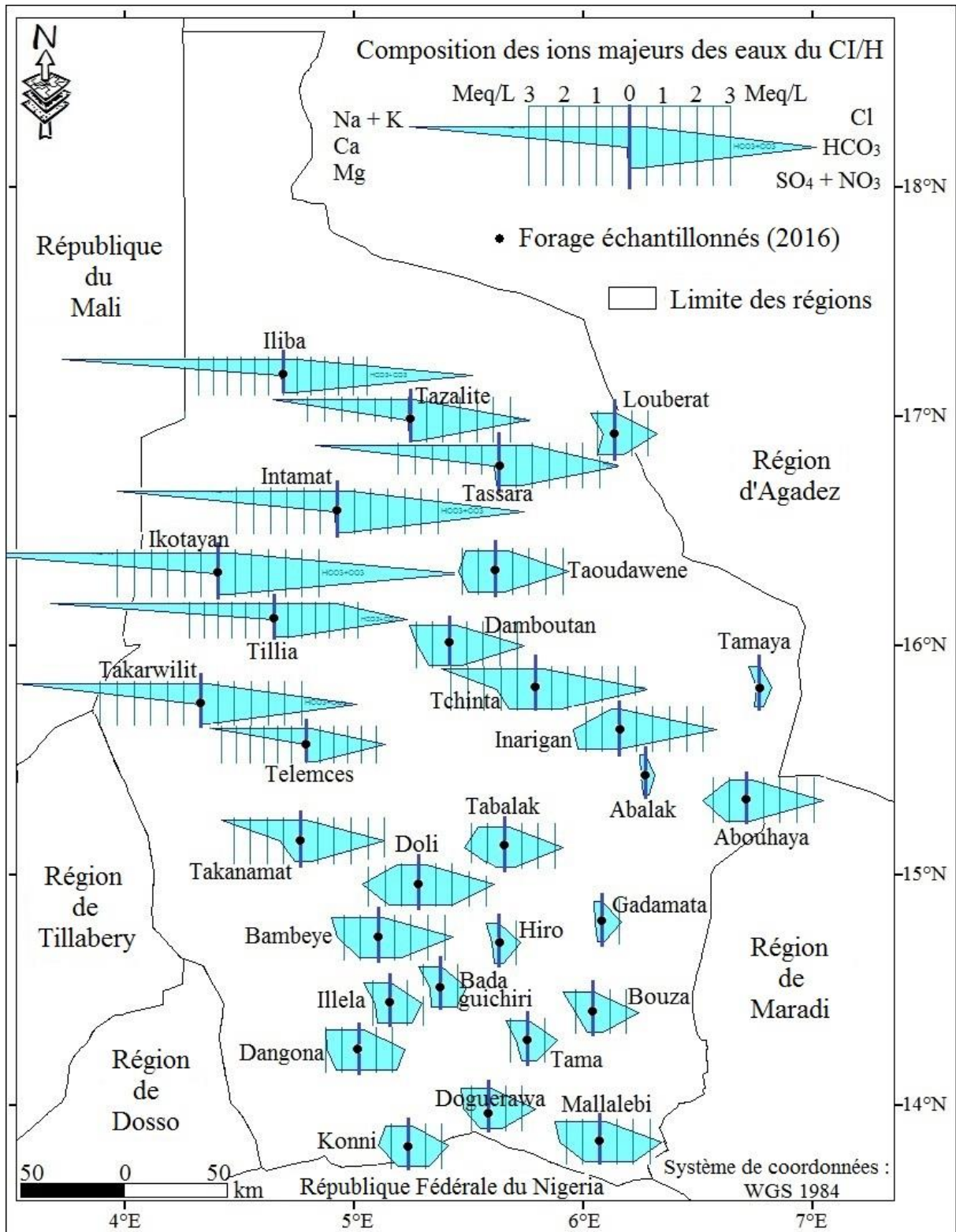


Figure 53 : Représentation spatiale de la composition chimique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua) à partir de la méthode de Stiff

3.3.3. Matrices de corrélation entre les éléments physico-chimiques

Une matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien a été réalisée pour les 30 prélèvements de la première campagne (Tableau 13).

Tableau 10 : Matrice de corrélation sur les paramètres physiques et ions majeurs des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Variable	pH	T (°C)	CE	Ca	Mg	Na	K	Fe	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃
pH	1,00											
T (°C)	0,22	1,00										
CE	0,83	0,21	1,00									
Ca	-0,11	-0,24	-0,21	1,00								
Mg	-0,26	-0,31	-0,23	0,87	1,00							
Na	0,79	0,25	0,94	-0,52	-0,52	1,00						
K	-0,64	-0,06	-0,69	0,51	0,38	-0,81	1,00					
Fe	-0,08	0,31	0,01	0,24	0,18	-0,09	0,24	1,00				
HCO ₃	0,83	0,14	0,96	-0,26	-0,25	0,93	-0,78	-0,07	1,00			
Cl	0,53	0,23	0,69	-0,22	-0,25	0,67	-0,46	-0,04	0,51	1,00		
SO ₄	0,16	0,27	0,19	0,44	0,28	-0,01	0,37	0,51	0,00	0,16	1,00	
NO ₃	0,15	-0,36	0,14	-0,18	-0,14	0,20	-0,25	-0,13	0,08	0,27	-0,17	1,00

Les seuils de signification en corrélation linéaire sont très proches de 0,55 (0,001), 0,45 (0,01) et 0,35 (0,05). Les valeurs supérieures à ces seuils sont identifiées en rouge (0,001), bleu (0,01) et vert (0,05) dans le tableau, ce qui permet de dégager/confirmer quelques tendances fortes :

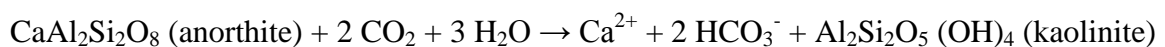
- trois paramètres sont très fortement corrélés entre eux (>0,83) : conductivité électrique (CE), bicarbonates, et sodium, confirmant comme le diagramme de Stiff, par exemple, que les eaux les plus minéralisées présentent un faciès bicarbonaté-sodique. Ils sont également fortement corrélés au pH : la minéralisation Na-HCO₃ s'accompagne d'une consommation de protons. Ils sont corrélés, de façon moins forte, mais encore très significative (> 0,51) avec le chlorure. Plus inattendues sont leurs corrélations négatives avec le potassium, qui ne semble donc pas, ou très peu, jouer de rôle dans l'acquisition de la minéralisation, du moins lorsque celle-ci est de faciès Na-HCO₃ ;

- le calcium est corrélé de façon très forte au magnésium (0,87), et significativement au potassium (0,51), par contre il est anti-corrélé au sodium (-0,52). Comme le montraient les diagrammes précédents, l'opposition entre les facies Ca-Mg et Na est nette ;
- la température (T°) n'est corrélée significativement (0,36) qu'avec les nitrates, ce qui suggère simplement que les eaux prélevées dans la partie libre du système, moins profondes et moins chaudes, sont affectées par une contamination nitraté anthropique ;
- le sulfate (SO_4^{2-}) est significativement corrélé avec le fer (0,51), mais aussi avec le calcium (0,44). Ceci laisse penser que les sulfates peuvent être liés à la fois avec le fer et le calcium. Dans le premier cas, les phénomènes d'oxydation de la pyrite (FeS_2) peuvent être la cause et dans le second cas, on peut penser à la dissolution de gypse ($CaSO_4$) ;
- les nitrates enfin, ne présentent aucune corrélation avec les autres éléments.

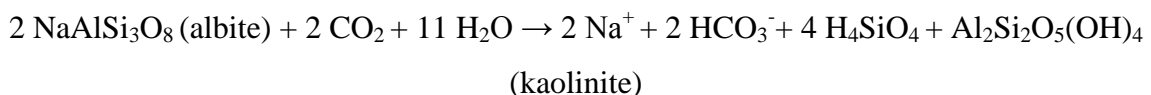
3.3.4. Processus de la minéralisation

3.3.4.1. Origine des bicarbonates et des cations majeurs

Peu d'éléments sont disponibles sur la lithologie des formations étudiées : il s'agit de grès silicatés et de sables, plus ou moins argileux. Pratiquement aucune information n'est disponible sur leur minéralogie (analyse DRX), mais il semble raisonnable de supposer que, outre le quartz, les feldspaths y sont largement représentés et que c'est principalement à partir de l'altération de ces minéraux que les eaux acquièrent leurs charges ioniques, avec des schéma réactionnels du type :



Ou



Le premier de ces schémas conduit à l'obtention d'un faciès bicarbonaté calcique, comme celui majoritairement observé sur les eaux du Continental Hamadien ou du Continental Intercalaire dans sa partie libre, le second à l'obtention d'un faciès bicarbonaté sodique, tel celui majoritairement observé dans les eaux du Continental Intercalaire dans sa partie captive. Qualitativement, il est donc possible de rendre compte des minéralisations observées à partir des interactions entre l'eau et les minéraux silicatés.

Toutefois, une question se pose : pourquoi le cation associé aux bicarbonates est dans un cas plutôt le calcium et dans l'autre essentiellement le sodium ?

Trois hypothèses peuvent être formulées :

- Hypothèse 1 : La répartition des silicates sodique et calcique est variable dans l'espace. Si cette hypothèse peut sembler acceptable pour expliquer la différence entre les eaux du Continental Hamadien (calcique) et celles du Continental Intercalaire captif (sodique) qui constituent deux niveaux distincts du système dont les minéralogies pourraient être différentes, il est difficile de l'envisager pour expliquer la différence au sein d'un même niveau, entre Continental Intercalaire libre (calcique) et Continental Intercalaire captif (sodique), sauf si la minéralogie varie selon les différents niveaux (avec la profondeur) du Continental Intercalaire et/ou latéralement (variation latérale de faciès géologique) et que les niveaux sollicités dans la partie captive sont différents de ceux sollicités dans la partie libre ;
- Hypothèse 2 : Elle repose sur la séquence d'altérabilité des feldspaths : les plagioclases Ca sont plus facilement altérables que les plagioclases Na, eux même moins résistants que les feldspaths K. Voir par exemple le célèbre "triangle de Goldich" (1938). Le passage d'un faciès Ca à un faciès Na représenterait alors une intensification, ou une durée plus importante, des interactions eau-roche. Cette hypothèse est cohérente avec ce qui est observé dans l'évolution du pH dans les eaux du système (**3.3.1.2**) : les pH les plus basiques sont mesurés dans la partie captive du Continental Intercalaire. Elle est aussi cohérente avec la piézométrie : augmentation de la teneur en Na (et du pH) d'amont (Est) en aval (Ouest) dans la partie captive du Continental Intercalaire. Enfin, elle est supportée par les teneurs en ^{14}C , qui seront présentées dans le chapitre **3.4.2.** : les "âges" des eaux sodiques de la partie captive du Continental Intercalaire sont supérieurs à ceux des eaux calciques du Continental Hamadien et, évidemment, à ceux des eaux calciques de la partie libre du Continental Intercalaire.

- Hypothèse 3 : Le Continental Intercalaire contient plus d'argiles que le Continental Hamadien, ce qui peut favoriser les phénomènes d'échange cationique entre le calcium (et le magnésium) de l'eau et le sodium (et le potassium) des argiles présentes dans les formations aquifères. (Schoeller, 1962 ; 1969 cité par Kaid Rassou, 2009 ; Abderamane, 2012).

La répartition des points (Fig. 54), dans le diagramme $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] vs (Na^+ + K^+ - Cl^-)$, (Kamel et al., 2009), établi à partir des données du Tableau 14, montre que l'échange de base est plus susceptible de se produire dans le réservoir du Continental Intercalaire captif que dans celui du Continental Hamadien ou encore du Continental Intercalaire libre.

Tableau 11 : Rapport $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] vs (Na^+ + K^+ - Cl^-)$ pour les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Tahoua)

Site	Aquifère	(Na+K-Cl)	(Ca+Mg) - (HCO3+SO4)	Site	Aquifère	(Na+K-Cl)	(Ca+Mg) - (HCO3+SO4)
Bada Guichiri	CH Captif	0,62	-0,68	Damboutan	CI Captif	1,02	-1,02
Bambeye		1,18	-1,19	Ikotayan		7,42	-7,51
Bouza		0,85	-0,99	Iliba		7,44	-7,01
Dan Gona		0,85	-0,89	Intamat		6,14	-5,78
Doguéraawa		0,72	-0,80	Tabalak		0,63	-0,55
Doli		0,42	-0,66	Takanamat		2,17	-2,06
Gadamata		0,24	-0,30	Takarwilit		5,29	-4,88
Hiro		0,37	-0,45	Taoudawene		0,54	-0,51
Illéla		0,75	-0,79	Tassara		4,51	-3,70
Konni		0,55	-0,57	Tazalite		3,92	-3,81
Mallalebi		1,15	-1,24	Tchinta		2,49	-2,20
Tama		0,64	-0,68	Telemces		3,21	-3,14
Abalak		CI Libre	0,18	-0,09		Tillia	CI Libre	5,77	-5,29
Abouhaya	0,36		-0,48	Louberat	0,71	-0,68	
Inarigan	0,23		-0,29	Tamaya	0,28	-0,22	

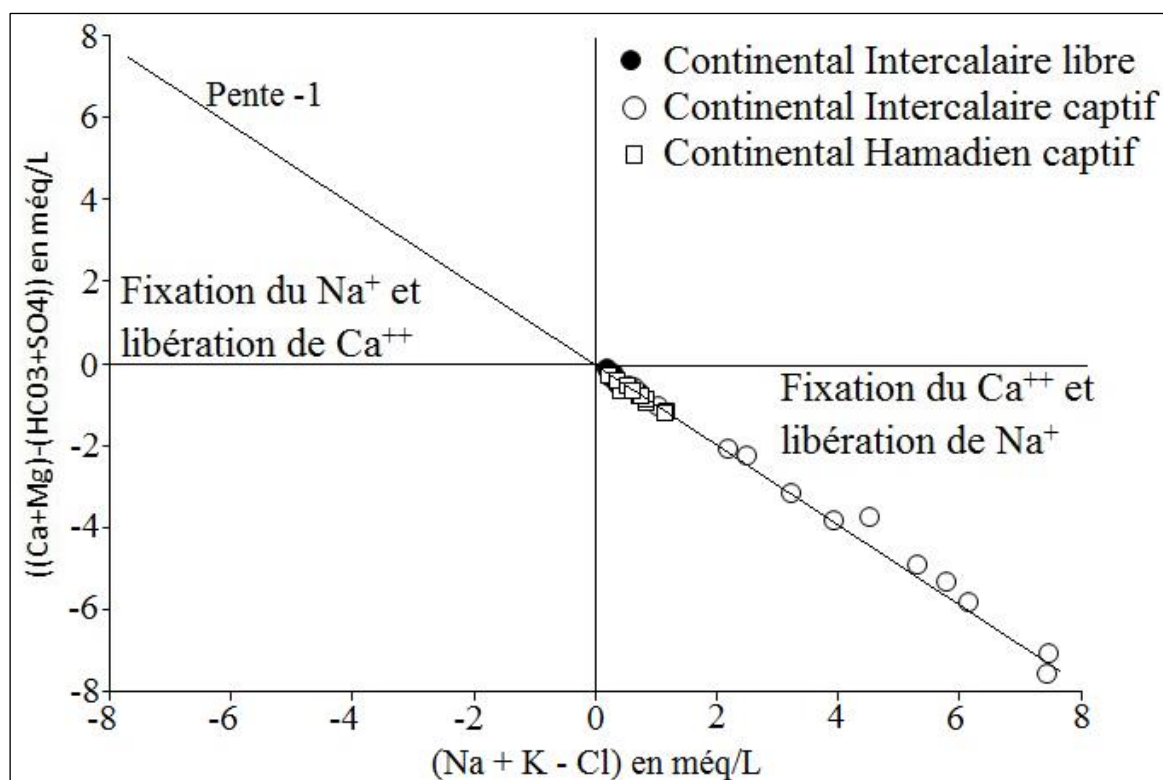


Figure 54 : Relation entre $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$ vs $[Na^+ + K^+ - Cl^-]$ des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Les éléments dont nous disposons ne nous permettent pas de trancher fermement entre ces trois hypothèses. Il nous semble toutefois que l'hypothèse 2, éventuellement couplée avec l'hypothèse 3, permet de rendre compte de l'essentiel des observations sur l'évolution des bicarbonates, des cations majeurs et du pH.

Pour aller plus loin, et permettre de contraindre une modélisation géochimique (par ex., utilisation de PHREEQC), l'acquisition de données minéralogiques (par DRX) est incontournable. Elle pourrait débiter par des analyses XRD sur quelques échantillons de cuttings issues des différents niveaux du système du Continental Intercalaire/Hamadien.

3.3.4.2. Origine des chlorures et des bromures

Les rapports massiques $[Br^-]/[Cl^-]$ des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden de la zone (Tableau 15) sont tous supérieurs au rapport marin ($3,47 \cdot 10^{-3}$) excepté le rapport du forage de Bouza ($2,19 \cdot 10^{-3}$). La quasi-totalité des points dans le diagramme $[Br^-]$ vs $[Cl^-]$ (Fig. 55) est donc située au-dessus de la droite de dilution de l'eau de mer, uniquement indiquée comme repère, puisque les formations aquifères sont d'origine continentale.

Tableau 12 : Valeur du rapport $[Br^-]/[Cl^-]$ massique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (n.a : teneur de Br inférieure à la limite de detection)

Site	Aquifère	Br/Cl	Site	Aquifère	Br/Cl	Site	Aquifère	Br/Cl	
Bada	CH Captif	n.a	Damboutan	CI Captif	$5,18.10^{-3}$	Abalak	CI Libre	n.a	
Guichiri									
Bambeye		$8,25.10^{-3}$	Ikotayan		$6,7.10^{-3}$				
Bouza		$2,19.10^{-3}$	Iliba		n.a				
Dan Gona		$8,16.10^{-3}$	Intamat		$4,34.10^{-3}$			Abouhaya	$4,55.10^{-3}$
Doguérawa		$5,02.10^{-3}$	Tabalak		$1,02.10^{-2}$				
Doli		$6,45.10^{-3}$	Takanamat		$6,25.10^{-3}$			Inarigan	n.a
Gadamata		n.a	Takarwilit		$4,09.10^{-3}$				
Hiro		n.a	Taoudawene		$7,61.10^{-3}$				
Illéla		$7,81.10^{-3}$	Tassara		$5,62.10^{-3}$			Louberat	n.a
Konni		$9,98.10^{-3}$	Tazalite		$6,33.10^{-3}$				
Mallalebi		$5,0.10^{-3}$	Tchinta		$5,81.10^{-3}$				
Tama		n.a	Telemces		$6,22.10^{-3}$			Tamaya	$9,83.10^{-3}$
			Tillia		$4,48.10^{-3}$				

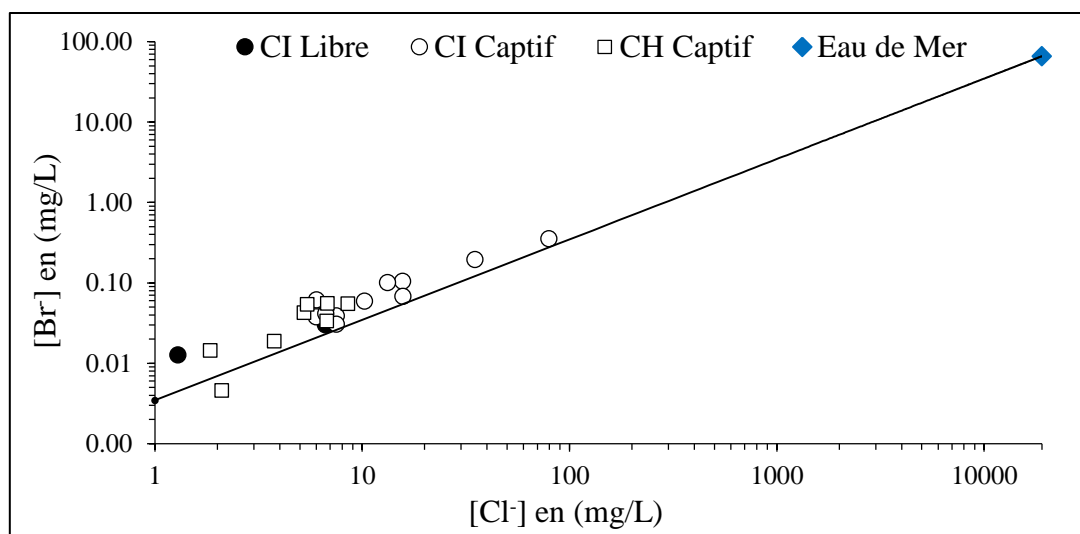


Figure 55 : Relation entre $[Br^-]$ vs $[Cl^-]$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

La figure 55 suggère une origine unique des chlorures (et des bromures) avec un rapport assez peu variable.

La matrice de corrélation entre les différents éléments chimiques (Tableau 13) montrait une corrélation significative entre chlorures et bicarbonates. Cette corrélation est présentée sur la figure 56.

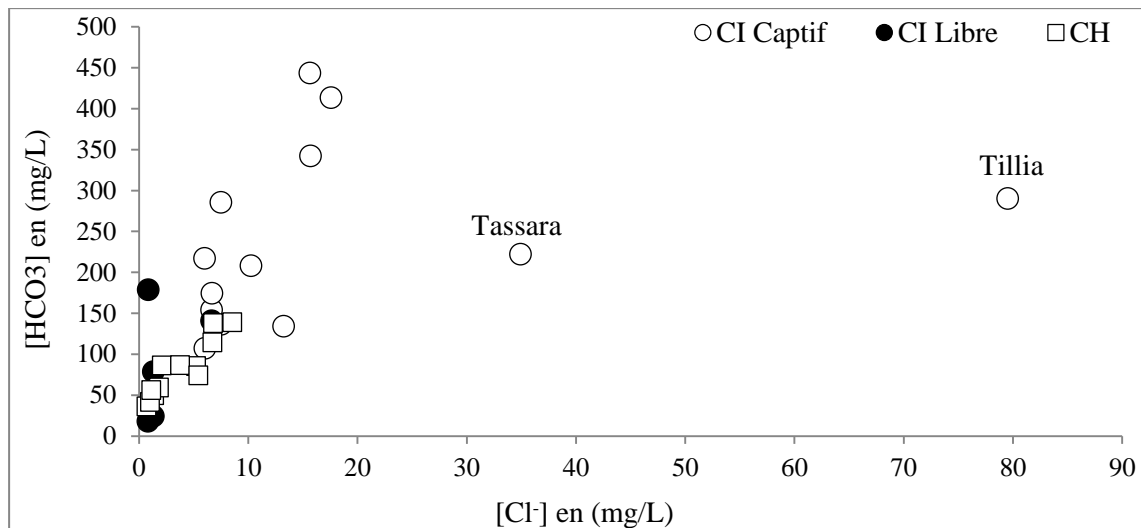


Figure 56 : Relation entre $[HCO_3^-]$ et $[Cl^-]$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Une tendance linéaire associe bien les points pour lesquels la teneur en chlorure est inférieure à environ 20 mg/L. Les chlorures pourraient dans ce cas provenir, outre de la recharge par les précipitations plus ou moins concentrées par évaporation/transpiration, de l'hydrolyse des silicates. En effet, ces minéraux contiennent de faibles quantités de chlorures contenus, par exemple, dans les micas en substitution des OH^- (Edmunds et al., 1985; Kamineni, 1987) ou dans les inclusions fluides, surtout du quartz (Nordstrom et al., 1989).

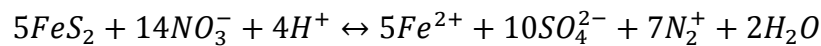
En revanche, les deux points qui présentent les plus fortes teneurs en chlorures (Tassara et Tillia), captés dans le Continental Intercalaire captif, ne s'inscrivent pas dans cette tendance linéaire (Fig. 56), suggérant une seconde source de chlorures, ponctuellement. Il existe au-dessus du système du Continental Intercalaire/Hamadien des formations marines du Crétacé moyen et supérieur à efflorescences salines qui peuvent abriter localement des nappes d'extension limitée. Cependant, l'hypothèse d'une faible contribution ponctuelle des eaux de ces nappes à l'alimentation du système profond, qui pourrait expliquer les teneurs en chlorures "anomaliques", n'est pas supportée par ce qui est connu de la distribution des charges hydrauliques : il semble que le système profond soit en charge par rapport aux nappes du Crétacé. L'origine des teneurs en chlorures les plus élevées reste donc difficile à identifier avec les données disponibles.

La mesure des teneurs en chlore-36 pour l'ensemble de la gamme des teneurs en chlorures observées (nous ne disposons pour l'instant que des mesures sur les échantillons d'eau souterraine les moins concentrées, annexe 17) pourrait contribuer à affiner ces interprétations.

3.3.4.3. Origine des sulfates

Les rapports $[SO_4^{2-}]/[Cl^-]$ calculés pour les eaux souterraines de cette étude sont nettement supérieurs dans leurs ensembles au rapport marin avec des facteurs de 40 à 100 pour le Continental Hamadien et des facteurs de 3 à 20 pour le Continental Intercalaire.

Dans le diagramme $[SO_4^{2-}]$ vs $[Ca^{2+}]$, (Fig. 57), les échantillons issus du Continental Hamadien et ceux du Continental Intercalaire, se situent de part et d'autre de la droite de dissolution du gypse (1 : 1), écartant vraisemblablement, toute évidence d'une quelconque origine des sulfates liée à la dissolution du gypse. Ceci, est confirmé, par les indices de saturation vis à vis du gypse qui montrent une sous-saturation pour tous les échantillons. Cependant, la présence de Fer, et l'absence des nitrates dans les échantillons du CH laissent penser aux phénomènes d'oxydation de la pyrite à partir de l'équation ci-dessous :



Mais, l'inexistence de corrélation des nitrates avec les autres éléments majeurs, permet d'écarter l'hypothèse d'une source liée à l'oxydation de la pyrite. La présence cependant, des fragments de gypse dans les formations du Sénonien supérieur, constituant le toit du système aquifère, pourrait expliquer l'origine des sulfates, par les processus de lessivage.

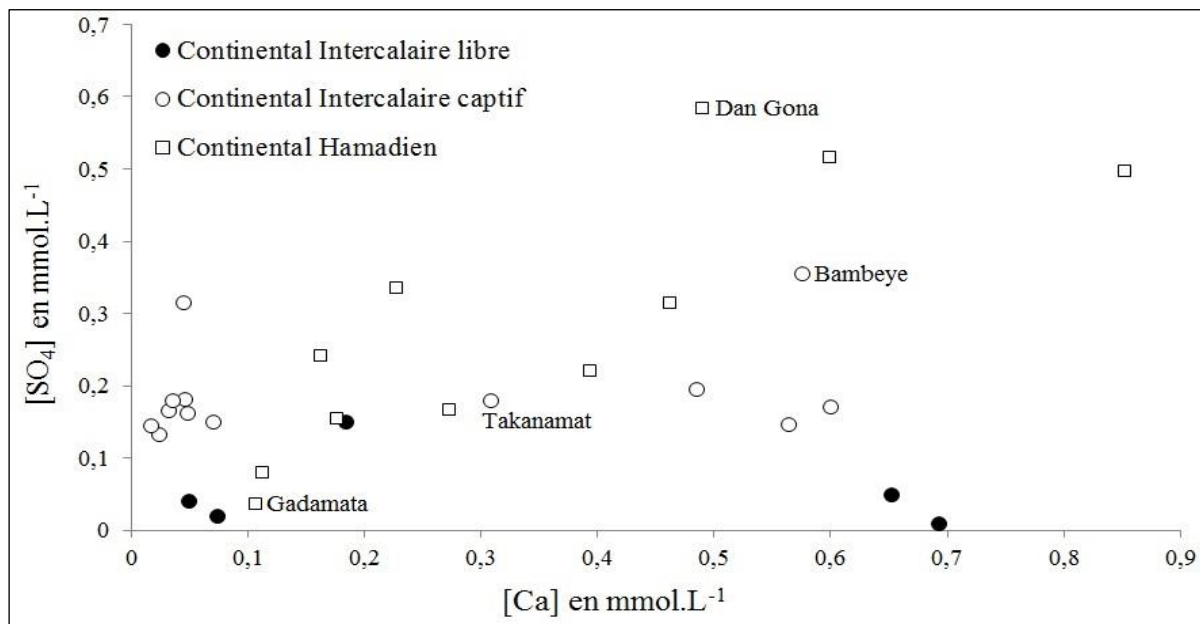


Figure 57 : Relation entre $[SO_4^{2-}]$ et $[Ca^{2+}]$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Le diagramme $[SO_4^{2-}]$ vs $[Fe]$ (Fig. 58) montre deux tendances. L'une concerne la grande majorité des échantillons, avec de faibles teneurs en fer ($<0,015$ mole/L) plus ou moins corrélées aux teneurs en sulfates. L'autre concerne quatre échantillons dont les teneurs en fer sont plus élevées et qui semblent également corrélées aux teneurs en sulfates avec une pente plus faible.

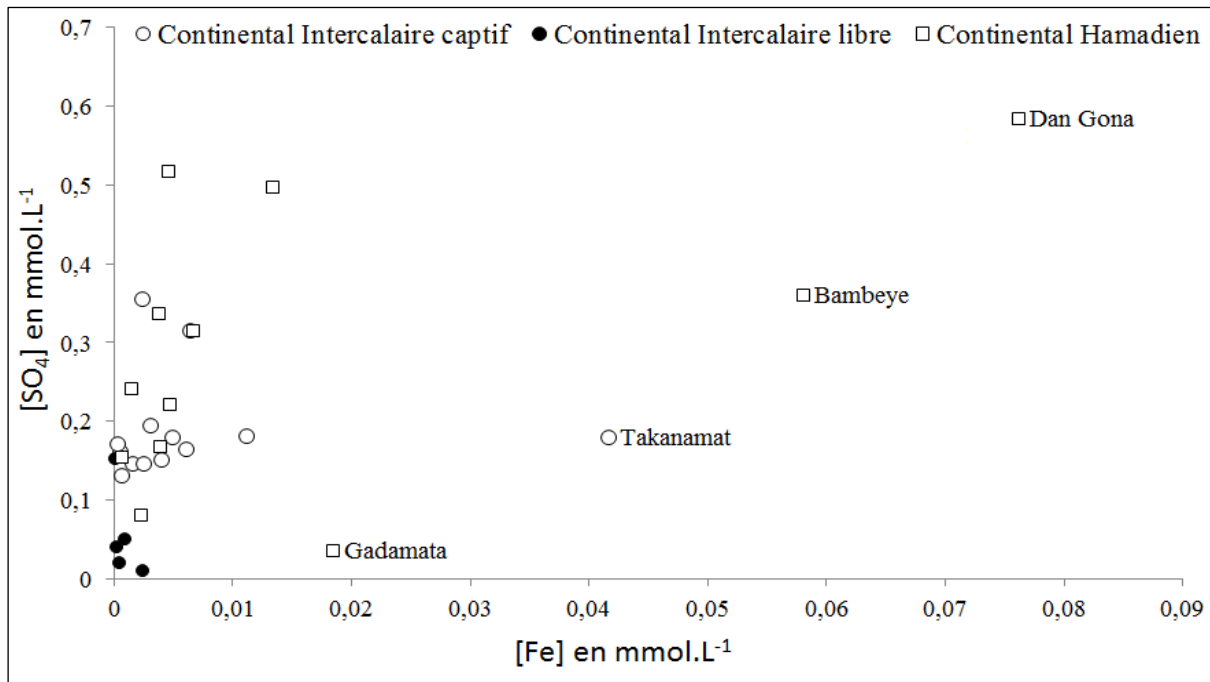


Figure 58 : Relation entre $[SO_4^{2-}]$ et $[Fe]$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Finalement les teneurs en sulfates présentent à la fois des liens avec le calcium (mise en solution de gypse ?) et avec le fer (oxydation de pyrites ? influence du potentiel redox ?) mais ces liens sont difficiles à déchiffrer dans le détail.

Pour obtenir des renseignements complémentaires sur l'origine des sulfates, il pourrait être utile de réaliser des analyses isotopiques des sulfates dissous (^{34}S et ^{18}O).

3.3.4.4. Indice de saturation

Les indices de saturation (Is) calculés (Tableau 16) montrent évidemment une sous-saturation de tous les échantillons vis-à-vis de la halite et du gypse mais aussi vis-à-vis de la dolomite et de la calcite, excepté l'échantillon de Tchintabaraden qui atteint juste la saturation pour la calcite et la dolomite avec respectivement des valeurs d'indice de saturation de 0,05 et 0,15.

Cette sous-saturation générale vis à vis de la calcite et de la dolomite (Fig. 59) confirme l'absence de carbonates dans les formations aquifères, purement silicatées. Elle permet en outre d'exclure la possibilité de la formation de carbonates secondaires dans les conditions actuelles. Ces points sont importants pour l'interprétation des teneurs en ^{14}C qui seront présentées ultérieurement (point 3.4.2.).

Tableau 13 : Indices de saturation de la calcite, la dolomite, le gypse et l'halite des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

Site	Aquifère	Calcite	Dolomite	Gypse	Halite
BadaGuichiri	CH Captif	-2,17	-4,13	-3,01	-9,46
Bambeye		-0,23	-0,51	-2,39	-8,34
Bouza		-1,2	-2,56	-2,98	-9,05
DanGona		-1,24	-2,38	-2,27	-8,7
Doguerawa		-0,71	-1,63	-2,72	-8,88
Doli		-0,08	-0,18	-2,14	-8,65
Gadamata		-2,51	-4,92	-3,96	-10,6
Hiro		-2,32	-4,55	-3,61	-9,98
Illela		-1,91	-3,61	-2,76	-9,29
Konni		-1,04	-2,23	-2,5	-8,9
Mallalebi		-0,22	-0,66	-2,24	-8,35
Tama		-1,59	-3,18	-3,17	-9,59
Damboutan		CI Captif	-0,31	-0,55	-2,73	-8,32
Ikotayan	-0,37		-0,89	-4,1	-7,16
Iliba	-0,33		-0,71	-3,9	-7,1
Intamat	-0,18		-0,3	-3,9	-7,23
Tabalak	-0,68		-1,68	-2,68	-8,74
Takanamat	-0,67		-1,53	-2,94	-8,07
Takarwilit	-0,6		-1,28	-4,26	-7,63
Taoudawene	-0,2		-0,28	-2,81	-8,26
Tassara	-0,42		-0,75	-3,72	-6,95
Tazalite	-0,71		-1,83	-4,33	-7,84
Tchintabraden	0,05		0,15	-2,46	-7,79
Telemces	-0,87		-2,17	-3,87	-7,89
Tillia	-0,36		-1,28	-3,66	-6,46
Abalak	CI Libre	-3,32	-6,63	-4,35	-10,5
Abouhaya		-0,08	-0,26	-3,19	-8,85
Inarigan		-1,04	-1,91	-3,9	-10,1
Louberat		-2,07	-3,76	-3,2	-9,33
Tamaya		-3,38	-6,33	-4,24	-9,97

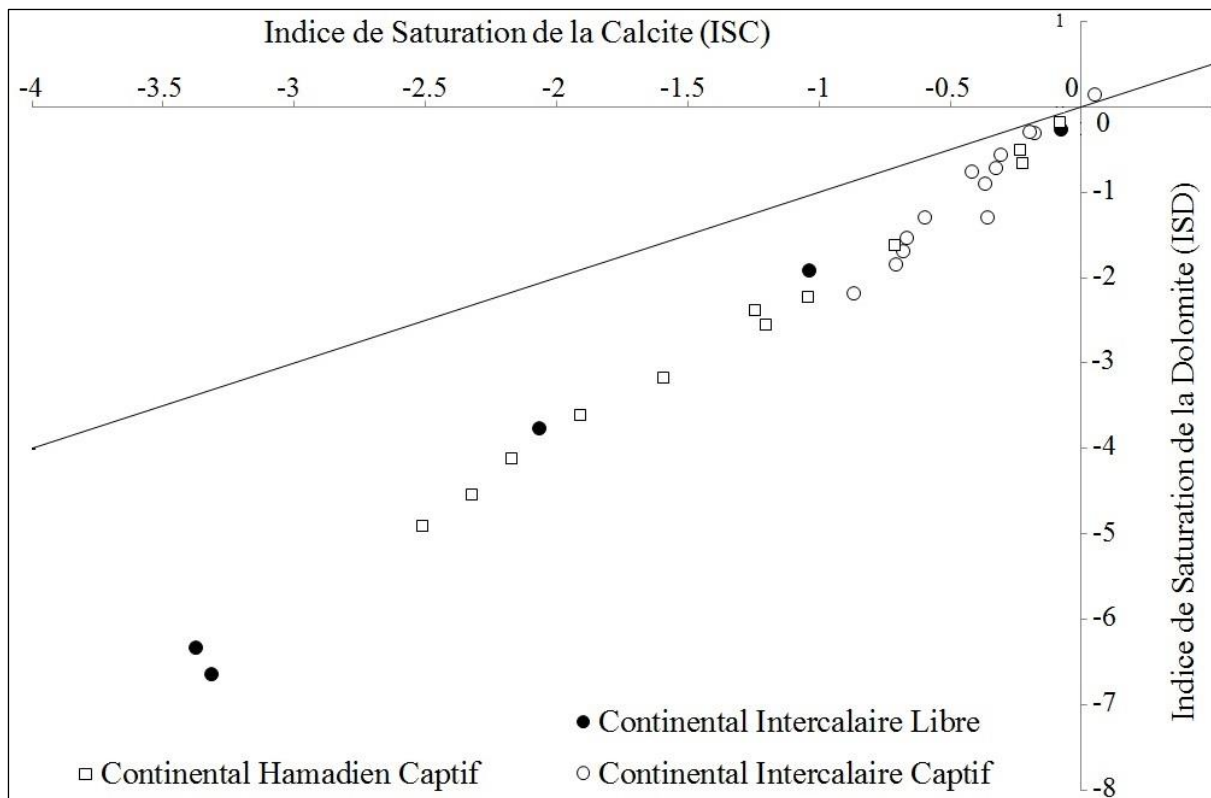


Figure 59 : Relation entre ISdolomite vs IScalcite dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.3.5. Aptitudes des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien aux différents usages

3.3.5.1. Consommation humaine et animale

Dans cette étude, plusieurs paramètres ont été mesurés, ou peuvent être évalués, qui permettent d'évaluer l'aptitude physico-chimique des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua à la consommation humaine et animale. Il s'agit tout d'abord, des paramètres organoleptiques (goût, odeur, couleur, ...), des paramètres physiques (température, pH et conductivité), des paramètres chimiques (sulfate et chlorure, nitrate et nitrite, fluor, et fer) et de la dureté de l'eau.

3.3.5.1.1. Paramètres organoleptiques

Du point de vu organoleptiques, il ressort, que les eaux du système aquifère du CI/H, de la région de Tahoua, sont claires, limpides et sans odeurs d'après les constats faits *in situ*, aux moments des opérations des essais de pompage et des campagnes d'échantillonnage d'eau. Cependant, les eaux d'un certain nombre des forages captant le Continental Hamadien changent de couleur et deviennent rougeâtres quelques heures ou jours après leur pompages, en raison de la précipitation d'oxydes de fer. Par ailleurs, dans le secteur nord-ouest de la région, quelques forages qui captent le Continental Intercalaire présentent un goût désagréable (forage d'Ikotayan par exemple), peut-être à cause de teneurs plus élevées en sels. Excepté ce caractère rougeâtre constaté dans certains points captant le Continental Hamadien, et le goût salé observé en quelques points qui captent le Continental Intercalaire captif, les eaux du système aquifère du CI/H jouissent d'une bonne qualité organoleptique dans leur ensemble.

3.3.5.1.2. Paramètres physiques

Ils s'agissent du pH, de la température et de la conductivité électrique :

- **pH** : les valeurs de pH mesurées sur les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien sont comprises entre 6,15 et 8,68 unités pH. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2008), il n'y a pas de valeur guide pour le pH, mais un optimum entre 6,5 et 8,5 unités pH. Ces limites sont basées sur des considérations techniques (corrosion), mais l'intervalle peut être étendu jusqu'à 9.5 unités pH, s'il n'existe pas des systèmes (réseau) de distribution (Vassolo et al., 2012). Ainsi, plus de 84% des eaux du système aquifère sont conformes à cet optimum entre 6,5 et 8,5 unités pH et moins de 16% composés des forages d'Abalak, de Badaguichiri, de Gadamata, d'Illéla, de Loubérat et de Tamaya présentent des valeurs inférieures et Timblim une valeur supérieure à celles indicatives de l'OMS.

- **température** : mesurée *in situ*, les valeurs de température pour les eaux du système aquifère sont comprises entre 32 et 48,5°C. Si, d'après Bouselsal et al. (2015), la température d'une eau potable doit être comprise entre 22 et 25°C, l'OMS (WHO, 2008), ne donne aucune valeur guide, et préfère considérer toutes les températures, même élevées, comme acceptables.

Les fortes températures observées dans les eaux du Continental Intercalaire/Hamadien, particulièrement au centre et à l'Ouest de la région, nécessite tout de même un refroidissement avant leur utilisation domestique ;

- **conductivité électrique** : pas de norme fixe pour la conductivité selon l'OMS (2006 et 2008). Cependant, selon la référence de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (depuis décembre 2003) de la directive européenne, la valeur maximale de la conductivité électrique est limitée à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C. Les conductivités mesurées dans cette étude à 25°C *in situ* sont comprises entre 47,40 et 1462 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'ensemble des échantillons présentent une valeur de conductivité inférieure à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour toutes les eaux, à l'exception du forage d'Infène qui montre une valeur de 1462 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs modérées de conductivité électrique, loin de la limite de la directive européenne pour l'eau potable permettent de considérer ces eaux comme de bonne qualité pour la consommation humaine et animale sur ce critère.

3.3.5.1.3. Paramètres chimiques

- **sulfates et chlorures** : Les teneurs maximales fixées par WHO (2008) pour une eau potable sont de 250 mg/L pour les sulfates et pour les chlorures. Pour les sulfates, des teneurs supérieures à la norme peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux en particulier chez les enfants. Les teneurs en sulfates, comprises entre 0,96 et 56 mg/L et celles des chlorures qui varient entre 0,70 et 79,52 mg/L des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien sont faibles par rapport aux normes OMS, même si elles montrent cependant des différences sensibles d'un forage à un autre, et permettent leur utilisation sans danger (Fig. 60a et b) ;

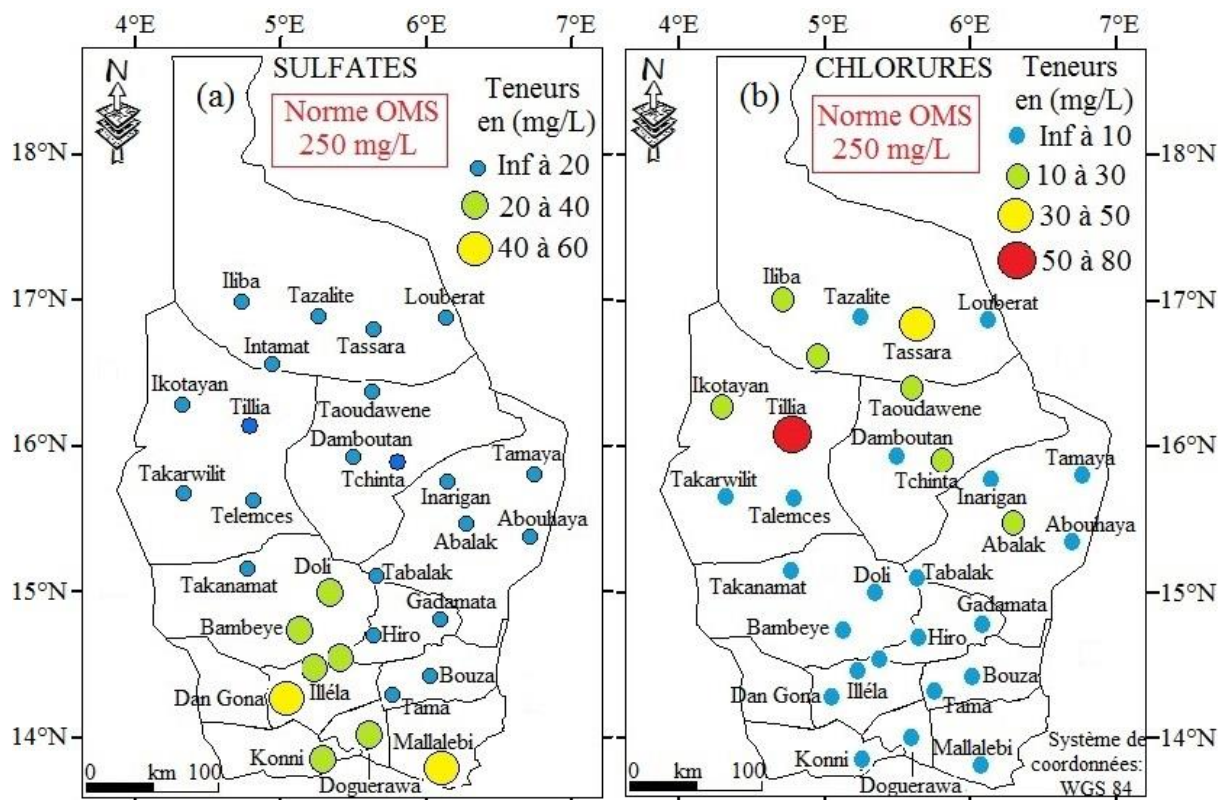


Figure 60 : Répartition spatiale des teneurs en nitrates des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

- **nitrates et nitrites** : plus nocifs que les sulfates et chlorures, ils peuvent provoquer des troubles graves chez les nourrissons, quand leurs valeurs dépassent les normes fixées par l'OMS (WHO, 2008), pour une eau potable : moins de 50 mg/L pour les nitrates, de 3 mg/L pour les nitrites (exposition court terme) et de 0.2 mg/L pour les nitrites (exposition long terme). Les teneurs maximales en nitrates et nitrites dans les eaux du système aquifère du CI/H sont respectivement de 26,18 mg/L et de 1,27 mg/L.

100% des eaux présentent des valeurs inférieures à la norme (WHO, 2008) pour les nitrates et nitrites. Cependant, pour une exposition à long terme, un suivi doit être envisagé pour le forage d'Iliba, qui présente ponctuellement une teneur en nitrite de 1,27 mg/L.

Sur la carte des nitrates (Fig. 61), des valeurs un peu plus importantes sont observées dans les forages de Tamaya et Abalak, représentés par les ronds verts et surtout dans le forage de Tassara, représenté par un rond rouge. Ces valeurs semblent être liées aux activités anthropiques, la nappe étant libre dans ce secteur où s'exerce une pratique de pastoralisme très importante.

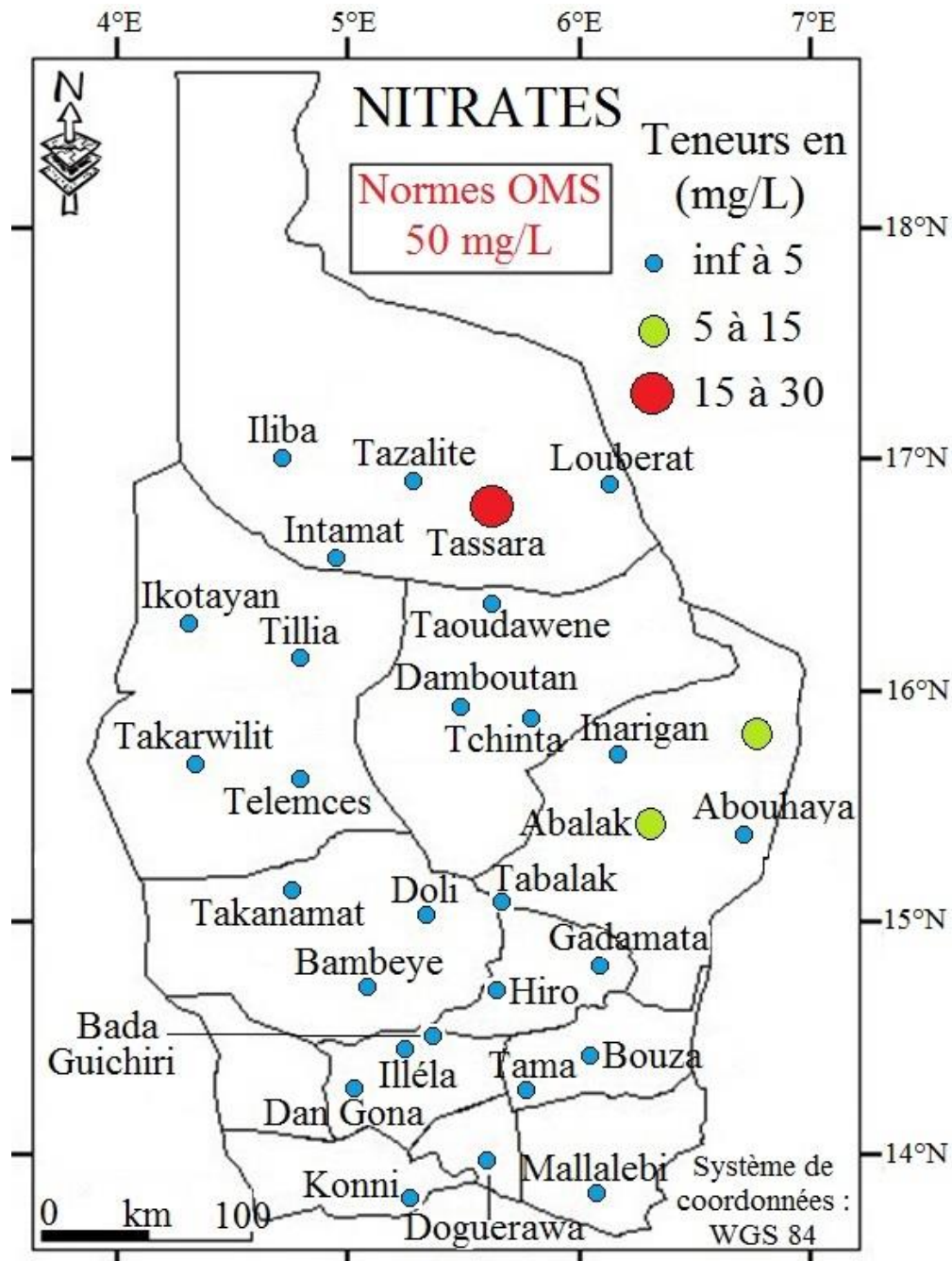


Figure 61 : Répartition spatiale des teneurs en nitrates des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Sur la carte des nitrites (Fig. 62), le forage d'Iliba (rond rouge) apparaît clairement, bien qu'il capte la nappe du Continental Intercalaire à une profondeur très importante (505 mètres). Ceci pourrait s'expliquer par une contamination par les pratiques de puisage, qui utilise des puisettes, des cordes et chameaux, à cause de la nature de l'ouvrage (forage-puits). Un forage-puits, est un puits qui est alimenté par un forage sans pompage, par un canal qui communique les deux ouvrages.

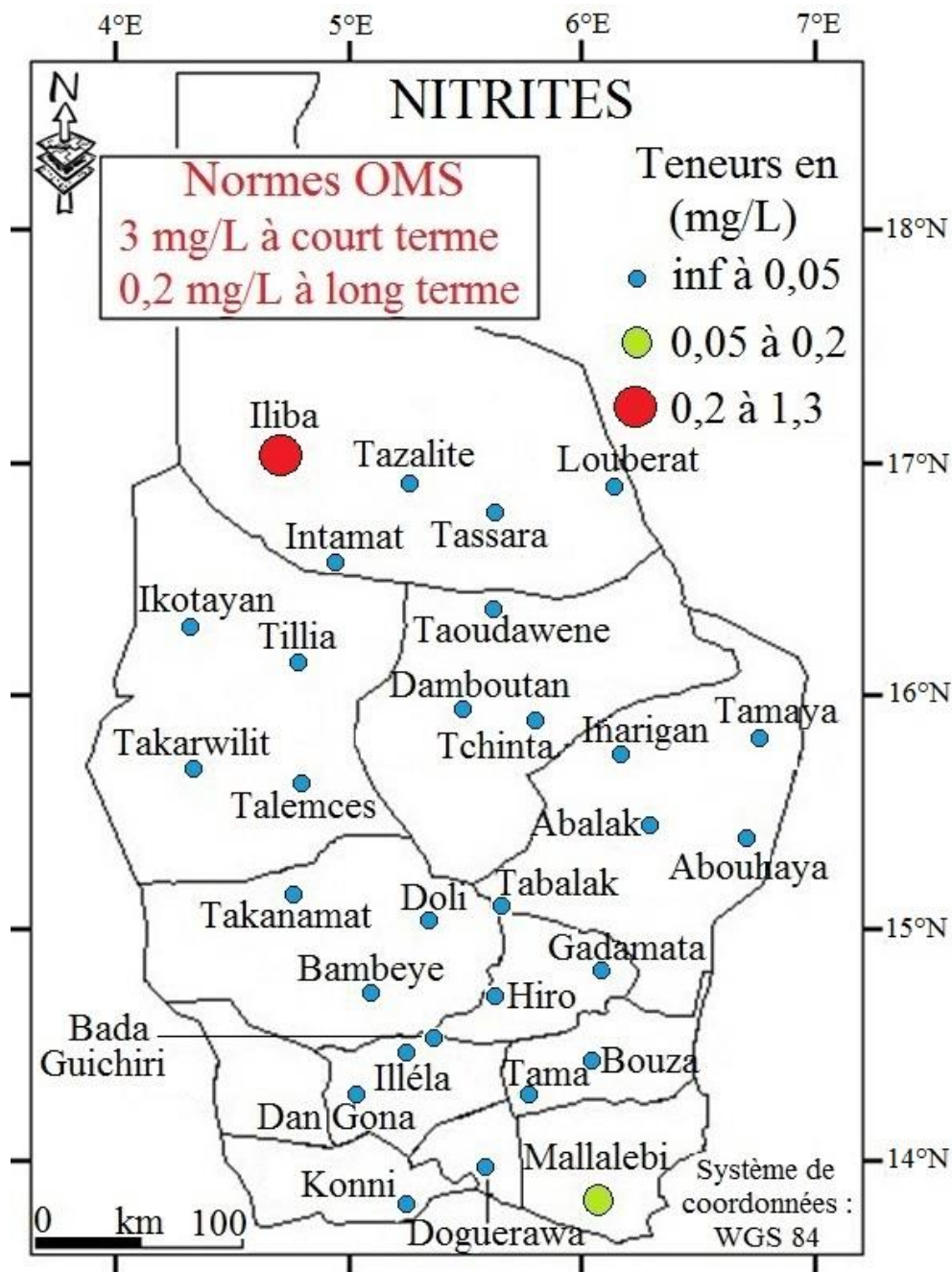


Figure 62 : Répartition spatiale des teneurs en nitrites des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

- **fer (Fe) et fluor (F⁻)** : Amadou et al. (2014) qui cite l'OMS, stipulent que la teneur de fer total dans une eau potable ne doit pas dépasser 0.3 mg/L. Quant à la liste des références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine (Gilli et al, 2016), la valeur limite du fer pour une eau potable est estimée à 0,2 mg/L. 50 % des eaux du système aquifère présentent des valeurs inférieures à cette norme (0,2 mg/L) et environ 50% des valeurs supérieures (Fig. 63).

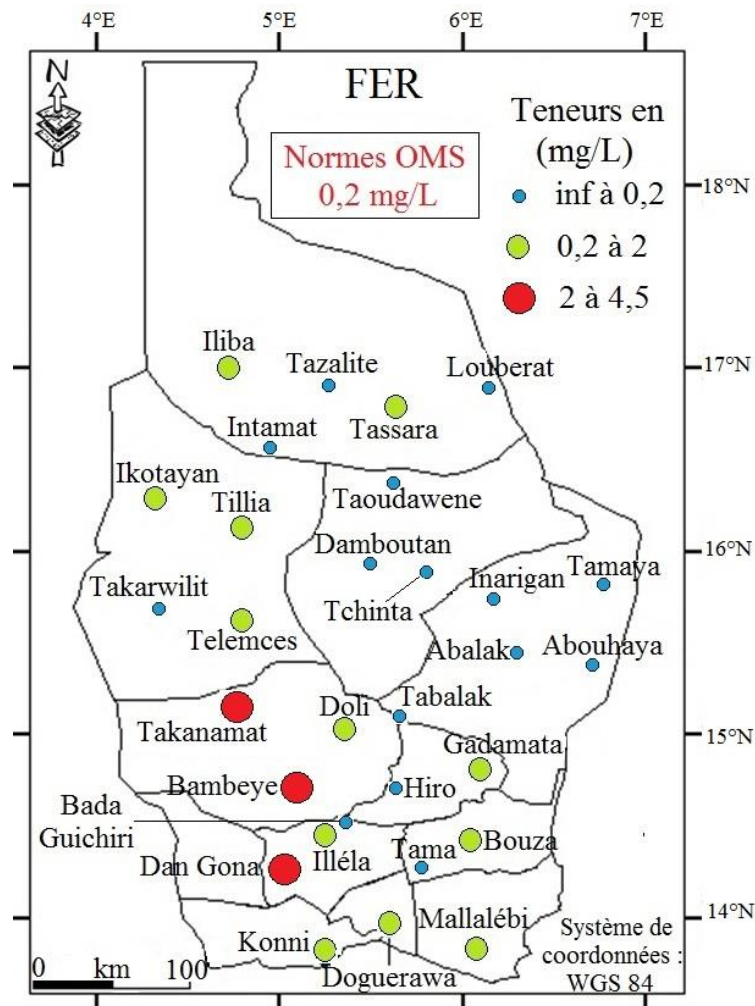


Figure 63 : Répartition spatiale des teneurs en fer des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Le fluor est un élément très important à prendre en considération dans les eaux de boisson.

Si, à faible quantité il est bénéfique pour l'organisme, comme tous les oligo-éléments d'ailleurs, sa présence en excès dans les eaux de boisson peuvent être toxique et engendrer des caries dentaires (Jordana et al., 2004) ou des fluoroses dentaires ou osseuses à forte dose (Brouwer et al., 1988 et OMS, 2000 cité par Amadou et al., 2014). La valeur limite du fluor fixée par WHO (2008) pour les eaux de boisson est de 1,5 mg/L pour les régions tempérées. Tous les échantillons analysés ici présentent des teneurs en fluor en dessous de la norme (WHO, 2008), excepté celui du village d'Ikotayan (Fig. 64) qui présente une teneur qui est très voisine de la norme (1,52 mg/L). Dès lors des mesures idoines pourraient être prises pour le forage d'Ikotayan, mais aussi pour celui de Tillia assez proche du seuil (1.01 mg/L).

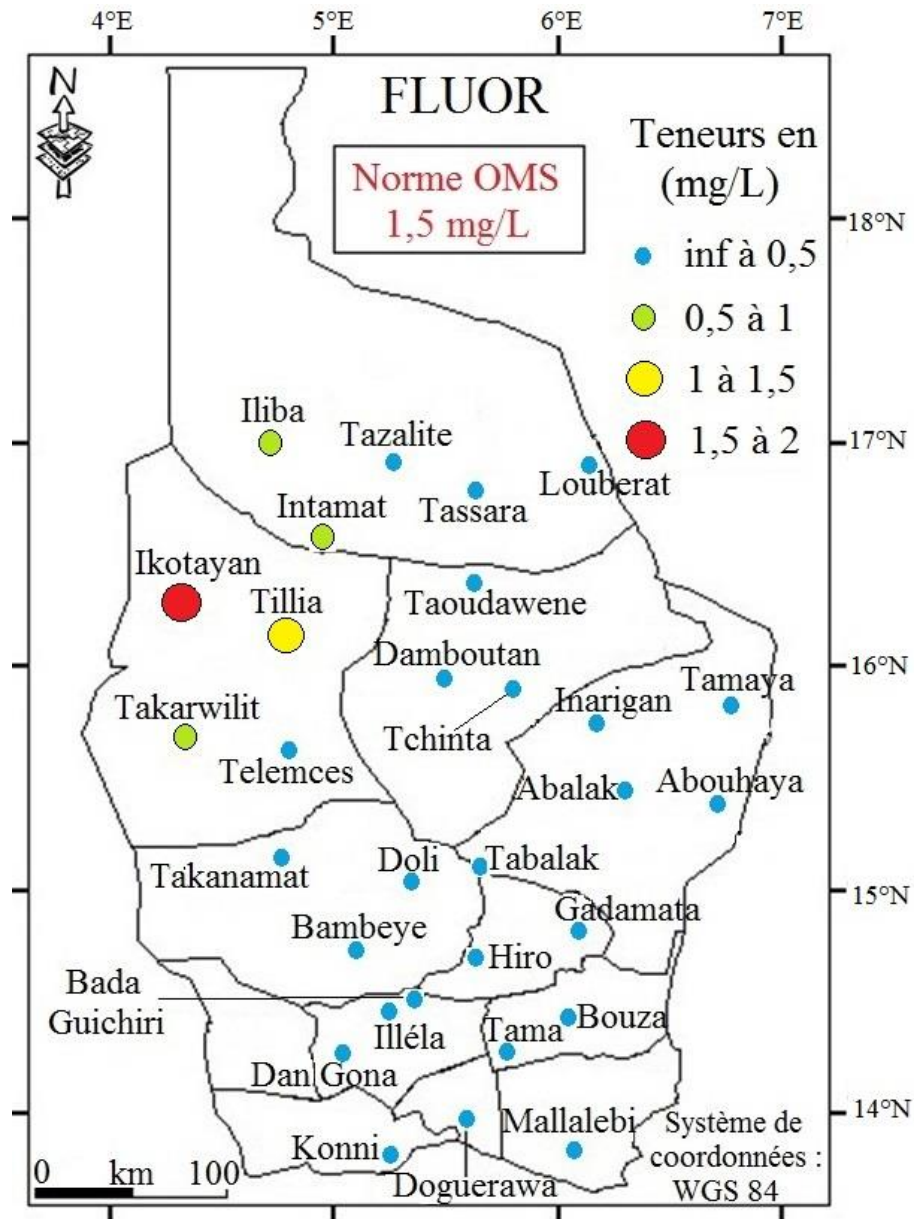


Figure 64 : Répartition spatiale des teneurs en fluor des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

La représentation spatiale des teneurs en fer (Fig. 63) et en fluor (Fig. 64) des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua permet de faire ressortir clairement les secteurs les plus touchés par des teneurs élevées (souvent hors norme) de fer et de fluor. Il s'agit surtout de la partie ouest dans la nappe du Continental Hamadien pour le fer (secteur de Dan Gona, de Bambeye et de Takanamat principalement), correspondant aux ronds rouge et vert (Fig. 63) et la partie nord-ouest pour le fluor, dans le Continental Intercalaire, correspondant aux ronds rouge et jaune (Fig. 64).

- **dureté de l'eau** : déterminée par le titre hydrotimétrique (TH), elle classe les eaux du Continental Intercalaire/Hamadien en 3 catégories, dont plus de 63% comme douce ($0 < \text{th} < 6^\circ\text{f}$), 30% modérément dure ($6^\circ\text{f} < \text{th} < 12^\circ\text{f}$) et enfin 7% des eaux comme dure ($12^\circ\text{f} < \text{th} < 18^\circ\text{f}$), (OMS, 1986).

Toutes les valeurs du TH sont inférieures à 14°f , et sont comprises entre $0,20^\circ\text{f}$ et $13,28^\circ\text{f}$, avec une moyenne de $4,73^\circ\text{f}$ et se répartissent de manière hétérogène sur l'ensemble de la région (Fig. 65). Au plan de la santé, une eau dure n'a pas d'impact majeur, par contre, elle entraîne un certain nombre de désagrément : entartrage des canalisations et des chauffe-eau, consommation excessive de savon lors des usages domestiques (difficilement moussante), cuisson des légumes plus longue, et dépôt de tartre au fond des marmites et casseroles lorsqu'elles sont portées à ébullition (Hubert et al., 2002 ; Lasm et al., 2008 ; Yapo et al., 2010 ; Lagnika et al., 2014). Les eaux douces quant à elles sont généralement agressives et peuvent corroder les canalisations et favoriser le passage en solution de certains métaux dits lourds (cadmium, mercure, plomb, etc.). Ce phénomène est également fonction du pH, de l'alcalinité et de la concentration de l'oxygène dissous (Hudson et al., 1976 ; Larson et al., 1966).

La figure 65, montre la représentation spatiale de la dureté des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua. Si la nature douce des eaux, observée dans la partie nord-ouest de la région, est liée à la prédominance du sodium dans le cortège cationique il n'en est pas de même pour les forages situés sur l'axe Tamaya-Illéla et l'axe Tamaya-Konni, qui montrent une croissance de la dureté de l'eau suivant ces axes.

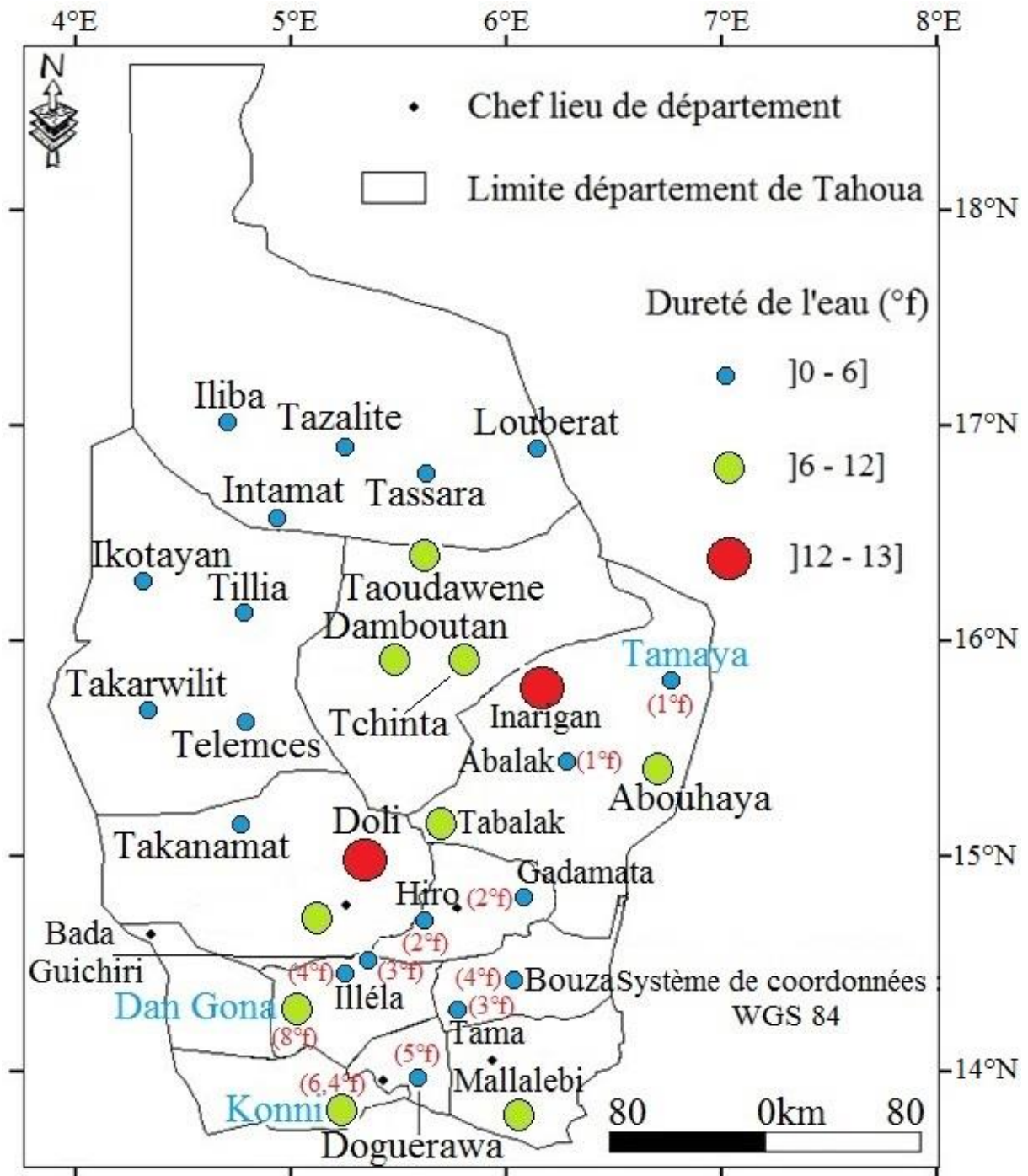


Figure 65 : Répartition spatiale de la dureté des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.3.5.2. Irrigation

La qualité ou l'aptitude des eaux souterraines destinées à l'irrigation est contrôlée par un certain nombre de paramètres importants. Parmi les principaux, les plus fréquemment utilisés sont la salinité totale de l'eau, le sodium d'adsorption ratio (SAR), le pourcentage en sodium et enfin les carbonates de sodium résiduel (RSC).

3.3.5.2.1. Salinité totale

L'effet premier d'une salinité totale excessive est la réduction de la croissance des cultures, ainsi que de leur productivité. La salinité est très souvent couplée à d'autres paramètres comme le SAR pour apprécier l'aptitude de l'eau à l'irrigation. Pour les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, les plus fortes minéralisations sont observées dans le secteur de Tassara et de Tillia, au Nord-Ouest de la région, avec des valeurs qui varient entre 318 et 668 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces valeurs de conductivité confèrent aux eaux de ces deux départements, une qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation.

3.3.5.2.2. Sodium d'adsorption ratio (SAR)

Les indices SAR calculés pour les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, dans la région de Tahoua, varient de 0,14 à 37,34. Ils sont, avec les valeurs de conductivité mesurées *in situ* pour les mêmes eaux, projetés dans le diagramme de Richards (1954), (Fig. 66).

Les eaux se répartissent dans le diagramme de Richards, en quatre groupes C_1S_1 , C_2S_1 , C_2S_3 et C_2S_4 comme suit :

- C_1S_1 : correspond à des eaux d'une qualité excellente. Ce sont des eaux, dont l'utilisation est sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, et sur la plupart des sols. Cette catégorie représente environ 47% de l'ensemble des points d'eau, et prend en compte toutes les eaux du Continental Intercalaire libre, 60% des eaux du Continental Hamadien, et 15% des eaux du Continental Intercalaire captif ;
- C_2S_1 : correspond à des eaux d'une bonne qualité. Ce sont des eaux qui, en général, peuvent être utilisées sans contrôle, en particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels sur la plupart des sols. Cette catégorie représente environ 27% des eaux, et concerne le restant des eaux du Continental Hamadien (40%) et 23% des eaux du Continental Intercalaire captif ;
- C_2S_3 : correspond à des eaux d'une qualité admissible. Il s'agit en général, des eaux convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur sol bien drainés.

L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Cette catégorie concerne uniquement les eaux du Continental Intercalaire captif, précisément le forage de Tassara et celui de Telemces ;

- **C₂S₄** : correspond à des eaux d'une qualité mauvaise. Il s'agit des eaux ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisées sous certaines conditions : sol très perméable, bien lessivé, plantes tolérantes aux sels.

Cette dernière classe représente 20% des eaux, uniquement du Continental Intercalaire captif, se trouvant précisément dans la partie nord-ouest de la région de Tahoua.

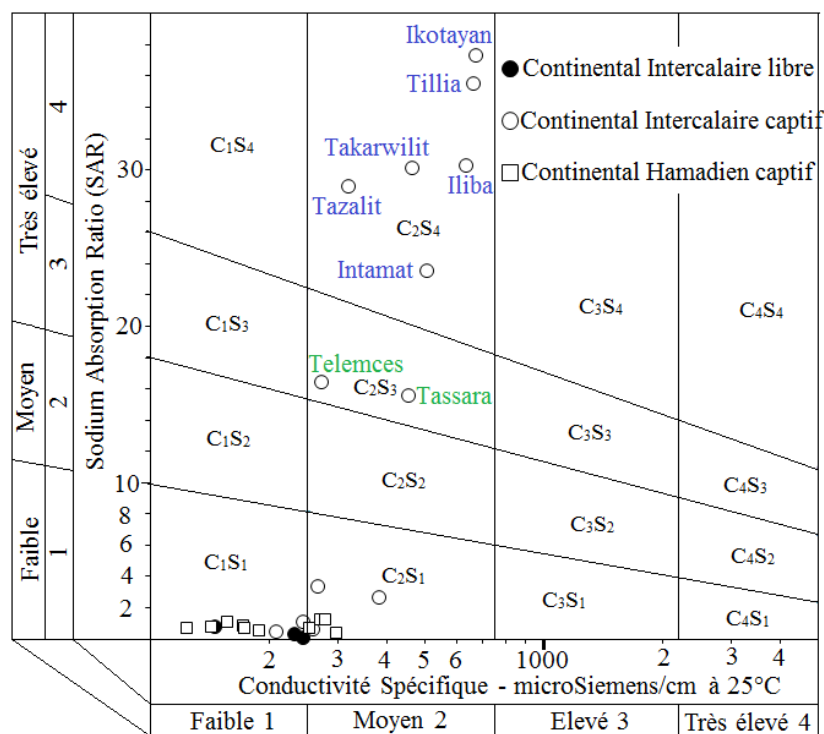


Figure 66 : Indices SAR vs conductivité électrique à 25°C dans le diagramme de Richards (1954), des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Tahoua)

3.3.5.2.3. Pourcentage en sodium

Le diagramme de Wilcox (1948), permet également de faire une classification des eaux en fonction de leur aptitude à l'irrigation. Contrairement à Richards, il prend en compte le pourcentage en sodium (%Na) et la conductivité électrique de l'eau à 25°C.

Les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua, projetées dans le diagramme de Wilcox (Fig. 67), permet de constater une répartition de ces eaux en trois groupes :

- plus de 73% des eaux sont excellentes, ce groupe prend en compte toutes les eaux issues du Continental Hamadien, toutes celles du Continental Intercalaire libre et environ 38% des eaux du Continental Intercalaire captif, avec une tendance vers le pôle admissible pour ces dernières ;
- les eaux du forage de Telemces, captant le Continental Intercalaire captif, sont considérées comme admissibles ;
- enfin près 24% des eaux se présentent comme médiocre, avec une tendance vers la classe mauvaise. Ceci concerne uniquement les forages dans le CI captif, se trouvant géographiquement dans la partie nord à nord-ouest de la région, à savoir les forages d'Ikotayan, d'Iliba, d'Intamat, de Takarwilit, de Tassara, de Tazalite, et de Tillia.

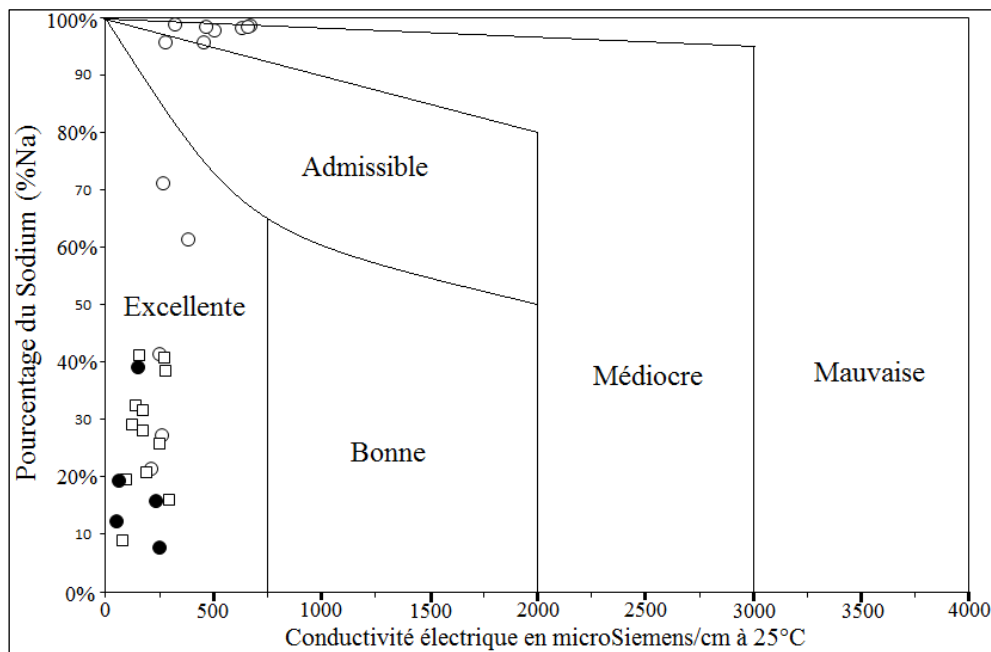


Figure 67 : Pourcentage de sodium vs conductivité électrique à 25°C dans le diagramme de Wilcox (1948), des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Tahoua)

3.3.5.2.4. Carbonates de sodium résiduel (RSC)

Les valeurs de RSC des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua, sont comprises entre -0,33 et 7,18. Ces valeurs sont regroupées en trois classes de qualité ou d'aptitude à l'irrigation. Leur répartition spatiale est présentée sur la Figure 68 :

- 67% environ des eaux présentent une bonne qualité pour l'irrigation avec des valeurs de RSC inférieures à 1,25. Cette classe concerne toutes les eaux du CH, du CI libre et seulement 10% des eaux du CI captif ;

- 6% des eaux ont une qualité moyenne, et des valeurs de RSC comprises entre 1,25 et 2,50. Elle regroupe uniquement les eaux du Continental Intercalaire captif (forage de Takanamat et de Tchintabaraden), rencontrées dans la partie nord-ouest de la région ;
- enfin pour les eaux salées et impropres pour l'irrigation, présentant des valeurs de RSC supérieures à 2,5, on compte environ 27%, il s'agit des forages situés dans la partie nord-ouest de la région de Tahoua, captant les nappes du CI captif.

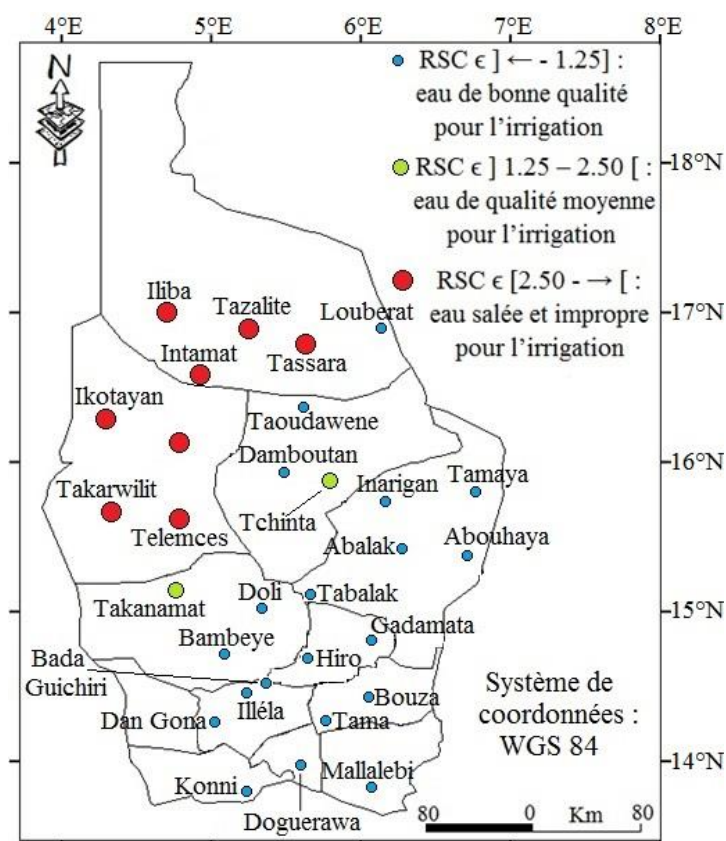


Figure 68 : Répartition spatiale des carbonates de sodium résiduel des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

En définitive, selon les différents critères d'analyses, plus de 70% des eaux du système aquifère dans la région de Tahoua sont d'une qualité excellente. Ceci concerne toutes les eaux du Continental Hamadien et du Continental Intercalaire libre, auxquelles s'ajoutent les eaux du Continental Intercalaire captif du secteur de Tchintabaraden (Damboutan et Taoudawene). Ces eaux peuvent, être utilisées sans danger pour l'irrigation pour la plupart des cultures, et sur la plupart des sols. En revanche, celles du Continental Intercalaire captif, rencontrées dans la partie nord et nord-ouest de la région de Tahoua, plus précisément dans le département de Tassara et de Tillia, sont d'une qualité médiocre à mauvaise pour l'irrigation.

3.4. CARACTERISTIQUES ISOTOPIQUES DES EAUX DU CONTINENTAL INTERCALAIRE/HAMADIEN

3.4.1. Teneurs en isotopes du carbone (^{13}C et ^{14}C) du carbone inorganique total dissous (CITD) et datation des eaux par ^{14}C

3.4.1.1. Teneur en carbone-13 du CITD

Les teneurs en carbone-13 du CITD de trente échantillons d'eau du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, collectés dans la région de Tahoua (annexe 14), varient de $-13,03\text{‰}$ à -8‰ vs V-PDB pour la nappe du Continental Hamadien, avec $-9,51\text{‰}$ comme moyenne, une médiane de $-9,36\text{‰}$ et un écart-type de 1‰ ($n=12$). Pour la nappe du Continental Intercalaire captif, ces teneurs varient de $-13,03\text{‰}$ à $-9,74\text{‰}$ vs V-PDB, avec une moyenne de $-11,30\text{‰}$, une médiane de $-11,32\text{‰}$ et un écart-type de $0,90\text{‰}$ ($n=13$). Enfin, les teneurs varient entre $-13,70$ et $-10,04\text{‰}$ vs PDB, avec une moyenne de $-12,32\text{‰}$, une médiane de $-13,03\text{‰}$ et un écart-type de $1,49\text{‰}$ pour les eaux du Continental Intercalaire libre ($n=5$). Ces teneurs peuvent correspondre, aux fractionnements près, à celles de CO_2 issu de sols couverts de plantes de cycle C4 (Hatch et Slack), c'est-à-dire la moitié des graminées, le sorgho, le mil, le maïs, Péanium Turgidum ou "herbe à chameau", etc. voire de cycle CAM (Crassulacean Acid Metabolism) c'est-à-dire les plantes grasses et crassulentes tropicales (Le Gal La Salle, 1994, qui cite Bender, 1971 ; Troughton, 1972 ; Lerman, 1974 ; et Deines, 1980).

La représentation sous forme d'histogramme du nombre de valeurs vs teneurs en ^{13}C du CITD des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (Fig. 69), montre la très faible dispersion des teneurs.

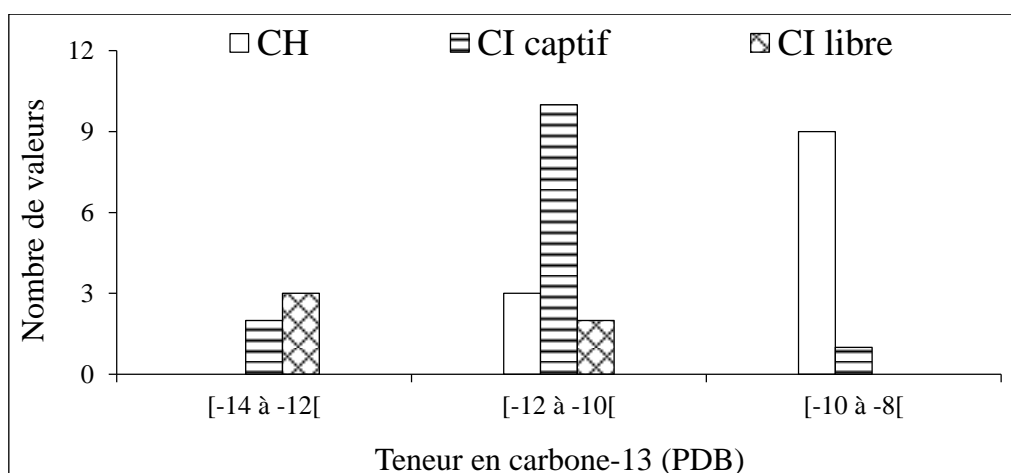


Figure 69 : Histogramme de répartition des teneurs en ^{13}C des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.4.1.2. Teneur en carbone-14 (^{14}C) des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

Les activités ^{14}C , varient de 2,6 à 56,93 pmC, avec une moyenne de $18,27 \pm 0,10$ pmC et une médiane de 14,82 pmC ($\sigma = 16,11$ pmC, $n = 12$). Elles varient également pour les eaux de la nappe du Continental Intercalaire captif de 1,32 à 19,38 pmC, avec une moyenne de $3,68 \pm 0,06$ pmC et une médiane de 2,01 pmC ($\sigma = 4,80$ pmC, $n = 13$). Enfin, ces activités de ^{14}C varient de 19,25 à 45,02 pmC, avec une moyenne de $38,13 \pm 0,15$ pmC et une médiane de 42,22 pmC ($\sigma = 10,65$ pmC, $n = 5$) pour les eaux de la nappe du Continental Intercalaire libre.

Le graphique nombre de valeurs vs activités en ^{14}C (Fig. 70), montre que toutes les eaux du Continental Intercalaire captif, sauf une, présentent une activité en ^{14}C inférieure à 5 pmC, alors que les eaux du Continental Intercalaire libre présentent les activités les plus élevées de la série avec 4 des points d'eau sur 5 présentant une valeur d'activité supérieure à 40 pmC. Enfin, dans le même diagramme, on constate la présence d'eaux du Continental Hamadien dans toutes les classes d'activité en ^{14}C . Pour mieux visualiser la variation des activités du ^{14}C , en particulier dans les eaux du Continental Hamadien, une carte de distribution spatiale a été établie en figure 71.

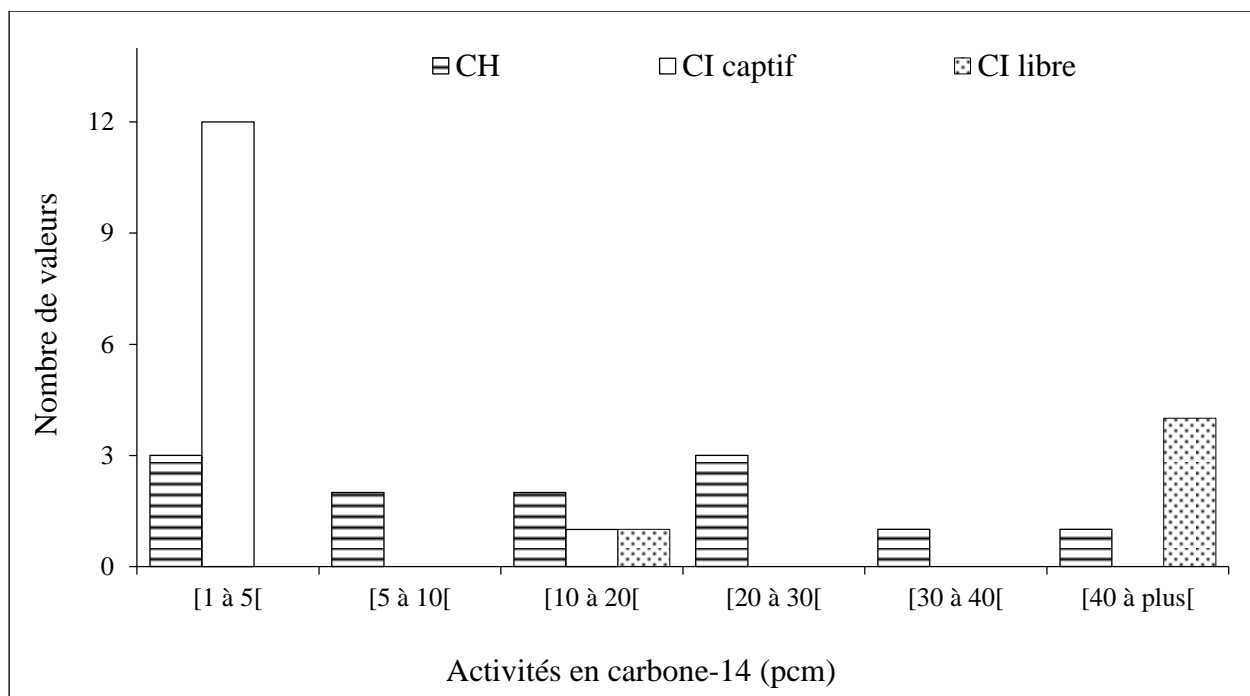


Figure 70 : Histogramme de répartition des activités en ^{14}C des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

La distribution spatiale des activités du ^{14}C (Fig. 71) montre qu'il existe une organisation des activités en ^{14}C , à l'échelle de la région de Tahoua. Les activités les plus élevées s'observent dans la partie est de la région (partie libre de l'aquifère) et se situent autour de 50 pmC. De là, elles diminuent vers le centre et l'Ouest de la région pour atteindre des valeurs de l'ordre de 1 pmC au Nord du parallèle $15^{\circ}30'\text{N}$, et vers le Sud-Ouest pour atteindre les valeurs de l'ordre de 5 à 10 pmC au Sud du même parallèle $15^{\circ}30'\text{N}$. Cette diminution des valeurs d'activités du carbone-14 met en évidence le "vieillissement" des eaux dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, de l'Est vers l'Ouest, au Nord du parallèle $15^{\circ}30'\text{N}$ et du Nord-Est au Sud-Ouest au Sud de ce parallèle (Fig. 71), en cohérence avec les directions d'écoulement déduites de la piézométrie (Fig. 41, point 3.2.3.6.).

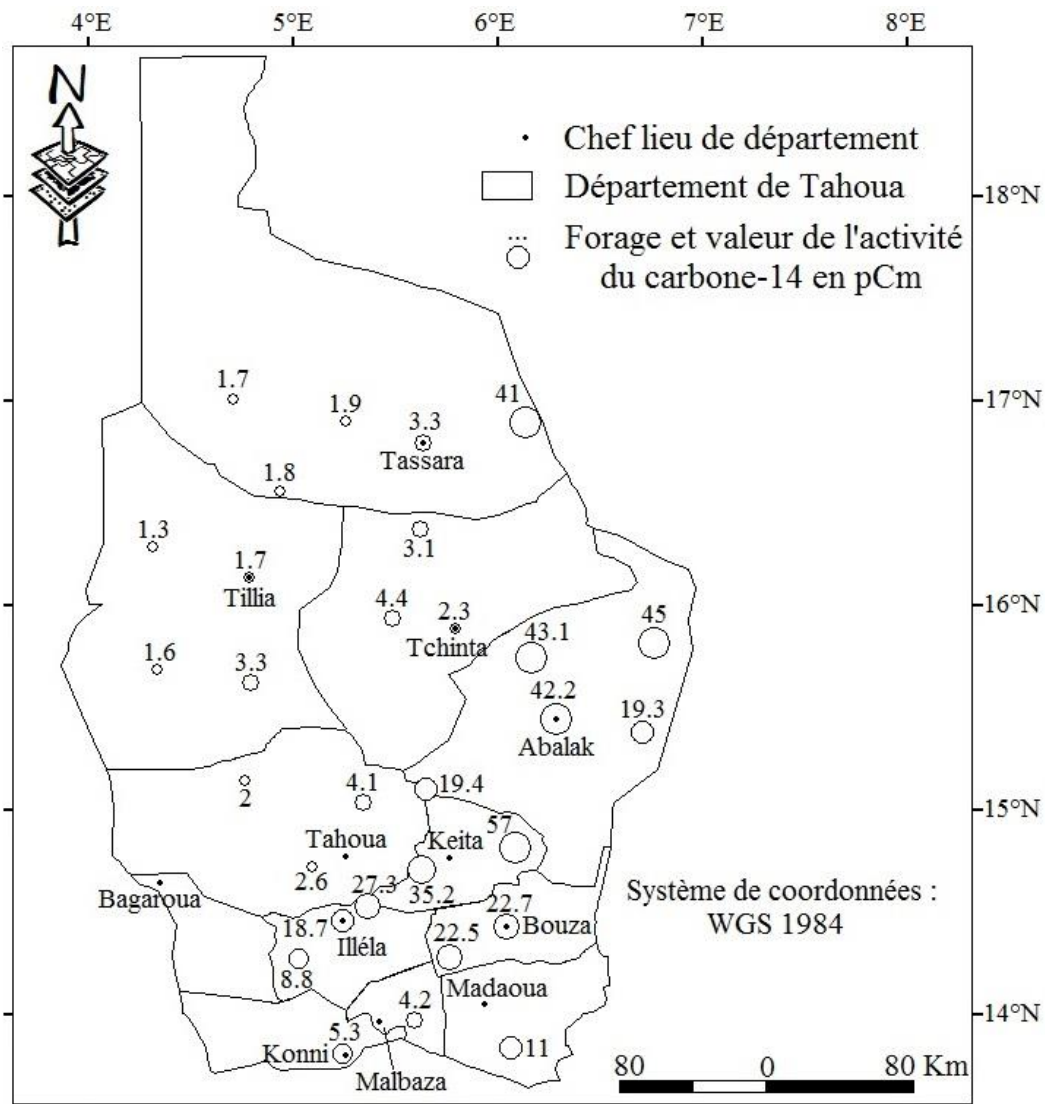


Figure 71 : Distribution spatiale des activités de carbone-14 des nappes du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.4.1.3. Relation entre activités ^{14}C et teneurs en ^{13}C

Aucune relation n'est observée entre teneurs en ^{14}C et en ^{13}C (Fig. 72). Les (faibles) variations de teneurs en ^{13}C observées ne sont pas liées aux (fortes) variations de teneurs en ^{14}C . Ceci est un argument fort en faveur de l'unicité de la source de carbone représentée dans le CITD. En effet, dans le cas de la présence de deux (ou plus) sources de carbone, chacune de ces sources est caractérisée par une teneur en ^{13}C et une activité ^{14}C initiale (avant décroissance radioactive). Il est donc généralement possible de détecter des relations de mélanges qui se superposent aux effets de la décroissance radioactive de ^{14}C .

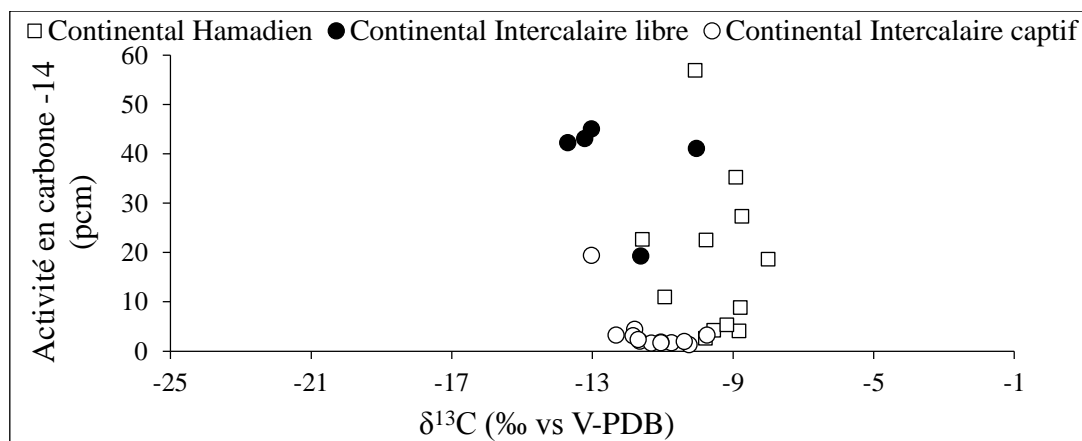


Figure 72 : Relation entre l'activité en ^{14}C et $\delta^{13}\text{C}$ des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

L'exemple le plus fréquent de mélange est celui observé dans les aquifères carbonatés, entre un carbone issu du CO_2 des sols, pauvre en ^{13}C et actif en ^{14}C , et un carbone issu de la mise en solution de minéraux carbonatés, plus riche en ^{13}C et "mort" en ^{14}C . Les cas dans lesquels des mélanges de carbone interviennent rendent nécessaire l'utilisation de modèles pour obtenir l'activité initiale à partir de laquelle l'équation de décroissance radioactive permet de proposer un "âge" de l'eau.

Pour le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, nous proposons une source unique de carbone dans le CITD : le CO_2 des sols. Cette hypothèse est cohérente avec :

- l'absence de relation entre teneurs en ^{13}C et activités ^{14}C ;
- les données minéralogiques qui indiquent l'absence de minéraux carbonatés primaires ;
- le schéma proposé pour l'acquisition des teneurs en bicarbonates dissous (3.3.4.1) ;
- la sous-saturation des eaux par rapport à la calcite et à la dolomite qui rend impossible la précipitation de minéraux carbonatés secondaires (Fig. 59, point 3.3.4.4.).

Dans ce cas, la datation des eaux par le carbone-14 est réalisée par simple application de la décroissance radioactive, à partir d'une teneur initiale de 100 pmC (en vérifiant que les "âges" obtenus sont bien largement antérieurs à la période de production anthropogénique de ^{14}C dans l'atmosphère par les essais nucléaires).

3.4.1.4. Datation des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien par le carbone-14 (^{14}C)

Le caractère silicaté du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden dans la région de Tahoua et l'origine uniquement biogénique du CITD permet donc de calculer le temps de séjour des eaux de ce système aquifère sans correction des activités mesurées.

Les âges bruts ainsi calculés (Annexe 15) varient de 4 700 à 35 800 ans B.P. à l'échelle du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien : de 4 700 à 30 200 ans B.P, pour les eaux du CH, de 6 600 à 13 600 ans B.P, pour les eaux du CI libre et enfin de 13 600 à 35 800 ans B.P. pour celles du CI captif. Pour les âges calibrés, sur l'ensemble du système aquifère du CI/H, ils varient de $5\,400 \pm 50$ à $40\,700 \pm 800$ ans Cal B.P.

La figure 73 montre la répartition des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien en fonction de leurs âges. Le fait que tous les âges soient supérieurs à environ 5 000 ans B.P, même dans la partie libre du système, indique de faible taux de renouvellement.

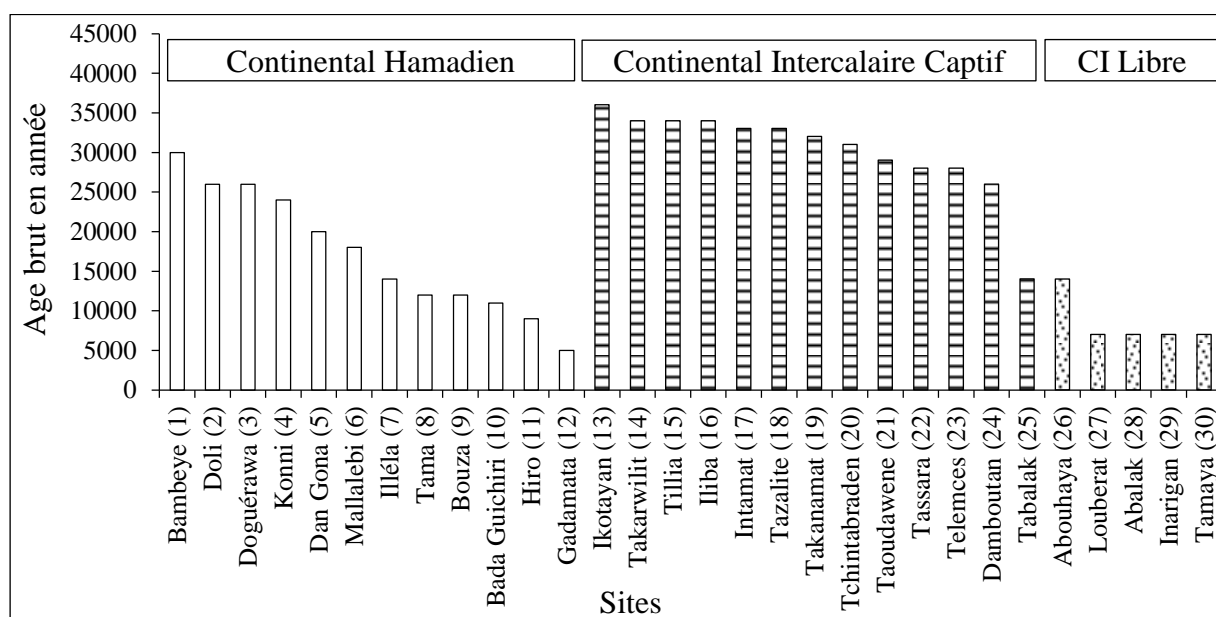


Figure 73 : Age brut des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

La répartition spatiale des temps de séjour, présentée sur la figure 74, montre une très bonne superposition à la piézométrie. La variation de couleur du rouge au bleu indique l'augmentation des temps de séjour des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, de façon conforme avec les principaux sens d'écoulement des eaux dans la région.

La carte montre un caractère plus récent des eaux de la partie sud de la région (CH) par rapport à celles de la partie nord (CI), qui est à mettre en relation avec la nature lithologique des réservoirs. En effet, le Continental Intercalaire présente des paramètres hydrodynamiques médiocres comparativement à ceux du Continental Hamadien. Ses perméabilités et transmissivités plus faibles conduisent à des vitesses d'écoulement horizontal moindre que dans le Continental Hamadien.

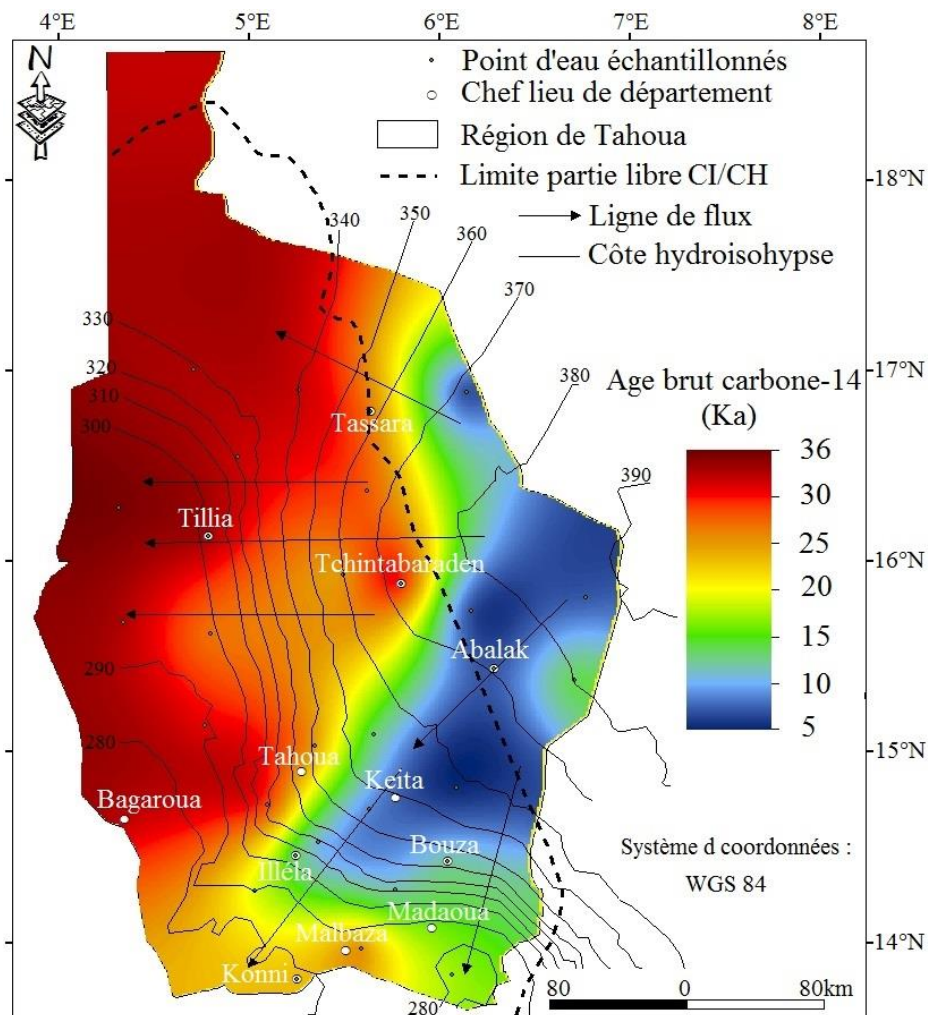


Figure 74 : Distribution spatiale des âges bruts des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua) et directions des flux des eaux souterraines

3.4.1.5. Relation entre âges bruts et TAC

La relation entre les âges calculés sur la base des teneurs en ^{14}C et le TAC (Fig. 75) met en évidence le contrôle du TAC par le temps de séjour des eaux souterraines dans le système aquifère de la zone d'étude. Deux pentes de relations linéaires sont indiquées sur la figure, l'une pour le Continental Hamadien, et l'autre, plus faible, pour le Continental Intercalaire captif. Ceci pourrait traduire une intensité différente de l'hydrolyse des silicates dans les eaux (calciques) du Continental Hamadien et dans les eaux (sodiques) du Continental Intercalaire. Alternativement, il est possible d'envisager une seule relation, de type logarithmique, qui engloberait l'ensemble des points.

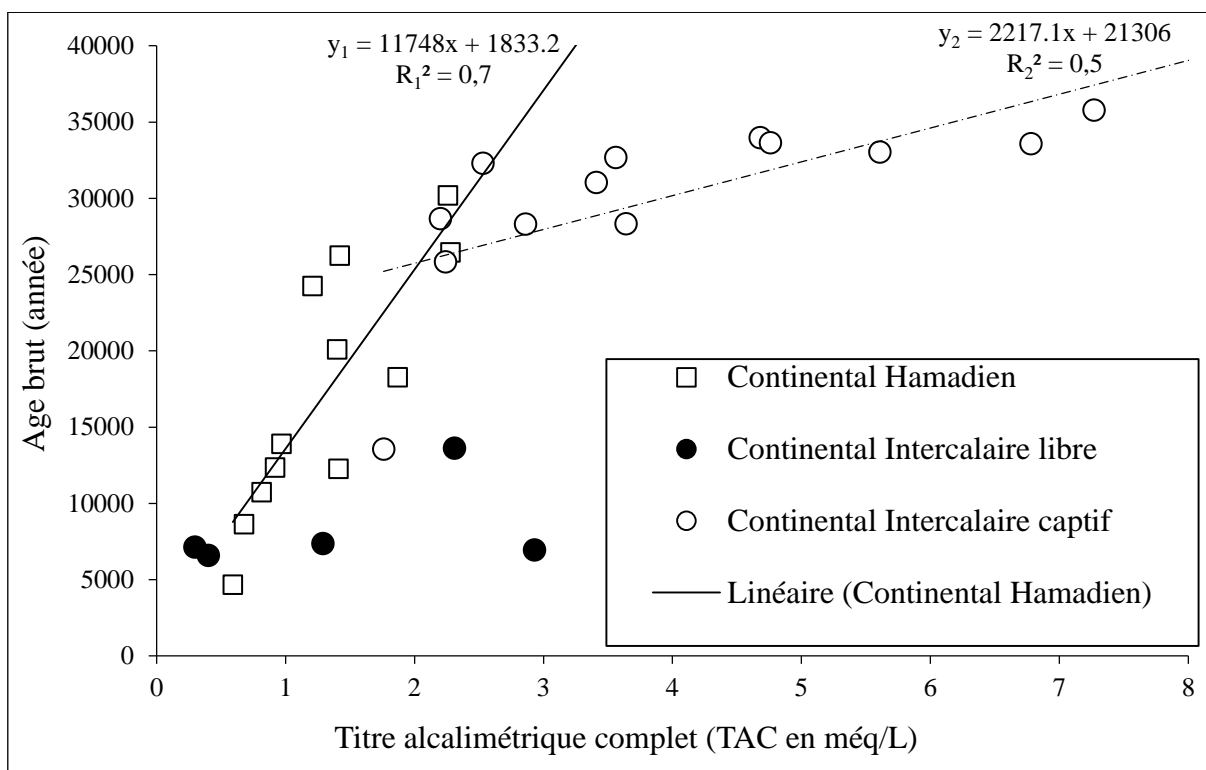


Figure 75 : Relation entre les âges bruts et le TAC des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

3.4.1.6. Comparaison entre les vitesses déduites des teneurs en ^{14}C et celles déduites de la loi de Darcy

Il est tentant, lorsque l'on dispose d'"âges" des eaux souterraines, calculés ici à partir des teneurs en ^{14}C , de déterminer des vitesses d'écoulement apparentes et de les comparer à celles qui peuvent être calculées à partir de la loi de Darcy.

L'exercice a ses limites puisque la loi de Darcy fait intervenir des différences de charge hydraulique (de pression) dans des conditions correspondant à la répartition mesurable, donc actuelle, des charges alors que le transfert du traceur naturel ^{14}C , correspond à un transfert "véritable" de l'eau qui porte le CITD, et qui intègre donc tous les régimes transitoires passés. En outre, l'"âge ^{14}C " ne correspond qu'à la moyenne de la distribution des temps de résidence, sans qu'il soit possible de reconstituer cette distribution.

En gardant en mémoire ces limites, nous avons procédé à la comparaison, dont les résultats figurent dans le tableau 17 et le tableau 18.

Pour l'aquifère du Continental Hamadien, les données hydrodynamiques, relativement nombreuses et précises, permettent de calculer une demi-douzaine de vitesses à partir de la loi de Darcy. Ces vitesses varient entre 13 et 42 m/an, avec une moyenne de 29 m/an. Huit vitesses ont été déterminées à partir des "âges" ^{14}C , comprises entre 5 et 17 m/an, avec une moyenne de 10 m/an. L'ordre de grandeur est identique entre les deux estimations mais les "vitesses Darcy" sont en moyenne supérieures d'un facteur 3 aux "vitesses ^{14}C ". En plus des limites signalées ci-dessus, et en particulier celle concernant la distribution du traceur ^{14}C , qui pourrait conduire à une minoration des "vitesses ^{14}C ", une explication possible de ce décalage réside dans une éventuelle surestimation des perméabilités utilisées dans les "vitesses Darcy". En effet, les transmissivités, qui permettent le calcul des perméabilités, sont mesurées après le développement des forages, une suite d'opérations qui vise à optimiser les volumes d'eau captés et qui augmente donc probablement la perméabilité aux abords des forages par rapport à la perméabilité moyenne de la formation à plus grande échelle.

Pour l'aquifère du Continental Intercalaire, les données hydrodynamiques sont moins nombreuses et ne permettent de calculer avec une fiabilité raisonnable que deux vitesses, cohérentes entre elles : 6 et 8 m/an. Ces vitesses sont proches de celles calculées à partir des teneurs en ^{14}C : de 3 à 7 m/an, avec une moyenne de 5 m/an. Cette meilleure convergence entre les deux types de vitesses dans l'aquifère du Continental Intercalaire pourrait être liée à une moindre efficacité du développement des forages dans cet aquifère de lithologie grésio-argileuse (alors que le Continental Hamadien est purement gréseux).

Tableau 14 : vitesses d'écoulement déduites à partir de la loi de Darcy

Sites	Réservoir	K (m/s)	Gradient hydraulique i	Porosité	Vitesse Darcy	Vitesse Darcy (m/an)	Vitesse Darcy moyenne
Gadamata	CH	3.27E-04	4.88E-04	1.5E-01	1.07E-06	34	29
Bouza							
Badaguichiri		4.80E-04	3.33E-04	1.5E-01	1.07E-06	34	
Illéla							
Illéla		2.80E-04	5.81E-04	1.5E-01	1.08E-06	34	
Dangona							
Badaguichiri		4.00E-04	5.00E-04	1.5E-01	1.33E-06	42	
Dangona							
Ibohamane		2.10E-04	2.94E-04	1.5E-01	4.12E-07	13	
Keita							
Loudou		1.14E-04	6.80E-04	1.5E-01	5.18E-07	16	
Keita							
Telemces	CI	3.27E-04	8.70E-05	1.5E-01	1.90E-07	6	7
Takarwilit							
Tassara		3.10E-04	1.25E-04	1.5E-01	2.59E-07	8	
Telemces							

Tableau 15 : vitesses d'écoulement déduites des teneurs en ^{14}C

Continental Hamadien				Continental Intercalaire			
Sites	Age 14C	D (m)	V_14C (m/an)	Sites	Age 14C	D (m)	V_14C (m/an)
Hiro	8629	80000	7	Tabalak	13565	96000	5
Dan Gona	20082			Takanamat	32298		
Hiro	8629	35000	17	Inarigan	6956	196000	7
Bada Guichiri	10723			Takarwilit	33980		
Hiro	8629	50000	10	Louberat	7360	94000	4
Illéla	13882			Tazalite	32677		
Gadamata	4657	44000	6	Louberat	7360	55000	3
Bouza	12265			Tassara	28326		
Bada Guichiri	10723	46000	5	Vitesse moyenne (14C)			5
Dan Gona	20082						
Bouza	12265	66000	11				
Mallalebi	18254						
Bouza	12265	110000	9				
Konni	24236						
Gadamata	4657	51000	13				
Hiro	8629						
Vitesse moyenne (14C)			10				

3.4.2. Isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$)

3.4.2.1. Pluies du Niger et de la sous-région

Dans le cadre de cette étude, aucune mesure des teneurs en isotopes stables des précipitations n'a été effectuée. Elle fait donc appel aux données de la station de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), basée à Niamey (IRD), qui dispose d'une chronique à l'échelle mensuelle, longue de 15 ans, mais non continue : de 1992 à 1999 excepté 1996, et de 2009 à 2016. Ces données mensuelles varient entre $-8,4\text{‰}$ et $3,41\text{‰}$ vs V-SMOW, avec une moyenne de $-2,43\text{‰}$, une médiane de $-2,42\text{‰}$, et un écart-type de $2,59\text{‰}$ pour l'oxygène-18 et entre -59‰ et $28,75\text{‰}$ vs V-SMOW, avec une moyenne de $-12,65\text{‰}$, une médiane de $-9,5\text{‰}$, et un écart-type de $18,81\text{‰}$ pour le deutérium.

La relation entre les teneurs brutes en ^2H vs ^{18}O permet d'établir une Droite Locale des Eaux Météoriques "brute" (DML_1) à Niamey (Fig. 76) :

$$\delta^2\text{H} = 6.997 \delta^{18}\text{O} + 4.3737 \quad (37)$$

La pente obtenue pour cette droite des eaux météoriques locale (DML_1) pour Niamey plus faible que celle de la Droite des Eaux Météoriques Mondiale (DMM) de Craig (1961), montre une reprise évaporatoire sensible de la majorité des précipitations dans la zone.

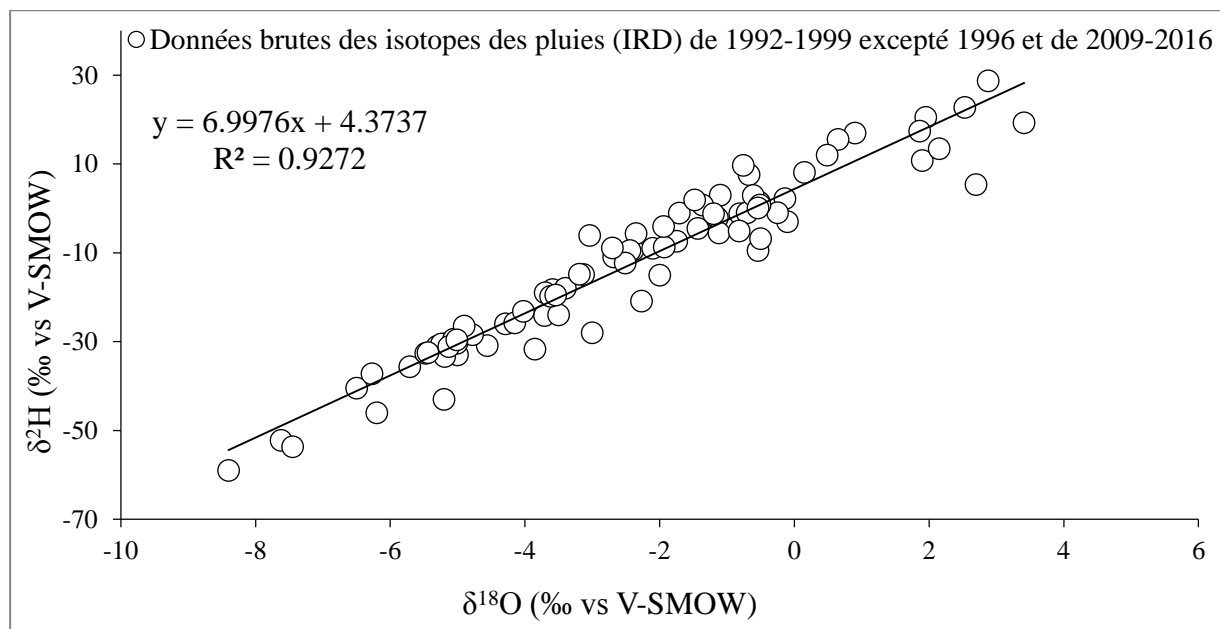


Figure 76 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ mensuelles dans les précipitations collectées à Niamey (station AIEA-IRD), période de 1992 à 1999 excepté 1996 et de 2009 à 2016 (Source :

http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_isohis.html)

Cette droite des eaux météoriques locale DML₁, a une pente et une ordonnée à l'origine voisines de celles déjà établies par les études antérieures pour les précipitations de Niamey et dans d'autres régions du Niger au cours de ces dernières années. Elle est également similaire à celles établies pour les stations AIEA dans la sous-région (Fig. 77) :

Gaultier, 2004 : $\delta^2\text{H} = 6,9 (\pm 0,7) \delta^{18}\text{O} + 0,83 (\pm 2,4)$	(Région de Diffa - Niger)
Guero, 2003 : $\delta^2\text{H} = 7,1 \delta^{18}\text{O} + 5,8$	(Région de Dosso - Niger)
Ousmane, 1988 : $\delta^2\text{H} = 6,6 \delta^{18}\text{O} + 7,5$	(Niamey Université - 1982)
Cette étude : $\delta^2\text{H} = 6,38 \delta^{18}\text{O} + 0,11 ; r^2=0,81 (n=4)$	(Dakar)
Cette étude : $\delta^2\text{H} = 6,39 \delta^{18}\text{O} + 0,89 ; r^2=0,95 (n=25)$	(Bamako)
Cette étude : $\delta^2\text{H} = 7,75 \delta^{18}\text{O} + 10,75 ; r^2=0,97 (n=5)$	(Ouagadougou)
Cette étude : $\delta^2\text{H} = 7,08 \delta^{18}\text{O} + 4,38 ; r^2=0,90 (n=8)$	(Kano)
Cette étude : $\delta^2\text{H} = 6,36 \delta^{18}\text{O} + 4,5 ; r^2=0,95 (n=15)$	(N'Djaména)

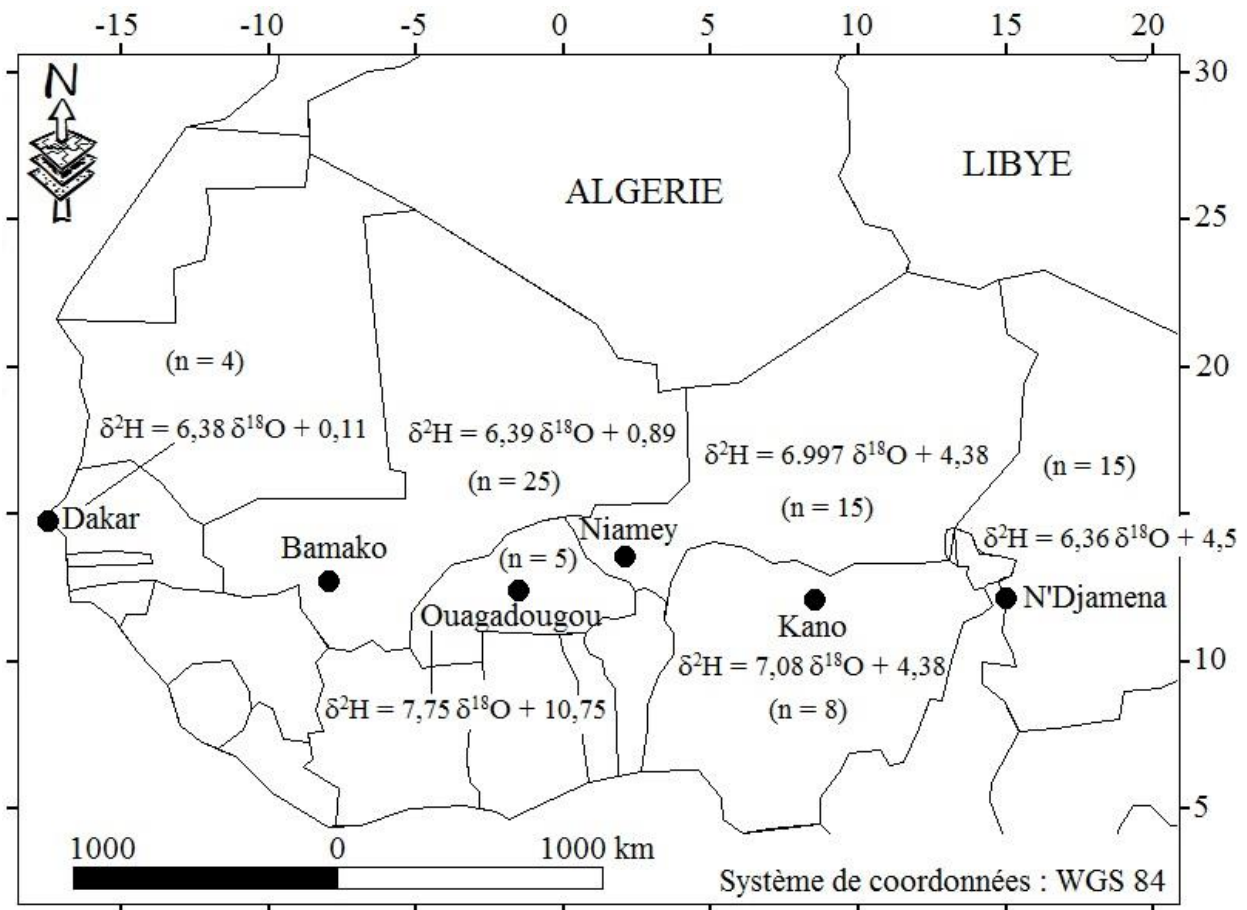


Figure 77 : Droites des eaux météoriques pour quelques stations AIEA de la sous-région

Les teneurs isotopiques moyennes annuelles pondérées des précipitations des années de 1992 à 1999, excepté 1996 (ORSTOM) et de 2009 à 2016 (IRD) (Annexe 16), varient entre -5,81‰ et -2,31‰ vs V-SMOW, avec une moyenne de -3,96‰, une médiane de -3,95‰, et un écart-type de 1,02‰ pour ^{18}O . Pour le deutérium, elles sont comprises entre -37,95‰ et -9,43‰ vs V-SMOW, avec une moyenne de -23,59‰, une médiane de -21,79‰, et un écart-type de 8,62‰ pour la même période. Les teneurs moyennes pondérées (-4,0 ‰ et -23,6 ‰) s'inscrivent dans l'intervalle obtenu par différentes autres études au Niger (Tableau 19). Elles sont en particulier très proches des valeurs obtenues par Taupin et al. (2002), par Tremoy et al. (2012) et par Abdou Babaye (2012).

Ces teneurs moyennes pondérées sont également voisines de celles qui peuvent être mesurées (Tableau 20) pour les stations de Bamako (Mali), de Dakar (Sénégal), de Kano (Nigéria), de N'Djaména (Tchad).

Tableau 16 : Teneurs isotopiques moyennes annuelles pondérées des précipitations (Niger)

Etudes sur le Niger	Ousmane (1988)	Taupin et al (1989)	Taupin (1990)	Taupin et al (1997; 2002)	Favreau (2000)	Guero (2003)	Gaultier (2000)	Gaultier (2004)	Tremoy et al (2012)	Abdou Babaye (2012)
$\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs V-SMOW)	-2,9	-4,4	-5,5	-4,2	-4,3	-4,6	-4,5	-2,9	-4,1	-4,1
$\delta^2\text{H}$ (‰ vs V-SMOW)	-13,8*	-36	-31	-25	-27	-27,1	-27,3	-24	-22,75	-24,2

* année déficitaire et chronique incomplète

Tableau 17 : Teneurs isotopiques moyennes annuelles des précipitations pondérées par hauteur d'eau de la bande sahélienne de l'Afrique de l'Ouest (Mali, Nigéria et Tchad)

AIEA/OMM (bande sahélienne)	Bamako (Mali)	Kano (Nigéria)	N'Djaména (Tchad)	Bamako (Mali)	Kano (Nigéria)	N'Djaména (Tchad)
Année	1993			1998		
$\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs V-SMOW)	-4,39	-3,79	-4,09	-4,3	-4,3	-4
$\delta^2\text{H}$ (‰ vs V-SMOW)	-30,5	-27	-22,1	-30	-26	-22

Les relations entre les hauteurs des précipitations et leurs teneurs isotopiques collectées sur le site de l'AIEA (Fig. 78), montre un net enrichissement en isotopes lourds dans les précipitations de début (avril-mai) et fin (octobre) de saison des pluies.

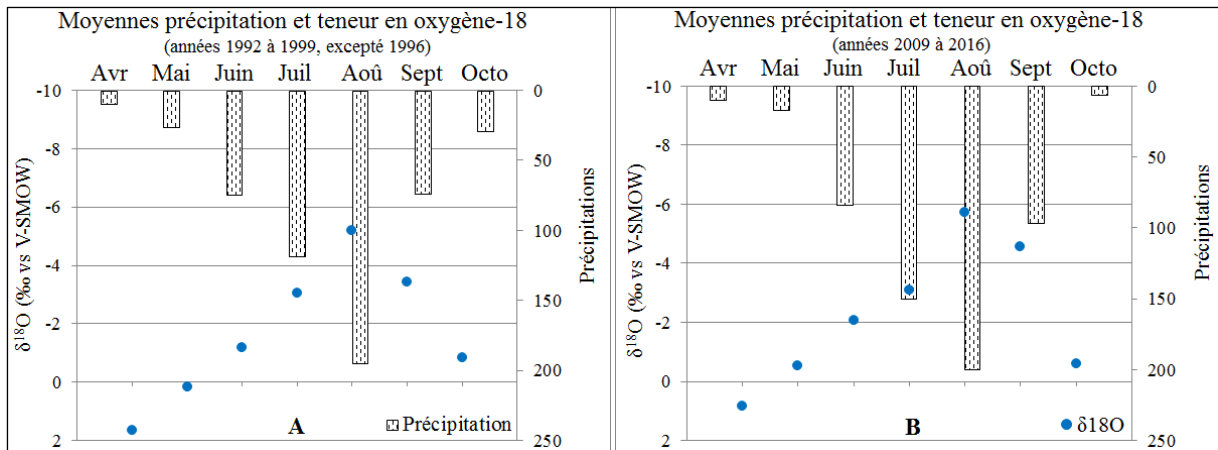


Figure 78 : Relation entre hauteurs et teneurs isotopiques des précipitations de Niamey (AIEA)

A Niamey en particulier et au Niger en général, plus de 90% des précipitations annuelles tombent entre le mois de juin et celui de septembre (Fig. 78-A et 78-B). Ces mois correspondent à la période potentielle de recharge des nappes. C'est pourquoi une deuxième droite des eaux météoriques (DML_2) a été établie, où seules les données des mois de juin à septembre sont considérées (Fig. 79). C'est cette droite, plus réaliste en ce qui concerne la recharge, qui sera comparée aux teneurs en isotopes lourds dans les eaux souterraines.

Cette droite météorique (DML_2) a pour équation (Fig. 79) :

$$\delta^2H = 7,43 \delta^{18}O + 5,95 \quad (38)$$

$$R^2=0,92$$

La pente est supérieure à celle de la première droite établie (DML_1) puisque les précipitations des mois les moins pluvieux, qui sont les plus reprises par l'évaporation, n'ont pas été prises en compte.

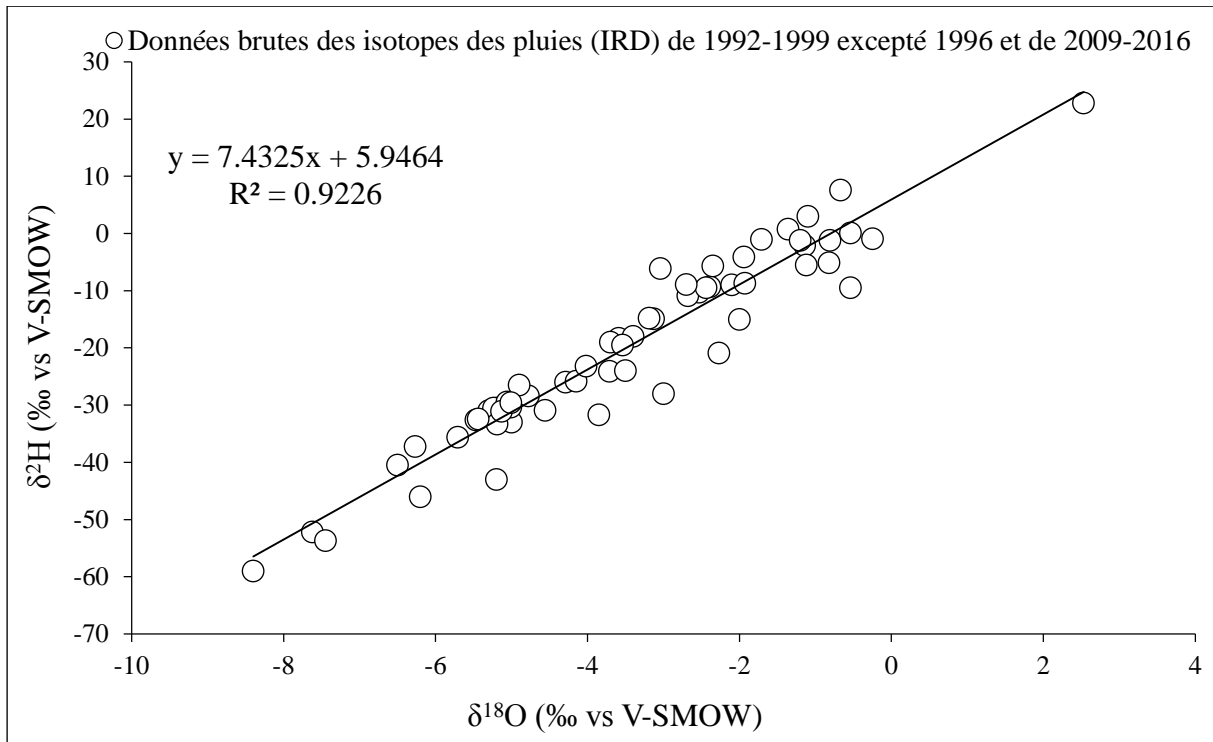


Figure 79 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ dans les pluies des mois de juin à septembre (IRD, Niamey), période de 1992 à 1999 excepté 1996 et la période de 2009 à 2016

3.4.2.2. Eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

3.4.2.2.1. Teneurs en isotopes stables des eaux souterraines du Continental Hamadien

L'analyse isotopique des échantillons d'eau de la nappe du CH du bassin des Iullemeden dans la région de Tahoua a montré des teneurs qui varient entre $-51,60\text{‰}$ et $-30,39\text{‰}$ vs V-SMOW avec une moyenne de $-46,58\text{‰}$ et une médiane de $-48,35\text{‰}$ ($n=17$) pour ^2H . Pour ^{18}O , ces teneurs sont comprises entre $-6,76\text{‰}$ et $-4,40\text{‰}$ vs V-SMOW avec une moyenne de $-6,11\text{‰}$ et une médiane de $-6,21\text{‰}$ (Annexe 17).

Elles permettent de définir une droite d'équation (Fig. 80) :

$$\delta^2\text{H} = 8,2 \delta^{18}\text{O} + 3,56 \quad (39)$$

$$R^2 = 0,91$$

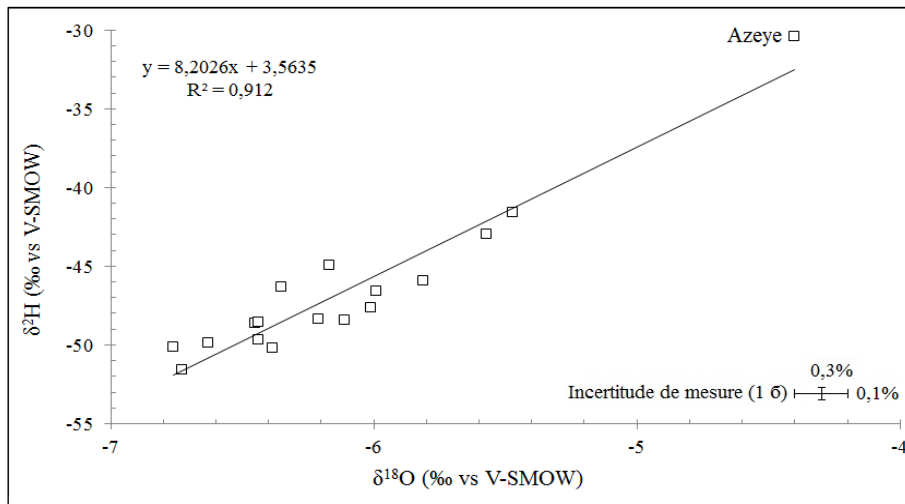


Figure 80 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux du Continental Hamadien de la région de Tahoua

3.4.2.2.2. Teneurs en isotopes stables des eaux souterraines du Continental Intercalaire

Ces eaux présentent des teneurs qui varient entre -59,30‰ et -47,68‰ vs V-SMOW (n=26) avec une moyenne de -55,29‰ et une médiane de -56,23‰ pour le deutérium, et des teneurs en ^{18}O variant de -8,11‰ à -6,49‰ vs V-SMOW, avec une moyenne de -7,58‰ et une médiane de -7,70‰ (Annexe 17). Elles permettent de définir une droite d'équation (Fig. 81) :

$$\delta^2\text{H} = 5,2 \delta^{18}\text{O} - 16,2. \quad (40)$$

$$R^2 = 0,67$$

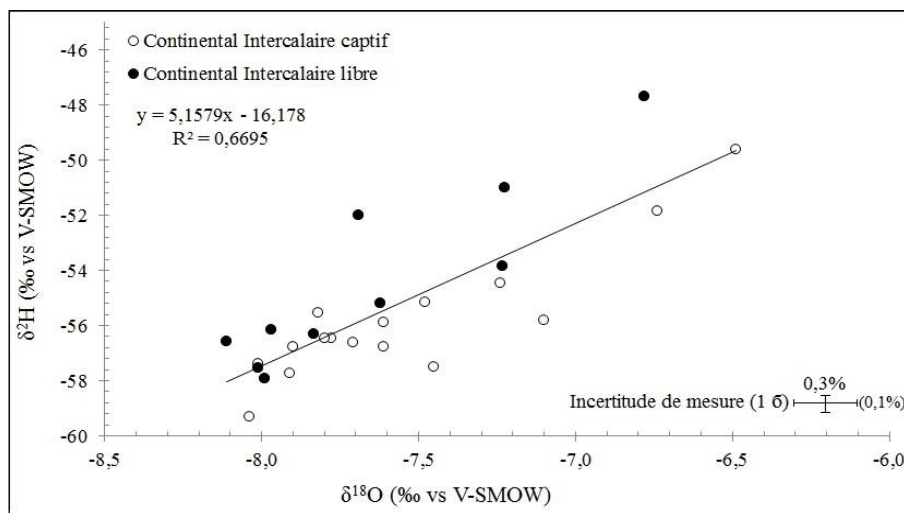


Figure 81 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux du Continental Intercalaire de la région de Tahoua

3.4.2.3. Comparaison entre la composition isotopique des eaux souterraines du Continental Intercalaire/Hamadien et celle des précipitations.

Sur un diagramme $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ (Fig. 82), l'ensemble des données a été regroupé :

- concernant les précipitations : droite mondiale des eaux météoriques (Craig, 1961), droite locale pendant la période de recharge potentielle (DML₂, cette étude), teneurs moyenne pondérées des précipitations pour Niamey (cette étude) et pour des régions proches de la zone d'étude, Dosso (Guero, 2003) et Diffa (Gaultier, 2000) ;
- concernant les eaux souterraines : les résultats obtenus pour les eaux du Continental Hamadien et du Continental Intercalaire libre et captif (cette étude) et les droites correspondantes, sur quelques échantillons du Continental Hamadien à Dosso (à l'Ouest de la zone d'étude; Guero 2003) et sur un forage (F₂, SEEN) dans le Continental Hamadien à Maradi (à l'Est de la zone d'étude, base de donnée SAI, 2005).

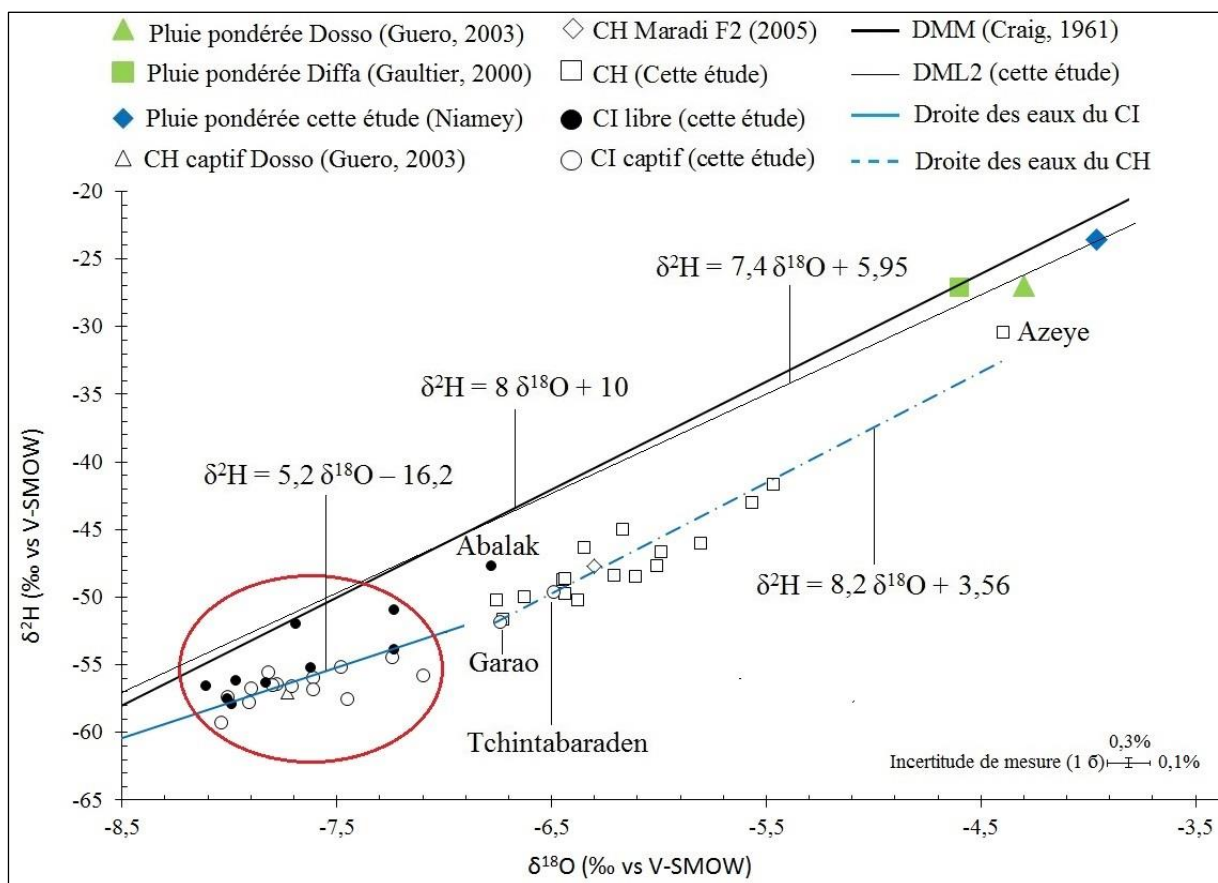


Figure 82 : Relation entre $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ dans les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua) et les précipitations au Niger

Une première constatation s'impose : toutes les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien sont situées en dessous des droites météoriques, mondiale et locale, avec donc des excès en deutérium ($d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$) inférieurs à 10, et ces eaux sont très appauvries en isotopes lourds par rapport aux précipitations actuelles (à l'exception de l'échantillon prélevé à Azeye, sur lequel nous reviendrons). Ces caractéristiques témoignent d'une recharge très majoritairement ancienne, sous des climats plus frais et probablement plus humides que le climat actuel (effet paléoclimatique). Les faibles teneurs en isotopes lourds sont liées à la température de condensation et à l'effet de masse. La cause des faibles excès en deutérium reste discutée, mais cette caractéristique se retrouve dans l'immense majorité des eaux "fossiles" du Sahel, du Sahara et même du Maghreb : voir la synthèse réalisée par Griès (2000) et les références qu'elle contient. Ce caractère ancien des eaux souterraines du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua est totalement cohérent avec les "âges" qui ont été déterminés à partir des teneurs en ^{14}C (point **3.4.2.4.**) : environ 5 à 30 ka pour les 12 échantillons analysés du Continental Hamadien et environ 8 à 36 ka pour les 18 échantillons analysés du Continental Intercalaire. Les analyses ^{14}C n'ont concerné que les échantillons de la première campagne alors que les analyses d'isotopes stables de l'eau ont été réalisées sur tous les échantillons.

Une des périodes de recharge potentielle est celle de la "période humide africaine" qui suit la dernière déglaciation. Son extension est variable selon les auteurs, les proxies utilisés et les localisations. Il semble toutefois que la transition aride-humide, abrupte, intervienne vers 15 ka BP et que le retour à des conditions arides, abrupt également, soit enregistré vers 5-4 ka BP (Gasse, 2000, deMenocal et al., 2000), avec dans l'intervalle une alternance de phases plus ou moins humides ("Sahara vert", débutant vers 11 ka, deMenocal et Tierney, 2012), ou sèches (correspondant au Younger Dryas, 12,9 à 11,6 ka, et épisodes secs de 8,4 à 8 et de 4,2 à 4 ka BP, Gasse, 2000).

Avant le dernier maximum glaciaire, la chronologie des phases humides du Pléistocène supérieur est beaucoup plus incertaine. La plus récente correspondrait à une période de 38 à 28 ka, selon une étude sur les teneurs en deutérium et carbone-13 des n-alkanes des plantes terrestres collectées dans une carotte marine à l'embouchure du fleuve Sénégal (Niedermeyer et al., 2010). Elle est en coïncidence, approximativement, avec la période humide de 40 à 30 ka (pouvant se prolonger jusqu'à environ 20 ka) identifiée au Sahel par Alimen (1987) à partir des industries préhistoriques (Atérien).

Cette phase pourrait aussi correspondre à la période de recharge des eaux les plus anciennes (environ 25 à 40 ka) prélevées par Beyerle et al. (2003) dans le Continental Terminal

(CT_2/CT_1 et CT_1) au Sud-Ouest du Niger, et peut-être même à celle (environ 24 à 18 ka) des eaux des aquifères confinés du Nord-Est du Nigéria (Edmunds et al., 1999). Dans ces deux derniers cas, des températures de recharge inférieures d'environ 6°C aux températures actuelles ont été déterminées à partir des teneurs en gaz rares dissous.

En définitive, l'existence d'une phase humide à l'Holocène (environ 15 à 5 ou 4 ka BP) est certaine, entrecoupée de périodes plus sèches, et celle d'une phase humide au Pléistocène supérieur (d'environ 40 à 30, ou même 20 ka BP) est très probable. D'autres phases humides antérieures ont évidemment existé, mais les âges carbone-14 évalués pour les eaux du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (environ 5 à 36 ka BP, 5 à 41 ka Cal B.P.) pourraient correspondre à des recharges privilégiées au cours de ces deux phases humides les plus récentes.

Le second point notable à propos de la distribution des teneurs en isotopes stables sur la figure 82 est que les eaux du Continental Intercalaire sont significativement plus pauvres en isotopes lourds que les eaux du Continental Hamadien. La paléorecharge de ces aquifères devait donc être plus "froide" au Nord qu'au Sud. Ceci pourrait être expliqué par la différence d'altitude des bassins versants d'alimentation lors de cette paléorecharge. En effet, sur la figure 83, la partie libre de l'aquifère du Continental Intercalaire peut essentiellement être alimentée, outre par les précipitations locales, par des infiltrations d'eaux de surface du réseau de l'Azaouak. Actuellement, ce réseau de surface ne coule qu'épisodiquement, mais lors des phases humides, il présentait un lit majeur pouvant atteindre jusqu'à 5 km de large et ses affluents collectaient et drainaient des quantités d'eau considérables à partir d'un bassin versant de plus de 420 000 km² depuis les massifs de haute altitude de l'Aïr, du Hoggar et des Adrar des Iforas, jusqu'au fleuve Niger (Durand et al., 1981, INQUA-ASEQUA, 1986). On note également, toujours dans cette partie nord, à l'époque, la présence de plusieurs mares et lacs permanents. Quant à la partie sud de la région (partie libre du Continental Hamadien), elle ne pouvait recevoir d'infiltration que des vallées drainant des eaux issues de bassins versants de plus basse altitude, principalement les vallées de la Tarka, de Goulbi N'Kaba et celle de Goulbi N'Maradi.

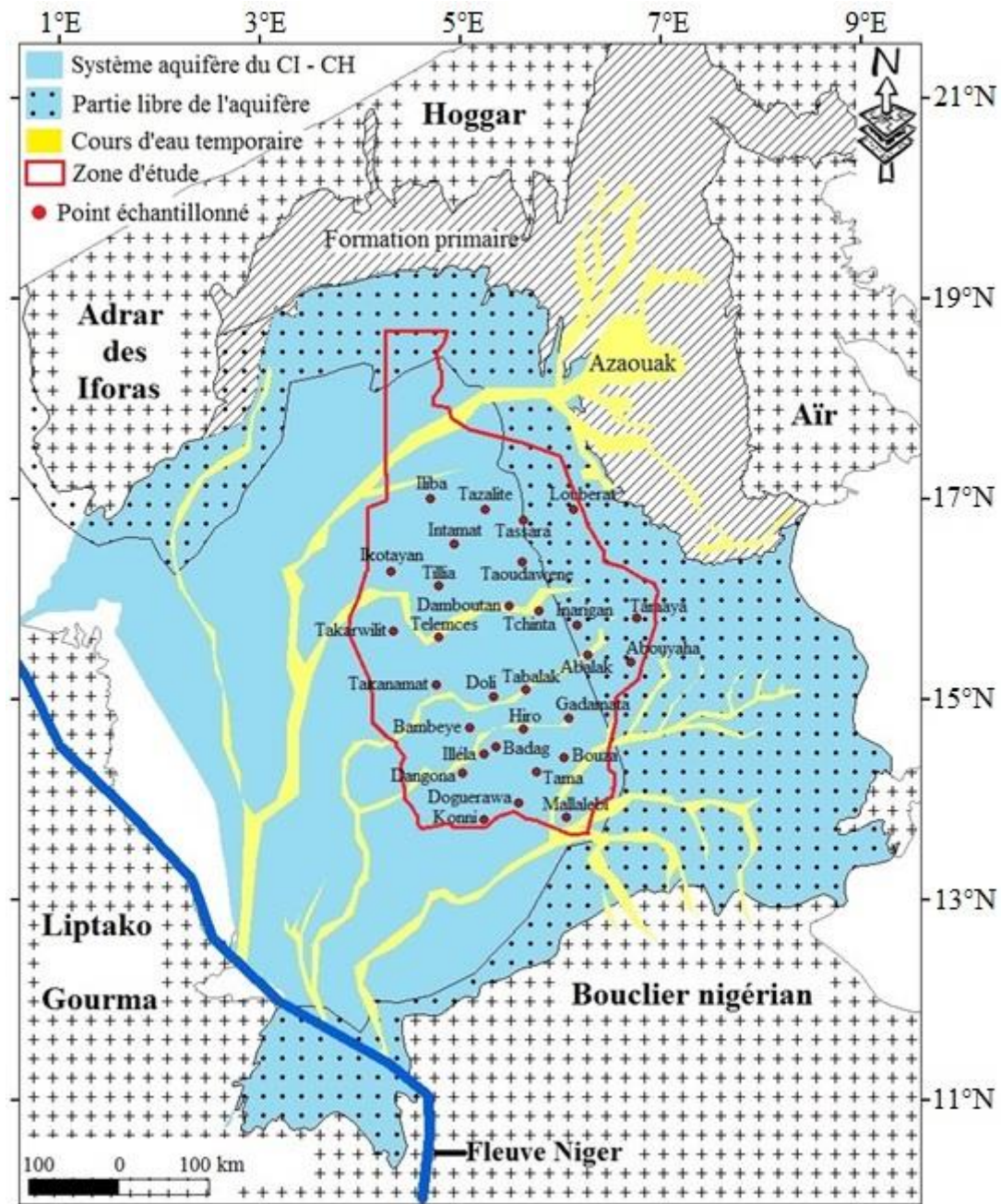


Figure 83 : Carte du bassin des Iullemeden avec les différents cours d'eau temporaires

La distribution spatiale des teneurs en oxygène-18 des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien dans la région de Tahoua est représentée sur la figure 84. Ce graphique confirme la répartition en deux groupes des eaux du système aquifère :

- Les eaux fossiles du Continental Intercalaire au Nord de la région, avec des teneurs en ^{18}O de l'ordre de -8‰ à -7‰, excepté deux forages (Garao et Tchintabaraden) qui se distinguent, avec des teneurs en ^{18}O de -6,74‰ pour Garao et de -6,55‰ pour Tchintabaraden.

Ces deux valeurs élevées par rapport à la gamme qui caractérise le Continental Intercalaire peuvent être liées d'une part aux plans d'équipement définis pour ces deux forages pour ne capter que la partie supérieure du Continental Intercalaire et éventuellement à une contribution des eaux des nappes discontinues du Crétacé moyen à supérieur présentes au dessus du Continental Intercalaire dans cette partie nord, d'autre part. Cette dernière hypothèse pourrait aussi expliquer que les eaux du forage de Tchintabaraden sont les seules à atteindre la saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite dans les eaux prélevées sur le Continental Intercalaire ;

- Au Sud, les eaux du Continental Hamadien, se présentent avec une gamme de teneurs en ^{18}O voisines de -6‰ à -5‰. Les eaux du forage d'Azeye sortent de cette gamme, avec une valeur de -4,4‰, proche de celles des précipitations actuelles, ce qui suggère la possibilité d'une recharge du Continental Hamadien dans cette zone par des précipitations récentes. Malheureusement, ce forage n'a fait l'objet d'un prélèvement que lors de la deuxième campagne et la teneur en ^{14}C de ses eaux, qui aurait pu confirmer une alimentation récente, n'a donc pas été mesurée.

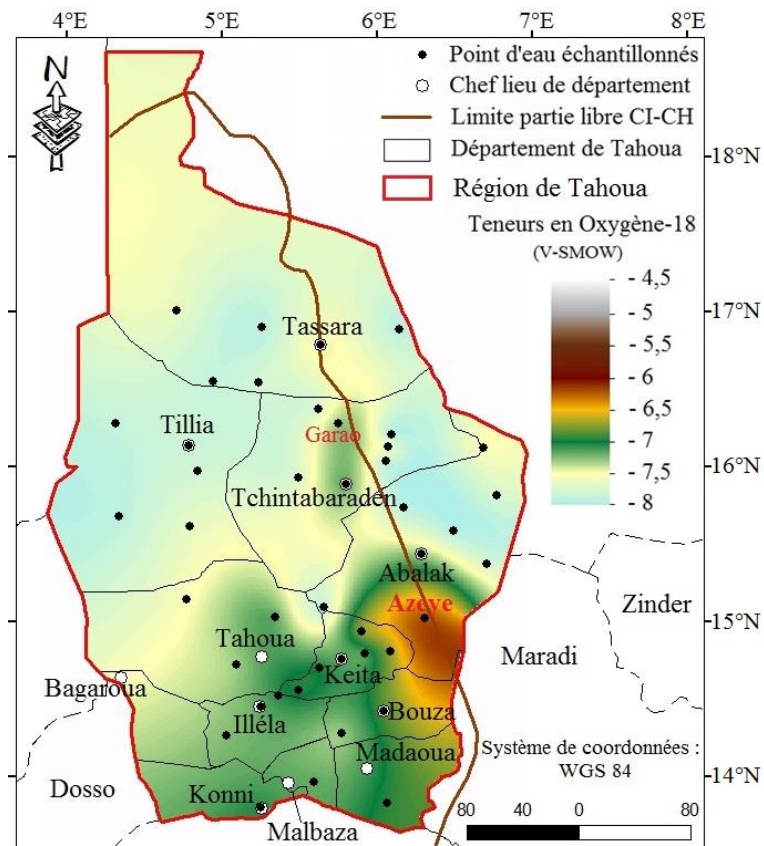


Figure 84 : Distribution spatiale des teneurs en ^{18}O des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Cette possibilité d'alimentation plus ou moins récente dans le Continental Hamadien incite à examiner plus en détail la répartition des teneurs en isotopes stables des eaux prélevées dans ce niveau aquifère.

Le diagramme $\delta^{18}\text{O}$ vs ^{14}C (Fig. 85) suggère, dans les eaux du Continental Hamadien, une diminution de la teneur en ^{18}O avec celle de l'activité ^{14}C , c'est-à-dire selon le sens d'écoulement (flèche bleue). Une telle tendance n'est pas observée pour les eaux du Continental Intercalaire, qui présentent en partie libre comme en partie captive, quelque soit leur activité ^{14}C , des teneurs en ^{18}O basses (entre -6,5 et -8,0 ‰).

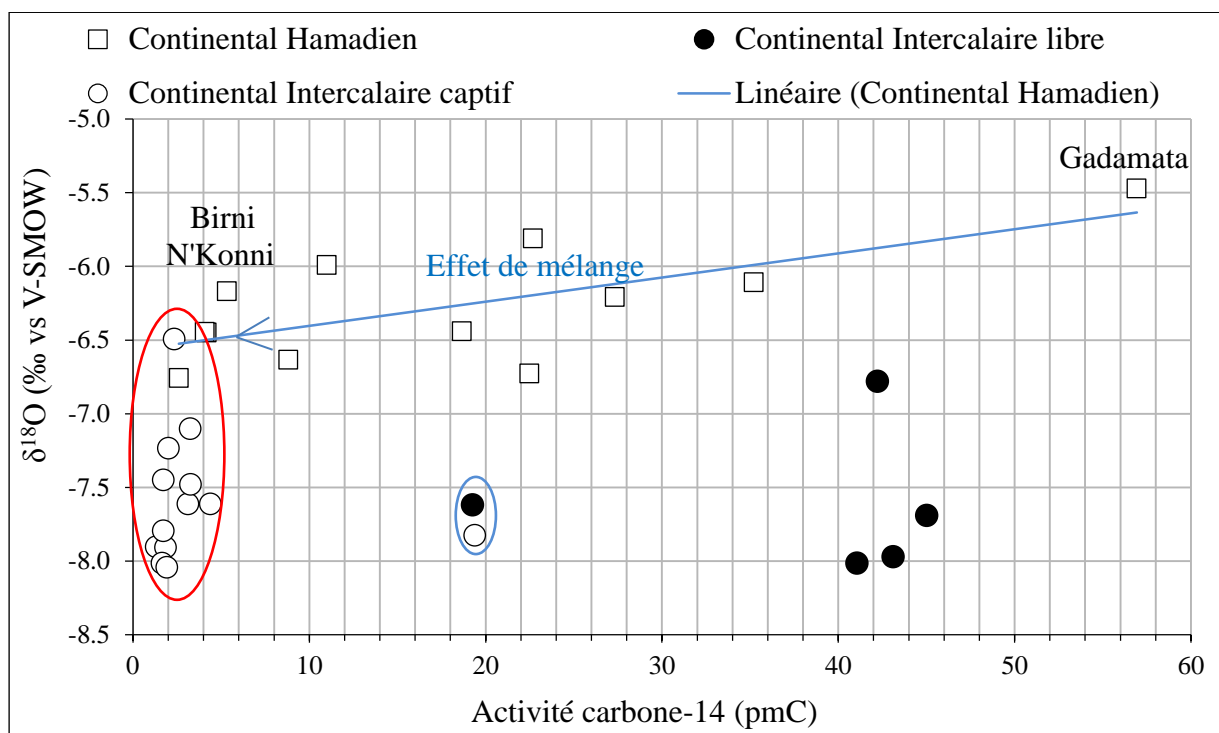


Figure 85 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et activité ^{14}C des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Les relations entre $\delta^{18}\text{O}$ des eaux et profondeur équipée des forages sont montrées sur les figures 86 (Continental Hamadien) et 87 (Continental Intercalaire).

Une tendance, largement influencée, il est vrai, par la présence du point représentatif d'Azeye, semble apparaître pour le Continental Hamadien, correspondant à une diminution de $\delta^{18}\text{O}$ lorsque la profondeur de captage augmente, alors qu'aucune tendance n'est décelée pour le Continental Intercalaire.

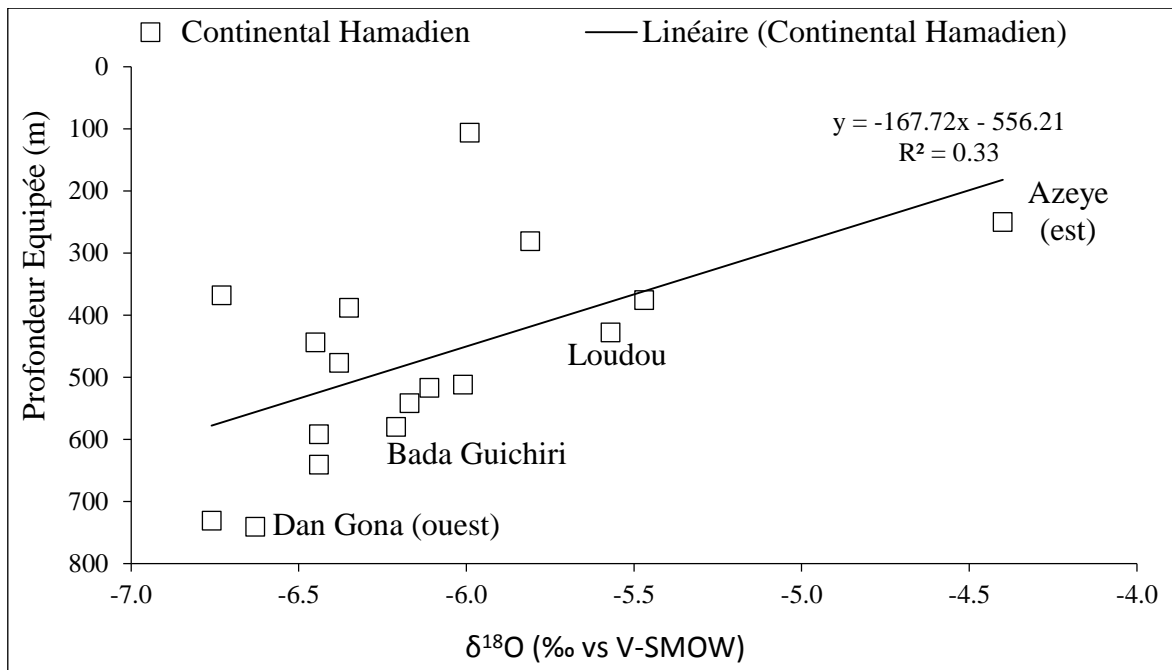


Figure 86 : Relation entre $\delta^{18}O$ vs profondeur équipée des points d'eau de l'aquifère du Continental Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

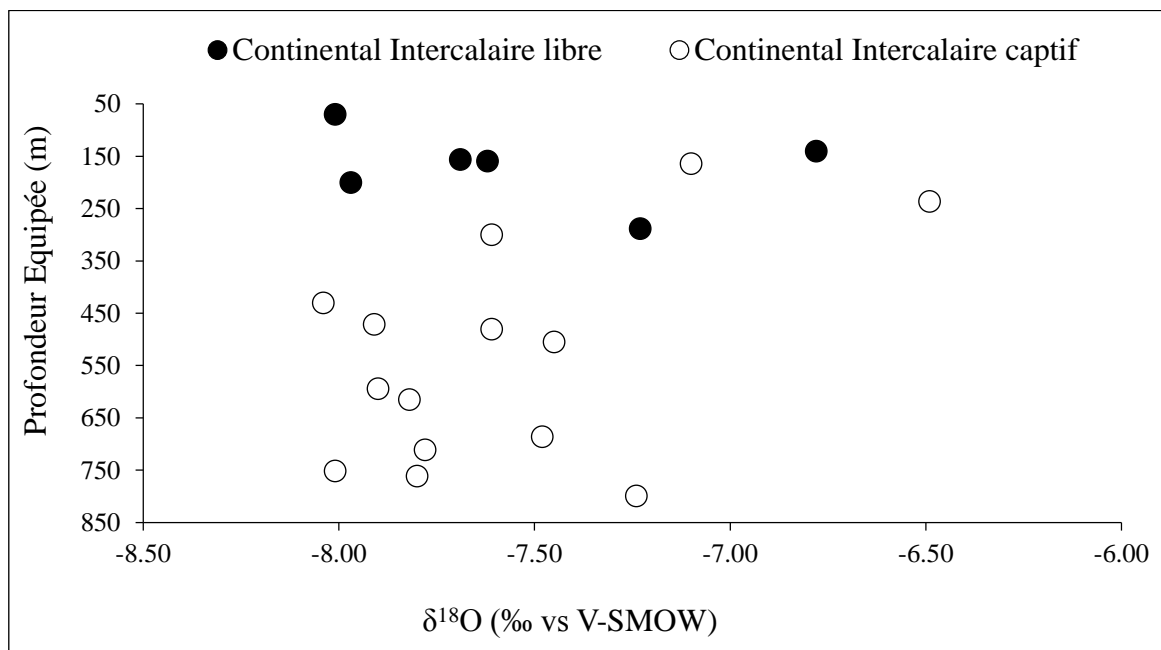


Figure 87 : Relation entre $\delta^{18}O$ vs profondeur équipée des points d'eau de l'aquifère du Continental Intercalaire du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Les relations entre $\delta^{18}O$ des eaux et distance aux zones de recharge sont illustrées par les figures 88 (Continental Hamadien) et 89 (Continental Intercalaire).

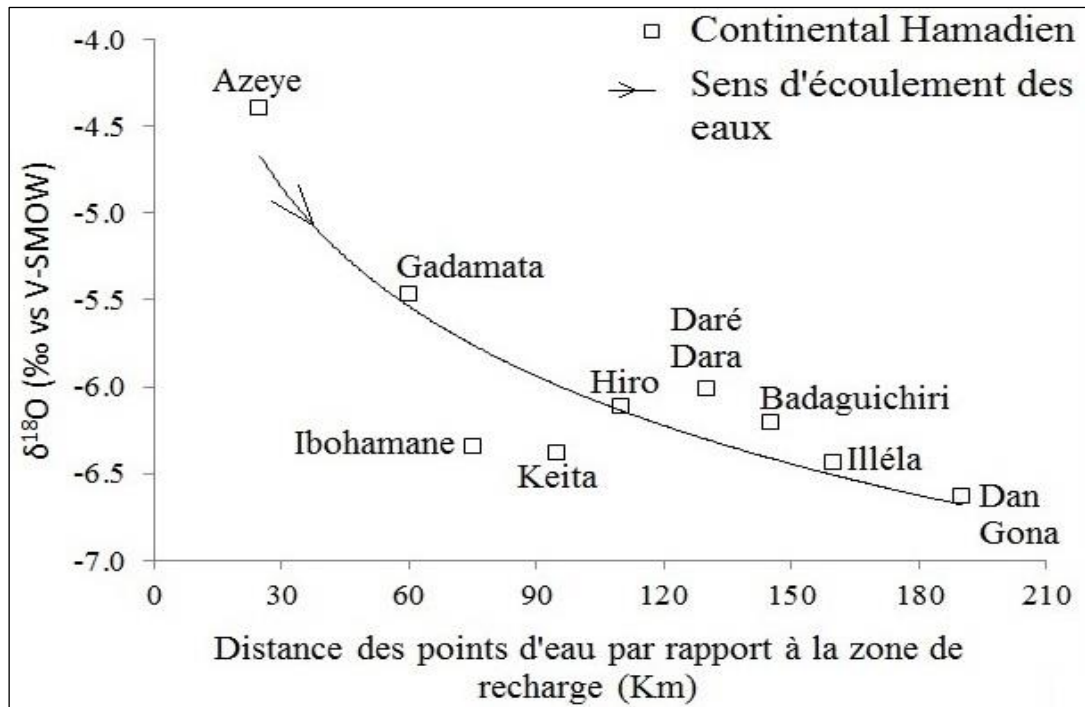


Figure 88 : Relation entre $\delta^{18}O$ vs distance des points d'eau par rapport à la zone de recharge de l'aquifère du Continental Hamadien du bassin des Iullemeden (Tahoua)

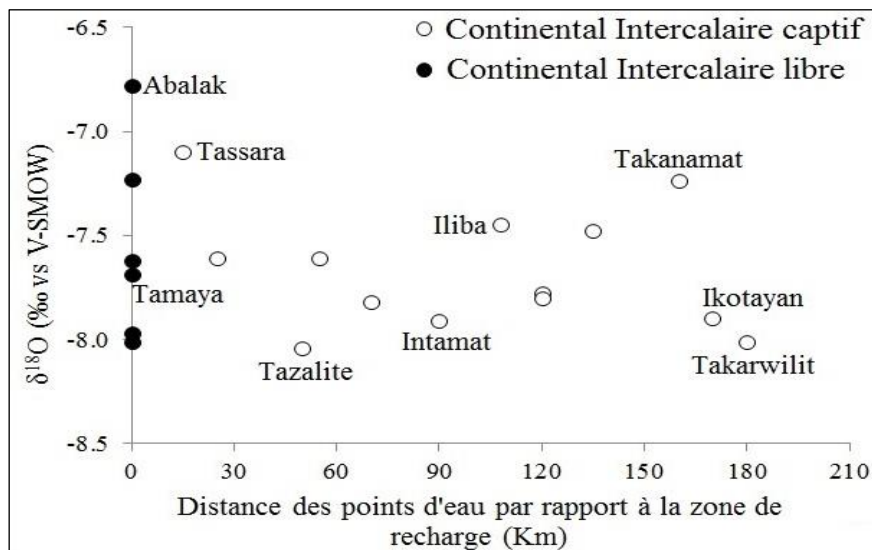


Figure 89 : Relation entre $\delta^{18}O$ vs distance des points d'eau par rapport à la zone de recharge de l'aquifère du Continental Intercalaire du bassin des Iullemeden (Tahoua)

Ici encore, une tendance apparaît pour les eaux du Continental Hamadien, qui semblent de plus en plus pauvres en isotopes lourds lorsque l'on s'éloigne de la zone de recharge, alors que cette tendance n'existe pas pour les eaux du Continental Intercalaire.

En conclusion, d'après les teneurs en isotopes stables, les eaux souterraines du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua sont essentiellement "fossiles", héritées d'une recharge sous un climat plus frais que l'actuel lors des phases humides de l'Holocène et probablement du Pléistocène supérieur. Aucune contribution d'eaux plus récentes n'est détectée dans le Continental Intercalaire, au Nord, même dans sa partie libre. En revanche, pour le Continental Hamadien, des indices de recharge plus récente sont relevés dans la partie est, la plus proche de sa zone de recharge située dans la région de Maradi, à l'Est de la zone d'étude (Fig. 84). Le plus fort de ces indices est constitué par les teneurs en isotopes lourds mesurées à Azeye, assez proches de celle des précipitations actuelles. Il est en outre possible que la droite décrite par les teneurs en isotopes lourds des eaux du Continental Intercalaire dans les diagrammes $\delta^2\text{H}$ vs $\delta^{18}\text{O}$ soit, au moins en partie, expliquée par un mélange entre recharge ancienne ("paléoclimatique") et recharge plus récente. Cette opposition entre partie nord (Continental Intercalaire) et partie sud (Continental Hamadien) de la région est cohérente avec la répartition actuelle des hauteurs de précipitations : 526,58 mm/an en moyenne au Sud (station synoptique de Birni N'Konni), contre 386,15 mm/an au Nord (station synoptique de Tahoua ville).

3.4.3. Teneurs en chlore 36

Les résultats du chlore-36 exprimés en rapport atomique $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ sont présentés dans le tableau 21 et mis en relation avec l'inverse des teneurs en Cl^- sur la figure 90.

Tableau 18 : Teneurs en ^{36}Cl des échantillons d'eau du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua.

Echantillon	Cl^- (mg/l)	$1/\text{Cl}^-$	Résultats non corrigés du Blanc			Age 14C (ka)
			$^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ (10^{-15} at/at)			
Illéla	2,26	0,44	339	±	24	13,9
Azeye	2,13	0,47	245	±	21	
Bada Guichiri	1,95	0,51	332	±	27	10,7
Gadamata	1,47	0,68	282	±	36	4,7
Hiro	1,19	0,84	311	±	31	8,6
Keita	1,12	0,89	375	±	42	
Dan Gona	5,76	0,17	296	±	13	20,1
Tamaya	1,79	0,56	283	±	27	6,6
Abalak	1,38	0,72	258	±	31	7,1
Abouhaya	6,77	0,15	312	±	11	13,6
Amataghtagh	1,01	0,99	354	±	46	

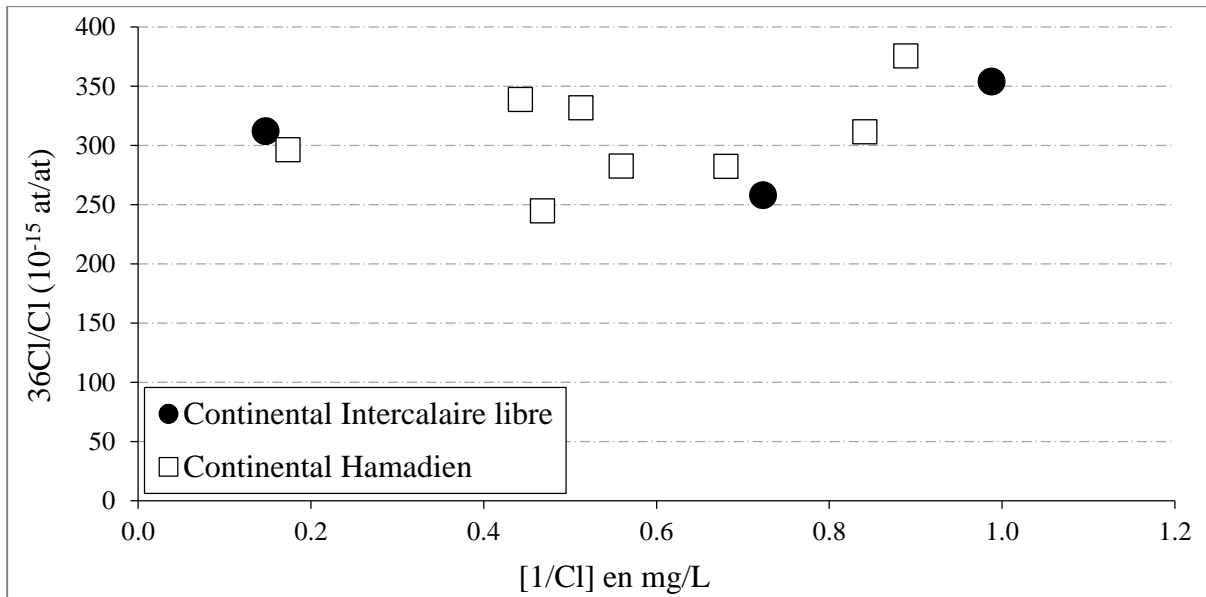


Figure 90 : Relation entre les teneurs en ^{36}Cl et l'inverse des teneurs en Cl^-

Les rapports $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ sont élevés mais relativement peu variables, puisque compris entre 245 et $385 \cdot 10^{-15}$ at. at $^{-1}$. Ils ne montrent pas de relation significative avec l'inverse des teneurs en Cl^- . Il est donc très probable qu'ils reflètent une source unique et que cette source soit l'atmosphère via les précipitations.

Compte tenu des faibles temps de résidence ^{14}C (Tableau 21), aucune décroissance radioactive mesurable de ^{36}Cl (qui a une demi-vie d'environ 300 000 ans et permet de dater des eaux très anciennes jusqu'à 1 000 000 ans) n'est à attendre.

Blinov et al. (2000) ont proposé une valeur de $9 \text{ at. m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pour le taux des retombées naturelles entre les latitudes de 10°N et 20°N . Cette valeur est cohérente avec les évaluations précédentes (in Bentley et al., 1986) et correspond aussi à celle (9 ± 5) calculée par Bouchez (2015) à partir des rapports $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ mesurés sur les eaux de l'aquifère quaternaire du bassin du Lac Tchad.

Une première valeur de R pour les précipitations actuelles peut être calculée grâce à l'équation (36) en utilisant la hauteur moyenne annuelle des précipitations à Tahoua (390 mm) et une teneur moyenne de ces précipitations en Cl^- (pas de valeur à Tahoua, mais elle doit être voisine (puisque la continentalité est sensiblement la même) de celle mesurée à Niamey, c'est-à-dire $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ d'après Le Gal la Salle, 1992). Le résultat obtenu est de $86 \cdot 10^{-15}$ at.at $^{-1}$, environ quatre fois moins que les rapports mesurés.

Une contribution de ^{36}Cl d'origine artificielle (essais d'armes nucléaire est exclue), d'une part en raison des temps de résidence calculés à partir des teneurs en ^{14}C et d'autre part, parce que cette contribution devrait être sensiblement identique dans toutes les eaux analysées, indépendamment de ces temps de résidence calculés, qui varient entre 5 et 20 ka pour les données disponibles (Tableau. 21). Notons au passage que l'échantillon d'Azeye, dont les teneurs en isotopes stables suggéraient fortement la possibilité d'une contribution de recharge récente, ne montre pas un rapport $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ plus élevé que ceux des autres échantillons (c'est même l'un des plus faible) et ne contient donc pas, comme les autres, de ^{36}Cl artificiel.

Il est donc impossible d'expliquer les rapports $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ élevés mesurés sur les échantillons sur la base d'un calcul faisant intervenir le taux de retombée, la hauteur de précipitations et la teneur en Cl^- des précipitations actuelles.

La recharge des eaux souterraines concernées s'étant effectuée sous des conditions climatiques différentes des conditions actuelles, il semble logique d'examiner si ces conditions paléoclimatiques pourraient expliquer les rapports $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ élevés mesurés.

Si on ne peut être certain de la parfaite constance du taux de retombée (F), il est toutefois difficile d'imaginer qu'il ait pu varier dans un rapport supérieur à 4.

En revanche, il est certain que la hauteur annuel des précipitations (P) était supérieure, et possible que la teneur en Cl^- des précipitations $[\text{Cl}^-]_p$ ait été différente.

Dans une démarche inverse, il est possible de calculer le produit $[\text{Cl}^-]_p \times P$ à partir de F (supposé constant) et des rapports mesurés : les valeurs de ce produit devraient être comprise entre 43 et 68 pour rendre compte des rapports mesurés.

Evidemment, il existe de multiples possibilités de combinaisons entre les deux paramètres pour atteindre ces valeurs de leur produit. Toutefois, une contrainte existe : lors d'une phase humide, P devait être assez nettement supérieure à sa valeur actuelle. C'est pourquoi il nous semble qu'adopter une valeur de $[\text{Cl}^-]_p$ supérieure à $0,1 \text{ mg l}^{-1}$ ne serait pas logique.

Il est évident que, suite à ces mesures préliminaires, d'autres sont nécessaires, d'une part, pour approfondir ce point concernant les teneurs élevées mesurées, et d'autre part, pour tenter de préciser l'origine de Cl^- dans les échantillons plus concentrés en cherchant à mettre en évidence un mélange entre le pôle météorique, défini par ces premières mesures et un pôle "roche".

IV : CONCLUSION ET PERSPECTIVES

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

4.1. CONCLUSION

Ce travail de thèse trouve son origine dans les enjeux liés aux ressources en eaux dans la région de Tahoua, concernant le système aquifère multicouche du Continental Intercalaire/Hamadien. Ce système est de plus en plus sollicité, en particulier pour couvrir des besoins en eau potable sans cesse croissants, auxquels seule son exploitation peut répondre à l'heure actuelle. Le fonctionnement hydrogéologique et géochimique de ce système complexe restait en outre très largement méconnu. Il était donc nécessaire d'acquérir des informations qui permettent d'améliorer l'état des connaissances sur le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien. C'est ce qui a été tenté dans cette thèse, en utilisant une approche couplant l'hydrogéologie, l'hydrogéochimie et l'hydrologie isotopique. Les informations acquises se situent :

- **Au plan hydroclimatique**

La caractérisation pluviométrique de la région de Tahoua montre, sans aucune surprise, un régime de mousson, avec une seule saison pluvieuse (juin à septembre), pendant laquelle 90% des précipitations se produisent, le mois d'août étant le plus arrosé avec, à lui seul, plus d'un tiers de la moyenne annuelle. Cette moyenne est proche de 530 mm/an dans la partie sud de la région (station de Birni N'Konni), alors qu'elle est voisine de 390 mm/an au centre de la région (station de Tahoua), voire moins dans la partie nord, correspondant à un climat semi-aride à aride.

- **Au plan géologique et hydrogéologique**

L'analyse des cuttings, des logs de diagraphie et des coupes géologique de forages montre que les profondeurs de captage dans le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien augmentent de l'Est de la région (partie libre de la nappe) d'environ 100 mètres de profondeur, vers le centre et l'Ouest, pour atteindre plus de 800 mètres de profondeur au forage de Takanamat. La nappe est libre à l'Est de l'axe Tassara-Abalak, et captive à l'Ouest de celui-ci. Les corrélations établies entre les différents logs litho-stratigraphiques de la région attribuent une épaisseur moyenne d'une cinquantaine de mètres au réservoir du Continental Hamadien, qui se superpose au réservoir du Continental Intercalaire dans la partie sud de la région. Dans la partie nord de la région, le réservoir du Continental Hamadien est absent.

Les formations du Crétacé moyen et supérieur reposent directement sur le Continental Intercalaire dont le réservoir dépasse les centaines de mètres d'épaisseur, car étant un système aquifère multicouche. Les paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, débits spécifiques, etc.) sont plus favorable, à l'exploitation dans le Continental Hamadien que dans le Continental Intercalaire, en raison de leurs lithologies différentes : le Continental Hamadien est essentiellement composé de grès moyens à grossiers à éléments de quartz, alors que le Continental Intercalaire se présente avec une lithologie surtout de type grès-argileux et argile silteuse.

Quant à la piézométrie du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, elle montre des surfaces piézométriques simples et régulières sur l'ensemble de la région. Ceci est dû au fait que les niveaux du Continental Intercalaire et du Continental Hamadien sont mis en charge par les mêmes formations géologiques (formations du Crétacé supérieur et du Paléocène). Les pressions dans ces différents niveaux sont donc en équilibre. Les courbes isopièzes diminuent d'altitude de l'Est vers l'Ouest, donnant ainsi aux eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua deux principaux sens d'écoulement, l'un de direction Est-Ouest, au Nord du parallèle 15° de latitude Nord et le second de direction NE-SO, au Sud de ce même parallèle. Ces deux sens d'écoulement se dirigent vers un même exutoire, le fleuve Niger.

Les vitesses d'écoulement calculées en utilisant la loi de Darcy se situent en moyenne à une trentaine de mètres par an pour le Continental Hamadien, alors que celles calculées à partir des teneurs en ^{14}C sont de l'ordre d'une dizaine de mètres par an.

Dans le Continental Intercalaire, les différences sont moindres puisque les estimations fondées sur la loi de Darcy sont de 6 et 8 m/an alors et que celles fondées sur les teneurs en ^{14}C sont comprises entre 3 et 7 m/an.

○ **Au plan hydrochimique et isotopique**

La synthèse peut être abordée via une analyse en composantes principales (ACP), effectuée pour les 30 échantillons prélevés lors de la première campagne et portant sur :

- ✓ les paramètres physicochimiques mesurés in situ : température (t°), conductivité électrique (CE) et pH ;
- ✓ les paramètres chimiques : anions et cations majeurs ;
- ✓ les paramètres isotopiques : teneurs en isotopes stables de l'eau et teneurs en carbone-14
- ✓ auxquels a été ajoutée la profondeur d'équipement des forages (PE).

Le plan factoriel F_1 - F_2 exprime 63,72% de la variance totale, avec 43,04% sur l'axe factoriel F_1 et 20,63% sur l'axe factoriel F_2 , ce qui montre un nuage de points bien structuré et une quantité d'information importante dans ce plan factoriel pour décrire les relations entre les différentes variables (Fig. 91) et la répartition des individus (échantillons) en différents groupes (Fig. 92).

Le graphique des variables (Fig. 91) montre que F_1 est avant tout un axe qui traduit la minéralisation des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien.

Sont regroupées à proximité de son extrémité positive quatre variables étroitement corrélées entre elles : conductivité électrique (CE), teneurs en bicarbonates et sodium et pH. Ceci correspond au fait que les eaux les plus concentrées, celle du Continental Intercalaire au Nord, sont de faciès bicarbonaté-sodique et qu'elles auraient acquis leur minéralisation par une altération de silicate sodiques consommant des ions H^+ .

La teneur en chlorures semble également liée à ce groupe, indiquant une possible source de ces ions dans l'altération des silicates constitutifs de la matrice de l'aquifère. En effet un complément de mesure de teneurs en ^{36}Cl sur des eaux plus concentrées en chlorures pourrait permettre, s'il met en évidence un mélange entre pôle météorique et pôle "roche", de s'en assurer.

La position de la variable teneur en ^{14}C , qui a un poids significatif sur la partie négative de F_1 , montre simplement l'influence du temps de résidence des eaux souterraines sur les processus d'interaction eau-roche qui génèrent la minéralisation.

Du côté négatif de F_1 se situent également les teneurs en calcium et magnésium, avec toutefois un poids limité. Ceci traduit le fait que les eaux les moins minéralisées, celle de la partie libre du Continental Intercalaire et celles du Continental Hamadien sont de faciès calcique (et magnésien). Nous avons interprété ce faciès comme résultant de l'altération de silicates calciques, plus facile que celle des silicates sodiques et qui pourrait donc intervenir plus rapidement dans les interactions eau-roche. Il est également possible que l'échange de bases sur les argiles contenues dans les grès du Continental Intercalaire joue un rôle dans l'opposition entre calcium (et magnésium) et sodium.

La position des deux variables représentant les teneurs en isotopes stables de l'eau montre que les eaux les plus minéralisées, celles de la partie captive du Continental Intercalaire, sont aussi celles qui présentent les teneurs en isotopes lourds les plus faibles. De façon plus générale, l'ensemble des eaux souterraines du Continental Intercalaire/Hamadien de la région possède des teneurs en isotopes lourds plus faibles que celle des précipitations actuelles,

montrant l'importance de paléorecharges qui peuvent être attribuées à la "période humide africaine" de l'Holocène ainsi qu'à d'autres épisodes humides et frais plus anciens, comme celui qui semble intervenir au Pléistocène supérieur, avant la dernière glaciation. Ces eaux peuvent dans leur grande majorité être qualifiées de "fossiles". Aucune alimentation récente n'est décelée au Nord (Continental Intercalaire). En revanche, il est possible que le Continental Hamadien de la région de Tahaoua bénéficie d'apports récents à partir de ses affleurements à l'Est, dans la région de Maradi.

Ce point mériterait un complément d'investigation.

Les teneurs en sulfates n'ont aucun poids sur l'axe de minéralisation F_1 , mais participent significativement à la variance selon l'axe F_2 , qui semble assez composite, puisque défini aussi par les teneurs en ^{13}C (?). Ces teneurs en sulfates semblent à la fois liées aux teneurs en calcium et aux teneurs en fer, ce qui suggère une origine mixte, mais difficile à décrypter dans le détail sur la base des données disponibles.

Cet axe F_2 est aussi en partie défini par la profondeur d'équipement (PE) et la température (t°), logiquement liées entre elles, et aussi logiquement corrélées négativement avec les teneurs en ^{14}C .

Enfin la position du potassium confirme ses corrélations négatives significatives avec le "groupe des quatre" (CE, pH, HCO_3 et Na) sans que nous n'ayons d'explication simple à proposer à ce stade, la corrélation négative entre teneurs en Na^+ et K^+ étant la plus surprenante.

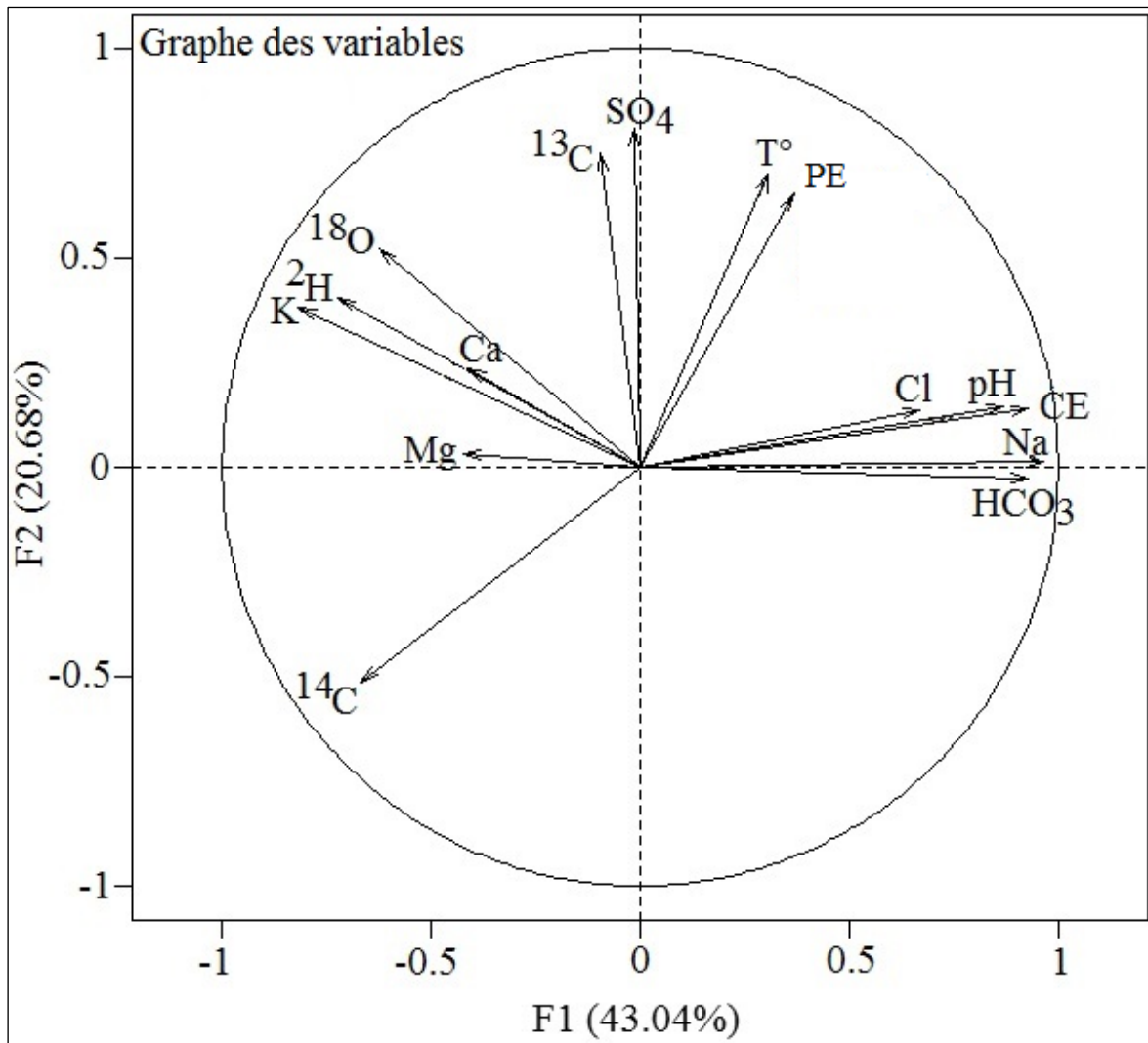


Figure 91 : Projection des variables dans le plan factoriels F_1 (Dim₁) x F_2 (Dim₂)

La projection des individus (ou échantillons) sur le plan factoriel F_1 - F_2 classe les eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua en trois groupes principaux (Fig. 92) qui recouvrent les différents contextes hydrogéologiques :

- ✓ **Groupe I** : il s'agit des eaux à conductivité électrique élevée, de faciès bicarbonaté-sodique, plutôt basiques, avec de faibles teneurs en ^{14}C correspondant à des temps de résidence longs, avec les teneurs en ^{18}O et ^2H les plus basses qui témoignent d'un effet paléoclimatique (paléorecharge) éventuellement assorti d'un effet lié à l'altitude élevée du bassin versant pendant les épisodes de recharge. Ce groupe I correspond aux eaux du Continental Intercalaire captif ;

- ✓ **Groupe II** : il s'agit d'eaux moins minéralisées que celles du groupe I, caractérisée par un faciès calcique et magnésien, légèrement acides, avec des teneurs en ^{14}C plus élevées que celle des eaux du groupe I, et donc des temps de résidence moins longs, avec les teneurs en ^{18}O et ^2H les plus élevées parmi les eaux souterraines échantillonnées dans la région de Tahoua, même si elles demeurent pour leur quasi-totalité faibles par rapport aux précipitations actuelles. Ce groupe II est celui des eaux du Continental Hamadien captif ;
- ✓ **Groupe III** : il s'agit d'eaux peu minéralisées, de faciès calcique et magnésien, qui présentent de faibles teneurs en ^{18}O et ^2H , identiques à celles des eaux du groupe I, mais avec des activités en ^{14}C élevées. Ce groupe III est celui des eaux du Continental Intercalaire libre.

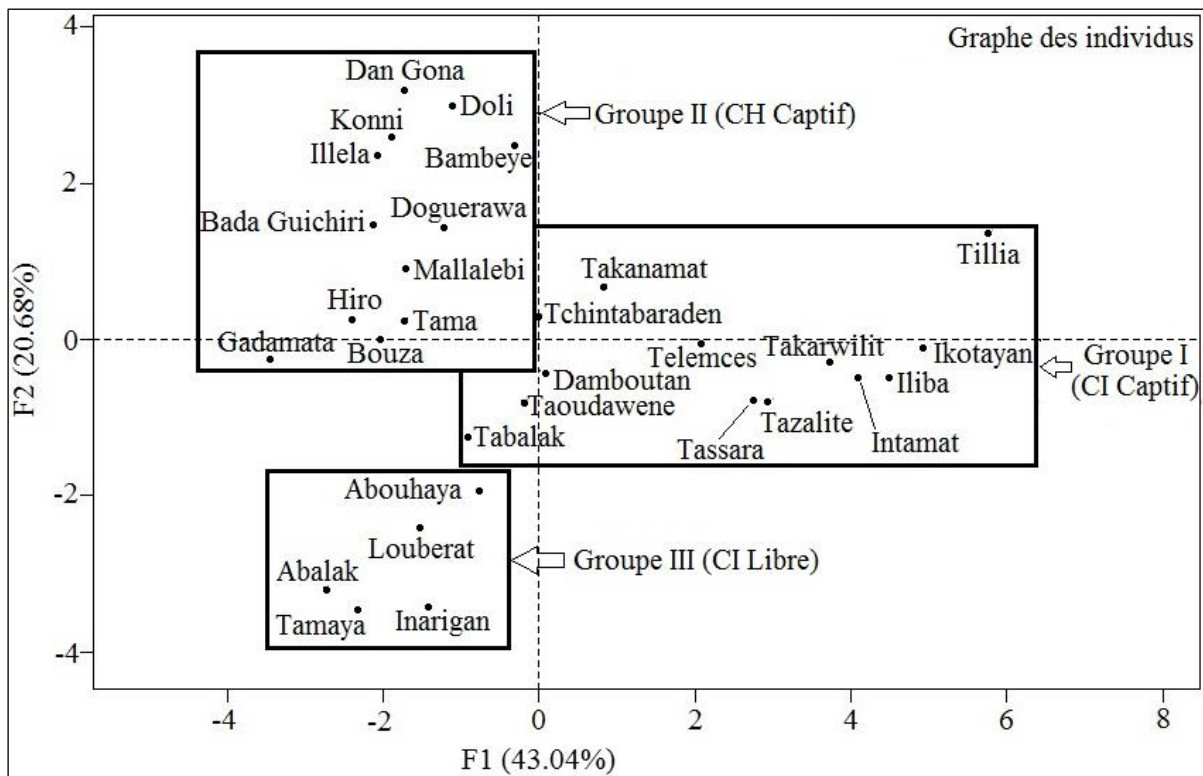


Figure 92 : Projection des individus dans le plan factoriels F_1 (Dim₁) x F_2 (Dim₂)

L'ACP fait donc apparaître des masses d'eau bien différenciées, tant en ce qui concerne leurs caractéristiques chimiques que leurs caractéristiques isotopiques.

Les teneurs en isotopes stables, en particulier, permettent d'affirmer que, dans ce système multicouche qui présente une piézométrie très régulière, les échanges d'eau entre Continental Hamadien et Continental Intercalaire sont très limités.

- **Au plan de l'aptitude des eaux aux différents usages**

On retient que la nappe libre du Continental Intercalaire et la nappe du Continental Hamadien sont d'une très bonne qualité pour la consommation humaine et animale en matière de composition chimique et de caractéristiques organoleptiques, excepté quelques points (Dan Gona, Bambeye, Konni, Doli et Gadamata) qui présentent des teneurs en fer un peu au-dessus de la norme OMS (2008). Ceci est moins vrai pour la nappe captive du Continental Intercalaire : même si la majorité des points d'eau sont de bonne qualité, quelques uns présentent des teneurs plus élevées que la norme OMS, c'est le cas du forage d'Iliba en matière de nitrite et de fer, du forage d'Ikotayan pour le fluor et le fer et enfin du forage de Tilia pour le fer.

En ce qui concerne l'aptitude des eaux du Continental Intercalaire/Hamadien à l'irrigation, les quatre paramètres utilisés pour l'évaluer (salinité totale de l'eau, SAR, pourcentage en sodium et RSC), montrent en définitive que les eaux de la nappe libre du Continental Intercalaire et celles de la nappe du Continental Hamadien présentent une excellente qualité. Quant aux eaux de la nappe du Continental Intercalaire captif, celles collectées au cours de cette étude dans le département de Tahoua et de Tchintabaraden présentent une qualité moyennement bonne à bonne, alors que celles se trouvant dans le département de Tassara et Tilia sont trop salées, donc impropres à l'irrigation.

4.2. PERSPECTIVES RECOMMANDATIONS

Cette étude de reconnaissance peut servir de socle pour d'autres à venir sur la région de Tahoua en particulier et le bassin des Iullemeden en général. Dans un souci d'affiner encore la compréhension du fonctionnement de ce système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, les perspectives suivantes nous semblent devoir être prises en compte dans les études futures :

- obtenir des données minéralogiques sur la composition minéralogique des différents niveaux du système du Continental Intercalaire/Hamadien. Ce peut être fait de façon assez simple en recueillant quelques dizaines d'échantillons de cuttings répartis en profondeur sur des forages eux-mêmes répartis sur la zone d'étude. Des analyses de diffraction X pourraient fournir des informations utiles pour mieux définir les processus de minéralisation des eaux et pour contraindre les codes géochimiques (PHREEQC entre autres) permettant de les modéliser et d'évaluer les flux mis en jeu ;

- élargir la zone d'étude : l'idéal pourrait être d'intégrer le bassin dans son ensemble, en appliquant la méthodologie développée ici, pour mieux comprendre son mode de fonctionnement général.
- Toutefois, un élargissement vers l'Est, au moins vers la zone de recharge du Continental Hamadien semble prioritaire pour confirmer une éventuelle recharge actuelle ou récente de cette nappe (suspectée à Azeye) et évaluer son ampleur, ce qui nous semble important pour la gestion de la ressource ;
- compléter les mesures de ^{36}Cl , non pas pour dater les eaux, mais pour obtenir des informations sur la source des chlorures dans les eaux les plus concentrées ;
 - réaliser des analyses isotopiques en ^{34}S et ^{18}O des sulfates, pour élucider la question de l'origine (ou des origines) des sulfates en solution, qui reste en suspens ;
 - dans l'idéal, faire une campagne exhaustive de mesure de niveau statique des forages captant le système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien, en essayant de couvrir tout le bassin, pour le moins compléter les données piézométriques vers les régions d'Agadez, de Maradi et de Dosso ;
 - tenter de résoudre les problèmes de géométrie qui entravent le développement du modèle d'écoulement, en ajoutant des points pour essayer d'équilibrer le bilan hydrique, et ainsi de simuler des valeurs de piézométrie proches de celles observées. Une fois le modèle calé, il pourra être utilisé pour affiner l'évaluation des temps de transfert des eaux.

En guise de recommandation, la réalisation des piézomètres en nombre raisonnable sur l'ensemble du bassin des Iullemeden en général et la région de Tahoua en particulier reste très indispensable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abderamane, H. (2012). Etude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad). *Thèse de doctorat, Université de Poitiers-France, 324p.*

Abdou Babaye, M. S. (2012). Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). *Thèse de doctorat, Université de Liège-Belgique et Université Abdou Moumouni de Niamey-Niger, 265p.*

Abdou, A., Bonnot, H., Bory Kadey, D., Chalamet, D., St Martin, M., et Younfa, I. (1998). Notice explicative des cartes géologiques du Liptako à 1/100 000 et 1/200 000. *Ministère des mines et de l'énergie du Niger, 64p.*

Abdoulkarimou, T. (1988). Détermination géologique des réservoirs du Continental Terminal à l'Ouest du dallol Bosso. *Mémoire de 3^{ème} cycle universitaire (DEA), Institut de Géodynamique de Bordeaux 3-France.*

Abid, K., Trabelsi, R., Zouari, K., et Abidi, B. (2009). Caractérisation hydrogéologique de la nappe du Continental Intercalaire (Sud tunisien)/hydrogeochemical characterization of the Continental Intercalaire aquifer (Southern tunisia). *Hydrological sciences journal, 54(3) :526-537.*

Adiaffi, B. (2008). Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud de la Côte d'Ivoire. *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay et Université de Cocody-Abidjan, 231p.*

AIEA. (2008). Isotopes de l'environnement dans le cycle hydrologique. *Collection cours de formation n°32/F.*

Alimen, H. (1987). Evolution du climat et des civilisations depuis 40.000 ans du Nord au Sud du Sahara Occidental (Première conceptions confrontées aux données récentes). Bulletin de l'association française pour l'étude du quaternaire. *Document généré le 09/06/2016.*

Doi : 10.3406/quate.1987.1851 ;

http://www.persee.fr/doc/quate_0004-5500_1987_num_24_4_1851

Alzouma, K. (1982). Etude pétrologique de la série sédimentaire tertiaire du bassin de Malbaza (République du Niger). *Thèse de Doctorat.*

Amadou, H., Laouali, M. S., et Manzola, A. S. (2014). Caractéristique hydrochimique des eaux souterraines de la région de Tahoua (Niger). *Journal of Applied Biosciences, 81 (1), 7161-7172.*

AMMAN. (2013). Suivi de la nappe du Tarat et du réseau de production en eau potable et en industrielle d'Arlit-Akouta. *Rapport de synthèse. Ref. 2013/NIG/AMN/03/HYDRO.*

Andrews, J. N., Edmunds, W. M., Smedley, P. L., Fontes, J. C., Fifield, L. K., and Allan, G. L. (1994). Chlorine-36 in groundwater as a paleoclimatic indicator : the east midlands Triassic sandstone aquifer (uk). *Earth and Planetary Science Letters, 122 (1-2) : 159-171.*

Andrews, J. N., Fontes, J. C., Aranyossy, J. F., Dodo, A., Edmunds, W. M., Joseph, A., et Travi, Y. (1994). The evolution of alkaline groundwater in the Continental Intercalaire aquifer of the Irhazer plain, Niger. *Water Research*, volume 30, n°1.

Ardoin-Bardin, S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrologiques en zone soudano-sahélienne. *Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2*, 437p.

Arnold, M., Aumaître, G., Bourlès, D. L., Keddadouche, K., Braucher, R., Finkel, R. C., Nottoli, E., Benedetti, L., and Merchel, S. (2013). The french accelerator mass spectrometry facility aster after ; year : Status and recent developments on ^{36}Cl and ^{129}I . *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 294 :24-28.

Barbecot, F., Marlin, C., Gibert, E., and Dever, L. (2000). Hydrochemical and isotopic characterisation of the Bathonian and Bajocian coastal aquifer of the Cean area (northern France). *Applied Geochemistry*. 15 : 791-805.

Bannoud, A H. (2001). Elimination de la dureté et des sulfates contenus dans les eaux par nanofiltration. *Elsevier, Desalination and Water Treatment*. 137 : 133-139.

Barrat, J.M. (2016). Ressources en eau des systèmes aquifères Iullemeden/ Taoudéni/ Tanezrouft en Afrique Sahélo-Saharienne. *Revue officielle de la société géologique de France, Géosciences appliquées, Numéro 191. ISSN 0016.7916.*

Belghiti, M.L., Chahlaoui, A., Bengoumi, D., et El Moustaine, R. (2013). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-quaternaire dans la région de Meknès (Maroc). *Larhyss journal, ISSN 1112-3680, n°14.*

Bentley, H. W., Phillips, F. M., and David, S. N. (1986). Chlorine-36 in the terrestrial environment. *Handbook of environmental isotope geochemistry*, 2 :427-480.

Bessoles, B., et Trompettes, R. (1980). Géologie de l'Afrique Panafricaine, zone mobile d'Afrique centrale (partie sud) et zone mobile soudanaise. *Mémoire. B.R.G.M, n°92, volume 2, 398p.*

Beyerle, U., Rueedi, J., Leuenberger, M., Aeschbach-Hartig, W., Peeters, F., Kipfer, R., Dodo, A. (2003). Evidence for periods of wetter and cooler climate in the Sahel between 6 and 40 kyr BP derived from groundwater. *Geophysical Research Letters, Volume. 30, n°. 4, 1173, doi: 10.1029/2002GL016310.*

Biémi, J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute marahoué (Côte d'Ivoire). *Thèse de doctorat, Université de Natio-Côte d'Ivoire, 493p.*

Black, R. (1967). Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique Occidentale. *Chronology Mines Recherche. Mini re Paris, 364, P. 225-238.*

- Blinov, A., Massonet, S., Sachsenhauser, H., Stan-Sion, C., Lazarev, V., Beer, J., Synal, H.-A., Kaba, M., Masarik, J., and Nolte, E. (2000).** An excess of ^{36}Cl in modern atmospheric precipitation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms*, 172(1) : 537-544.
- Boubacar Hassane, A. (2010).** Aquifère superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : cas de la communauté urbaine de Niamey (Niger). *Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey*. 249p.
- Bouchemal, F., et Achour, S. (2015).** Qualité physico-chimique et paramètres de pollution des eaux souterraines de la région de Biskra. *Larhyss journal*, ISSN 1112-3680, n°22.
- Bouchez, C. (2015).** Bilan et dynamique des interactions rivières-lac(s)-aquifères dans le bassin hydrologique du lac Tchad : *Approche couplée géochimie et modélisation des transferts*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille. 296p.
- Boudouresque, L., Dubois, D., Lang, J., et Trichet, J. (1982).** Contribution à la stratigraphie et à la paléographie de la bordure occidentale du bassin des Iullemeden au Crétacé supérieur et au Cénozoïque (Niger et Mali, Afrique de l'Ouest). *Bulletin de la Société Géologique de France*, (7), t.24, n°4, p. 685-695.
- Bouselsal, B., Kherici, N., Hadj-Said, S., et Belksier, S. (2015).** Qualité des eaux des aquifères de Sahara septentrionale. Cas des eaux des aquifères D'El-oued (SE Algérie). *IJE, Global Climate Change. Volume, 2-Issue 3*, 1014.
- Bradaï, A., Douaoui, A., et Marlet, S. (2009).** Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. *Cirad, 7p., Colloque-CD-rom. « Cirad-00366475 »*.
- Bredehoeft, J. D., et Konikow, L. F. (1993).** Ground-water models: *validate or invalidate*, *Ground Water* 312: 178-179.
- Bricha, S., Ounine, K., Oulkheir, S., El Haloui, N., et Attarassi, B. (2007).** Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *African Sciences*. 03(3): 391-404, ISSN 1813-548X.
- Browne, E., and Firestone, R. (1986).** Table of Radiocactive Isotopes. *Wiley Interscience, New York*.
- Castany, G. (2000).** Hydrogéologie, 2^{ème} cycle : Principes et méthodes. *Collection Dunod, ISBN 2 10 004171 1, Code 044171. Paris-France*. 130p.
- CEDR. (2012).** Rapport présenté par le Niger conformément à l'article 9 de la convention. Rapport valant 15^e, 16^e, 17^e, 18^e, 19^e, 20^e et 21^e rapport. *République du Niger, Ministère de la justice*.
- Craig, H. (1957).** Isotopic stantards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 12 : 133-149.
- Craig, H. (1961).** Standard for reporting concentration of deuterium and oxygen-18 in naturel waters. *Science, Volume. 133, p. 1833-1834*.

- Craig, H., Gordon, L., et Horibe, Y. (1963).** Isotope exchange effects in the evaporation of water. 1. Low-temperature experimental results. *Geophysical Research*, 68:5079-5087.
- Daddy Gaoh, M. A. (1993).** Étude des nappes aquifères du Continental Terminal entre les dallols Bosso et Maouri, département de Dosso, République du Niger. *Thèse de doctorat, Université de Liège-Belgique*, 316p.
- Dansgaard, W. (1964).** Stables isotopes in precipitation. *Tellus*, 16, p. 435-468.
- deMenocal, P. B. et Tierney, J. E. (2012).** Green Sahara: African Humid Periods Paced by Earth's Orbital Changes. *Nature Education Knowledge* 3(10):12
- De Martonne, E. (1926).** Aréisme et indice d'aridité. *Comptes rendus Académie des Sciences*, vol. 181, pp. 1395-1398.
- deMenocal, P. B., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., and Yarusinsky, M. (2000).** Abrupt onset and termination of the African Humid Period : rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews* 19: 347-361.
- Derwich, E., Benaabidate, L., Zian, A., Sadki, O., et Belghity, D. (2010).** Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du Haut Sebou e naval de sa confluence avec Oued Fes. *Larhyss Journal. ISSN 1112-3680, n°08*.
- Diene, M. (1995).** Etude hdrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe superficielle du Ferlo septentrional (Nord Sénégal). *Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop-Dakar*, 103p.
- Dodo, A. (1992).** Etude des Circulations Profondes dans le Grand Bassin Sédimentaire du Niger : Identification des aquifères et compréhension de leurs fonctionnements. *Thèse de doctorat, Université Neuchatel-France, IGCH*. 165p.
- DRHAT. (2008).** Monographie de la région de Tahoua. 103p.
- Durand, A., Icole, M., et Bieda, S. (1981).** Sédiments et climats Quaternaires du Sahel Central : Exemple de la Vallée de Maradi (Niger Méridional). *Disponible sur : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/cahiers/geologie/02754.pdf*
- Dupuis, D., Pons, J., et Prost, A.E. (1991).** Mise en place de plutons et caractérisation de la formation birimienne au Niger occidentale. *Compte Rendus de l'Academie des Sciences Paris*, 312 (2), p 769-776.
- Edmunds, W.M., Fellman, E., and Goni, I.B. (1999).** Lakes, groundwater and paleohydrology in the Sahel of NE Nigeria: envidence from hydrogeochemistry. *Journal of the Geological society of London, Volume 156, p. 345-355 printed in Great Britain*.
- Edmunds, W.M., Kay, R.L.F., and McCartney, R.A. (1985).** Origin of saline groundwaters in the Cammellis granite, (Cornwall, England): Natural processes and reaction during Hot Dry Rock Reservoir Circulation. *Chemical Geology*. 49, 287-301.
- Ehhalt, D., Knott, K., Nagel, J. F., and Vogel, J. C. (1963).** Deuterium and oxygen-18 in rain water. *Journal of Geophysical Research*, 68:3775-3780.

El Asslouj, J., Kholtei, S., El Amrani-Paaza, N., et Hilali, A. (2015). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chouia, Maroc). *Journal of Water Sciences, Volume 20, n°3, DOI : 10.7202/01650ar.*

Elfil, H., et Roques, H. (2001). Contribution à l'étude des phénomènes d'entartrage par les eaux géothermales. Partie I : étude du phénomène sur site et comparaison avec le système calcocarbonique pur. *Journal de la Société Chimique de Tunisie, volume. 4, n°9.*

Fabryka-Martin, J., Davis, S., and Elmore, D. (1987). Applications of ^{129}I and ^{36}Cl in hydrology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 29 (1) : 361-371.*

Favreau, G. (2000). Caractérisation et Modélisation d'une nappe phréatique en hausse au Sahel : dynamique et géochimie de la dépression piézométrique naturelle du kori de Dantiandou (Sud-Ouest du Niger). *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay, 353p.*

Finkel, R., Arnold, M., Aumaître, G., Benedetti, L., Bourlès, D., Keddadouche, K., and Merchel, S. (2013). Improved ^{36}Cl performance at the aster HVE 5MV accelerator mass spectrometer national facility. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 294(0) :121-125.*

Fontes, J. Ch., and Zuppi, G. M. (1976). Isotopes and Chemistry in sulphide bearing spring of central Italy. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium. I.A.E.A, Vienna.*

Fontes, J.-C., and Garnier, J.-M. (1979). Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon : A review of the existing models and a new approach. *Water resources research, 15 (2) 399-413.*

Gallaire, R. (1995). Hydrogéologie en milieu subdésertique d'altitude, le cas de l'Aïr (Niger). *Thèse de doctorat, Université Paris Sud 11-Orsay. N°162, 392p.*

Gasse, F. (2000). Hydrological changes in the African tropics since the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews 19: 189-211.*

Gat, J. R., and Dansgaard, W. (1972). Isotopes survey of water occurrences in Israel and the Jordan rift valley. *Journal of Hydrology, Volume. 16, p. 177-211.*

Gaultier, G. (2004). Recharge et paléorecharge d'une nappe libre en milieu Sahélien (Niger Oriental) : approches géochimique et hydrodynamique. *Thèse de doctorat, Université Paris Sud 11-Orsay. 203p.*

Gbombélé Soro, R. K. O., Tanina Soro, D., Traoré, A., N'guessan Fossou, R. M., et Soro, N. (2016). Aptitudes à l'agriculture des eaux souterraines du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal, édition Volume. 12, N°21. ISSN : 1857-7881 (Print) et ISSN 1857-7431. Doi: 10.19044/esj.2016.v12n21p81 ;*
[URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n21p81](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n21p81)

Gilli, E., Mangan, C., et Mudry, J. (2016). Hydrogéologie : Objet, méthodes, application. *Collection DUNOD, 4^{ème} édition, 356p.*

Gleick, P.H. (1996). Basic water requirements for human activities: *Meeting basic needs*. *Water International Volume 21, No. 2, pp. 83-92.*

Gleick, P. H., and Palaniappan, M. (2010). Peak Water limits to freshwater withdrawal and use, *proceedings of the National Academy of Science*. 107 11155-11162. (doi : 10.1073/pnas.1004812107). <http://www.pnas.org/content/early/2010/05/20/1004812107.abstract>

Girard, P. (1993). Techniques isotopiques (^{15}N , ^{18}O) application à l'étude des nappes des altérites et du socle fracturé de l'Ouest Africain. Etude de cas : l'Ouest du Niger. *Thèse de doctorat, Université de Québec à Montréal. 154p.*

Goldich, S.S. (1938). A study in rock weathering. *Journal of Geology*, volume 46, p. 17-23.

Gouaidia, L., Guefaïfia, O., Boudoukha, A., et Hemila, M. L. (2013). Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risque de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana, Nord-Est Algérien. *Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales*, 37, 1 : 81-92.

Greigert, J. (1966a). Description des formations crétacées et tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique occidentale). *BRGM ed., 229 p. Paris, France.*

Greigert, J. (1968). Description des formations Crétacées et Tertiaires du bassin des Iullemeden (Afrique Occidentale). *Edition du BRGM, publication n°2, 74, rue de la Fédération, Paris 15^e.*

Greigert, J. (1978). Atlas des eaux souterraines de la République du Niger. Etat des connaissances. *Rapport BRGM, 79 AGE001. Orléans, France.*

Greigert, J., et Pougnet, R. (1965). Carte géologique de la République du Niger au 1: 2 000 000. *BRGM, ed. Paris, France.*

Griès, S. (2000). Etude géochimique et isotopique des nappes profondes au Sahara – Sahel ; implications pour la gestion des ressources en eau et les reconstitutions paléoclimatiques. *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay, 318p.*

Guendouz, A., and Michelot, J.-L. (2006). Chlorine-36 dating of deep groundwater from northern Sahara. *Science Direct, Journal of Hydrology 328, 572-580.*

Guergazi, S., et Achour, S. (2005). Caractéristiques physico-chimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration. *Larhyss Journal. ISSN 1112-3680, n°04.*

Guero, A. (2003). Étude des relations hydrauliques entre les différentes nappes du complexe sédimentaire de la bordure Sud-Ouest du bassin des Iullemeden (Niger) : approches géochimique et hydrodynamique. *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay, 265p.*

Herczeg, A. L., and Leaney, F. W. (2011). Environmental tracers in arid-zone hydrology. *Hydrogeology Journal Review, 19(1) :17-29.*

Hubert, J., Hubert, C., Jungers, P., Daudon, M., et Hartemann, P. (2002). Eaux de boisson et lithiase calcique urinaire idiote. Quelles eaux de boisson et quelle cure de diurèse? *Progrès en Urologie, 12, 692-699.*

Hudson, H.E., and Gilcreas, F.W. (1976). Health and economic aspects of water hardness and corrosiveness. *Journal American Water Works Association*, 68 : 201

Huggle, D., Blinov, A., Stan-Sion, C., Korschinek, G., Scheffel, C., Massonet, S., Zerle, L., Beer, J., Parrat, Y., Gaeggeler, H., Hajdas, W., and Nolte, E. (1996). Production of cosmogenic ^{36}Cl on atmospheric argon. *Planetary and Space Science*, 44(2) :147-151.

INS. (2014). Le Niger en chiffre 2014. Edité par direction de la coordination et du développement de la statistique (DCDS). 128, rue de la Sirba, BP 13416, Niamey-Niger.

INQUA-ASEQUA, Symposium International (1986). Changements globaux en Afrique durant le Quaternaire : Passé-Présent-Futur. Dakar, du 21 au 28 avril. Disponible sur : http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/pt5/travaux_d/23941.pdf

Jordana, S., and Batista, E., (2004). Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta : an international earth science journal*. Volume 2, N°2, ISSN: 1695-6133. Université de Barcelona-España.

Joseph, A., et Aranyosy, J.F. (1989). Mise en évidence d'un gradient de continentalité inverse en Afrique de l'Ouest en relation avec les lignes de grains. *Communication Congrès IAEA, Hydrology Isotopes. En Afrique, Niamey, 100p.*

Joseph, A. (1990). Recharges et Paléorecharges des aquifères en Région subdésertique au Niger, *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay.*

Joseph, A., Frangi, P., et Aranyosy, J.F. (1992). Isotopes characteristics of meteoric water and groundwater in the Sahelo-Sudanese Zone. *Journal of Geophysical Research*, volume 97, n° D7, 7543-7551.

Joseph, A., and Travi, Y. (1994). The evolution of alkaline groundwater in the continental inetrcaire aquifer of the Irhazer plain, Niger. *Water Resources*, Volume 30, no. 1, p. 45-61.

Kaid Rassou, K. (2009). Etude des interactions entre les eaux souterraines et les eaux de surface dans le bassin côtier d'Oualidia. *Thèse de doctorat, Université de Cadi Ayyad-Marrakech, 214p.*

Kamel, A., Rim, T., Kamel, Z., et Brahim, A. (2009). Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire (Sud tunisien)/Hydrogeochemical characterization of the Continental Intercalaire aquifer (Southern Tunisia). *Hydrological Sciences journal*, ISSN : 0262-6667 (print) 2150-3435. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.54.3.526>.

Kamineni, D.C. (1987). Halogen-bearing minerals in plutonic rocks: a possible source of chlorurine in saline groundwaters in the Canadian Shield. In *Saline Water and Gases in Cristalline Rocks (FRITZ P., FRAPE S.K., Eds); Special Paper 33, Geological Association of Canada, Ottawa, 69-79.*

Kazemi, G. A., Lehr, J. H, and Perrochet, P. (2006). Groundwater age. *John Wiley and Sons.* <https://doi.org/10.1002/0471929514.ch1>.

Klein, M. G., Gottedang, A., Mous, D. J. W., Bourlès, D. L., Arnold, M., Hamelin, B., Aumaître, G., Braucher, R., Merchel, S., and Chauvet, F. (2008). Performance of the HVE 5MV AMS system at CEREGE using an absorber foil for isobar suppression. *Nuclear*

Instruments and Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, 266(8):1828-1832.

Lagaude, A., Kirsche, C., et Travi, Y. (1988). Défluoruration des eaux souterraines au Sénégal : travaux préliminaires sur l'eau du forage de Fatick.

Lagnika, M., Ibikounlé, M., Mazou, F., Sakiti, N., et Boutin, C. (2014). Diversité faunique et qualité physico-chimique de l'eau des puits à Parakou (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Bulletin of Social and History natural. Toulouse*, 150, 2014, 59-72.

Lagnika, M., Ibikounlé, M., Montcho, J.-P.C., Wotto, V.D., et Sakiti, N.G. (2014). Caractéristiques physico-chimiques de l'eau des puits dans la commune de Pobè (Bénin, Afrique de l'Ouest). *Journal of Applied. Bioscience*. 79 : 6887-6897, ISSN 1997-5902.

Landreau, A., et Roux, J.C. (1985). Les nitrates dans les eaux souterraines : exemples de répartition et évolution des teneurs dans quelques aquifères français. *BRGM*. 55p.

Larson, T.E. (1966). Deterioration of water quality in distribution systems. *Journal American. Water Works Association*, 58 : 1307.

Lasm, T., Yao, T.K., Oga, M.S., Kouame, F.K., Jourda, J.P., et Baka, D. (2008). Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale Area (Southern Cote D'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X Volume. 20 n°3.

Le Gal La Salle, C. (1994). Circulation des eaux souterraines dans l'aquifère captif du Continental Terminal, bassin des Iullemeden, Niger. Méthodologie et application : isotopes stables de la molécule de l'eau, carbone-14, chlore-36, uranium et gaz nobles. *Thèse de doctorat, Université Paris Sud 11-Orsay*. 175p plus annexe.

Louvat, D., Michelot, J.-L., et Aranyossy, J. F. (1999). Origin and residence time of salinity in the Äspö groundwater system. *Applied Geochemistry*, 14 : 917-925.

Lucia, F., Mohamed, K., Kamel, Z., Ahmed, M., et Gian Maria, Z. (2001). Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie). *Earth and Planetary Sciences* 332 : 665-571.

Machens, E. (1973). Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. *Mémoire, BRGM, n°82, 167p*.

Majoube, M. (1971). Fractionnement en oxygène-18 et deutérium entre l'eau et sa vapeur. *Journal de Chimie Physique et de Physico-chimie Biologique*. 68 : 1423-1436.

Margat, J. (1982). Aquifère du Continental Intercalaire du bassin sédimentaire du Niger (Mali, Niger, Nigéria). *Bulletin, BRGM, Hydrogéologie, n°2*.

Margat, J. (2006). Ressources en eau et gestion des aquifères transfrontaliers de l'Afrique du Nord et du sahel. 7, place de fontenoy, 75352 Paris 07 SP (France). *Composed by Marina RUBIO, 93200 SaintèDenis*.

- Masarik, J. and Beer, J. (1999).** Simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 104(D10) :12099-12111.
- Masarik, J. and Beer, J. (2009).** An updated simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114.
- MEELD/DHUSA. (2010).** Projet d'hydraulique villageoise dans la région de Tahoua : réalisation de 24 forages profonds. 204p.
- Ménabréaz, L. (2012).** Production atmosphérique du nucléide cosmogénique ^{10}Be et variations de l'intensité du champ magnétique terrestre au cours des derniers 800 000 ans. *Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseilles*.
- Merlivat, L., and Jouzel, J. (1979).** Global Climatic Interpretation of the Deuterium and Oxygen-18 Relationship for Precipitation. *Journal of Geophysical Research. Volume. 84, N° C8*.
- MHA. (2014).** Rapport sur les indicateurs de l'eau potable et de l'assainissement pour l'année 2013, du Comité technique permanent de validation des indicateurs de l'eau et de l'assainissement. *République du Niger*.
- Mignon, R. (1970).** Etude géologique et prospection du Damagaram Mounio et Sud Maradi. *Rapport, B.R.G.M., 70 ABL, 001 NIA*.
- Miko, I. (1999).** Dynamique des formations détritiques et ligniteuses du Continental Terminal dans le bassin des Iullemeden (Niger). *Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni de Niamey-Niger, 328p*.
- Monfort, M. (1997).** Etude des relations entre les aquifères du Continental Terminal au Nord de Niamey (Niger) : approche géologique, géochimique et hydrodynamique. *Mémoire de 3^{ème} cycle Universitaire (DEA), Université Paris Sud 11-Orsay, 121p*.
- Mook, W. (1980).** Carbon-14 in hydrogeological studies. In Handbook of environmental isotope geochemistry. *Volume 1. IAEA*.
- Ndembo Londo, J. (2009).** Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba (Kinshasa / République Démocratique du Congo). *Thèse de doctorat, Université d'Avignon-France et des Pays de Vaucluse et Université de Kinshasa-RDC, 203p*.
- N'Diaye, A.D., Kankou, M O. S'A O., et Lo, B. (2009).** Etude de la salinité des eaux usées utilisées dans l'irrigation dans le périmètre maraîcher de Sebkha, Nouakchott. *International Journal Biological and Chemistry. Science. 4(6) :2060-2067, ISSN : 1991-8631*.
- Nezli, I.E., Achour, S., Hamdi-Aïssa, B. (2009).** Approche hydrogéochimique à l'étude de la fluoration des eaux de la nappe du Complexe Terminal de la basse vallée de l'Oued M'Ya (Ouargla). *Courrier du savoir-n°09*.
- Niedermeyer, E. M., Schefub, E., Sessions, A. L., Mulitza, S., Mollenhauer, G., Schulz, M., and Wefer, G. (2010).** Orbital- and millennial-scale changes in the hydrologic cycle and

vegetation in the western African Sahel: insights from individual plant wax δD and $\delta^{13}C$. *Quaternary Science Reviews*, 29: 2996-3005.

Nir, A. (1967). Development of isotope method applied to ground water hydrology. In sout G.E. (ed). Isotope techniques in the hydrology cycle. *Geophysical Monograph Series, Fournier, Grenoble I.*

Nordström, D.K., Lindblom, S., Donahoe, R.J., and Barton, C.C. (1989c). Fluid inclusions in the Stripe granite and their possible influence on the groundwater chemistry. *Geochimica. et Cosmochimica Acta* 53, 1741-1755.

Nouayti, N., Khattach, D., et Hilali, M. (2015). Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc). Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco). *Journal of Materials Environmental. Science.* 6 (4): 1068-1081. CODEN : JMESC�.

Oeschger, H., Houtermans, J., Loosli, H., and Wahlen, M. (1969). The constancy of radiation from isotope studies in meteorites and on the earth. In Olsson, I. U., editor, Radiocarbon Variations and Absolute Chronology, p. 471-496. *Wiley Interscience New York.*

OMS. (1986). Directives de qualité pour l'eau de boisson. *Vol. 2. Critères d'hygiène et documentation à l'appui*

OSS. (2006). Ressources en eau et gestion des aquifères transfrontaliers de l'Afrique du Nord et du Sud. *Published in 2005 by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.* 134p.

OSS/SAI. (2007). Modèle hydrogéologique du système aquifère d'Iullemeden (SAI). N°212. 85p.

OSS/SAI. (2008). Gestion concertée des ressources en eau partagées d'un aquifère transfrontalier sahélien. *Collection synthèse n°2, Tunis.* 38p.

OSS/SAI. (2011). Analyse diagnostique transfrontalière. *Tome I. ISBN : 978-9973-856-41-8.* 112p.

OSS/SAI. (2017). Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel : *rapport du projet régional de coopération technique RAF/7°11, appuyé par l'AIEA.* 118p.

Ouandaogo/Yemeogo, S. (2008). Ressource en eau souterraine du centre urbain d'Ouagadougou au Burkina Faso qualité et vulnérabilité. *Thèse de doctorat, Université Academie d'Aix-Marseille,* 254p.

Ousmane, B. (1978). Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle du sahel : l'hydrogéologie du Damagram Occidental (Environs de Zinder-Niger). *Thèse de 3^{ème} cycle, USTL, Montpellier.*

Ousmane, B. (1988). Étude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi, Zinder-Est). *Thèse de doctorat, Université de Niamey,* 441p.

- Ousmane, B. (2012).** La gestion et l'exploitation des eaux souterraines au Niger. *Proceedings of the international workshop. Tripoli-Libya.*
- Ozer, P., Bodart, C., et Tychon, B. (2005).** Analyse climatique de la région de Gouré. Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. *European Journal of Geography*. 308. Consulté le 14 octobre 2017. <http://cybergeogeo.revues.org/3338>
- Ozer, P., et Erpicum, M. (1995).** Méthodologie pour une meilleure représentation spatio-temporelle des fluctuations pluviométriques observées au Niger depuis 1905", *Sécheresse*, 6, 103-108.
- Ozer, P., Erpicum, M., Demarée, G., and Vandiepenbeeck, M. (2003).** The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 489-492. DOI : [10.1623/hysj.48.3.489.45285](https://doi.org/10.1623/hysj.48.3.489.45285)
- Ozer, P., Hountondji, Y.-C., Niang, A.J., Karimoune, S., Laminou Manzo, O., et Salmon M., (2010).** Desertification au Sahel : *Historique et perspectives*. BSGLG, 54, 69-84.
- Paturel, J. E., Servat, E., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J. F., Lubes-Niel, H., Fritsch, J. M., Masson, J. M., et Marieu, B. (1997).** Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *ORSTOM, programme FRIEND AOC, 06 BP 1203 ; cedex 1, Abidjan 06-Côte d'Ivoire.*
- Pearson Jr, F. (1992).** Effects of parameter uncertainty in modeling ^{14}C in groundwater. *In Radiocarbon After Four Decades*, pages 262-275. Springer.
- Peter, G. C., and Andrew, L. H. (1999).** Environmental tracers in subsurface hydrology. *CSIRO Land and Water, Glen Osmond, Australia*. 535p. 99-048102.
- Petersen, J. O. (2014).** Traçage isotopique (^{36}Cl , ^4He , ^{234}U) et modélisation hydrogéologique du système aquifère du Sahara Septentrional. Application à la recharge quaternaire du Continental Intercalaire. *Thèse de doctorat, Université d'Aix marseille*. 329p.
- Plummer, L. N., Böhke, J. K., et Busenberg, E. (2003).** Approches for groundwater dating. *In Lindsey, USGS Water – ressources investigations report 03-4035*, 12-42.
- Plummer, L. N., Perstemon, E. C., and Parkhurst, D. L. (1991).** An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path. *Department of the Interior, US Geological Survey*.
- PNUD. (2013).** Taux d'alphabétisation par pays, indiqué par le Programme des Nations Unis pour le Développement pour le Niger. [Rapport du développement humain](#), consulté en ligne en janvier 2017
- Pontié, M., Schrotter, J-C., Lhassani, A., et Diawara, C.K. (2006).** Traitement des eaux destinées à la consommation humaine : élimination domestique et industrielle du fluor en excès. *Actualité chimique n°301-302*.
- Radier, H. (1957).** Contribution à l'étude géologique du sahara oriental (A.O.F). *Bulletin du service géologique et de prospection minière, n°26, Dakar, 1959*.

Reilly, T. E., Plummer, L. N., Phillips, P. J., and Busenberg, E. (1994). The simulation and multiple environmental tracers to quantify groundwater flow in a shallow aquifer. *Water Resources Research*. 302 : 421-433.

Rouabhia, A.E.K., et Djabril, L. (2010). L'irrigation et le risque de pollution saline exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El Abiod. *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°08 ; 13p.

Sadat, A.W., NGoran, E. B.Z., Siaka, S., et Parinet, B. (2001). Intérêt de l'analyse multidirectionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences* 38 : 2573-2585, ISSN 1997-5902.

Saley, M. B. (2003). Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Thèse de doctorat, Université de Cocody-Abidjan, 209p.*

Sandao, I. (2013). Etudes hydrodynamique, Hydrochimique et Isotopique des eaux souterraines du bassin versant de la Korama/ Sud Zinder, Niger : Impacts de la variabilité climatique et des activités anthropiques. *Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niger. 211p.*

Sandao, I., Abdou Babaye, M. S., Ousmane, B., and Michelot, J.-L. (2015). Ground Water suitability for irrigation in the Korama basin, Southern Zinder, Niger. *International Journal of Research in Agriculture and Forestry*. Volume 2, ISSN. 2394-5907 (print) & ISSN. 2394-5915 (online).

SCETAGRI. (1985). Nappes aquifères de la région d'Arlit, Synthèse hydrogéologie Nappe du Tarat.

Sircoulon, J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940. *Cahier ORSTOM, série hydrologique*. Volume. 13, n°2.

Sonntag, G., Munich, K. O and Jacob, H. (1983). Variation of deuterium and oxygen-18 in continental precipitation and groundwater ; and their causes. In *secret-Perrot, A., Beran, M. and ratcliffe, R. (eds). Variation in the global water budget*. D. Reidel Pub. Co., Boston p.107-124.

Soumaila, A. (2000). Étude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest). *Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 253p.*

Soumaila, A., Henry, P., et Rossy, M. (2004). Contexte de mise en place des roches basiques de la ceinture de roches vertes birimienne de Diagorou-Darbani (Liptako, Niger, Afrique de l'Ouest) : plateau océanique ou environnement d'arc/bassin arrière-arc océanique. *C. R. Géosciences*, 336, p. 1137-1147.

Soumaila, A., et Konate, M. (2005). Caractérisation de la déformation dans la ceinture birimienne (paléoprotérozoïque) de Diagorou-Darbani (Liptako nigérien, Afrique de l'Ouest). *Africa. Geoscience Review*, volume. 13, n°3, p. 161-178.

SPEN/PEAMU. (2015). Projet de renforcement et d'extension des réseaux d'AEP dans 18 centres secondaires de la SPEN : travaux de réalisation, d'équipement et de raccordement de 20 forages gros diamètres. 66p.

Tabouche, N., et Achour, S. (2004). Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara Septentrionale Algérien. *Larhyss Journal*. ISSN 1112-3680, n°03.

Tamers, M. (1968). Surface-water infiltration and groundwater movement in arid zones of Venezuela. *Technical report, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas*.

Taupin, J.D. (1990). Evaluation isotopique de l'évaporation en zone non saturée sous climat sahélien, et évolution géochimique des solutions des sols (vallée du moyen Niger). *Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11-Orsay, 172p*.

Taupin, J. D., Gallaire, R., et Arnaud, Y. (1997). Analyses isotopiques et chimiques des précipitations sahéliennes de la région de Niamey au Niger : implications climatologiques. *Hydrochemistry, IAHS, n°244, pp 151-162*.

Taupin, J. D., Gaultier, G., Favreau, G., Leduc, C., et Marlin, C. (2002). Variabilité isotopique des précipitations sahéliennes à différentes échelles de temps à Niamey (Niger) entre 1992 et 1999 : implication climatique. *C. R. Géoscience, n° 334, p. 43-50*.

Taupin, J-D., Gaultier, G., Favreau, G., Leduc, C., et Ramirez, E. (2003). Etude isotopique des précipitations sahéliennes à l'échelle de l'événement : relation avec les paramètres météorologiques et le type de précipitation. *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Régions (proceedings of an international symposium held at Montpellier. April 2003) IAHS Publications. n°. 278-2003*.

Tremoy, G. (2012). Etude de la composition isotopique (deutérium et oxygène-18) de la vapeur d'eau à Niamey (Niger) : vers une meilleure compréhension des processus atmosphériques en Afrique de l'Ouest. *Thèse de doctorat, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines. 263p*.

Vassolo, S., et Daïra, D. (2012). Qualité de l'eau dans la partie Tchadien du Bassin du Lac Tchad. *Activités du projet-rapport n°4, 25p*.

WHO. (2008). Guidelines for drinking-water quality. 3rd Edi. *Incorporating the first and second Addenda. Volume 1. Recommendations*

Yapo, O.B., Mambo, V., Seka, A., Ohou, M.J.A., Konan, F., Gouzile, V., Tidou, A.S., Kouame, K.V., et Houenou, P. (2010). Evaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire) : Koumassi, Marcory, Port-Bouet et Treichville. *International Journal of Chemistry Sciences. 4(2) : 289-307, 19p*.

Youssef, H., Jacques, M., Jacky, M., Lhoussaine, B., et Pierre, C. (1999). Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines : exemple de la plaine du Souss (Maroc). 6p, *Earth and Planetary Sciences 1999. 328, 381-386*.

ANNEXE

ANNEXE

Annexe 1 : protocole d'extraction du CO₂ dans les échantillons d'eau :

- préparer l'azote liquide, ainsi que tous les matériels nécessaires ;
- placer un dewar d'azote liquide avant la pompe à vide pour piéger l'eau ;
- allumer le circuit de refroidissement de la colonne à reflux ;
- faire le vide dans toute la ligne (toutes les vannes ouvertes) ;
- vérifier qu'il n'y a pas de fuites et que la pression des lignes soit de $0,00.10^{-3}$ mbar pour la première ligne et $1,2 \cdot 10^{-2}$ mbar pour la deuxième ligne ;
- ouvrir le robinet d'eau du circuit de refroidissement, se trouvant juste derrière la ligne et laisser l'eau couler tout au long de l'opération et l'arrêter en fin de manipulation ;
- fermer la vanne VB ;
- faire entrer 20 mL d'acide orthophosphorique (H₂PO₄) 85% dans le ballon ;
- placer l'eau à analyser dans l'ampoule ouverte et faire passer l'échantillon dans le ballon en arrêtant avant de vider l'ampoule pour ne pas provoquer de fuite du vide. Au contact de l'acide orthophosphorique, les carbonates et bicarbonates présents dans l'eau réagissent en formant du CO₂ ;
- laisser le mélange 5 minutes sous agitation et après fermer la vanne VI ;
- placer les dewars d'azote liquide sur la ligne en A à la moitié du tube et en B jusqu'en haut du tube et ouvrir la vanne VB ;
- le CO₂ et de l'eau sont entraînés dans les pièges. Observer 30 secondes à 1 minute d'attente pour la remontée dans les pièges, puis ouvrir la vanne VI pour attirer tout le CO₂ dans les pièges ;
- après quelques secondes, fermer la vanne VB, la vanne VI est toujours ouverte et il faut attendre que la pression descende jusqu'à environ 4.10^{-2} mbar et fermer la vanne VI ;
- remplacer les deux pièges à azote liquide par des pièges à carboglace (contenant un mélange de carboglace et d'acétone bien remué) : le CO₂ se sublime, alors que l'eau reste piégée ;
- attendre une demi-heure, la vanne VE étant ouverte tout au long de l'opération (PE sous pompage), fermer VM ;
- plonger le PE dans l'azote liquide ;
- ouvrir VI : le CO₂ est piégé dans le PE, puis fermer VI

- pomper les incondensables, ouvrir VM et fermer le VE ;
- retirer le PE et mettre un nouveau à sa place, changer les tubes des pièges utilisés par des nouveaux bien séchés et remettre la ligne en pompage ;
- remplacer le ballon et remettre les ampoules en place, pour finir remettre toute la ligne en pompage, et vérifier que le robinet d'eau du circuit de refroidissement est fermé.

Précautions à observer :

- Ne pas oublier d'ouvrir le VE lorsque les lignes sont mises en pompage ;
- Ne pas oublier de mettre un agitateur magnétique dans le ballon propre avant son positionnement sur le circuit.

Annexe 2 : Protocole de préparation chimique du chlorure dissous :

- rinçage des bouteilles et tubes à centrifuger, trois fois à l'eau milliQ, en laissant reposer le contenant plein, pendant plusieurs heures, au moins une fois. Pour les petits volumes, prévoir au moins trois tubes à centrifuger de 15 mL par échantillon. Labelliser les tubes (bouchons + tubes). Pour ce qui est des échantillons de cette étude, où des gros volumes ont été utilisés, à cause des faibles teneurs en chlorure dans les échantillons, ce sont des tubes de 50 mL qui ont été utilisés;
- ajouter 3 mL d'AgNO₃ (solution à 10%) à l'échantillon, et 1 mL d'acide nitrique HNO₃, pour les échantillons non acidifiés, fermer le tube et agiter un peu à la main. En milieu acide, le nitrate d'argent AgNO₃ réagit avec les ions chlorures et un précipité de chlorure d'argent AgCl se forme ;
- placer les bouteilles à l'abri de la lumière, pendant 2 jours (quelques minutes avec agitation pour les échantillons concentrés). L'AgCl est en effet photosensible, il convient de le manipuler rapidement et à l'abri de la lumière, afin qu'il ne noircisse pas. Au bout des deux jours, tous les échantillons dans le cadre de cette étude, ayant des faibles teneurs en chlorure, bien qu'ils fussent "spikés", n'ont pas décanté, l'eau est trouble, mais on ne voit aucun précipité d'AgCl. Ils ont donc été "spikés" à nouveau et laissés pendant plus de deux mois à l'abri de la lumière jusqu'à décantation ;
- pomper le surnageant, à l'aide de la pompe péristaltique, (placer la partie la plus fine de la pipette pasteur dans le tuyau de la pompe, et couper la partie servant de poire, rincer abondamment, en aspirant de l'eau MilliQ placer dans un bêcher, pour rincer la pipette, le tuyau et la pompe) ;

- nettoyer le plan de travail, après chaque échantillon, et vérifier vos gants. Etape non nécessaire pour les petits volumes (< 50 mL) ;
- transvaser le précipité dans un tube à centrifuger, préalablement rincé, centrifuger et jeter le surnageant. Répéter l'opération, si nécessaire. Le chlorure étant sous la forme de précipité de chlorure d'argent, AgCl, cette étape permet d'éliminer, facilement, une bonne partie des autres espèces en solution ;
- ajouter 3 mL d' NH_3 et "vortexer" jusqu'à dissolution du précipité ;
- ajouter 1 mL d'une solution de nitrate de baryum (BaNO_3) saturé ;
- laisser une nuit bouchon non vissé et hotte éteinte (pendant 6h au moins) ;
- peser un nouveau tube à centrifuger de 15 mL (non nécessaire si pas de dilution isotopique) ;
- filtrer la solution à l'aide d'une seringue (placer le filtre seringue acrodisc, sortir le piston, transférer la solution dans la seringue et appuyer) et d'un filtre seringue acrodisc (15 μm). Rincer le tube à l'eau milliQ ($\approx 2\text{mL}$). Nettoyer la paille et changer de gants, après chaque échantillon ;
- ajouter de l'acide nitrique concentré, afin de faire re-précipiter AgCl (au moins 3 mL). "Vortexer", puis laisser reposer 10 minutes, à l'abri de la lumière, par exemple dans la centrifugeuse ;
- centrifuger et jeter le surnageant ;
- répéter les sept derniers points précédents une fois, deux fois, voire trois fois pour les échantillons riches en sulfates ;
- ajouter 5 mL d'eau MQ, "vortexer", centrifuger, éliminer le surnageant, opération à faire trois fois ;
- sécher le précipité à l'étuve (une à deux nuit(s) à 80°C) ;
- les séries sont en général de douze échantillons, dont un blanc en début de séquence, et un blanc en fin de séquence. Deux séries, peuvent être facilement menées, de front (en fonction de l'espace dans la salle dédiée, et du nombre d'opérateurs). Le temps moyen, entre le rinçage des tubes et la mise à l'étuve, est de deux à trois jours.

Annexe 3 : Hauteur annuelle des précipitations au niveau des stations synoptiques de Tahoua

Année	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
Précipitation annuelle Konni	673	990,2	931,3	644,2	561,7	502,3	685,8	622,4	695,7	429,1
Précipitation annuelle Tahoua	353,4	528	461,7	546,1	468,2	396,7	387,6	533,6	477,8	315
Année	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
Précipitation annuelle Konni	551,3	525,5	460,6	628	571,7	638,7	568,1	523	589	557,1
Précipitation annuelle Tahoua	582	555,2	342,6	431,8	477,9	463,8	497,9	407,6	317	421,7
Année	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Précipitation annuelle Konni	388,1	328,4	289,4	428,2	487,9	542,3	542	642,4	494,4	496,4
Précipitation annuelle Tahoua	267,2	267,1	244,9	421,2	421,1	391,7	360,3	565,7	293,8	313,4
Année	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Précipitation annuelle Konni	395,5	320,6	386,6	375,2	358,7	445,5	334,3	545,8	484,7	448,1
Précipitation annuelle Tahoua	350,3	206	235,4	275,9	220,4	325	272,1	316,3	367	333,1
Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Précipitation annuelle Konni	637,5	532,1	443,1	733,1	442,2	533,1	428	531,7	625,6	439,7
Précipitation annuelle Tahoua	508,8	339,8	256	635,6	345	347,6	304	480,2	490,3	322,7
Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Précipitation annuelle Konni	321,7	439,7	467,6	507,6	588,1	794	433	629	358	626,7
Précipitation annuelle Tahoua	377,3	401	373,1	205,5	458,7	327,8	357,4	451,6	412,3	360,5

Annexe 4 : Nombre de jours de pluie aux stations synoptiques de la région de Tahoua

Année	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
Nombre de jours de pluie Konni	55	56	54	62	60	51	63	59	61	52
Nombre de jours de pluie Tahoua	51	60	58	60	55	51	67	42	45	39
Année	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
Nombre de jours de pluie Konni	53	56	56	53	46	55	62	58	72	52
Nombre de jours de pluie Tahoua	52	49	53	54	55	54	71	72	57	54
Année	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Nombre de jours de pluie Konni	59	46	50	70	65	67	53	72	63	50
Nombre de jours de pluie Tahoua	45	42	44	55	60	69	61	73	56	42
Année	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Nombre de jours de pluie Konni	48	39	45	51	59	55	50	56	55	47
Nombre de jours de pluie Tahoua	41	37	37	48	53	49	41	51	60	51
Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Nombre de jours de pluie Konni	65	53	53	75	50	52	57	57	75	61
Nombre de jours de pluie Tahoua	67	57	45	68	54	54	58	52	64	51
Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nombre de jours de pluie Konni	61	60	65	57	48	54	50	58	48	60
Nombre de jours de pluie Tahoua	44	58	59	41	54	56	53	49	60	54

Annexe 5 : Température et valeur d'indice d'aridité à la station synoptique de Tahoua

Année	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
Tmax_moyenne_annuelle	36,41	36,05	35,79	35,53	35,37	35,93	35,74	36,09	35,87	35,99
Tmin_moyenne_annuelle	21,42	20,79	20,93	21,48	21,44	21,61	21,22	21,61	21,38	21,46
Tmoyenne_annuelle	28,92	28,42	28,36	28,51	28,41	28,77	28,48	28,85	28,63	28,73
Indice d'aridité	9,08	13,74	12,04	14,18	12,19	10,23	10,07	13,73	12,37	8,13
Année	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970
Tmax_moyenne_annuelle	34,99	35,61	36,40	35,74	36,11	36,07	35,95	36,61	37,36	36,37
Tmin_moyenne_annuelle	19,86	21,69	22,30	21,37	21,56	21,45	21,70	22,03	23,08	21,87
Tmoyenne_annuelle	27,43	28,65	29,35	28,56	28,84	28,76	28,83	29,32	30,22	29,12
Indice d'aridité	15,55	14,36	8,71	11,20	12,31	11,97	12,82	10,37	7,88	10,78
Année	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980
Tmax_moyenne_annuelle	36,68	36,97	37,49	35,80	35,77	36,10	35,64	36,10	36,59	36,58
Tmin_moyenne_annuelle	22,05	22,50	22,84	21,86	21,67	22,08	21,32	22,00	22,28	22,48
Tmoyenne_annuelle	29,37	29,74	30,17	28,83	28,72	29,09	28,48	29,05	29,44	29,53
Indice d'aridité	6,79	6,72	6,10	10,85	10,88	10,02	9,36	14,49	7,45	7,93
Année	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Tmax_moyenne_annuelle	36,28	36,17	37,38	35,55	35,17	35,60	36,26	35,22	35,19	35,96
Tmin_moyenne_annuelle	21,92	22,33	22,86	23,03	22,51	23,26	22,63	22,46	21,82	22,62
Tmoyenne_annuelle	29,10	29,25	30,12	29,29	28,84	29,43	29,45	28,84	28,51	29,29
Indice d'aridité	8,96	5,25	5,87	7,02	5,67	8,24	6,90	8,14	9,53	8,48
Année	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Tmax_moyenne_annuelle	35,17	34,74	62,84	35,06	35,94	36,34	35,80	35,99	36,04	35,92
Tmin_moyenne_annuelle	22,32	21,73	22,60	22,30	22,46	22,46	22,73	23,09	22,57	22,09
Tmoyenne_annuelle	28,75	28,24	42,72	28,68	29,20	29,40	29,27	29,54	29,31	29,01
Indice d'aridité	13,13	8,89	4,86	16,43	8,80	8,82	7,74	12,14	12,47	8,27
Année	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Tmax_moyenne_annuelle			36,13	36,39	36,38	36,24	36,22			
Tmin_moyenne_annuelle			22,58	22,85	23,22	22,69	22,78			
Tmoyenne_annuelle			29,36	29,62	29,80	29,47	29,50			
Indice d'aridité			9,48	5,19	11,53	8,31	9,05			

Annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Abalak F1	502868	23/03/2011	19/04/2011	6,285000	15,459000	420	140	20	76
Abalak P1			1970	6,284300	15,459638	423	82	26	77
Abalak P2			2000	6,279300	15,467694	427	86	26	
Abalo				6,337500	14,391600	349	147		
Aboroki	503783	24/04/2006	02/04/2006	6,379722	14,271389	373	142	13	80
Abouhaya	502890			6,709000	15,376000	432	159	32	57
Affala				5,248000	15,117000	430	766	22	117
Agando	504528						735	31	23
Akarana	502943			5,928000	15,817000	450	200	34	82
Akarazraz				6,450000	16,133000	447	90	15	76
Ala	503976	31/05/2008	17/06/2008	5,490300	14,529200	333	500	65	30
Alagadad	503393	janv-02	janv-02	5,947500	15,551900	492	400	22	148
Albadah	503817	26/03/2006	30/03/2006	6,026667	17,248333	366	46		28
Allakaye	504458	29/04/2009	21/05/2009	5,747777	14,410000	484	506	39	178
Ambaroura	504475	06/11/2008	28/11/2008	5,492500	14,454166	363	533	56	63
Anekar		nov-14	nov-14	5,040830	15,369160	392	657		
Aouloumatt	501528			6,032000	14,229000	333	222	12	38
Arroukou				5,310000	16,640000	380	335	12	59
Assougué				5,743050	14,385400	477	488		177
Azelik	503951			5,981400	16,149200	444	237	35	74
Azerori Nomade	501249			5,909000	14,142000	345	290	55	42
Azeye	503348			6,310600	15,026400	509	250		167
Baban Katami				6,254000	14,523000	367	139	9	52
Bada Guichiri	504474	06/01/2009	31/01/2009	5,365555	14,525555	361	580	55	53
Bagaré	503785	27/05/2006	31/05/2006	6,531700	14,261100	414	177	15	75
Bagga	504467	20/05/2009	29/06/2009	5,332500	14,671666	370	634	85	61
Bagueye	502750			5,883000	14,850000	538	619	15	116

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Bambeye	502475			5,096700	14,722000	342	731	18	34
Baoussa				6,055000	13,990000	326	208	10	54
Barmou 1	502804			5,398000	15,102000	440	714	22	101
Barmou 2	503515			5,401666	15,105833	451	713	53	116
Bélétché				6,080270	13,729400	280	103		
Binguirawa Kiaro	503931	01/11/2007	04/11/2007	6,198600	14,417500	349	145	27	44
Binguiré	504469	31/10/2009	18/11/2009	5,291388	13,965833	316	583	72	30
Bourdi				5,404000	14,576000	381	524	12	56
Bourdin Goram	502409			5,403600	14,576400	381	524	12	56
Bourkele	503934	07/11/2007	10/11/2007	6,377800	14,538900	347	98	18	33
Bouza F1	502162	10/03/1967	28/04/1967	6,040000	14,425600	396	272	80	90
Bouza F2		06/06/2014	20/06/2014	6,044917	14,425861	402	281	51	93
Chadawanka	503395	mars-02	mars-02	6,120000	15,034000	506	309	17	167
Chaoulawa	501476			6,175300	13,935600	320	130	12	42
Chinawa	503687	15/03/2006	18/03/2006	6,264720	14,105000	393	147	14	99
Chinchinanane	503164			5,340000	16,105000	401	494	30	77
Chintassalatene				5,805000	16,059000	447	202		67
Dabnou	503832	15/11/2007	25/12/2007	5,365300	14,152800	310	542	34	17
Dakoro chazoumaila	503673	23/02/2006	25/03/2006	6,215278	13,888611	324	101	13	48
Dakouraoua Dan Dadji	503703	15/04/2006	16/04/2006	6,302200	13,983300	348	137	19	61
Damboutane 2	502946			5,492000	15,934000	403	480	51	61
Damni gm Tsaidawa	503671	21/02/2006	24/02/2006	6,125834	13,920834	319	117	21	39
Dan Gona	504473	24/09/2009	20/10/2009	5,031388	14,270555	284	741	43	(+1)
Dan Tachi Gobirwa				6,143050	13,803800	307	144		
Daré et Dara	503975	01/02/2008	28/02/2008	5,490000	14,563600	363	512	39	43
Dawaki Dan Toudou	503702	11/04/2006	14/04/2006	6,232500	14,011400	342	140	18	58
Dawaki Doné Salamey	503686	13/03/2006	15/03/2006	6,236667	14,019167	342	108	18	60

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Dawaki Legass	503685	26/03/2006	15/04/2003	6,213900	14,038300	362	177	4	113
Dikitane				6,460000	14,541600	344	75		
Dikitane	503565			6,460000	14,541667	345	71	95	23
Dindi				5,611387	14,416667	359	520	34	50
Djataka	501017			6,167778	13,773334	290	80	12	11
Doguéraoua F1	500122	mars-83	mars-83	5,592720	13,969138	293	425	20	11
Doguéraoua F2		06/03/2014	29/03/2014	5,592861	13,968861	294	444	40	10
Doli	504465	14/03/2009	20/04/2009	5,343800	15,030830	400	641	62	80
Doudoubeye Baba	502414			5,543000	14,544000	343	499	57	32
Douhoua	502417			5,598000	14,531000	363	528	51	52
Ediri Mahaman 1	503809	22/07/2006	24/07/2006	6,396667	14,299444	375	102	18	66
Ediri Mahaman 2	503810	25/07/2006	28/07/2006	6,396667	14,299444	375	109	17	70
Egawane	502918			5,560000	16,486000	372	282	50	40
El Roudou Zongo	501066			5,903000	13,994000	299	226	12	37
Founkoye	502658			5,350000	14,760000	374	668	34	79
Foura Guirké		avr-14	avr-14	5,536666	14,151111	367	451	76	73
Gadamata	504462	08/02/2009	06/04/2009	6,087222	14,813888	480	376	45	149
Galmaoua	502659			5,550000	14,750000	380	577	45	49
Galmi Barrage				5,700000	13,968000	310	380	79	36
Galmi Hopital	500125			5,667000	13,970000	317	357	59	29
Gamé	504456	02/05/2009	22/05/2009	6,046111	14,475555	530	493	30	213
Gangara	503689	19/03/2006	21/03/2006	6,347200	14,122200	377	146	17	79
Gardaye	501511			6,200600	13,989700	345	142	9	60
Garhanga	504459	15/02/2009	09/03/2009	5,766388	14,560000	521	555	36	199
Garo Malamey	503692	07/04/2006	11/04/2006	6,531667	14,256667	411	119	11	88
Gojé				5,416111	14,019722	320	481		29
Goram	502411			5,609000	14,580000	374	535	24	66

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Goundouroum	503796	11/06/2006	15/06/2006	6,411667	14,331667	396	123	8	86
Gounfara	503235			5,713900	14,174200	343		50	37
Gourbin Kada 1	503697			6,117800	13,852700	305	97	20	18
Gourbin Kada 2	503712			6,096900	13,841100	282	109	20	17
Gourmougna Dania	504480			6,208333	13,666667	292	60	8	12
Gueza	502500			5,007500	14,566000	317	621	10	116
Guidan Addo	501182			6,120000	13,883000	304	135	14	21
Guidan Badjé	503813			6,431667	14,431666	368	118	15	56
Guidan Bagouari	503778			6,255556	13,769444	296	82	20	28
Guidan Baoulé	503807	17/07/2006	19/07/2006	6,315000	14,323300	373	117	18	64
Guidan Bodo	503093			6,063000	14,432000	450	297	16	12
Guidan Dazao 1	503802	23/06/2006	26/06/2006	6,455278	14,436666	374	63	14	18
Guidan Dazao 2	503150	19/07/2006	20/07/2006	6,455278	14,436666	374	131	7	56
Guidan Djibo	503085			6,202000	14,657000	438	282	15	138
Guidan Gara Roumboukawa	501254			6,247778	13,816944	316	64	8	37
Guidan Garo				6,338333	14,437222	325	109		
Guidan Ider		juil-14	juil-14	5,313333	14,011388	279	504		(+1)
Guidan Idi Agawa	501490			6,298000	13,900000	328	96	11	43
Guidan Jika	503677	06/04/2006	10/04/2006	6,321667	13,888333	330	90	18	44
Guidan Kago	502662			5,533000	14,533000	356	579	41	64
Guidan Maissabe	503706			6,269444	13,802778	296	78	20	18
Guidan Makéra				5,942700	13,991940	299	208		
Guidan Oubandawaki	503722	31/05/2006	02/06/2006	6,530500	14,238300	391	146	2	114
Guidan Raki		oct-14	oct-14	5,239444	13,890833	319			
Hayaye	503682	11/03/2006	12/03/2006	6,223333	13,935833	320	129	20	37
Hiro	504463	13/02/2009	20/03/2009	5,632222	14,702500	392	517	60	70
Ibecetane 2	502934			5,849700	15,433300	520	446		

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Ibecetane 3	502935			5,850000	15,433000	519	406	20	134
Ibohamane F1	25711	11/04/1986	10/05/1986	5,927100	14,793805	411	388	57	87
Ibohamane F2		16/07/2014	06/08/2014	5,923028	14,794222	407	388	49	89
Ighouzaren	503347			5,016700	16,930000	364	474	40	54
Ikizimane	502950			6,425000	15,617000	424	151	9	77
Ikotayan	503346			4,316700	16,283100	318	594	45	28
Iliba Fonfo	503089	juin-11	juin-11	4,711600	17,006400	351	505	32	37
Illéla F1	501921	juil-67	juil-67	5,246916	14,457027	312	592	108	9
Illéla F2		28/01/2014	17/02/2014	5,246361	14,457056	312	590	105	8
In Arouinat	503090			4,875000	17,687500	322	309		10
In Garasaman	503082			6,265000	14,555000	383	152	39	54
In Orfane	503091			5,535833	17,299723	354	208		40
In Wagar II	502970			6,666667	16,100277	474	136	6	88
Inargad(Inarigan)	503394			6,168000	15,740000	450	200	26	114
Infene	503904			4,846000	15,808000	394	711	8	79
Ingarsman	503506	07/11/2004	10/11/2004	6,265000	14,555000	383	152	39	55
InKarkada	503968	26/04/2008	16/05/2008	4,968300	14,834160	341	680	35	70
Insafari	504461	27/01/2009	10/02/2009	5,940000	14,728300	402	504	47	133
Intamat				4,941000	16,551000	353	471	63	51
Izakwa	503411	févr-02	févr-02	5,819167	15,652500	464	406	29	114
Kade Bade	500167			5,346000	14,001000	293	625	49	(+2)
Kahé Damé	505572	05/07/2009	23/07/2009	5,460555	14,138611	351	491	92	52
Kaiwa 1 et 2				6,176940	13,838300	312	118		
Kalfou Dabagui 1	502772			5,519000	14,865000	471	695	11	146
Kalfou Dabagui 2	504451			5,521900	14,866100	466	689	49	149
Kalfou Rafi	502775			5,529000	14,869000	424	663	26	105
Kao	503415			5,720000	15,410000	466	440	25	139

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Kao Kao	502923			6,261700	16,123900	442	137	32	74
Kaoura Abdou	500629			5,650000	14,450000	386	475	50	45
Kaoura Alassane	504471	09/10/2009	25/10/2009	5,445833	14,066666	337	480	80	41
Karadji Sud	502664			5,500000	14,666000	362	608	38	33
Karamé				6,420830	14,140500	361	123		
Karanguia	503868	30/07/2006	05/08/2006	6,315000	14,323300	373	123	16	78
Karaourayé				6,050000	13,845000	314	187		
Karo Baka	501259			6,240000	13,830000	313	64	16	16
Kawara				5,666944	14,069166	298			
Kehehe 1	504453			5,618611	15,038889	400	601	51	76
Kehehe 2	504454	févr-09	févr-09	5,619167	15,037222	398	585	48	76
Keita F1	502346	mai-87	mai-87	5,773380	14,764000	395	477	90	82
Keita F2		02/06/2014	15/07/2014	5,768750	14,758306	387	428	61	66
Kélème				5,809166	14,206111	394	357		82
Kire Kafada	503907	19/11/2007	29/11/2007	5,903900	13,929200	290	232	24	8
Kodadou	503683	10/03/2006	13/03/2006	6,240600	13,970000	319	131	8	37
Kolatawa	503669			6,078055	13,830556	308	84	20	28
Kolatawa 1	503668			6,078055	13,830556	308	91	20	26
Kollom Baba	502781			5,350000	14,883000	418	711	26	96
Konkomawa	501171			6,128334	13,904445	316	105	8	36
Konkomawa Tabani	504483			6,066667	13,825000	304	85	7	22
Konni 1 SEEN		26/11/2013	20/12/2013	5,248806	13,805944	283	541	106	(+1)
Konni 2 SEEN		10/12/2013	31/12/2013	5,249250	13,806139	279	542	110	(+1)
Konni F1		24/11/1971	23/12/1971			0	542	92	(+4)
Konni F3	500189	19/09/1991	08/11/1991	5,249160	13,805700	280	541	105	(+2)
Konni F4		01/06/2004	01/06/2004	5,250416	13,806972	271	569	61	(+3)
Korama Lamso	503709			6,077778	13,747222	278	65	20	8

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Koré Kajenko				6,320500	14,553610	358	171		
Koré Mahalba				6,448050	14,089400	357			
Koren Kaoura	503933	14/11/2007	18/11/2007	6,217500	14,491400	382	181	17	65
Koren Kilgenki	503808			6,320000	14,555000	356	103	18	37
Koren Mahalba	501006			6,430000	14,096000	340	149	4	42
Kossa Babbah	500583			5,521944	14,288056	384	580	29	75
Koulki Da Jini	503086			6,310555	14,761666	449	230	30	95
Koumassa	503504	23/10/2004	31/10/2004	5,872000	13,878000	318	203	47	16
Kozoro Sama Koura	503670	18/02/2006	21/02/2006	5,977200	13,837200	312	141	21	26
Laba 1	502179			5,938000	14,619000	533	511	44	214
Laba 2	504452			5,938600	14,621400	538	518	33	214
Leyma	503906	25/10/2007	31/10/2007	6,077500	14,233100	334	207	18	32
Leyma Tawa	503801	12/06/2006	16/06/2006	6,365000	14,425000	338	122	13	73
Louberat	503816	20/03/2006	26/03/2006	6,135000	16,890556	391	70	14	22
Loudou	504460	01/02/2009	25/02/2009	5,902222	14,941388	486	428	41	156
Machekari	503954			5,160000	15,842200	377	538	53	70
Madaoua F1	501530	mars-61	mars-61	5,960000	14,076083	313	259	80	34
Madaoua F2	501542	avr-71	avr-71	5,955600	14,075600	322	263	40	37
Madaoua F3	501544	sept-90	sept-90	5,955694	14,076083	333	265	39	39
Madetta II	501799			6,028000	14,264000	350	301	22	58
Magaria Makéra	504478	22/06/2009	10/07/2009	5,771666	14,008055	407	412	50	125
Mai Eroufa 1	503805	10/07/2006	13/07/2006	6,353600	14,325800	391	120	16	74
Mai Eroufa 2	503806	10/07/2006	16/07/2006	6,353600	14,325800	391	145	16	67
Mai Magaria				6,493300	14,475000	376	127	7	54
Maissassap 1	503151	28/07/2006	01/08/2006	6,340300	14,307200	375	124	18	67
Maissassap 2	503804	07/07/2006	10/07/2006	6,340200	14,307200	376	127	17	72
Makera Guidan Moussa	503725	15/06/2006	17/06/2006	6,486111	14,286667	416	140	4	95

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Malbaza Bourgoum	504470	10/07/2009	0608/2009	5,515277	13,930277	294	484	100	0
Malbaza Usine 1	500128			5,508100	13,956400	321	457	45	37
Malbaza Usine 2	500129			5,510000	13,956000	321	455	77	33
Maley Campement				6,145000	13,878000	305	147		
Maley Peulh	503672	21/02/2006	28/02/2006	6,143333	13,876667	299	90	19	29
Maley Sedentaire	503779			6,161111	13,908334	307	100	20	26
Malindou	503905	13/10/2007	25/10/2007	5,837222	14,060277	341	290	22	57
Mallalebi	503908	12/11/2007	14/11/2007	6,066700	13,830600	300	106	18	28
Mambawa	503505	01/11/2004	05/11/2004	6,253000	14,536000	362	123	40	55
Manzou	501580			6,323600	14,045600	328	201	11	45
Maraké	503715			6,172222	13,808333	310	98	21	12
Marmaro				6,263000	14,187000	367	104	9	67
Matchouda				6,307500	14,381600	333	106		
May Magaria	503803			6,493333	14,475000	376	127	7	54
Mayata	503392			6,427000	14,880000	447	160	29	118
Midal	503412	juin-02	juin-02	4,450555	16,918612	329	663	45	28
Moghheur	502454			5,286000	14,658000	347	636	18	24
Moujia		août-14	août-14	5,375000	14,366940	319	588		40
Mouléla	503929	13/06/2008	25/06/2008	5,669400	13,999722	317	353	30	32
Moulléla				5,657222	14,474167	372	515	40	55
Nakonawa	503714			6,118333	13,769444	298	97	21	18
Nakonawa Sami	503708			6,075000	13,785556	296	83	20	16
Nobi	503920	26/12/2007	18/01/2008	5,534160	14,015277	326	431	31	44
N'Wala Toumbourkou	503707			6,078055	13,911111	316	115	20	24
Raha	500644			5,591667	14,460000	351	528	40	37
Régao				6,284720	14,373800	330	126		
Rididi	504466	16/05/2009	20/11/2009	5,324166	14,713888	375	606	31	68

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Roukouzoum	500619			5,508333	14,436667	337	551	39	24
Roumbouki	501086			5,930000	13,960000	287	144	15	9
Roumbouki Guidan Mano	501196			6,227778	13,846666	313	85	20	38
Sabon Gari 1				6,188611	14,335833	317	235		15
Sabon Karé	500101			5,701700	13,969200	318	380	40	36
Sabon Sara Gabass	503932	05/11/2007	08/11/2007	6,204400	14,387500	345	130	23	30
Sabonga	503925	27/05/2008	13/06/2008	5,648600	14,185600	336	369	33	39
Sabré Guidan Djibo	501189			6,204444	13,834167	318	83	7	37
Sabré Makéra	503674			6,209722	13,838056	320	112	11	40
Sakolé 1	502386			5,706000	14,834000	392	489	44	65
Saléwa 1		juil-14	juil-14	5,337500	14,068055	299	576		5
Samo	502674			5,515000	14,700000	354	596		37
Soungalé	501317			5,871000	14,223000	382	255	12	42
Souraka				6,496380	14,528050	339	86		
Souraka	503812			6,425000	14,425000	382	78	20	22
Tabalak				5,656100	15,094200	398	615	72	65
Taboé-Ladama	503935	19/01/2008	01/02/2008	5,741940	14,226380	337	353	31	37
Tabotaki	503903			6,161700	14,616900	426	377	26	118
Tadouta				5,792000	14,521200	450	477		138
Tagalal	503510	07/12/2004	18/12/2004	6,311000	14,762000	444	230	30	96
Tagigalt	502931			5,720000	16,134000	426	185	33	80
Tahoua F1	502828			5,274000	14,896000	388	685	85	79
Tahoua F2	15281	juin-72	juin-72	5,256250	14,889972	382	690	90	73
Tahoua F3	502827			5,271940	14,884138	382	630	50	73
Tahoua F4	24882	janv-86	janv-86	5,255270	14,890100	388	688	44	74
Tahoua F5	80003	sept-88	sept-88	5,272916	14,900805	384	683	53	71
Tahoua F6	503489	avr-04	avr-04	5,254500	14,889720	384	697	74	79

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Tahoua F7	503490	avr-04	avr-04	5,294270	14,889194	398	696	76	81
Tajaé Nomade	504476	25/06/2009	19/07/2009	5,298055	14,227500	283	564	95	(+1)
Takanamatt F1	502599	juil-84	juil-84	4,770380	15,142700	332	799	60	45
Takanamatt F2		03/11/2014	12/12/2014	4,770111	15,142667	327	794	75	45
Takarwilit	503410	nov-01	nov-01	4,341000	15,680000	332	751	45	34
Takel Guidan Bawa				6,220500	13,915000	319	127		
Takorka 1	501163			6,182000	13,923000	310	107	13	28
Taksanainasse	503413	août-02	août-02	4,634000	15,952000	335	569	44	43
Tama	504457	13/04/2009	03/05/2009	5,769166	14,280000	355	368	86	56
Tamak Guidan Maazou	503800			6,390000	14,440000	335	73	15	14
Tamaské F2		08/08/2014	02/09/2014	5,654028	14,829972	412	531	46	90
Tamaské F1	502384	juin-80	juin-80	5,654361	14,830000	410	515	35	88
Tamaya 1	502883			6,769000	15,815000	462	142	39	78
Tamaya 2	502885			6,770000	15,815000	468	156	39	91
Taoudawene	503950			5,621100	16,371380	410	300	32	68
Tapkin Godia	504488			5,964167	13,749722	294	95		45
Taraouraou	503071			6,075000	14,331000	364	239	38	71
Tarbein Wouya	503704			6,313334	13,937500	329	113	19	46
Tassa Takoret	503169			5,476000	17,503000	350	188	15	36
Tassara F1	502926	sept-85	sept-85	5,650000	16,716000	369	147	20	30
Tassara F2		29/01/2014	09/02/2014	5,643472	16,808361	367	164	32	45
Taza	502736			5,203000	15,360000	468	797	12	168
Tazalite	503168			5,260000	16,900000	369	430	46	39
Tchimbabatane	502220			6,025000	14,707000	432	385	13	104
Tchinkaki	502791			5,452000	14,801000	438	664	16	119
Tchintabaraden F2	502963	mai-11	mai-11	5,797000	15,885000	427	236	30	86
Tchintabaraden F1	24537	sept-85	sept-85	5,808270	15,899940	437	251	40	84

Suite annexe 6 : Paramètres techniques de forage du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Début forage	Fin forage	Longitude	Latitude	Altitudes	P.Equipée	Débit	N.S
Telemces	503414			4,797000	15,620000	360	686	41	58
Tillia F1	15932	1979	1979	4,791600	16,125000	345	761	60	51
Tofaminir	502876			6,548000	15,840000	442	145	38	72
Toro	504464	05/03/2009	20/04/2009	5,494160	15,008610	376	690	79	76
Toudouni	502685			5,450000	14,730000	329	594		27
Toudounia/Mahaledi	503507	17/11/2004	23/11/2004	6,401000	14,551000	345	151	38	36
Toufafi 2001				5,980000	14,046111	302	213		
Toulou Magé				6,316000	13,930000	326			
Touloumadgé Arawa	503679	08/03/2006	10/03/2006	6,313334	13,937500	329	111	16	48
Tounfafi Ladama		sept-14	sept-14	5,708000	14,209720	331	359		35
Toukoulou	501480			6,230000	13,900300	335	134	30	51
Tsamaye	503688	17/03/2006	25/03/2006	6,275000	14,127800	386	175	10	91
Wadey				6,116000	14,754000	461	386	15	133
Wartagadess	503724	05/06/2006	13/06/2006	6,486100	14,286000	410	179		109
Zabouré				6,255830	13,763800	293	87		
Zabouré	503710			6,266667	13,786111	297	75	21	14
Zakin Rowa	501494			6,349200	13,841700	325	201	25	40
Zongo Kouka				6,381700	14,509700	336	141	17	74
Zongon Djatamirou	504485			6,261667	13,711945	304	72	9	22
Zouba	503691	25/03/2006	27/03/2006	6,439167	14,158334	365	127	18	67
Zouraré Sabara	504477	26/11/2008	17/12/2008	5,434166	14,246944	340	546	75	36

Annexe 7 : Paramètres hydrodynamiques du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Longitude	Latitude	Débit	N.S	Durée Pompage	Rabatement	Transmissivité
Alagadad	503393	5,947500	15,551900	22	148	19	3	1,50E-02
Allakaye	504458	5,747777	14,410000	39	178	2	6	4,00E-03
Azerori Nomade	501249	5,909000	14,142000	55	42	12	3	2,00E-02
Bada Guichiri	504474	5,365555	14,525555	55	53	2	5	3,00E-02
Bagga	504467	5,332500	14,671666	85	61	20	6	2,00E-01
Bambeye	502475	5,096700	14,722000	18	34	24	4	4,50E-03
Barmou 1	502804	5,398000	15,102000	22	101	24	2	2,20E-02
Barmou 2	503515	5,401666	15,105833	53	116	20	6	1,00E-02
Binguirawa Kiaro	503931	6,198600	14,417500	27	44	12	2	1,43E-02
Binguiré	504469	5,291388	13,965833	72	30	1	8	2,00E-02
Bourkele	503934	6,377800	14,538900	18	33	12	1	2,32E-02
Bouza F2		6,044917	14,425861	51	93	42	4	1,70E-02
Chadawanka	503395	6,120000	15,034000	17	167	20	1	2,50E-02
Chinchinanane	503164	5,340000	16,105000	30	77	6	0	3,30E-03
Dabnou	503832	5,365300	14,152800	34	17	12	18	2,85E-03
Dan Gona	504473	5,031388	14,270555	43	(+1)	1	7	1,00E-02
Daré et Dara	503975	5,490000	14,563600	39	43	12	3	1,49E-02
Doguéraoua F2		5,592861	13,968861	40	10	32	79	1,80E-02
Doli	504465	5,343800	15,030830	62	80	2	21	3,90E-03
Gadamata	504462	6,087222	14,813888	45	149	2	7	2,00E-02
Gamé	504456	6,046111	14,475555	30	213	2	10	1,00E-03
Garhanga	504459	5,766388	14,560000	36	199	2	16	1,00E-03
Guidan Bodo	503093	6,063000	14,432000	16	12	22	13	1,40E-02
Guidan Djibo	503085	6,202000	14,657000	15	138	22	4	3,30E-03
Ibohamane F1	25711	5,927100	14,793805	57	87	22	2	3,50E-02
Ibohamane F2		5,923028	14,794222	49	89	24	3	2,90E-02
Illéla F2		5,246361	14,457056	105	8	5	16	1,80E-02

Suite annexe 7 : Paramètres hydrodynamiques du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Longitude	Latitude	Débit	N.S	Durée Pompage	Rabatement	Transmissivité
Infene	503904	4,846000	15,808000	8	79	24	49	7,00E-03
Ingarsman	503506	6,265000	14,555000	39	55	22	13	1,70E-03
Insafari	504461	5,940000	14,728300	47	133	2	6	1,00E-02
Kahé Damé	505572	5,460555	14,138611	92	52	1	7	2,00E-02
Kaoura Alassane	504471	5,445833	14,066666	80	41	1	10	1,00E-02
Keita F2		5,768750	14,758306	61	66	30	6	1,30E-02
Kire Kafada	503907	5,903900	13,929200	24	8	12	2	6,62E-02
Konni 1 SEEN		5,248806	13,805944	106	(+1)	72	11	4,80E-02
Konni 2 SEEN		5,249250	13,806139	110	(+1)	12	7	2,30E-02
Koren Kaoura	503933	6,217500	14,491400	17	65	12	2	2,78E-02
Loudou	504460	5,902222	14,941388	41	156	2	9	2,00E-03
Madetta II	501799	6,028000	14,264000	22	58	22	1	7,00E-03
Magaria Makéra	504478	5,771666	14,008055	50	125	1	2	3,00E-03
Malbaza Bourgoum	504470	5,515277	13,930277	100	0	1	23	2,00E-02
Malindou	503905	5,837222	14,060277	22	57	12	3	7,39E-03
Mallalebi	503908	6,066700	13,830600	18	28	12	2	8,06E-02
Mambawa	503505	6,253000	14,536000	40	55	12	10	1,88E-03
Mouléla	503929	5,669400	13,999722	30	32	12	3	1,03E-02
Nobi	503920	5,534160	14,015277	31	44	12	3	8,41E-03
Sabon Sara Gabass	503932	6,204400	14,387500	23	30	12	2	1,96E-03
Sabonga	503925	5,648600	14,185600	33	39	12	5	1,07E-01
Taboé-Ladama	503935	5,741940	14,226380	31	37	12	3	6,35E-03
Tagalal	503510	6,311000	14,762000	30	96	22	3	4,10E-03
Tagigalt	502931	5,720000	16,134000	33	80	12	25	5,60E-04
Tahoua F5	80003	5,272916	14,900805	53	71	24	5	1,00E-02
Tahoua F6	503489	5,254500	14,889720	74	79	21	11	3,00E-03
Tajaé Nomade	504476	5,298055	14,227500	95	(+1)	1	18	1,00E-02

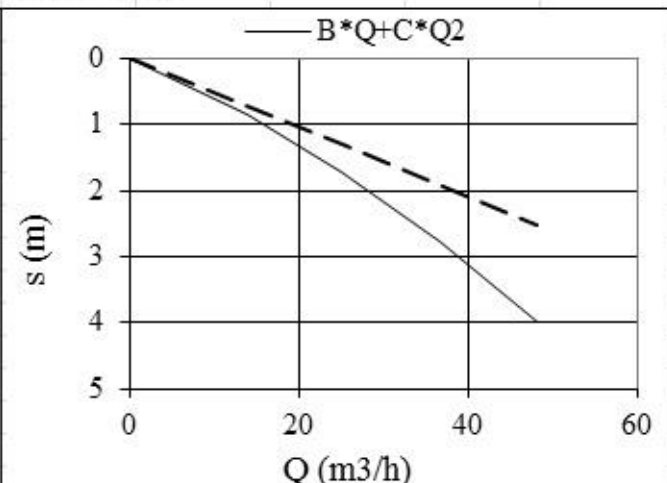
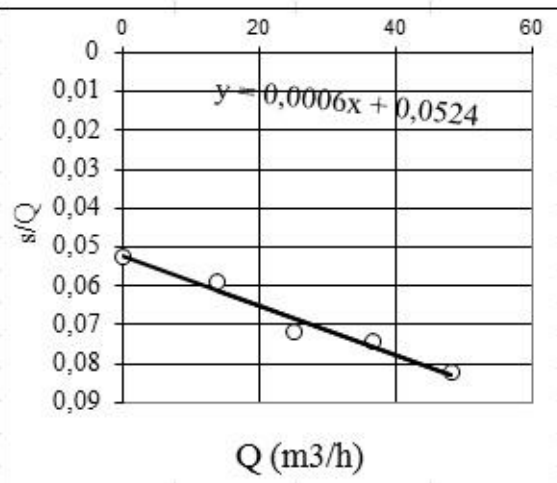
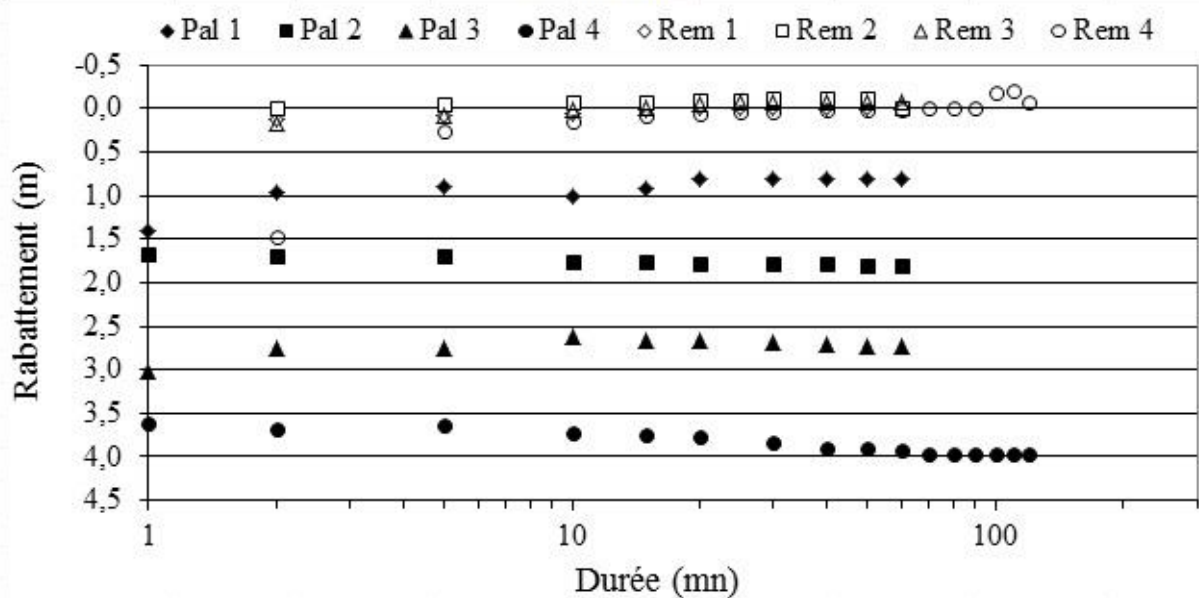
Suite annexe 7 : Paramètres hydrodynamiques du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Sites	IRH	Longitude	Latitude	Débit	N.S	Durée Pompage	Rabatement	Transmissivité
Takanamatt F2		4,770111	15,142667	75	45	48		9,30E-03
Takarwilit	503410	4,341000	15,680000	45	34	20	15	1,40E-03
Taksanainasse	503413	4,634000	15,952000	44	43	18	12	2,40E-03
Tama	504457	5,769166	14,280000	86	56	2	13	4,00E-03
Tamaské F1	502384	5,654361	14,830000	35	88	30	6	1,00E-02
Tamaské F2		5,654028	14,829972	46	90	24	2	3,80E-02
Tamaya 1	502883	6,769000	15,815000	39	78	24	2	9,80E-02
Taraouraou	503071	6,075000	14,331000	38	71	22	3	6,00E-03
Tassa Takoret	503169	5,476000	17,503000	15	36	18	26	2,30E-04
Tassara F2		5,643472	16,808361	32	45	48	36	2,30E-04
Tazalite	503168	5,260000	16,900000	46	39		11	1,70E-03
Telemces	503414	4,797000	15,620000	41	58	18	3	2,90E-02
Tillia F1	15932	4,791600	16,125000	60	51	26	7	7,60E-03
Toudounia/Mahaledi	503507	6,401000	14,551000	38	36	22	5	1,48E-02
Zouraré Sabara	504477	5,434166	14,246944	75	36	1	13	3,00E-02

Annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage de Bouza (F2)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	375		
Altitude (m):	0	Diamètre (mm):	6,0449167		
NS/repère (m):	92,78	Équipement:	14,425861		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	0	Bas:	0
Date palier (jj/mm/aa):	23/06/2014	Crépine 2 haut :	0		
		Cote pompe/sol (m):	124,84	Sous rep.:	
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 30-13		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	3,97	Pertes de charge: B=	5,24E-02
Débit MAX calculé (y compris pert) (m3/h):	75,84	Pertes de charge: C=	6,32E-04

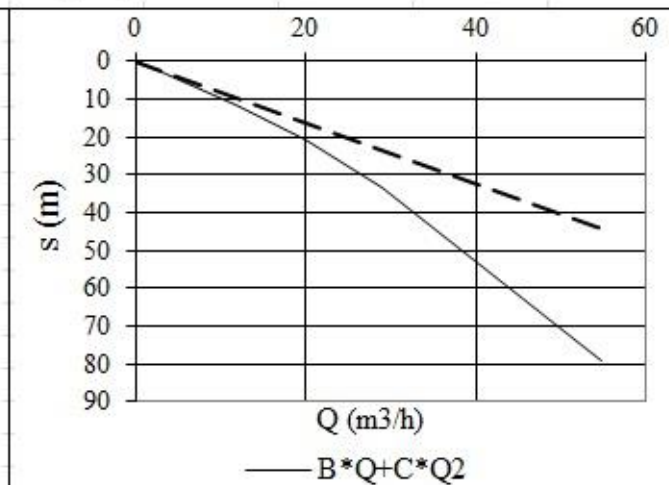
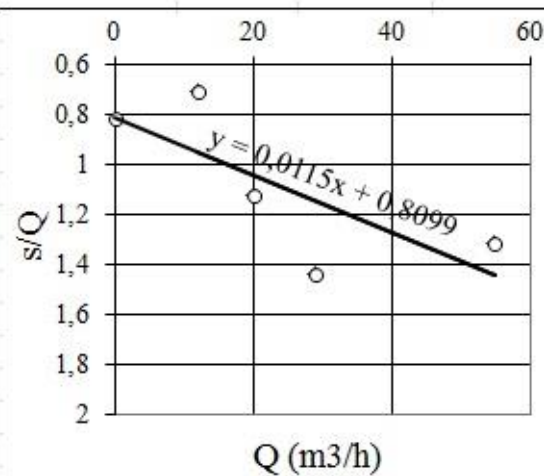
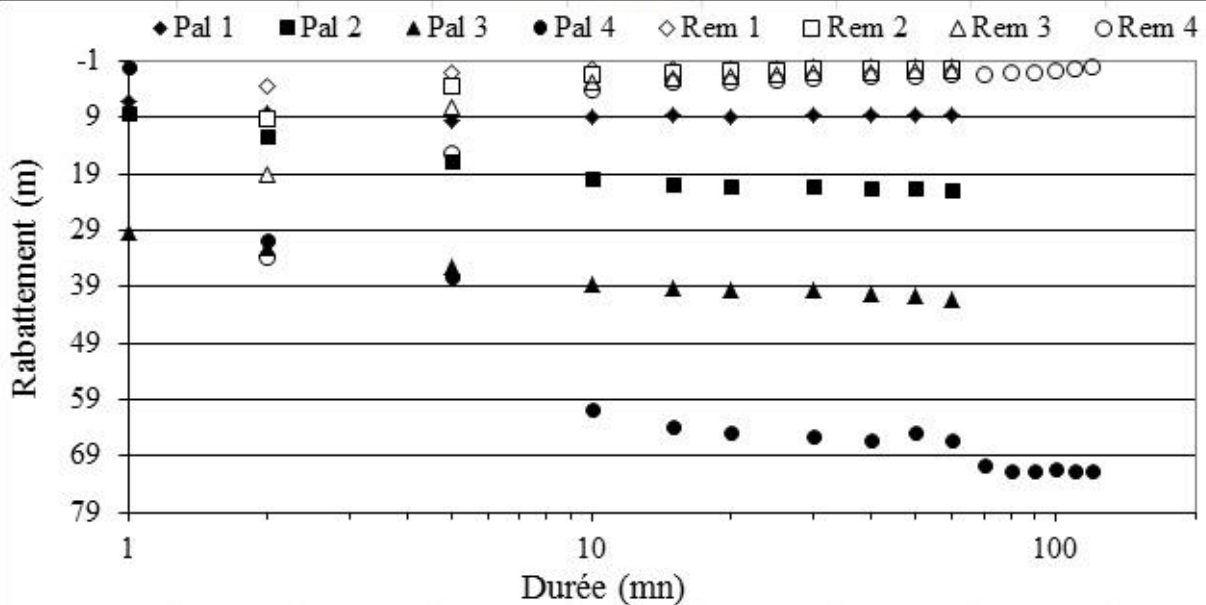
Comptes courant

	Q (m ³ /h)	s (m)	s/Q (h/m ²)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,0523503	0	0		
Pal 1	13,87	0,82	0,0591417	0,7258364	0,8472636	Pal 1	Rem 1
Pal 2	25,11	1,80	0,0716724	1,3147395	1,713138	Pal 2	Rem 2
Pal 3	36,67	2,73	0,0744444	1,9197715	2,7692204	Pal 3	Rem 3
Pal 4	48,20	3,97	0,0823708	2,5231083	3,9903781	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage de Doguérawa (F2)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	450		
Altitude (m):	0	Longitude (Est):	5,5928611		
NS/repère (m):	10,11	Latitude (Nord):	13,968861		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	0	Bas:	0
Date palier (jj/mm/aa):	06/07/2014	Crépine 2 haut :	0		
		Cote pompe/sol (m):	104,96	Sous rep.:	105,46
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 60-19		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	71,75	Pertes de charge: B=	8,10E-01
Débit critique (y compris pert) (m ³ /h):	25,00	Pertes de charge: C=	1,15E-02

l'artésianisme jaillissant s'est déclenché après le quatrième palier

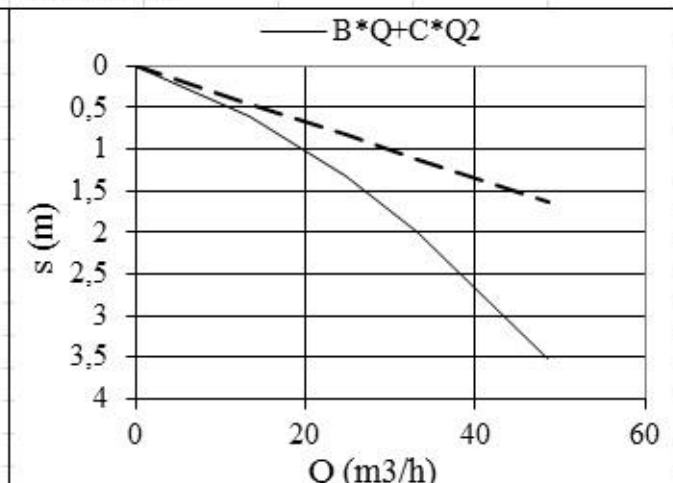
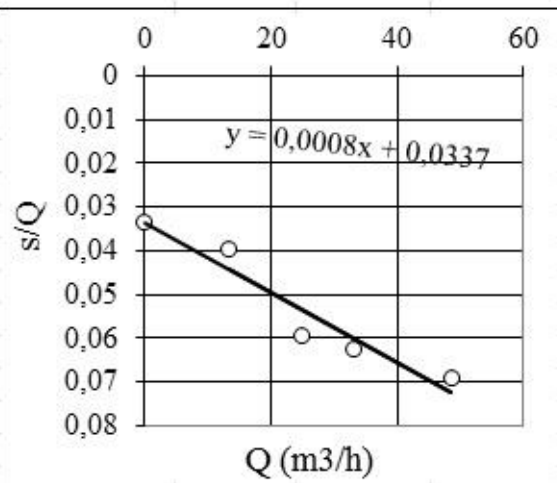
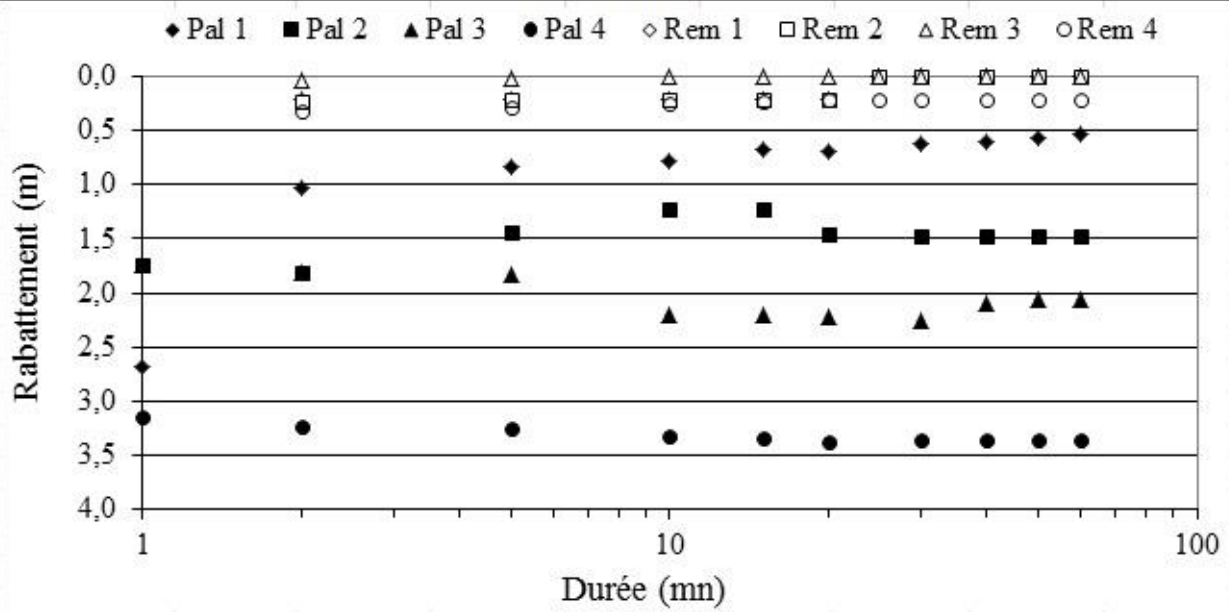
Comptes courant

	Q (m ³ /h)	s (m)	s/Q (h/m ²)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,8099283	0	0		
Pal 1	11,96	8,45	0,7065217	9,6867425	11,333718	Pal 1	Rem 1
Pal 2	20,00	22,39	1,1195	16,198566	20,804152	Pal 2	Rem 2
Pal 3	29,00	41,68	1,4372414	23,487921	33,171165	Pal 3	Rem 3
Pal 4	54,80	71,75	1,3093066	44,384071	78,960965	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage d'Ibohamane (F2)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	0		
Altitude (m):	0	Diamètre (mm):	5,9230278		
NS/repère (m):	88,56	Équipement:	14,794222		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	0	Bas:	0
Date palier (jj/mm/aa):	04/08/2014	Crépine 2 haut :	0		
		Cote pompe/sol (m):	121,41	Sous rep.:	
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 60-11		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	3,37	Pertes de charge: B=	3,37E-02
Débit MAX calculé (y compris pert) (m3/h):	100,09	Pertes de charge: C=	7,95E-04

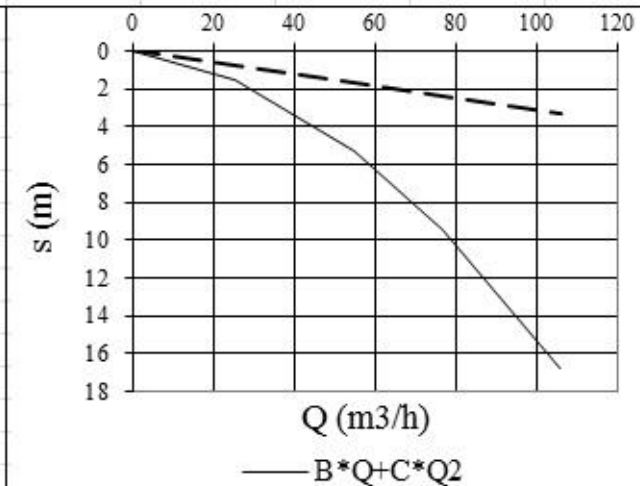
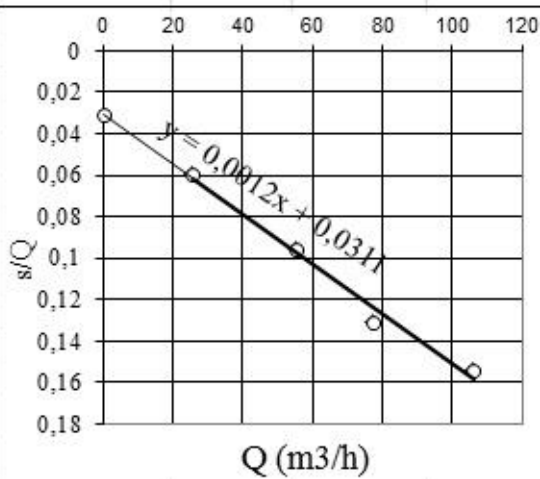
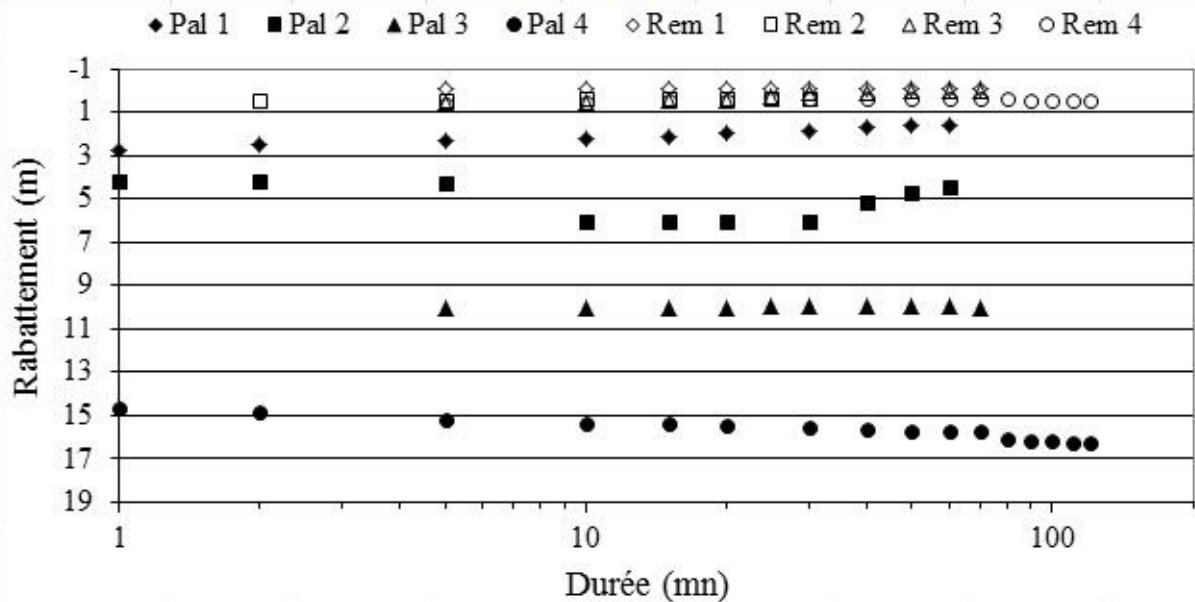
Comptes courant

	Q (m3/h)	s (m)	s/Q (h/m2)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,0336684	0	0		
Pal 1	13,44	0,53	0,0394443	0,4523913	0,5959417	Pal 1	Rem 1
Pal 2	24,82	1,47	0,0592264	0,8356501	1,3254569	Pal 2	Rem 2
Pal 3	33,23	2,07	0,0622931	1,1188015	1,996776	Pal 3	Rem 3
Pal 4	48,67	3,37	0,0692447	1,6385746	3,5218255	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage d'Illéla (F2)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	600		
Altitude (m):	0	Longitude (Est):	5,2463611		
NS/repère (m):	7,97	Latitude (Nord):	14,457056		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	577,94	Bas:	584,6
Date palier (jj/mm/aa):	21/04/2014	Crépine 2 haut :	0		
		Cote pompe/sol (m):	75	Sous rep.:	75,5
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 77-8		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	16,30	Pertes de charge: B=	3,11E-02
Débit critique (y compris pert) (m3/h):	60,00	Pertes de charge: C=	1,20E-03

l'artésianisme jaillissant s'est déclanché après le quatrième palier

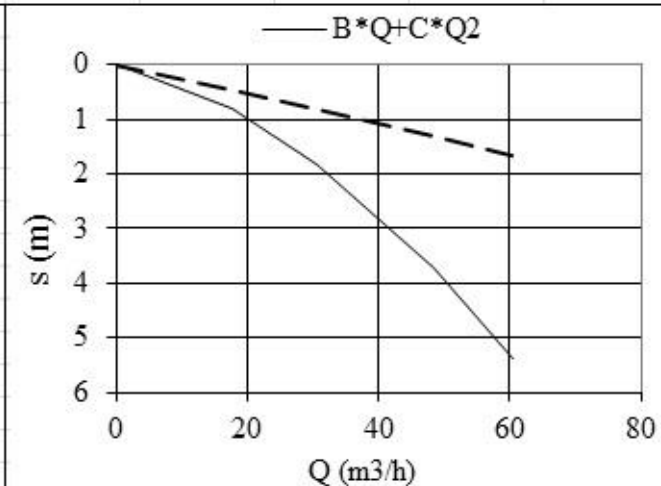
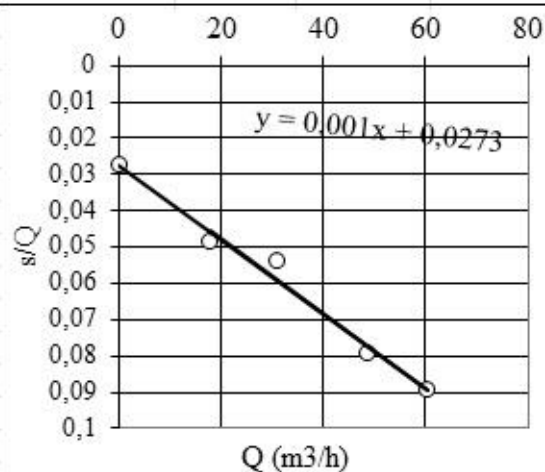
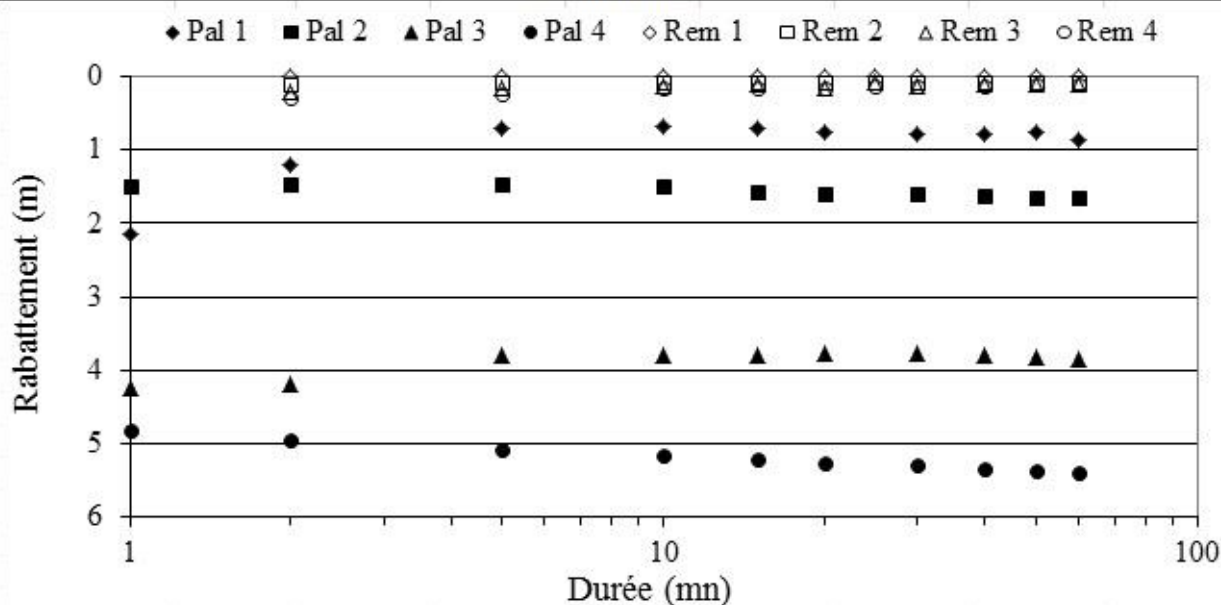
Comptes courant

	Q (m3/h)	s (m)	s/Q (h/m2)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,0310646	0	0		
Pal 1	25,50	1,52	0,0596078	0,792148	1,5713925	Pal 1	Rem 1
Pal 2	55,00	5,28	0,096	1,7085545	5,3336441	Pal 2	Rem 2
Pal 3	77,00	10,06	0,1306494	2,3919763	9,497152	Pal 3	Rem 3
Pal 4	106,00	16,30	0,1537736	3,2928506	16,757811	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage de Keita (F2)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	461		
Altitude (m):	0	Longitude (Est):	5,76875		
NS/repère (m):	66,13	Latitude (Nord):	14,758306		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	398,2	Bas:	422,2
Date palier (jj/mm/aa):	12/07/2014	Crépine 2 haut :	350,2		
		Cote pompe/sol (m):	99,66	Sous rep.:	
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 77-8		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	5,39	Pertes de charge: B=	2,73E-02
Débit MAX calculé (y compris pert) (m^3/h):	197,39	Pertes de charge: C=	1,03E-03

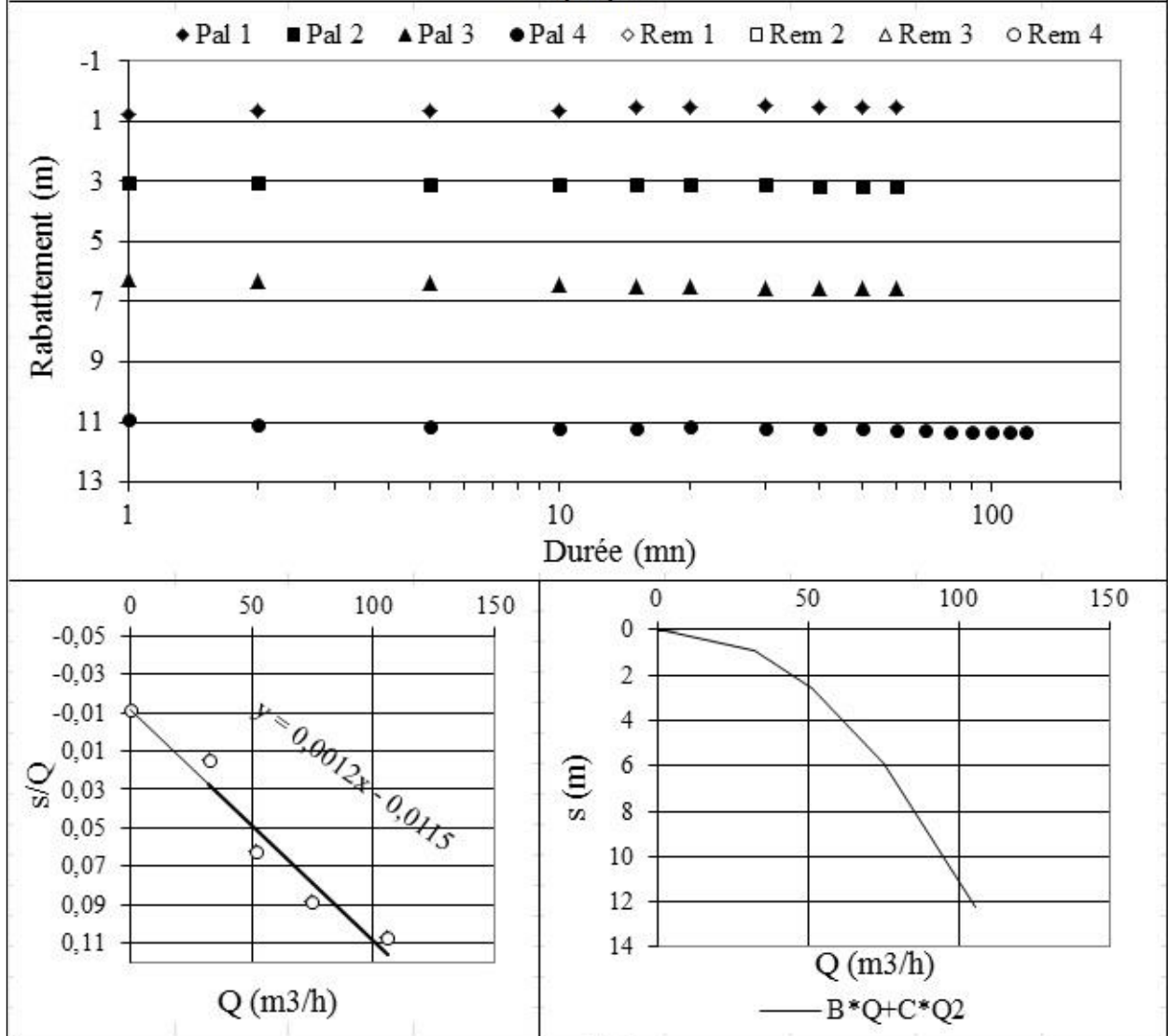
Comptes courant

	Q (m^3/h)	s (m)	s/Q (h/m^2)	$B*Q$	$B*Q+C*Q^2$	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,0273069	0	0		
Pal 1	17,74	0,86	0,0484663	0,4845417	0,8074342	Pal 1	Rem 1
Pal 2	30,74	1,65	0,0536702	0,8395055	1,8087712	Pal 2	Rem 2
Pal 3	48,53	3,85	0,0793324	1,3252045	3,7404513	Pal 3	Rem 3
Pal 4	60,42	5,39	0,0892113	1,6498382	5,3933432	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage de Konni (F5)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	600		
Altitude (m):	0	Longitude (Est):	5,2488056		
NS/repère (m):	0,00	Latitude (Nord):	13,805944		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	505,98	Bas:	518,14
Date palier (jj/mm/aa):	04/01/2014	Crépine 2 haut :	524,05		
		Cote pompe/sol (m):	52	Sous rep.:	52,5
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 77-9		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	11,34	Pertes de charge: B=	-1,15E-02
Débit critique (y compris pert) (m3/h):	supérieur à 105	Pertes de charge: C=	1,20E-03
l'artésianisme jaillissant s'est déclanché après le quatrième palier			

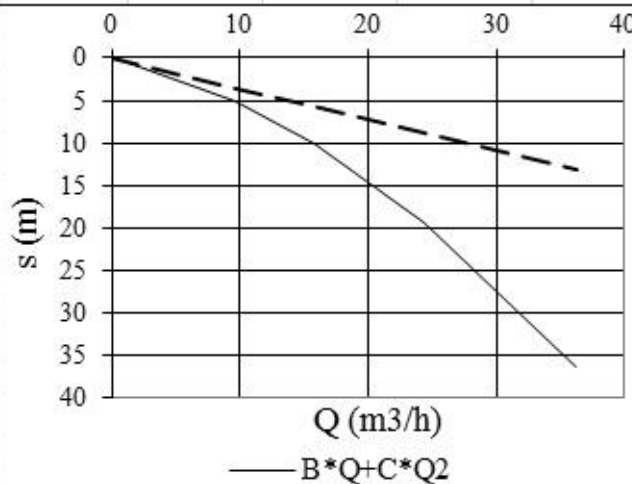
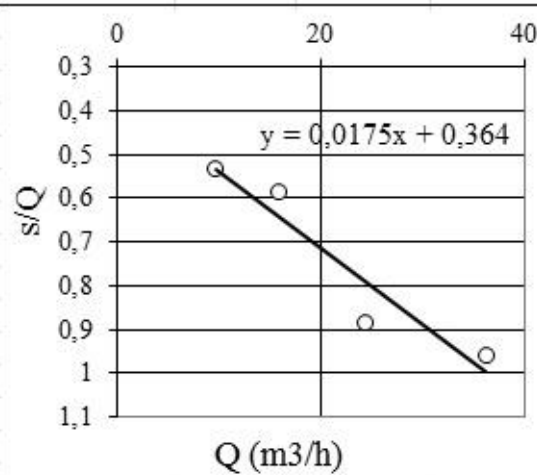
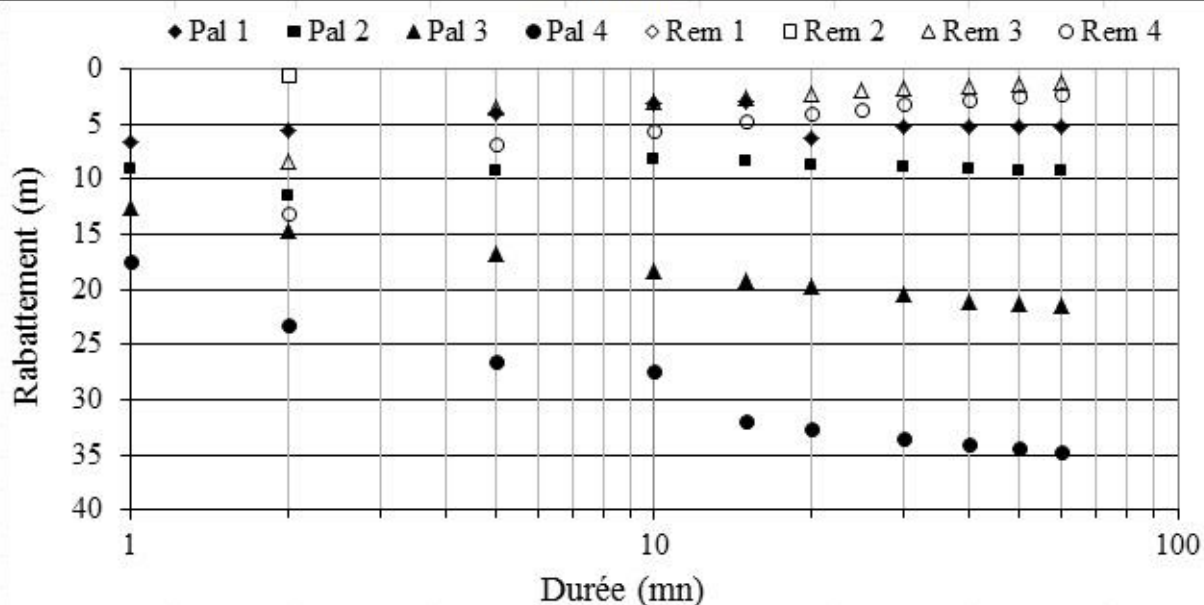
Comptes courant

	Q (m3/h)	s (m)	s/Q (h/m2)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	-0,011529	0	0		
Pal 1	32,43	0,48	0,0148011	-0,373889	0,8889023	Pal 1	Rem 1
Pal 2	51,42	3,18	0,0618436	-0,592826	2,5818664	Pal 2	Rem 2
Pal 3	75,00	6,60	0,088	-0,864682	5,8893021	Pal 3	Rem 3
Pal 4	105,88	11,34	0,1071024	-1,220701	12,239929	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage de Tassara (F2)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP (SPEN)	Profondeur forée (m):	163,8		
Altitude (m):	0	Longitude (Est):	16,808361		
NS/repère (m):	44,91	Latitude (Nord):	5,6434722		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	125,49	Bas:	137,19
Date palier (jj/mm/aa):	30/04/2014	Crépine 2 haut :	143,06	Bas:	160,8
		Cote pompe/sol (m):	105	Sous rep.:	105,5
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 30-13		

Graphiques



Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	34,80	Pertes de charge: B=	3,64E-01
Débit critique (y compris pert) (m3/h):	≈ 25	Pertes de charge: C=	1,75E-02

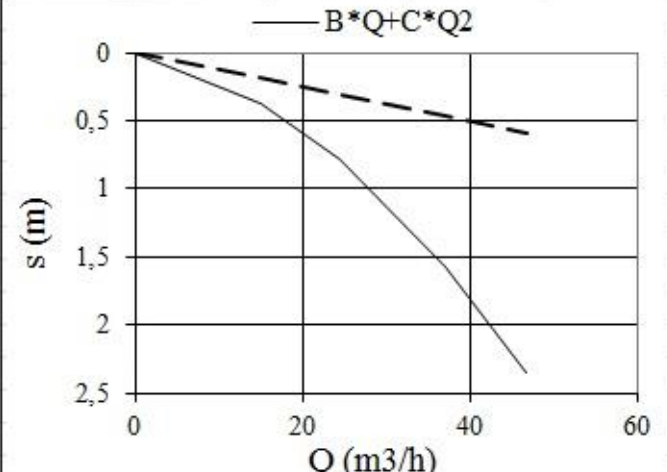
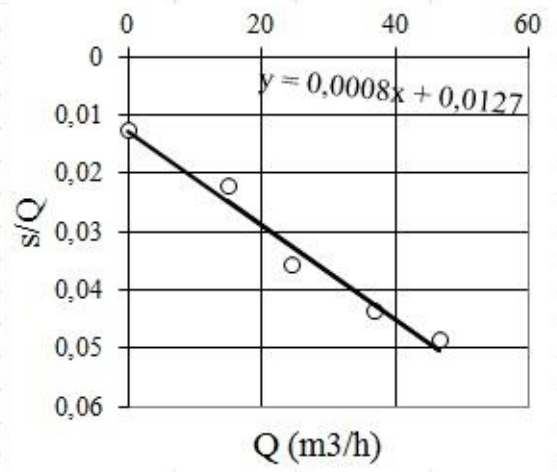
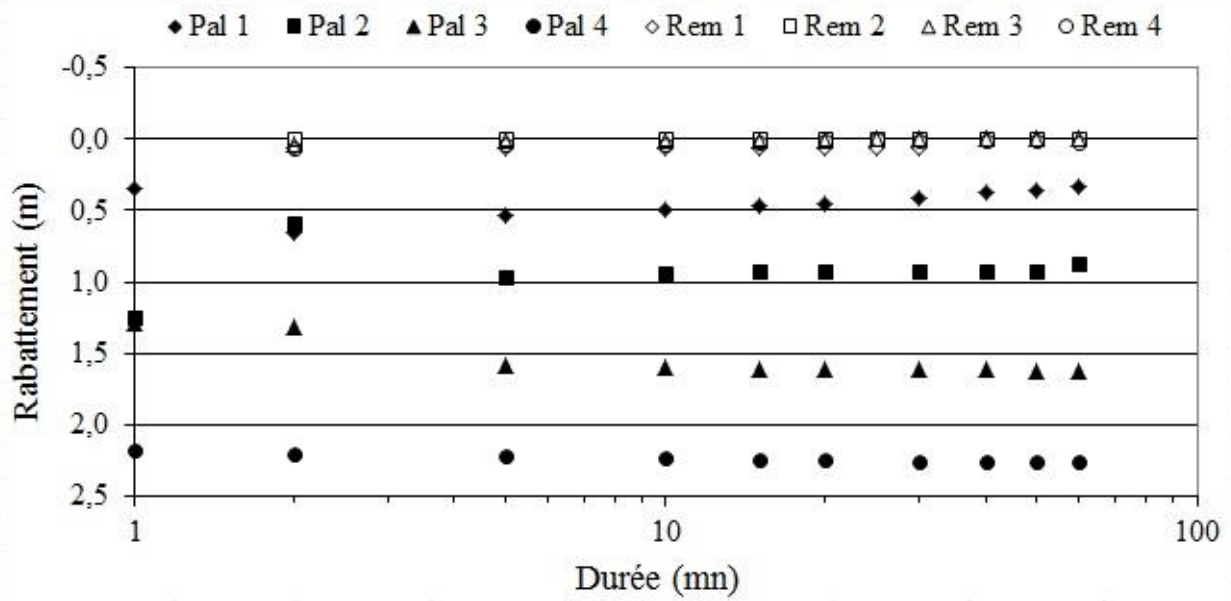
Comptes courant

	Q (m3/h)	s (m)	s/Q (h/m2)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,3639861	0	0		
Pal 1	9,70	5,18	0,5340206	3,5306654	5,1759786	Pal 1	Rem 1
Pal 2	15,80	9,26	0,5860759	5,7509808	10,116333	Pal 2	Rem 2
Pal 3	24,40	21,55	0,8831967	8,8812615	19,292077	Pal 3	Rem 3
Pal 4	36,27	34,80	0,9594706	13,201777	36,205611	Pal 4	Rem 4

Suite annexe 8 : Fiche de pompage d'essai par palier du forage de Tamaské (F3)

Type d'ouvrage (PC/FE):	Forage AEP SPEN	Profondeur forée (m):	0		
Altitude (m):	0	Longitude (Est):	0		
NS/repère (m):	90,17	Latitude (Nord):	0		
Niveau repère/sol (m):	0,5	Crépine 1 (supp.) haut :	0	Bas:	0
Date palier (jj/mm/aa):	01/09/2014	Crépine 2 haut :	0		
		Cote pompe/sol (m):	115,48	Sous rep.:	
Piezo suivis (nombre):	0	Type pompe:	SP 60-11		

Graphiques



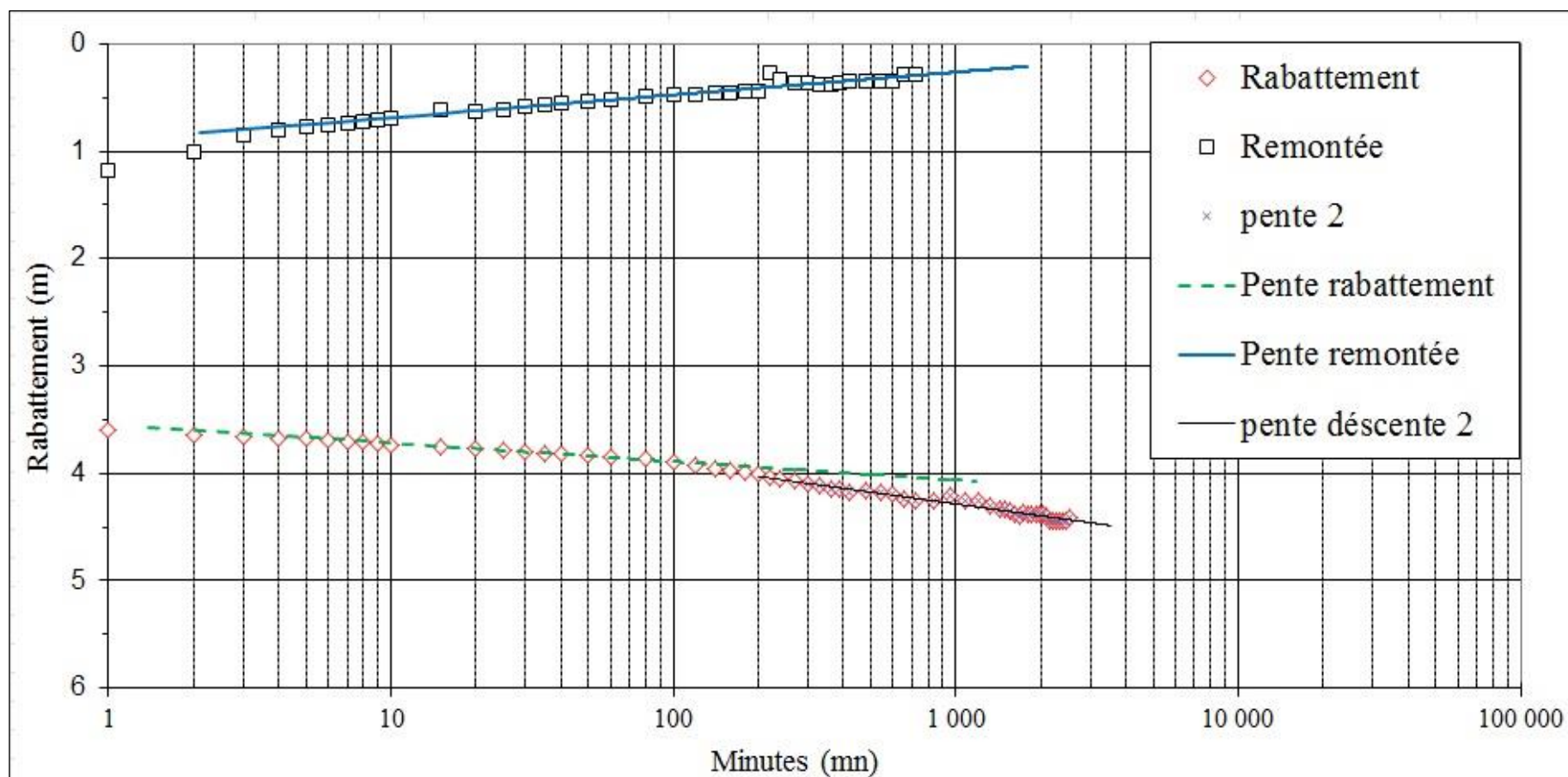
Resultats

Rabattement MAX (pendant palier) (m):	2,26	Pertes de charge: B=	1,27E-02
Débit MAX calculé (y compris pert) (m3/h):	178,61	Pertes de charge: C=	8,05E-04

Comptes courant

	Q (m3/h)	s (m)	s/Q (h/m2)	B*Q	B*Q+C*Q ²	Legend pompage	Legend remontée
	0	0	0,0126532	0	0		
Pal 1	14,97	0,33	0,0220411	0,189444	0,3699289	Pal 1	Rem 1
Pal 2	24,44	0,87	0,0355945	0,3092701	0,7902805	Pal 2	Rem 2
Pal 3	37,05	1,62	0,0437286	0,4687597	1,573803	Pal 3	Rem 3
Pal 4	46,69	2,26	0,0484044	0,590779	2,3459877	Pal 4	Rem 4

Annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage de Bouza (F2)

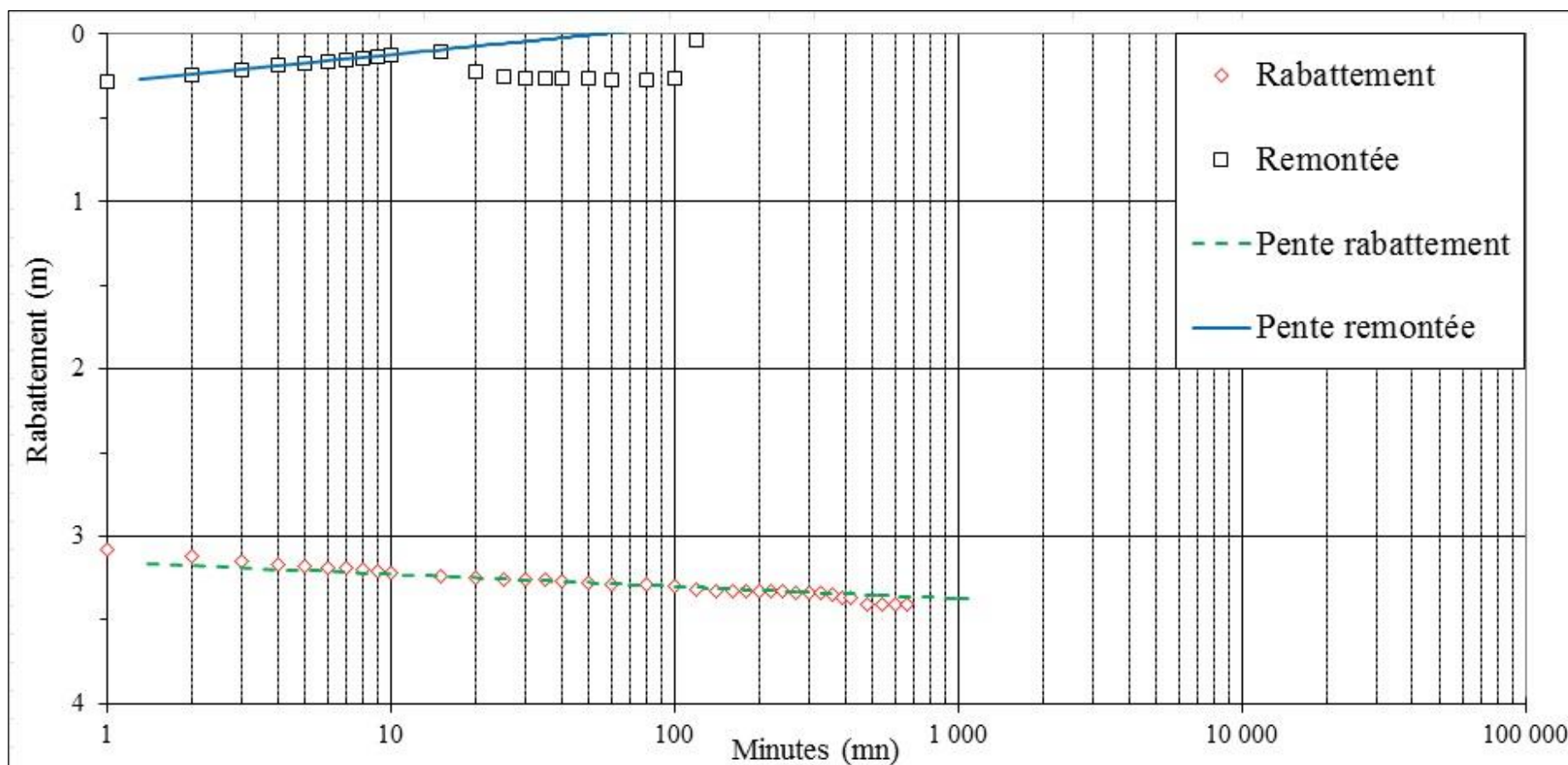


Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$		
	Pompage	Remontee
débit de pompage (Q)	51,00	
Rabattement par cycle (delta s)	0,15564263	-0,452493145
T (en m ² /s)	1,7E-02	5,7E-03

Date descent (jj/mm/aa):	24/06/2014	Crépine 2 haut :	0
Date remontée (jj/mm/aa):	25/06/2014	Cote pompe/sol (m)	124,84
Crépine 1 (supp.) haut :	0	Type pompe:	SP 30-13
Sommet Crépine - NS:	-92,7	Débit "Moyen":	51,00

Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage d'Ibohamane (F2)

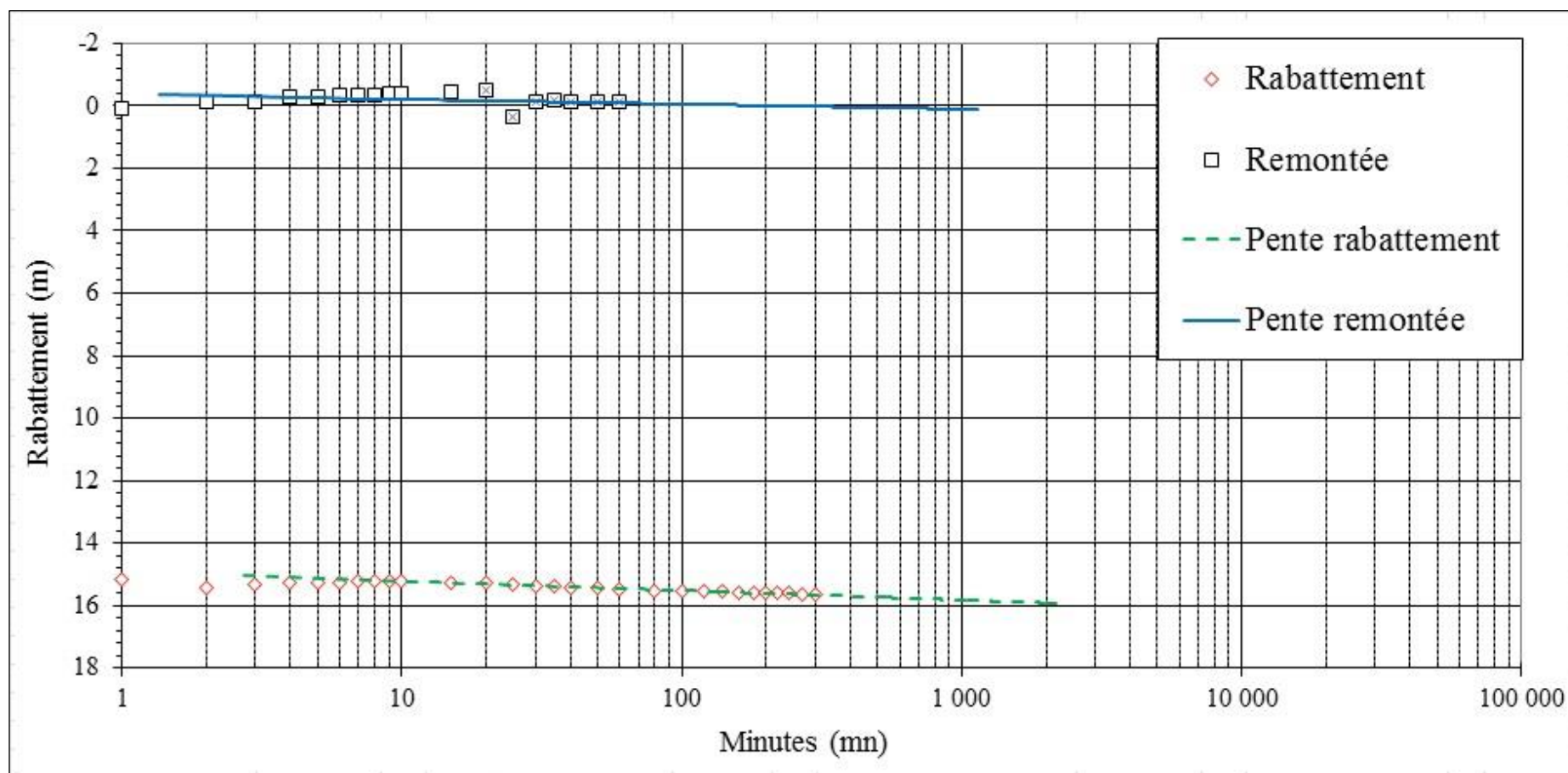


Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$		
	Pompage	Remontee
débit de pompage (Q)	48,50	
Rabattement par cycle (delta s)	0,0852027	-0,198833303
T (en m ² /s)	2,9E-02	1,2E-02

Date descent (jj/mm/aa):	06/08/2014	Crépine 2 haut :	0
Date remontée (jj/mm/aa):	07/08/2014	Cote pompe/sol (m):	121,41
Crépine 1 (supp.) haut :	0	Type pompe:	SP 60-11
Sommet Crépine - NS:	-88,56	Débit "Moyen":	48,50

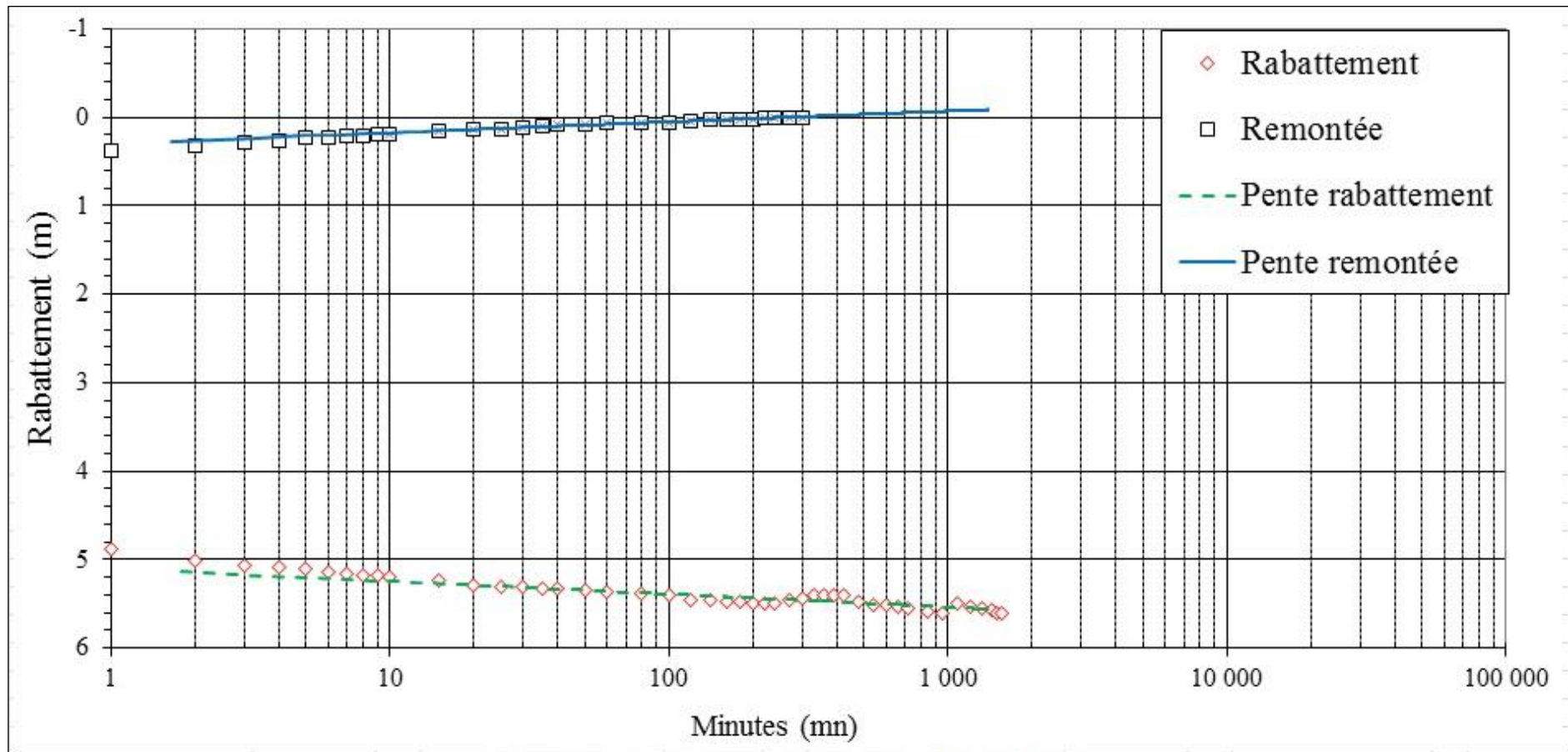
Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage d'Illéla (F2)



Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$			
	Pompage	Remontée	
débit de pompage (Q)	105,00		Date descent (jj/mm/aa): 23/04/2014
Rabattement par cycle (delta s)	0,29294093		Date remontée (jj/mm/aa): 23/04/2014
T (en m ² /s)	1,8E-02		Crépine 1 (supp.) haut : 577,94
			Crépine supposée - NS: 569,61
			Crépine 2 haut : 0
			Cote pompe/sol (m): 75
			Type pompe: SP 77-8
			Débit "Moyen": 105,00

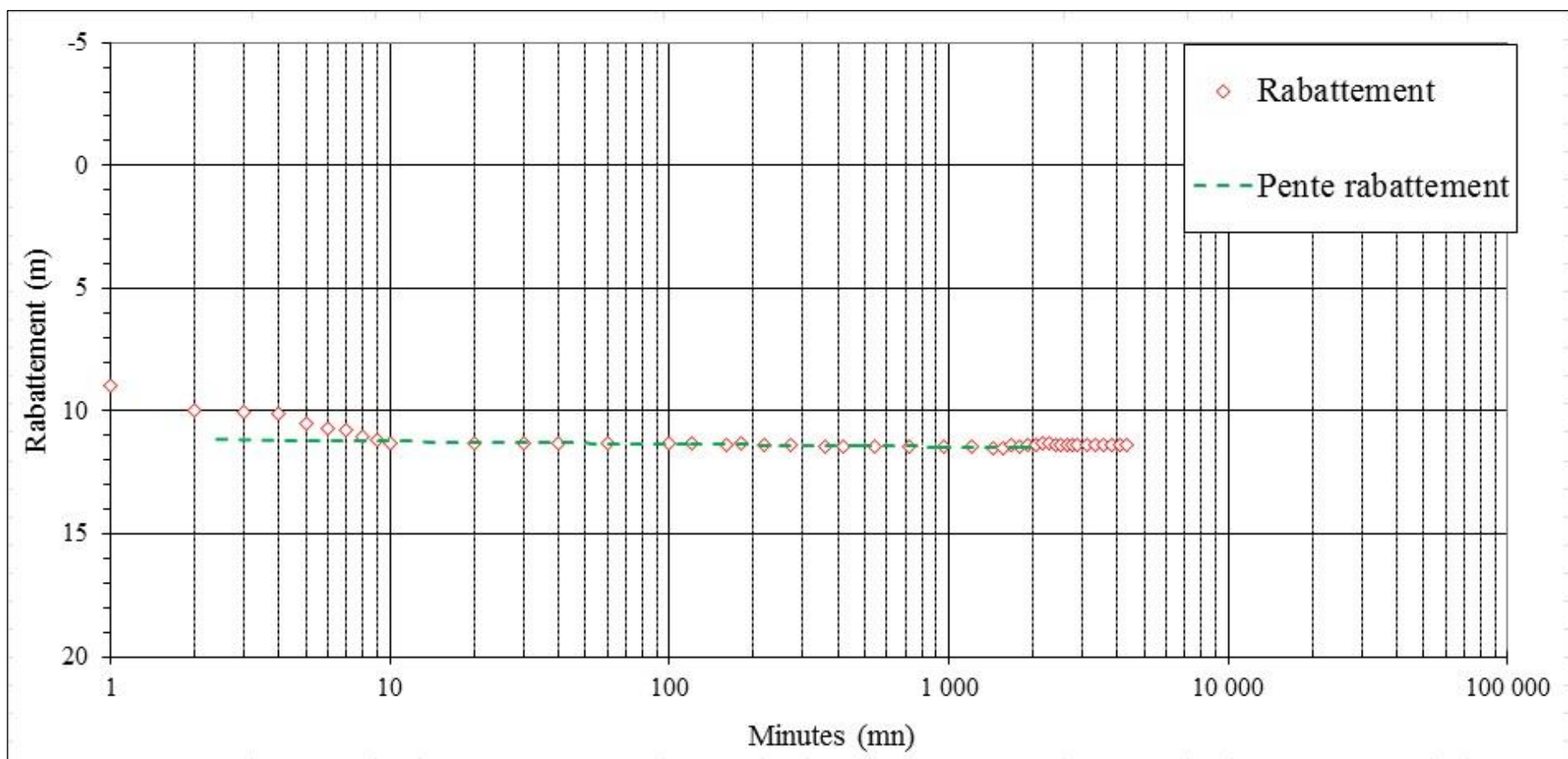
Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage de Keita (F2)



Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$						
	Pompage	Remontée				
débit de pompage (Q)	60,60		Date descent (jj/mm/aa):	13/07/2014	Crépine 2 haut :	268
Rabattement par cycle (delta s)	0,23768322	-0,221752396	Date remontée (jj/mm/aa)	14/07/2014	Cote pompe/sol (m):	130
T (en m ² /s)	1,3E-02	1,4E-02	Crépine 1 (supp.) haut :	190	Type pompe:	SP 77-8
			Crépine supposée - NS:	123,87	Débit "Moyen":	60,60

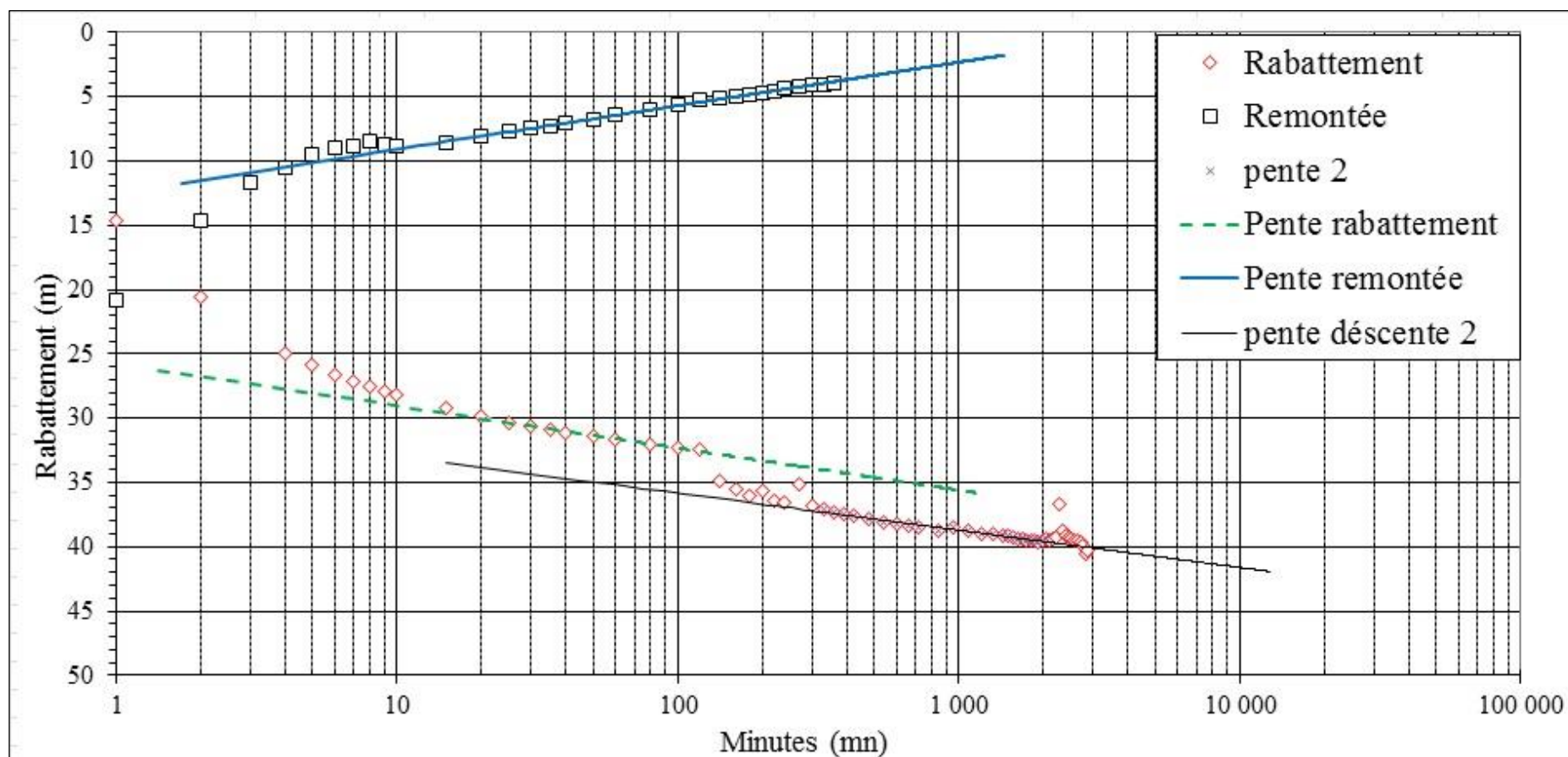
Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage de Konni (F5)



Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$						
	Pompage	Remontée				
débit de pompage (Q)	105,88		Date descent (jj/mm/aa):	05/01/2014	Crépine 2 haut :	524,05
Rabattement par cycle (delta s)	0,11314801	#VALEUR!	Date remontée (jj/mm/aa):	28/12/2013	Cote pompe/sol (m):	52
T (en m ² /s)	4,8E-02	#VALEUR!	Crépine 1 (supp.) haut :	505,98	Type pompe:	SP 77-9
			Crépine supposée - NS:	505,98	Débit "Moyen":	105,88

Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage de Tassara (F2)

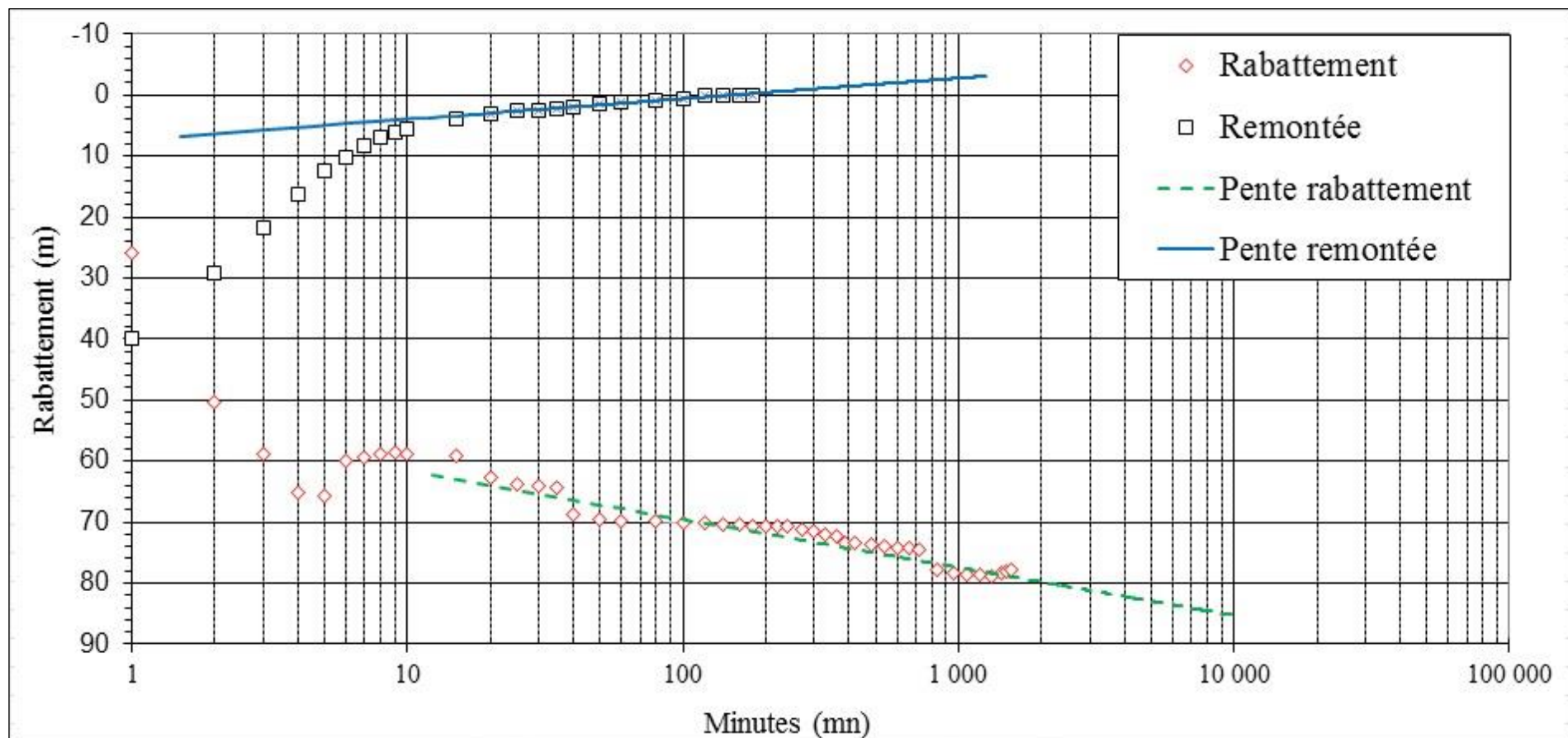


Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$		
	Pompage	Remontee
débit de pompage (Q)	31,80	
Rabattement par cycle (delta s)	6,88668559	-9,89641311
T (en m ² /s)	2,3E-04	1,6E-04

Date descent (jj/mm/aa):	01/05/2014	Crépine 2 haut :	143,06
Date remontée (jj/mm/aa):	03/05/2014	Cote pompe/sol (m):	105
Crépine 1 (supp.) haut :	125,49	Type pompe:	SP 30-13
Sommet Crépine - NS:	80,58	Débit "Moyen":	31,80

Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage de Doguerawa (F2)

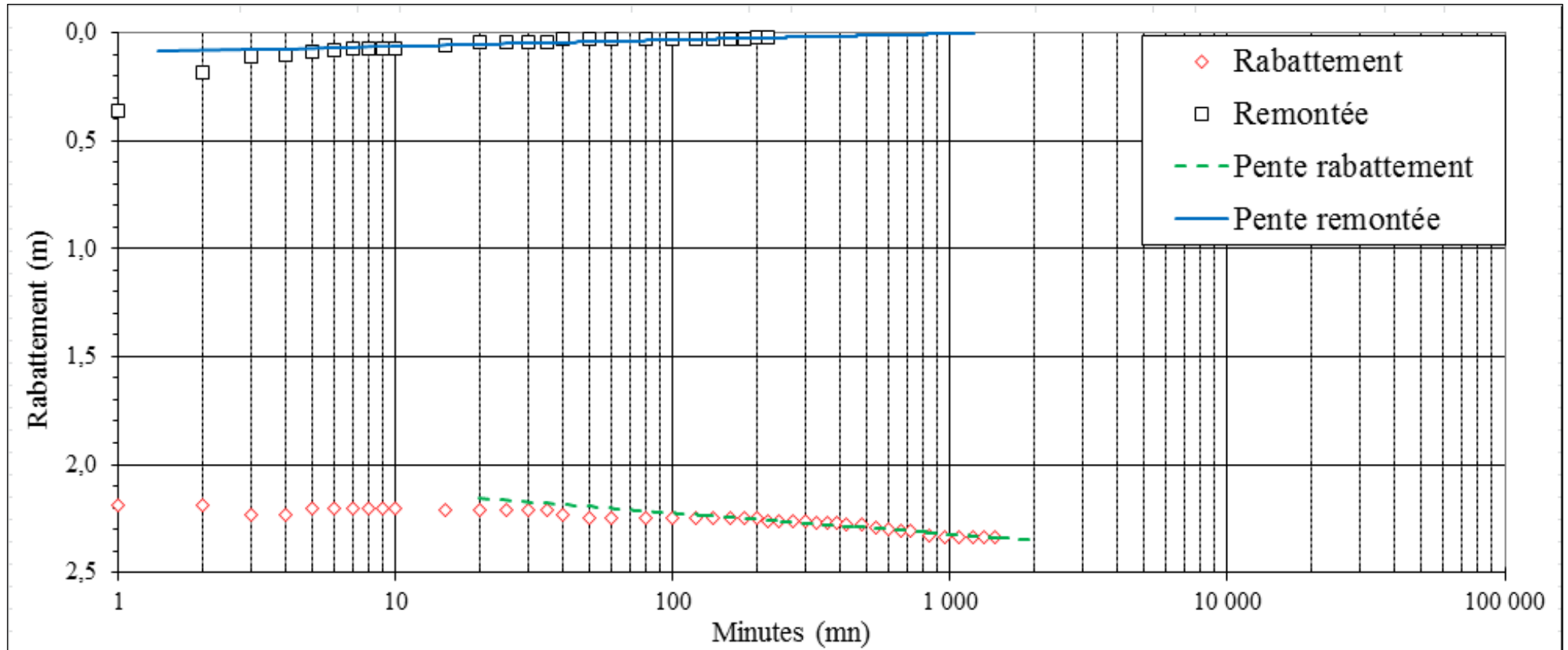


Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Transmissivité (Jacob), $T = 0,183 \cdot Q / \Delta s$		
	Pompage	Remontee
débit de pompage (Q)	40,31	
Rabattement par cycle (delta s)	7,64561757	-8,867081357
T (en m ² /s)	2,7E-04	2,3E-04

Date descent (jj/mm/aa):	07/07/2014	Crépine 2 haut :	0
Date remontée (jj/mm/aa):	09/07/2014	Cote pompe/sol (m):	104,96
Crépine 1 (supp.) haut :	0	Type pompe:	SP 60-19
Crépine supposée - NS:	-10,11	Débit "Moyen":	40,31

Suite annexe 9 : Fiche de pompage d'essai de longue durée du forage de Tamaské (F3)



Interpretation/commentaires du pompage à longue durée

Interpretation		
T=0,183*Q/delta s		
Descent	Pompage	Remontee
Q	46,08	
Rabattement par cycle (delta s)	0,09435862	#VALEUR!
T	2,5E-02	#VALEUR!

Date descent (jj/mm/aa):	01/09/2014	Crépine 2 haut :	0
Date remontée (jj/mm/aa)	15/08/2013	Cote pompe/sol (m):	115,48
Crépine 1 (supp.) haut :	34,67	Type pompe:	SP 60-11
Crépine supposée - NS:	-55,5	Débit "Moyen":	46,08

Annexe 10 : Valeurs de perméabilité du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

Sites	Longitude	Latitude	K	Sites	Longitude	Latitude	K
Ala	5,490300	14,529200	1,06E-04	Konni 2 SEEN	5,249250	13,806139	6,39E-04
Alagadad	5,947500	15,551900	4,29E-04	Koren Kaoura	6,217500	14,491400	5,25E-04
Allakaye	5,747777	14,410000	6,78E-05	Leyma	6,077500	14,233100	1,78E-04
Azerori Nomade	5,909000	14,142000	3,17E-04	Loudou	5,902222	14,941388	4,35E-05
Bada Guichiri	5,365555	14,525555	6,52E-04	Madetta II	6,028000	14,264000	9,46E-05
Bagga	5,332500	14,671666	4,00E-03	Magaria Makéra	5,771666	14,008055	1,11E-04
Bambeye	5,096700	14,722000	7,76E-05	Malbaza Bourgoum	5,515277	13,930277	7,14E-04
Barmou 1	5,398000	15,102000	3,49E-04	Malindou	5,837222	14,060277	2,24E-04
Barmou 2	5,401666	15,105833	1,92E-04	Mallalebi	6,066700	13,830600	4,48E-03
Binguirawa Kiaro	6,198600	14,417500	2,70E-04	Mambawa	6,253000	14,536000	8,55E-05
Binguiré	5,291388	13,965833	4,55E-04	Mouléla	5,669400	13,999722	2,45E-04
Bourkele	6,377800	14,538900	1,22E-03	Nobi	5,534160	14,015277	2,55E-04
Bouza SEEN	6,044917	14,425861	3,40E-04	Sabon Sara Gabass	6,204400	14,387500	8,17E-05
Chadawanka	6,120000	15,034000	9,62E-04	Sabonga	5,648600	14,185600	2,38E-03
Chinchinanane	5,340000	16,105000	1,94E-04	Taboé-Ladama	5,741940	14,226380	2,35E-04
Dabnou	5,365300	14,152800	7,31E-05	Tagalal	6,311000	14,762000	4,61E-05
Dan Gona	5,031388	14,270555	2,00E-04	Tagigalt	5,720000	16,134000	1,40E-05
Daré et Dara	5,490000	14,563600	3,82E-04	Tahoua F5	5,272916	14,900805	1,45E-04
Doguéraoua SEEN	5,592861	13,968861	2,47E-04	Tahoua F6	5,254500	14,889720	5,77E-05
Doli	5,343800	15,030830	7,22E-05	Tajaé Nomade	5,298055	14,227500	2,86E-04
Gadamata	6,087222	14,813888	3,33E-04	Takanamatt F1	4,770380	15,142700	1,37E-04
Gamé	6,046111	14,475555	2,56E-05	Takanamatt SEEN	4,770111	15,142667	1,37E-04
Garhanga	5,766388	14,560000	2,56E-05	Takarwilit	4,341000	15,680000	3,78E-05
Guidan Bodo	6,063000	14,432000	7,78E-04	Taksanainasse	4,634000	15,952000	4,80E-05
Guidan Djibo	6,202000	14,657000	1,83E-04	Tama	5,769166	14,280000	1,21E-04
Ibohamane F1	5,927100	14,793805	3,57E-04	Tamaské 1 SEEN	5,654028	14,829972	4,75E-04
Ibohamane SEEN	5,923028	14,794222	4,60E-04	Tamaské F1	5,654361	14,830000	1,54E-04

Suite annexe 10 : Valeurs de perméabilité du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien

Sites	Longitude	Latitude	K	Sites	Longitude	Latitude	K
Illéla SEEN	5,246361	14,457056	4,09E-04	Tamaya 1	6,769000	15,815000	5,44E-03
Infene	4,846000	15,808000	1,43E-04	Taraouraou	6,075000	14,331000	2,86E-04
Ingarsman	6,265000	14,555000	6,30E-05	Tassa Takoret	5,476000	17,503000	6,76E-06
InKarkada	4,968300	14,834160	6,82E-04	Tassara SEEN	5,643472	16,808361	6,57E-06
Insafari	5,940000	14,728300	2,38E-04	Tazalite	5,260000	16,900000	7,39E-05
Kahé Damé	5,460555	14,138611	4,17E-04	Telemces	4,797000	15,620000	6,17E-04
Kaoura Alassane	5,445833	14,066666	2,38E-04	Tillia F1	4,791600	16,125000	1,36E-04
Keita SEEN	5,768750	14,758306	1,76E-04	Toudounia/Mahaledi	6,401000	14,551000	1,78E-04
Kire Kafada	5,903900	13,929200	1,58E-03	Zouraré Sabara	5,434166	14,246944	5,56E-04
Konni 1 SEEN	5,248806	13,805944	1,37E-03				

Annexe 11 : Paramètres physiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (cette étude)

Site	Point d'eau	Longitude	Latitude	Aquifère capté	Date	Heure	pH	T (°C)	C (µS/cm)	TDS
Abalak	Forage	6,27729	15,45364	CI Libre	05/05/2017	17h09	6,14	35	59,74	29,93
Abalak	Forage	6,285000	15,439000	CI Libre	20/09/2016	08h20	6,15	32,40	47,40	
Abouhaya	Forage	6,709	15,376	CI Libre	04/05/2017	17h12	8,87	32,2	285,6	142,9
Abouhaya	Forage	6,709000	15,376000	CI Libre	19/09/2016	16h55	7,65	32,80	231,00	
Amataghtagh	Forage	6,0909	16,21101	CI Libre	06/05/2017	10h41	7,83	34,3	410,6	205,4
Azeye	Forage	6,3106	15,0264	CH Captif	04/05/2017	14H30	7,58	35	67,39	33,73
Bada Guichiri	Forage	5,36484	14,52578	CH Captif	09/05/2017	14h06	7,21	43,6	174,4	87,35
Bada Guichiri	Forage	5,365555	14,525555	CH Captif	26/09/2016	18h48	6,43	43,30	142,70	
Bambeye	Forage	5,096700	14,722000	CH Captif	18/09/2016	11h19	7,41	44,60	272,00	
Bouza	Forage	6,044917	14,425861	CH Captif	04/09/2016	18h00	7,01	38,70	157,20	
Chimbangran	Puits	6,07198	16,13203	CI Libre	06/05/2017	10h05	8,02	32,9	357,1	178,9
Chinwagri	Forage	6,05442	16,0362	CI Libre	06/05/2017	9h27	7,65	34,4	354	177
Damboutan	Puits	5,492	15,934	Crétacé sup	07/05/2017	9h21	8,32	35,4	1381	690,4
Damboutan	Forage	5,492000	15,934000	CI Captif	21/09/2016	11h11	7,50	38,20	244,00	
Dan Gona	Forage	5,03186	14,27068	CH Captif	09/05/2017	12h04	7,51	43,8	306	152,8
Dan Gona	Forage	5,031388	14,270555	CH Captif	27/09/2016	09h56	6,76	39,50	254,00	
Daré Dara	Forage	5,49002	14,56366	CH Captif	10/05/2017	18h46	7,04	42,2	157,2	78,56
Doguérawa	Forage	5,592861	13,968861	CH Captif	06/09/2016	10h40	7,31	41,50	172,10	
Doli	Forage	5,343888	15,030830	CH Captif	18/09/2016	13h50	7,49	39,70	298,00	

Suite annexe 11 : Paramètres physiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (cette étude)

Site	Point d'eau	Longitude	Latitude	Aquifère capté	Date	Heure	pH	T (°C)	C (µS/cm)	TDS
Gadamata	Forage	6,08715	14,81384	CH Captif	10/05/2017	12h36	7,15	39,3	98,8	49,24
Gadamata	Forage	6,087222	14,813888	CH Captif	17/09/2016	17h40	6,42	39,50	81,10	
Garao	Forage	5,75313	16,28393	CI Captif	07/05/2017	12h45	8,15	36	347,2	172,3
Hiro	Forage	5,6323	14,70229	CH Captif	10/05/2017	17h02	7,15	39,2	121,3	60,55
Hiro	Forage	5,632222	14,702500	CH Captif	17/09/2016	20h17	6,54	38,80	98,00	
Ibohamane	Forage	5,92291	14,7944	CH Captif	10/05/2017	14h25	7,09	40,5	98,55	49,25
Ikotayan	Forage	4,316700	16,283100	CI Captif	24/09/2016	10h57	8,21	39,50	668,00	
Iliba	Forage	4,711600	17,006400	CI Captif	23/09/2016	11h25	8,15	36,50	631,00	
Illéla	Forage	5,24673	14,45691	CH Captif	09/05/2017	10h54	7,37	45	215,2	107,7
Illéla	Forage	5,248000	14,457000	CH Captif	27/09/2016	07h10	6,49	43,50	173,60	
In Tézégaret	Puits	6,49001	15,59064	CI Libre	05/05/2017	14h33	6,8	34,3	202,5	101,2
In waggar	Forage	6,6846	16,12575	CI Libre	05/05/2017	9h42	7,67	33,4	434,7	216,3
Inarigan	Forage	6,17009	15,74149	CI Libre	05/05/2017	19h05	7,27	33,3	287,9	144
Inarigan	Forage	6,168000	15,740000	CI Libre	20/09/2016	16h13	6,55	33,40	244,00	
Infène	Forage	4,84645	15,97501	CI Captif	09/05/2017	13h10	8,4	48,5	1462	729,9
Inkotayan	Forage	4,3193	16,28918	CI Captif	08/05/2017	6h48	8,9	37,9	795,9	391,2
Intamat	Forage	4,94615	16,55259	CI Captif	07/05/2017	17h36	8,72	43,1	591,2	295,3
Intamat	Forage	4,941000	16,551000	CI Captif	23/09/2016	19h21	8,29	41,60	501,00	
Keita	Forage	5,77064	14,75864	CH Captif	10/05/2017	15h28	7,02	40,4	103,1	51,54
Konni	Forage	5,249250	13,806139	CH Captif	06/09/2016	12h40	6,96	44,20	189,30	

Suite annexe 11 : Paramètres physiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (cette étude)

Site	Point d'eau	Longitude	Latitude	Aquifère capté	Date	Heure	pH	T (°C)	C (µS/cm)	TDS
Louberat	Forage	6,140555	16,890556	CI Libre	22/09/2016	14h25	6,41	33,80	144,70	
Loudou	Forage	5,90217	14,94129	CH Captif	10/05/2017	10h49	7,27	37,5	117,2	58,59
Mallalebi	Forage	6,066700	13,830600	CH Captif	16/09/2016	18h25	7,67	32,10	278,00	
Tabalak	Forage	5,656100	15,094160	CI Captif	04/09/2016	12h00	7,20	32,40	208,00	
Takanamat	Forage	4,770111	15,142667	CI Captif	02/09/2016	15h00	7,20	44,20	265,00	
Takarwilit	Forage	4,341000	15,680000	CI Captif	24/09/2016	15h52	8,23	42,10	462,00	
Tama	Forage	5,769166	14,280000	CH Captif	17/09/2016	13h15	6,95	40,90	124,10	
Tamaya	Forage	6,76997	15,81472	CI Libre	05/05/2017	7h53	6,46	32,9	71,49	35,94
Tamaya	Forage	6,770000	15,815000	CI Libre	03/09/2016	18h30	6,15	32,00	59,50	
Taoudawene	Forage	5,60254	16,39269	CI Captif	07/05/2017	13h53	8,33	38,6	304,7	152
Taoudawene	Forage	5,621100	16,371400	CI Captif	21/09/2016	16h45	7,56	37,40	257,00	
Tazalite	Forage	5,260000	16,900000	CI Captif	23/09/2016	13h15	8,39	40,80	318,00	
Tchintabraden	Forage	5,797	15,885	CH Captif	06/05/2017	16h30	7,85	36,2	446,7	223,6
Tchintabraden	Forage	5,797000	15,885000	CI Captif	21/09/2016	09h30	7,68	35,10	379,00	
Telemces	Forage	4,77569	15,6273	CH Captif	08/05/2017	14h52	8,52	47	330,3	163,63
Telemces	Forage	4,797000	15,620000	CI Captif	25/09/2016	10h10	7,90	45,00	272,00	
Tillia	Forage	4,788	16,136	CH Captif	09/05/2017	10h09	8,67	46,6	776	388
Tillia	Forage	4,788000	16,136000	CI Captif	24/09/2016	13h30	8,17	45,70	658,00	
Timbilim	Forage	5,23856	16,54657	CI Captif	07/05/2017	16h04	8,68	39,1	776,2	387,6

Annexe 12 : Paramètres chimiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (cette étude)

Site	Campagne	Ca	Mg	Na	K	Fet	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	F	Br
		(mg/L)											
Abalak	1 ^{ère}	2,9	1,1	1,4	5,6	0,0	18,0	0,8	2,0	5,83	0,01	0,00	0,00
Abalak	2 ^{ème}	2,2	1,25	1,4	5,93			1,38	1,99	6,30	0,05	0,00	
Abouhaya	1 ^{ère}	26,1	7,5	7,8	7,9	0,1	140,9	6,6	4,8	4,25	0,00	0,00	0,03
Abouhaya	2 ^{ème}	27,01	7,89	8,31	8,85			6,77	4,82	3,48	0,00	0,00	
Amataghtagh	2 ^{ème}	39,57	22,46	9,61	2,29			1,01	1,92	0,53	0,00	0,23	
Azeye	2 ^{ème}	1,82	1,16	1,79	3,96			2,13	3,03	0,05	0,00	0,00	
Bada Guichiri	1 ^{ère}	6,5	3,5	9,4	9,6	0,1	49,7	1,4	23,2	0,00	0,00	0,03	0,00
Bada Guichiri	2 ^{ème}	4,10	3,43	8,11	12,55			1,95	22,78	0,05	0,00	0,15	
Bambeye	1 ^{ère}	24,2	6,9	26,8	7,9	3,3	137,9	6,8	34,5	0,00	0,00	0,04	0,06
Bouza	1 ^{ère}	10,9	2,6	15,6	8,9	0,2	86,0	2,1	16,0	0,00	0,00	0,05	0,00
Chimbangran (puits)	2 ^{ème}	30,49	19,02	9,68	4,48			1,41	3,03	8,13	0,00	0,24	
Chinwagri	2 ^{ème}	31,34	19,15	9,44	4,24			1,18	2,57	1,26	0,00	0,18	
Damboutan	1 ^{ère}	19,4	7,7	24,1	7,0	0,2	136,6	7,5	18,8	0,00	0,00	0,26	0,04
Damboutan (puits)	2 ^{ème}	9,18	4	251,91	5,24			87,49	218,06	0,21	1,67	3,52	
Dan Gona	1 ^{ère}	19,6	8,4	14,6	14,0	4,3	85,4	5,2	56,0	0,00	0,00	0,05	0,04
Dan Gona	2 ^{ème}	20,88	8,93	14,70	14,98			5,76	59,22	0,05	0,00	0,00	
Daré Dara	2 ^{ème}	3,51	2,63	6,67	11,53			1,70	16,92	0,05	0,00	0,15	
Doguérawa	1 ^{ère}	15,8	3,3	13,3	9,9	0,3	86,6	3,8	21,2	0,00	0,00	0,06	0,02
Doli	1 ^{ère}	34,1	10,9	10,2	8,6	0,8	139,1	8,5	47,6	0,00	0,00	0,03	0,06
Gadamata	1 ^{ère}	4,3	1,8	1,4	8,0	1,0	36,1	0,7	3,4	0,00	0,00	0,00	0,00
Gadamata	2 ^{ème}	2,73	1,85	1,38	8,40			1,47	3,51	0,05	0,00	0,15	
Garao	2 ^{ème}	17,75	8,85	44	7,63			12,22	11,07	5,68	0,00	0,00	
Hiro	1 ^{ère}	4,5	1,9	3,7	9,1	0,1	41,4	1,0	7,6	0,00	0,01	0,03	0,00
Hiro	2 ^{ème}	3,10	2,05	3,65	9,78			1,19	5,83	0,00	0,00	0,15	
Ibohamane	2 ^{ème}	2,72	1,69	2,65	8,38			1,21	3,76	0,04	0,00	0,00	
Ikotayan	1 ^{ère}	1,3	0,3	180,3	0,7	0,3	443,5	15,6	15,9	0,00	0,00	1,52	0,10
Ikotayan	2 ^{ème}	1,02	0,32	179,4	0,79			14,13	15,40	0,15	0,00	1,50	

Suite annexe 12 : Paramètres chimiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (cette étude)

Site	Campagne	Ca	Mg	Na	K	Fet	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	F	Br
		(mg/L)											
Iliba	1 ^{ère}	1,8	0,6	182,0	0,8	0,6	413,6	17,6	17,5	1,69	1,27	0,86	0,00
Illéla	1 ^{ère}	9,1	4,8	10,6	13,4	0,2	59,2	1,8	32,2	0,00	0,00	0,03	0,01
Illéla	2 ^{ème}	9,22	4,93	8,59	13,15			2,26	32,57	0,05	0,00	0,16	
In Tézégaret	2 ^{ème}							2,67	2,29	0,05	0,04	0,16	
In waggar	2 ^{ème}	14,36	8,44	49,43	8,53			23,35	47,91	0,07	0,00	0,55	
Inarigan	1 ^{ère}	27,7	15,3	3,9	3,2	0,1	178,7	0,8	1,0	0,00	0,00	0,01	0,00
Inarigan	2 ^{ème}	30,73	15,97	3,97	3,40			1,05	1,06	0,17	0,00	0,00	
Infène	2 ^{ème}	4,97	0,62	248,75	1,43			6,22	6,28	1,02	0,00	0,00	
Intamat	1 ^{ère}	1,9	0,7	151,1	0,7	0,0	342,2	15,7	15,6	1,12	0,00	0,81	0,07
Intamat	2 ^{ème}	2,17	0,75	105,80	0,72			14,43	15,06	1,92	0,00	0,80	
Keita	2 ^{ème}	4,44	1,85	4,35	8,59			1,12	3,66	0,05	0,00	0,17	
Konni	1 ^{ère}	18,5	4,1	9,1	12,0	0,4	73,8	5,4	30,2	0,00	0,00	0,04	0,05
Louberat	1 ^{ère}	7,4	6,5	13,2	6,6	0,0	78,7	1,3	14,5	0,00	0,00	0,25	0,00
Loudou	2 ^{ème}	3,87	2,51	3,06	7,62			1,57	3,77	0,06	0,00	0,17	
Mallalebi	1 ^{ère}	24,0	5,5	24,9	10,3	0,3	114,1	6,7	49,5	0,00	0,09	0,07	0,03
Tabalak	1 ^{ère}	24,0	4,3	11,1	12,3	0,0	107,4	6,0	16,5	0,00	0,00	0,07	0,06
Takanamat	1 ^{ère}	12,3	2,5	50,8	5,7	2,3	154,3	6,6	17,3	0,00	0,00	0,25	0,04
Takarwilit	1 ^{ère}	0,9	0,2	126,2	0,7	0,0	285,5	7,5	12,7	0,00	0,00	0,57	0,03
Tama	1 ^{ère}	7,1	2,3	8,6	11,6	0,0	56,1	1,1	14,7	0,00	0,00	0,01	0,00
Tamaya	1 ^{ère}	2,0	2,0	2,8	7,7	0,0	24,4	1,3	3,9	5,07	0,01	0,00	0,01
Tamaya	2 ^{ème}	2,21	2,05	2,25	7,22			1,79	3,65	5,27	0,05	0,00	
Taoudawene	1 ^{ère}	22,5	10,2	15,7	9,1	0,1	134,2	13,2	14,0	0,00	0,00	0,06	0,10
Taoudawene	2 ^{ème}	22,44	10,50	14,68	9,50			12,16	12,78	0,08	0,00	0,17	
Tassara	1 ^{ère}	2,8	1,2	125,5	1,5	0,2	222,0	34,9	14,5	26,18	0,00	0,14	0,20
Tazalite	1 ^{ère}	0,7	0,1	93,9	0,3	0,1	217,2	6,0	14,0	0,00	0,00	0,18	0,04
Tchintabraden	1 ^{ère}	23,0	9,3	60,5	5,6	0,1	208,0	10,3	34,2	4,87	0,00	0,10	0,06
Tchintabraden	2 ^{ème}	42,41	14,78	22	7,63			8,54	32,58	1,05	0,00	0,00	

Suite annexe 12 : Paramètres chimiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (cette étude)

Site	Campagne	Ca	Mg	Na	K	Fet	HCO3	Cl	SO4	NO3	NO2	F	Br
		(mg/L)											
Telemces	1ère	1,4	0,2	77,0	1,8	0,3	174,5	6,7	17,3	0,00	0,00	0,28	0,04
Telemces	2ème	1,34	0,16	58,96	1,91			6,81	16,79	0,06	0,00	0,00	
Tillia	1ère	1,8	0,2	183,8	0,8	0,4	290,4	79,5	30,2	0,00	0,00	1,01	0,36
Tillia	2ème	1,31	0,15		0,87			82,25	29,66	0,16	0,00	0,89	
Timbilim	2ème	1,28	0,83		1,10			24,34	46,06	0,13	0,00	1,72	

NB : Damboutan puits capte les nappes du Crétacé supérieur

Annexe 13 : Paramètres chimiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (campagne de septembre 2016)

Site	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	Total Cation	Total Anion	B.I
	(méq/L)										
Bada Guichiri	0,33	0,29	0,41	0,25	0,81	0,04	0,48	0,00	1,27	1,34	3
Bambeye	1,21	0,57	1,17	0,20	2,26	0,19	0,72	0,00	3,15	3,17	0
Bouza	0,55	0,21	0,68	0,23	1,41	0,06	0,33	0,00	1,66	1,80	4
Dan Gona	0,98	0,70	0,63	0,36	1,40	0,15	1,17	0,00	2,67	2,71	1
Doguérawa	0,79	0,27	0,58	0,25	1,42	0,11	0,44	0,00	1,89	1,97	2
Doli	1,71	0,90	0,44	0,22	2,28	0,24	0,99	0,00	3,27	3,51	4
Gadamata	0,22	0,15	0,06	0,20	0,59	0,02	0,07	0,00	0,63	0,68	4
Hiro	0,23	0,16	0,16	0,23	0,68	0,03	0,16	0,00	0,78	0,87	5
Illéla	0,46	0,40	0,46	0,34	0,97	0,05	0,67	0,00	1,66	1,69	1
Konni	0,93	0,35	0,39	0,31	1,21	0,15	0,63	0,00	1,97	1,99	1
Mallalebi	1,20	0,46	1,08	0,26	1,87	0,19	1,03	0,00	3,01	3,09	2
Tama	0,35	0,19	0,37	0,30	0,92	0,03	0,31	0,00	1,22	1,26	2

Suite annexe 13 : Paramètres chimiques des eaux du système aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien (septembre 2016)

Site	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4	NO3	Total Cation	Total Anion	B.I
	(méq/L)										
Damboutan	0,97	0,64	1,05	0,18	2,24	0,21	0,39	0,00	2,84	2,84	1
Ikotayan	0,06	0,02	7,84	0,02	7,27	0,44	0,33	0,00	7,95	8,04	1
Iliba	0,09	0,05	7,91	0,02	6,78	0,49	0,37	0,03	8,07	7,67	2
Intamat	0,10	0,06	6,57	0,02	5,61	0,44	0,32	0,02	6,74	6,39	2
Tabalak	1,20	0,36	0,48	0,31	1,76	0,17	0,34	0,00	2,36	2,27	2
Takanamat	0,62	0,21	2,21	0,15	2,53	0,19	0,36	0,00	3,18	3,08	1
Takarwilit	0,05	0,02	5,49	0,02	4,68	0,21	0,26	0,00	5,57	5,16	4
Taoudawene	1,13	0,85	0,68	0,23	2,20	0,37	0,29	0,00	2,89	2,87	0
Tassara	0,14	0,10	5,45	0,04	3,64	0,98	0,30	0,42	5,74	5,35	3
Tazalite	0,03	0,01	4,08	0,01	3,56	0,17	0,29	0,00	4,13	4,02	1
Tchintabraden	1,15	0,77	2,63	0,14	3,41	0,29	0,71	0,08	4,70	4,49	2
Telemces	0,07	0,01	3,35	0,05	2,86	0,19	0,36	0,00	3,48	3,41	1
Tillia	0,09	0,01	7,99	0,02	4,76	2,24	0,63	0,00	8,11	7,63	3
Abalak	0,15	0,10	0,06	0,14	0,30	0,02	0,04	0,09	0,44	0,45	1
Abouhaya	1,30	0,63	0,34	0,20	2,31	0,19	0,10	0,07	2,47	2,67	4
Inarigan	1,39	1,27	0,17	0,08	2,93	0,02	0,02	0,00	2,91	2,97	1
Louberat	0,37	0,54	0,57	0,17	1,29	0,04	0,30	0,00	1,65	1,63	0
Tamaya	0,10	0,16	0,12	0,20	0,40	0,04	0,08	0,08	0,58	0,60	1

Annexe 14 : Paramètres isotopiques (^{13}C et ^{14}C) des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (campagne de septembre 2016)

Site	Longitude	Latitude	Aquifère capté	^{13}C	^{14}C
Abalak	6,285000	15,439000	CI Libre	-13,697	42,22
Abouhaya	6,709000	15,376000	CI Libre	-11,623	19,25
Bada Guichiri	5,365555	14,525555	CH Captif	-8,746	27,33
Bambeye	5,096700	14,722000	CH Captif	-9,784	2,60
Bouza	6,044917	14,425861	CH Captif	-11,573	22,68
Damboutan	5,492000	15,934000	Crétacé sup	-11,800	4,39
Dan Gona	5,031388	14,270555	CH Captif	-8,793	8,81
Doguérawa	5,592861	13,968861	CH Captif	-9,547	4,19
Doli	5,343888	15,030830	CH Captif	-8,829	4,08
Gadamata	6,087222	14,813888	CH Captif	-10,077	56,93
Hiro	5,632222	14,702500	CH Captif	-8,922	35,21
Ikotayan	4,316700	16,283100	CI Captif	-10,246	1,32
Iliba	4,711600	17,006400	CI Captif	-10,751	1,72
Illéla	5,248000	14,457000	CH Captif	-8,003	18,65
Inarigan	6,168000	15,740000	CI Libre	-13,219	43,11
Intamat	4,941000	16,551000	CI Captif	-11,047	1,84
Konni	5,249250	13,806139	CH Captif	-9,172	5,33
Louberat	6,140555	16,890556	CI Libre	-10,040	41,05
Mallalebi	6,066700	13,830600	CH Captif	-10,940	10,99
Tabalak	5,656100	15,094160	CI Captif	-13,026	19,38
Takanamat	4,770111	15,142667	CI Captif	-11,646	2,01
Takarwilit	4,341000	15,680000	CI Captif	-11,320	1,64
Tama	5,769166	14,280000	CH Captif	-9,763	22,49
Tamaya	6,770000	15,815000	CI Libre	-13,025	45,02
Taoudawene	5,621100	16,371400	CI Captif	-11,838	3,12
Tassara	5,636000	16,789000	CI Captif	-9,737	3,25
Tazalite	5,260000	16,900000	CI Captif	-10,386	1,92
Tchintabraden	5,797000	15,885000	CH Captif	-11,694	2,34
Telemces	4,797000	15,620000	CH Captif	-12,328	3,26
Tillia	4,788000	16,136000	CH Captif	-11,047	1,71

Annexe 15 : Ages bruts Carbone-14, non calibrés et calibrés

Référence échantillon	¹⁴ C (pmC)	Err pmC	âge brut	âge calBP	âge calBC
Ikotayan	1,32192	0,05474	35762	40683 ± 797	38733 ± 797
Takarwilit	1,64001	0,05398	33980	39562 ± 961	37612 ± 961
Iliba	1,71919	0,05412	33590	39029 ± 1397	37079 ± 1397
Tillia	1,71122	0,0537	33628	39140 ± 1305	37190 ± 1305
Intamat	1,83509	0,0564	33051	37522 ± 675	35572 ± 675
Tazalite	1,92415	0,05578	32659	37192 ± 691	35242 ± 691
Takanamat	2,01174	0,05729	32291	36730 ± 700	34780 ± 700
Tchintabaraden	2,34328	0,05761	31030	35071 ± 352	33121 ± 352
Bambeye	2,59668	0,05766	30181	34379 ± 161	32429 ± 161
Telemces	3,25846	0,06622	28304	32707 ± 327	30757 ± 327
Taoudawene	3,11974	0,06227	28664	33137 ± 371	31187 ± 371
Konni	5,32605	0,10138	24242	29005 ± 417	27055 ± 417
Tassara	3,25388	0,06172	28316	32716 ± 323	30766 ± 323
Doli	4,07802	0,06404	26450	31241 ± 346	29291 ± 346
Damboutane	4,38883	0,06755	25842	30871 ± 348	28921 ± 348
Doguerawa	4,1895	0,06263	26227	31098 ± 341	29148 ± 341
Dan Gona	8,81071	0,08393	20081	24011 ± 309	22061 ± 309
Mallalebi	10,99194	0,08286	18253	21952 ± 325	20002 ± 325
Tabalak	19,37939	0,11024	13565	16588 ± 335	14638 ± 335
Abouhaya	19,24579	0,10854	13622	16713 ± 258	14763 ± 258
Illéla	18,65017	0,10145	13882	17122 ± 190	15172 ± 190
Bouza	22,68266	0,11409	12264	14342 ± 266	12392 ± 266
Tama	22,49245	0,10095	12334	14499 ± 335	12549 ± 335
Bada Guichiri	27,33443	0,11731	10722	12705 ± 40	10755 ± 40
Tamaya	45,01556	0,18617	6598	7504 ± 42	5554 ± 42
Hiro	35,21317	0,14416	8628	9587 ± 36	7637 ± 36
Louberat	41,051	0,16272	7360	8184 ± 83	6234 ± 83
Inarigan	43,11277	0,16886	6955	7785 ± 44	5835 ± 44
Abalak	42,21727	0,1547	7129	7966 ± 19	6016 ± 19
Gadamata	56,93059	0,18635	4657	5396 ± 51	3446 ± 51

Annexe 16 : Teneurs isotopiques moyennes annuelles des précipitations pondérées par hauteur d'eau au Niger (AIEA, ORSTOM – IRD, Niamey)

Année	Source	Hauteur de Pluie (mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰ vs V-SMOW)	$\delta^2\text{H}$ (‰ vs V-SMOW)
1992	ORSTOM (AIEA)	471.00	-3.48	-21.79
1993		452.00	-2.31	-16.70
1994		584.00	-5.34	-33.71
1995		533.00	-4.96	-33.41
1997		360.80	-2.98	-18.28
1998		892.20	-4.75	-37.95
1999		537.50	-5.81	-37.47
2009	IRD (AIEA)	426.30	-4.49	-23.98
2010		419.70	-4.81	-28.10
2011		343.85	-2.43	-9.43
2012		572.40	-4.22	-25.15
2013		431.26	-3.95	-21.00
2014		597.80	-3.18	-16.20
2015		597.80	-3.11	-12.46
2016		437.10	-3.59	-18.19
Minimum		343.85	-5.81	-37.95
Maximum		892.20	-2.31	-9.43
moyenne		510.45	-3.96	-23.59
Ecart-type		130.02	1.02	8.62
médiane		471.00	-3.95	-21.79

Annexe 17 : Paramètres isotopiques de la molécule d'eau du système aquifère du Continental

Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Site	Campagne	Longitude	Latitude	Aquifère capté	¹⁸ O	² H
Abalak	1ère	6,285000	15,439000	CI Libre	-6,78	-47,68
Abalak	2ème	6,27729	15,45364	CI Libre	-7,05	-48,32
Abouhaya	1ère	6,709000	15,376000	CI Libre	-7,62	-55,19
Abouhaya	2ème	6,70900	15,37600	CI Libre	-7,19	-54,08
Amataghtagh	2ème	6,09090	16,21101	CI Libre	-7,99	-57,94
Azeze	2ème	6,31060	15,02640	CH Captif	-4,40	-30,39
Bada Guichiri	1ère	5,365555	14,525555	CH Captif	-6,21	-48,35
Bada Guichiri	2ème	5,36484	14,52578	CH Captif	-6,11	-48,90
Bambeye	1ère	5,096700	14,722000	CH Captif	-6,76	-50,13
Bouza	1ère	6,044917	14,425861	CH Captif	-5,81	-45,96
Chimbangran 1	2ème	6,07198	16,13203	CI Libre	-7,23	-50,99
Chinwagri	2ème	6,05442	16,03620	CI Libre	-7,83	-56,32
Damboutan	1ère	5,492000	15,934000	Crétacé sup	-7,61	-55,90
Damboutan	2ème	5,49200	15,93400	CI Captif	-6,14	-49,44
Dan Gona	1ère	5,031388	14,270555	CH Captif	-6,63	-49,89
Dan Gona	2ème	5,03186	14,27068	CH Captif	-6,52	-49,63
Daré Dara	2ème	5,49002	14,56366	CH Captif	-6,01	-47,65
Doguérawa	1ère	5,592861	13,968861	CH Captif	-6,45	-48,65
Doli	1ère	5,343888	15,030830	CH Captif	-6,44	-48,59
Gadamata	1ère	6,087222	14,813888	CH Captif	-5,47	-41,61
Gadamata	2ème	6,08715	14,81384	CH Captif	-5,70	-41,90
Garao	2ème	5,75313	16,28393	CI Captif	-6,74	-51,84
Hiro	1ère	5,632222	14,702500	CH Captif	-6,11	-48,44
Hiro	2ème	5,63230	14,70229	CH Captif	-6,22	-48,73
Ibohamane	2ème	5,92291	14,79440	CH Captif	-6,35	-46,31
Ikotayan	1ère	4,316700	16,283100	CI Captif	-7,90	-56,77
Iliba	1ère	4,711600	17,006400	CI Captif	-7,45	-57,50
Illéla	1ère	5,248000	14,457000	CH Captif	-6,44	-49,67
Illéla	2ème	5,24673	14,45691	CH Captif	-6,43	-50,13
In Tézégaret	2ème	6,49001	15,59064	CI Libre	-8,11	-56,56
In waggar	2ème	6,68460	16,12575	CI Libre	-7,23	-53,85
Inarigan	1ère	6,168000	15,740000	CI Libre	-7,97	-56,14
Inarigan	2ème	6,17009	15,74149	CI Libre	-7,92	-56,23
Infène	2ème	4,84645	15,97501	CI Captif	-7,78	-56,44
Inkotayan	2ème	4,31930	16,28918	CI Captif	-8,02	-57,76
Intamat	1ère	4,941000	16,551000	CI Captif	-7,91	-57,75
Intamat	2ème	4,94615	16,55259	CI Captif	-8,20	-58,97
Keita	2ème	5,77064	14,75864	CH Captif	-6,38	-50,18
Konni	1ère	5,249250	13,806139	CH Captif	-6,17	-44,92
Louberat	1ère	6,140555	16,890556	CI Libre	-8,01	-57,53
Loudou	2ème	5,90217	14,94129	CH Captif	-5,57	-42,95

Suite annexe 17 : Paramètres isotopiques de la molécule d'eau du système aquifère du
Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua

Site	Campagne	Longitude	Latitude	Aquifère capté	¹⁸ O	² H
Mallalebi	1 ^{ère}	6,066700	13,830600	CH Captif	-5,99	-46,58
Tabalak	1 ^{ère}	5,656100	15,094160	CI Captif	-7,82	-55,52
Takanamat	1 ^{ère}	4,770111	15,142667	CI Captif	-7,24	-54,45
Takarwilit	1 ^{ère}	4,341000	15,680000	CI Captif	-8,01	-57,38
Tama	1 ^{ère}	5,769166	14,280000	CH Captif	-6,73	-51,60
Tamaya	1 ^{ère}	6,770000	15,815000	CI Libre	-7,69	-52,00
Tamaya	2 ^{ème}	6,76997	15,81472	CI Libre	-7,57	-51,17
Taoudawene	1 ^{ère}	5,621100	16,371400	CI Captif	-7,61	-56,78
Taoudawene	2 ^{ème}	5,60254	16,39269	CI Captif	-7,56	-57,11
Tassara	1 ^{ère}	5,636000	16,789000	CI Captif	-7,10	-55,80
Tazalite	1 ^{ère}	5,260000	16,900000	CI Captif	-8,04	-59,30
Tchintabraden	1 ^{ère}	5,797000	15,885000	CH Captif	-6,49	-49,61
Tchintabraden	2 ^{ème}	5,79700	15,88500	CI Captif	-6,55	-50,77
Telemces	1 ^{ère}	4,797000	15,620000	CH Captif	-7,48	-55,16
Telemces	2 ^{ème}	4,77569	15,62730	CI Captif	-7,65	-56,29
Tillia	1 ^{ère}	4,788000	16,136000	CH Captif	-7,80	-56,48
Tillia	2 ^{ème}	4,78800	16,13600	CI Captif	-7,87	-57,17
Timbilim	2 ^{ème}	5,23856	16,54657	CI Captif	-7,71	-56,60

Annexe 18 : Mesure isotopique du ³⁶Cl, Data corrigées par ASTER, et resultats non corrigés du Blanc

Nom Echantillon	Data corrigées ASTER															
	36Cl/35Cl			36Cl/37Cl			35Cl/37Cl			37Cl/35Cl						
Illéla	1,97471E-13	±	1,15496E-14	0,05849	1,40227E-12	±	7,8605E-14	0,056	7,106635	±	0,1234408	0,017	0,140713573	±	0,00244	0,017
Azeze	1,42297E-13	±	1,08768E-14	0,07644	1,01559E-12	±	7,56358E-14	0,074	7,142657	±	0,1187558	0,017	0,140003923	±	0,00233	0,017
Bada Guichiri	1,0623E-13	±	8,14894E-15	0,07671	1,38223E-12	±	1,0332E-13	0,075	13,02173	±	0,2126432	0,016	0,076794712	±	0,00125	0,016
Tamaya	8,93355E-14	±	8,1273E-15	0,09098	1,18202E-12	±	1,05587E-13	0,089	13,2415	±	0,2192172	0,017	0,075520145	±	0,00125	0,017
Gadamata	3,21946E-14	±	3,66515E-15	0,11384	1,22231E-12	±	1,37465E-13	0,112	37,99566	±	0,7034626	0,019	0,026318795	±	0,00049	0,019
Abalak	4,30508E-14	±	4,74364E-15	0,11019	1,10405E-12	±	1,20155E-13	0,109	25,6651	±	0,4879310	0,019	0,038963417	±	0,00074	0,019
Hiro	6,04654E-14	±	5,64928E-15	0,09343	1,3126E-12	±	1,20619E-13	0,092	21,72512	±	0,3808123	0,018	0,046029665	±	0,00081	0,018
Keita	4,55298E-14	±	4,5613E-15	0,10018	1,58886E-12	±	1,56472E-13	0,098	34,92408	±	0,7489473	0,021	0,028633539	±	0,00061	0,021
Amataghtagh	3,70859E-14	±	4,33711E-15	0,11695	1,51067E-12	±	1,76176E-13	0,117	40,76584	±	0,7525616	0,018	0,024530342	±	0,00045	0,018
Abouhaya	4,11513E-13	±	1,81447E-14	0,04409	1,28959E-12	±	5,23377E-14	0,041	3,136199	±	0,0511421	0,016	0,318857317	±	0,00520	0,016
Dan Gona	3,90904E-13	±	1,76128E-14	0,04506	1,22625E-12	±	5,10486E-14	0,042	3,139382	±	0,0517355	0,016	0,31853403	±	0,00525	0,016
Nom Echantillon	Résultats non corrigés du Blanc															
	[Chlore] (dilution isotopique) (mmol/g)				1/Cl (mmol/g)				36Cl (108 atom/l)				36Cl/Cl (1015 at/at)			
Illéla	0,060587512	±	0,001937794	0,03198	16,50505153	±	0,527887488	0,032	0,123559	±	0,0076307	0,062	338,6428552	±	23,55179	0,070
Azeze	0,060184444	±	0,001839995	0,03057	16,61558919	±	0,507981791	0,031	0,088599	±	0,0070308	0,079	244,45167	±	20,78846	0,085
Bada Guichiri	0,008066518	±	0,000184864	0,02292	123,9692282	±	2,841053446	0,023	0,01611	±	0,0012772	0,079	331,6402273	±	27,36870	0,083
Tamaya	0,008058357	±	0,00018613	0,02310	124,0947811	±	2,866317576	0,023	0,013708	±	0,0012906	0,094	282,4697222	±	27,38231	0,097
Gadamata	0,004550156	±	0,000100971	0,02219	219,7726986	±	4,876894772	0,022	0,007729	±	0,0009729	0,126	282,0526218	±	36,05271	0,128
Abalak	0,007119977	±	0,00016624	0,02335	140,4499007	±	3,27927145	0,023	0,011056	±	0,0013079	0,118	257,8515423	±	31,09244	0,121
Hiro	0,008645719	±	0,000191249	0,02212	115,6641736	±	2,558570673	0,022	0,016205	±	0,0015938	0,098	311,2335139	±	31,37546	0,101
Keita	0,004981895	±	0,000126815	0,02546	200,7268329	±	5,10954691	0,025	0,011264	±	0,0012115	0,108	375,4465955	±	41,49718	0,111
Amataghtagh	0,004202552	±	9,27739E-05	0,02208	237,9506556	±	5,252904238	0,022	0,008954	±	0,0011413	0,127	353,7889068	±	45,76691	0,129
Abouhaya					5,168106116				0,358392	±	0,7348738	2,050	311,8030213	±	13,74825	0,044
Dan Gona					6,073467116				0,289694	±	0,8836643	3,050	296,1878093	±	13,34520	0,045

Suite annexe 18 : Mesure isotopique du ³⁶Cl, resultats corrigés du Blanc

Résultats corrigés du Blanc																
Nom Echantillon	Concentration Chlore (par dilution isotopique) (mmol/g)			1/Cl (mmol/g)			36Cl (108 atom/l)			36Cl/Cl (1015 at/at)						
Illéla	0,060425747	±	0,001938079	0,03207	16,54923673	±	0,530795709	0,032	0,123469	±	0,007631946	0,062	339,3010154	±	23,6284	0,070
Azeyé	0,060022295	±	0,001840297	0,03066	16,66047581	±	0,510813807	0,031	0,088508	±	0,00703221	0,079	244,8613749	±	20,8531	0,085
Bada Guichiri	0,007906895	±	0,000187751	0,02375	126,4718956	±	3,003097381	0,024	0,016021	±	0,001284547	0,080	336,4620487	±	28,1351	0,084
Tamaya	0,007895795	±	0,000189104	0,02395	126,6496879	±	3,033250017	0,024	0,013617	±	0,001298076	0,095	286,374872	±	28,1478	0,098
Gadamata	0,004387243	±	0,000106375	0,02425	227,9335683	±	5,526571603	0,024	0,007638	±	0,000982903	0,129	289,0804769	±	37,8567	0,131
Abalak	0,006959536	±	0,000169477	0,02435	143,6877346	±	3,499044618	0,024	0,010966	±	0,001315167	0,120	261,6567081	±	32,0201	0,122
Hiro	0,008483372	±	0,000194137	0,02288	117,8776564	±	2,697555358	0,023	0,016114	±	0,001599856	0,099	315,4138608	±	32,1367	0,102
Keita	0,004821071	±	0,00013105	0,02718	207,4227722	±	5,638317443	0,027	0,011174	±	0,001219358	0,109	384,875517	±	43,2822	0,112
Amataghtagh	0,004040258	±	9,85851E-05	0,02440	247,5089597	±	6,039389488	0,024	0,008863	±	0,001149767	0,130	364,272959	±	48,0839	0,132

Suite annexe 18 : Mesure isotopique du ^{36}Cl , pesée et nombre de coups total de ^{36}Cl

Nom Echantillon	Spike ^{35}Cl (g)	Echantillon (g)	Concentration Chlore (mg/l)	Coups total de ^{36}Cl
Illéla	0,3	1007,17	2,2578	434
Azeye	0,3	1004,78	2,1341	222
Bada Guichiri	0,1013	1020,68	1,9495	199
Tamaya	0,1016	1002,23	1,7876	133
Gadamata	0,2029	1000,07	1,4687	96
Abalak	0,2055	1015,48	1,3817	83
Hiro	0,2026	1003,55	1,1885	144
Keita	0,2045	1013,06	1,1248	121
Amataghtagh	0,2037	1003,88	1,0117	77
Abouhaya	0	387,36	6,7667	1089
Dan Gona	0	452,24	5,758	992

Résumé

Titre : Evaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la Région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques

Mots clés : hydrogéologie, hydrochimie, hydrologie isotopique, datation, recharge, aquifère multicouche

Résumé : Dans la région de Tahoua (Niger), qui fait partie du bassin des Iullemeden, le système aquifère multicouche profond du Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H) représente une réserve essentielle. Il est utilisé pour l'alimentation en eau potable des populations, pour les besoins en eau des industries extractives, et pour l'abreuvement du bétail, en raison de la dégradation de la qualité et le très faible débit des nappes phréatiques, et de celles du Crétacé supérieur. Malgré quelques études hydrogéologiques classiques conduites sur ce système aquifère, il reste mal connu, notamment en ce qui concerne la répartition des différentes masses d'eau et leurs temps de résidence/renouvellement. Cette étude, principalement fondée sur une approche hydrogéochimique et isotopique, vise à améliorer les connaissances sur le système aquifère du CI/H afin d'optimiser durablement sa gestion.

Les données ont été obtenues à partir de cartes géologiques et des fiches techniques de forage, de diagraphie, et d'essais de pompage. En outre, des échantillons d'eau ont été prélevés dans 40 forages répartis régulièrement dans la zone d'étude (114 425 km²). Des paramètres (pH, t et CE) ont été mesurés *in situ* et les échantillons ont été acheminés au laboratoire GEOPS où des analyses chimiques (ions majeurs) et isotopiques (¹⁸O, ²H, ¹³C, ¹⁴C, ³⁶Cl) ont été effectuées.

À partir des coupes géologiques, la couche du CH est présente au-dessus des couches CI dans la partie sud de la région mais pas dans la partie nord.

Cependant, la piézométrie est continue sur toute la région. Dans la partie située au Nord (au-dessus de 16°N), les lignes d'écoulement sont dirigées des affleurements du CI (Est) vers l'Ouest, et dans la partie située au Sud (au-dessous de 16°N), des affleurements du CH (Nord-Est) vers le Sud-Ouest. La teneur en isotopes stables de l'eau (vs V-SMOW) varie de -8 à -7 ‰ pour ¹⁸O et de -59 à -48 ‰ pour ²H dans la partie nord (CI) et de -6 à -5 ‰ pour ¹⁸O et -51 à -41 ‰ pour ²H dans la partie sud (CH), montrant deux masses d'eau différentes. Toutes ces teneurs sont largement inférieures à celles correspondant aux précipitations actuelles, qui ne contribuent donc pas significativement à la recharge. Ceci est en accord avec les "âges" des eaux souterraines (5 à 36 ka) calculés à partir des teneurs en ¹⁴C (1 à 57 pmC), qui sont également en bon accord avec la piézométrie.

Ainsi, même si la piézométrie continue du système aquifère du CI/H indique que les pressions sont en équilibre entre les différentes couches, les caractéristiques géochimiques montrent des différences notables entre la partie sud, où la couche de CH est présente, et la partie nord, où elle est absente. Les échanges d'eau entre les différentes couches sont donc très limités. Dans toutes ces couches, les eaux souterraines sont vieilles (> 5ka) et ont été rechargées sous un climat plus frais qu'aujourd'hui. Il est probable qu'elles soient largement héritées de périodes humide du Pléistocène supérieur et de la "Période Humide Africaine" (~ 15-5 ka) et qu'elles devraient être gérées comme une ressource fossile.



Summary

Title : Assessment of the water resources of the "Continental Intercalaire/Hamadien" aquifer in the Tahoua Region (Iullemeden basin, Niger): climatic and anthropic impacts

Keywords : hydrogeology, hydrochemistry, isotope hydrology, dating, recharge, multilayer aquifer

Summary : In the region of Tahoua (Niger), which is part of the Iullemeden basin, the deep multilayer aquifer system of the Continental Intercalaire/Hamadien (CI/H) represents an essential reserve. It is exploited for the drinking-water supply for the local population, for the extractive-industry's water use and for the watering of cattle, because of the degradation of water quality and the very low flow in shallow aquifers and Upper Cretaceous aquifers. Despite some classical hydrogeological studies, this system remains poorly known, particularly with regard to the distribution of the different water bodies and their residence/renewal times. This study, mainly based on a geochemical and isotopic approach, aims to improve knowledge on the CI/H system in order to optimize its sustainable management.

Data were obtained from geological maps, and data-sheets of drilling, pumping and logging test. In addition, water samples were collected from 40 boreholes regularly distributed over the study area (114 425 km²). Some parameters (pH, t and EC) were measured in situ and the samples were sent to the GEOPS laboratory where chemical (major ions) and isotopic (stable isotopes in water, ¹⁴C, ¹³C, ³⁶Cl) analyses were performed.

From geological cross-sections, the CH layer is present above the CI layers in the Southern part of the region but not in the Northern part.

However, piezometry is continuous over the whole region. In the Northern part (above 16°N), the flow lines are directed from the CI outcrops (East) to west and in the Southern part (below 16°N), from the CH outcrops (East) to South-West. Stable isotope contents of water (vs V-SMOW) range from -8 to -7 ‰ for ¹⁸O and from -59 to -48 ‰ for ²H in the Northern part (CI) and from -6 to -5 ‰ for ¹⁸O and -51 to -41 ‰ for ²H in the Southern part (CH), showing two different water masses. All these values are much lower than those corresponding to present-day precipitation, which does not significantly contribute to recharge. This is in agreement with the groundwater "ages" (5 to 36 ka) calculated from ¹⁴C contents (1 to 57 pmC), which are also in good agreement with piezometry.

Therefore, even if the continuous piezometry of the deep aquifer system of CI/H indicates that pressures are in equilibrium between the different layers, the geochemical features show noticeable differences between the Southern part, where the CH layer is present, and the Northern part, where it is absent. Thus, water exchanges between the different layers are very limited. In all these layers, groundwater is old (> 5ka) and was recharged under a cooler climate than at present. Probably, it is largely inherited from Upper-Pleistocene wet periods and from the "African Humid Period" (~15-5 ka) and should be managed as a fossil resource.

