



BÉNIN



BURKINA FASO



GHANA



MALI



NIGER



TOGO

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

RAF/7/011

SYSTÈME DU LIPTAKO-GOURMA ET DE LA HAUTE-VOLTA

2017

NOTE DE L'ÉDITEUR

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

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

SYSTÈME DU LIPTAKO-GOURMA ET DE LA HAUTE-VOLTA

CONTREPARTIES :

M. Philippe Armand ADJOMAYI (Bénin)

M. Moussa BOUKARI (Bénin)

M^{me} Ratoussian Aline KABORE KOMI (Burkina Faso)

M. Alphonse GALBANE (Burkina Faso)

M. Dickson ADOMAKO (Ghana)

M. Shiloh Kwabena Dedeh OSAE (Ghana)

M. Sidi KONÉ (Mali)

M. Aly THIAM (Mali)

M. Sanoussi RABÉ (Niger)

M. Ismaghil BOBADJI (Niger)

M. Gounten MANOUABA (Togo)

M. Kounadi DIABAKTE (Togo)

Expert :

M^{me} Laurence GOURCY (France)

Reproduit par l'AIEA
Vienne (Autriche), 2017

Table des matières

1. INTRODUCTION	1
1.1. Brève présentation de la zone étudiée et études réalisées précédemment	1
1.2. Objectifs du projet	3
2. SITES D'ÉTUDE	4
2.1. Situation géographique et topographie générale	4
2.2. Climatologie	6
2.3. Géologie et hydrogéologie	9
3. ACQUISITION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE SUIVIE	15
4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	16
4.1. Signaux isotopiques dans les précipitations/eaux de pluie	16
4.2. Présentation des données chimiques sur les eaux souterraines	21
4.3. Liptako-Gourma	22
4.4. Gondo-Sourou	28
4.5. Secteur de la Haute-Volta centrale	37
5. CONCLUSIONS	49
6. RÉFÉRENCES	55
ABRÉVIATIONS	58

1. INTRODUCTION

1.1. Brève présentation de la zone étudiée et études réalisées précédemment

Le système de la zone Liptako-Gourma/Haute-Volta n'est pas un aquifère transfrontières dans lequel les eaux souterraines circulent en continu en Afrique occidentale comme le cas des bassins sédimentaires d'Iullemeden ou de Taoudéni, mais est constitué de diverses unités géologiques/hydrogéologiques dont les eaux souterraines obéissent à des dynamiques différentes, de formations sédimentaires anciennes (de grès) et de roches dures fissurées/altérées. Les limites de ces systèmes aquifères correspondent donc plus ou moins à celles des bassins hydrologiques (Haute-Volta et Sourou) ou des régions naturelles (Liptako-Gourma). Les aquifères du Liptako-Gourma et de la Haute-Volta centrale sont pour l'essentiel des aquifères de socle cristallin. Deux aquifères sédimentaires importants à l'échelle locale ont été localisés dans la plaine du Gondo-Sourou et dans le bassin de la Pendjari/Oti. Les pays concernés par ces ressources en eaux souterraines sont le Niger, le Mali, le Burkina Faso, le Ghana, le Bénin et le Togo. La « dépression piézométrique » du Gondo-Sourou est constituée d'un aquifère libre qui appartient aux bassins intra-continentaux cénozoïques du Sahel (Koussoube, 2010 ; Dakouré, 2003). Cette zone particulière, qui prolonge le Bassin de Taoudéni, a été relativement bien étudiée, notamment dans le cadre de deux thèses de doctorat et d'un important projet national malien, le « Programme d'appui aux collectivités territoriales pour l'eau potable et l'assainissement (PACTEA) ».

L'aquifère du Liptako-Gourma est l'un des aquifères transfrontières couverts par le projet ISARM (Gestion des ressources des aquifères partagés), dans le cadre du programme de l'UNESCO/PHI. Ce projet international avait pour objet d'améliorer la compréhension des facteurs scientifiques, socio-économiques, juridiques, institutionnels et environnementaux liés à la gestion des aquifères transfrontières. Cependant, le Liptako-Gourma est une zone géographique naturelle sans limites précises.

Depuis le lancement du projet ISARM en Afrique (en 2002), diverses activités ont été menées pour collecter les informations disponibles, élaborer des systèmes de suivi, établir une plateforme et organiser des réunions en vue de faciliter l'échange d'informations et de données, et cartographier les ressources en eaux souterraines.

En 2005, sous l'égide du WHYMAP (Programme mondial d'évaluation et de cartographie hydrogéologiques) et de l'IGRAC (Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines), les limites des aquifères transfrontières d'Afrique occidentale et centrale ont été déterminées (Davies et al., 2012 ; Altchenko et Villholth, 2013). Parmi les 20 aquifères délimités, l'aquifère transfrontières présentant de l'intérêt pour la présente étude est appelé APWC17 (Liptako-Gourma) et concerne toute la plaine du Gondo.

Aucun des secteurs étudiés n'est couvert comme étude de cas dans le cadre du récent projet GRAPHIC de l'UNESCO-PHI (Évaluation des ressources en eaux souterraines qui subissent les pressions exercées par l'activité humaine et les changements climatiques).

Au Niger, le BGR a réalisé une étude détaillée d'une zone proche de Niamey, la capitale, qui a permis de mettre au jour les relations entre les aquifères (alluvial, de socle et continental intercalaire) et le fleuve Niger. L'Institut international de gestion de l'eau (IWMI), une organisation de recherche scientifique à but non lucratif qui se consacre à l'exploitation durable des ressources en eau et terrestres dans les pays en développement, a proposé l'exécution, de 2009 à 2012, un important projet régional intitulé *Groundwater in sub-Saharan Africa: Implications for food security and livelihoods* (rôle des eaux souterraines d'Afrique sub-saharienne dans la sécurité alimentaire et les moyens de subsistance), dont l'objectif était de trouver des solutions aux principaux problèmes et de combler certaines des principales lacunes dans ce domaine. Des études plus approfondies ont été menées au Ghana. Ces projets ont principalement porté sur la partie nord-est du pays (notamment sur une partie des zones couvertes par la présente étude dans le bassin de la Haute-Volta).

Le programme de recherche sur l'eau, la terre et les écosystèmes (Research Program on Water, Land and Ecosystems - WLE) du GCRAI associe les ressources de 11 centres de ce groupe, de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et de nombreux partenaires nationaux, régionaux et internationaux pour fournir une approche intégrée de la recherche sur la gestion des ressources naturelles. Certaines activités

concernaient les bassins du Niger et de la Volta, et la plupart d'entre elles étaient liées à l'irrigation et à ses incidences sur les ressources en eaux souterraines.

Le Partenariat mondial pour l'eau (PME) en Afrique de l'Ouest, qui aide les pays à mettre en pratique les principes de la gestion durable des ressources en eau, est donc fortement impliqué dans la gestion intégrée des ressources en eau. Ces programmes internationaux appuient diverses activités qui débouchent sur l'amélioration de la gestion des ressources en eaux souterraines. Cependant, peu d'entre eux permettent d'acquérir de nouvelles données techniques pour améliorer les connaissances en hydrogéologie. Il pourrait aussi y avoir diverses études menées au niveau local. Mise en œuvre par le BGS en partenariat avec des hydrogéologues africains, l'archive de recherches sur les eaux souterraines en Afrique (Africa Groundwater Literature Archive) est une base de données consultable en ligne qui contient à ce jour près de 7 000 références de recherches sur les eaux souterraines du continent. Les résultats et les conclusions des études locales et régionales sont disponibles sur ce portail.

1.2. Objectifs du projet

L'objectif global du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA était d'améliorer les connaissances hydrogéologiques concernant les aquifères transfrontières du Liptako-Gourma et de la Haute-Volta à l'aide de techniques géochimiques (y compris isotopiques) pour permettre aux pouvoirs publics locaux de disposer d'informations de qualité en vue d'une gestion appropriée des ressources en eaux souterraines. Compte tenu de l'étendue de l'aquifère transfrontières, des incertitudes quant à ses limites et à son fonctionnement et de la volonté de collaboration régionale, les activités d'échantillonnage ont été plus particulièrement concentrées sur trois zones : le bassin du Liptako-Gourma (qui couvre des parties du Niger, du Burkina Faso et du Mali), la plaine du Gondo-Sourou (Mali et Burkina Faso) et le bassin de la Haute-Volta centrale (Bénin, Ghana, Togo, Burkina Faso) (fig. 1).

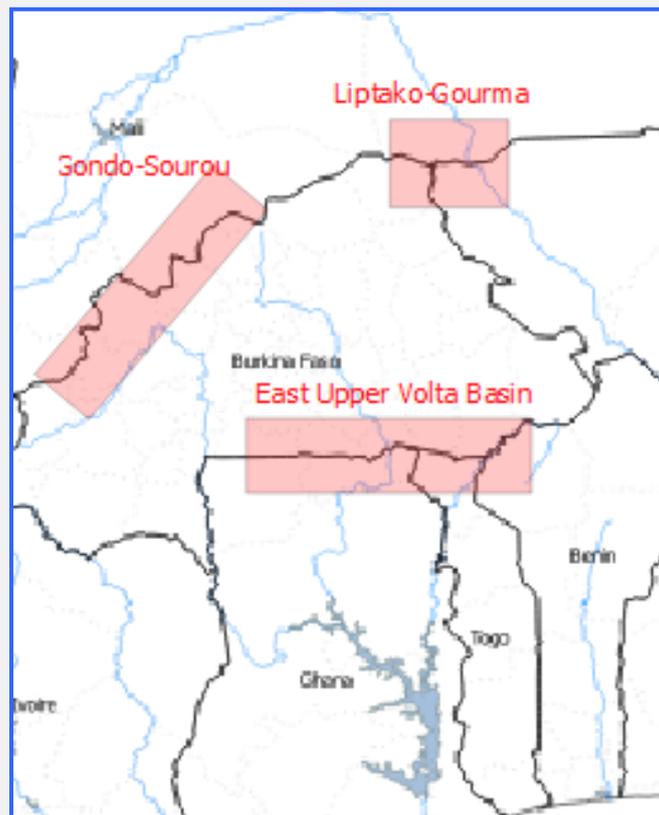


Figure 1 : Le bassin de la Haute-Volta, la région du Liptako-Gourma et les trois zones d'étude pilote

2. SITES D'ÉTUDE

2.1. Situation géographique et topographie générale

La zone de l'aquifère du Liptako-Gourma a une superficie d'environ 159 500 km², avec une population de quelque 7 758 500 habitants en 2013 (source : ISARM). Elle couvre une grande partie du nord-est du Mali, le nord-est et l'est du Burkina Faso, et le sud du Niger (régions de Tillabéry et de Dosso, et la commune urbaine de Niamey). La région est traversée par le fleuve Niger.

Le Liptako-Gourma est une zone géographique caractérisée par son climat et sa végétation. Il est essentiellement constitué d'un vaste plateau latéritique de savane ouest-africaine d'une altitude comprise entre 198 et 305 m.

L'Autorité du Liptako-Gourma a été créée le 3 décembre 1970 avec pour objectif de promouvoir le développement économique de cette région à faible densité de population. La

gestion intégrée des ressources en eau s'inscrit dans le cadre de cet objectif, couvrant les aspects environnementaux, économiques et sociétaux. Les objectifs spécifiques sont de fournir des quantités suffisantes d'eau de bonne qualité en vue du développement de l'irrigation et de l'élevage, d'évaluer la disponibilité de l'eau et d'appuyer la planification des travaux destinés à réguler et améliorer l'exploitation de l'eau de surface. La région du Liptako-Gourma connaissant actuellement des problèmes de sécurité, il n'y a pas d'échantillonnage dans la zone frontalière entre le Niger et le Mali dans le cadre du projet RAF/7/011.

L'est du bassin de la Haute-Volta a une population de 1 143 000 habitants pour une superficie de 47 800 km² (source : ISARM). Cette zone est comprise entre les latitudes 9°30' et 11°30' Nord et les longitudes 0°45' et 2°03' Est. Au Togo la zone étudiée couvre environ 40 % du pays (25 545 km²) et englobe les régions de la Kara et des Savanes. Elle est également appelée bassin de l'Oti. Au Bénin, l'aquifère régional couvre 12,1 % du pays (13 590 km²). Il correspond au bassin de la Pendjari et s'étend sur les départements de l'Atacora, de la Donga et de l'Alibori. Au Ghana, la zone étudiée comprend les régions hautes de l'est et de l'ouest du pays, avec une très grande superficie estimée à 27 000 km². Seule une petite partie du Burkina Faso est concernée par cette étude. La partie sud-est du pays est presque entièrement occupée par le parc national d'Arli dans les régions Centre-Est (provinces du Boulgou et du Koulpélogo) et Centre-Sud (province du Nahouri). L'altitude augmente progressivement, passant de 160 m dans les plaines de la Pendjari à l'ouest, à 650 m dans les chaînes de montagnes de l'Atacora. Les aquifères de la Haute-Volta sont principalement constitués de roche dure et, pour de telles lithologies, les caractéristiques des systèmes aquifères sont identiques à celles du Liptako-Gourma. Certains experts considèrent que les zones de roches dures du bassin de la Haute-Volta font partie du « Liptako-Gourma ».

Un aquifère sédimentaire situé à l'est du Bénin, à l'ouest du Togo et au Burkina Faso (bassins de la Pendjari/Oti) présente des caractéristiques hydrogéologiques particulières.

On trouve une autre zone hydrogéologique spécifique, en l'occurrence un aquifère sédimentaire, dans la partie nord-ouest du bassin de la Haute-Volta, ainsi qu'au Mali et au Burkina Faso. Cette plaine, appelée plaine du Gondo ou du Gondo-Sourou, couvre une superficie d'environ 30 000 km² (source : Koussoube, 2010), avec une largeur de 90 km et une longueur de 400 km (fig. 2). Au Mali, elle s'étend sur de petites parties des régions

de Mopti, de Sikasso et de Ségou. Au Burkina Faso, la zone étudiée comprend les régions de la Boucle du Mouhoun, du Nord et du Sahel. Il s'agit d'une zone de plaine située entre le plateau de Bandiagara (Mali), à plus de 600 m d'altitude, et un plateau latéritique du Burkina Faso dont l'altitude est inférieure à 400 m.

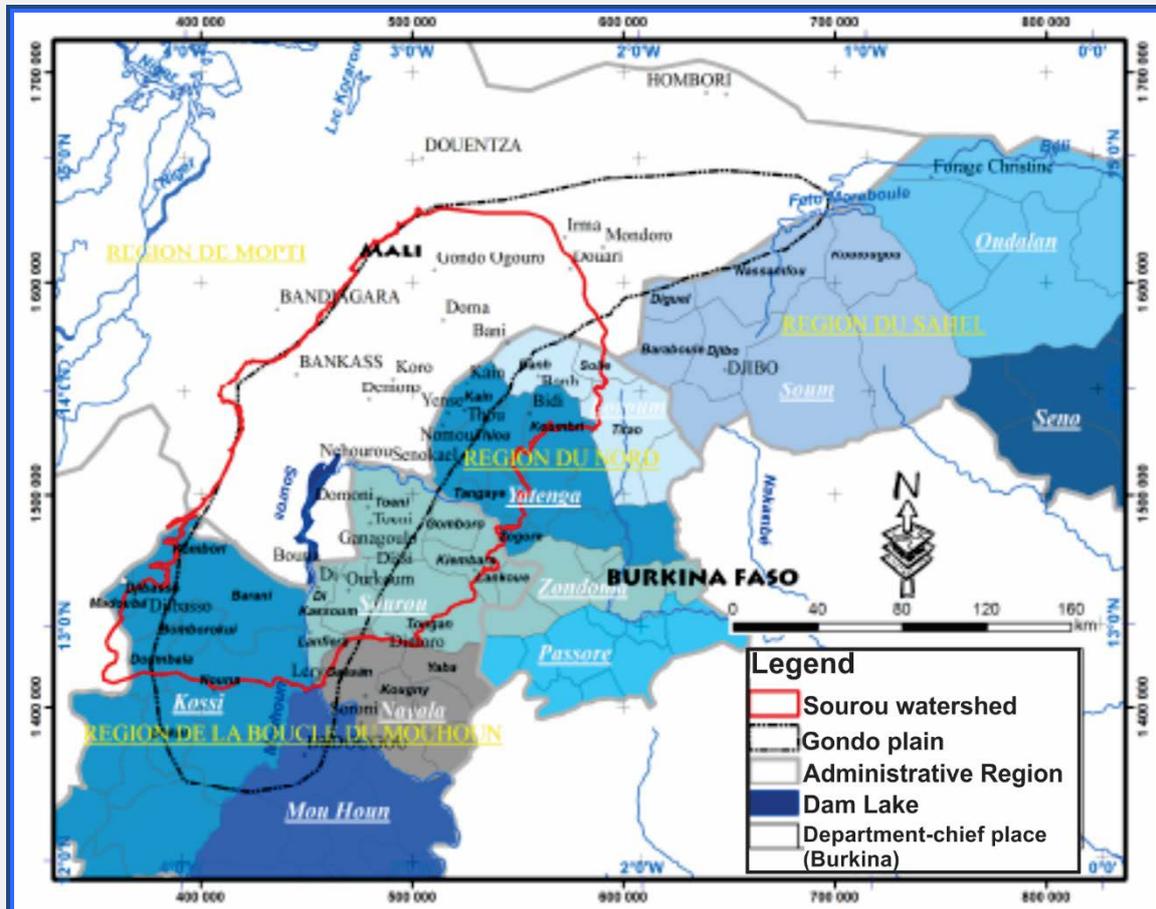


Figure 2 : Plaine du Gondo-Sourou au Mali et au Burkina Faso (Koussoube, 2010)

2.2. Climatologie

Le Liptako-Gourma et la Haute-Volta se trouvent dans diverses zones climatiques (d'après la classification de Köppen-Geiger) : le climat tropical de savane (ou soudano-guinéen, Aw) pour le secteur nord-est de la Haute-Volta et le climat semi-aride subtropical de steppe / basses latitudes (BSH) pour les secteurs du Gondo-Sourou et du Liptako-Gourma. Le régime des précipitations dépend du déplacement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT), lequel se traduit par une oscillation saisonnière des précipitations entre le golfe de Guinée et le Sahel (fig. 3). Les zones étudiées sont caractérisées par un régime unimodal de précipitations, avec une saison des pluies clairement marquée en mai-octobre (les hauteurs de

pluie étant maximum autour du mois d'août). Dans la plaine du Liptako-Gourma (partie septentrionale de la zone étudiée), le climat est beaucoup plus sec que dans la partie centrale de la région de la Haute-Volta. On peut considérer que la station météorologique de Niamey est représentative du climat de ce secteur. La température moyenne est de 29,3 °C et les précipitations sont habituellement comprises entre 500 et 750 mm par an (de 1961 à 2015). Elles atteignent leur maximum entre juin et septembre (fig. 4).

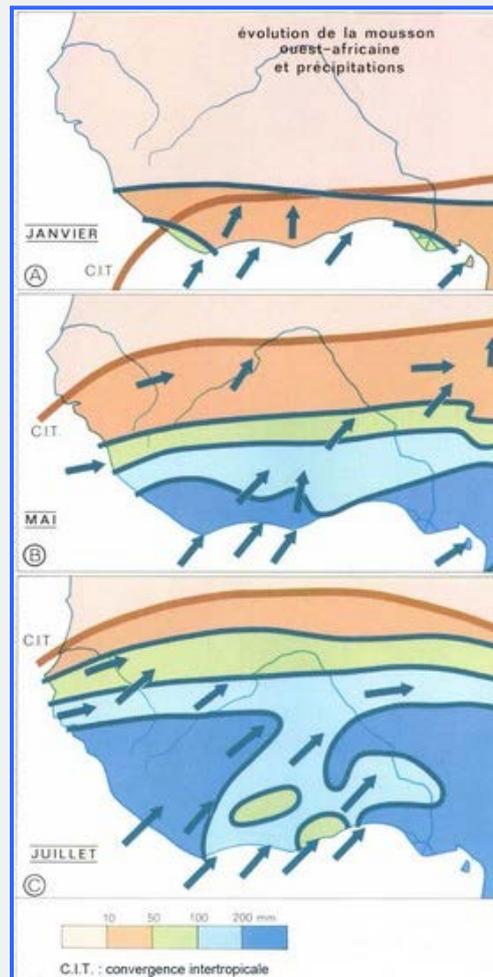


Figure 3 : Évolution de la ZCIT en janvier, mai et juillet (source : archives Larousse)

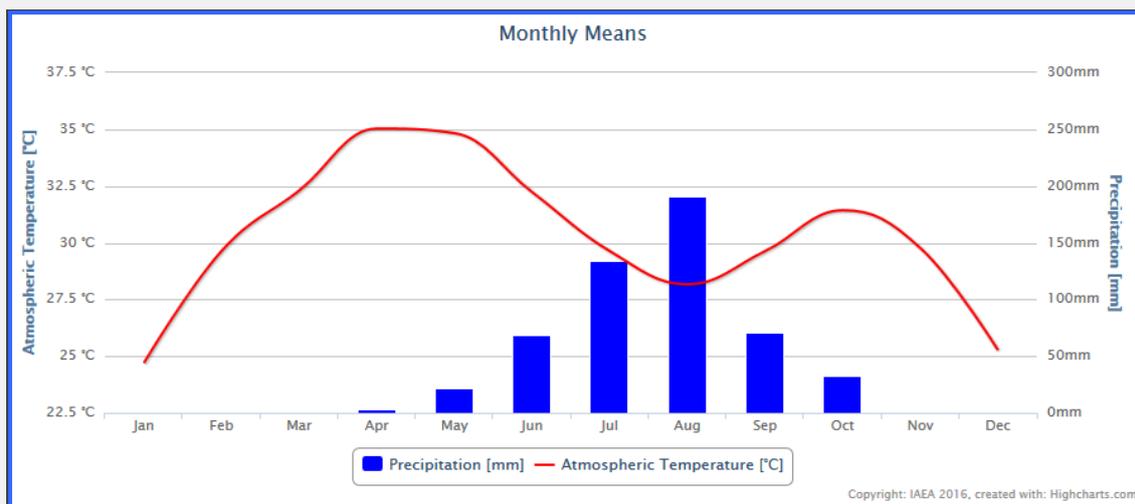


Figure 4 : Moyennes mensuelles de températures et de précipitations à la station de l'IRD/IRI du GNIP de l'AIEA à Niamey pendant la période 2009-2014 (source : WISER AIEA)

Dans la plaine du Gondo-Sourou, les précipitations varient d'environ 100 mm dans la partie méridionale (Sikasso, Mali) à 500 mm à Mopti (Mali). La moyenne annuelle des températures est comprise entre 28 et 30 °C. À Bankass, les précipitations annuelles sont de 528 mm et la température de 27,4 °C (fig. 5).

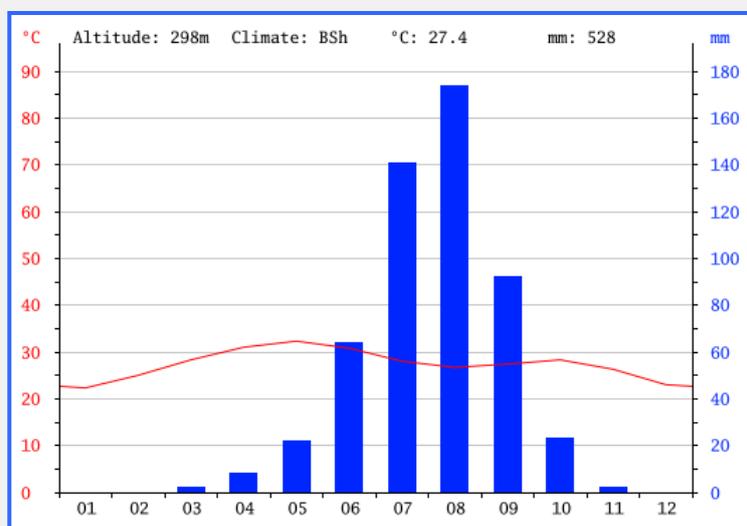


Figure 5 : Températures et précipitations mensuelles à Bankass (Mali). (climate-data.org)

La rivière Sourou, qui traverse la plaine, principalement au Burkina Faso, a pour particularité qu'elle « inverse » son cours pendant la période de l'année où elle est en crue. Plusieurs barrages ont été construits sur cette rivière. Dans la partie centrale du bassin de la Volta en particulier, les précipitations annuelles totales sont comprises entre 1 000 et 1 350 mm (1981-2010). La température moyenne annuelle est de 27,4 °C à Natitingou (Bénin). Les

données de la station de Mango (Togo) peuvent servir d'exemples pour les précipitations et les températures mensuelles dans ce secteur (fig. 6).

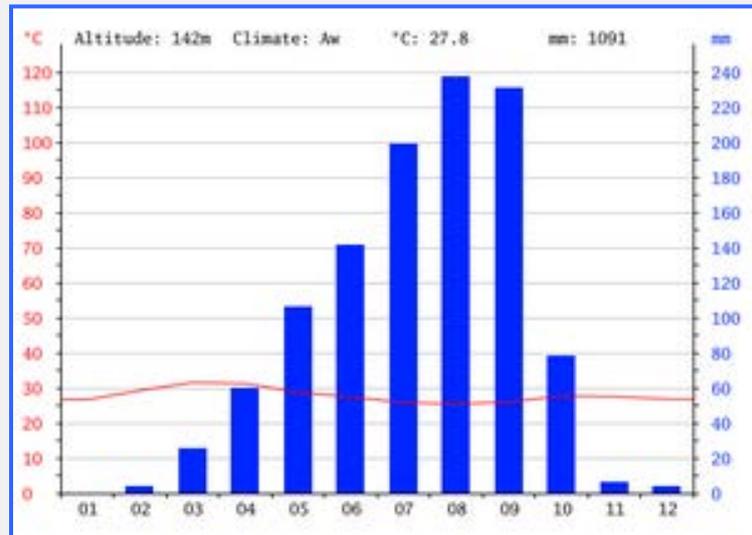


Figure 6 : Précipitations et températures mensuelles à la station de Sansanné-Mongo (Togo). Source : climate-data.org

La végétation est essentiellement une végétation de pâturages, en particulier de savane, avec des bouquets d'arbres résistants à la sécheresse, tels que les baobabs ou les acacias.

2.3. Géologie et hydrogéologie

La zone est dominée par des roches de socle précambriennes et, dans la plaine du Gondo-Sourou et le bassin de la Pendjari/Oti, par des roches sédimentaires consolidées et non consolidées. Les ressources en eaux souterraines se trouvent donc principalement dans des zones de fracture et des altérites (fig. 7).

Les roches précambriennes comprennent des roches cristallines et métamorphiques. Les roches de socle non altérées abritent très peu de ressources en eau. Les principaux aquifères se développent au sein du terrain de couverture de roches altérées et du substrat rocheux fissuré (McDonald et Davies, 2000).

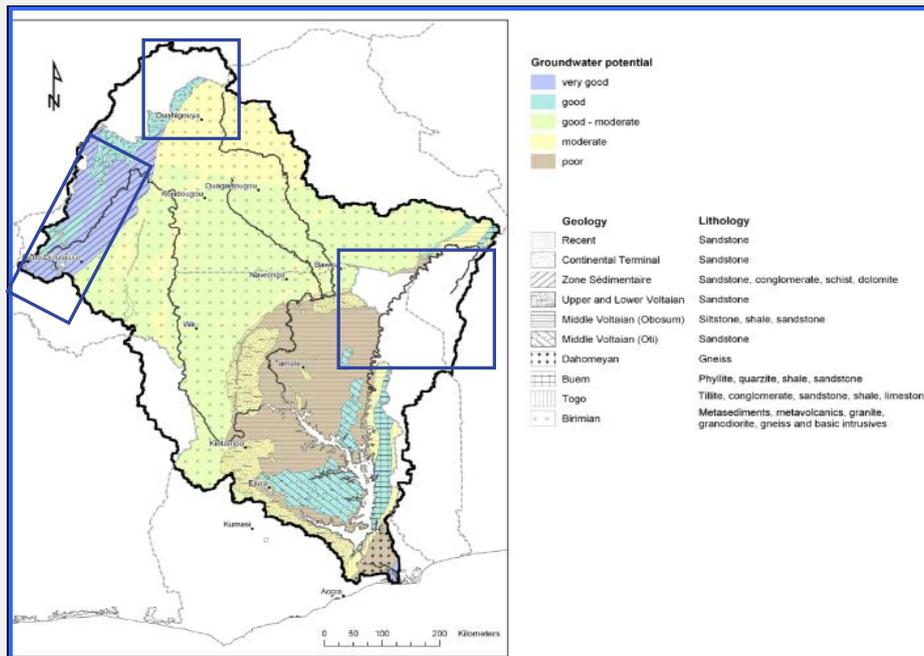


Figure 7 : Carte géologique et potentiel en eaux souterraines des trois secteurs du bassin de la Volta étudiés (Martin, 2006)

Liptako-Gourma :

La zone du Liptako-Gourma est constituée à environ 95 % de formations cristallines dont 75 % datent de l'ère birrimienne (fig. 8). On trouve parfois des aquifères du continental terminal dans la discordance géologique à la verticale du socle birrimien (voir tableau ci-dessous)

Ère	Formation géologique	Lithologie	Unités d'aquifères
Quaternaire	Vallée du Niger	Sable, argiles	Alluvions
Pliocène moyen	Ouallam-Filingué	Sables, silts argileux/grès argileux	Continental terminal
Néoprotérozoïque (Voltaïen)		Grès, quartzite, mudstone	
Paléoprotérozoïque Précambrien (Birrimien)	Liptako-Gourma	Granites, gneiss, autres roches métamorphiques cristallines (schiste, roches vertes, quartzite)	Aquifère discontinu de socle

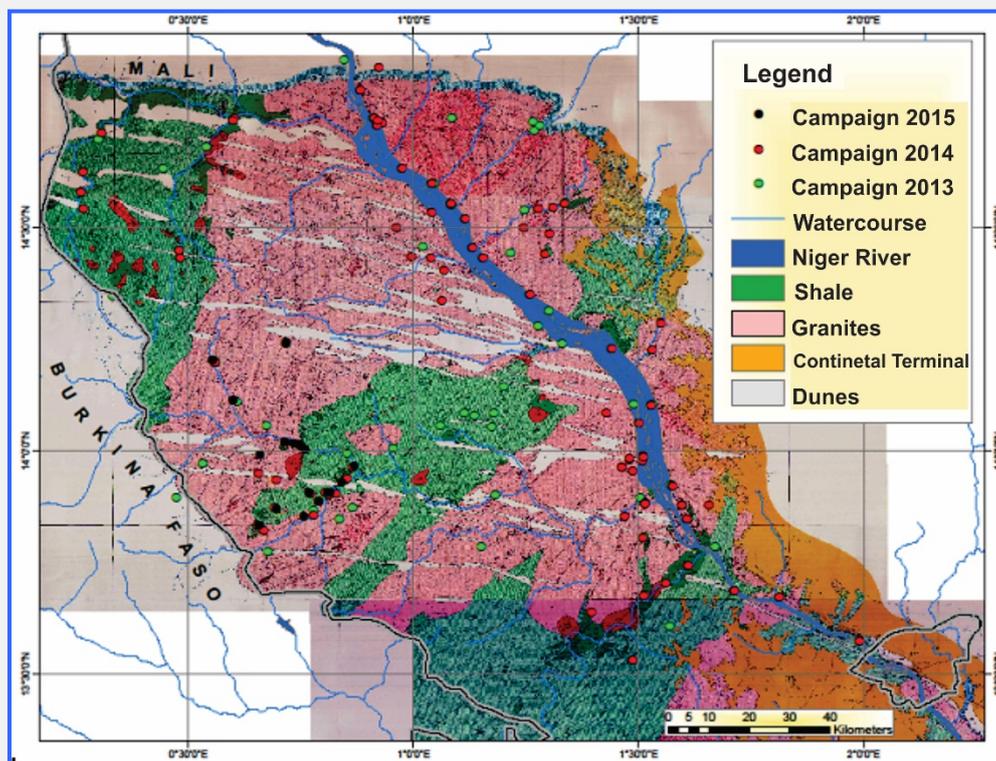


Figure 8 : Carte géologique du Liptako-Gourma au Niger
(Sanoussi, rapport du projet RAF/7/011)

Plaine du Gondo-Sourou (fig. 9) :

Les informations géologiques sur cette zone proviennent de Practica et al., 2010, United Nations 1988, Koussoube 2010.

Ère	Formation géologique	Lithologie	Unités d'aquifères
Quaternaire		Sables et argiles	Aquifères locaux uniquement, aquifère alluvial du Sourou
Néoprotérozoïque	Irma	Calcaire, dolomite	Continental terminal quaternaire (CTQ)
Éocène supérieur à pliocène	Koro	Sable argileux avec quelques couches latéritiques intercalées, argiles	Aquifère multicouche
Précambrien	Sarnyéré	Dolomite , calcaire	
Infracambrien	Toun	Calcaire , calcaire et marbre, grès, schiste argileux	Infracambrien plissé (ICP)
Infracambrien	Groupe de Bandiagara (et Koutiala)	Grès , quartzite	Infracambrien tabulaire (ICT)
Précambrien	Socle birrimien	grès, granites, roches volcaniques	Socle (birrimien)

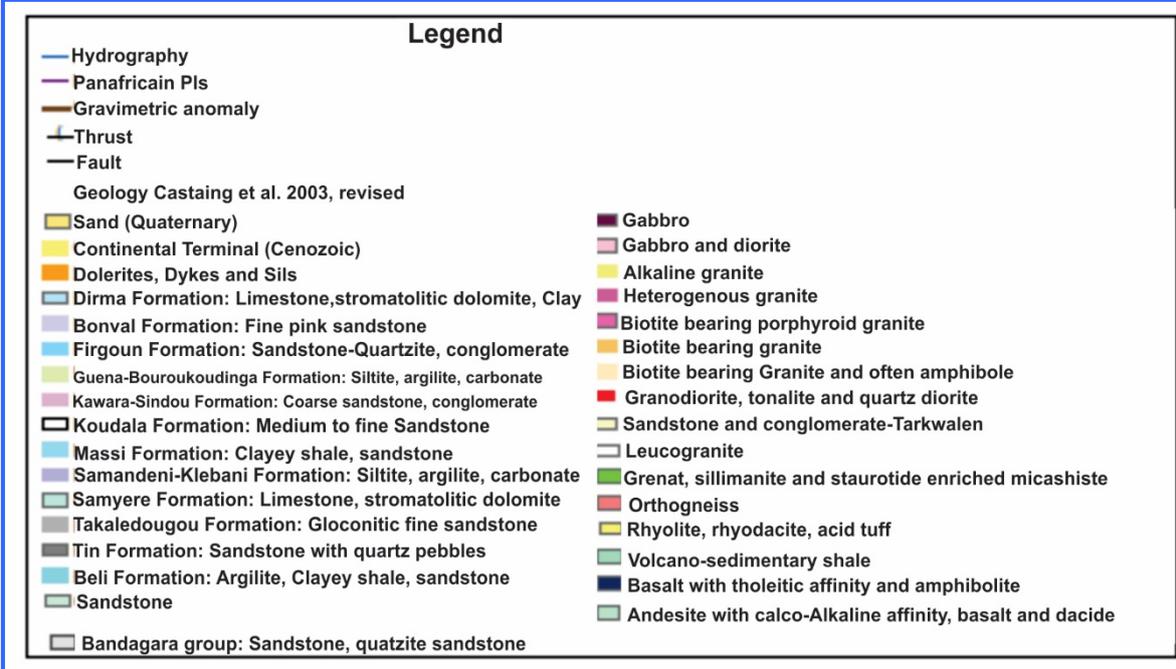
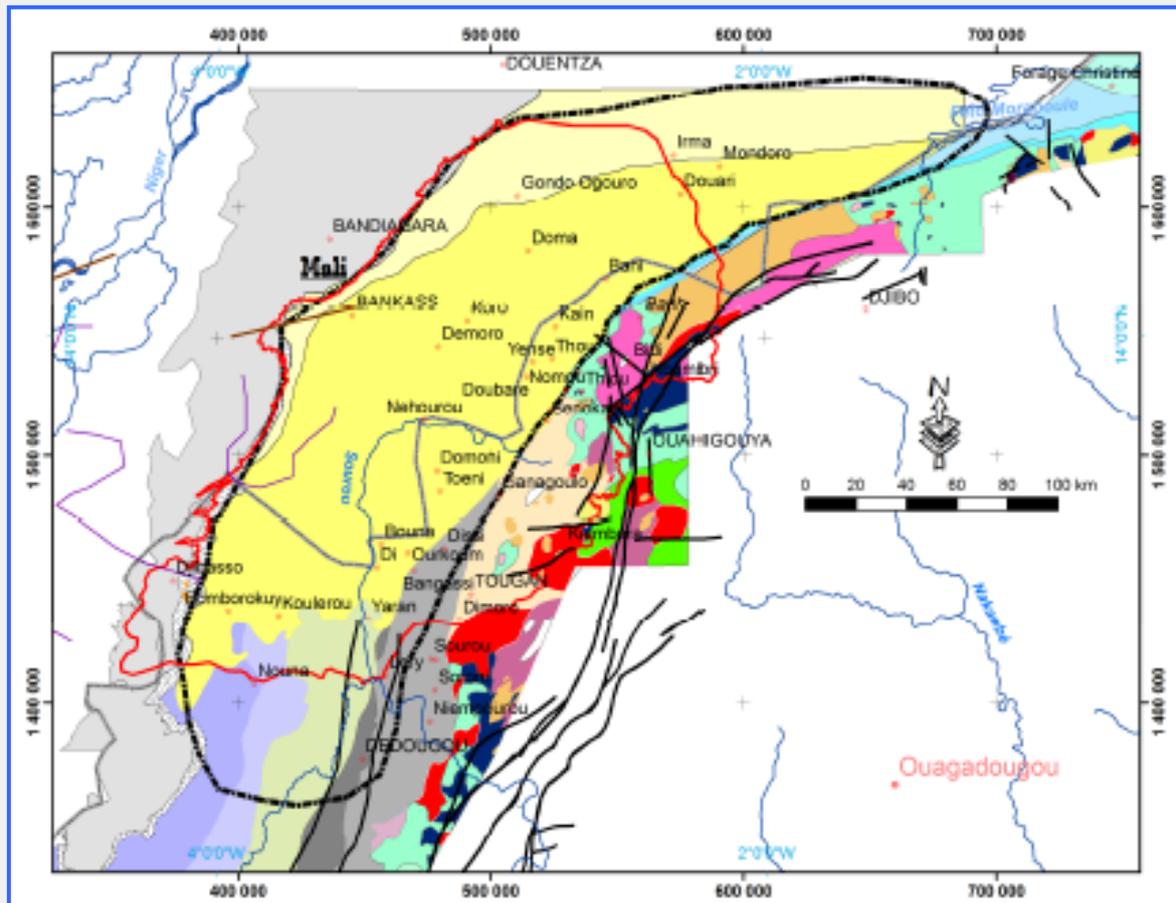


Figure 9 : Carte géologique de la plaine du Gondo-Sourou (Castaing et al., 2003 et Meme 1992 dans Koussoube, 2010)

Haute-Volta centrale :

Le bassin est constitué de roches dures du socle et de formations sédimentaires intergranulaires/fracturées (figs. 10 et 11). La synthèse a été réalisée à partir d'informations extraites d'Affaton 1990, d'Affaton 2008, de Carney et al. 2010, de Martin, 2006 (voir tableau ci-dessous).

Ère	Formation géologique	Lithologie	Unités d'aquifères
Quaternaire	Dépôts fluviaux	Sable, argiles	Aquifères alluviaux
Voltaïen supérieur (néoprotérozoïque)	Mégaséquence d'Obosum/Tamale (sans intérêt pour cette étude – uniquement au Ghana)		Aquifère du bassin voltaïen
Protérozoïque – ordovicien inférieur (Néoprotérozoïque) Voltaïen moyen	Mégaséquences de l'Oti-Pendjari (appelées triades dans le bassin de Taoudéni)	<i>Grès, argilites, tillites, carbonates dolomitiques, schistes argileux, siltite</i>	
Mésoprotérozoïque supérieur Voltaïen inférieur	Mégaséquences de Bombouaka (Gambaga) – notamment Dapaong, Fosse-aux-lions, Yemboure, Panabako/Tossiego	<i>Grès, quartz, arénite, schiste argileux, siltite, calcaire</i>	
Protérozoïque supérieur – Paléozoïque inférieur	Unité structurale volcano-sédimentaire du Buem	Grès, quartzite, rhyolite, andésite, schiste argileux, hématite, jaspe, roches volcaniques	Unités structurales de grès
	Série du Togo	Tillite, phyllite, quartzite, grès, schiste argileux, calcaire	
Précambrien	Unités structurales de l'Atacora	Schiste, micaschiste, gneiss, quartzite, granite fortement métamorphisé	Unités structurales de l'Atacora
Antébirrimien à protérozoïque moyen	Socle Formation birrimienne	<i>orthogneiss, gneiss, micaschistes</i>	Aquifère de socle complexe – birrimien
Birrimien supérieur		Laves basaltique et andésitique, schiste	
Birrimien		Phyllites, grauwacke, granites, gneiss, migmatites, granodiorite	

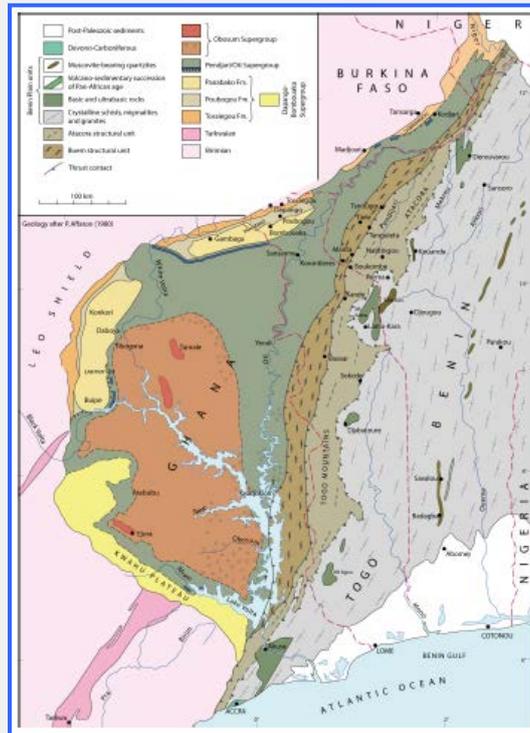


Figure 10 : Carte géologique du bassin de la Volta (d'après Affaton, 1990)

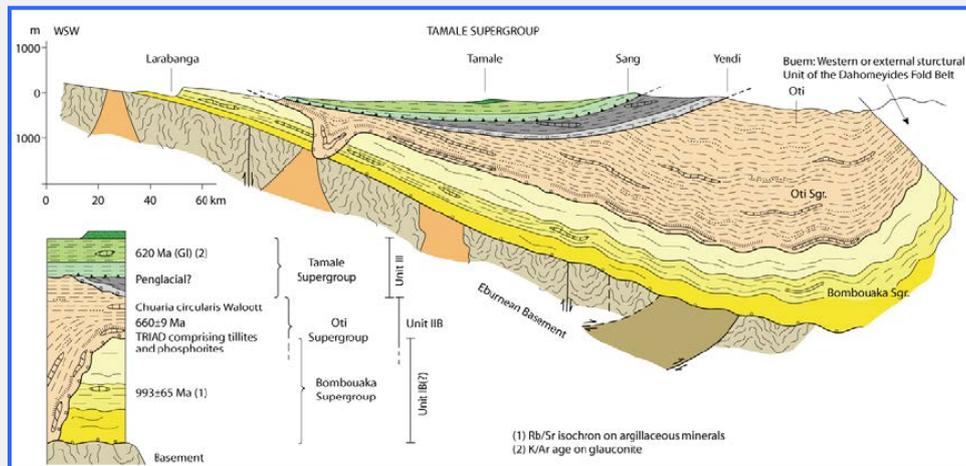


Figure 11 : Coupe transversale du bassin de la Volta (modifiée d'après Affaton, 1990, dans Affaton, 2008)

3. ACQUISITION DE DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE SUIVIE

Une synthèse des données recueillies par secteur étudié a été réalisée dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA (voir tableau ci-dessous).

Secteur	Pays	Type d'échantillon	Principale formation hydrogéologique	Nombre d'échantillons/ de sites d'échantillonnage/ de campagnes d'échantillonnage	Chimie	¹⁸ O/ ² H	³ H	¹⁴ C/ ¹³ C
Liptako-Gourma	Niger	Précipitations	2013-2015	Niamey	N/D*	17	0	0
		Eau de surface		1 (Nera)	N/D	N/D	N/D	N/D
		Eaux souterraines	socle	60/58/1	60	60	60	0
	Burkina Faso	Précipitations		Pas de station	0	0	0	0
		Eau de surface		3/2/2 réservoir de Gomdi, Yakouta	3	3	0	0
	Eaux souterraines	Socle (granite, schiste, orthogneiss, pegmatites)	80/80/2	80	80	38	0	
Gondo-Sourou	Mali	Précipitations	2014-2015	Koutiala, Mopti/Sévaré, Bankass	N/D	27	0	N/D
		Eau de surface		1/1/1 (Markala)	0	0	0	N/D
		Eaux souterraines	CTQ, ICP, ICT	30/30/2	30	30	30	N/D
	Burkina Faso	Précipitations		Pas de station				
		Eau de surface		1/1/1 (barrage de Lery)	1	1	0	N/D
	Eaux souterraines		24/24/1	8	8	8	N/D	
Haute-Volta centrale	Bénin	Précipitations	2014-2015	Natitingou	N/D	10	0	N/D
		Eau de surface		12/12/1	12	12	11	0
		Eaux souterraines	Socle, grès, voltaïen, Atacora	97/67/3	97	97	34	11
	Togo	Précipitations	2015	Dapaong Mango (pas encore de données)	0	14	0	0
		Eau de surface		3/2/2 (Oti)	3	3		
		Eaux souterraines	Socle, grès, voltaïen	66/42/2	66	66	41	20
	Ghana	Précipitations		Navrongo (pas encore de données)				
Eaux de surface			12/12/1 - Tamini/Volta blanche	12	12	12	0	
Eaux souterraines			73/73/2	72	73	73	27	

* N/D : données non disponibles.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

4.1. Signaux isotopiques dans les précipitations/eaux de pluie

D'un point de vue hydrochimique, il n'y a pas eu acquisition de nouvelles données concernant la composition chimique des eaux de pluie pendant la durée du projet.

La teneur en tritium des précipitations de l'époque actuelle n'a pas été mesurée dans les stations susmentionnées. Des données relativement anciennes basées sur les résultats du GNIP et sur certaines publications ont été traitées en ce qui concernait l'Afrique occidentale (Lapworth et al. 2012). Les valeurs de ^3H dans les précipitations sont inférieures à 10 TU depuis plus de 30 ans. Pour ce qui est des isotopes, les stations suivantes ont été installées pendant la mise en œuvre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA : Niamey (Niamey), Dapaong, Mango (Togo), Natitingou (Bénin), Navrongo (Ghana), Bankass, Koutiala et Mopti/Sévaré (Mali). Il n'y avait pas de données pour Mango et Navrongo, ces stations ayant été installées tardivement au cours du projet. En outre, certaines stations font partie du réseau GNIP depuis plusieurs années : Bohicon, Kandi, Cotonou (Bénin), Ouagadougou, Barogo, Houde, Nasso et Bobo-Dioulassou (Burkina Faso), Bamako (Mali) et Niamey (Niger) (fig. 12).

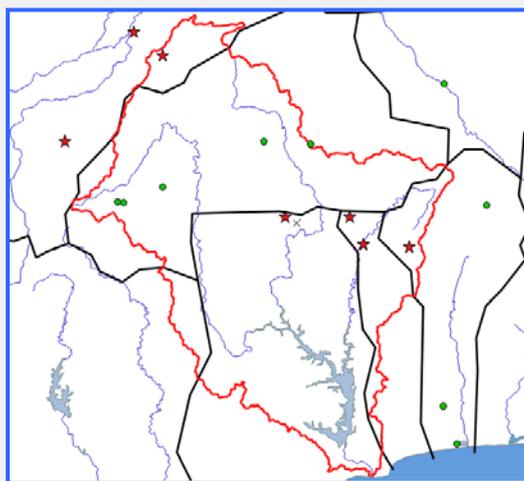


Figure 12 : Emplacement des stations d'observation pluviométrique du GNIP (les points verts correspondent aux stations en activité, les X aux stations fermées) et de celles qui ont été utilisées dans le cadre du projet RAF/7/011 (étoiles rouge) dans la zone étudiée.

La région étudiée étant assez étendue, le signal de précipitations de chaque secteur a été analysé.

Liptako-Gourma :

Les hauteurs de pluie mesurées par la station de Niamey illustrent parfaitement le signal d'entrée du secteur du Liptako-Gourma (fig. 13). Comme on dispose d'informations couvrant de nombreuses années, il est possible d'estimer la moyenne pondérée du signal d'entrée des isotopes stables pour l'époque actuelle (2009-2014) dans ce secteur.

Niamey 2009-2014 (AIEA/GNIP) : $\delta^2\text{H} = 6,55 \pm 0,24 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O} + 4,62 \pm 0,97 \text{ ‰}$

$$\delta^2\text{H}_w = 6,77 \pm 0,28 \times \delta^{18}\text{O}_w + 5,06 \pm 0,94$$

$$\delta^2\text{H}_{\text{pwlsr}} = 7,21 \pm 0,24 \times \delta^{18}\text{O}_w + 6,99 \pm 0,97$$

Moyenne annuelle pondérée (2009-2015) : $\delta^{18}\text{O} = -3,38 \text{ ‰}$ et $\delta^2\text{H} = -16,96 \text{ ‰}$

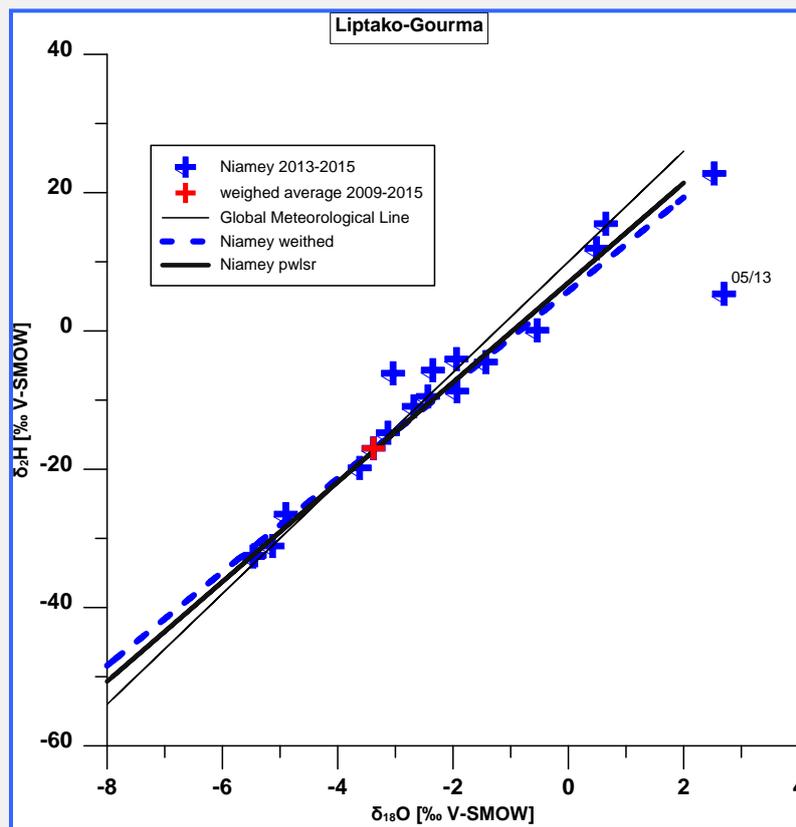


Figure 13 : Isotopes stables dans les précipitations du secteur du Liptako-Gourma

La pente ici est assez différente de celle calculée pour la saison des pluies de 1989 par Girard et al. (1997) qui ont indiqué que la meilleure estimation de la droite météorologique locale était :

$$\delta^2\text{H} = 8 \times \delta^{18}\text{O} + 15,4$$

Pour la période couverte par le projet (2013-2015) et exception faite des échantillons de mai 2013, la moyenne pondérée des précipitations est $\delta^2\text{H} = -14,71 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -3,13 \text{ ‰}$. Les données de Taupin et al. (1995 et 2002) indiquent que la moyenne interannuelle des précipitations à Niamey a été de $-4,2 \text{ ‰} \delta^{18}\text{O}$ pour la période 1992-1999 et $\delta^2\text{H} = -33,9 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -4,54 \text{ ‰}$ pour 1988-1989.

Gondo-Sourou :

Dans ce secteur, trois stations météorologiques ont été installées en 2014 et l'on dispose déjà de données portant sur deux années (fig. 14). La station de Bamako, qui enregistre des données depuis de longues années, peut servir de point de comparaison pour les données des autres stations qui n'effectuent des mesures que depuis deux ans.

Bamako 1962-1999 (AIEA/GNIP) : $\delta^2\text{H} = 6,39 \pm 0,11 \times \delta^{18}\text{O} + 0,88 \pm 0,62$

$$\delta^2\text{H}_w = 6,56 \pm 0,13 \times \delta^{18}\text{O}_w + 1,33 \pm 0,62$$

$$\delta^2\text{H}_{pwlsr} = 6,88 \pm 0,16 \times \delta^{18}\text{O}_w + 2,22 \pm 0,89$$

Moyenne annuelle pondérée : $\delta^2\text{H} = -31,18 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -4,58 \text{ ‰}$

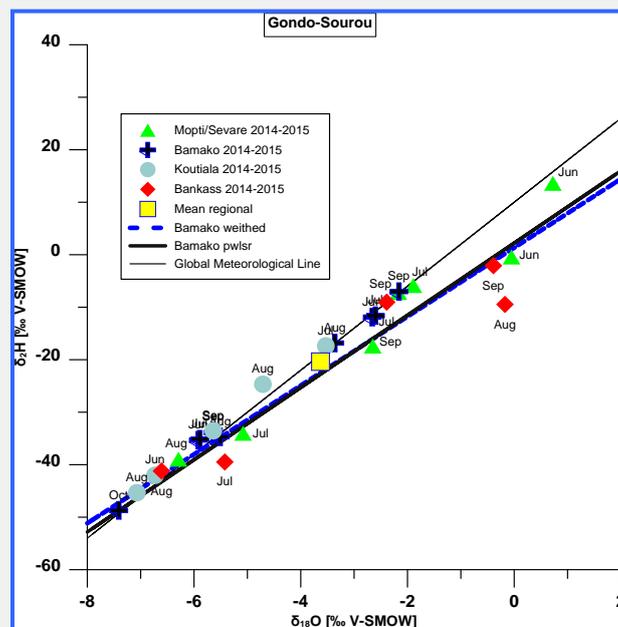


Figure 14 : Isotopes stables de l'eau dans les précipitations du secteur du Gondo-Sourou

La droite météorique locale (DML) définie par Dakouré (2003) et dont l'équation est $\delta^2\text{H} = 7,7 \times \delta^{18}\text{O} + 12$ ne concorde pas avec les données les plus récentes de précipitations. Par exemple, la droite météorique de Bamako, avec sa pente de 6,6, présente des signes d'un enrichissement isotopique des précipitations dû à l'évaporation, comme c'est le cas pour certains échantillons mensuels de Mopti/Sévaré et Bankass. En l'absence de chiffres de données pluviométriques, il n'est pas possible de déterminer si les échantillons où ces signes sont le plus marqués correspondent aux quantités de pluie les plus faibles ou aux mois relativement secs. Les autres échantillons mensuels suivent la DML. Si l'on fait abstraction des échantillons aux signes les plus évidents (Bankass 07-08/15), la moyenne des trois stations de la plaine du Gondo (Bankass, Koutiala, Mopti/Sévaré) pour la période 2013-2015 est : $\delta^2\text{H} = -20,37 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -3,63 \text{ ‰}$. Il n'est pas possible de calculer la moyenne pondérée car les chiffres de précipitations mensuelles n'ont pas été communiqués.

Haute-Volta centrale :

Le réseau GNIP ne dispose pas de stations établies de longue date dans ce secteur (fig. 15). Les données de la station de Cotonou, laquelle est relativement éloignée de la zone étudiée et subit très probablement une influence océanique, correspondent d'assez près au signal des isotopes stables mesuré par les stations de cette zone. Le signal d'entrée concernant les isotopes des précipitations peut être déduit des données cumulées qui ont été précédemment recueillies dans le nord du Ghana (Akiti, 1980) ou d'une autre droite météorique locale proposée pour cette même région par Yidana et al., 2016 ; Pelg-Ba, 2009, et Yidana, 2013. On ne dispose pas encore des données de la période 2014-2015 collectées dans les stations d'observation pluviométrique du Ghana pendant la mise en œuvre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA. Les données de la station de Natitingou (Bénin) couvrent une période de deux années (2014-2015).

Nord du Ghana, Bolgatanga, 1978-1979 (d'après Akiti, 1980) : $\delta^2\text{H} = 7,86 \times \delta^{18}\text{O} + 13,61$

Nord du Ghana, données composites (d'après Yidana et al, 2016) : $\delta^2\text{H} = 7,5 \times \delta^{18}\text{O} + 5,53$

Nord du Ghana, Tamale, 1997-1998 (d'après Pelig-Ba, 2009) : $\delta^2\text{H} = 6,9 \times \delta^{18}\text{O} - 0,19$

Nord du Ghana, Tamale, 2012 (d'après Yidana, 2013) : $\delta^2\text{H} = 7,3 \times \delta^{18}\text{O} + 4,77$

Cotonou 2005-2013 (AIEA/GNIP) : $\delta^2\text{H} = 7,10 \pm 0,10 \times \delta^{18}\text{O} + 9,09 \pm 0,67 \text{ ‰}$

$$\delta^2\text{H}_w = 7,29 \pm 0,19 \times \delta^{18}\text{O}_w + 9,66 \pm 0,66$$

Natitingou 2014-2015 : $\delta^2\text{H} = 7,41 \pm 0,36 \times \delta^{18}\text{O} + 9,89 \pm 0,98$

$$\delta^2\text{H}_w = 7,43 \delta^{18}\text{O}_w + 9,74$$

Moyenne annuelle pondérée de Cotonou : $\delta^2\text{H} = -12,59 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -3,00 \text{ ‰}$

Moyenne annuelle pondérée de Natitingou : $\delta^2\text{H} = -12,55 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -3,02 \text{ ‰}$

La station de Kandi est située dans la partie nord-est du Bénin et, bien qu'elle soit relativement éloignée de la zone étudiée, ses données pourraient également être utilisées. En effet, les résultats sont assez comparables aux données de Natitingou (fig. 15). Les précipitations les plus enrichies correspondent au début (mars, mai) et à la fin (octobre/novembre) de la saison des pluies. Par ailleurs, les mois de faible pluviométrie sont caractérisés par une évaporation notable.

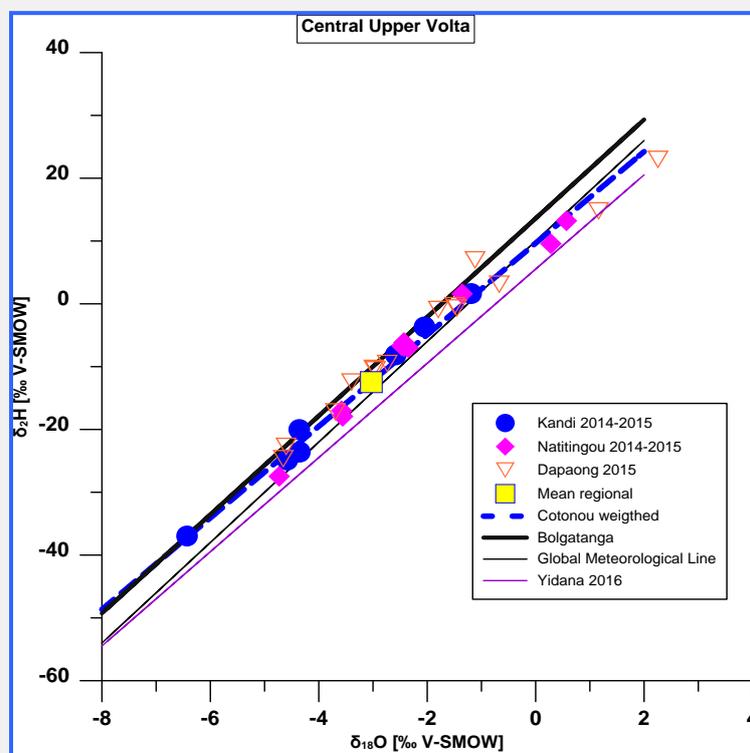


Figure 15 : Isotopes stables dans les précipitations du secteur de la Haute-Volta centrale

Pour Dapaong et Natitingou, exception faite des échantillons de mars/mai et d'octobre/novembre, la valeur moyenne des précipitations pendant la période 2014-2015 était $\delta^2\text{H} = -8,84 \text{ ‰} / \delta^{18}\text{O} = -2,66 \text{ ‰}$. La moyenne pondérée serait $\delta^2\text{H} = -12,46 \text{ ‰}$ et $\delta^{18}\text{O} = -3,03 \text{ ‰}$.

Cependant, cette moyenne a été calculée à partir de quelques données et sans informations pluviométriques fiables. Yidana (2013) a proposé pour le nord du Ghana une valeur moyenne

de précipitations de $\delta^2\text{H} = -23 \text{ ‰}$ et $\delta^{18}\text{O} = -4,00 \text{ ‰}$, ce qui correspond mieux aux données ayant trait aux eaux souterraines recueillies dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA (voir ci-après).

4.2. Présentation des données chimiques sur les eaux souterraines

Afin d'adopter une approche cohérente du traitement des données à l'échelle régionale et étant donné le peu d'informations disponibles sur la formation géologique et la lithologie des sites d'échantillonnage, on a utilisé de grandes classes hydrogéologiques : i) pour le Gondo-Sourou, quaternaire/alluvial, continental terminal/quaternaire, infracambrien plissé, infracambrien tabulaire, ii) pour la Haute-Volta centrale, voltaïen (Oti/Pendjari, Triade), unités structurales de grès (Buem, Togo), Atacora, socle birrimien (voir la description géologique) et iii) pour le Liptako-Gourma, uniquement birrimien/unités de socle. D'autres informations ont pu être utilisées quand elles étaient disponibles.

De nombreux résultats chimiques doivent être considérés avec prudence car l'équilibre ionique est supérieur à 5 %. Le tableau suivant présente une synthèse par pays :

Pays	Nombre de données chimiques	N. de données pour lesquelles l'équilibre ionique est de $\leq 5 \%$	N. de données pour lesquelles l'équilibre ionique est $> 5 \%$ et $\leq 10 \%$	N. de données pour lesquelles l'équilibre ionique est $> 10 \%$
Mali	30	13	5	12
Burkina Faso	94	94	-	-
Niger	60	60	-	-
Ghana	86	76	9	1
Togo	69	58	2	9
Bénin	109	109	-	-

Au Togo, l'équilibre ionique supérieur à 10 % est dû à un excès d'anions ou à un déficit de cations sauf pour un échantillon. Les résultats pour lesquels l'erreur de l'équilibre ionique était supérieure à $|10| \%$ n'ont pas été utilisés. Au Mali, seules 18 séries de données chimiques (sur 30) peuvent être utilisées. Une grande majorité d'échantillons étaient caractérisés par un excès de cations. L'interprétation des données chimiques sera donc limitée.

4.3. Liptako-Gourma :

La figure 16 indique les emplacements des points d'échantillonnage dans la zone du Liptako-Gourma.

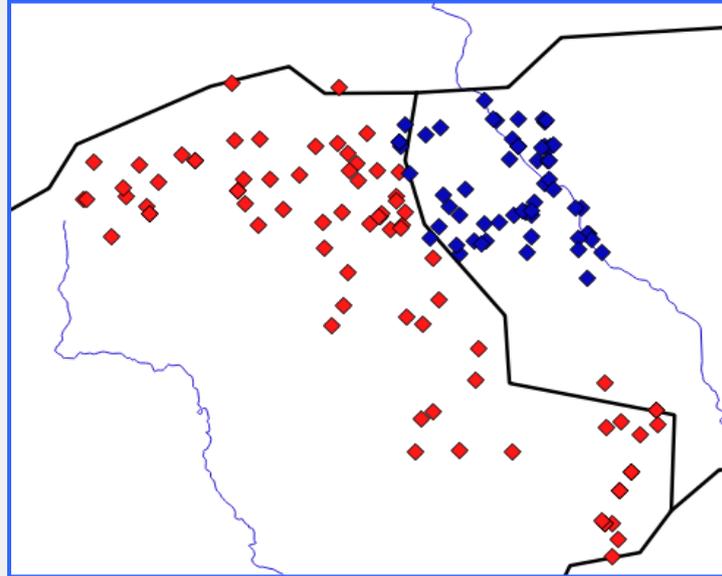


Figure 16 : Emplacements des points d'échantillonnage dans le secteur du Liptako-Gourma, au Burkina Faso (en rouge) et au Niger (en bleu)

Les eaux souterraines dans ce secteur sont de type Ca-Mg-HCO₃ et Ca-Mg-Cl (NO₃)-SO₄ (fig. 17). L'un des principaux facteurs de la variabilité des anions est la teneur en nitrate. Les teneurs en NO₃ varient de < LQ (0,5 mg.l⁻¹) à 1 483 mg.l⁻¹ (Famale, Niger). Les concentrations de sulfate et de chlore sont souvent bien moins importantes (en meq/l) que celles de nitrate.

Seul un échantillon du Burkina Faso (C80) affiche une teneur élevée en SO₄. Le Ca, le Mg et le Na sont d'importance similaire. Le potassium représente généralement moins de 5 % du volume total de cations.

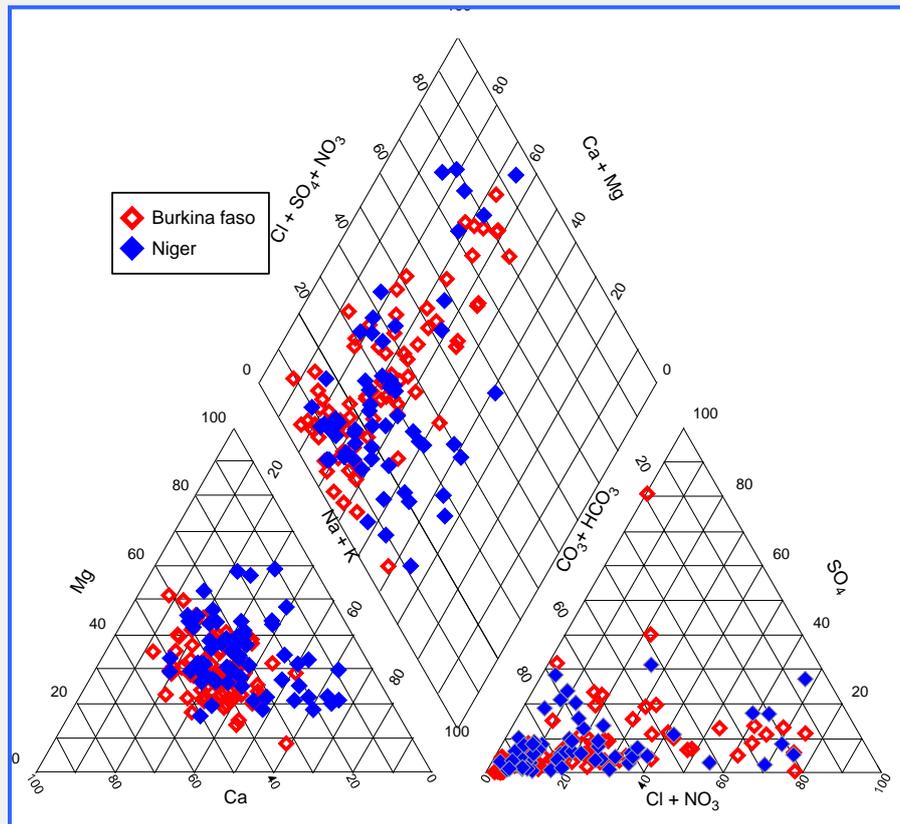


Figure 17 : Diagramme de Piper pour le secteur du Liptako-Gourma

Au Burkina Faso et au Niger, seules des eaux souterraines provenant de roches du socle/cristallines ont été échantillonnées. Aucune formation birrimienne ou granitoïde n'a été identifiée dans ces pays. Seuls trois échantillons d'eau de rivière ont été prélevés au Burkina Faso. La figure 18 présente les rapports $(Na+Mg)/(Na+K)$ par rapport au volume total de cations. La grande dispersion des points d'échantillonnage confirme que le processus d'échanges cationiques n'est pas prédominant dans la zone étudiée.

La variabilité chimique peut être attribuée en partie aux incidences des activités humaines, principalement aux eaux usées et aux engrais, comme en témoigne la variabilité des teneurs en nitrate. Étant donné qu'aucune source de chlore n'a été détectée dans la formation géologique, le Cl provient principalement des eaux usées domestiques et était donc assez bien corrélé avec le nitrate, sauf pour les sites d'échantillonnage C80.

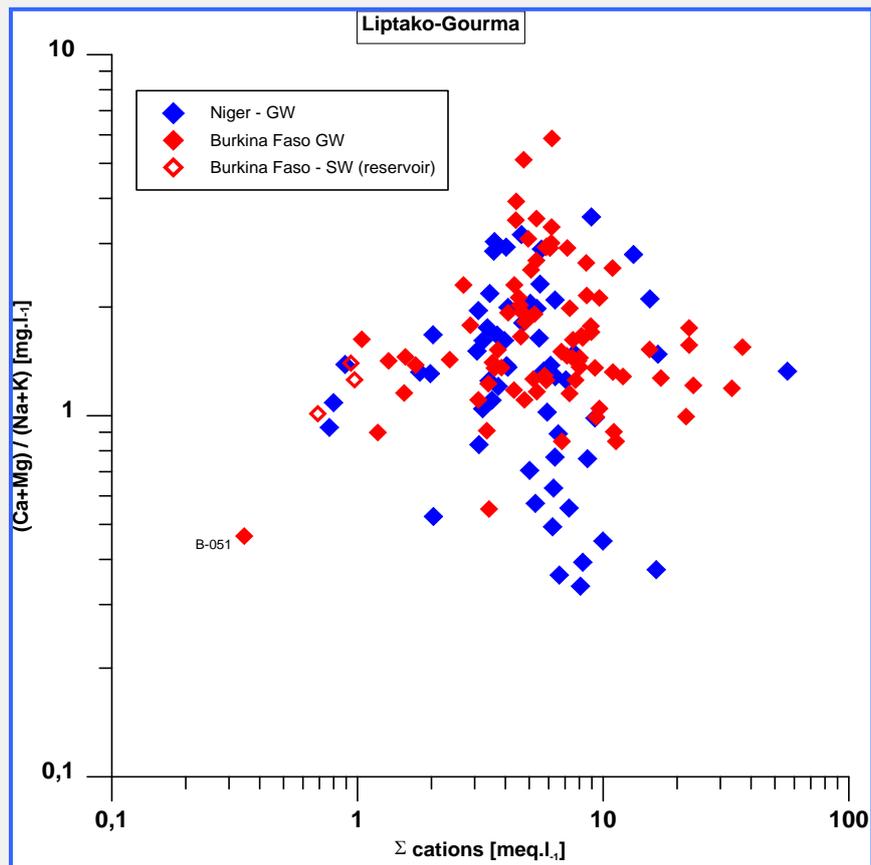


Figure 18 : Preuves d'échanges cationiques dans le secteur du Liptako-Gourma

Les deux limites de qualité de l'eau potable sont représentées sur la figure et l'on peut voir qu'une grande majorité des échantillons d'eau prélevés affichent les concentrations de NO_3 et de Cl les plus élevées. Les concentrations de Cl les plus élevées sont liées aux fortes teneurs en Ca, Mg, Na, K (exception faite de C80), ce qui est le signe d'un long temps de résidence et d'une source soumise à des pressions multiples. Il se peut que la contamination à l'azote soit limitée aux points d'échantillonnage (puits, forages) du fait de l'absence de mesures de protection mais il est possible qu'elle soit plus diffuse dans certains secteurs et touche une zone plus étendue. Des études locales pourraient permettre de confirmer l'ampleur de la contamination (fig. 19).

Étant donné que la zone concernée est assez vaste et qu'on manque d'informations sur les caractéristiques des puits d'où proviennent les échantillons, il est difficile de montrer les influences possibles entre eaux de surface et eaux souterraines ou les différences entre les échantillons provenant des dépôts colluviaux, des parties altérées du socle ou du socle fracturé.

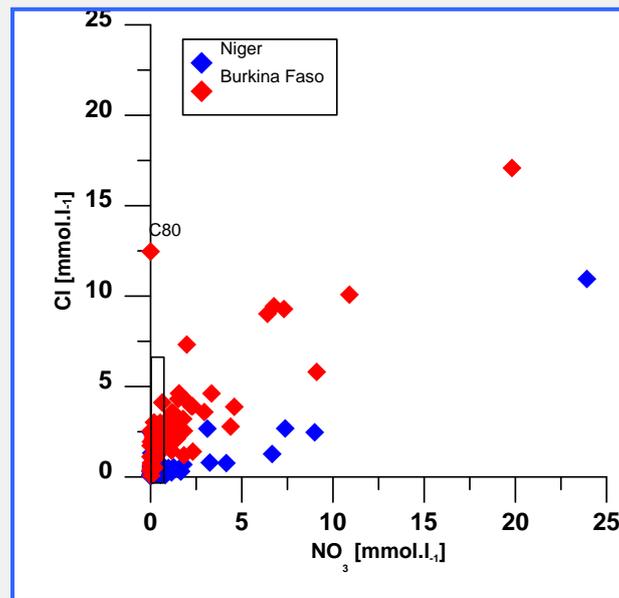


Figure 19 : Relation entre Cl et NO₃ dans le secteur du Liptako-Gourma

Sur le graphique des isotopes stables (fig. 20), les échantillons d'eaux de surface suivent une droite d'évaporation d'une pente de 4,83. La plupart des échantillons d'eaux souterraines suivent également cette droite d'évaporation. L'évaporation de l'eau peut se produire pendant les précipitations ou pendant l'infiltration de l'eau à travers le sol et dans les zones non saturées/altérées. Elle peut aussi avoir lieu après l'échantillonnage si les procédures de conservation n'ont pas été strictement respectées. Nous avons considéré ici que les échantillons d'eau ont été adéquatement entreposés et qu'il n'y a pas eu fractionnement isotopique après l'échantillonnage. Le point d'intersection de la droite d'évaporation et de celle des précipitations de Niamey est bien plus proche de la moyenne pluviométrique pondérée de Niamey, laquelle a été calculée à l'aide des données plus récentes de la station du GNIP à Niamey.

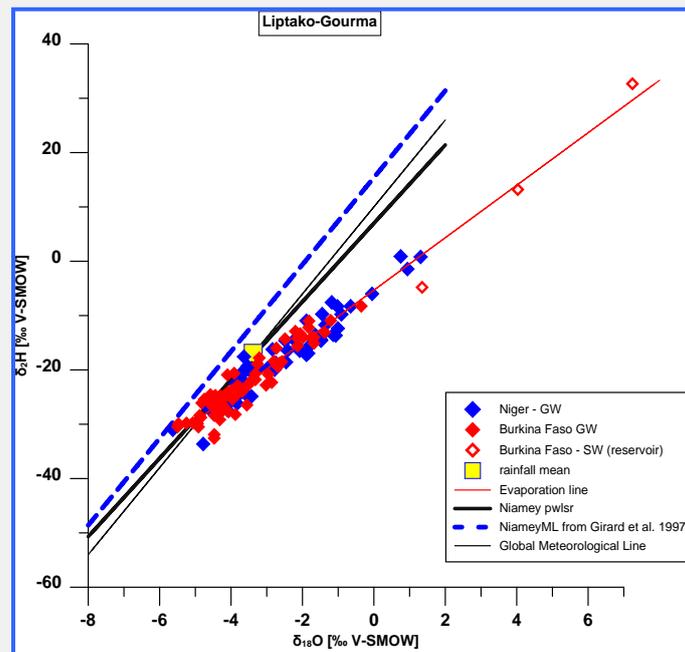


Figure 20 : Répartition globale des données d'isotopes stables dans le secteur du Liptako-Gourma

L'excès de deutérium dans les eaux souterraines est très variable. Il est compris entre -9,7 et +14,04 ‰. Il n'a pas été possible d'établir de lien entre l'excès de deutérium et la profondeur maximale des forages/puits ou la répartition spatiale des échantillons. Dray et al. (1978) ont démontré que les eaux souterraines « anciennes » dans ce secteur pouvaient avoir une composition isotopique de $-8 < \delta^{18}\text{O} < -6$ ‰. Aucun des échantillons d'eau n'a une teneur en tritium inférieure au seuil de détection dans la présente étude et le fait que la concentration de $\delta^{18}\text{O}$ est inférieure à -6 ‰ confirme qu'aucune des eaux souterraines ne peut être considérée comme de l'eau « ancienne » pure. Toutefois, on peut considérer que les eaux souterraines dont les valeurs isotopiques sont les plus faibles et l'évaporation est faible ou nulle ont été relativement protégées et/ou contiennent une part du composant le plus ancien.

Les échantillons d'eau dont les concentrations de $\delta^{18}\text{O}$ sont comprises entre -5 ‰ et -1 ‰ présentent une faible teneur en nitrate (fig. 21). Pour la plupart des échantillons pauvres en isotopes, on peut considérer que les eaux souterraines ont été davantage protégées contre les infiltrations directes de contaminants ou, ce qui est moins probable, qu'elles subissent un processus de dénitrification. Il est très probable que le temps de résidence moyen des eaux souterraines dans ces secteurs ait été plus long. Il pourrait donc s'agir d'un socle fracturé mais les informations disponibles sur les puits d'échantillonnage sont insuffisantes pour confirmer cette hypothèse. En ce qui concerne les échantillons les plus riches en isotopes ($\delta^{18}\text{O} > -1$ ‰)

les concentrations de nitrates peuvent être bien plus faibles en raison de la dilution des eaux de surface. La plupart des points d'échantillonnage sont situés à proximité du fleuve Niger. Dans certains des échantillons pauvres en isotopes (provenant du Niger comme du Burkina Faso), on a observé des concentrations de nitrate relativement élevées (max. 23,2 mg.l⁻¹) et des concentrations de tritium supérieures aux seuils de détection. Cela peut s'expliquer par un mélange d'eaux relativement anciennes et d'eaux récentes. Par ailleurs, il est possible qu'une réalimentation ait lieu à l'époque actuelle pendant la saison des pluies (lorsque la moyenne mensuelle de $\delta^{18}\text{O}$ peut être inférieure à -5 ‰). Cela signifierait que l'écoulement est très faible dans l'aquifère autour du puits d'échantillonnage ou que l'échantillonnage n'a pas été correctement effectué (sans pompage, avec prélèvement uniquement d'eaux superficielles ou d'eaux de réalimentations récentes). En outre, il est possible qu'il y ait infiltration directe à partir de cours d'eau éphémères ou d'eau provenant de bassins creusés par l'homme pendant les fortes averses.

La teneur en tritium des précipitations actuelles n'a pas été établie par mesure directe des hauteurs de pluie. Les données de précipitations d'une année (2012) mesurées à Cotonou indiquent que la concentration de tritium est comprise entre 1,3 et 2,3 UT. Les valeurs les plus élevées (maximum 9,1 UT au B220) indiquent que la réalimentation a eu lieu après les années 1960 (ou la possibilité d'une production terrigénique, compte tenu de la présence d'U, de Th, de Li et de B, Andrews et Kay, 1982). À Kobia (fleuve Niger, à proximité de Niamey) les eaux de pluie affichaient une concentration de 8,9 UT en 1989, ce qui représentait environ 3 UT en 2015, compte tenu de la décroissance radioactive. Étant donné qu'une teneur en tritium supérieure à trois indiquerait la présence d'une partie de composants du « pic de tritium » (1960-1970), plus de 60 % des échantillons prélevés seraient un mélange de cette eau et de précipitations actuelles. Cette situation est assez habituelle dans les zones fracturées des formations de roches dures alors que les zones altérées peuvent contenir des eaux plus récentes.

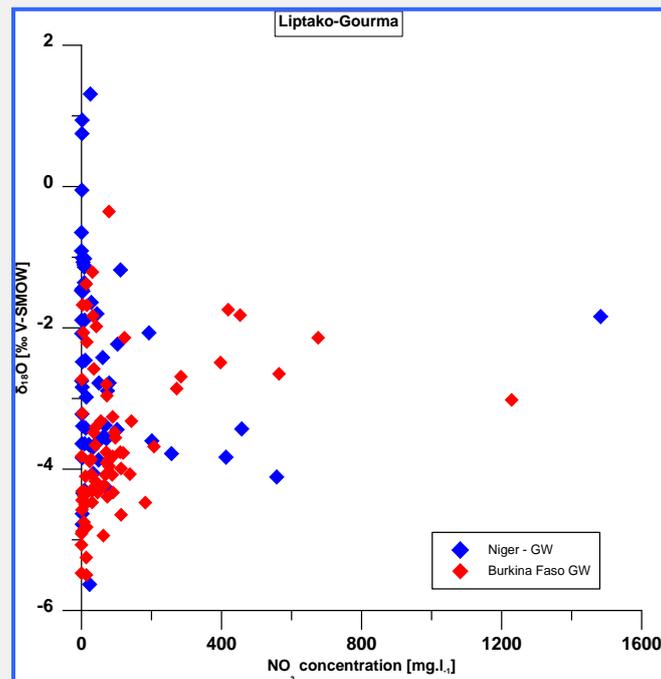


Figure 21 : Relation entre $\delta^{18}\text{O}$ et NO_3 dans le secteur du Liptako-Gourma

Nous n'avons constaté aucune corrélation entre des éléments chimiques et des données isotopiques. Par ailleurs, les analyses statistiques (ACP, AFC) ne montrent pas de corrélations entre les paramètres mesurés. De précédentes études (rapport de mission d'expert de Gourcy, 2015) ont démontré qu'au Niger, le paramètre le plus significatif pouvant expliquer en grande partie la variabilité des isotopes est la distance par rapport au fleuve Niger. Par ailleurs, il a été démontré que les eaux prélevées dans les puits alimentés à la fois par des formations alluviales et des formations de socle étaient diluées.

4.4. Gondo-Sourou :

La figure 22 indique les emplacements des points d'échantillonnage. On ne dispose de données chimiques et isotopiques que pour 11 échantillons du Burkina Faso. Les seules informations lithologiques concernant ces échantillons sont les indications « sédimentaire » et « cristallin », et cette précision n'est pas donnée pour certains échantillons. Les échantillons n'ont pas été identifiés comme venant du bassin du Sourou, mais comme faisant partie de l'ensemble d'échantillons prélevés au Burkina Faso dans le cadre d'une approche géographique.

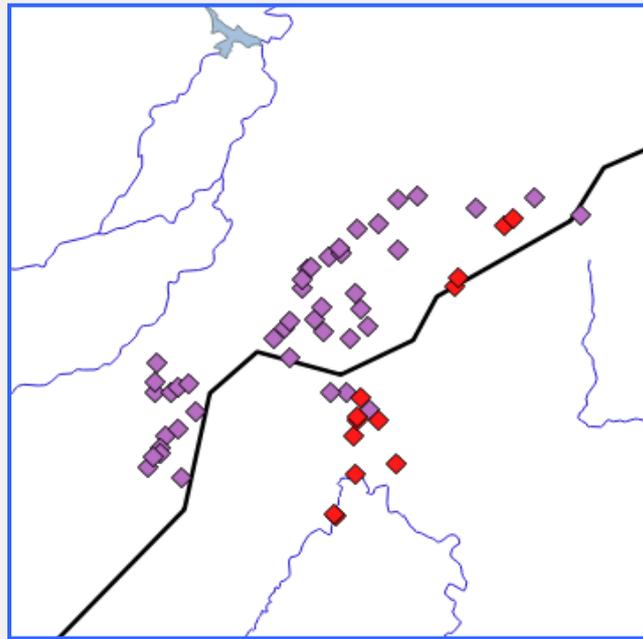


Figure 22 : Emplacements des points d'échantillonnage dont les prélèvements ont fait l'objet d'analyses chimiques dans le secteur du Gondo-Sourou [Burkina Faso (en rouge) et Mali (en violet)]

On dispose d'informations hydrochimiques sur les échantillons prélevés au Mali dans les formations de l'infra-cambrien tabulaire (cinq échantillons), de l'infra-cambrien plissé (cinq échantillons) et du continental terminal quaternaire (20 échantillons).

Comme il a été indiqué précédemment, on n'a pas pu utiliser certaines données chimiques ayant trait aux échantillons du Mali en raison de problèmes liés à l'analyse. On a construit le diagramme de Piper sans tenir compte des données dont l'équilibre ionique était supérieur à 10 %.

Les eaux souterraines sont essentiellement de type Ca-Mg-HCO₃. Quelques échantillons du Mali sont enrichis en sulfate, d'autres en chlore. Il est possible que la grande variabilité des échantillons du Mali soit due à des problèmes liés à l'analyse (fig. 23). Pour le Burkina Faso, deux échantillons étaient enrichis en sodium. Les eaux souterraines prélevées à ces points présentaient de fortes concentrations de NO₃.

Il a été établi que la teneur élevée en sulfate dans la plaine du Gondo était due à un problème de gestion des eaux souterraines. La forte teneur des eaux souterraines en SO₄ peut s'expliquer par la présence de minerai de soufre dans les formations géologiques (roches carbonatées) de certains secteurs (Groen et *al.*, 1988 ; Bethemont et *al.*, 2003). L'eau de la

formation cristalline au Mali a un faible taux de minéralisation (conductivité de 12 à $130 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) sauf à Kouri.

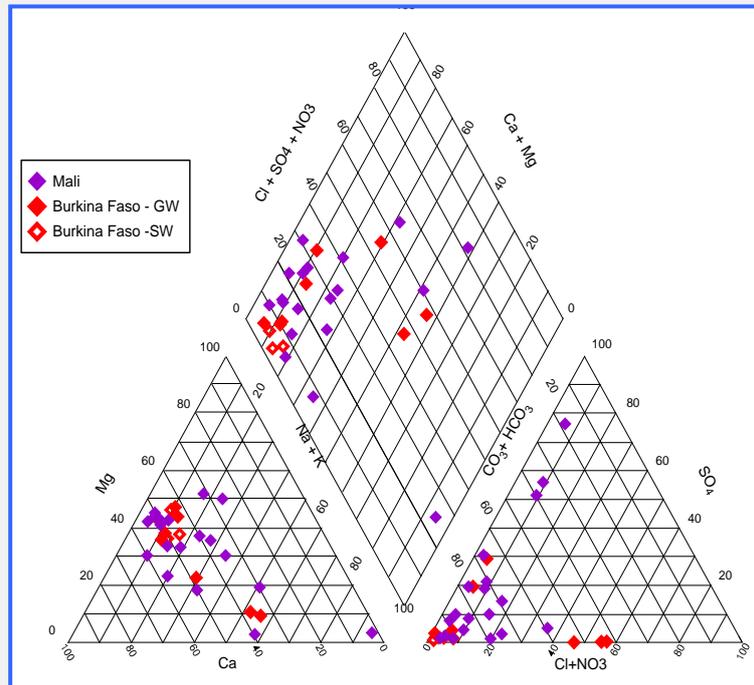


Figure 23 : Diagramme de Piper pour le secteur du Gondo-Sourou

La figure 24 montre la possibilité d'échanges cationiques dans quelques échantillons prélevés au Mali et au Burkina Faso. Les échantillons les plus évolués sur le plan chimique ont été prélevés à Gangafani, dans la partie nord-est de la zone étudiée. Les échantillons de l'ICP affichent le rapport $\text{Ca}+\text{Mg}/\text{Na}+\text{K}$ le plus élevé, ce qui s'explique par la prédominance du calcaire dans cette formation.

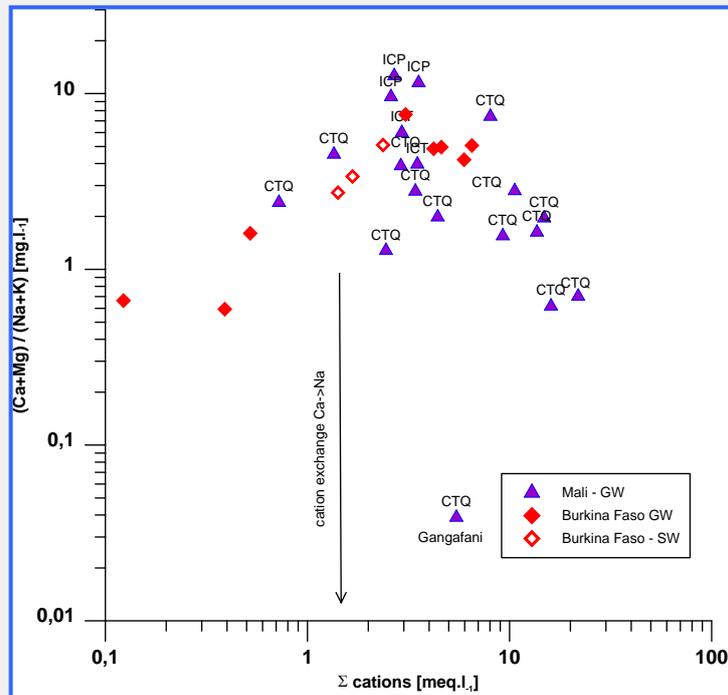


Figure 24 : Preuves d'échanges cationiques dans le secteur du Gondo-Sourou

Au Burkina Faso, les concentrations de nitrate ne sont pas très élevées dans la plaine du Sourou. Deux échantillons affichent des concentrations de NO_3 supérieures à 10 mg.l^{-1} et de faibles concentrations de Cl, ce qui indique que l'azote est très probablement d'origine organique (eaux usées ou déjections animales organiques). Les échantillons d'eaux de surface et deux échantillons d'eaux souterraines affichent de faibles teneurs en Cl et en NO_3 (fig. 25).

Au Mali, trois échantillons présentent de très fortes concentrations de NO_3 ($> 49 \text{ mg.l}^{-1}$) : Koulongon-Peulh, Thiondougou et Sirakélé. Koussoubé (2010) a suggéré que le SiO_2 était un bon indicateur de drainance d'eau de l'aquifère le plus profond (infracambrien). Cela ne peut se voir au point d'échantillonnage sélectionné pour cette étude. Trois échantillons (Souhe, Thiondougou, Diallasagou) présentent une conductivité élevée liée aux fortes concentrations de SO_4 , de Na et de Cl (fig. 26). Les puits se trouvent au centre de la partie méridionale de la plaine du Gondo-Sourou. Comme indiqué plus haut, on peut répartir les données isotopiques du Mali entre les trois principales formations hydrogéologiques de la zone étudiée : CTQ (continental terminal quaternaire), ICP (infracambrien plissé) et ICT (infracambrien tabulaire). Malheureusement, il n'était pas possible de déterminer les échantillons des puits/forages du Burkina Faso en fonction de la lithologie dominante.

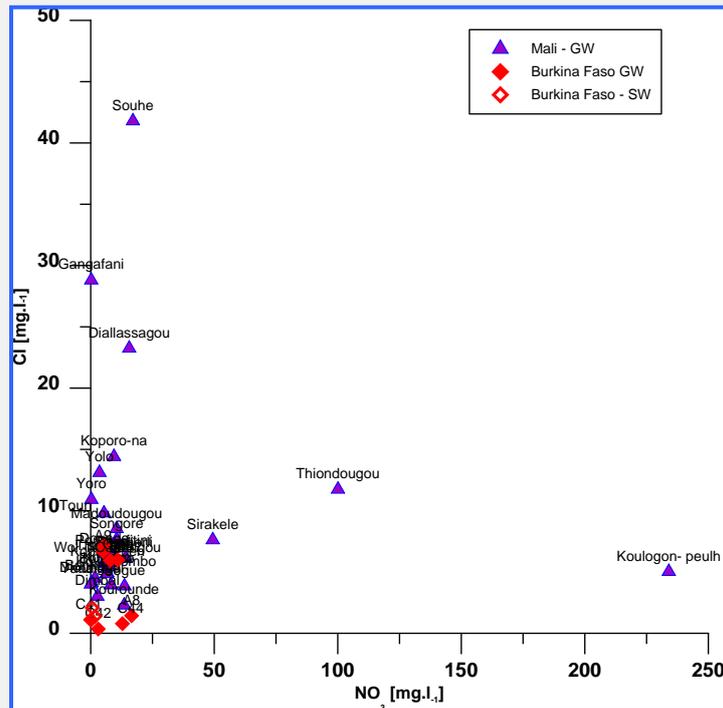


Figure 25 : Relation entre Cl et NO₃ dans le secteur du Gondo-Sourou

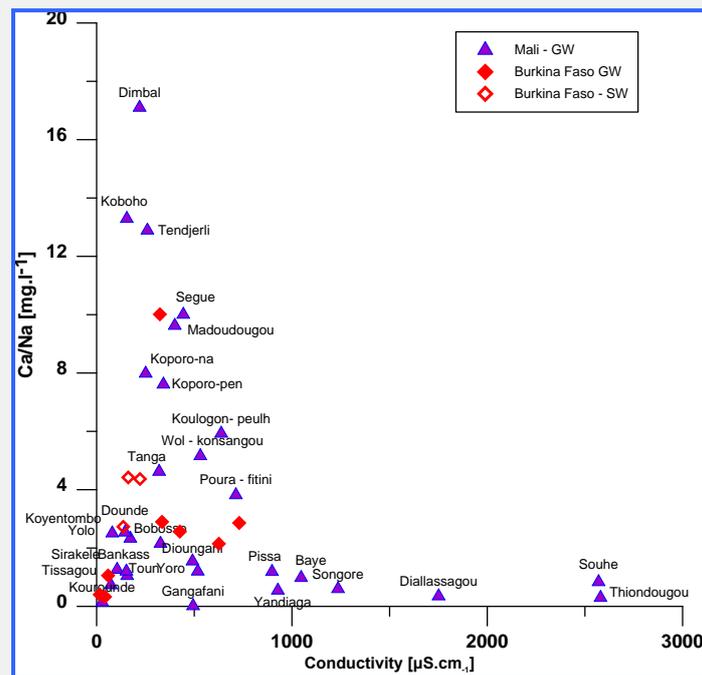


Figure 26 : Relation entre Ca/Na et conductivité dans le secteur du Gondo-Sourou

La droite météorique mondiale et la droite météorique locale (DML) des eaux de pluie déjà établies sont représentées à la figure 27. Les données des eaux de surface suivent une droite d'évaporation dont la pente est 4,78. La valeur isotopique moyenne des eaux de pluie calculée pour la période 2014-2015 est assez élevée par rapport à celle des eaux souterraines qui n'ont

pas subi de processus d'évaporation. On peut plutôt utiliser le signal d'entrée calculé par Dakouré (2003).

Quatre points d'échantillonnage du CTQ au Mali sont caractérisés par une plus forte évaporation ou suivent une droite de précipitations différente (Baye, Songore, Pissa et Souhe). Trois échantillons présentant un excès de deutérium d'environ -7 ‰ ont été prélevés dans le même secteur. Ces échantillons proviennent de l'aquifère du CTQ, qui est le moins profond et donc le plus vulnérable. Ils présentent également une conductivité élevée. On ne dispose pas de données chimiques sur ces échantillons. Deux d'entre eux (Pissa et Songore) affichent de très faibles teneurs en tritium (< 0,3 UT), ce qui veut dire qu'ils peuvent être en partie ou principalement d'origine ancienne (réalimentation avant 1960).

S'agissant des isotopes stables (fig. 27), il n'y a pas de différence entre l'ICP, l'ICT et le CTQ, sauf pour les quatre échantillons susmentionnés.

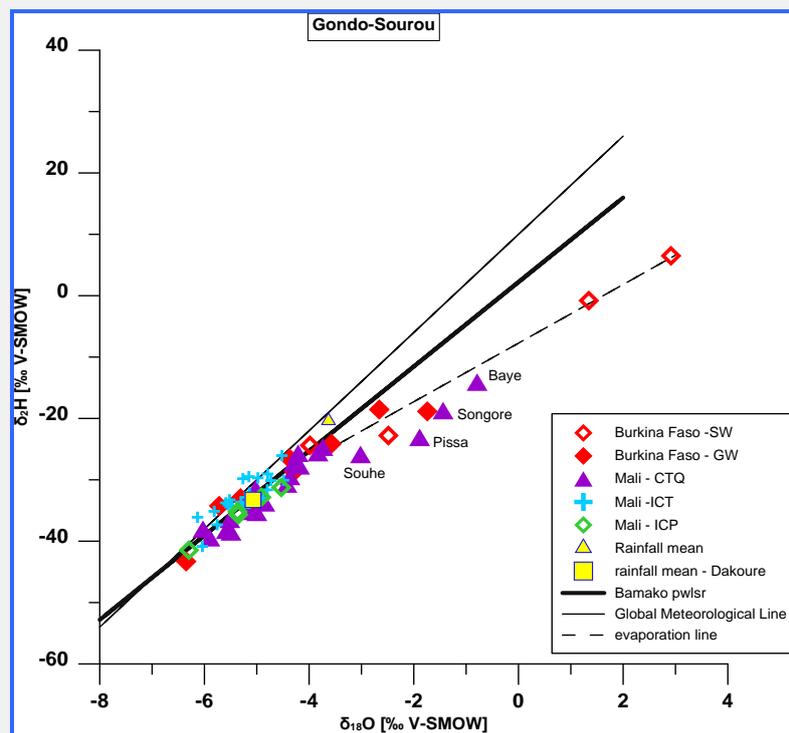


Figure 27 : Répartition globale des données d'isotopes stables dans le secteur du Gondo-Sourou

Une ACP réalisée à partir des données du Burkina Faso et du Mali montre qu'il y a une corrélation entre tous les éléments chimiques et les données d'isotopes stables (fig. 28).

L'axe x est défini par la minéralisation, les échantillons de Songore, Baye, Pissa, Souhe, Thiondougou et Diallassagou (Mali) étant bien représentés dans la partie droite de cet axe.

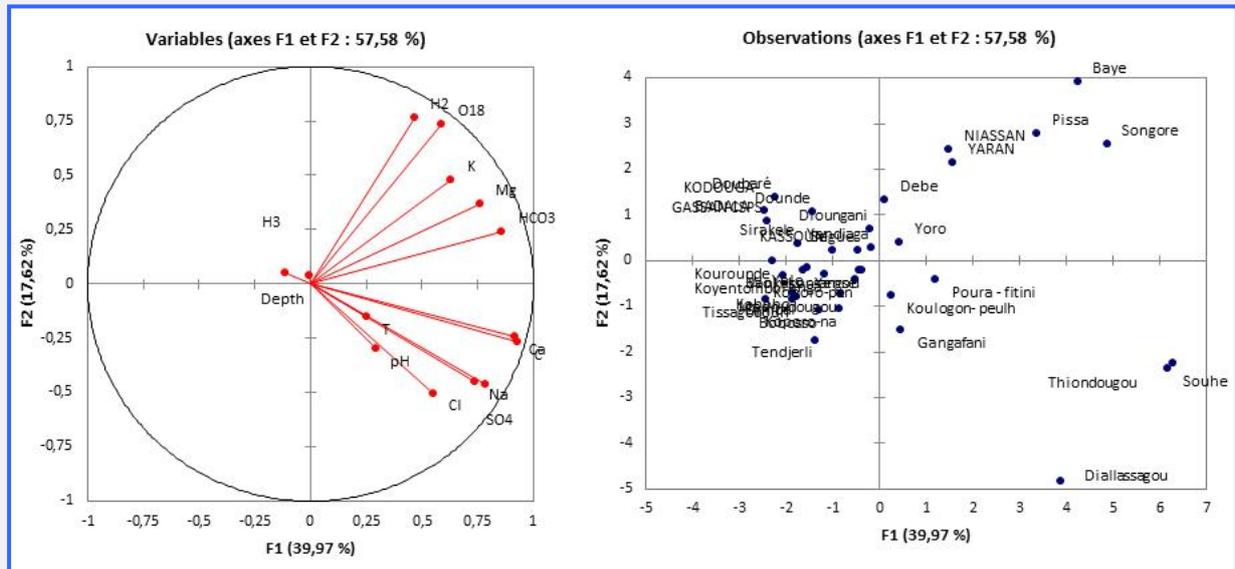


Figure 28 : ACP des échantillons du secteur du Gondo-Sourou

Si l'on observe uniquement les données du Mali où la provenance des échantillons est mieux définie, il est clair que les échantillons qui affichent les teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ les plus élevées proviennent du CTQ (couche superficielle) et correspondent à des puits peu profonds (fig. 29).

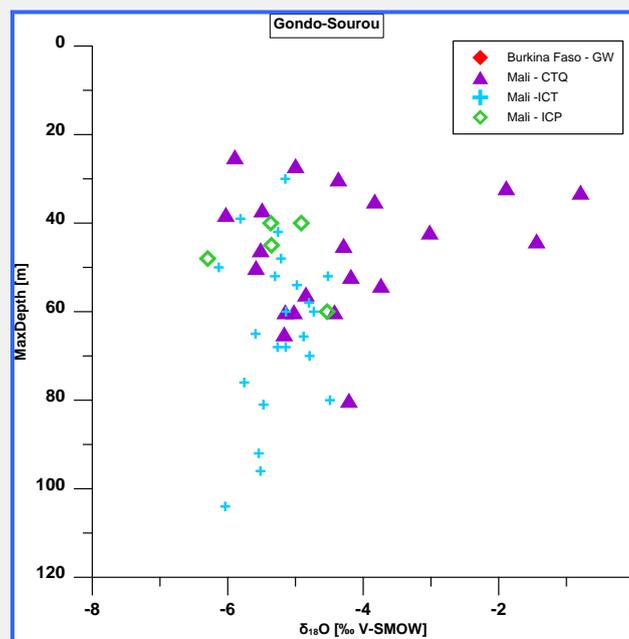


Figure 29 : Relation entre la profondeur maximale des puits et la teneur en $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines dans le secteur du Gondo-Sourou

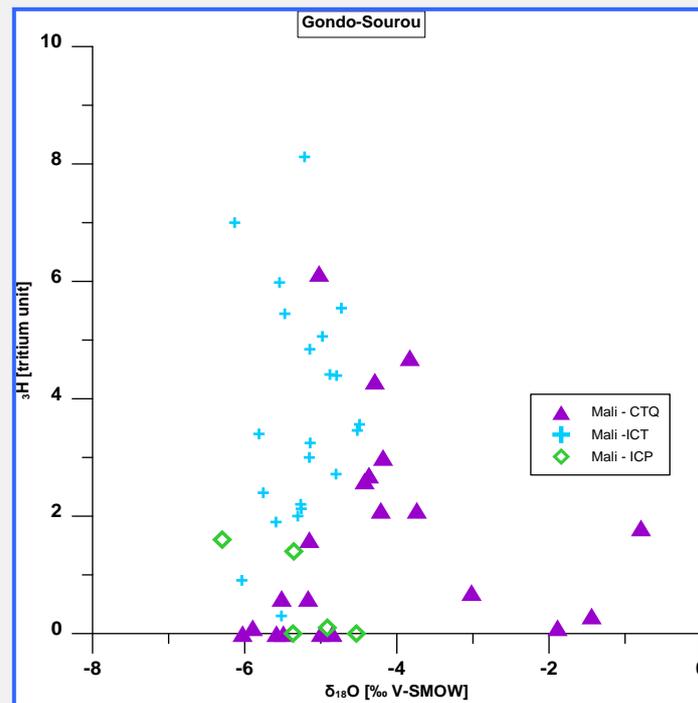


Figure 30 : Relation entre les teneurs en tritium et en $\delta^{18}\text{O}$ des eaux souterraines du secteur du Gondo-Sourou

Il est possible que les eaux souterraines soient assez anciennes car les valeurs de tritium varient de 0 à 1,6 UT (fig. 30). Elles peuvent se trouver dans un aquifère semi-captif faiblement réalimenté. Le secteur concerné est situé entre Madoudougou et Wol-Kansangou. Les échantillons provenant de l'aquifère le plus profond (ICT) affichent la plus grande fourchette de valeurs de ^3H . Les quatre échantillons dont la conductivité est la plus élevée possèdent les plus faibles valeurs de ^3H (fig. 31). Cette corrélation négative peut s'expliquer par la grande ancienneté de l'eau et par un long temps de transit ayant donné lieu à une forte interaction eau-roche. De plus, certaines lithologies géologiques qui peuvent être plus facilement dissoutes devraient être présentes (calcaire, évaporites).

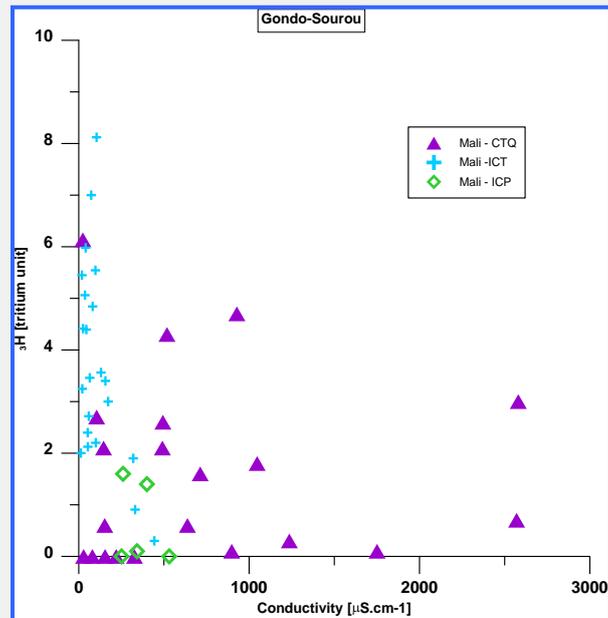


Figure 31 : Relation entre tritium et conductivité dans les eaux souterraines du secteur du Gondo-Sourou

Dakouré (2003) a estimé que les échantillons dont la teneur en tritium était supérieure à 5 UT correspondaient aux précipitations de l'époque actuelle. On peut considérer que l'eau du réservoir (Doubare, BKF) est représentative de ces précipitations. La valeur de ^3H d'un échantillon prélevé en février 2016 est de 1,6 UT.

En parallèle, les données de suivi de la rivière Kou (BKF) de décembre 2013 à décembre 2015 indiquent que les valeurs de ^3H varient de moins de 0,4 UT, la limite de détection, à 0,6 UT. Certaines des valeurs les plus élevées (jusqu'à 4 UT) ont été enregistrées en 2013. Cependant, comme on ne dispose d'aucune information sur les sites d'échantillonnage ni sur l'importance (et les fluctuations) des eaux souterraines dans le flux des eaux de surface, ces renseignements sont difficilement exploitables.

En l'absence d'autres données sur le tritium concernant les précipitations et du fait des difficultés d'interprétation des données de la rivière Kou, on peut considérer 1,6 comme une valeur approximative acceptable pour le signal d'entrée de l'époque actuelle. La plupart des échantillons de l'ICT sont des eaux datant de la période allant du pic de teneurs en tritium de 1963 à l'époque actuelle, avec des rapports de mélange. Les échantillons qui affichent les valeurs de ^3H les plus élevées proviennent de la partie méridionale de la zone étudiée (Mafoune-Tene). En ce qui concerne cette zone, il est difficile d'aller plus loin dans l'interprétation des données car on dispose de peu d'informations sur les échantillons d'eau.

4.5. Secteur de la Haute-Volta centrale :

La figure 32 montre les emplacements des points d'échantillonnage pour lesquels on dispose de données chimiques.

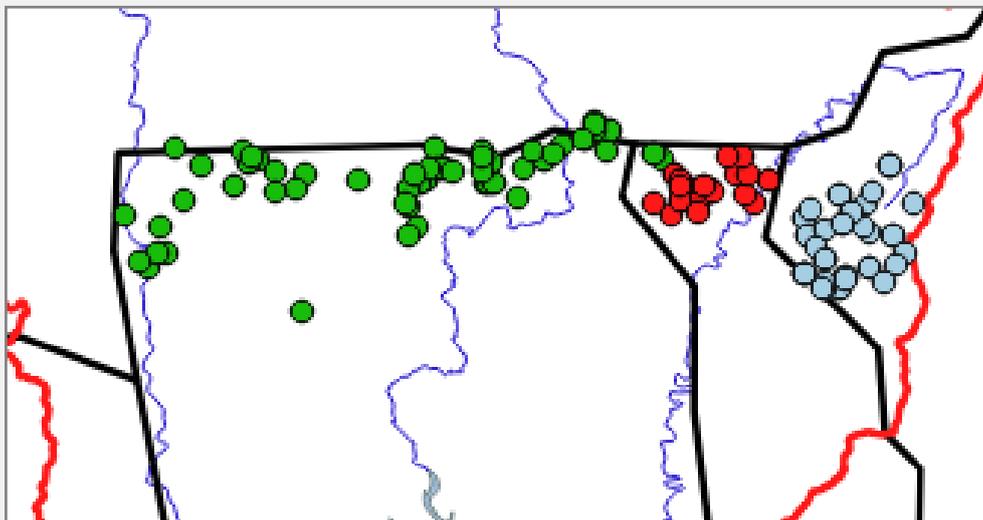


Figure 32 : Points d'échantillonnage dans le secteur de la Haute-Volta centrale [Ghana (en vert), Togo (en rouge), Bénin (en bleu)]

Pour préparer les synthèses des données existantes, il a d'abord fallu homogénéiser les informations relatives aux renseignements ayant trait au « Nom de l'aquifère ». Pour le Togo, les échantillons sont classés dans les catégories suivantes : Socle, Triade (Oti/Pendjari) et Grès. Au Ghana, seul le socle a été échantillonné.

Une description « commune » simplifiée de la lithologie est proposée et utilisée dans le présent document. Les informations correspondantes sont présentées dans le tableau suivant.

Nom de l'aquifère (utilisé pour l'interprétation des données)	Lithologie (telle que décrite dans les documents sur ce sujet)
Socle	Birimien
Grès	Buem
	Togo
Atacora	Atacora
Voltaïen	Tamale
	Oti/Pendjari (Triade)
	Dapaong

Les faciès chimiques des eaux souterraines du secteur de la Haute-Volta centrale sont caractérisés par une grande variabilité (fig. 33).

Les échantillons d'eau du Ghana sont plus homogènes car l'échantillonnage n'a porté que sur un aquifère de socle. Leur évolution chimique suit la droite de mélange Ca: Mg en ce qui concerne les cations et la variabilité des anions est principalement due au mélange Cl+NO₃.

Pour le Togo, exception faite de trois échantillons enrichis en sulfate, le triangle des anions du diagramme de Piper ne montre aucun signe d'une évolution géochimique marquée. Concernant les cations, le mélange Na+K pourrait représenter près de 100 % du volume total, avec 91,6 % pour le Na, le K étant moins important. Les eaux souterraines évoluent du type Ca-Mg-HCO₃ vers le type Na (K)-HCO₃. Pour le Burkina Faso, deux échantillons sont également relativement enrichis en SO₄, par rapport à l'abondance relative des autres anions.

En ce qui concerne le Bénin, les cations sont très dispersés dans le diagramme de Piper, tandis que les anions sont répartis de façon plus homogène. À l'extrême droite de l'axe Cl+NO₃ se trouve un échantillon (B831) de l'Atacora dont la concentration de NO₃ est de 113.6mg.l⁻¹. Les deux autres points d'échantillonnage du Bénin où la teneur en nitrates est élevée sont liés à l'aquifère de l'Atacora.

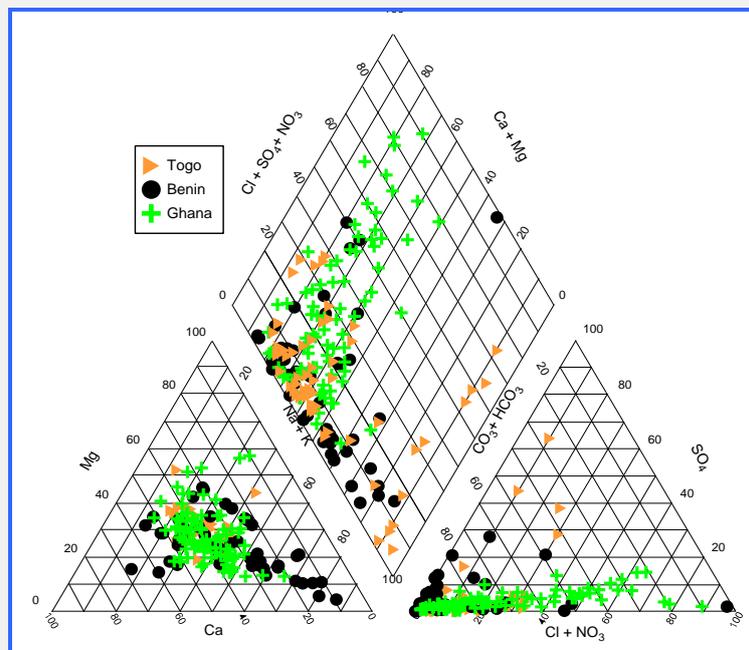


Figure 33 : Diagramme de Piper pour le secteur de la Haute-Volta centrale

La figure 34 montre clairement que les échanges cationiques ont une influence notable sur certains échantillons de la formation voltaïenne du Bénin et du Togo. Ceux-ci proviennent de la partie nord-est du Togo (région de l'Oti) et de la partie nord-ouest du Bénin, une zone correspondant (pour la plupart des échantillons) à la formation de la Pendjari. Par conséquent, les échanges cationiques ont une influence plus marquée sur les aquifères sédimentaires que les aquifères de roche dure, et sur le voltaïen que le grès (grès au sens strict et Atacora).

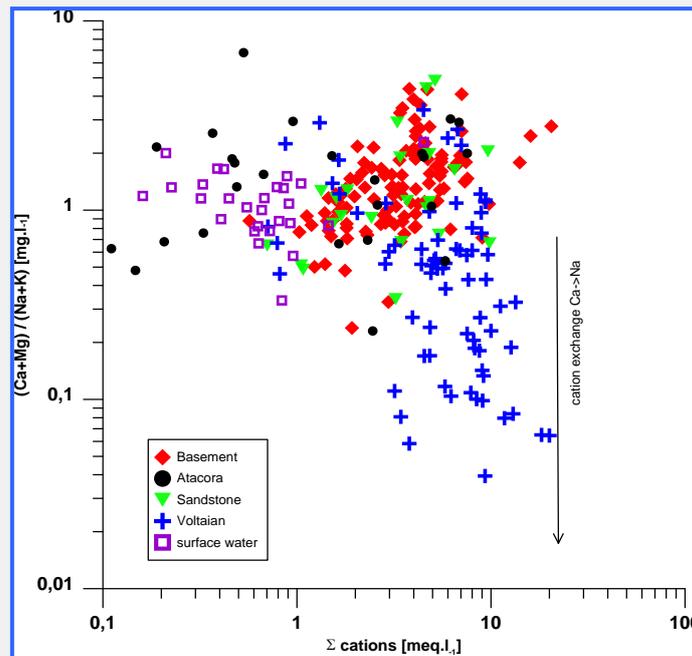


Figure 34 : Preuves d'échanges cationiques dans le secteur de la Volta centrale

En observant l'indice de vulnérabilité hydrochimique décrit par Meyzonnat et al. (2015), on voit une évolution assez régulière des eaux souterraines des formations de socle, qui sont très vulnérables, vers les aquifères de l'aquifère sédimentaire voltaïen (fig. 35). Les mêmes échantillons caractérisés par un processus d'échanges cationiques (fig. 34) sont ceux qui sont les moins vulnérables. Deux échantillons du point d'échantillonnage Adbadia EA Islamic (campagnes d'échantillonnage 1 et 2) présentent l'indice de vulnérabilité chimique le plus élevé.

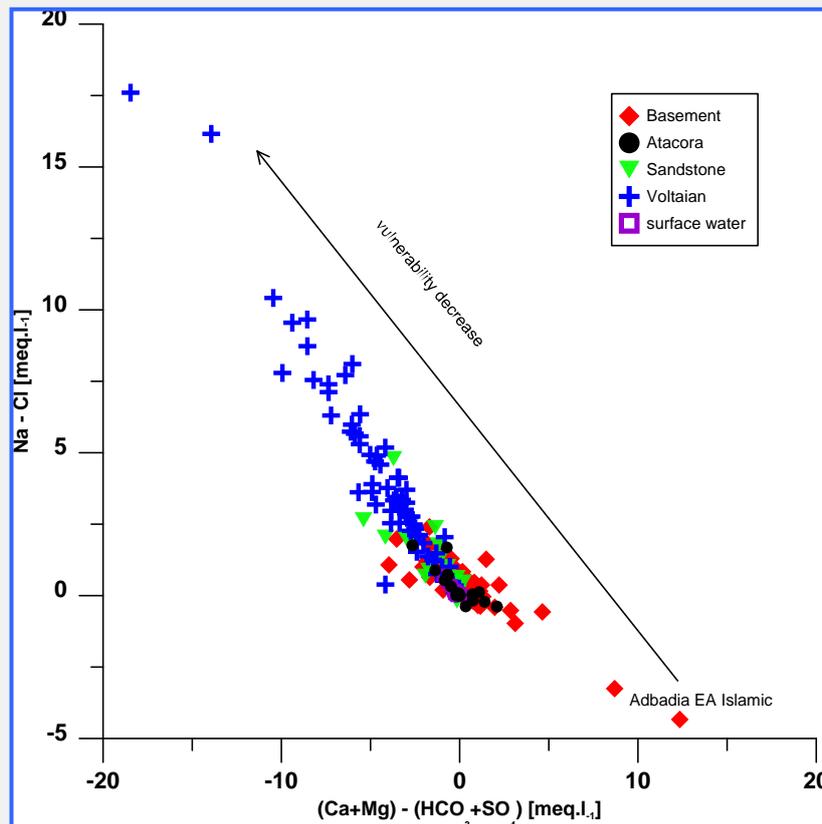


Figure 35 : Indice de vulnérabilité hydrochimique dans le secteur de la Volta centrale

Un indice de vulnérabilité hydrochimique (IVH) a été attribué à chaque échantillon d'eau souterraine en fonction de sa projection orthogonale sur la droite de régression linéaire. Seules cinq catégories d'IVH seront utilisées.

Le rapport entre nitrate et chlore indique que la teneur élevée en nitrate est également liée à la forte concentration de Cl (fig. 36), ce qui est généralement dû à un impact anthropique d'origine urbaine et agricole (N organique). Les concentrations de NO_3 les plus élevées s'observent toujours dans la catégorie d'IVH 5. Certaines eaux souterraines très vulnérables d'un point de vue géochimique peuvent présenter une faible teneur en nitrate, en partie en raison du processus de dénitrification.

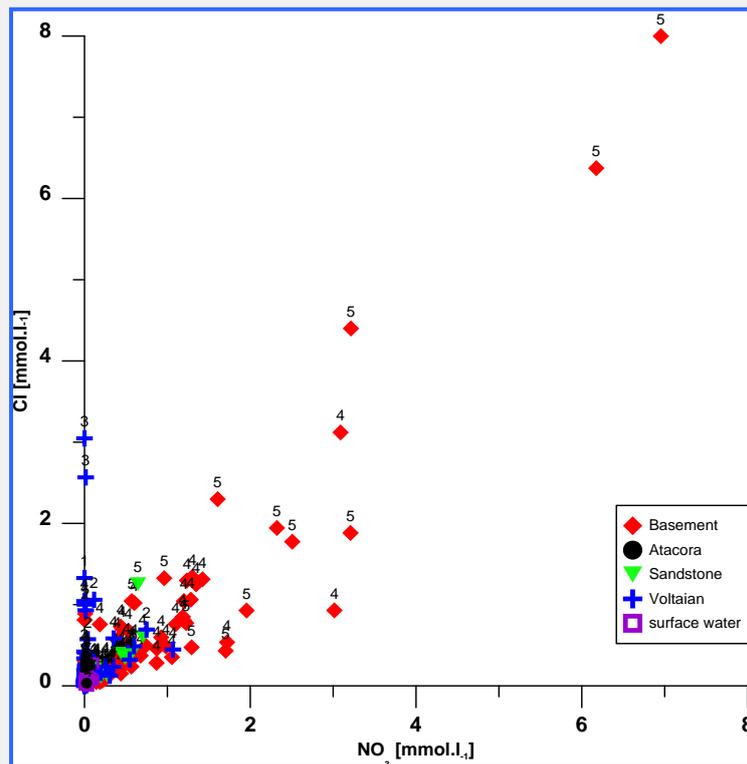


Figure 36 : Relation entre les teneurs en Cl et en NO₃ dans le secteur de la Volta centrale

Les échantillons des catégories d'IVH 1, 2 et 3 proviennent de la partie est du Bénin et de la partie nord-ouest du Togo, où se trouvent les formations sédimentaires. En revanche, la plupart des échantillons des formations de grès et de l'Atacora sont de catégorie IVH 4. Ainsi, seule la formation voltaïenne des aquifères sédimentaires affiche une faible vulnérabilité chimique.

L'existence de processus d'échanges cationiques et les indications d'une vulnérabilité chimique plus faible laissent à penser que les eaux souterraines de l'aquifère voltaïen ont un temps de résidence plus long. En observant la position géographique des points d'échantillonnage et le rapport Ca/Na (qui indique un processus d'échanges cationiques), on peut déterminer la direction de circulation de l'eau au sein de cette formation géologique. Pour certains points (généralement d'IVH 4), le long de la ligne de flux, une réalimentation locale/directe est possible.

S'agissant des isotopes stables, les échantillons d'eaux de surface suivent une droite d'évaporation dont la pente est de + 5‰ (fig. 37). En ce qui concerne les autres secteurs, on constate que la valeur moyenne pour les échantillons de précipitations datant de 2014 et 2015

est relativement plus élevée que celle de la plupart des échantillons d'eaux souterraines. Deux ans de données ne suffisent pas pour donner un aperçu représentatif du signal d'entrée. Dans la majorité des échantillons d'eaux souterraines, les valeurs vont de -6 ‰ à -2 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de -40 ‰ à -20 ‰ pour $\delta^2\text{H}$.

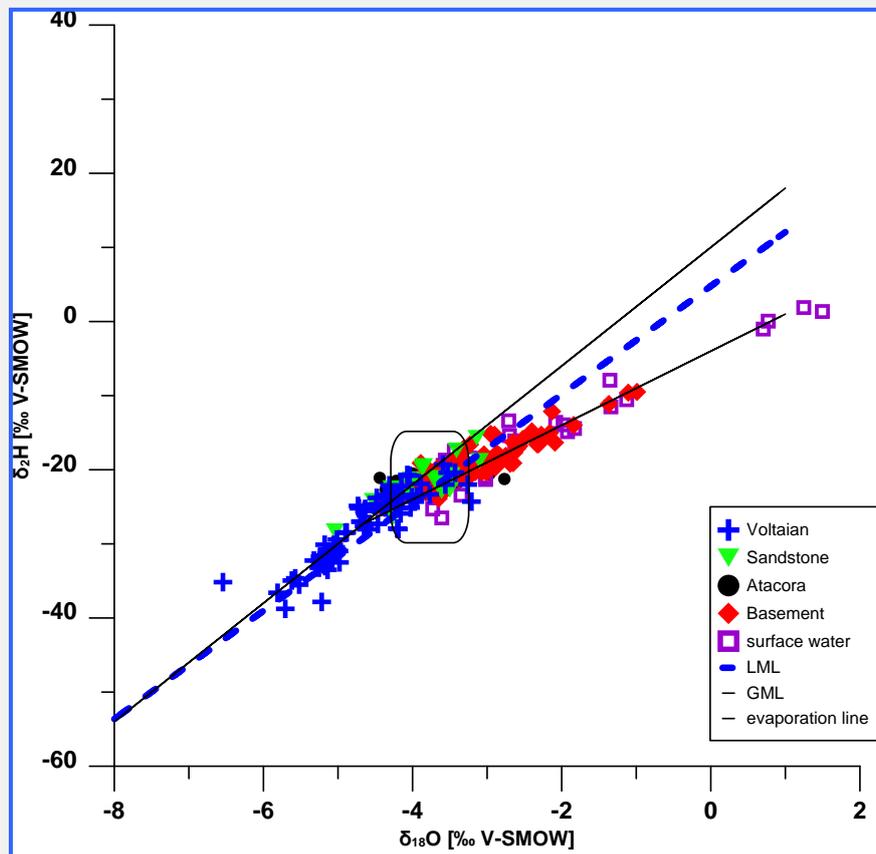


Figure 37 : Répartition globale des teneurs en isotopes stables dans le secteur de la Haute-Volta centrale

La dispersion des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$ autour de la DML est assez importante pour une la formation voltaïenne, mais peu d'échantillons d'eaux souterraines présentent une évaporation élevée (figs. 37 et 38). Les échantillons d'eaux souterraines du Togo suivent parfaitement la DML et seules les eaux de surface présentent les signes d'un processus d'évaporation. Au contraire, presque tous les échantillons d'eaux souterraines du Ghana affichent de tels signes, étant donné qu'ils proviennent tous de la formation de socle. Le point « de départ » de la composition isotopique des eaux souterraines est proche de -4 ‰.

Les eaux souterraines des formations voltaïennes sont les plus pauvres en isotopes, tandis que les eaux des formations de socle de roches dures présentent les signes les plus marqués d'évaporation (fig. 37). Les eaux des formations de grès et de l'Atacora sont plus proches du signal moyen des précipitations à quelques exceptions près. Au Ghana, l'échantillonnage n'a

porté que sur la formation de socle de faible profondeur. Par conséquent, les données isotopiques affichent des signes d'évaporation et sont caractéristiques du signal de précipitations de l'époque actuelle.

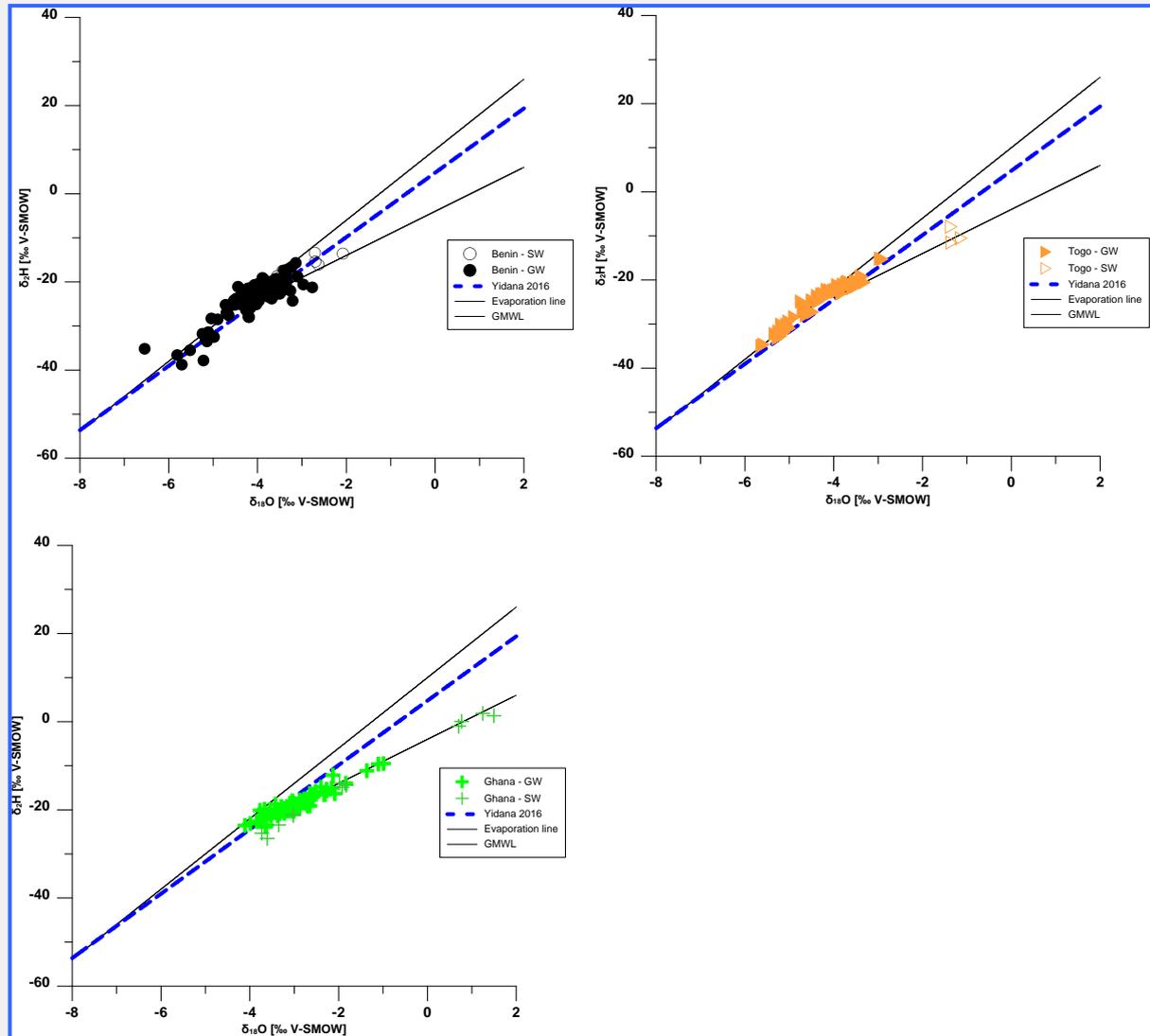


Figure 38 : Répartition globale des données d'isotopes stables du secteur de la Haute-Volta centrale pour chaque pays

Les données ayant trait au tritium confirment que les eaux souterraines voltaïennes sont les plus anciennes et donc les moins influencées par l'évaporation et les précipitations de l'époque actuelle (fig. 39).

Pour ce qui est des autres secteurs étudiés, on ne dispose pas de données sur le tritium des précipitations régionales récentes. On a pu cependant déduire le signal d'entrée du tritium à partir des données des eaux de surface. Les valeurs de tritium des eaux de surface

échantillonnées pendant la mise en œuvre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA vont de 1,6 à 3,4 UT. Ce sont les échantillons des réservoirs du Ghana qui présentent les valeurs les plus faibles (1,6 et 1,7 UT). Il est possible que les eaux souterraines influencent la composition isotopique de ces eaux de surface. On peut considérer que la valeur de tritium moyenne du signal d'entrée est comprise entre 2,4 et 3,4 UT. Parmi les échantillons du socle, seuls quelques-uns affichent les valeurs les plus élevées (et un seul du voltaïen), ce qui est le signe d'une réalimentation de 1963 à nos jours avec différents taux de mélange. La plupart des échantillons d'eau du voltaïen présentent des valeurs de tritium très faibles, ce qui indique que les eaux souterraines ont plus de 60 ans (ou contiennent une forte proportion d'eaux très anciennes). Pour les valeurs de ^3H plus faibles, la teneur en isotopes stables est comprise entre -4 et -6 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$. Cette variabilité est peut-être due aux effets du paléoclimat.

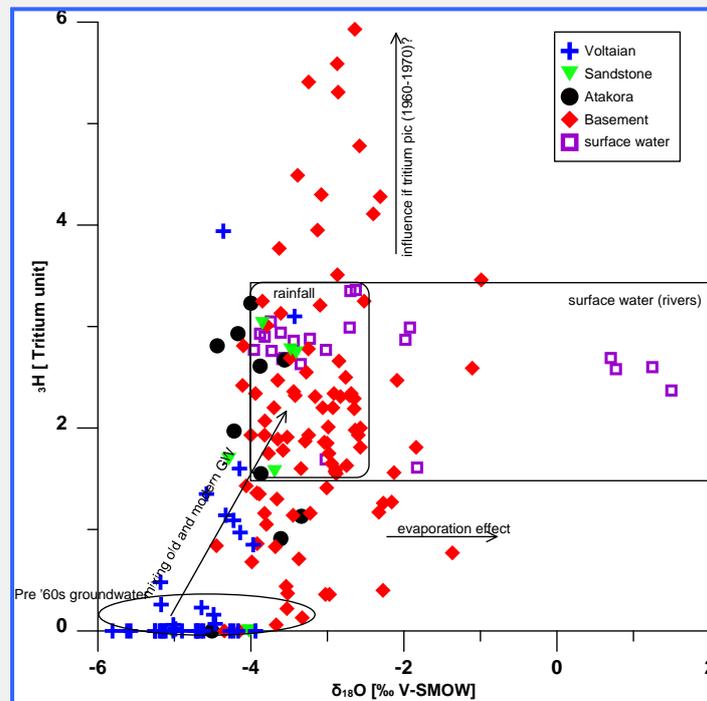


Figure 39 : Relation entre les teneurs en ^3H et en $\delta^{18}\text{O}$ dans les principales unités lithologiques du secteur de la Haute-Volta centrale

La répartition géographique indique une évolution de la partie est de la zone étudiée (nord-ouest du Bénin), où les eaux proviennent des précipitations de l'époque actuelle, vers la partie nord-est du Togo, où les eaux souterraines sont les plus anciennes (eau sans tritium). Les valeurs de tritium sont caractérisées par une variation spatiale dans le nord du Ghana et l'ouest du Togo, ce qui est le signe d'une réalimentation plus récente (fig. 40).

Les formations de l'Atacora et de grès occupent une position intermédiaire, avec des valeurs de tritium importantes, caractéristiques d'une réalimentation à l'époque actuelle (1960-2016), mais moins variables, en raison d'une dynamique plus lente. Cela indique que les aquifères de socle peuvent être réalimentés par infiltration d'eaux de surface pendant la saison des pluies (et les violentes averses), mais que ces eaux mettront plus de temps à atteindre les eaux souterraines à travers la zone non saturée.

Pour résumer, on peut classer la dynamique de réalimentation des différents aquifères en fonction de sa vitesse, de la plus rapide à la plus lente, comme suit : socle/birrimien > grès et Atacora > voltaïen. Il est difficile de distinguer la formation de grès de celle de l'Atacora en termes de comportement hydrodynamique, en partie en raison du nombre relativement faible d'échantillons prélevés dans cet environnement sédimentaire.

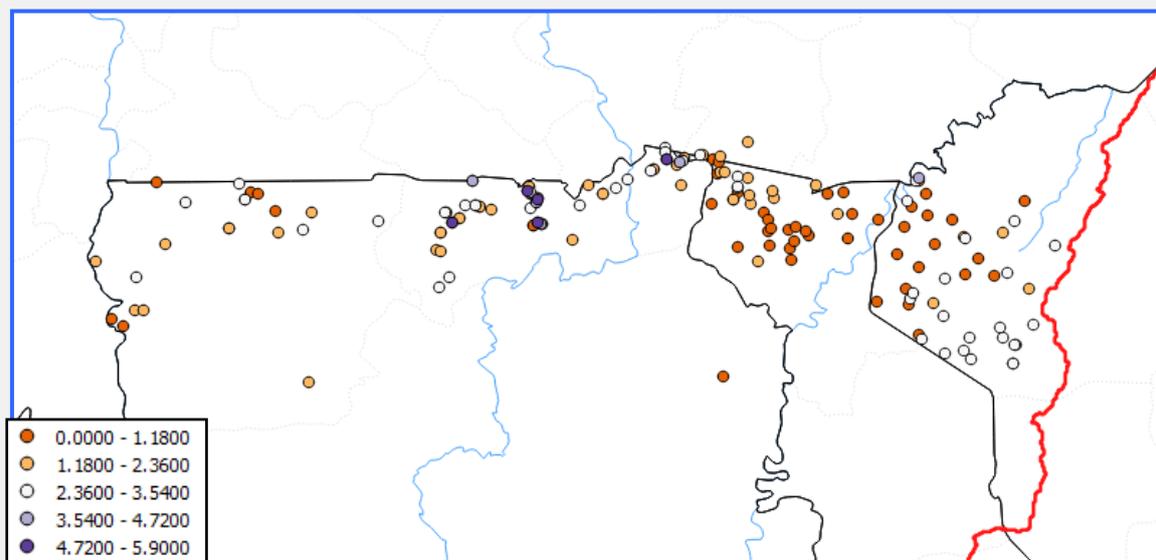


Figure 40 : Répartition spatiale des teneurs en ^3H dans le secteur de la Haute-Volta centrale

Pour certains échantillons, des analyses du A^{14}C et du $\delta^{13}\text{C}$ ont été réalisées afin d'estimer l'âge des eaux souterraines. Quand l'activité de ^{14}C était supérieure à 85 pourcents de carbone moderne (pMC), les valeurs de tritium étaient systématiquement supérieures à 1 UT, ce qui indique la présence d'eaux « modernes » mélangées avec des eaux souterraines anciennes. Par ailleurs, un échantillon (Nabame, Togo) affichant une A^{14}C de 51 pMC a aussi une teneur en tritium de 1,6 UT en raison d'un mélange d'eaux anciennes et d'eaux plus récentes.

Pour la datation, il est nécessaire d'estimer les valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ dans les sols qui sont directement influencés par la végétation naturelle ou les cultures. Le secteur sélectionné se trouve dans des zones agroécologiques de savane guinéenne et soudanaise dominées par les cultures et les pâturages. Les principales cultures vivrières sont le sorgho, le maïs, le millet et l'arachide (Obuobie et Barry, 2010 ; Obuobie et Barry, 2012). On peut considérer que l'occupation des sols est dominée par les plantes de type C4. La moyenne de $\delta^{13}\text{C}$ de ces plantes est estimée à -12‰ (-15 à -20‰).

La principale évolution de la relation entre $A^{14}\text{C}$ et $\delta^{13}\text{C}$ s'opère le long de l'axe Y, ce qui indique qu'il y a peu de processus chimiques (fig. 41). D'après la méthode graphique proposée par Han et al. 2012, un échantillon contenant du tritium (principalement du socle) peut être considéré comme étant en conditions de système ouvert. L'altération des silicates est possible.

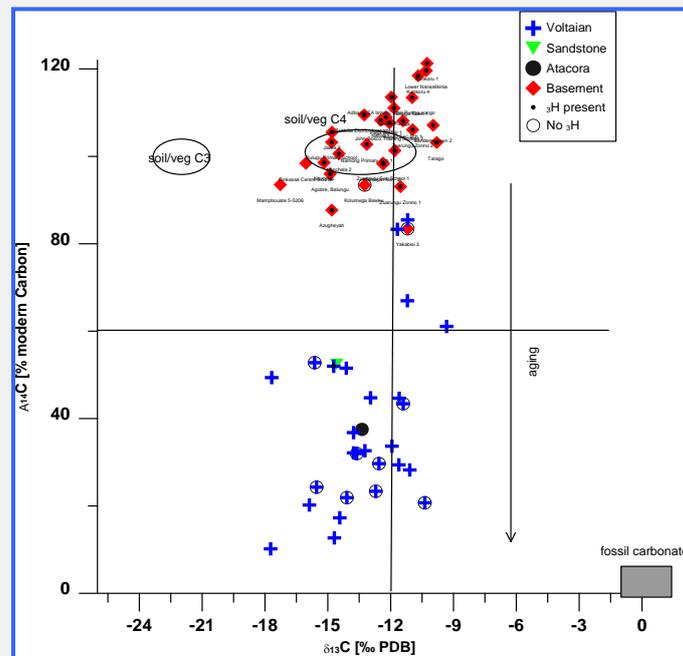


Figure 41 : Relation entre $A^{14}\text{C}$ et $\delta^{13}\text{C}$ dans les eaux souterraines du secteur de la Haute-Volta centrale

Pour l'estimation de l'âge, on a remplacé les données de température manquantes par 31°C et les échantillons sans pH ou sans informations chimiques n'ont pas pu être traités. La teneur normale en $\delta^{13}\text{C}$ a été estimée à -12‰ dans les matières organiques du sol, et à $+0,8\text{‰}$ pour les phases minérales.

Les eaux souterraines les plus anciennes, selon le modèle d'Evans, ont entre 800 et 22 400 ans. Les eaux souterraines « les plus jeunes » sont généralement mélangées à des

eaux modernes. Une trentaine d'échantillons présentent les caractéristiques d'eaux souterraines très anciennes. Tous proviennent de la formation voltaïenne du Togo et du Bénin (et il y avait aussi un échantillon de l'Atacora et un autre de la formation de grès).

Les eaux souterraines sans tritium et/ou présentant une faible activité de ^{14}C (moins de 84 pMC) sont considérées comme « anciennes » et ne sont pas influencées par les précipitations modernes. Ce sont les plus pauvres en isotopes ($\delta^{18}\text{O}$ inférieur à $-4,95\text{‰}$ et $\delta^2\text{H}$ inférieur à $-31,1\text{‰}$) (fig. 42). Les eaux souterraines les plus anciennes peuvent fournir des informations sur les conditions de paléorecharge (réalimentation aux basses températures atmosphériques). Certaines eaux souterraines anciennes peuvent afficher des signes d'évaporation (d'après les teneurs en isotopes stables), ce qui indique que celle-ci peut se produire pendant la réalimentation et n'est donc pas toujours liée à une influence directe des eaux de surface ou à une forte vulnérabilité à la pollution.

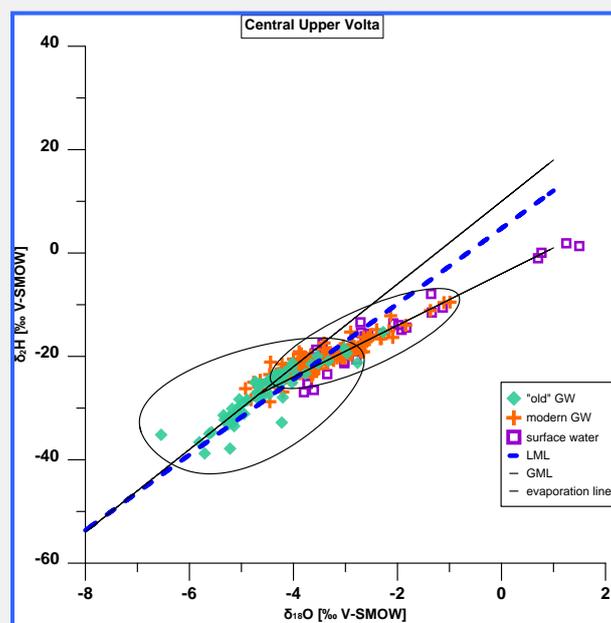


Figure 42 : Répartition globale des données d'isotopes stables des eaux souterraines pour lesquelles on possède des indications d'âge dans le secteur de la Haute-Volta centrale

Enfin, on a effectué une analyse statistique des données des échantillons d'eaux souterraines du secteur de la Haute-Volta centrale qui possèdent des informations communes ($n=234$). L'ACP montre que les données d'isotopes stables sont à l'opposé de celles de Na et HCO_3 sur l'axe Y/F2, ce qui est le signe d'un long temps de résidence et d'échanges d'ions. Une ACP portant uniquement sur les échantillons pour lesquels on dispose de données sur ^3H ($n=146$) confirme cette constatation (fig. 43).

L'AFC (analyse factorielle des correspondances) a confirmé que les échantillons du voltaïen et du socle étaient les plus différenciés d'un point de vue hydrogéochimique, tandis que les eaux de l'Atacora et de la formation de grès avaient une spécificité chimique moindre (il y avait moins d'échantillons provenant de ces deux formations géologiques).

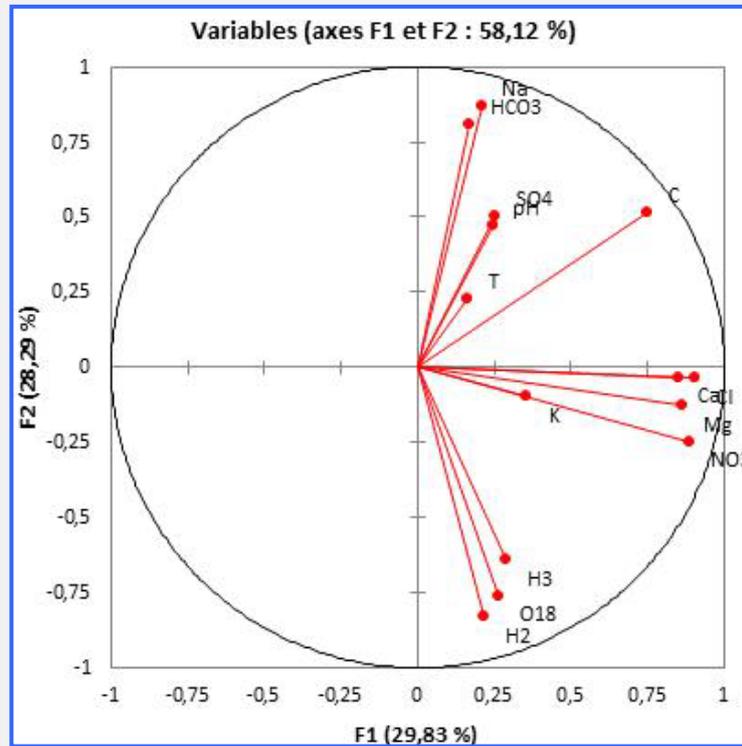


Figure 43 : ACP des échantillons d'eaux souterraines dont la série de données est complète, y compris 3H (n=146), pour le secteur de la Haute-Volta centrale

5. CONCLUSIONS

Aquifères de roches dures/de socle

Les aquifères de roches dures étudiés dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA occupent une grande partie du bassin de la Haute-Volta entre le nord du Bénin, du Togo et du Ghana, et la partie sud-ouest du Niger, une zone parfois appelée le Liptako-Gourma.

On peut distinguer deux grands systèmes aquifères dans ces formations géologiques : un système aquifère de zone altérée (aquifères du régolithe) et un système aquifère de zone fracturée. La réalimentation dans le socle a été estimée à 100-160 mm/an (soit 10-16 % des précipitations annuelles) dans l'ouest du Bénin et au Ghana (Seguis *et al.*, 2011 ; Obuobie et Barry 2012). Les aquifères du Ghana, en particulier ceux situés dans le nord du pays, sont principalement réalimentés par les précipitations (Obuobie, 2008 ; Martin, 2006). Au Niger, la réalimentation des eaux souterraines est plus faible, avec environ 1-13 mm/a (Barry et Obuobie, 2012).

Les eaux souterraines sont généralement captées à partir de puits creusés, de puits à drains rayonnants assez peu profonds (10 à 60 m) ou de bassins artificiels dans lesquels l'eau s'accumule pendant la saison des pluies. Le débit peut donc être assez faible et il peut arriver que l'eau vienne à manquer à la fin de la saison sèche. Selon les estimations actuelles, il y aurait aujourd'hui suffisamment d'eau pour l'irrigation et les autres activités humaines dans le nord du Ghana (Akudago *et al.*, 2009 ; Barry *et al.*, 2010). Cependant, les pratiques récentes qui reposent sur l'exploitation d'aquifères très peu profonds qui sont à sec une partie de l'année, et la pression anthropique, mise en évidence par la contamination aux nitrates, limitent l'utilisation des ressources en eaux souterraines.

Les données isotopiques et chimiques confirment la réalimentation par les précipitations ou les eaux superficielles (provenant des cours d'eau) qui s'infiltrent dans des zones spécifiques pendant les fortes averses et pendant la saison des pluies (pluies d'août-septembre dans la partie nord du Liptako-Gourma). La plupart des échantillons d'eaux souterraines présentaient des signes d'évaporation, ce qui confirme une infiltration probable d'eaux de surface sur toute la zone étudiée. Dans divers secteurs, des bassins ou de petites zones de rétention d'eau ont

été créés pour l'usage domestique. Ces points d'infiltration d'eau peuvent également faciliter le transfert de contaminants tels que les nitrates. Les concentrations de nitrates de la plupart des échantillons d'eaux souterraines prélevés pendant la mise en œuvre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA étaient élevées ou très élevées (jusqu'à 1450 mg.l⁻¹). Ces concentrations sont localisées autour des bassins et des puits creusés, mais dans certains secteurs, la contamination des eaux souterraines peut s'étendre sur des zones plus étendues de l'aquifère. Certaines données indiquent que le nitrate pourrait provenir à la fois des eaux d'égout et des engrais agricoles.

La variabilité chimique des eaux souterraines est donc principalement déterminée par la pression humaine, comme le montrent les teneurs en nitrate. L'infiltration d'eaux de surface autour du fleuve Niger a été clairement établie. Les ressources en eaux souterraines étaient localisées dans l'aquifère alluvial et l'aquifère de socle. L'infiltration de l'eau des cours d'eau contribue à réduire les concentrations de nitrate.

Les aquifères de socle sont donc très vulnérables aux changements mondiaux (anthropiques et climatiques). Cependant, les données de divers puits ont révélé des échanges cationiques et de faibles teneurs en tritium, ce qui indique également qu'il s'agit d'eaux souterraines ayant un temps de résidence moyen de quelques décennies. Le mélange d'eaux souterraines assez jeunes avec des eaux souterraines très anciennes a été également démontré. Par ailleurs, les eaux souterraines « anciennes » peuvent s'évaporer pendant la réalimentation et conserver cette signature sur la durée.

Le choix des points d'échantillonnage et le grand nombre de puits situés dans la zone altérée des aquifères de socle rendent impossible une évaluation globale des ressources en eaux souterraines du système aquifère du Liptako-Gourma. De plus, on peut considérer que les aquifères des formations de roches dures sont plus souvent de petites unités indépendantes que de grands aquifères uniformes.

Aquifères sédimentaires

Les aquifères sédimentaires ont été étudiés dans deux secteurs : la zone du Gondo-Sourou (Mali-Burkina Faso) et celle de l'Oti/Pendjari (Togo, Bénin, Burkina Faso).

L'examen des aquifères sédimentaires de roches consolidées a permis de mettre au jour divers processus chimiques, tels que les échanges cationiques (le Na remplace généralement le Ca dans les eaux souterraines qui circulent sur une trajectoire d'écoulement donnée) et la minéralisation (interactions eau-roche croissante sur la durée). Par ailleurs, les outils isotopiques (isotopes stables de l'eau, tritium et ^{14}C) ont permis de déterminer que les eaux souterraines étaient en partie assez anciennes (leur âge pourrait aller jusqu'à 22 400 ans).

Les ressources en eaux souterraines des deux bassins sédimentaires sont peut-être assez importantes, mais les principaux problèmes de gestion de ces ressources sont la présence d'eau fortement minéralisée (saline) et le faible nombre de puits forés ayant un débit satisfaisant. Étant donné que les eaux souterraines peuvent être très anciennes, il faudrait dans certains cas évaluer soigneusement la réalimentation pour assurer l'exploitation durable de ces ressources.

Le Gondo-Sourou est un bassin endoréique situé dans une grande plaine où les activités agricoles se sont développées suite à la construction de plusieurs barrages sur la rivière Sourou. D'autres projets sont prévus et la construction de systèmes d'irrigation permettra de développer l'utilisation des terres. Cela se traduira par une augmentation de la population et donc l'exploitation accrue des ressources en eaux souterraines. Seuls quelques-uns des échantillons prélevés dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA présentaient de fortes concentrations de nitrates. Trois échantillons sur 42 avaient des concentrations de NO_3 supérieures à $20 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Les aquifères sédimentaires, à l'exception de ceux de la zone de réalimentation, sont mieux protégés contre la pression anthropique. Cependant, en raison du manque de matériel de forage, les puits creusés sont généralement peu profonds, et donc plus vulnérables à cette pression ainsi qu'à la variabilité des conditions de réalimentation.

La conductivité de l'eau augmente du Mali au Burkina Faso, le long des lignes de flux, en raison de l'accroissement des échanges entre l'eau et la roche. Les eaux sont fortement minéralisée (SO_4 , Na, Cl) dans certains secteurs, et les caractéristiques chimiques des eaux souterraines de ces secteurs sont donc incompatibles avec les normes de qualité de l'eau potable ou de l'eau d'irrigation. L'origine des solutés n'a pas pu être déterminée à ce stade.

Il ressort des données recueillies sur le tritium que 25 % des eaux souterraines échantillonnées datent d'avant 1960 (avant l'essai de bombe). Aucune analyse de ^{14}C n'a été réalisée. Par ailleurs, il n'a pas non plus été possible d'évaluer l'échange entre l'aquifère le plus profond et l'aquifère superficiel. Néanmoins, il n'y a pas de différence marquée entre la teneur en ^3H des eaux souterraines et celle des trois couches aquifères détectées, les données indiquant toutes la présence d'eaux anciennes (> 60 ans) et récentes. Il existe donc des secteurs de réalimentation ou des zones d'échange entre les aquifères les plus profonds (et les plus anciens) et les aquifères plus superficiels.

Le système aquifère sédimentaire de la Pendjari/Oti est constitué de plusieurs couches, à savoir les formations voltaïenne, de grès et de l'Atacora.

Les aquifères sédimentaires ont un fort potentiel. Cependant, les forages n'ont pas toujours donné un débit satisfaisant et il est important de déterminer les secteurs plus prometteurs pour exploitation. Les eaux souterraines des secteurs les moins vulnérables sont de meilleure qualité (faible concentration de nitrates) mais il conviendrait d'analyser les eaux souterraines plus anciennes et le taux de renouvellement pour pouvoir estimer l'exploitation durable de ces ressources en eau.

Les analyses du carbone 14 réalisées sur divers échantillons ont confirmé la présence d'eaux assez anciennes (800 à 22 000 ans), principalement dans l'aquifère voltaïen. Les eaux souterraines très anciennes (d'un âge supérieur à plusieurs centaines d'années) sont souvent appauvries en isotopes stables, ce qui peut être considéré comme un signe de paléorecharge. Par ailleurs, les mesures du tritium sont importantes dans le cas des eaux souterraines présumées très anciennes, car elles permettent de déceler l'existence de processus de mélange entre des eaux souterraines très anciennes et plus récentes dans certains secteurs.

La réalimentation de l'aquifère voltaïen a principalement lieu dans les dépressions géographiques. Trois points d'échantillonnage présentaient les valeurs de tritium les plus élevées. Ces forages se trouvaient dans des dépressions. Néanmoins, le débit de ces puits était assez faible. Il conviendrait de bien protéger ces secteurs afin d'éviter le transfert de divers polluants dans l'aquifère voltaïen.

Les données ayant trait aux formations de grès du Buem et du Togo ont révélé la présence d'eaux souterraines récentes et assez anciennes. La vulnérabilité de ces formations est moyenne ou élevée. Une réalimentation localisée de ces formations a été mise en évidence et les concentrations de nitrate sont supérieures à $30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dans 17 % des points d'échantillonnage.

Enfin, la formation de grès de l'Atacora est la plus vulnérable des formations sédimentaires. Comme il s'agit clairement d'une importante zone de réalimentation, il conviendrait de la protéger. Déjà, les concentrations de nitrate sont supérieures à $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour 30 % des points d'échantillonnage et atteignent $260 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ pour certains points.

Les données hydrochimiques (notamment celles d'échanges cationiques) ont permis de définir les sens d'écoulement des eaux souterraines et de mettre en évidence certaines zones de réalimentation localisées.

Recommandations

Des résultats extrêmement intéressants ont été enregistrés dans le cadre du projet RAF/7/011 appuyé par l'AIEA. En ce qui concerne l'aquifère de socle, une étude approfondie de la concentration de nitrate dans les eaux souterraines pourrait permettre de déterminer si l'infiltration des polluants a principalement lieu aux emplacements des bassins et des puits creusés, c'est-à-dire dans des zones très localisées pouvant être protégées, ou si la pollution mesurée dans certains secteurs est le résultat d'une pollution diffuse. Il pourrait être extrêmement intéressant de chercher à déterminer si les niveaux de pollution des eaux souterraines de certains secteurs caractérisés par la minéralisation aurifère des roches volcano-sédimentaires du birrimien dépassent toujours les seuils des normes de qualité de l'eau potable, comme indiqué dans le passé (Smedley et al., 2007).

Il serait également recommandé d'étudier les couches les plus profondes des aquifères de roches dures car leurs ressources en eaux souterraines pourraient être exploitables et moins vulnérables.

Il est important de continuer à surveiller le niveau et la qualité des eaux souterraines, de même que les isotopes stables présents dans les eaux de surface et les précipitations, et de collecter

davantage de données sur le tritium, afin de pouvoir constituer une bonne base de données de référence permettant de réaliser des études diverses, détaillées et plus ciblées sur les eaux souterraines.

Dans l'aquifère sédimentaire, il conviendrait de protéger les secteurs déterminés comme étant des zones de réalimentation pour éviter une augmentation du niveau de pollution des eaux souterraines. Les études transfrontières entre le Burkina Faso et le Mali devraient se poursuivre en vue de la définition du modèle hydrogéologique conceptuel de l'aquifère du Gondo-Sourou et de l'évaluation des incidences des changements mondiaux attendus prochainement du développement de l'agriculture irriguée. Dans la zone transfrontières entre le Togo, le Bénin et le Burkina Faso, une collaboration internationale permettrait de dresser une carte hydrogéologique des aquifères sédimentaires (secteurs de la Pendjari/Oti) et d'améliorer les estimations du bilan hydrique (notamment en ce qui concerne la réalimentation des eaux souterraines) grâce auxquelles on pourrait proposer un plan de gestion durable visant à éviter la baisse du niveau des eaux souterraines.

6. RÉFÉRENCES

- A**ffaton P. (1990) - Le bassin des Volta (Afrique de l'Ouest) : une marge passive, d'âge protérozoïque supérieur, tectonisée au Panafricain. Editions ORSTOM, Collection Études et Thèses, Paris, 500 p.
- A**ffaton P. (2008) – Lithostratigraphy of the Volta Basin and related structural units. in: F. Kalsbeek Ed. The Voltain Basin Ghana. Workshop and excursion.
- A**kiti T.T. (1980) – Etude géochimique et isotopique de quelques aquifères du Ghana. Thèse de doctorat de l'université Paris XI-Orsay. 232p.
- A**kudago J.A. et al. (2009) –Estimating the storage and maximum annual yield of the aquifer system in Northern Ghana and the potential irrigation. Journal of Environmental Hydrology. Vol.17, paper 19.
- A**ltchenko Y., Villholth K.G. (2013) - Transboundary aquifer mapping and management in Africa: a harmonised approach, Hydrogeology Journal, 21: 7, pp.1497-1517.
- A**ndrew J.J., Kay R.L.F. (2012) – Natural production of tritium in permeable rocks. Nature 298:361-363.
- B**arry B., Obuobie E. (2012) – Mali. In : Groundwater availability and land-use in Sub-Saharan Africa: a review of 15 countries. Ed. Pavelic et al.
- B**arry B., Obuobie E. (2012) – Niger. In : Groundwater availability and land-use in Sub-Saharan Africa: a review of 15 countries. Ed. Pavelic et al.
- B**arry B. et al. (2010) – Shallow groundwater in the Atankwidi catchment in the White Volta Basin: current status and future sustainability. Colombo, Sri Lanka, IWMI research Report 39, 30p.
- B**éthemont J., Faggi P., Zoungrana T.P. (2003) – La vallée du Sourou (Burkina Faso). Génèse d'un territoire dans l'Afrique soudano-sahélienne. L'Harmattan Ed., Paris.
- C**arney J.N., et al. (2010) – Lithostratigraphy, sedimentation and evolution of the Volta Basin in Ghana. Precambrian Research, 183, pp.701-724.
- D**akouré D. (2003) – Étude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso – Mali) – essai de modélisation. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle de l'Université Paris VI.
- D**avies J., Robins N., Farr J. et al (2013) –Identifying transboundary aquifers in need of international resource management in the Southern African Development Community region. Hydrogeology Journal, 21:2, 321-330.
- D**ray M., Gonfiantini R., Zuppi G.M. (1978). Isotopic composition of groundwater in the southern Sahara. In : Isotope Hydrology, 1978. IAEA, Vienna, pp. 187–199.
- G**irard P., Hillaire-Marcel C., Oga M.S. (1997) – Determining the recharge mode of Sahelian aquifers using water isotopes. Journal of Hydrology, 197, 189-202.

Groen J., Schuchmann L.B., Geirgert W. (1988) – The occurrence of high nitrate concentration in groundwater in villages in Northwestern Burkina Faso. *Journal of African Earth Sciences*, 7 (3), 519-543.

Han L.F., Plummer N.L., Aggarwal P. (2012) – A graphical method to evaluate predominant geochemical processes occurring in groundwater systems for radiocarbon dating. *Chemical Geology*, 318-319, pp. 88-112.

Koussoube Y. (2010) – Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (bassin du Sourou) : Burkina Faso, Mali. Thèse de doctorat, Université Paris VI.

Lapworth D., MacDonald A.M. Tijani M.N. et al (2012) – Residence time of shallow groundwater in West Africa: implications for hydrogeology and resilience to future changes in climate. *Hydrogeology Journal*.

Martin N. (2006) – Development of a water balance for the Atankwidi catchment, West Africa – A case study of groundwater recharge in a semi-arid climate. *Ecology and Development Series*, No41. 167p.

McDonald A.M., Davies J. (2000) – A brief review of groundwater for rural water supply in the sub-Saharan Africa. BGS Technical Report WC/00/33, 23p.

Meyzonat G., Larocque M., Barbecot F., Pinti D.L., Gagné S. (2015) – The potential of major ion chemistry to assess groundwater vulnerability of a regional aquifer in Southern Quebec (Canada). *Environ. Earth Sci*, 75:68.

Obuobie E., Barry B. (2010) – Ghana country status on groundwater. *Groundwater in sub-Saharan Africa: implications for food security and livelihoods*.

Obuobie E., Barry B. (2012) – Ghana. In : *Groundwater availability and land-use in Sub-Saharan Africa: a review of 15 countries*. Ed. Pavelic et al.

Pelig-Ba K.B. (2009) - Analysis of Stable Isotope Contents of Surface and Underground Water in Two Main Geological Formations in the Northern Region of Ghana. *West African J Appl Ecol* 15:1–9.

Practica/EWVITA/UNICEF (2010) – Etude de faisabilité des forages manuels. Identification des zones potentiellement favorables. 26p.

Séguis L. et al. (2011) – Origin of streamflow in the crystalline basement catchment in a sub-humid Sudanian zone: The Donga basin (Benin, West Africa). Inter annual variability of water budget. *Journal of Hydrology*, 402:1-13.

Smedley P.L., Knudsen J., Maiga D. (2007) – Arsenic in groundwater from mineralized Proterozoic basement rocks of Burkina Faso. *Applied Geochemistry*, 22: 1074-1092.

Taupin J.D., Gallaire R., J.C. Fontes (1995) – Isotopic study of rainfall in the Sahelian zone (Niger) along two sections, east-west (Lake Chad-Niamey) and north-south (Agadez-Niamey). IAHS publication n°232, 285-292.

Taupin J.D., Gaultier G., Favreau G et al. (2002) -. Isotopic variability of Sahelian rainfall at different time steps in Niamey (Niger, 1992-1999): climatic implications. *Académie des sciences / Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS C. R. Geoscience*, 334, 43–50.

United Nations (1988) – Groundwater in North and West Africa. *Natural Resources/Water series No18.ST/TCD/5*, United Nations Publication.404 p.

Yidana S.M. (2013) - The stable isotope characteristics of groundwater in the Voltaian basin—an evaluation of the role of meteoric recharge in the basin .J Hydrogeol Hydrol Eng 2013(2):2. doi:10.4172/2325-9647.1000106.

Yidana S.M., Fynn O.F., Adomacko D., Chegbeleg L.P. (2016) – Estimation of evapotranspiration losses in the vadose zone using stable isotopes and chloride mass balance method. Environ. Earth Science, 75:208.

ABRÉVIATIONS

ACP : Analyse en composantes principales

AFC : analyse factorielle des correspondances

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique

BGS : Service géologique britannique

BKF : Burkina Faso

CGIAR : Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale

CTQ : Continental terminal quaternaire

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

GNIP : Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations

GRAPHIC : Évaluation des ressources en eaux souterraines qui subissent les pressions exercées par l'activité humaine et les changements climatiques

HV : Haute-Volta

ICP : Infracambrien plissé

ICT : Infracambrien tabulaire

IGRAC : Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines

ISARM : Gestion des ressources des aquifères partagés

IVH : Indice de vulnérabilité hydrogéochimique

IWMI : Institut international de gestion de l'eau

LG : Liptako-Gourma

PACTEA : Programme d'Appui aux Collectivités Territoriales pour l'Eau potable et l'Assainissement

PHI : Programme hydrologique international

PME : Partenariat mondial pour l'eau

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

UT : Unité de tritium

WHYMAP : Programme mondial d'évaluation et de cartographie hydrogéologiques

WLE : Programme de recherche sur l'eau, la terre et les écosystèmes

ZCIT : Zone de convergence intertropicale