



BURKINA FASO
Unité - Progrès - Justice



Programme d'Approvisionnement en Eau
et d'Assainissement (PAEA)



SYNTHESE ET VALORISATION DES ETUDES SUR LES RESSOURCES EN EAU

CARACTÉRISATION GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE
DU NORD DU BURKINA FASO

RÉFÉRENCE : RT1.2.3-01

VERSION FINALE VF – 12/2022



Synthèse et valorisation des études sur les ressources en eau au profit du PAEA
Axe 2 : Améliorer les connaissances sur les ressources en eau, pour une exploitation renforcée et durable
Résultat 1.2 : La caractérisation géologique et hydrogéologique des systèmes aquifères des bassins sédimentaires de l'Ouest, du Nord et de l'Est du Burkina Faso est réalisée
Activité 1.2.3-01 : Élaboration d'une synthèse des caractéristiques des aquifères du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

CARACTERISATION GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD DU BURKINA FASO

Réf : RT.1.2.3-01	Version : VF	Date : 23/12/2022
Préparé par : DEROUANE Johan, avec la collaboration de COMPAORE Hillary, SAURET Élie, TIDIANI Koné, BANDRE Levy Stéphane, YENOU Lazare	Vérifié par : DEROUANE Johan et YENOU Lazare	

Table des matières

A. INTRODUCTION ET CADRE DE L'INTERVENTION	11
A.1. CONTEXTE GÉNÉRAL	11
A.2. LE PAEA ET L'ÉTUDE SÉVÈRE	11
B. OBJECTIF DE L'ÉTUDE	13
C. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE	13
C.1. ZONES SÉDIMENTAIRES DU NORD ET DE L'EST	13
C.2. ZONE SÉDIMENTAIRE DE L'OUEST	15
D. DÉLIMITATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	15
E. CADRE ADMINISTRATIF ET DE GESTION	16
E.1. RÉGIONS, PROVINCES, COMMUNES ET POPULATION	16
E.2. CADRE DE GESTION DES RESSOURCES EN EAU : AGENCES DE L'EAU	18
F. CLIMAT ET PARAMÈTRES HYDRO-CLIMATIQUES	18
F.1. SOURCE DES DONNÉES CLIMATOLOGIQUES ET EXPLOITATION	18
F.1.1. DONNÉES CLIMATOLOGIQUES DE L'ANAM	19
F.1.2. DONNÉES CLIMATOLOGIQUES GLOBALES	20
F.2. PRÉCIPITATIONS	20
F.2.1. PRÉCIPITATIONS ANNUELLES ET DISTRIBUTION SPATIALE	20
F.2.2. DISTRIBUTION ANNUELLE DES PRÉCIPITATIONS MENSUELLES	24
F.3. TEMPÉRATURES	24
F.4. ÉVAPOTRANSPIRATION RÉELLE (ETR)	25
F.5. AUTRES PARAMÈTRES HYDRO-CLIMATOLOGIQUES	27
G. TOPOGRAPHIE ET GÉOMORPHOLOGIE	27
H. HYDROGRAPHIE ET BASSINS VERSANTS	28
I. TYPES DE SOLS	29
I.1. CARTE DES SOLS DU BUNASOL	29
I.2. TYPOLOGIE TEXTURALE DE LA FAO (HWSD)	30
J. OCCUPATION DES SOLS	31
K. CONTEXTE GÉOLOGIQUE	33
K.1. EXTENSION ET CONFIGURATION GÉOLOGIQUE GÉNÉRALE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DE TAOUDENI	33
K.1.1. LOCALISATION ET EXTENSION DU BASSIN	33
K.1.2. CONFIGURATION GÉOLOGIQUE GÉNÉRALE DU BASSIN	33
K.1.3. LITHOSTRATIGRAPHIE GÉNÉRALE DU BASSIN	34
K.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD DU BURKINA FASO	36
K.2.1. LES FORMATIONS NEOPROTEROZOÏQUES	37
K.2.1.1. FORMATION DE FIRGOUN	38
K.2.1.2. FORMATION DE BELI	38
K.2.1.3. FORMATION D'IRMA	39
K.2.1.4. FORMATION DE SARNYERE	39
K.2.1.5. FORMATION DE MASSI	40
K.2.2. LE CONTINENTAL TERMINAL	40
K.2.3. LE QUATÉNAIRE	40
K.2.4. SUPERFICIES À L'AFFLEUREMENT	40

L.	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD DU BURKINA FASO.....	41
L.1.	UNITES HYDROGÉOLOGIQUES RENCONTRÉES	41
L.1.1.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DES GRES QUARTZITE ET CONGLOMERATS DE FIRGOUN	42
L.1.2.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DES SCHISTES ARGILEUX ET GRES DE BELI.....	42
L.1.3.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DES CALCAIRES ET DOLOMIES D'IRMA	43
L.1.4.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DES CALCAIRES ET DOLOMIES DE SARNYERE	43
L.1.5.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DES SCHISTES ARGILEUX ET GRES DE MASSI.....	43
L.1.6.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DU CONTINENTAL TERMINAL.....	43
L.1.7.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DU QUATERNAIRE	43
L.2.	OUVRAGES RECENSES ET CAPITALISATION DES DONNÉES	44
L.2.1.	INVENTAIRE GÉNÉRAL DES OUVRAGES RECENSES DANS LE SÉDIMENTAIRE NORD.....	44
L.2.2.	CAS PARTICULIER DU SITE DE FORAGE « CHRISTINE »	45
L.2.2.1.	LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES	46
L.2.2.2.	CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES ET LITHOLOGIE	48
L.2.2.3.	PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES ET PRODUCTIVITÉ DU SITE DE FORAGE CHRISTINE.....	49
	Essais de pompage de 1996.....	49
	Essais de pompage de 2012.....	51
	Synthèse des données de productivité des ouvrages du site Christine	52
L.3.	CARACTÉRISTIQUES DES UNITES HYDROGÉOLOGIQUES	52
L.3.1.	GÉOMÉTRIE DES AQUIFÈRES	52
L.3.1.1.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE FIRGOUN.....	53
L.3.1.2.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE BELI	53
L.3.1.3.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION D'IRMA	54
L.3.1.4.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE SARNYERE.....	55
L.3.1.5.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE MASSI	55
L.3.1.6.	SYNTHÈSE SUR LE BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD	56
L.3.2.	NIVEAUX DE NAPPE	59
L.3.2.1.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE FIRGOUN.....	59
L.3.2.2.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE BELI	59
L.3.2.3.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION D'IRMA	59
L.3.2.4.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE SARNYERE.....	59
L.3.2.5.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE MASSI	60
L.3.2.6.	SYNTHÈSE SUR LE BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD	60
L.3.3.	PRODUCTIVITÉ DES AQUIFÈRES ET PARAMÈTRES HYDRODYNAMIQUES	61
L.3.3.1.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE FIRGOUN.....	62
L.3.3.2.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE BELI	63
L.3.3.3.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION D'IRMA	63
L.3.3.4.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE SARNYERE.....	64
L.3.3.5.	UNITE HYDROGÉOLOGIQUE DE LA FORMATION DE MASSI	65
L.3.3.6.	SYNTHÈSE SUR LE BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD	66
L.3.4.	SYNTHÈSE DES CARACTÉRISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES DES AQUIFÈRES DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD.....	67
M.	SUIVI ET ÉVOLUTION DES EAUX SOUTERRAINES.....	68
M.1.	SUIVI DE LA PIEZOMÉTRIE	68
M.2.	VARIATIONS TEMPORELLES DE LA PIEZOMÉTRIE	69
M.2.1.	SITE DE TIN-AKOFF	70
M.2.2.	SITE DE TIN-ARKACHEN	73
N.	HYDROCHIMIE	76
N.1.	PHYSICO-CHIMIE.....	76
N.1.1.	TEMPÉRATURE.....	77

N.1.2.	POTENTIEL HYDROGENE PH.....	78
N.2.	CONDUCTIVITE ELECTRIQUE CE	78
N.2.1.1.	FACIES HYDRO-CHIMIQUES DES EAUX SOUTERRAINES	79
O.	ÉVALUATION DE LA RECHARGE DES AQUIFÈRES	80
O.1.	METHODES UTILISEES D'ÉVALUATION DE LA RECHARGE.....	80
O.2.	ÉVALUATION PAR APPROCHE BILANTAIRE SPATIALISEE	80
O.2.1.	METHODOLOGIE DE L'APPROCHE BILANTAIRE SPATIALISEE	80
O.2.2.	PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS	81
O.3.	ÉVALUATION PAR CUBATURES DES VARIATIONS PIEZOMETRIQUES	84
O.3.1.	METHODE DES CUBATURES DE VARIATIONS PIEZOMETRIQUES.....	84
O.3.2.	RESULTATS OBTENUS	85
O.3.2.1.	SITE DE TIN-AKOFF	85
O.3.2.2.	SITE DE TIN-ARKACHEN	86
O.4.	SYNTHESE DES EVALUATIONS DE LA RECHARGE.....	87
P.	EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES.....	87
P.1.	DEMANDE EN EAU ET USAGES DES EAUX SOUTERRAINES	87
P.2.	DEMANDE EN EAU POUR LA CONSOMMATION HUMAINE.....	88
P.3.	DEMANDE EN EAU DES SECTEURS MINIERES ET INDUSTRIELS.....	88
P.4.	DEMANDE EN EAU POUR L'AGRICULTURE	89
Q.	ESTIMATION DES RÉSERVES.....	89
Q.1.	RESERVES TOTALES.....	89
Q.2.	RESERVES EXPLOITABLES	90
Q.3.	RESERVES RENOUVELABLES.....	90
R.	SYNTHÈSE DES POTENTIALITES SUR LES AQUIFERES DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD DU BURKINA FASO	91
S.	GESTION ET CAPITALISATION DES DONNEES.....	92
T.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	93
BIBLIOGRAPHIE		95
ANNEXES.....		98
ANNEXE 1 :	LISTE DES OUVRAGES REPERTORIES	98
ANNEXE 2 :	RECUEIL DES CARTES	100

Liste des illustrations

Figure 1 : Logigramme de l'axe 1.....	12
Figure 2 : Zones sédimentaires du Burkina Faso	13
Figure 3 : Localisation du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso.....	15
Figure 4 : Population totale (2019) par portion de commune dans le bassin sédimentaire du Nord	17
Figure 5 : Densité de population du bassin sédimentaire du Nord par commune	18
Figure 6 : Zones climatiques du bassin sédimentaire du Nord	19
Figure 7 : Stations climatologiques de l'ANAM	20
Figure 8 : Chronique 1991-2020 de pluviométrie annuelle et courbe de tendance.....	21
Figure 9 : Distribution spatiale des précipitations moyennes de la période 2011-2020	22
Figure 10 : Carte des précipitations année-type P10 du bassin sédimentaire du Nord	22
Figure 11 : Carte des précipitations année-type P50 du bassin sédimentaire du Nord	23
Figure 12 : Carte des précipitations année-type P90 du bassin sédimentaire du Nord	23
Figure 13 : Pluviométrie mensuelle (année moyenne, P10, P50, P90)	24
Figure 14 : Températures et précipitations mensuelles moyennes sur la période 1991-2020	25
Figure 15 : Carte de l'évapotranspiration réelle FAO (AETI FAO) moyenne annuelle sur la période 2011-2020	26
Figure 16 : Évapotranspiration réelle annuelle dans le du bassin sédimentaire du Nord (FLDAS).....	26
Figure 17 : Cadre topographique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso	27
Figure 18 : Réseau hydrographique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso	28
Figure 19 : Types de sols du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso (BUNASOL)	30
Figure 20 : Répartition des types de sols du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso (BUNASOL)	30
Figure 21: Texture des sols du bassin sédimentaire du Nord selon la FAO (HWSD).....	31
Figure 22 : Répartition des Textures de sols dans le bassin sédimentaire du Nord selon la FAO	31
Figure 23 : Carte de l'occupation des sols du bassin sédimentaire du Nord	32
Figure 24 : Répartition des types d'occupation de sol sur le bassin sédimentaire du Nord	32
Figure 25 : Extension du bassin sédimentaire de Taoudéni.....	33
Figure 26 : Log stratigraphique du bassin de Taoudéni (d'après Trompette, 1973).....	35
Figure 27 : Carte géologique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso	37
Figure 28 : Pourcentages de répartition géographique (superficies à l'affleurement) des formations du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso.....	41
Figure 29 : Carte des unités hydrogéologiques du bassin sédimentaire du Nord	42
Figure 30 : Localisation des ouvrages recensés dans le bassin sédimentaire du Nord.....	45

Figure 31 : Localisation du forage Christine dans le bassin sédimentaire du Nord	46
Figure 32 : Plan de localisation des ouvrages du site Christine	47
Figure 33 : Coupe technique du forage Christine 2.....	48
Figure 34 : Coupe lithologique du forage Christine 2.....	49
Figure 35 : Courbe caractéristique du forage Christine 2 selon les essais de 1996	50
Figure 36 : Courbes de descente et de remontée au FC3 (37m) lors de l'essai longue durée au FC2 (source : J. Zambelongo)	51
Figure 37 : Courbe caractéristique du forage Christine 2 selon l'essai de 2012 (adapté de CACI/CERTI)	52
Figure 38 : Géométrie des aquifères : valeurs moyennes des paramètres par unité hydrogéologique.....	57
Figure 39 : Distribution spatiale des profondeurs des forages du bassin sédimentaire du Nord.....	57
Figure 40 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération du bassin sédimentaire du Nord	58
Figure 41 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération saturée du bassin sédimentaire du Nord	58
Figure 42 : Profondeurs moyennes du niveau de nappe par unité hydrogéologique	60
Figure 43 : Distribution spatiale des profondeurs de niveau statique du bassin sédimentaire du Nord	61
Figure 44 : Classification des débits de l'aquifère de Firgoun.....	62
Figure 45 : Classification des débits de l'aquifère de Béli	63
Figure 46 : Classification des débits de l'aquifère d'Irma	64
Figure 47 : Classification des débits de l'aquifère de Sarnyéré.....	65
Figure 48 : Classification des débits de l'aquifère de Massi.....	65
Figure 49 : Débits moyens observés dans chaque formation aquifère.....	66
Figure 50 : Classes de débits par unité hydrogéologique	66
Figure 51 : Distribution spatiale des débits du bassin sédimentaire du Nord	67
Figure 52 : Localisation des piézomètres du bassin sédimentaire du Nord.....	69
Figure 53 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Akoff SE3, et de la pluviométrie mensuelle	70
Figure 54 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Akoff SE4, et de la pluviométrie mensuelle	71
Figure 55 : Chroniques du niveau statique dans les piézomètres du site de Tin-Akoff et courbe de tendance polynomiale, et pluviométrie annuelle	72
Figure 56 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Arkachen SE4, et de la pluviométrie mensuelle	73
Figure 57 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Arkachen SE5, et de la pluviométrie mensuelle	74
Figure 58 : Chroniques du niveau statique dans les piézomètres du site de Tin-Arkachen et courbe de tendance polynomiale, et pluviométrie annuelle	75

Figure 59 : Chroniques du niveau statique dans les piézomètres du site de Tin-Arkachen : tentative d'inversion des données de 2018	76
Figure 60 : Température des eaux souterraines des ouvrages OMES	77
Figure 61 : Distribution spatiale de la température des eaux souterraines du bassin sédimentaire du Nord	77
Figure 62 : pH des ouvrages OMES	78
Figure 63 : Distribution spatiale du pH du bassin sédimentaire du Nord	78
Figure 64 : Conductivité électrique des ouvrages OMES	79
Figure 65 : Distribution spatiale de la conductivité électrique du bassin sédimentaire du Nord.....	79
Figure 66 : Diagramme de Piper pour la zone du forage Christine et de Tin Akoff (source : CACI/CERTI, 2012)	80
Figure 67 : Répartition spatiale de la recharge annuelle selon FLDAS dans le sédimentaire Nord	82
Figure 68 : Répartition spatiale de la recharge annuelle selon Penman-FAO dans le sédimentaire Nord	82
Figure 69 : Chroniques des valeurs annuelles de recharge et de précipitation sur le bassin sédimentaire du Nord (période 1991-2020).....	83
Figure 70 : Infiltration globale depuis la surface du sol (reconstitution du stock en eau du sol + recharge vers la nappe) calculée selon la méthode Penman-FAO (années P10, P50, P90).....	84
Figure 71 : Évolution de la recharge annuelle à partir du site de Tin-Akoff.....	85
Figure 72 : Distribution mensuelle de la recharge moyenne calculée à partir des fluctuations piézométriques du site de Tin-Arkoff.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1 : Population du bassin sédimentaire du Nord par portion de commune (source : RGPH 2019)	16
Tableau 2 : Statistiques de pluviométrie du bassin sédimentaire du Nord	21
Tableau 3 : Lithologie des formations sédimentaires de la bordure Sud du bassin du Gourma (Mali et Burkina Faso)	36
Tableau 4 : Capitalisation des bases de données.....	44
Tableau 5 : Caractéristiques des essais de pompage du forage Christine 2 menés en 1996.....	50
Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques du forage Christine 2.....	51
Tableau 7 : Données de l'essai de pompage par palier de 2012.....	51
Tableau 8 : Synthèse des débits testés sur le site Christine.....	52
Tableau 9 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun	53
Tableau 10 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Béli.....	54
Tableau 11 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma	54
Tableau 12 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré	55
Tableau 13 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Massi	56
Tableau 14 : synthèse des paramètres de géométrie du bassin sédimentaire du Nord	56
Tableau 15 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun.....	59
Tableau 16 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Béli	59
Tableau 17 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma.....	59
Tableau 18 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré.....	59
Tableau 19 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Massi.....	60
Tableau 20 : Synthèse des profondeurs de nappe dans le bassin sédimentaire du Nord	60
Tableau 21 : Classification des transmissivités selon CIEH.....	61
Tableau 22 : Classification des débits selon CIEH.....	62
Tableau 23 : Classification des débits spécifiques selon CIEH.....	62
Tableau 24 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun.....	62
Tableau 25 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Béli	63
Tableau 26 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma.....	63
Tableau 27 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré.....	64
Tableau 28 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Massi.....	65
Tableau 29 : Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères du bassin sédimentaire du Nord	68
Tableau 30 : Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques du site « Christine »	68

Tableau 31 . Caractéristiques des piézomètres du bassin sédimentaire du Nord	69
Tableau 32 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Akoff SE3.....	70
Tableau 33 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Akoff SE4.....	71
Tableau 34 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Arkachen SE4	73
Tableau 35 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Arkachen SE3	74
Tableau 36 : Paramètres physiques des eaux du bassin sédimentaire du Nord selon des données OMES	76
Tableau 37 : Synthèse des évaluations de recharge par approche bilantaire sur le bassin sédimentaire du Nord (période 1991-2020).....	83
Tableau 38 : Statistiques de la recharge du site de Tin-Akoff.....	85
Tableau 39 : Estimation de la demande en eau pour la consommation humaine	88
Tableau 40 : Estimation des réserves totales en eau souterraine du bassin sédimentaire du Nord (Mm ³ = million de mètres cubes).....	89
Tableau 41 : Estimation des réserves (facilement) exploitables en eau souterraine du bassin sédimentaire du Nord (Mm ³ : million de mètres cubes)	90
Tableau 42 : Réserves en eau renouvelables du bassin sédimentaire du Nord (Mm ³ : millions de mètres cubes)	91

Liste des abréviations

AEP	Approvisionnement en Eau Potable
ANAM	Agence Nationale de la Météorologie
AUFC	Association des Usagers du Forage Christine
BF	Burkina Faso
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso
BUNASOLS	Bureau National des Sols
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data
CIEH	Comité Inter-Etat de l'Equipeement Hydraulique
CIRAD	Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
Coeff Emm	Coefficient d'Emmagasinement
CPCS	Commission de Pédologie et des Cartographie des Sols
CV	Coefficient de variation
CVP	Cubature des Variations Piézométriques
CT	Continental Terminal
DEIE	Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
DREA	Direction Régional de l'Eau et Assainissement
FLDAS	Famine Land Data Assimilation System
INERA	Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
Max	Maximum
Min	Minimum
NIB	Niveaux Inférieurs du Buem (Faciès plissé)
NS	Niveau Statique
OMES	Ouvrages de Mobilisation des Eaux Souterraines
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
ONPF	Office Nationale des Puits et Forages
ORSTOM	Organisation pour la Recherche Scientifique et Terrestre d'Outre-Mer
PAEA	Programme d'Approvisionnement en Eau et Assainissement
RPN	Réseau Piézométrique National

A. INTRODUCTION ET CADRE DE L'INTERVENTION

A.1. Contexte général

Le Burkina Faso est un pays sahélien enclavé dont les ressources en eau sont déficitaires. Ce déficit résulte de conditions climatiques extrêmes et d'une grande variabilité, auxquelles s'ajoutent une expansion démographique importante et une croissance économique peu maîtrisée. Les réalités liées au changement climatique contribuent à accentuer ce déficit en eau, causant de graves pénuries puisque l'eau intervient dans pratiquement tous les secteurs de développement du pays.

Ces défis majeurs ont entraîné l'établissement de politiques nationales, qui se matérialisent actuellement par 5 programmes majeurs :

- le Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable 2016-2030 (PN-AEP). Il s'agit d'un programme sectoriel qui fait suite au Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement à l'horizon 2015 (PN-AEPA, 2006-2015) ;
- le Programme National D'Assainissement des Eaux Usées et Excréta 2016-2030 (PN-AEUE). Il s'agit également d'un programme sectoriel basé sur les recommandations du PN-AEPA ;
- le Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau 2016-2030 (PN-GIRE). Ce programme fait suite au Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau du Burkina Faso (PA-GIRE) qui couvrait la période 2003-2015. Le PAGIRE matérialisait la *"Loi d'orientation relative à la gestion de l'Eau"*, adoptée en février 2001 ;
- le Programme National des Aménagements Hydrauliques à l'horizon 2030 (PN-AH) ;
- le Programme de Pilotage et de Soutien (PPS).

Un constat communément partagé par les différents Programmes et Plans d'Action est que la prise de décision fondée sur des données factuelles, y compris pour l'allocation des ressources en eau entre les autres usagers et l'approvisionnement en eau, est entravée par une connaissance insuffisante et surtout peu fiable de la quantité des ressources en eau et de leur localisation, particulièrement au niveau des eaux souterraines.

Le PN-AEP, au travers de son objectif OO1-A2, souligne que « *La connaissance du potentiel des ressources utilisables pour l'eau potable sera améliorée* » (MEA, 2016a) tandis que le PN-GIRE avance deux actions « *Action 5 – Développement du SNIEAU* » et « *Action 6 – Amélioration des connaissances sur les ressources en eau* » pour palier à la problématique (MEA, 2016b). C'est la même préoccupation qui avait également conduit à l'institutionnalisation, par Décret, de la fourniture d'informations sur les travaux de réalisation et de réhabilitation des ouvrages hydrauliques (Procédure IOTA, BKF, 2005).

Or, il est certain que « *on ne peut bien gérer que ce que l'on connaît bien. Tout cadre de gestion intégrée des ressources en eau doit prioritairement se fonder sur l'évaluation et le suivi de ces ressources, en quantité et en qualité* » (BM, 2017).

C'est face à cette situation que le Gouvernement du Burkina Faso a mis en place, avec l'appui de la Banque Mondiale, le **Programme d'Approvisionnement en Eau et d'Assainissement (PAEA)**.

A.2. Le PAEA et l'étude SEVERE

L'objectif général du PAEA est donc d'améliorer l'accès aux services d'approvisionnement en eau potable et d'assainissement dans des zones ciblées du Burkina Faso. Le PAEA comprend **quatre Domaines de Résultats (DR)**, à savoir :

- DR 1. Amélioration de l'accès à l'eau ;
- DR 2. Amélioration de l'accès à l'assainissement
- **DR 3. Amélioration de l'accès à des informations fiables sur les ressources en eau ;**
- DR T. Renforcement du capital humain.

Afin d'accompagner les agences d'exécution du DR3 - à savoir le SP-GIRE et la DGRE du MEA - dans la réalisation de leurs principales activités, le PAEA a prévu une étude visant à « **la synthèse et la valorisation des études sur les ressources en eau au Burkina** » (ci-après SEVERE). L'objectif de la SEVERE est i) de capitaliser les résultats des études et travaux menés dans le cadre du DR3 du PAEA ainsi que les résultats des études et travaux existants, et ii) de réaliser, sur cette base, différentes activités visant à concourir à une meilleure évaluation des ressources en eau, au développement d'un modèle de gestion des aquifères, à la réalisation de cartes hydrogéologiques et au développement d'outils pour une meilleure gestion des données (SHER-ARTELIA, 2021).

L'étude SEVERE base son approche méthodologique en 4 axes génériques. Parmi ceux-ci, l'axe 1 travaille spécifiquement sur **l'amélioration des connaissances sur les ressources en eau, pour une exploitation renforcée et durable**. Cet axe vise à atteindre 3 résultats :

- R1.1 - Les données sur l'évaluation et la caractérisation des ressources en eau sont collectées et capitalisées ;
- R1.2 - La caractérisation géologique et hydrogéologique des systèmes aquifères des bassins sédimentaires de l'Ouest, du Nord et de l'Est du Burkina Faso est réalisée ;
- R1.3 - Les ressources en eau de surface et souterraine du Burkina Faso sont évaluées et un bilan global des ressources en eau est établi.

Le logigramme dans lequel s'inscrit l'axe 1 est repris à la figure suivante.

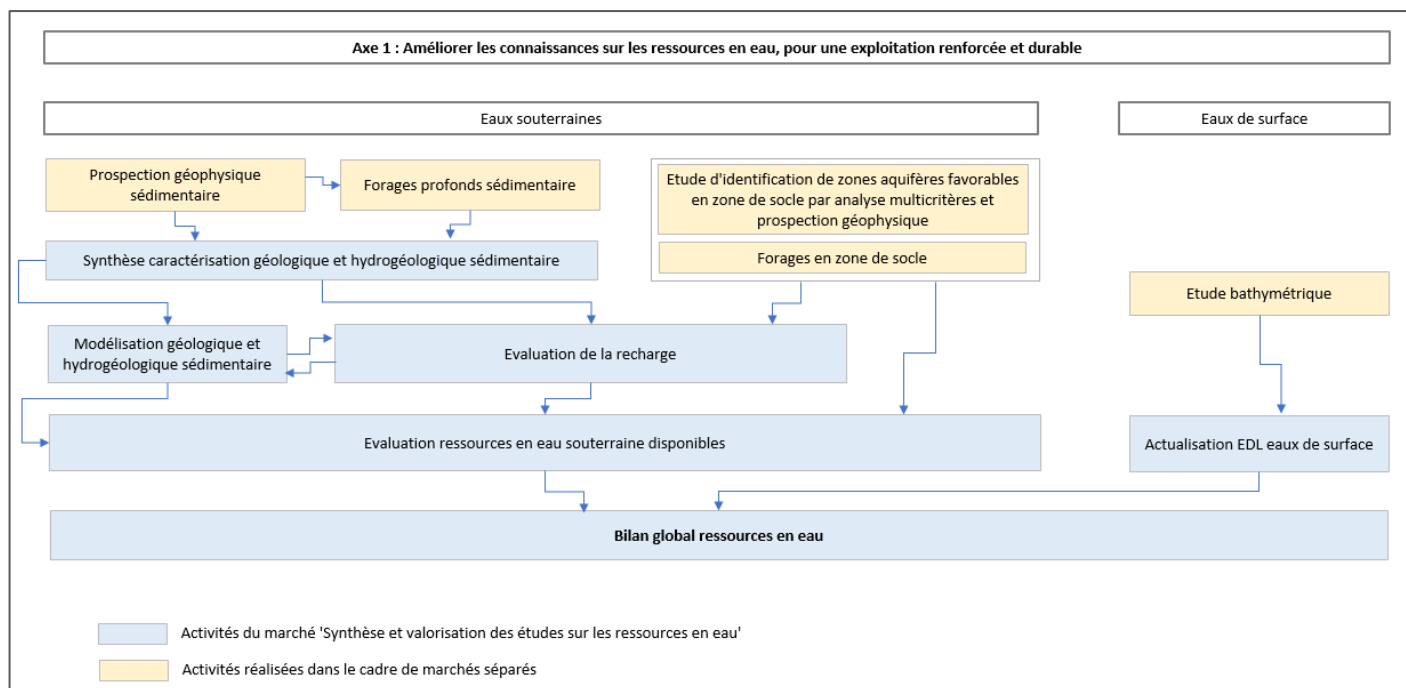


Figure 1 : Logigramme de l'axe 1

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du résultat R1.2 « **La caractérisation géologique et hydrogéologique des systèmes aquifères des bassins sédimentaires de l'Ouest, du Nord et de l'Est du Burkina Faso est réalisée** ».

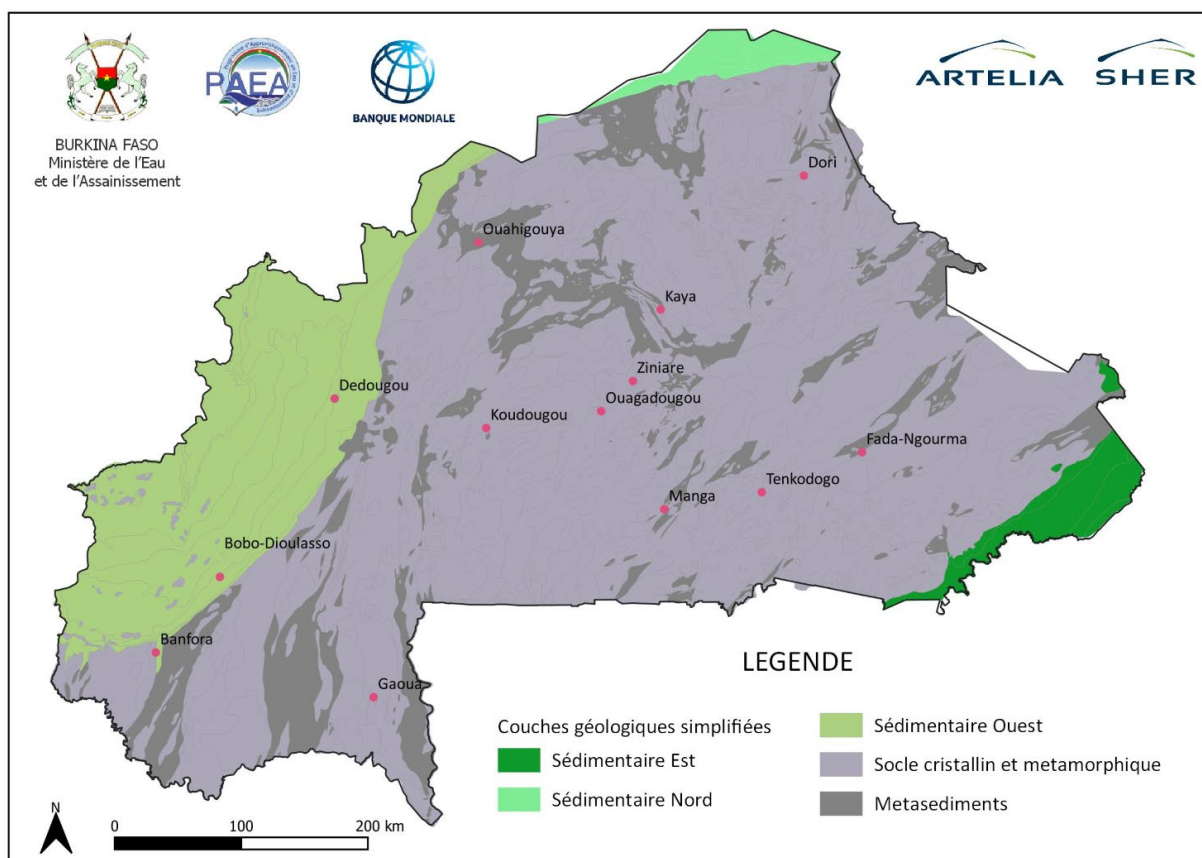
B. OBJECTIF DE L'ÉTUDE

L'objectif de l'étude est de réaliser une caractérisation géologique et hydrogéologique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso, en vue d'évaluer les potentialités aquifères de cette zone.

C. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE

Le Burkina Faso compte 3 zones sédimentaires distinctes : la zone Nord, la zone Est et la zone Ouest.

Les zones sédimentaires du Nord et de l'Est font l'objet d'une méthodologie de caractérisation similaire basée sur la capitalisation des données existantes, tandis que la zone sédimentaire de l'Ouest est traitée distinctement compte tenu des investigations de terrain qui y sont menées et du niveau supérieur d'information disponible.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ARTELIA/SHER 2022

Figure 2 : Zones sédimentaires du Burkina Faso

C.1. Zones sédimentaires du Nord et de l'Est

Compte tenu du contexte sécuritaire défavorable rencontré durant la mise en œuvre du PAEA, les investigations de terrain initialement prévues dans le cadre du PAEA au niveau du sédimentaire du Nord et du sédimentaire de l'Est (réalisation de forages de reconnaissance profonds) n'ont pu être mises en œuvre. L'étude vise donc à capitaliser les données et informations existantes sur la zone du sédimentaire du Nord

(et de l'Est pour le rapport distinct correspondant), en vue de réaliser une synthèse du contexte géologique et hydrogéologique de cette zone.

Les principales étapes de l'étude sont les suivantes, en particulier pour la zone du sédimentaire du Nord qui fait l'objet du présent rapport :

- (1) Collecte des données et documents existants en relation avec les objectifs de l'étude, auprès des structures détentrices (DGRE, SP-GIRE, DGEP, ONEA, BUMIGEB, AEL, DREA, ANAM, université Joseph Ki Zerbo, 2iE, bureaux d'études, etc...);
- (2) Collecte et revue documentaire relative à la littérature disponible (rapports techniques, publications, études scientifiques dont thèses et TFE, etc.) se rapportant à la bordure sud du bassin de Taoudeni (Mali et Burkina Faso) ;
- (3) Capitalisation des documents collectés (dont extraction de données utiles) ;
- (4) Traitement, validation et mise en format des données collectées ;
- (5) Alimentation des bases de données BD-OMES et BD-SEVR, constitution d'un SIG du sédimentaire du Nord, et alimentation de la base documentaire de l'étude SEVERE ;
- (6) Exploitation des données pour l'élaboration de la caractérisation géologique et hydrogéologique et pour l'évaluation des potentialités aquifères du sédimentaire du Nord ;
- (7) Réalisation de produits cartographiques et rédaction du rapport de synthèse.

Les thématiques abordées, correspondant aux principales sections du présent rapport, se rapportent au cadre administratif et de gestion, au climat et aux paramètres hydro-climatiques, à la topographie et à la géomorphologie, à l'hydrographie et aux bassins versants, aux types de sols, à l'occupation des sols, au contexte géologique, au contexte hydrogéologique, au suivi et à l'évolution temporelle des eaux souterraines, à l'inventaire et à la caractérisation des sources naturelles, à l'évaluation de la recharge des aquifères, à l'exploitation des eaux souterraines, à l'estimation des réserves, et à la synthèse des potentialités des aquifères.

L'approche méthodologique mise en œuvre pour le bassin sédimentaire de l'Est est similaire à celle présentée ci-dessus. Elle fait l'objet d'un rapport distinct présentant dès lors sensiblement la même structure.

Globalement, les données géologiques et hydrogéologiques disponibles sur la zone du sédimentaire du Nord du Burkina Faso (et au Mali en zone frontalière de bordure sud du bassin de Taoudeni) sont relativement limitées. Elles permettent néanmoins l'élaboration d'une synthèse consistante des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la zone, malgré l'absence d'investigations de terrain complémentaires. Elles correspondent principalement à des rapports techniques relatifs à des travaux de forage d'hydraulique rurale, mais également (de manière plus limitée) à des travaux à caractère scientifique (thèses et TFE). On notera également l'exploitation des différents rapports établis pour le compte de l'Agence de l'Eau du Liptako (Etat des lieux, etc.) qui ont pu être collectés et capitalisés.

La collecte des données existantes, entamée dès le début de l'année 2021, s'est poursuivie en plusieurs phases jusqu'en octobre 2022. L'ensemble des données et documents relatifs à la géologie et à l'hydrogéologie du sédimentaire du Nord du Burkina Faso (ainsi que la partie malienne de la bordure de bassin) a pu être collecté et totalement capitalisé.

Toutes les données collectées ont fait l'objet d'un traitement et d'une mise en format harmonisée, avant d'être intégrées aux bases de données BD-OMES et BD-SEVR élaborées dans le cadre de la présente étude. Ces bases de données cartographiques ont ensuite été exploitées pour l'élaboration de la caractérisation

géologique et hydrogéologique du sédimentaire du Nord ainsi que pour l'évaluation de ses potentialités aquifères.

C.2. Zone sédimentaire de l'Ouest

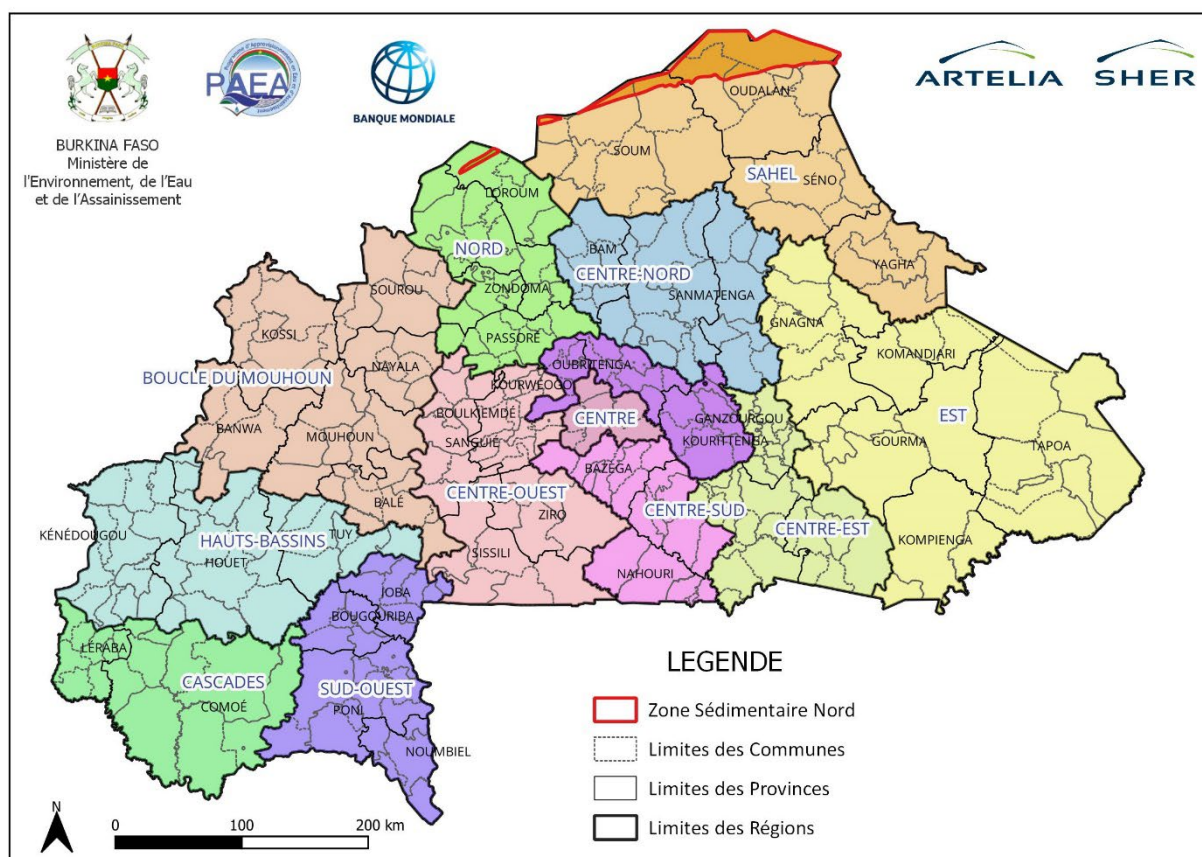
Le bassin sédimentaire de l'Ouest fait l'objet d'une méthodologie distincte et phasée, compte tenu de la mise en œuvre d'investigations de terrain (géophysique et réalisation de forages profonds) menées dans cette zone dans le cadre du PAEA et compte tenu de l'élaboration prévue d'un modèle hydrogéologique dans le cadre de la présente étude.

La caractérisation géologique et hydrogéologique de la zone du sédimentaire de l'Ouest fera donc l'objet d'un rapport distinct.

D. DÉLIMITATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude correspond à la partie du bassin sédimentaire de Taoudéni située au Nord du Burkina Faso. Elle est principalement située dans la région administrative du Sahel. La localisation de la zone d'étude est reprise sur la figure ci-après.

La superficie de la zone d'étude est d'environ 4.000 km², soit environ 1,5 % seulement de la superficie du Burkina Faso.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ARTELIA/SHER 2022

Figure 3 : Localisation du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

E. CADRE ADMINISTRATIF ET DE GESTION

E.1. Régions, provinces, communes et population¹

Sur le plan administratif, le bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso fait partie de la Région du Sahel et celle du Nord. Il couvre environ 8 % de la superficie de la région du Sahel, et moins de 2 % de la région du Nord.

Le bassin sédimentaire du Nord couvre partiellement les provinces de Oudalan (33% de la superficie de la province), de Soum (5% de la superficie de la province) et de Loroum (3% de la superficie de la province).

Sur le plan communal (Tableau 1), il recouvre presque entièrement la commune rurale de Tin-Akoff (7.621 hab. en 2019 dans le bassin). Il s'étend sur la partie nord des communes rurales de Markoye (45 hab. en 2019 dans le bassin), Oursi (557 hab. en 2019 dans le bassin), Déou (7.199 hab. en 2019 dans le bassin), Koutougou (3.586 hab. en 2019 dans le bassin), Nassoumbou (124 hab. en 2019 dans le bassin) et Diguel (507 hab. en 2019 dans le bassin). L'extrême Ouest du bassin traverse la commune rurale de Bahn (1.853 hab. en 2019 dans le bassin).

Tableau 1 : Population du bassin sédimentaire du Nord par portion de commune (source : RGPH 2019)

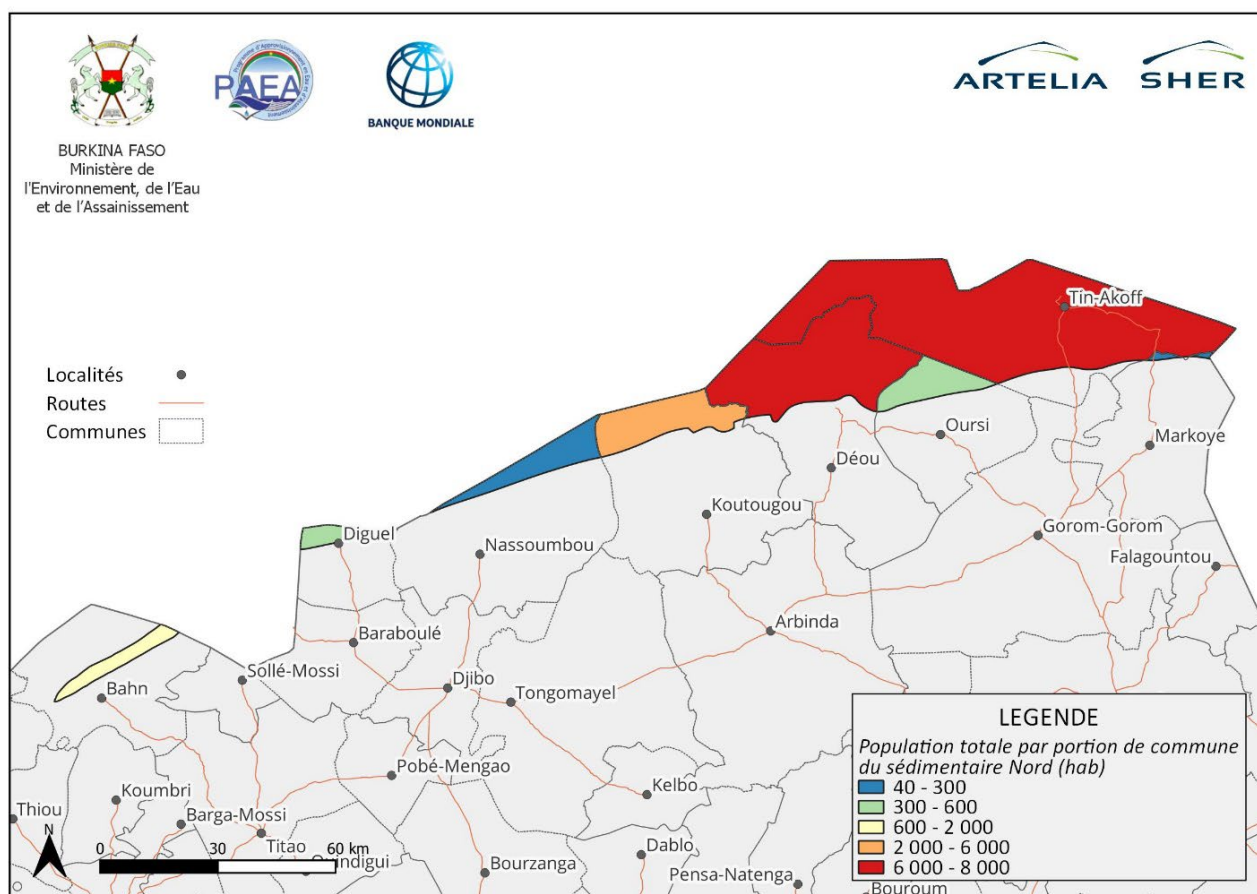
Portion de Commune	Superficie en km ²	Densité de population (hab./km ²)	Population en 2019	Population en 2030	Population en 2050
Tin-Akoff	2.147	3,6	7.621	10.326	17.939
Déou	889	8,1	7.199	9.755	16.946
Markoye	15	3,0	45	62	107
Oursi	197	2,8	557	755	1.311
Koutougou	333	10,8	3.586	4.859	8.441
Nassoumbou	218	0,6	124	168	293
Diguel	65	7,8	507	687	1.193
Bahn	117	15,8	1.853	2.511	4.362
Total	3.981	5,4	21.493	29.122	50.593

La population totale estimée du bassin sédimentaire du Nord en 2019 est d'environ 21.493 habitants, soit 0,1% seulement de la population totale du pays.

Sur base du taux d'accroissement actuel de la population (2,8 %), la population du bassin atteindrait environ 29.000 habitants en 2030, et 50.000 habitants en 2050.

Comme présenté sur la Figure 4, les portions des communes de Tin-Akoff et Déou sur le bassin sédimentaire du Nord sont les plus peuplées, totalisant à elles deux près de 70% de la population totale du bassin.

¹ Source de données relatives à la population : RGPH 2019. Les données relatives aux projections 2030 et 2050 sont établies à partir du taux d'accroissement national actuel (2.8%), et peuvent être significativement influencées par la situation sécuritaire du pays (en particulier dans la zone couverte par la présente étude).



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, RGPH 2019, ARTELIA/SHER 2022

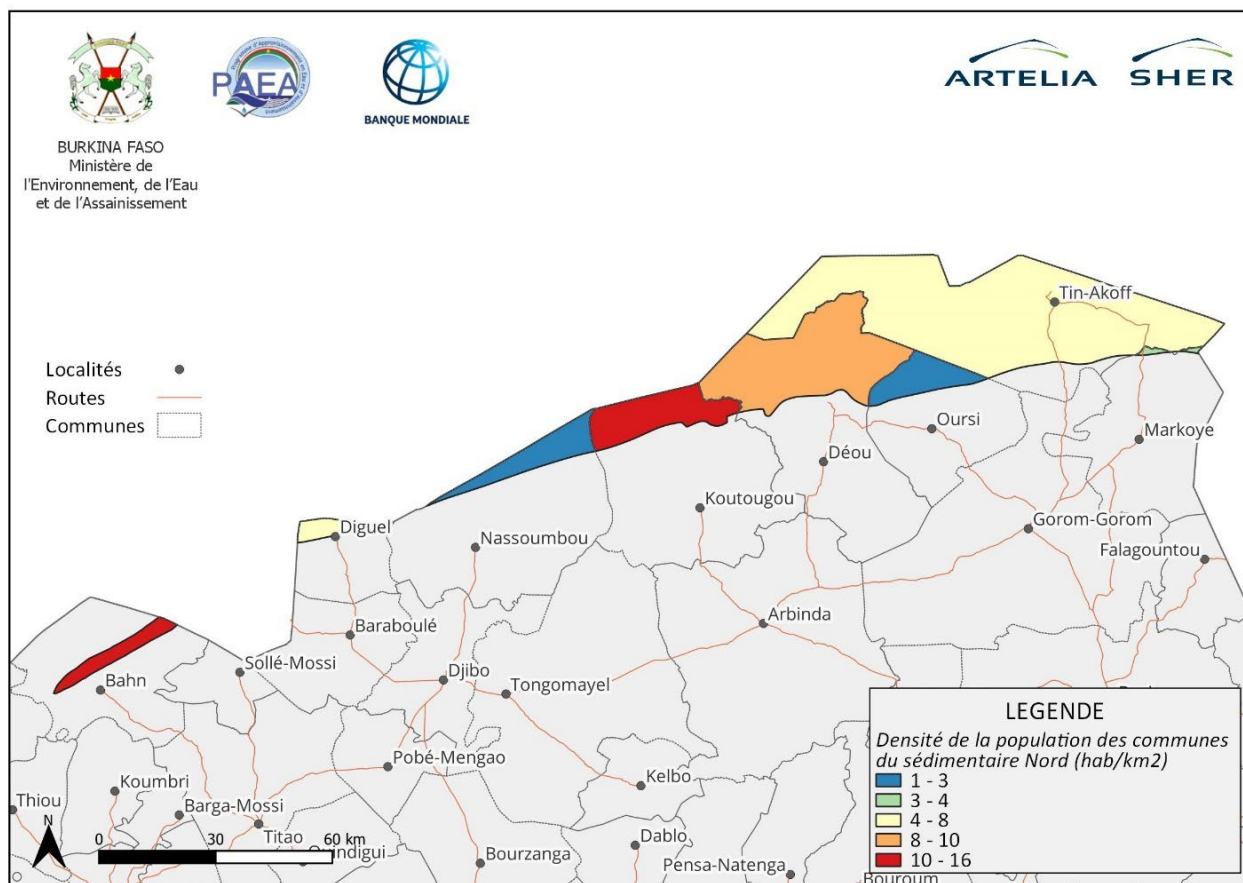
Figure 4 : Population totale (2019) par portion de commune dans le bassin sédimentaire du Nord

La densité moyenne de population du bassin sédimentaire du Nord (2019) est de l'ordre de 5,4 hab./km², la moyenne nationale étant de 75 hab./km². Le bassin sédimentaire du Nord est donc extrêmement peu densément peuplé, la densité étant plus de dix fois inférieure à la moyenne nationale.

Les densités de population les plus élevées (10 à 16 hab./km² seulement) sont rencontrées dans les portions de communes de Bahn et Koutougou (Figure 5).

Aucune localité de plus de 5.000 habitants (2019) n'est située dans le bassin sédimentaire du Nord. Les localités les plus importantes rencontrées à moins de 50 km de la limite du bassin sont Djibo (61.000 hab. en 2019), Titao (48.000 hab. en 2019), Arbinda (45.000 hab. en 2019), Deou (13.000 hab. en 2019), Gorom Gorom (10.000 hab. en 2019), et Markoye (5.600 hab. en 2019).

Le bassin sédimentaire du Nord est donc extrêmement peu densément peuplé, et présente un caractère rural.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, RGPH 2019, ARTELIA/SHER 2022

Figure 5 : Densité de population du bassin sédimentaire du Nord par commune

E.2. Cadre de gestion des ressources en eau : Agences de l'Eau

L'Agence de l'Eau compétente sur le territoire couvert par le bassin sédimentaire du Nord est l'Agence de l'Eau du Liptako (AEL).

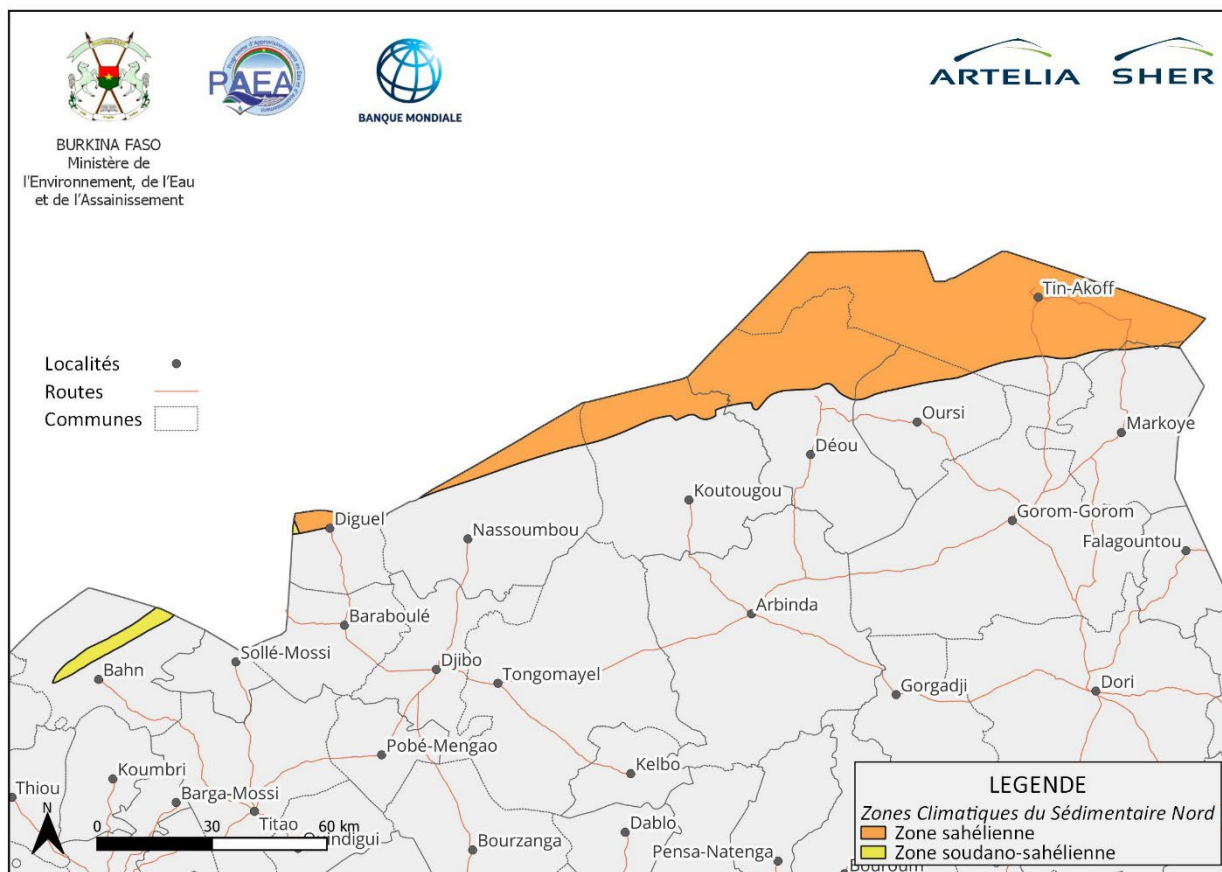
Le bassin sédimentaire du Nord représente moins de 8,5% de la superficie de l'espace de compétence de cette Agence.

F. CLIMAT ET PARAMÈTRES HYDRO-CLIMATIQUES

Le climat du bassin sédimentaire du Nord est un climat de type Sahélien qui couvre les communes de Tin-Akoff, Déou, Markoye, Oursi, Koutougou, Nassoumbou et Diguel, et soudano-sahélien à l'extrême Ouest dans la commune de Banh (Figure 6).

F.1. Source des données climatologiques et exploitation

Les données climatologiques exploitées dans le cadre de la présente étude sont d'une part les données issues des stations climatologiques de l'ANAM, et d'autre part les données climatologiques globales téléchargées et traitées à partir de fournisseurs de données globales spatialisées dont FLDAS, TerraClimate, CHIRPS, WorldClim et FAO Water Portal.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

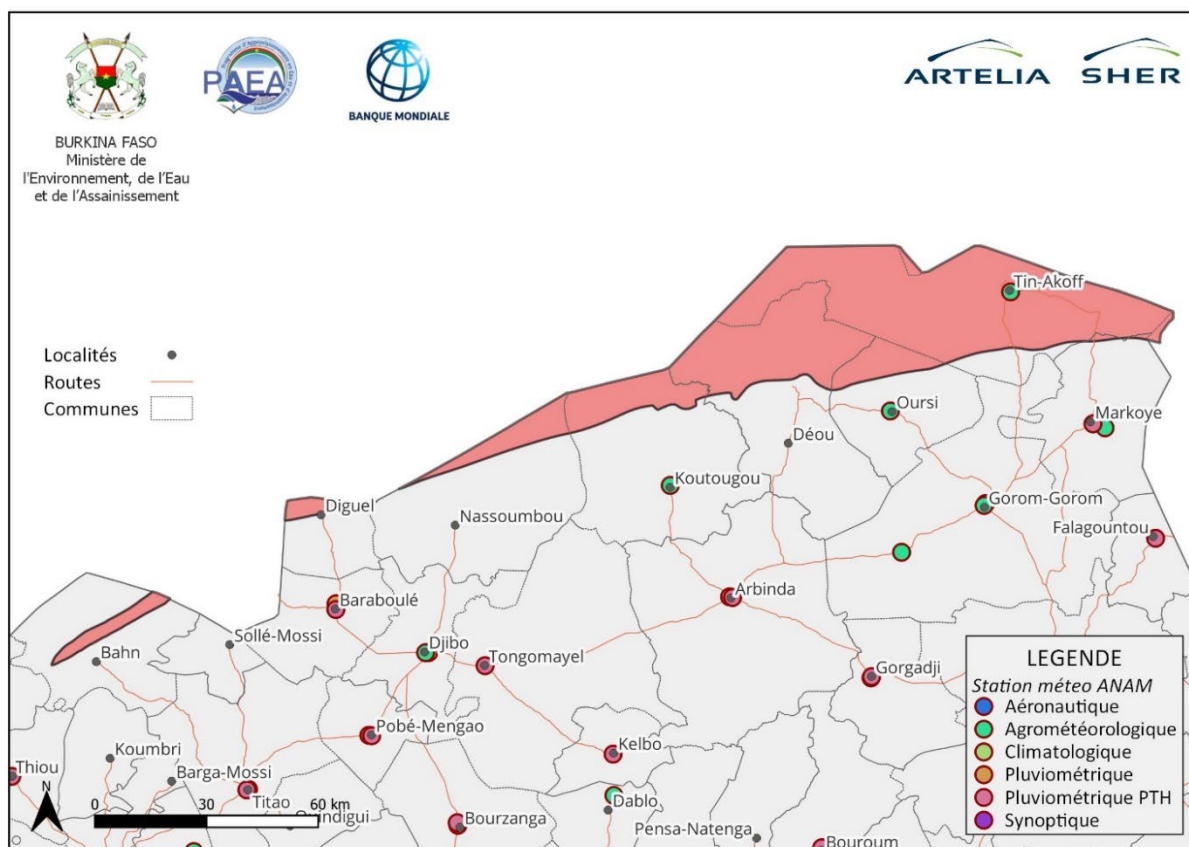
Figure 6 : Zones climatiques du bassin sédimentaire du Nord

F.1.1. Données climatologiques de l'ANAM

La localisation et la typologie des stations climatologiques de l'ANAM, dans et à proximité du bassin sédimentaire du Nord, est reprise sur la Figure 7 ci-après.

Les paramètres climatologiques capitalisés dans le cadre de l'étude sur base des données obtenues de l'ANAM sont La pluie, la pluie maximale, la température maximale, la température minimale, la température moyenne, le vent, l'insolation, l'humidité maximale, l'humidité minimale, l'évaporation bac A, et l'évapotranspiration potentielle.

Les données sont capitalisées au pas de temps mensuel, à partir de l'année 1960.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 7 : Stations climatologiques de l'ANAM

F.1.2. Données climatologiques globales

Les paramètres climatologiques capitalisés à partir des données globales spatialisées (FLDAS, TerraClimate, CHIRPS, WorldClim et FAO Water Portal) sont les précipitations, la température (min-max-moyenne), l'évapotranspiration potentielle, et l'évapotranspiration réelle.

L'utilisation de données globales vise à optimiser la distribution spatiale des valeurs mensuelles pour chaque paramètre étudié, et à disposer de séries temporelles complètement distribuées spatialement et temporellement au pas de temps mensuel sur une période continue (sans lacune temporelle de donnée).

Les données sont capitalisées au pas de temps mensuel, à partir de l'année 1981 (ou ultérieure, selon le paramètre et le fournisseur de données globales).

Les données globales sont traitées par l'intermédiaire de QGIS et de Google Earth Engine (GEE), et sont validées sur base des données de l'ANAM. Les procédures de validation sont décrites dans le rapport portant sur l'évaluation de la recharge par approche bilantaire spatialisée.

F.2. Précipitations

F.2.1. Précipitations annuelles et distribution spatiale

Les précipitations annuelles moyennes sur l'ensemble du bassin sédimentaire du Nord, sur la période 1991-2020, sont de l'ordre de 386,6 mm.

Les valeurs P10 (année sèche), P50 (année médiane) et P90 (année humide) sur la même période 1991-2020 sont respectivement de l'ordre de 292 mm, 379 mm et 476 mm.

Tableau 2 : Statistiques de pluviométrie du bassin sédimentaire du Nord

Pluviométrie moyenne 1991-2020	Pluviométrie P10 1991-2020	Pluviométrie P50 1991-2020	Pluviométrie P90 1991-2020
387	292	379	476

Le graphique repris sur la Figure 8 illustre la chronique des précipitations annuelles du bassin sédimentaire du Nord sur la période 1991-2020.

L'année la plus sèche sur la période est 2004 (267 mm), tandis que la plus humide est 2012 (549 mm).

La courbe de tendance (puissance) indique une augmentation sensible de la pluviométrie sur la période de 30 années considérée.

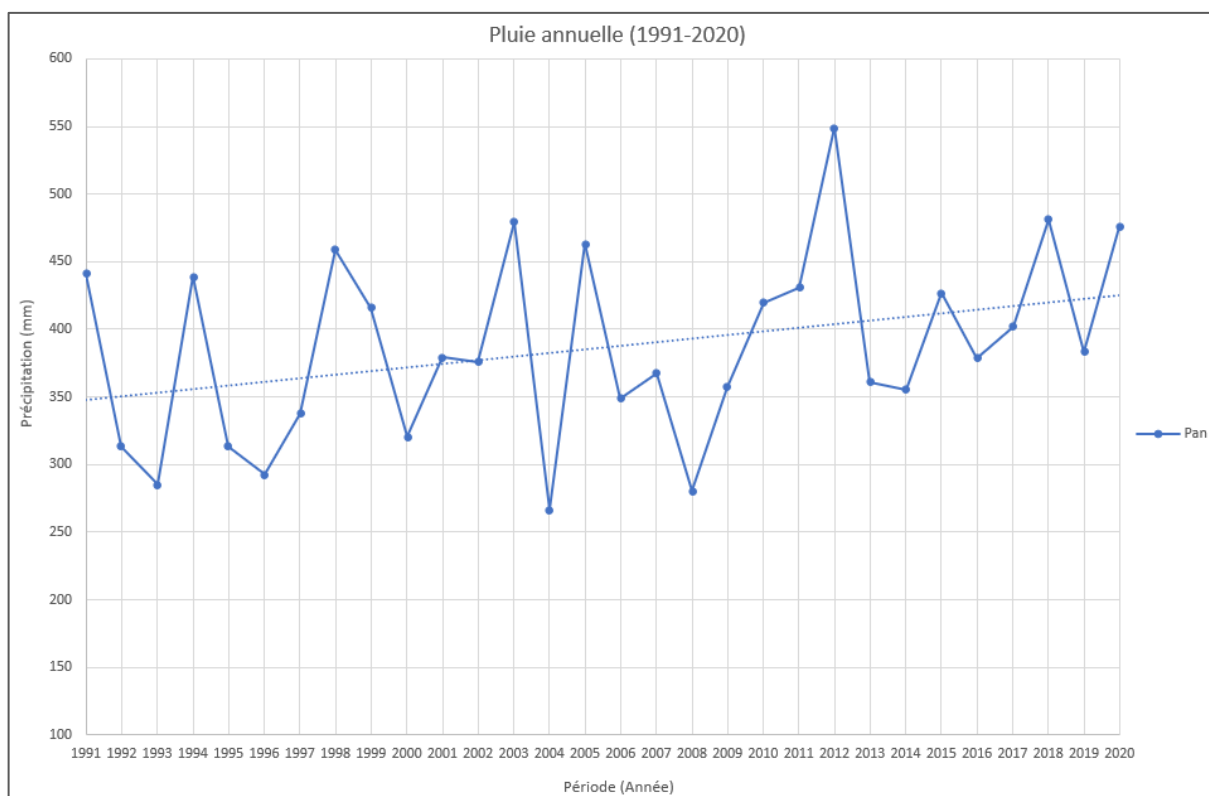
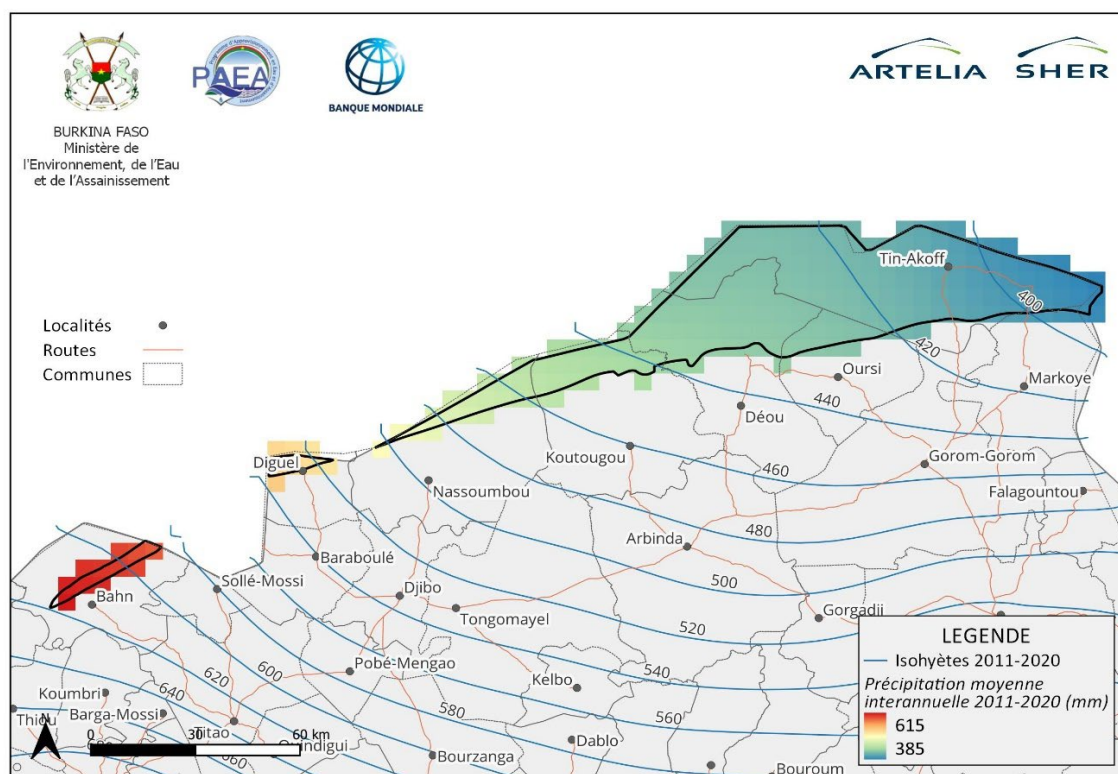
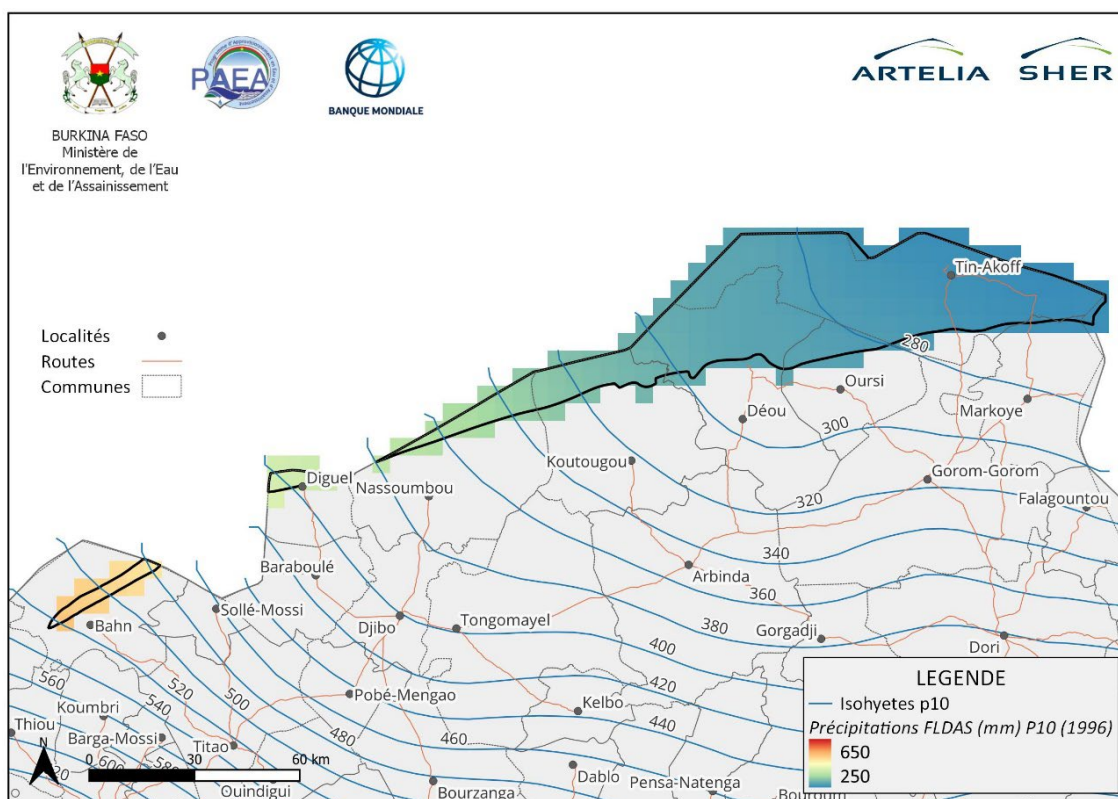


Figure 8 : Chronique 1991-2020 de pluviométrie annuelle et courbe de tendance

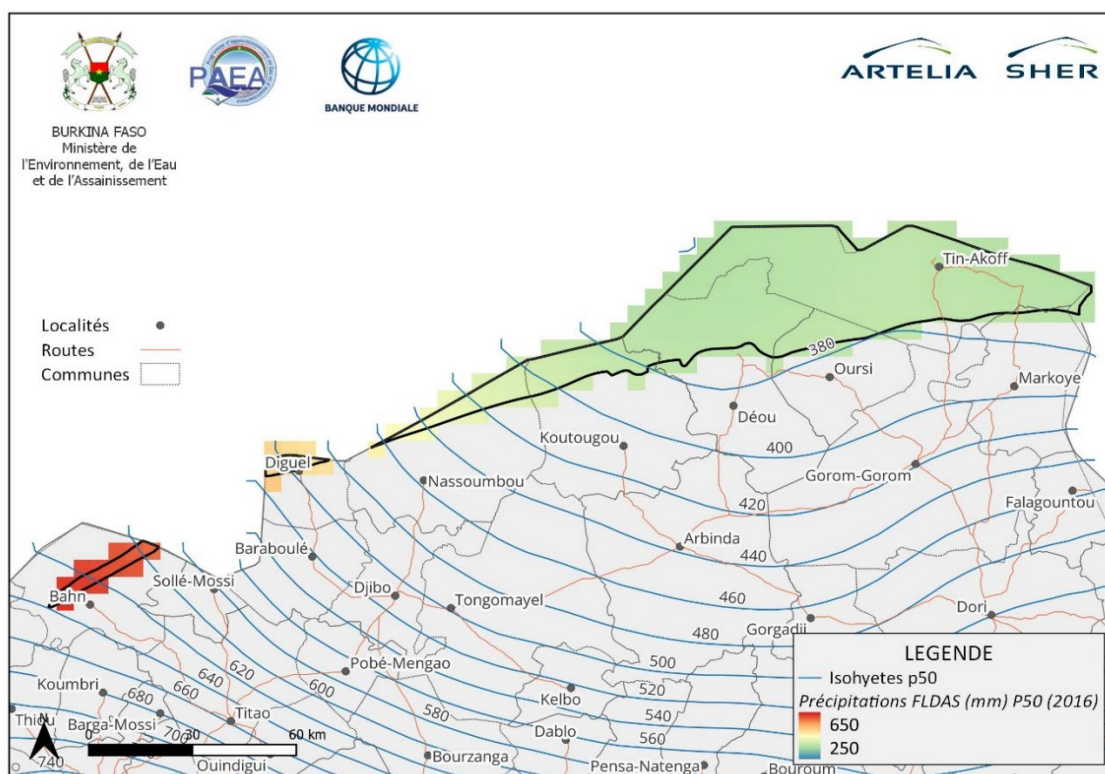
La distribution spatiale des précipitations annuelles est illustrée sur les figures ci-après (Figure 9, Figure 10, Figure 11, et Figure 12), respectivement pour la moyenne annuelle de la période 2011-2020, pour l'année-type sèche P10 (1996), pour l'année-type médiane P50 (2016) et pour l'année-type humide P90 (2020).



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022
 Figure 9 : Distribution spatiale des précipitations moyennes de la période 2011-2020

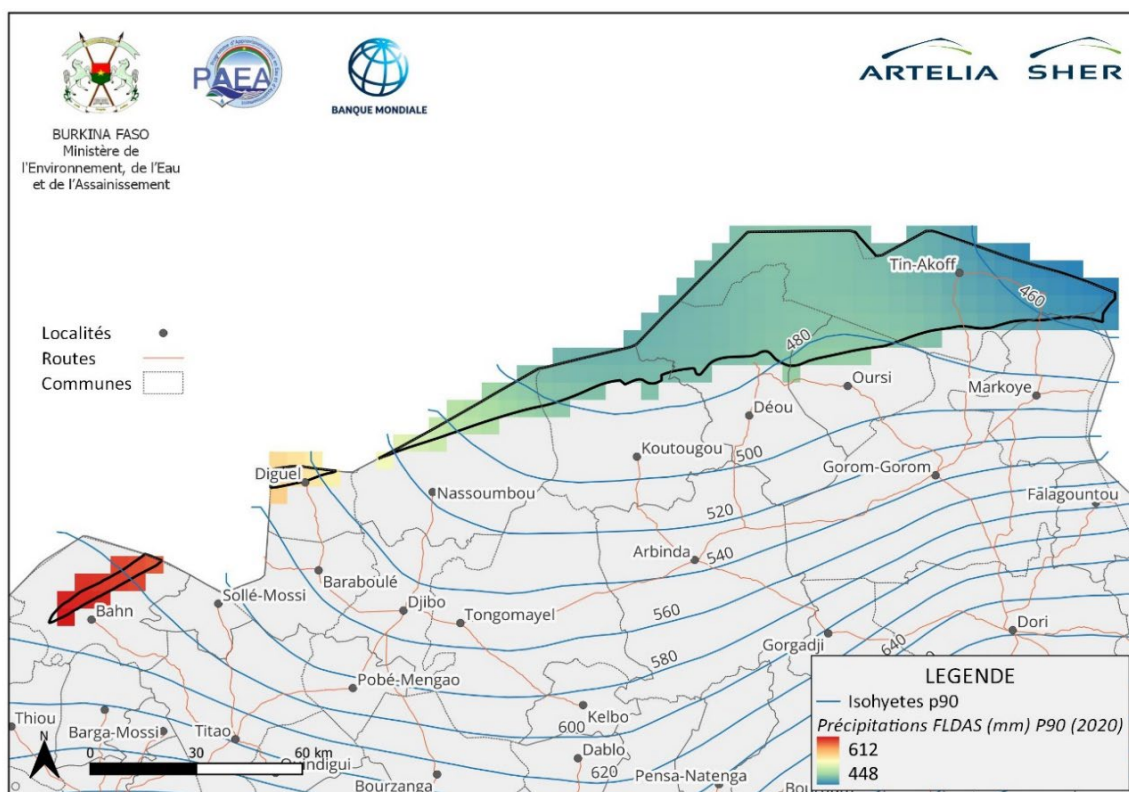


Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022
 Figure 10 : Carte des précipitations année-type P10 du bassin sédimentaire du Nord



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 11 : Carte des précipitations année-type P50 du bassin sédimentaire du Nord

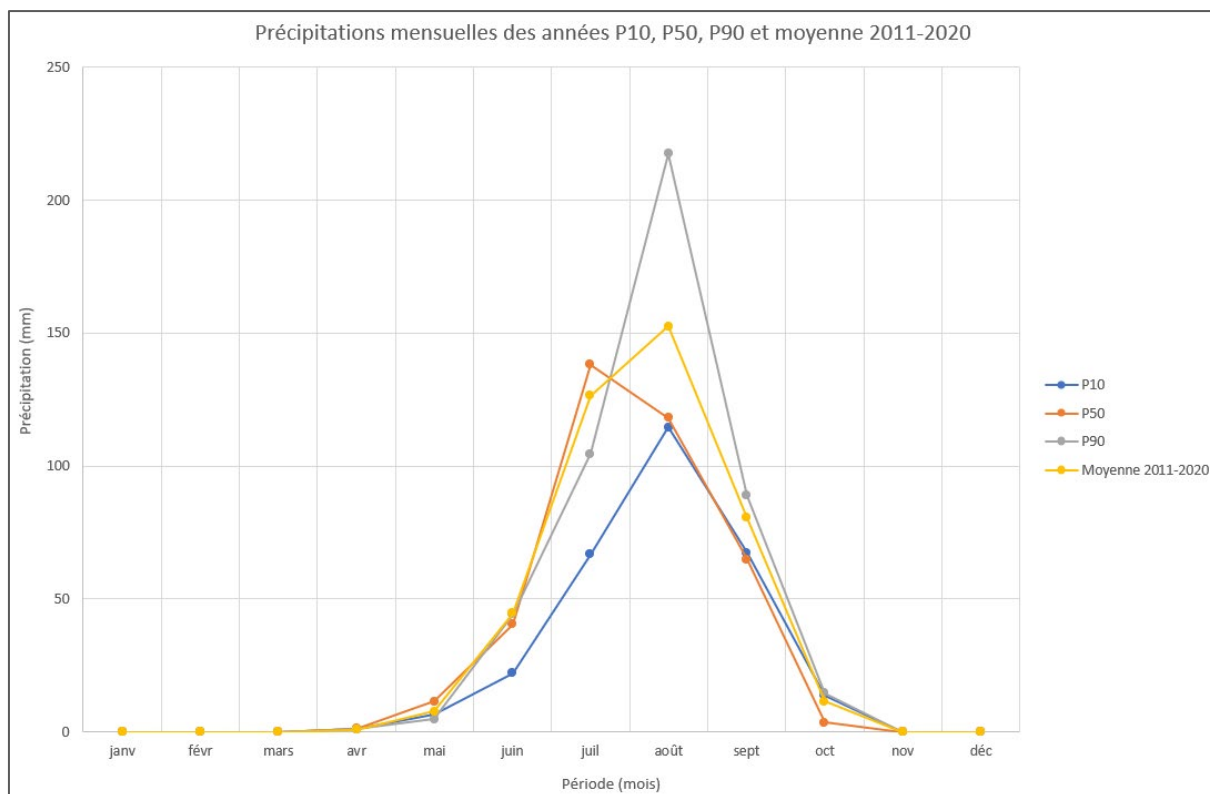


Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 12 : Carte des précipitations année-type P90 du bassin sédimentaire du Nord

F.2.2. Distribution annuelle des précipitations mensuelles

La distribution temporelle des précipitations mensuelles est illustrée sur la Figure 13 ci-après, pour les années moyenne (2011-2020), ainsi que pour les années P10, P50 et P90 de la période 1991-2020 ;



Source de données : ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 13 : Pluviométrie mensuelle (année moyenne, P10, P50, P90)

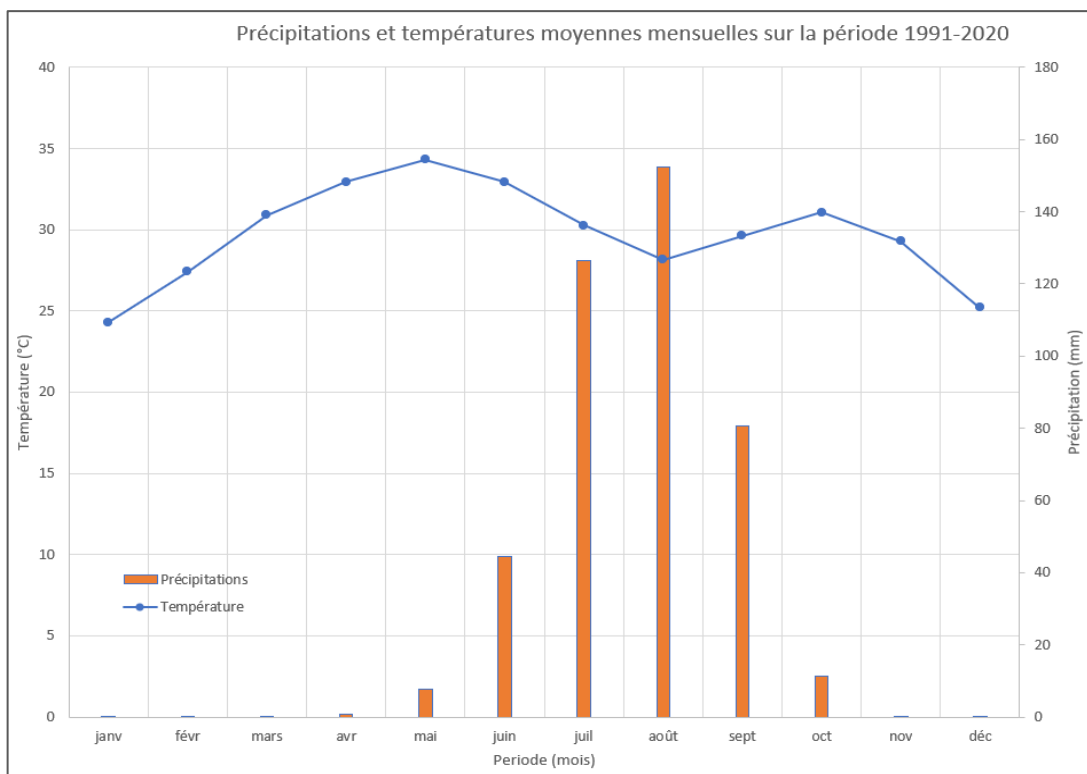
Les précipitations sont réparties du mois de mai au mois d'octobre, avec les valeurs les plus élevées rencontrées au mois d'août.

La valeur moyenne au mois d'août est de 152 mm, avec un maximum de 233 mm observé en août 2012.

F.3. Températures

Les températures mensuelles moyennes de la période 1991-2020 sont comprises entre 24,3°C (Janvier, mois le plus frais) et 34,3°C (Mai, mois le plus chaud). La température moyenne inter-annuelle sur la période est de 29.7°C, tandis que l'écart-type est de 3.1°C.

La Figure 14 ci-dessous illustre les températures mensuelles moyennes sur la période 1991-2020, ainsi que les précipitations annuelles moyennes sur la même période.



Source de données : ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 14 : Températures et précipitations mensuelles moyennes sur la période 1991-2020

F.4.Évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle a été évaluée, dans le cadre de la présente étude, d'une part selon le bilan simplifié de Thornthwaite à partir de valeurs mensuelles d'ETP sur une période de 30 années (1991-2020), et d'autre part à partir de données globales. Parmi les données globales capitalisées, celles de la FAO (FAO WaterPortal) sont particulièrement intéressantes : elles sont basées sur la méthode de calcul de Penman-Monteith faisant intervenir de nombreux paramètres climatiques, et (notamment) sur le développement effectif du couvert végétal rencontré. De surcroît leur résolution spatiale est particulièrement fine (250m).



La Figure 16 ci-après illustre l'évapotranspiration réelle annuelle (FLDAS) de 1991 à 2020. Les valeurs sont comprises entre 245 et 510 mm.



Figure 16 : Évapotranspiration réelle annuelle dans le du bassin sédimentaire du Nord (FLDAS)

F.5. Autres paramètres hydro-climatologiques

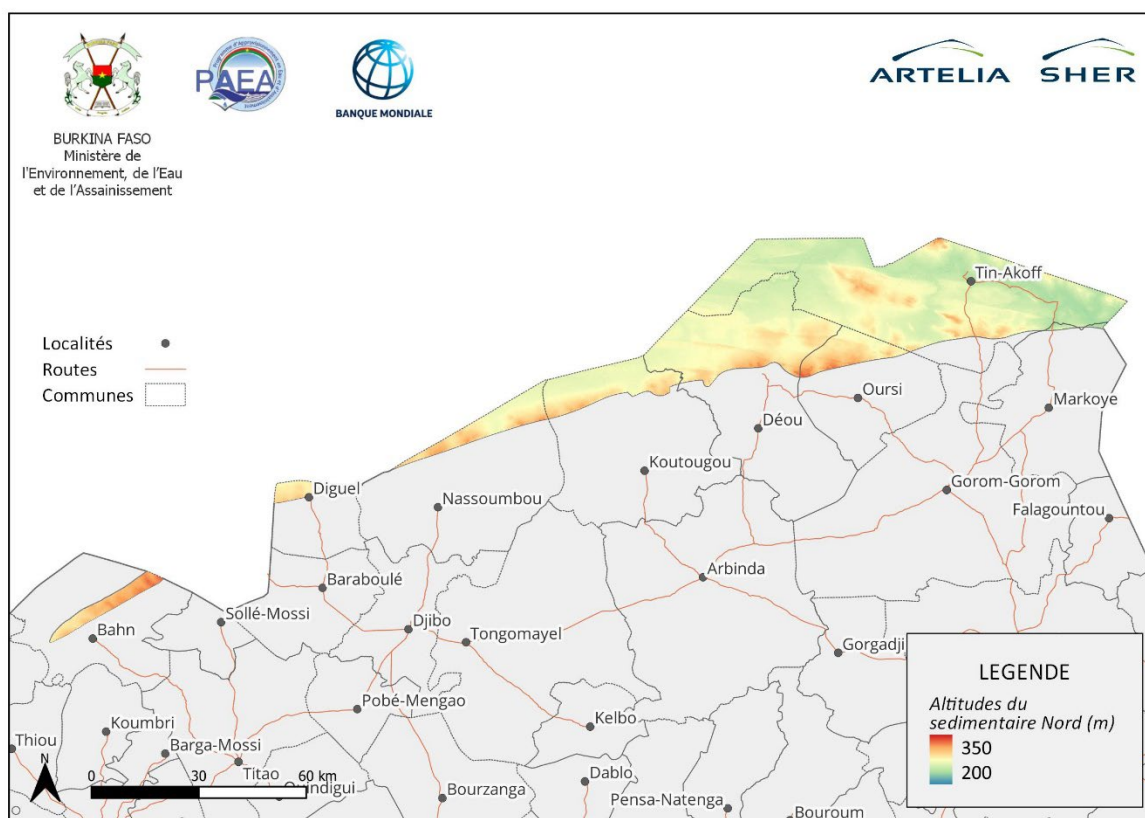
Les autres paramètres hydro-climatologiques importants sont repris dans la section O.2 relative à l'évaluation de la recharge par approche bilantaire.

G. TOPOGRAPHIE ET GÉOMORPHOLOGIE

La topographie du bassin sédimentaire du Nord est à l'image de celle de la région du Sahel. Il est essentiellement composé de plateaux faiblement ondulés et d'une pénéplaine. À l'exception de quelques reliefs bien individualisés, le bassin sédimentaire du Nord s'étale en une plaine uniforme dont l'altitude varie entre 250 et 340 m résultants de la superposition de 2 ou 3 systèmes dunaires partiellement érodés (Figure 17).

Cette zone se caractérise, contrairement à d'autres zones du Burkina Faso, par l'apparition des cordons dunaires et la raréfaction des reliques de l'ancienne pénéplaine latéritique. Ainsi, on distingue une succession de longs cordons dunaires orientés Est-Ouest qui forme un paysage dunaire.

Les quelques lambeaux encore existants de cette couverture dominent la plaine d'une cinquantaine de mètres. Ils possèdent une cuirasse ferrugineuse épaisse de 3 à 10 mètres coiffant un puissant niveau d'altération (lithomarge). Les formations sédimentaires clastiques constituent généralement, avec les niveaux gréseux et quartzitiques, des chaînes de collines remarquables, mais peu élevées (de 20 à 30 m).



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, NASA SRTM, ARTELIA/SHER 2022

Figure 17 : Cadre topographique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

H. HYDROGRAPHIE ET BASSINS VERSANTS

La presque totalité du réseau hydrographique du bassin sédimentaire du Nord (97 %) fait partie du sous-bassin national du Béli (Figure 18), faisant partie du bassin national du Niger. La partie restante, à l'extrême Ouest, est située dans le sous-bassin du Mouhoun Supérieur.

Le Béli est le cours d'eau le plus septentrional du pays (435,4 km) qui prend sa source dans la région de Djibo et au Mali avant de se jeter dans le fleuve Niger. Il est alimenté dans la partie Ouest par les affluents Belbindri, Djayèl Ara Damazougria (tous à Koutougou, Arbinda) ; Kalembago, Kaouling, Kossogo (à Pobé Mengao et Baraboulé) ; Tôboulé (commune de Nassoumbou), Balourél (commune de Djibo), et dans la partie Est par les affluents Adiora, Sabélèmbalo à Tin-Akoff.

Le sous-bassin est jalonné par de nombreuses mares plus ou moins pérennes dont les plus importantes sont : Oursi, Tin-Akoff, Yomboli, Kissi, Darkoye, Soum. Il est constaté une longue période d'assèchement pendant la saison sèche et une remontée des eaux avec des crues plus ou moins importantes pendant la saison des pluies.

L'action combinée du régime des cours d'eau, de l'ensablement et de la sédimentation entraînent une diminution du drainage de la zone et la disparition de certains marigots. Sous l'effet des cordons dunaires, certains sous-bassins tels que ceux liés aux mares d'Oursi et de Markoye ont tendance à s'individualiser.

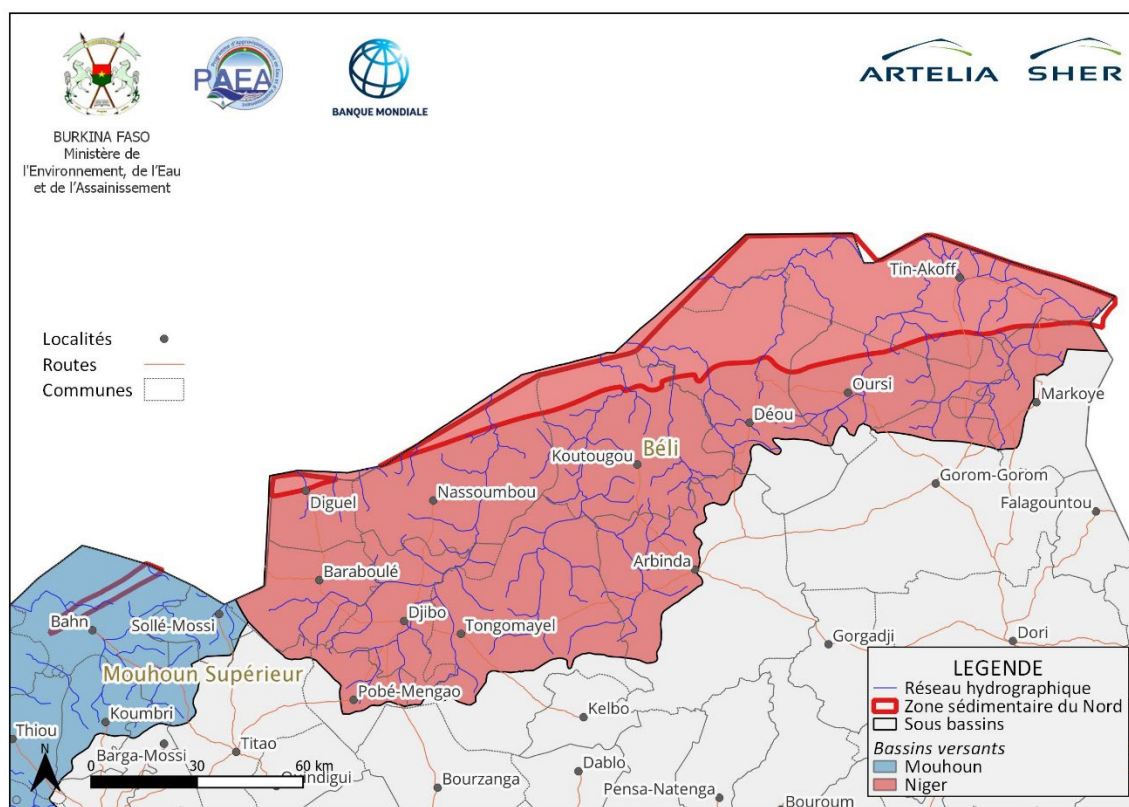


Figure 18 : Réseau hydrographique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

I. TYPES DE SOLS

Les types de sols rencontrés dans le bassin sédimentaire du Nord, et leurs caractéristiques texturales, sont décrits ci-après respectivement selon la typologie cartographique du BUNASOL et selon la classification HWSD (Harmonized World Soil Database) de la FAO.

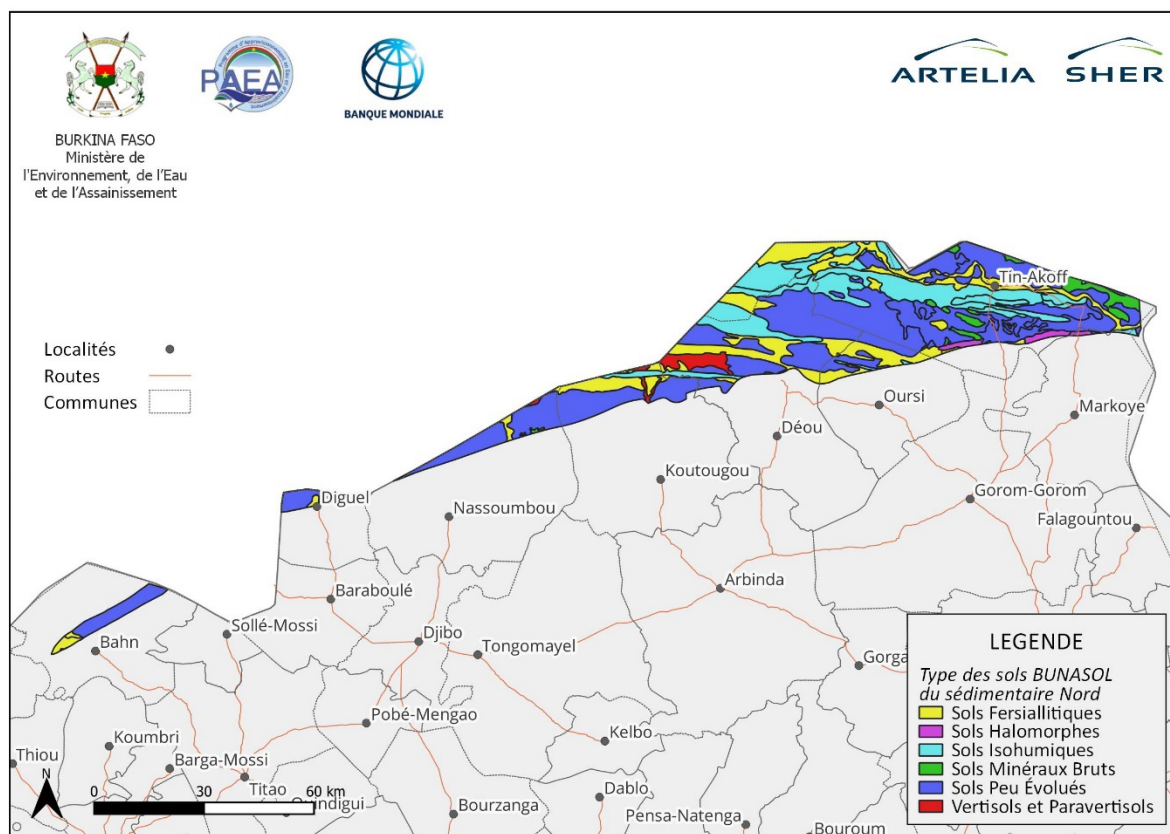
I.1. Carte des sols du BUNASOL

Les études déjà réalisées au Burkina Faso, notamment par l'ORSTOM (actuel IRD), l'IRAT (actuel CIRAD) la SOGREAH, la SOGETHA, l'INERA et le BUNASOLS, distinguent huit classes de sols dominants selon la terminologie CPCS (1967). Le bassin sédimentaire du Nord se caractérise par six (6) types de sols (Figure 19) dont plus de 50 % de l'ensemble est représenté par des sols peu évolués d'origine non climatique (Figure 20).

Les six types de sols rencontrés dans le bassin sédimentaire du Nord sont les suivants :

- Les sols peu évolués d'origine non climatique (52,4 %)
- Les sols isohumiques à complexe saturé (21,5 %)
- Les sols ferrugineux tropicaux (20 %)
- Les sols Minéraux Bruts d'origine non climatique (3 %)
- Les vertisols et paravertisols topomorphes (2,1 %)
- Les sols halomorphes à structure dégradée (1,1 %)

Les sols sont marqués de l'empreinte profonde des dunes de sable que l'on rencontre partout dans le bassin. L'érosion des sols principalement due aux fortes intensités pluviométriques peut atteindre une moyenne de 10 ha/an. Les paysages sahéliens sont de vastes étendues de sols nus, bruns à rouges barrés de temps à autre par des cordons dunaires portant une savane arbustive.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, BUNASOL, ARTELIA/SHER 2022

Figure 19 : Types de sols du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso (BUNASOL)

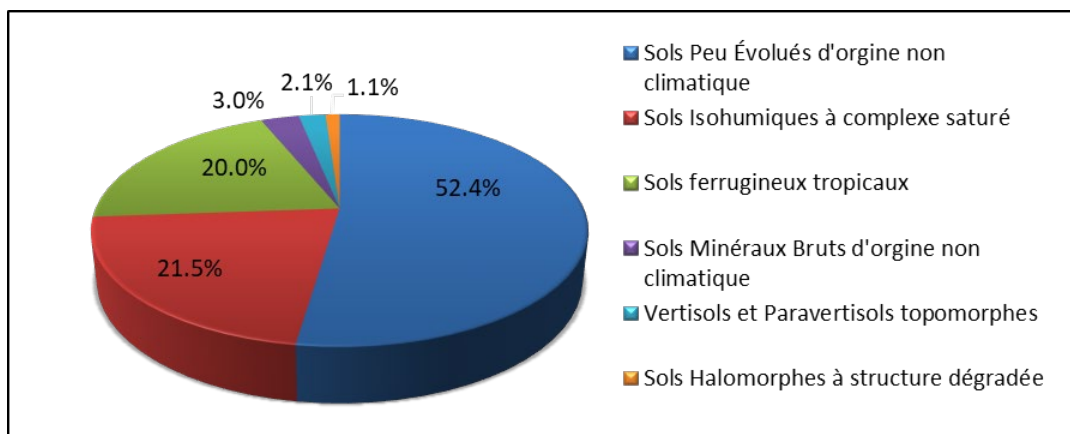
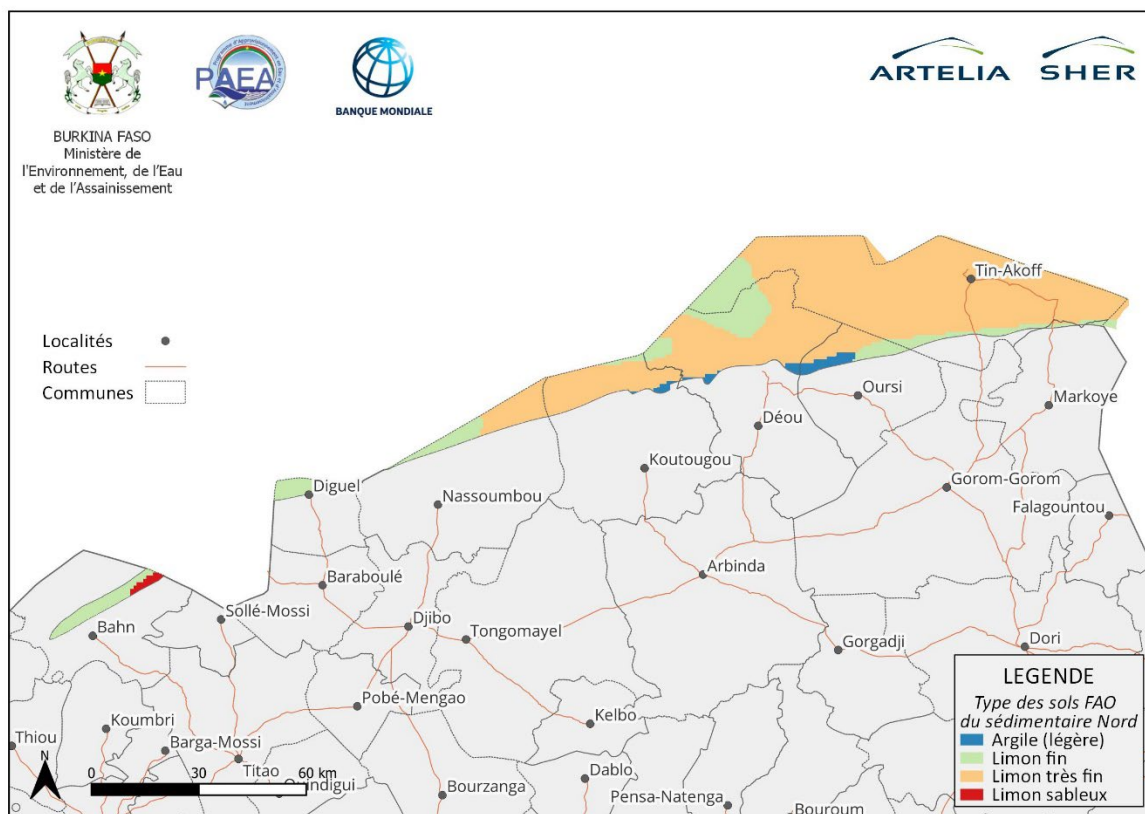


Figure 20 : Répartition des types de sols du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso (BUNASOL)

I.2. Typologie texturale de la FAO (HWSD)

La texture des sols est étroitement liée au contexte géologique de la zone. Elle est à dominance limoneuse et on distingue quatre types de sols selon la classification de la FAO (Figure 21). Les sols limoneux très fins sont dominants à 79,5% (Figure 22) et couvrent presque l'entièreté de la partie Nord, Est et centrale de la zone. Les sols limoneux fins (18,3%) se déploient dans la partie Sud-Ouest et sud-est sur les formations de Firgoun et de Béli et de façon isolée au Nord.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, FAO, ARTELIA/SHER 2022

Figure 21: Texture des sols du bassin sédimentaire du Nord selon la FAO (HWSD)

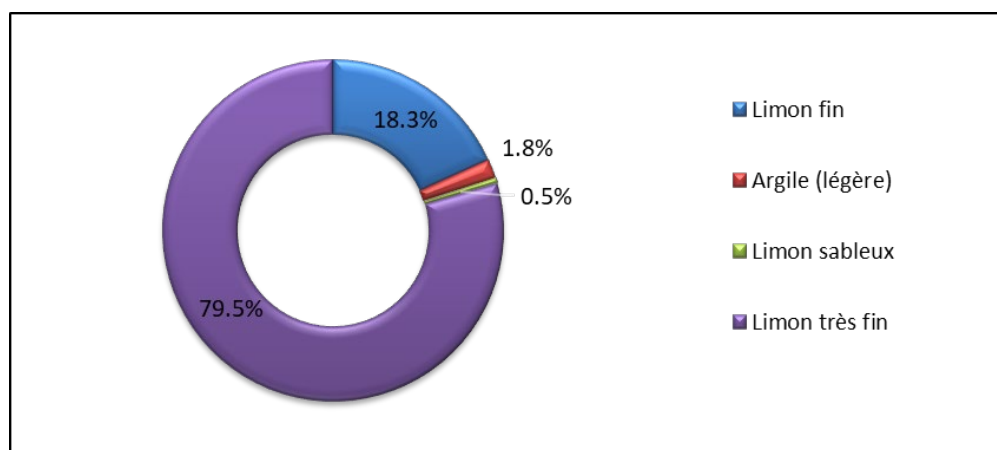


Figure 22 : Répartition des Textures de sols dans le bassin sédimentaire du Nord selon la FAO

La classification HWSD de la FAO permet de discriminer, pour chaque classe de sol, les valeurs de Réserve Utilisable maximale (RU_{max}) et de Réserve Facilement Utilisable maximale (RFU_{max}). Ces valeurs sont utilisées pour l'approche bilantaire spatialisée selon la méthode simplifiée de Thornthwaite.

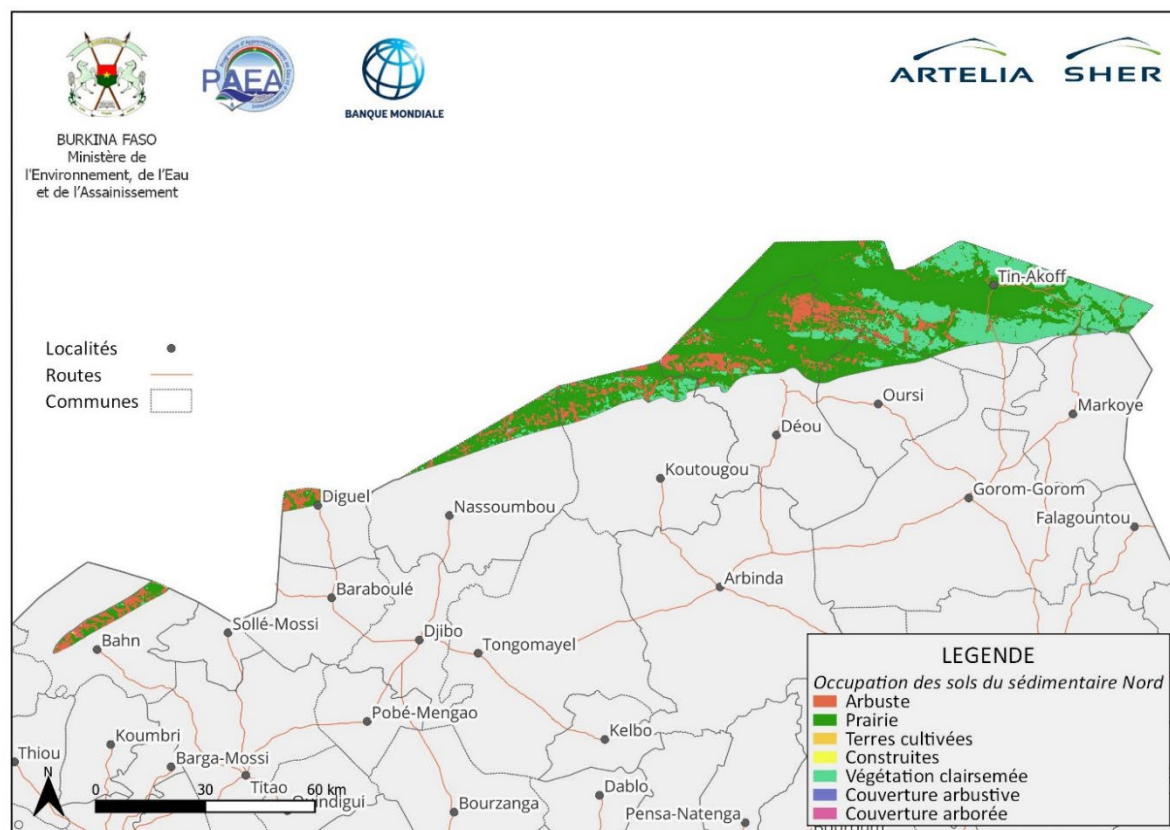
J. OCCUPATION DES SOLS

La carte d'occupation des sols du bassin sédimentaire du Nord est reprise sur la Figure 23 ci-après.

Près des deux tiers du bassin sédimentaire du Nord (64 %) sont des zones de prairie réparties sur toute l'étendue de la superficie à l'exception de la partie Est où la végétation clairsemée (23 %) est plus

représentative. Les zones construites représentent à peine 0,01 % de la superficie du bassin, et se situent au niveau des principales agglomérations.

Les superficies cultivées, pluviales ou sous irrigation, représentent moins de 0,1 % de la superficie de la zone.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, COPERNICUS 2020, ARTELIA/SHER 2022

Figure 23 : Carte de l'occupation des sols du bassin sédimentaire du Nord

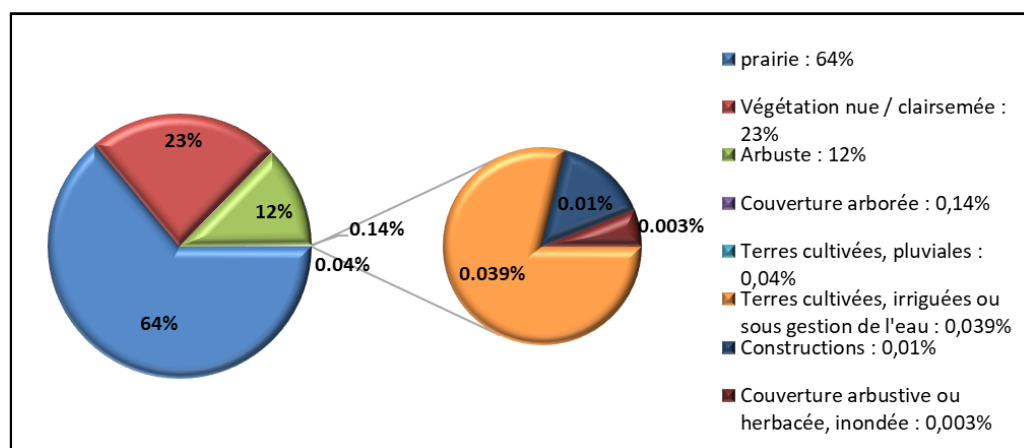


Figure 24 : Répartition des types d'occupation de sol sur le bassin sédimentaire du Nord

K. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

K.1. Extension et configuration géologique générale du bassin sédimentaire de Taoudeni

K.1.1. Localisation et extension du bassin

Le bassin sédimentaire de Taoudeni couvre une superficie totale d'environ 1,5 million km². Il s'étend principalement au Mali et en Mauritanie (totalisant plus de 80% de la superficie du bassin) et dans les deux Guinées et déborde légèrement en Algérie, Burkina Faso, Sénégal et Sierra Leone. La localisation et l'étendue du bassin est reprise sur la Figure 25 ci-après.



Figure 25 : Extension du bassin sédimentaire de Taoudeni

Les parties du bassin de Taoudeni situées au Burkina Faso (zones sédimentaires du Nord et de l'Ouest du Burkina Faso) ne représentent que 3% de la superficie totale du bassin de Taoudeni.

K.1.2. Configuration géologique générale du bassin

Le bassin de Taoudéni constitue le plus vaste bassin sédimentaire précambrien supérieur et paléozoïque d'Afrique. Sa structure est simple dans l'ensemble : les terrains les plus récents affleurent vers son centre ensablé et les pendages centripètes excèdent rarement 2°.

Au Nord et au Sud, on le voit reposer en discordance majeure sur le socle Précambrien moyen et inférieur de la dorsale Réguibat et de la dorsale de Léo. À l'Ouest, il est bordé par la chaîne calédonno-hercynienne des Mauritanides, au contact de laquelle il se plisse et se fracture selon une bande étroite. Au Sud-Ouest, sa partie supérieure recouvre en discordance la chaîne des Rokelides. Enfin à l'Est, sa partie inférieure se plisse en direction de la chaîne pharusienne, ces deux dernières chaînes étant rattachées à l'orogénèse pan-africaine.

Sa période active de subsidence s'est poursuivie jusqu'au milieu du paléozoïque, où s'est produite l'orogénèse hercynienne et où il s'est trouvé exondé. Il renferme près de 6.000 m de sédiments du

précambrien terminal et du paléozoïque. Il est çà et là recouvert de fins dépôts continentaux du mésozoïque-cénozoïque, comprenant notamment des dunes du quaternaire et des systèmes lacustres.

Les grandes lignes de la géologie du bassin de Taoudéni ont été établies durant la période 1945-1960 par la Direction fédérale des mines et de la géologie (D.F.M.G.) et le Bureau minier de la France d'Outre-mer (BUMIFOM), par le Bureau de Recherche du Pétrole (B.R.P.) et par quelques géologues isolés comme Th. Monod de l'Institut Français d'Afrique Noire (I.F.A.N). Après 1960, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.), les géologues universitaires et des compagnies pétrolières comme l'AGIP et la TEXACO ont le plus souvent effectué des études de détail sur des zones restreintes.

K.1.3. Lithostratigraphie générale du bassin

Le bassin de Taoudéni à l'Ouest et Nord-Ouest, et le bassin du Gourma au nord, constituent la couverture sédimentaire néoprotérozoïque à phanérozoïque qui recouvre une grande partie du craton Ouest-africain et qui, latéralement, est partiellement impliquée dans les chaînes bordières panafricaines ou hercyniennes (Dahomeyides, chaîne du Gourma et chaîne Pharusienne à l'Est, Rokelides, Bassarides et Mauritanides à l'Ouest).

La stratigraphie des deux bassins n'est bien connue que sur leurs bordures dont les dépôts ont cependant pu être corrélés grâce au caractère régional des discontinuités sédimentaires, aux similitudes de faciès, aux rares données paléontologiques et enfin aux données géochronologiques (Deynoux, 1983; Bertrand-Sarfati et al., 1987; Affaton, 1980). Il est généralement admis que la sédimentation s'est étalée dans le temps depuis le début du Néoprotérozoïque (environ 1000 Ma), pour ce qui est identifié en surface, et probablement davantage en profondeur, jusqu'au Carbonifère (environ 300 Ma) dans le bassin de Taoudéni. Elle est généralement caractérisée par des dépôts marins de plate-forme épicontinentale, littoraux ou marins peu profonds, avec de rares intercalations de dépôts continentaux notamment glaciaires (Deynoux, 1980, 1983 ; Miningou, 2006 ; Miningou et al., 2011). Les principales périodes d'émersion sont soulignées par des discordances de ravinement, localement angulaires, qui permettent de subdiviser la couverture en quatre grands ensembles (Trompette, 1973, 1983 ; Affaton, 1980 ; Deynoux, 1983; Bertrand-Sarfati et al., 1991).

Actuellement, la stratigraphie reprise en Figure 26, proposée par Trompette (1973), sert de coupe type pour l'ensemble du bassin.

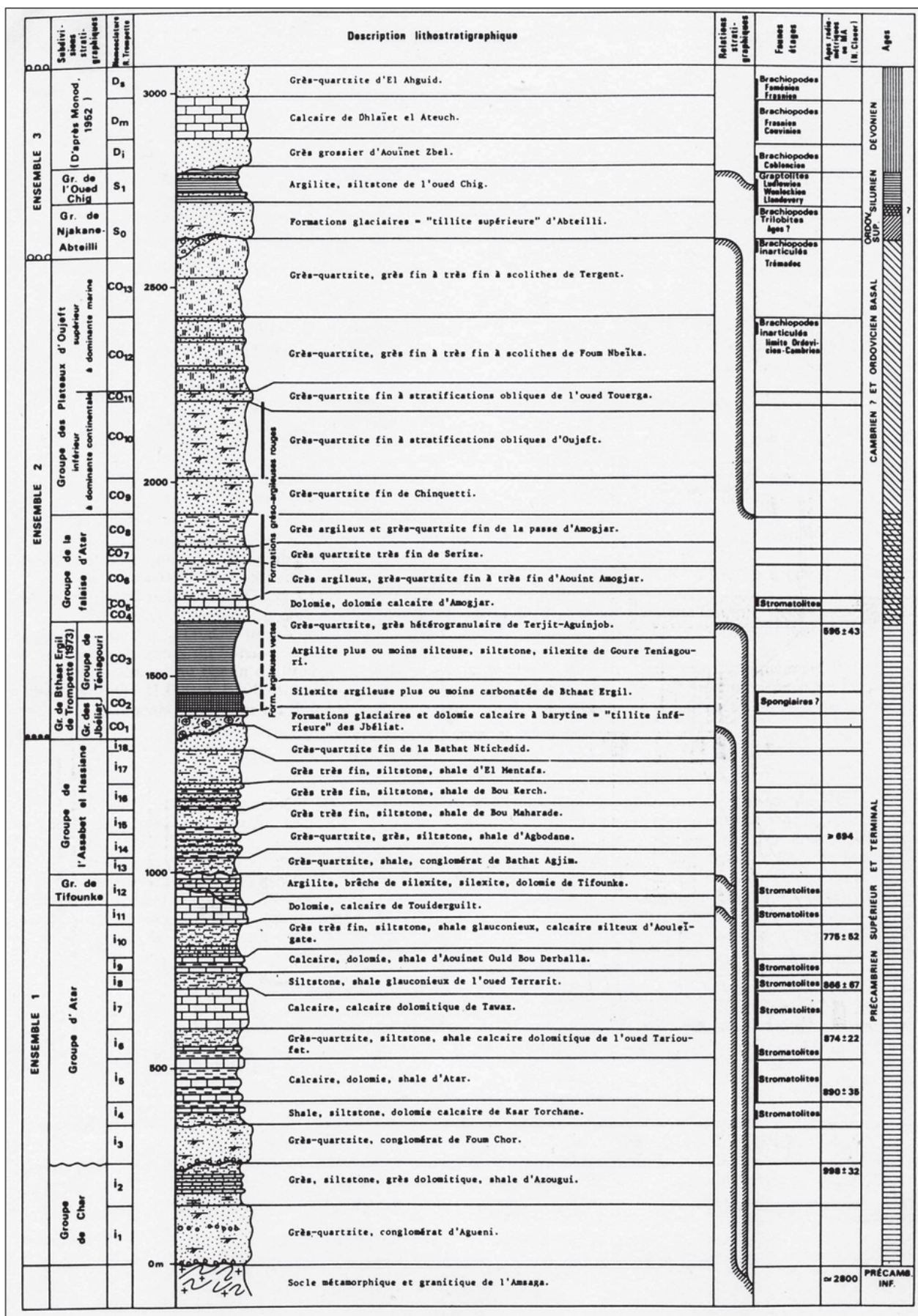


Figure 26 : Log stratigraphique du bassin de Taoudéni (d'après Trompette, 1973)

K.2. Contexte géologique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

Dans la partie Nord du Burkina, les formations sédimentaires appartiennent au domaine subsident du Gourma, faisant partie du bassin de Taoudeni. La lithostratigraphie du bassin du Gourma correspond à la partie située à l'Est du vaste bassin de Taoudéni qui a eu une évolution spécifique.

Les formations sédimentaires du bassin sédimentaire du Gourma reposent en discordance angulaire et stratigraphique sur le socle métamorphique et plutonique tectonisé du Paléoprotérozoïque.

Le Tableau 3 ci-après (adapté de Castaing et al 2003 et de Koussoubé 2010) reprend la lithologie des formations sédimentaires rencontrées au Mali et au Burkina Faso dans le bassin du Gourma.

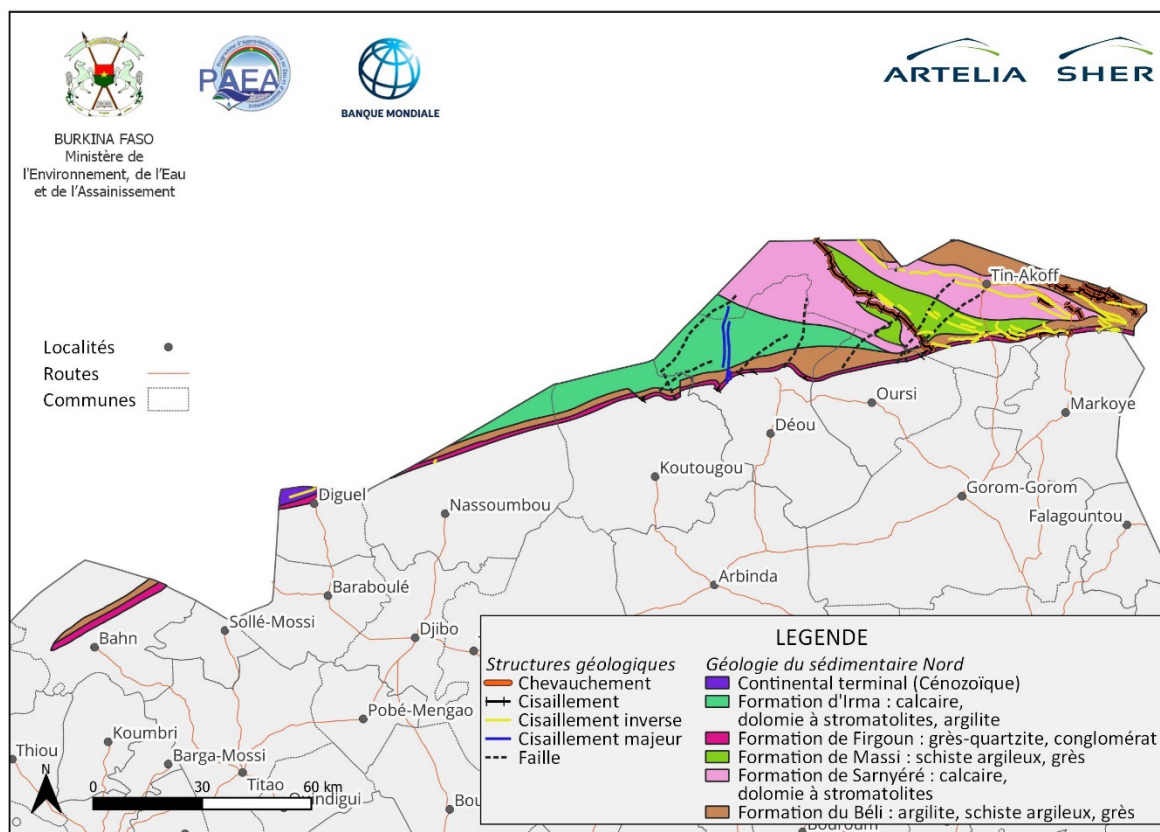
Tableau 3 : Lithologie des formations sédimentaires de la bordure Sud du bassin du Gourma (Mali et Burkina Faso)

Adapté de Castaing et al 2003 et de Koussoubé 2010

Age	Groupe	Formation	Lithologie
Cambrien	Groupe Supérieur	Formation de Bandiagara	Grès fluviatile grossier à lits conglomératiques
		Formation de Koutiala	Grès blanc, brun, jaune, rose et rouge à grains grossiers
	Discordance angulaire (tectonique compressive Panafricaine)		
Néoprotérozoïque	Groupe Moyen	Formation de Oualo	Argilite à passées de grès fins plus ou moins ferrugineux, à rares lentilles de dolomies à stromatolites
		Formation de Hombori-Douentza	Grès-quartzite ± grossiers à passées conglomératiques.
		Formation de Massi	Argilo-calcaire intercalations gréseuses et cherteuses
		Formation de Sarnyéré	Dolomies
	Discontinuité sédimentaire (rifting Panafricain, failles distensives)		
	Groupe Inférieur	Formation de Dimamou	Schiste rouge et schiste argileux
			Pélite schisteuse, grès grossier et quartzite, passée conglomératique
			Formation clastique terrigène dont la base n'a pas été observée dans le Gourma
		Formation de Koro	Marne et argile
		Formation d'Irma	Dolomie litée à Stromatolites
		Formation du Béli	Dolomie litée à Stromatolites et intercalations argileuses et gréseuses
			Pélite et schiste argileux rouge et intercalations de grès-quartzite.
		Formation du Firgoun	Grès-quartzite et passées conglomératiques

Trois groupes de formations appartiennent à la bordure Sud du bassin du Gourma au Mali et au Burkina Faso. Au Nord du Burkina Faso, on retrouve les formations de Massi et de Sarnyéré dans le Groupe Moyen, et les formations d'Irma, du Béli et du Firgoun dans le Groupe Inférieur.

La Figure 27 ci-après illustre les formations géologiques rencontrées dans le bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ARTELIA/SHER 2022

Figure 27 : Carte géologique du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

Des études du bassin du Gourma ont été effectuées notamment par Reichelt (1972), et Delfour (Delfour, 1965 ; Delfour et Jeambrun, 1970), qui ont défini les bases des premières interprétations lithostratigraphiques du bassin du Gourma. Il appartient au Néoprotérozoïque, mais sa période active de subsidence s'étend jusqu'à l'orogénèse varisque du milieu du Paléozoïque. Il a été par la suite recouvert de dépôts continentaux du mésozoïque-cénozoïque. Ainsi, la géologie du bassin sédimentaire du Nord est constituée de bas en haut par les formations de l'Infracambrien, les formations du Continental Terminal et le Quaternaire.

Les sections ci-après décrivent les différentes formations rencontrées dans la partie Burkinabè du bassin du Gourma, laquelle constitue la zone sédimentaire Nord du Burkina Faso. Le référentiel utilisé pour la terminologie, pour la cartographie ainsi que pour les descriptions géologiques, se rapporte à la carte géologique et minière au 1/million du Burkina Faso (Bumigeb 2003, projet Sysmin).

K.2.1. Les formations Néoprotérozoïques

Les formations qui composent la couverture sédimentaire néoprotérozoïque du Nord du Burkina Faso sont gréseuses et calcaro-dolomitiques, datées du précambrien supérieur au cambro-ordovicien. Elles comprennent de la base au sommet :

K.2.1.1. Formation de Firgoun

la Formation de Firgoun, gréseuse et conglomératique peu épaisse (10 à 50 m d'épaisseur en moyenne), est discordante sur le socle birimien et jalonne la limite d'érosion actuelle de la bordure Sud-Est du bassin du Gourma au Burkina Faso (Oudalan) et au Niger (Liptako).

Régionalement, elle repose directement en discordance majeure sur le socle cristallin avec un pendage régulier de 5° à 15° vers le nord et qui correspond à la limite d'érosion actuelle du bassin du Gourma, sur la bordure Sud-est du bassin de Taoudeni.

A l'affleurement, elle constitue une succession de trois horizons remarquables par leur morphologie.

Au contact Nord du socle d'abord, le premier horizon, grés-conglomératique, plus résistant à l'érosion, souligne une cuesta de 10 à 20 m de haut exposée au Sud. En aval pendage (10° à 15° N) vers le Nord, il affleure sur une largeur de 300 à 400 m, mais plus épisodiquement en plusieurs chaînons gréseux ou grés-conglomératiques discontinus et peu élevés (Gariol, Fourfaré Wandé, Fourfaré Tiaïga et Tondi Garia), séparés par d'étroites cuvettes non affleurantes. Le premier horizon présente une puissance moyenne de l'ordre de 75 mètres.

Au-delà, vers le Nord, après une zone non affleurante large de 400 à 500 m, affleure le deuxième horizon formé de grès à patine jaune sur une largeur d'environ 80 à 100 m, d'une puissance de 10 à 15 mètres en moyenne.

Le troisième horizon, de 15 mètres de puissance en moyenne, est constitué de grès quartzites blanchâtres diaclasés jaunes.

Les dépôts de la Formation de Firgoun sont l'expression d'une première grande transgression marine, sans doute généralisée à l'échelle du bassin de Taoudéni. Elle marque l'installation d'une plateforme marine peu profonde, avec des dépôts clastiques terrigènes d'abord littoraux soulignés par des cordons de conglomérat, puis des dépôts sableux, d'abord de plage, puis de zone intertidale à subtidale caractérisés par des barres sableuses hydrauliques. Vers le sommet, la tendance transgressive culmine avec les horizons de grès à glauconie, accompagnés de dépôts de tempête.

K.2.1.2. Formation de Béli

Cette formation affleure au Nord du Burkina Faso, à la frontière avec le Mali et le Niger. Elle repose en concordance sur la formation de Firgoun. Elle se présente sous forme de bande étroite parallèle aux grès de Firgoun et elle matérialise la limite Nord-est du bassin sédimentaire du Nord. Elle se distingue de cette dernière par sa lithologie qui est essentiellement constituée de formations tendres argilo-silteuses, plus ou moins carbonatées.

Elle est formée à la base par des pélites et schistes argileux rouge et intercalations de grès-quartzite et au sommet par des dolomies litées à Stromatolites et intercalations argileuses et gréseuses. Elle présente des épaisseurs très variables (50 à 1.500 m). La formation de Béli est très tectonisée, prise dans les écaillages et chevauchements de la bordure sud du Gourma occidental.

Cette formation est essentiellement constituée de niveaux tendres de pélites ou schistes argileux rouge-violacé avec intercalations de rares bancs de grès ou grès à fin débit en plaquettes. Les séquences récurrentes d'argilite et siltite finement laminée de couleur verdâtre ou rouge violacé, contiennent en outre des horizons de calcaire silto-argileux et des lentilles centimétriques silto- ou argilo-calcaires.

K.2.1.3. Formation d'Irma

La Formation d'Irma est représentée par une puissante série carbonatée (> 400 m). Elle est principalement constituée de dolomies litées à Stromatolites, comportant des intercalations argileuses, marneuses et gréseuses vers la base et entièrement carbonatée ensuite.

Dans l'Oudalan, la partie supérieure de la formation a été reconnue (Bertrand-Sarfati et Moussine-Pouchkine, 1983), dans les sondages de reconnaissance de « Christine » et de « Minouche » décrits par Gravost (1969). Géométriquement, les deux successions recoupées sont stratigraphiquement superposables, cumulant ainsi environ 260 m de dépôts carbonatés qui représentent, selon Bertrand-Sarfati et Moussine-Pouchkine (1983) la partie sommitale de la Formation d'Irma et la partie basale de la Formation de Sarnyéré, séparées par une discontinuité sédimentaire.

La partie inférieure de la Formation d'Irma serait constituée de dolomie gréseuse litée à passées de stromatolites (Gravost, 1969). A partir de la coupe géologique interprétative de cet auteur, il est possible d'estimer l'épaisseur minimale de l'ensemble de la Formation d'Irma dans ce secteur de l'Oudalan à environ 400 mètres.

Gravost (1969) décrit une succession monotone de séquences (2 à 5 m de puissance) de dolomie légèrement calcaire, séparées par des arrêts de sédimentation ou par des surfaces d'érosion. Les horizons carbonatés sont variés, représentés soit par des dolomies à stromatolites en colonnes non jointives de 1 à 2,5 cm de diamètre, soit des microbrèches intraformationnelles à oolithes et éléments de stromatolites remaniés et de dolomie, soit des calcaires oolithiques plus fins et lités.

L'empilement de ce type de séquence est caractérisé par la récurrence de faciès récifaux stromatolitiques, sous forme de biostromes (Conophyton) à grains, associés aux faciès bréchiques resédimentés et aux grainstones oolithiques laminés.

Concernant la partie inférieure de la Formation d'Irma, moins connue, la présence de dolomie gréseuse indique des apports clastiques terrigènes dans un milieu de plate-forme carbonatée sans doute plus interne que par la suite, mais qui permet déjà le développement de stromatolites.

K.2.1.4. Formation de Sarnyéré

La formation de Sarnyéré est composée essentiellement de calcaires dolomitiques à Stromatolites. Elle a été notamment identifiée dans le forage « Christine » où la partie sommitale de la formation d'Irma et la partie basale de la formation de Sarnyéré sont séparées par une discontinuité sédimentaire (Gravost, 1969).

Latéralement vers l'Est, la Formation de Sarnyéré passe aux faciès récifaux de bordure de plate-forme carbonatée, bien développés dans la région de Tin Akof et aux faciès carbonatés turbiditiques, silicifiés, de Kim Marou, Tin Manan et Tin Hrassan dans l'Oudalan (Delfour et Jeambrun, 1970 ; Bertrand-Sarfati et Moussine-Pouchkine, 1983).

La partie inférieure est constituée de dolomies laminées d'origine algaire, à structures de dessiccation en bols et fentes verticales et horizontales. La partie supérieure est rythmique, composée de lits dolomitiques algaires à fenestrae, de lits dolomitiques argileux à « bird eyes » et d'intercalations argileuses. Les séquences sédimentaires, d'épaisseur plurimétrique, débutent par des faciès packstones et se poursuivent par des faciès à lamines algaires. Le sommet de ces séquences montre des surfaces à polygones de dessiccation (Bertrand-Sarfati et Moussine-Pouchkine, 1978).

Les caractères de ces dépôts évoquent une sédimentation marine très peu profonde de type « tidal flat » ; ce sont des dolomies de plate-forme interne restreinte, transgressives sur la bordure SE du bassin de Taoudéni.

K.2.1.5. Formation de Massi

La formation de Massi est une formation argilo-calcaire de 300 à 400 m de puissance, à intercalations gréseuses ou cherteuses dans la partie supérieure.

Cette unité est essentiellement constituée d'argilites à patine jaune, à minces passées calcaires, laminées à la base et à intercalations gréseuses ou cherteuses dans la partie supérieure. Les argilites sont très tectonisées, schistosées, prises dans les écaillages et chevauchements de la bordure du bassin du Gourma.

Ces dépôts fins évoquent une sédimentation marine plutôt profonde, de type turbidite essentiellement silico-clastique.

K.2.2. Le Continental Terminal

Les dépôts du Continental terminal sont présents principalement dans la plaine du Gondo, sur une zone de 300 km le long de la frontière Nord-Ouest avec le Mali et plus discrètement dans la zone Est, de Diapaga à la frontière du Niger.

Dans la plaine du Gondo, le Continental terminal se présente comme une formation argilo-sableuse plus ou moins bariolée, rouge violacé à ocre, discordante sur les formations du Néoprotérozoïque ou du socle birimien. Les puissances, au Burkina Faso, ne dépassent pas 10 à 35 m.

Le Continental Terminal du bassin sédimentaire du Nord est caractérisé par des cuirasses latéritiques notamment du Pliocène et très ferrugineuses discordante sur les formations du Néoprotérozoïque. C'est particulièrement le cas au niveau du sondage Djibo 18, qui recoupe d'abord 7,30 m d'argiles sableuses friables bruns jaunâtres plus ou moins rubéfiées, puis entre 7,30 et 19,60 m des argiles sableuses friables de teinte ocre, à passées plus sableuses, et enfin jusqu'à la base de la formation à 33,50 m des argiles rouge violacé légèrement friables.

K.2.3. Le Quaternaire

Les dépôts quaternaires sont constitués de matériaux hydro-éoliens. Il s'agit d'une part de sables dunaires ou meubles, et d'autre part d'alluvions argileuses récentes et actuelles.

- Les dunes, mises en place sous un régime de vent Sud, sont hautes de quelques dizaines de mètres, larges de 2 km et s'allongeant sur plusieurs dizaines de kilomètres dans la direction Est-Ouest. Ces dunes sont localement en voie d'érosion, donnant lieu à des voiles sableux superficiels peu épais mais très étendus, ainsi qu'à des dépôts qui contribuent largement à engorger le cours des ruisseaux temporaires. Elles sont composées de sables éoliens meubles à grain fin (0,5 mm), émoussé, mat, blanc, beige ou roux et montrent un flanc abrupt tourné vers le Nord en voie d'érosion.
- Les alluvions sont issues de l'érosion des dunes et des massifs rocheux et se concentrent dans les bas-fonds, lits des marigots et des mares. Ils se composent de divers dépôts meubles, dont principalement du sable, sable argileux ou argile sableuse et d'argile, plus rarement de termes plus grossiers (gravier et galets), surtout dans les lits des cours d'eau subactuels, ou dans des paléochenaux.

K.2.4. Superficies à l'affleurement

Plus de 50% de la surface du bassin sédimentaire du Nord au Burkina Faso (compte non-tenu des dépôts Quaternaires, lesquels sont non-cartographiés) est couverte par les formations carbonatées d'Irma et de Sarnyéré, tandis que plus de 30 % est couverte de formations gréseuses, argileuses, schisteuses et quartzitiques de Firgoun et de Béli.

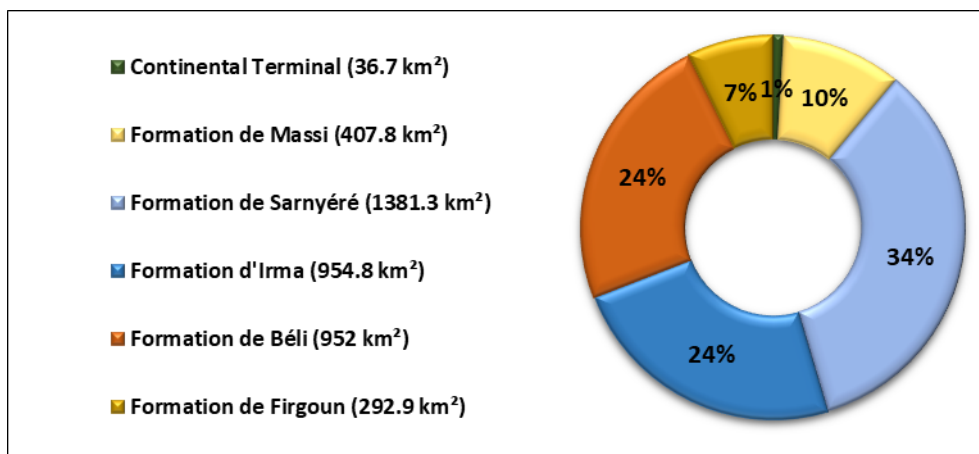


Figure 28 : Pourcentages de répartition géographique (superficies à l'affleurement) des formations du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso

L. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD DU BURKINA FASO

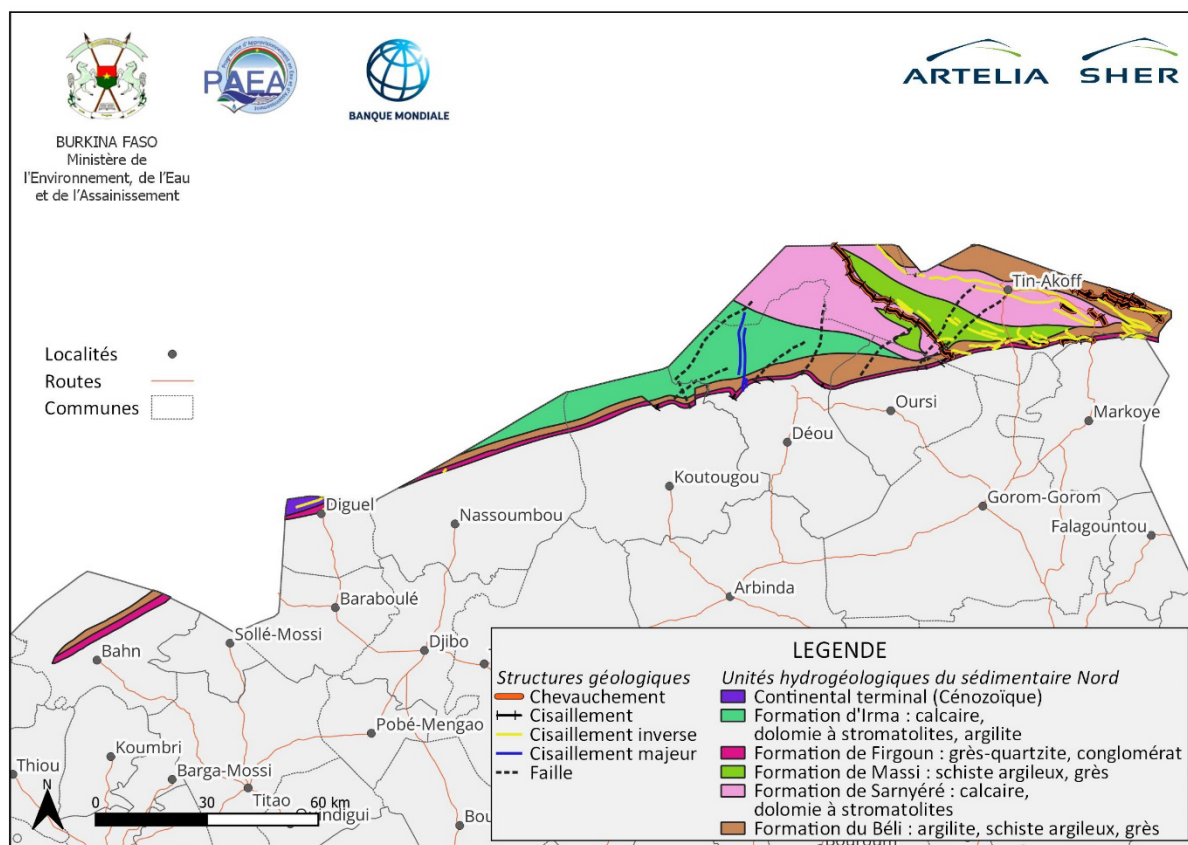
L.1. Unités hydrogéologiques rencontrées

Dans le bassin du Nord du Burkina Faso, l'essentiel des aquifères est représenté par les formations Infracambriennes rencontrées au Sud-Ouest du bassin de Taoudeni.

Les unités hydrogéologiques rencontrées dans le bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso sont définies comme suit :

1. Unité hydrogéologique de Firgoun ;
2. Unité hydrogéologique de Béli ;
3. Unité hydrogéologique d'Irma ;
4. Unité hydrogéologique de Sarnyéré ;
5. Unité hydrogéologique de Massi ;
6. Unité hydrogéologique du Continental Terminal ;
7. Unité hydrogéologique du Quaternaire.

Ces unités hydrogéologiques sont représentées sur la Figure 29 ci-après.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ARTELIA/SHER 2022

Figure 29 : Carte des unités hydrogéologiques du bassin sédimentaire du Nord

Les principaux niveaux aquifères se retrouveraient essentiellement dans les formations carbonatées d'Irma et de Sanyéré, et dans les formations gréseuses.

L.1.1. Unité hydrogéologique des grès quartzite et conglomérats de Firgoun

L'unité hydrogéologique des grès quartzite et conglomérats de Firgoun, d'une puissance d'environ 100 mètres, est rencontrée en bordure sud de bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso. Elle se présente sous forme de bande large de moins de 1 km et elle plonge vers le Nord.

La superficie de l'affleurement de cette unité hydrogéologique est très limitée au Burkina Faso, où elle ne dépasse pas 292 km².

Cette unité hydrogéologique est principalement composée de grès-quartzite et conglomérat. Elle permet ainsi le stockage de volume intéressant d'eau mobilisable, et présente un caractère globalement aquifère.

L.1.2. Unité hydrogéologique des schistes argileux et grès de Béli

L'unité hydrogéologique des schistes argileux et grès de Béli est sous-jacente à celle de Firgoun et affleure au Nord de cette dernière et au Nord-Est du bassin sédimentaire du Nord. Sa superficie au Burkina Faso est de l'ordre de 952 km².

Cette unité hydrogéologique est principalement composée d'une épaisse alternance de schiste argileux, de grès-quartzite et de dolomie. Elle est susceptible de renfermer des niveaux aquifères intéressants, particulièrement dans les couches gréseuses fissurées, néanmoins la dominance de cette unité est de nature schisto-argileuse.

L.1.3. Unité hydrogéologique des calcaires et dolomies d'Irma

L'unité hydrogéologique de la formation d'Irma occupe une superficie d'environ 955 km² au Burkina Faso. Elle affleure sur un large territoire à l'Ouest du bassin sédimentaire du Nord. Elle est la continuité lithologique du sommet de la formation sous-jacente de Béli composée essentiellement de formations schisto-argileuses et dolomitiques.

Cette unité hydrogéologique est principalement composée de calcaire et de dolomie gréseuse litée.

Vu l'importance de son épaisseur qui serait supérieure à 400 m, et la continuité lithologique avec la formation de Sarnyéré, cette unité hydrogéologique est susceptible de fournir d'excellents débits. Ces deux formations constituent donc en réalité une entité hydrogéologique unique, très productive dans les niveaux carbonatés les plus karstifiés.

L.1.4. Unité hydrogéologique des calcaires et dolomies de Sarnyéré

Occupant le centre du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso, l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré couvre l'essentiel de sa surface avec environ 1.380 km². Elle est séparée de l'unité sous-jacente d'Irma par une discontinuité sédimentaire, bien que leur lithologie soit semblable.

La formation de Sarnyéré est composée essentiellement de calcaires dolomitiques à Stromatolites, dont les niveaux les plus karstifiés présentent d'excellentes propriétés aquifères.

La continuité lithologique de la formation de Sarnyéré avec la formation d'Irma conduit à les considérer comme une seule entité hydrogéologique, très productive dans les niveaux carbonatés les plus karstifiés.

L.1.5. Unité hydrogéologique des schistes argileux et grès de Massi

L'unité hydrogéologique de la formation de Massi occupe une superficie d'environ 408 km² au Burkina Faso. Elle affleure au cœur du bassin sédimentaire du Nord. Elle est entourée sur sa quasi-totalité par la formation de Sarnyéré, sauf au Sud où elle est en contact avec la formation de Béli.

Cette unité hydrogéologique est composée essentiellement de niveaux de schistes argileux et d'argilo-calcaires. On peut ainsi la considérer comme faiblement productive. En effet, peu de forage ont été recensés dans cette formation, et les débits y sont les plus faibles parmi toutes les unités du bassin sédimentaire du Nord.

L.1.6. Unité hydrogéologique du Continental Terminal

L'unité hydrogéologique du Continental Terminal occupe une superficie d'à peine 40 km² au Burkina Faso, au Sud-Ouest du bassin sédimentaire du Nord.

Bien qu'elle soit composée de formations considérées comme relativement productives, auxquelles on peut ajouter de petites nappes temporaires des dunes, sa présence sur l'ensemble du bassin est trop limitée. Ainsi, cette unité hydrogéologique ne peut être valorisée que très localement.

L.1.7. Unité hydrogéologique du Quaternaire

L'Unité hydrogéologique du Quaternaire correspond aux dépôts superficiels constitués de matériaux hydro-éoliens. Il s'agit d'une part de sables dunaires ou meubles, et d'autre part d'alluvions argileuses récentes et actuelles. Ces dépôts ne sont pas cartographiés.

Bien que présentant des propriétés hydrogéologiques favorables sur le plan lithologique, ces horizons sont généralement peu continus et de faible épaisseur, et ne sont saturés en eau que durant la saison des pluies.

Il s'agit dès lors de petites nappes temporaires, qui ne peuvent être valorisées que très localement et sur une période ne s'étendant pas significativement au-delà de la saison des pluies.

L.2. Ouvrages recensés et capitalisation des données

L.2.1. Inventaire général des ouvrages recensés dans le sédimentaire Nord

L'inventaire des ouvrages recensés (forages, puits, piézomètres) et de leurs caractéristiques a été réalisé sur base de la capitalisation des informations existantes collectées dans le cadre de la présente étude.

Les principales sources de données mises à disposition et capitalisées sont :

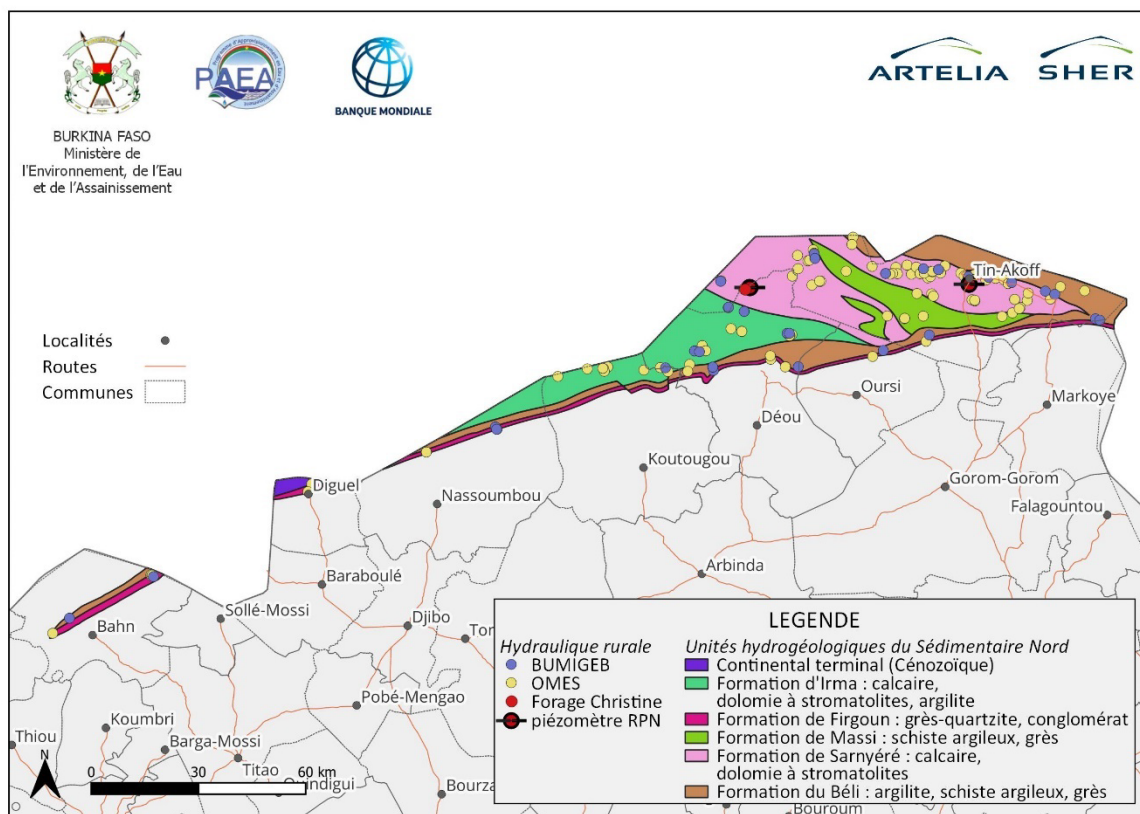
1. La base de données BD-OMES de la DGRE, consolidée dans le cadre de la présente étude. On notera que cette base de données intègre les données des BD INO, BEWACO, etc. Cette base de données a été alimentée, dans le cadre de la présente étude, par l'encodage de l'ensemble des données tierces collectées relatives au bassin sédimentaire du Nord.
2. La base de données cartographique associée à la carte géologique du Burkina Faso, élaborée par le BUMIGEB ;
3. La base de données DEIE relative aux piézomètres du réseau piézométrique national ;
4. Les données relatives au site de forage « Christine »

La description des principales données valorisées est synthétisée dans le Tableau 4 ci-après.

Tableau 4 : Capitalisation des bases de données

Base de données	Nombre d'ouvrages	Principales données valorisées
Données BUMIGEB (carte géologique)	39	Positif / négatif
		Débites en fin de foration
		Profondeur altération
		Profondeur ouvrage
		Lithologie / géologie
Données BD-OMES (y compris les données tierces collectées et encodées dans le cadre de la présente étude)	116	Positif / négatif
		Débites
		Débites spécifiques
		Profondeur altération
		Niveau statique
		Profondeur ouvrage
		Profondeur équipée
		Lithologie / géologie
Données RPN DEIE	4	Profondeur forée
		Niveaux de nappe
		Lithologie / géologie
Forage Christine	2	Débites
		Débites spécifiques
		Transmissivité
		Profondeur altération
		Niveau statique
		Profondeur ouvrage
		Profondeur équipée
		Lithologie / géologie

La distribution spatiale des ouvrages recensés dans le bassin sédimentaire du Nord, résultant de la capitalisation de ces données, est présentée sur la Figure 30 ci-après.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, OMES 2021, DGRE 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 30 : Localisation des ouvrages recensés dans le bassin sédimentaire du Nord

Au total, après traitement (dont la gestion des doublons) des données collectées, 152 ouvrages distincts sont répertoriés et capitalisés au sein des bases de données BD-OMES et BD-SEVR développées dans le cadre de la présente étude. La liste des ouvrages recensés, et leurs principales caractéristiques, sont reprises en annexe 1 du présent rapport.

Les données capitalisées relatives à ces ouvrages (forages, puits, piézomètres) sont utilisées, dans les sections qui suivent, pour établir la caractérisation hydrogéologique des différentes unités aquifères rencontrés dans le bassin sédimentaire du Nord.

On notera que les caractéristiques hydrogéologiques des formations du bassin sédimentaire du Nord ne sont pas significativement bien connues, si ce n'est dans leur partie superficielle à travers les différents forages inventoriés. S'agissant d'ouvrages réalisés dans le cadre de programmes d'hydraulique villageoise (à des profondeurs dépassant rarement 90 mètres), et compte tenu qu'aucun programme majeur de recherche appliquée sur l'hydrogéologie du bassin sédimentaire du Nord n'a été mis en œuvre à ce jour, le niveau d'information disponible et exploitable reste à ce jour relativement limité.

L.2.2. Cas particulier du site de forage « Christine »

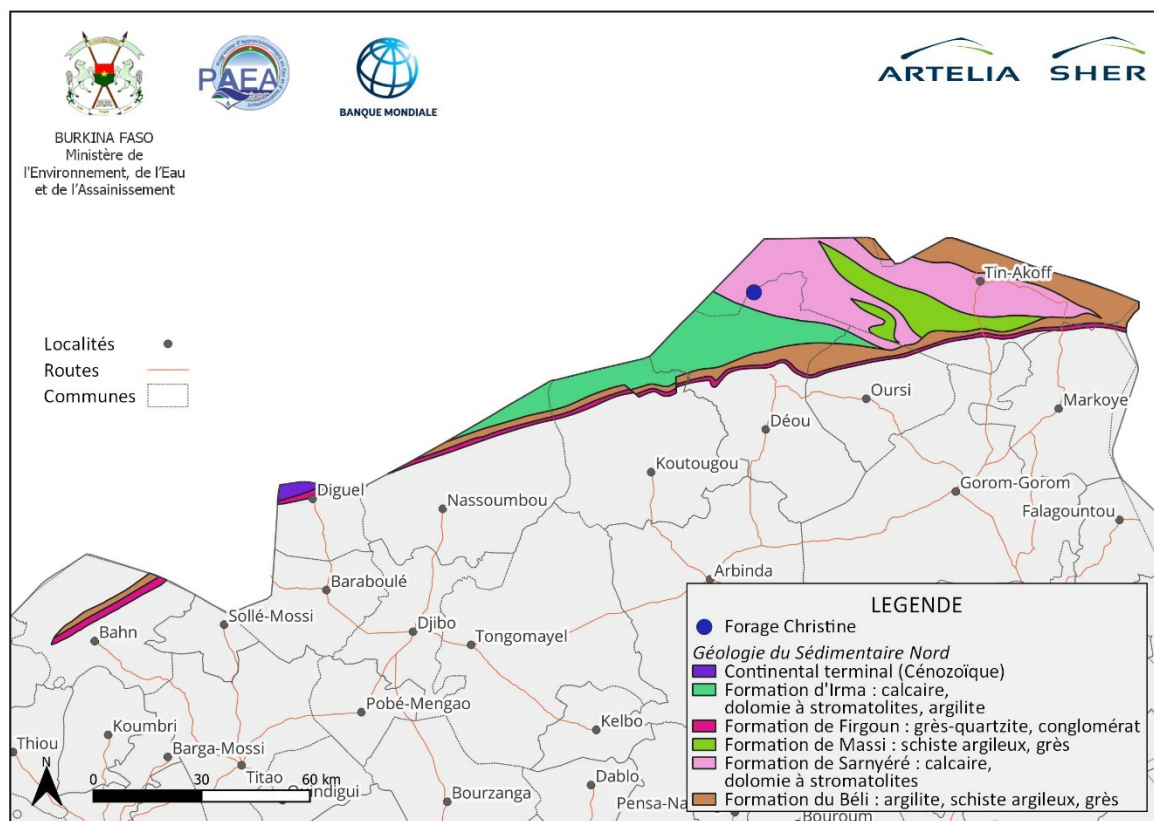
Etant donné la spécificité particulière du site de forage « Christine », une section lui est spécifiquement consacrée.

L.2.2.1. Localisation et caractéristiques principales

Le site de forage « Christine » est localisé au Nord du Sahel burkinabé et au Sud de la frontière avec la République du Mali, dans la commune rurale de Tin-Akoff, province de l'Oudalan. Il est situé à 0° 45' de Longitude Ouest et à 14° 48' de Latitude Nord.

Le forage Christine est situé dans l'Aire de Protection de la Faune du Seno Mango. Il est situé à 20 km au sud de "Tinta Bakate", 5 km à l'est de "Petel Kole" et 15 km de "Petel frontière" la frontière de la République du Mali.

Au sud du forage Christine, on trouve la dune Kienin Danief.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, BRGM, ARTELIA/SHER 2022

Figure 31 : Localisation du forage Christine dans le bassin sédimentaire du Nord

La première phase de prospection du site « Christine », qui a débuté en 1968-1969, a été menée par une équipe du BRGM. Cette étude a consisté en la réalisation d'un profil de sismique réfraction combiné à un profil électrique de 29km de long du Sud au Nord dans la région de Tin Arkachen. Plusieurs sondages électriques ont été pratiqués. Cette prospection a permis la réalisation de deux sondages de reconnaissance, dont le second (appelé 'sondage Christine') a une profondeur de 129,25m et a connu des pertes (cavernes karstiques). Ce sondage a été pompé à 10 m³/h pendant 108 heures avec un rabattement de 0,03m.

Le forage « Christine » initial a été réalisé en 1971 et mis en exploitation en avril 1972, dans un contexte de sécheresses des années 70 vécues par les populations burkinabè, notamment celles de la région du Sahel. Il a une profondeur de 76 mètres, et est localisé à 10 mètres du sondage de reconnaissance préalable cité plus haut et réalisé en 1969 sur base de résultats de géophysique sismique et électrique (BRGM).

Les débits pompés lors d'essais dans le forage d'exploitation initial « Christine » de 1971 ont atteint 90 à 100 m³/h pendant 51 heures, avec un rabattement de 0.32 mètres seulement. Peu de données techniques relatives à cet ouvrage sont disponibles ; elles ont toutes été capitalisées.

Pendant les conflits entre le Mali et Burkina Faso (en 1974 et 1985), l'ouvrage a été saccagé puis bouché et abandonné.

Entre 1995 et 1996, 3 tentatives de la réhabilitation du forage initial ont échoué, et ont mené à la réalisation de forages additionnels. Une première tentative de forage additionnel aurait été réalisée sans succès, tandis qu'une seconde tentative a donné un sondage avec un débit de 18 m³/h. La troisième tentative a permis la réalisation d'un forage productif de 90 mètres de profondeur, dénommé « Christine 2 » ou « Christine ONPF 1996 », réalisé à 10 mètres au Nord du forage initial de 1971. Des essais de pompage ont été réalisés lors de la foration en 1996, et lors d'une étude menée en 2012.

Deux piézomètres ont été réalisés à respectivement 400 et 600 mètres du forage Christine 2 ; ils sont actuellement bouchés.

Plus récemment (2009), 2 piézomètres additionnels (SE4B et SE5P) ont été réalisés à 1.300 mètres à l'est de l'actuel forage Christine 2. Le piézomètre SE4B a une profondeur de 122.5 m, un niveau statique de 33.4 m, et un débit en fin de foration de 25 m³/h. Le piézomètre SE5P a une profondeur de 151.15 m, un niveau statique de 37.5 m, et un débit en fin de foration de 42 m³/h. Ils ont tous deux fait l'objet d'un pompage d'essai à 18 m³/h pendant 4h, et ont montré un rabattement de 11 et 17 cm.

Tous ces ouvrages captent les niveaux de dolomies et calcaires karstifiés de la formation d'Irma.

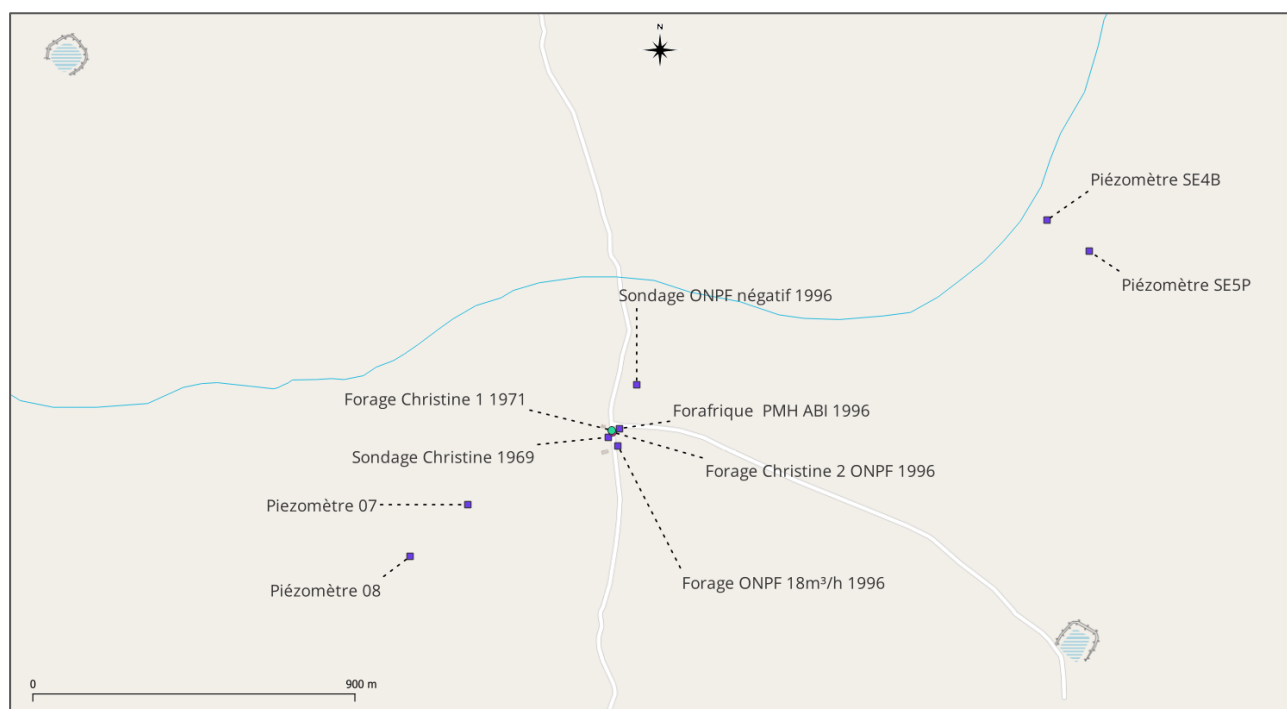


Figure 32 : Plan de localisation des ouvrages du site Christine

Le forage Christine 2 est équipé en PVC de 8". L'exhaure est assurée par une pompe immergée qui permet de refouler l'eau dans un château d'eau de 50 m³ pour l'alimentation des populations et le remplissage de quatre mares artificielles pour l'abreuvement des animaux en saison sèche.

La coupe technique du forage Christine 2 est présentée à la Figure 33 ci-après.

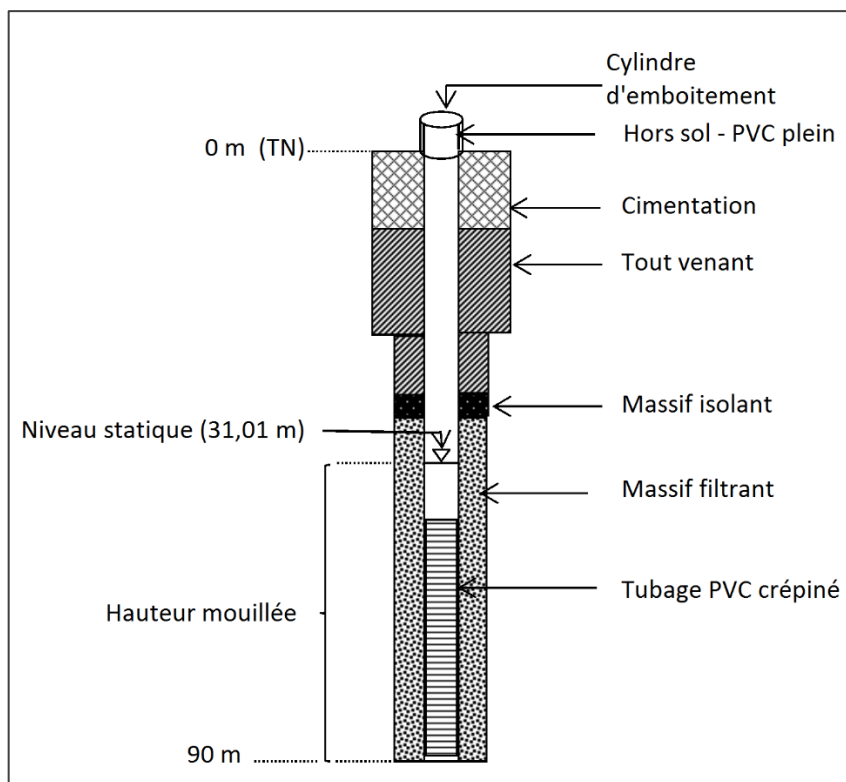


Figure 33 : Coupe technique du forage Christine 2

L.2.2.2. Conditions hydrogéologiques et lithologie

Les forages Christine 1 et 2 ont été exécutés dans les dolomies et calcaires karstifiés de la formation d'Irma, laquelle est supposée en continuité hydraulique avec la formation de Sarnyéré. L'aquifère serait formé par les fractures plus ou moins ouvertes et les karsts dans les calcaires et dolomies, avec développement de cavernes de dimensions variables.

La coupe du forage Christine 2 est présentée par la Figure 34 ci-après.



Figure 34 : Coupe lithologique du forage Christine 2

L.2.2.3. Paramètres hydrodynamiques et productivité du site de forage Christine

Le forage Christine 2 a fait l'objet d'essais de pompage en 1996 lors de sa réalisation, et en 2012 dans le cadre de l'étude CACI/CETRI (Etude des potentialités du forage Christine dans la Province de l'Oudalan, région du Sahel : rapport de synthèse, août 2012).

Essais de pompage de 1996

La productivité du forage Christine 2, et les paramètres hydrodynamiques de la nappe, ont été étudiés sur la base d'essais de pompage opérés du 06 au 11 mars 1996.

Les caractéristiques des essais menés sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques des essais de pompage du forage Christine 2 menés en 1996

Essai		Débit (m ³ /h)	Durée de la descente (h)	Durée de la remontée (h)
Paliers de débits	1 ^{er} palier	25	1	1
	2 ^e palier	50	1	1
	3 ^e palier	75	1	1
	4 ^e palier	112	1	1
Débit constant		112	72	38

La courbe caractéristique (débit/rabatement) du forage Christine 2 est reprise ci-après.

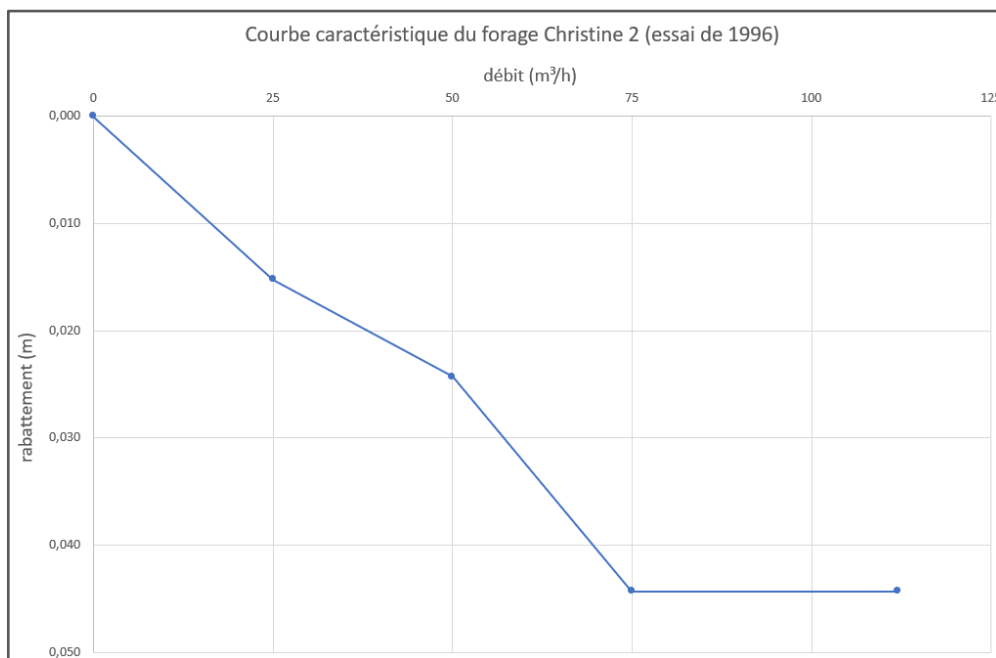


Figure 35 : Courbe caractéristique du forage Christine 2 selon les essais de 1996

Deux piézomètres ont été suivis lors des essais longue durée à 112 m³/h : l'ancien forage Christine (1971) situé au Sud-Ouest à 10 m, et un forage abandonné situé au Sud-Est.

Les rabattements observés en fin de pompage longue durée à 112 m³/h sont de 0,12 m, 0 m et 0,09 m respectivement pour le forage Christine 2, le forage Christine 1 et le forage abandonné (dénommé piézomètre FC3), pour des niveaux statiques de l'ordre de 35 m.

La courbe de descente mesurée sur le piézomètre FC3 (forage abandonné situé à 37 mètres du forage Christine 2) indique une transmissivité T1 de 0.28 m²/s et un coefficient d'emmagasinement S1 de 0.03, suivis d'une transmissivité T2 de 0.06 m²/s et d'un coefficient d'emmagasinement S2 de 0.01.

La courbe de remontée mesurée sur le piézomètre FC3 indique une transmissivité T'2 de 0.15 m²/s, suivie d'une transmissivité T'1 de 0.27 m²/s.

Ces éléments sont présentés sur la figure ci-après (source : J. Zambelongo, 1996).

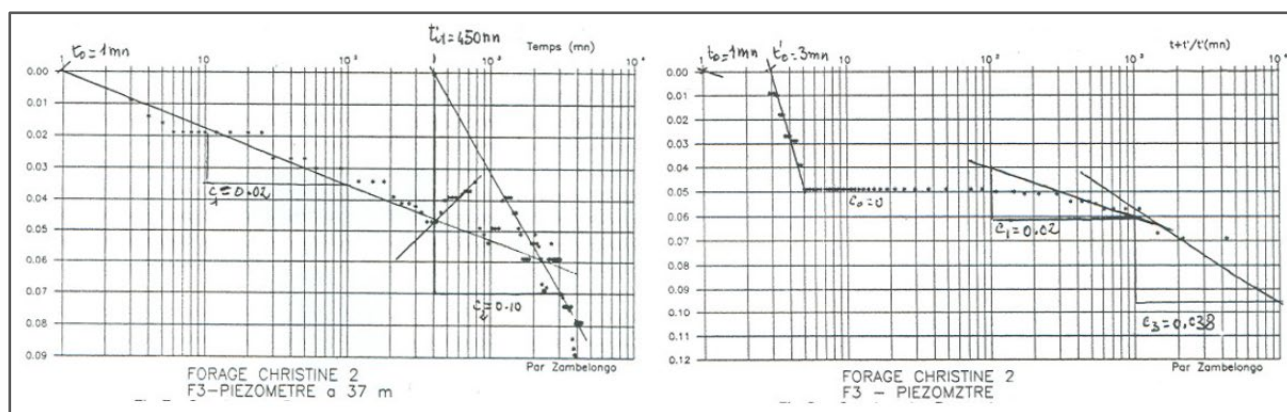


Figure 36 : Courbes de descente et de remontée au FC3 (37m) lors de l'essai longue durée au FC2 (source : J. Zambelongo)

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques du forage Christine 2 (selon, les observations au piézomètre FC3) sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Paramètres hydrodynamiques du forage Christine 2

Paramètre	Piézomètre : forage abandonné FC3	
	Descente	Remontée
Transmissivité T1 et T'1 (m ² /s)	0,28	0,27
Transmissivité T2 et T'2 (m ² /s)	0,06	0,15
Coefficient d'emmagasinement S1	0,03	-
Coefficient d'emmagasinement S2	0,01	-

Les conclusions de l'essai longue durée indiquent que la transmissivité de l'aquifère est excellente dans un rayon d'environ 800 mètres autour du forage, et plus modérée (bien que restant très élevée) au-delà (limite entre T1 et T2)

Les résultats des essais de pompage indiquent clairement le caractère karstique très marqué de l'aquifère dans la zone du site Christine.

Les faibles valeurs de rabattement indiquent que le débit maximum du forage n'a pas été atteint pendant les essais. En effet, selon la courbe d'exploitation théorique reprise dans le rapport des essais de pompage de 1996, un pompage de 20h/jour à 500 m³/h n'abaisserait – *théoriquement* - la nappe que de 0,96 m.

En tout état de cause, une exploitation à un débit compris entre 100 et 200 m³/h semblerait tout à fait envisageable.

Essais de pompage de 2012

Un essai de pompage par paliers a été réalisé dans le cadre de l'étude CACI/CETRI, en juin 2012.

Les caractéristiques et résultats sont repris dans le tableau ci-après.

Tableau 7 : Données de l'essai de pompage par palier de 2012

Palier	Débit (m ³ /h)	Rabattement (m)	Débit spécifique Q/S (m ³ /h/m)	Rabattement spécifique (m/m ³ /h)
1	30	0,08	375,0	0,003
2	49	0,10	490,0	0,002
3	68	0,19	680,0	0,001
4	72	0,21	342,8	0,003

Les débits testés vont de 30 à 72 m³/h, en 4 paliers. Le rabattement maximal, au débit de 72 m³/h, ne dépasse pas 21 cm.

Le débit spécifique moyen est de 390 m³/h/m et le rabattement spécifique moyen est de 0,003 m/m³/h.

La courbe caractéristique débit/rabattement est reprise sur la figure ci-après.



Figure 37 : Courbe caractéristique du forage Christine 2 selon l'essai de 2012 (adapté de CACI/CERTI)

Synthèse des données de productivité des ouvrages du site Christine

Le tableau ci-après reprend une synthèse des débits testés, des rabattements mesurés et des débits spécifiques correspondants, sur les différents ouvrages de la zone du site Christine.

Tableau 8 : Synthèse des débits testés sur le site Christine

Ouvrage	Débit max testé (m ³ /h)	Rabattement correspondant (m)	Débit spécifique (m ³ /h/m)	NS (m)
Christine 1 (1971)	100	0.32	312	35.8
Christine 2 (essai de 1996)	112	0.12	933	31.0
Christine 2 (essai de 2012)	72	0.21	343	31.0
SE4B	18	0.17	106	33.4
SE5P	18	0.11	164	37.5

L.3. Caractéristiques des unités hydrogéologiques

Les principales caractéristiques des unités hydrogéologiques du sédimentaire du Nord sont reprises dans les sections ci-après, sur base des données capitalisées à partir des inventaires et bases de données collectées (principalement OMES, BUMIGEB, DEIE).

Ces caractéristiques hydrogéologiques s'ajoutent donc, à l'échelle plus globale du sédimentaire du Nord, aux données spécifiques et locales relatives au site de forage Christine telles que reprises ci-avant.

L.3.1. Géométrie des aquifères

La géométrie des aquifères du bassin sédimentaire du Nord a été caractérisée par unité hydrogéologique sur la base des données de profondeurs de forage, d'épaisseur d'altération et d'épaisseur d'altération saturée. Les seuls éléments relatifs à la géométrie des aquifères qui peuvent être capitalisés sont donc ces 3 paramètres, en l'absence de données additionnelles portant (notamment) sur les profondeurs totales des différents horizons (hydro)géologiques. En effet, très peu d'études ont été menées sur la zone du sédimentaire du Nord, et la caractérisation hydrogéologique repose donc essentiellement sur la capitalisation des données issues des forages réalisés pour l'hydraulique villageoise.

On notera donc que la connaissance sur la géométrie des aquifères, dont en particulier les profondeurs totales des horizons, sont limitées en raison des profondeurs peu importantes (généralement moins de 100 m) des ouvrages répertoriés, lesquels ne captent que la partie superficielle des formations et n'atteignent pas la base de ces horizons.

Aucune donnée n'est disponible pour l'unité hydrogéologique du Continental Terminal ni celle du Quaternaire.

L.3.1.1. Unité hydrogéologique de la formation de Firgoun

La superficie à l'affleurement de l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun est d'environ 952 km².

Sur la base des ouvrages répertoriés, la densité des forages est faible ; elle varie de 0.5 à 2,2 forage / 100 km².

Les profondeurs minimales, maximales et moyennes des forages sont respectivement de 47 m, 100 m et 73 m. Le CV est faible, de l'ordre de 21%, suggérant une faible dispersion autour de la moyenne des profondeurs des forages de cette unité.

Les valeurs des percentiles calculés montrent que 10%, 50% (médiane) et 90% des forages ont des profondeurs respectivement inférieures ou égales à 52 m, 75 m et 88.6 m. Les forages captant cette unité sont relativement profonds, notamment en raison de la profondeur significative des niveaux de nappe.

Les épaisseurs d'altérations minimales, maximales et moyennes de cette unité sont respectivement de 1 m, 38 m et 16.6 m, tandis que l'épaisseur d'altération saturée moyenne est d'environ 0.1 mètre pour une maximale à 0.3 m. Les CV sont très élevés de l'ordre de 65% pour les épaisseurs d'altération et plus de 224% pour les épaisseurs d'altération saturée. Il existe une grande dispersion autour des valeurs moyennes de ces deux paramètres.

Les faibles valeurs d'épaisseurs d'altération saturée indiqueraient des matériaux plus drainants que capacitifs aux toits des horizons aquifères de cette unité hydrogéologique. Constitués de grès-quartzite et de conglomérat ils pourraient présenter des porosités intergranulaires et une capacité d'emménagement et de stockage d'eau assez importantes, pour constituer ainsi un réservoir aquifère intéressant.

Tableau 9 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun

Unité hydrogéologique de Firgoun	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	21	47	100	73	15,1	21%	52	75	88,6
Épaisseur altération (m)	21	1,0	38,2	16,6	10,7	65%	6,0	16,0	32,0
Épaisseur altération saturée (m)	5	0,0	0,3	0,1	0,1	224%	0,0	0,0	0,2

L.3.1.2. Unité hydrogéologique de la formation de Béli

La superficie à l'affleurement de l'unité hydrogéologique de la formation de Béli est d'environ 1.381 km².

Sur la base des ouvrages répertoriés, la densité des forages varie de 0.36 à 1.1 forage / 100 km².

Les profondeurs minimales, maximales et moyennes des forages sont respectivement de 47 m, 98 m et 73 m. Le CV est de l'ordre de 40% suggérant une dispersion autour de la moyenne assez importante des profondeurs des forages. Les valeurs des percentiles calculés montrent que 10%, 50% (médiane) et 90% des forages ont des profondeurs respectivement inférieures ou égales à 36 m, 54 m et 72.4 m. Les forages de cette unité hydrogéologique de Béli semblent les moins profonds de la série sédimentaire.

Les épaisseurs d'altérations minimales, maximales et moyennes de cette unité sont respectivement de 3.7 m, 33 m et 12.1 m.

L'épaisseur d'altération saturée est nulle, traduisant une profondeur de nappe plus importante que la base de la zone altérée.

Tableau 10 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Béli

Unité hydrogéologique de Béli	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	13	9,0	98,0	52,7	21,3	40%	36,0	54,0	72,4
Épaisseur altération (m)	16	3,7	33,0	12,1	8,0	66%	4,0	11,0	18,5
Épaisseur altération saturée (m)	5	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0

L.3.1.3. Unité hydrogéologique de la formation d'Irma

La superficie à l'affleurement de l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma est d'environ 408 km².

Sur la base des ouvrages répertoriés, la densité des forages est faible, elle varie de 1.5 à 4.9 forage / 100 km².

Les profondeurs minimales, maximales et moyennes des forages sont respectivement de 31 m, 130 m et 61 m. Le CV est faible, de l'ordre de 33% suggérant une faible dispersion autour de la moyenne des profondeurs des forages de cette unité.

Les valeurs des percentiles calculés montrent que 10%, 50% (médiane) et 90% des forages ont des profondeurs respectivement inférieures ou égales à 43 m, 60 m et 73 m. Elles sont comparables à celles de l'unité hydrogéologique de Firgoun. Les forages captant cette unité ont des profondeurs assez moyennes.

Les épaisseurs d'altérations minimales, maximales et moyennes de cette unité sont respectivement de 3.3 m, 52 m et 17.6 m, tandis que l'épaisseur d'altération saturée moyenne est d'environ 1.1 mètres pour une maximale à 6.6 m. Les CV sont très élevés de l'ordre de 70% pour les épaisseurs d'altération et plus de 245% pour les épaisseurs d'altération saturée, il existe donc une grande dispersion autour des valeurs moyennes de ces paramètres.

Tout comme l'unité hydrogéologique de Firgoun, les faibles valeurs d'épaisseurs d'altération saturée indiqueraient des matériaux plus drainants que capacitifs aux toits des horizons aquifères de cette unité hydrogéologique. Les faibles valeurs d'épaisseur d'altération saturée résultent principalement de la profondeur rencontrée des niveaux de nappe.

Tableau 11 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma

Unité hydrogéologique d'Irma	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	20	31,0	130,0	61,8	20,4	33%	43,4	60,1	73,0
Épaisseur altération (m)	21	3,3	52,0	17,6	12,3	70%	8,0	13,5	26,0
Épaisseur altération saturée (m)	6	0,0	6,6	1,1	2,7	245%	0,0	0,0	3,3

L.3.1.4. Unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré

La superficie à l'affleurement de l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré est d'environ 293 km².

Sur la base des ouvrages répertoriés, la densité des forages est faible, elle varie de 1.2 à 2.6 forage / 100 km². Cette unité représente l'aquifère le plus capté en terme de nombre d'ouvrages productifs.

Les profondeurs minimales, maximales et moyennes des forages sont respectivement de 8 m, 127 m et 61.1 m. Le CV est de l'ordre de 41%, suggérant une dispersion autour de la moyenne assez importante des profondeurs des forages de cette unité.

Les valeurs des percentiles calculés montrent que 10%, 50% (médiane) et 90% des forages ont des profondeurs respectivement inférieures ou égales à 31.7 m, 58.8 m et 90.4 m. Ces valeurs de percentiles indiquent des forages plus profonds que ceux captant les autres unités hydrogéologiques du sédimentaire Nord.

Les épaisseurs d'altérations minimales, maximales et moyennes de cette unité sont respectivement de 1 m, 63.9 m et 13.8 m, tandis que l'épaisseur d'altération saturée moyenne est d'environ 1.7 mètres pour une maximale à 29.3 m. Les CV sont très élevés de l'ordre de 93% pour les épaisseurs d'altération et plus de 300% pour les épaisseurs d'altération saturée. Il existe une grande dispersion autour des valeurs moyennes des valeurs d'épaisseur d'altération et d'altération saturée. Les faibles valeurs d'épaisseur d'altération saturée résultent principalement de la profondeur rencontrée des niveaux de nappe.

Tableau 12 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré

Unité hydrogéologique de Sarnyéré	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	60	8,0	127,0	61,1	24,8	41%	31,7	58,8	90,4
Épaisseur altération (m)	79	1,0	63,9	13,8	12,8	93%	2,2	10,3	27,2
Épaisseur altération saturée (m)	38	0,0	29,3	1,7	5,6	331%	0,0	0,0	3,2

L.3.1.5. Unité hydrogéologique de la formation de Massi

La superficie à l'affleurement de l'unité hydrogéologique de la formation de Massi est d'environ 955 km².

Sur la base des ouvrages répertoriés, la densité des forages est faible ; elle varie de 0.41 à 0.62 forage / 100 km².

Les profondeurs minimales, maximales et moyennes des forages sont respectivement de 70.1 m, 81.6 m et 78.5 m. Le CV est très faible, de l'ordre de 7% suggérant une faible dispersion autour de la moyenne des profondeurs des forages de cette unité. Les lithologies des formations aquifères de cette unité seraient homogènes sur toute l'étendue de l'unité hydrogéologique.

Les valeurs des percentiles calculés montrent que 10%, 50% (médiane) et 90% des forages ont des profondeurs respectivement inférieures ou égales à 73.4 m, 81.1 m et 81.4 m. Le CV est très faible de l'ordre de 7% suggérant une faible dispersion autour de la moyenne des profondeurs des forages de cette unité. Ces valeurs de percentiles indiquent des forages relativement profonds.

Les épaisseurs d'altérations minimales, maximales et moyennes de cette unité sont respectivement de 6 m, 28.5 m et 15.1 m. Le CV est de l'ordre de 52% pour les épaisseurs d'altération. Il existe une grande dispersion autour des valeurs moyennes d'épaisseur d'altération.

L'épaisseur d'altération saturée est nulle, traduisant une profondeur de nappe plus importante que la base de la zone altérée.

On notera toutefois que ces statistiques sont basées sur un nombre très limité d'ouvrages, ce qui réduit la représentativité des résultats sur le plan statistique.

Tableau 13 : Paramètres de géométrie de l'unité hydrogéologique de la formation de Massi

Unité hydrogéologique de Massi	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	4	70,1	81,6	78,5	5,61	7%	73,4	81,1	81,4
Épaisseur altération (m)	6	6,0	28,5	15,1	7,9	52%	7,3	14,6	23,4
Épaisseur altération saturée (m)	6	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0

L.3.1.6. Synthèse sur le bassin sédimentaire du Nord

La superficie totale du bassin sédimentaire du Nord est d'environ 4.029 km², sur une bande triangulaire orientée ENE-OSO, dont la base située à l'Est fait environ 50 km et le plus grand côté situé au Sud fait environ 315 km.

La profondeur moyenne des ouvrages, calculée à partir de 118 points, est de l'ordre de 63 m avec un maximum de 130 m.

L'épaisseur d'altération moyenne est d'environ 15 mètres, tandis que sa partie saturée est d'environ 1,2 mètres. Les faibles valeurs d'altération saturée résultent des profondeurs de niveau de nappe, souvent supérieures à 20 mètres.

Tableau 14 : synthèse des paramètres de géométrie du bassin sédimentaire du Nord

Global sédimentaire Nord	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	118	8,0	130,0	63,0	22,4	36%	37,7	63,0	89,0
Épaisseur altération (m)	143	1,0	63,9	14,6	11,8	81%	3,8	12,0	28,0
Épaisseur altération saturée (m)	60	0,0	29,3	1,2	4,6	384%	0,0	0,0	0,4

On observe donc de manière globale des profondeurs d'ouvrages relativement peu élevées, inférieures à 90 mètres pour 90% d'entre eux.

Le graphique repris en Figure 38 ci-après illustre la relative homogénéité des valeurs pour les 5 unités hydrogéologiques évaluées.

L'accessibilité à la ressource en eau souterraine est donc techniquement et économiquement favorable de ce point de vue.

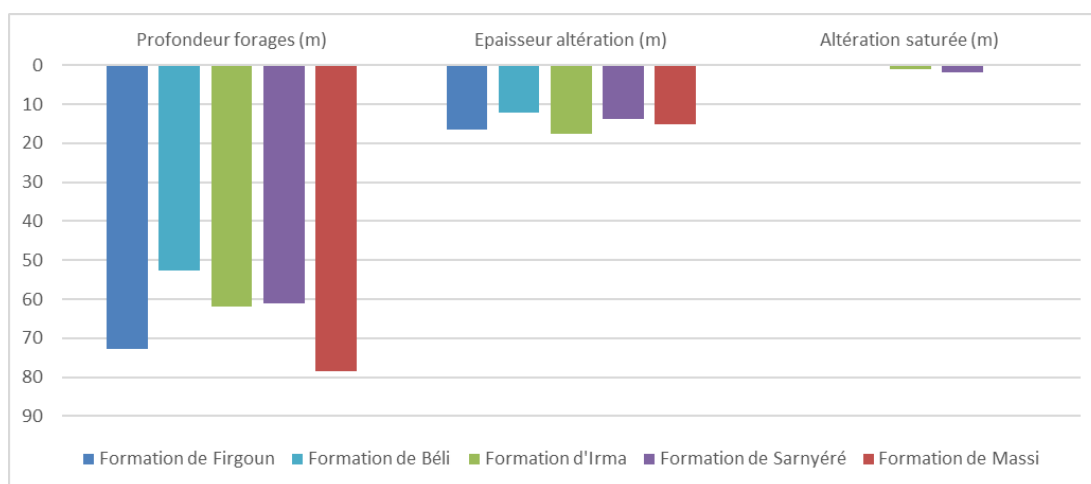
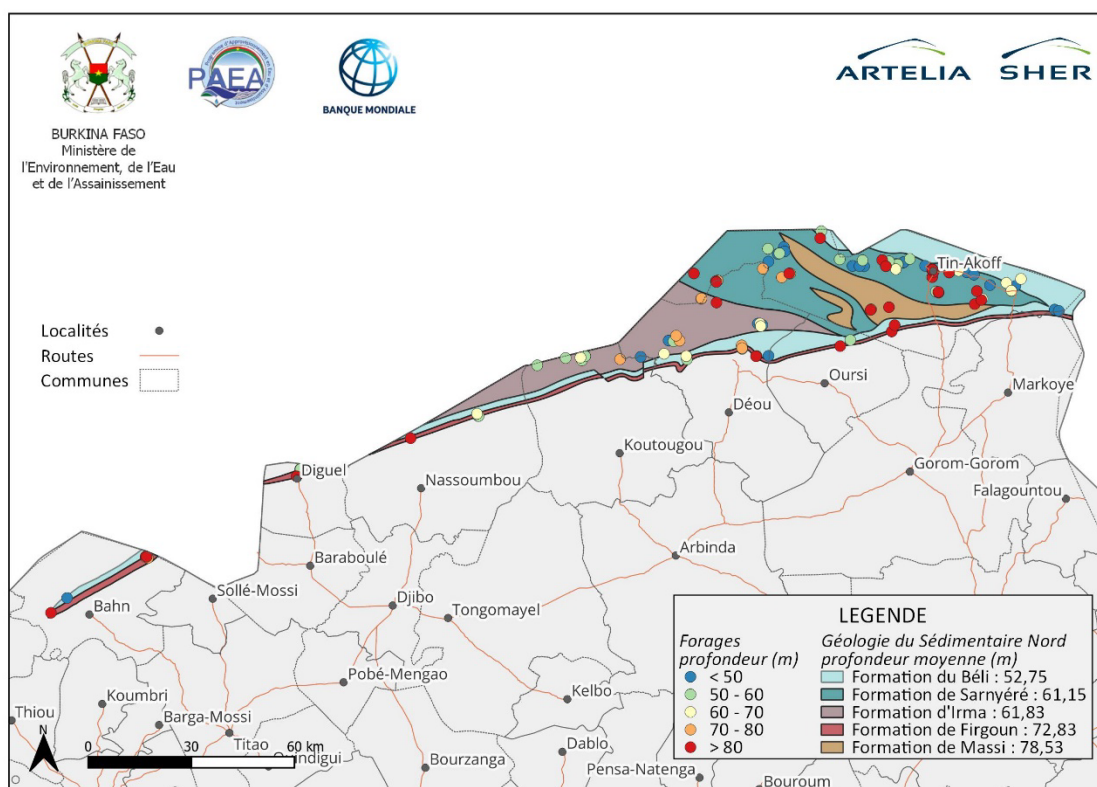


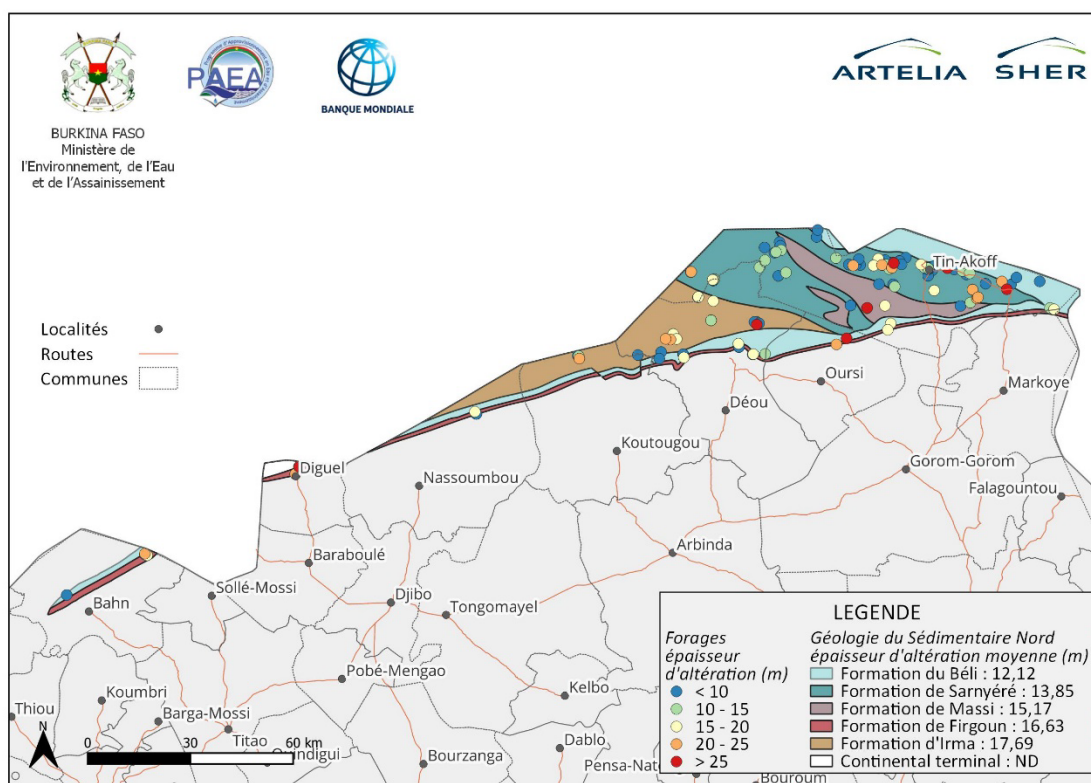
Figure 38 : Géométrie des aquifères : valeurs moyennes des paramètres par unité hydrogéologique

Les cartes reprises ci-après illustrent la distribution spatiale des valeurs de paramètres de géométrie, et les moyennes par unité hydrogéologique.



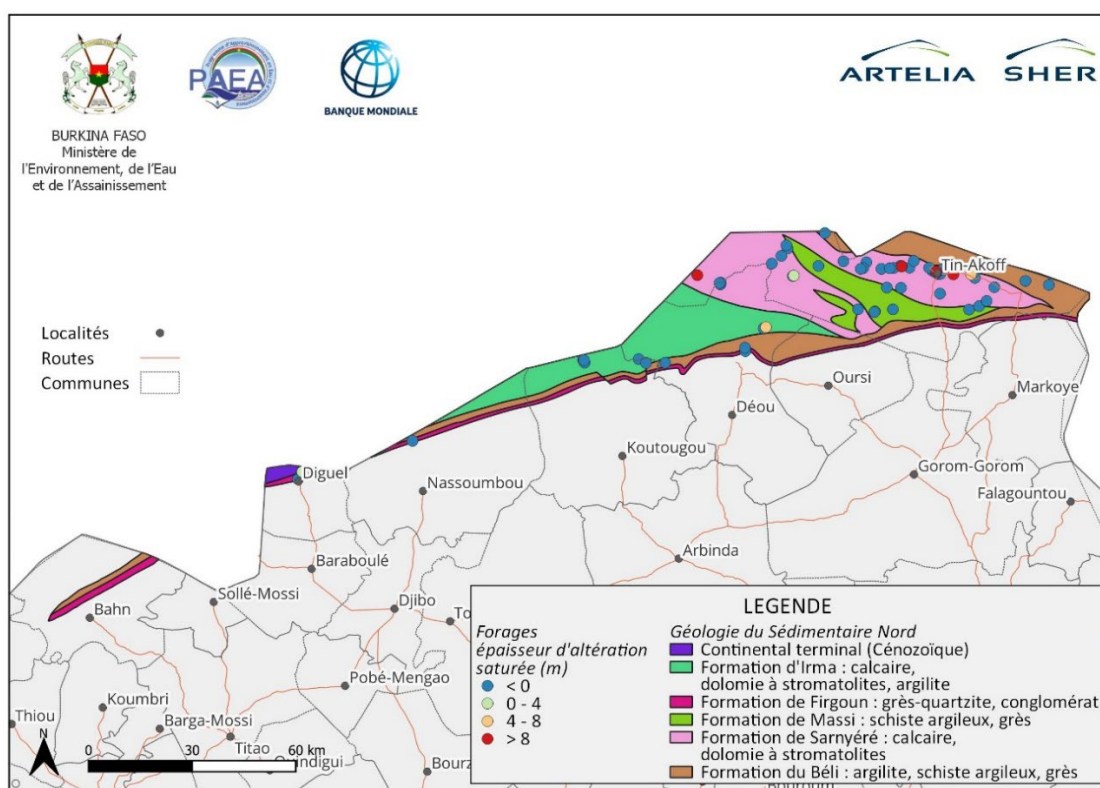
Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, OMES 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 39 : Distribution spatiale des profondeurs des forages du bassin sédimentaire du Nord



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, OMES 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 40 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération du bassin sédimentaire du Nord



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, OMES 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 41 : Distribution spatiale des épaisseurs d'altération saturée du bassin sédimentaire du Nord

L.3.2. Niveaux de nappe

L'analyse des niveaux statiques du bassin sédimentaire du Nord a été réalisée sur la base des données de forages disponibles. Généralement, il s'agit des niveaux statiques mesurées lors des travaux d'exécution des forages. Les niveaux de nappe présentés ne sont donc pas mesurés à des périodes synchrones.

Ces données concernent uniquement cinq formations géologiques sur les sept présentes sur la zone : aucune donnée n'est disponible pour l'unité hydrogéologique du Continental Terminal ni celle du Quaternaire.

L.3.2.1. Unité hydrogéologique de la formation de Firgoun

La profondeur moyenne de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun est de l'ordre de 31 mètres, avec un maximum de 42 mètres. 90% des ouvrages présentent une profondeur inférieure à 38 mètres.

Tableau 15 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun

Unité hydrogéologique de Firgoun	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur de nappe (m)	5	25,5	42,2	30,6	6,8	0,2	26,0	27,2	38,0

L.3.2.2. Unité hydrogéologique de la formation de Béli

La profondeur moyenne de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Béli est de l'ordre de 28 mètres, avec un maximum de 40 mètres. 90% des ouvrages présentent une profondeur inférieure à 36 mètres.

Tableau 16 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Béli

Unité hydrogéologique de Béli	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur de nappe (m)	5	19,3	39,8	27,7	8,1	0,3	20,8	24,7	36,6

L.3.2.3. Unité hydrogéologique de la formation d'Irma

La profondeur moyenne de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma est de l'ordre de 26 mètres, avec un maximum de 47 mètres. 90% des ouvrages présentent une profondeur inférieure à 44 mètres.

Tableau 17 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma

Unité hydrogéologique d'Irma	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur de nappe (m)	8	2,3	47,3	25,8	14,8	0,5	10,6	27,1	43,6

L.3.2.4. Unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré

La profondeur moyenne de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré est de l'ordre de 25 mètres, avec un maximum de 45 mètres. 90% des ouvrages présentent une profondeur inférieure à 38 mètres.

Tableau 18 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré

Unité hydrogéologique de Sarnyéré	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur de nappe (m)	38	5,1	44,6	24,5	9,1	0,3	13,0	24,8	37,7

L.3.2.5. Unité hydrogéologique de la formation de Massi

La profondeur moyenne de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Massi est de l'ordre de 49 mètres, avec un maximum de 69 mètres. 90% des ouvrages présentent une profondeur inférieure à 64 mètres.

On observe donc des profondeurs de nappe significativement plus importantes que dans les 4 autres unités hydrogéologiques, et par conséquent une accessibilité plus limitée à la ressource en eau souterraine.

Tableau 19 : Profondeurs de nappe dans l'unité hydrogéologique de la formation de Massi

Unité hydrogéologique de Massi	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur de nappe (m)	7	25,4	69,1	49,0	13,9	0,2	35,0	49,4	63,5

L.3.2.6. Synthèse sur le bassin sédimentaire du Nord

Le niveau de nappe moyen du bassin sédimentaire du Nord, calculé à partir de 63 ouvrages, est d'environ 28 mètres avec un maximum de 69 mètres. 90% des ouvrages présentent une profondeur inférieure à 45 mètres.

L'accessibilité à la ressource en eau souterraine est donc modérément favorable de ce point de vue, les niveaux de nappe moyens étant significativement plus profonds que ceux rencontrés dans les bassins du sédimentaire de l'Est et de l'Ouest.

Tableau 20 : Synthèse des profondeurs de nappe dans le bassin sédimentaire du Nord

Global sédimentaire Nord	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur de nappe (m)	63	2,3	69,1	28,2	12,6	45%	14,3	25,8	44,1

Le graphique repris en Figure 42 ci-après met en évidence les profondeurs moyennes de nappe relativement élevées rencontrées dans le bassin sédimentaire du Nord.

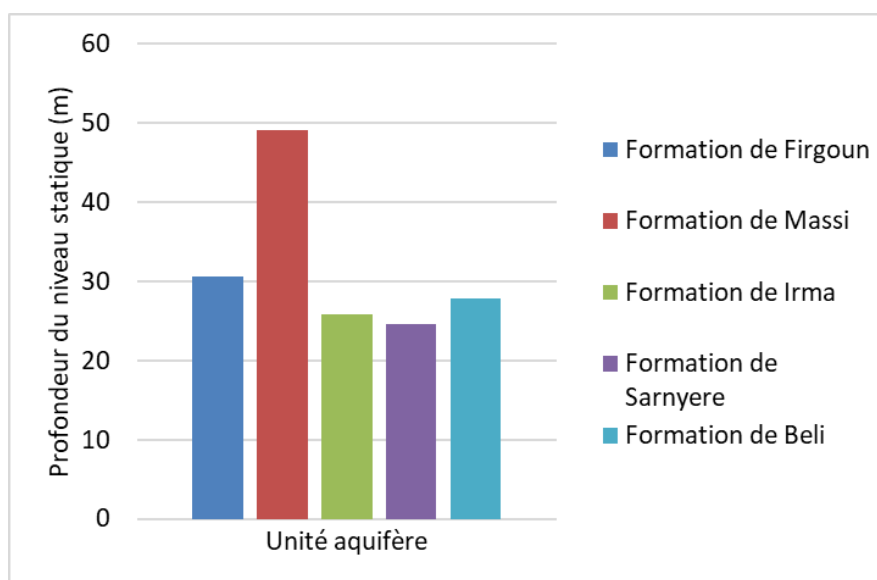
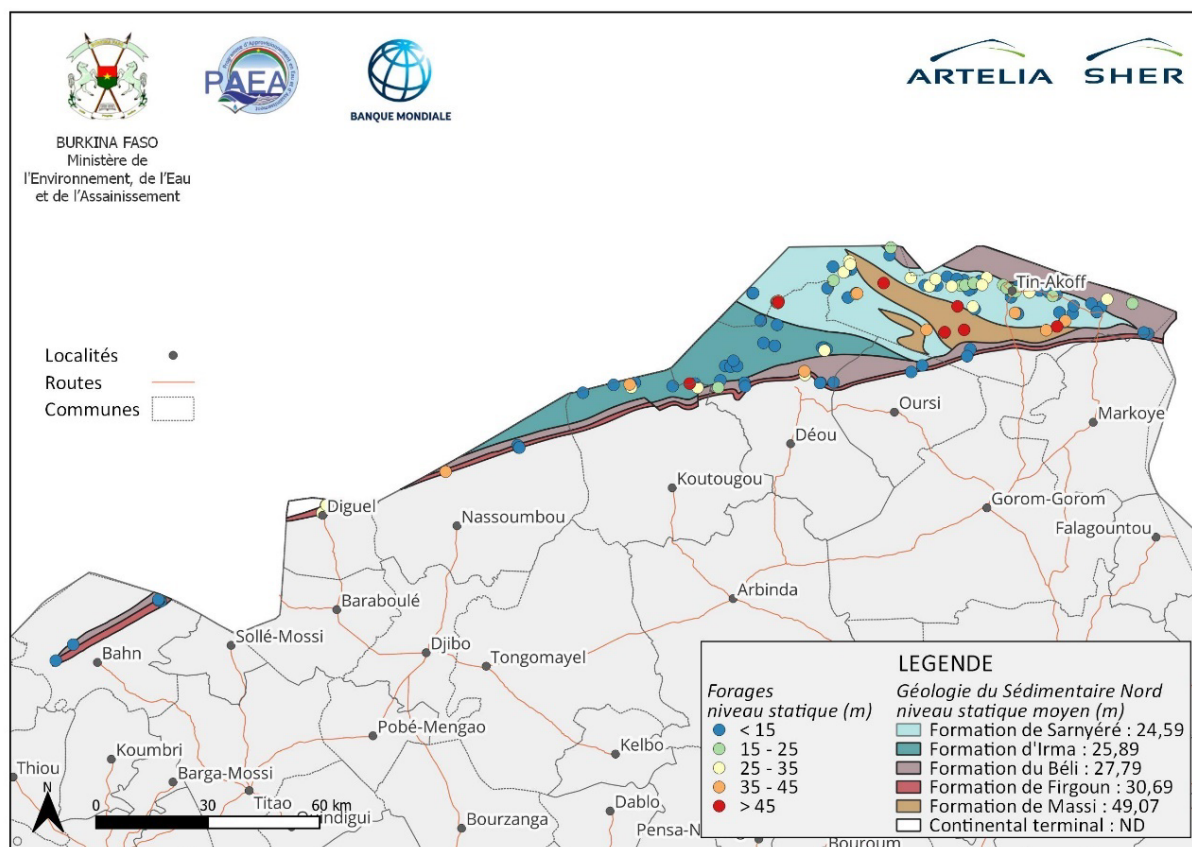


Figure 42 : Profondeurs moyennes du niveau de nappe par unité hydrogéologique

La carte présentée ci-après illustrent la distribution spatiale des profondeurs de nappe, ainsi que les moyennes par unité hydrogéologique.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, OMES 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 43 : Distribution spatiale des profondeurs de niveau statique du bassin sédimentaire du Nord

L.3.3. Productivité des aquifères et paramètres hydrodynamiques

L'évaluation de la productivité des différentes unités hydrogéologiques a été réalisée sur la base d'une analyse des débits de forage, ainsi que des paramètres hydrodynamiques.

Les données de débits concernent uniquement cinq formations hydrogéologiques. Aucune donnée n'est disponible pour l'unité hydrogéologique du Continental Terminal ni celle du Quaternaire.

Au niveau des paramètres hydrodynamiques, seules des données de transmissivité et de coefficient d'emménagement sont disponibles, et elles sont limitées à la zone du forage Christine (formation d'Irma).

La distribution des classes de valeurs des paramètres, réalisée selon la classification CIEH, est présentée dans les 3 tableaux ci-après Tableau 22 (Yao et al., 2010 ; Mboudou, 2017).

Tableau 21 : Classification des transmissivités selon CIEH

Intervalles	Classe
$T \text{ (m}^2/\text{s)} < 10^{-5}$	Faible
$10^{-5} < T \text{ (m}^2/\text{s)} < 10^{-4}$	Moyenne
$T \text{ (m}^2/\text{s)} > 10^{-4}$	Elevée

Tableau 22 : Classification des débits selon CIEH

Intervalles	Classe
$Q \text{ (m}^3/\text{h)} < 1$	Débits très faibles
$1 < Q \text{ (m}^3/\text{h)} < 2,5$	Débits faibles
$2,5 < Q \text{ (m}^3/\text{h)} < 5$	Débits moyens
$5 < Q \text{ (m}^3/\text{h)} < 10$	Débits forts
$Q \text{ (m}^3/\text{h)} > 10$	Débits très forts

Tableau 23 : Classification des débits spécifiques selon CIEH

Intervalles	Classe
$Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} < 0,1$	Domaine de l'hydraulique villageoise
$0,1 < Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} < 0,36$	Domaine de la petite hydraulique agricole
$0,36 < Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} < 1$	Domaine de l'hydraulique agricole
$Q_s \text{ (m}^3/\text{h/m)} > 1$	Domaine de l'hydraulique urbaine

L.3.3.1. Unité hydrogéologique de la formation de Firgoun

L'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun est caractérisée par des débits moyens de l'ordre de 4 m³/h, avec un maximum de 15 m³/h. 50 % des ouvrages présentent des débits inférieurs à 1,5 m³/h.

Tableau 24 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Firgoun

Formation de Firgoun	Nombre forages	Min	Max	Moy	P10	P50	P90
Débit (m ³ /h)	9	0,6	15,0	4,3	0,8	1,5	11,6

La Figure 44 présente les fréquences des débits de la formation de Firgoun. Les débits forts (5-10 m³/h) et moyens (2,5-5 m³/h) représentent chacun 22 % des données observées, alors que les débits faibles (1-2,5 m³/h) et très faibles (inf à 1 m³/h) représentent respectivement des fréquences de 33 % et 22%, soit plus de 50% au total des ouvrages. On constate qu'il n'y a pas de débits très forts (sup à 10 m³/h).

La productivité de cette unité est donc relativement limitée, avec 50% des ouvrages présentant des débits inférieurs à 1.5 m³/h.

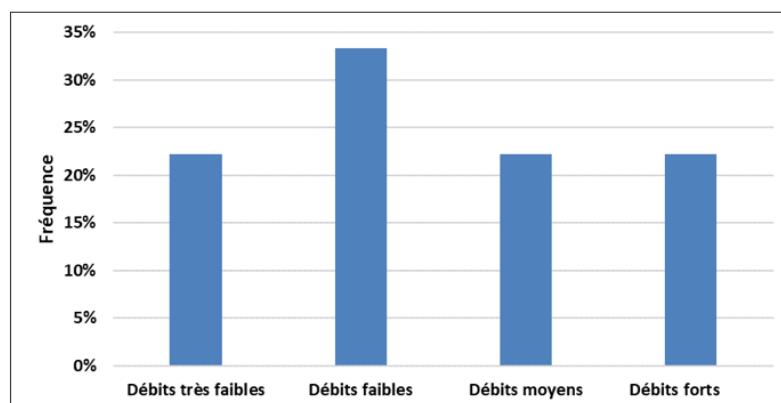


Figure 44 : Classification des débits de l'aquifère de Firgoun

L.3.3.2. Unité hydrogéologique de la formation de Béli

L'unité hydrogéologique de la formation de Béli est caractérisée par des débits moyens de l'ordre de 4 m³/h, avec un maximum de 29 m³/h. 50 % des ouvrages présentent des débits inférieurs à 1,5 m³/h.

Tableau 25 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Béli

Formation de Béli	Nombre forages	Min	Max	Moy	P10	P50	P90
Débit (m ³ /h)	12	0,2	28,8	4,4	0,7	1,4	7,0

On note une fréquence cumulée de débits faibles (1 à 2,5 m³/h) et très faibles débits (inf à 1 m³/h) de 60 %. Les débits forts (5 à 10 m³/h) et très forts (sup. à 10 m³/h) représentent 25% environ des ouvrages (Figure 45).

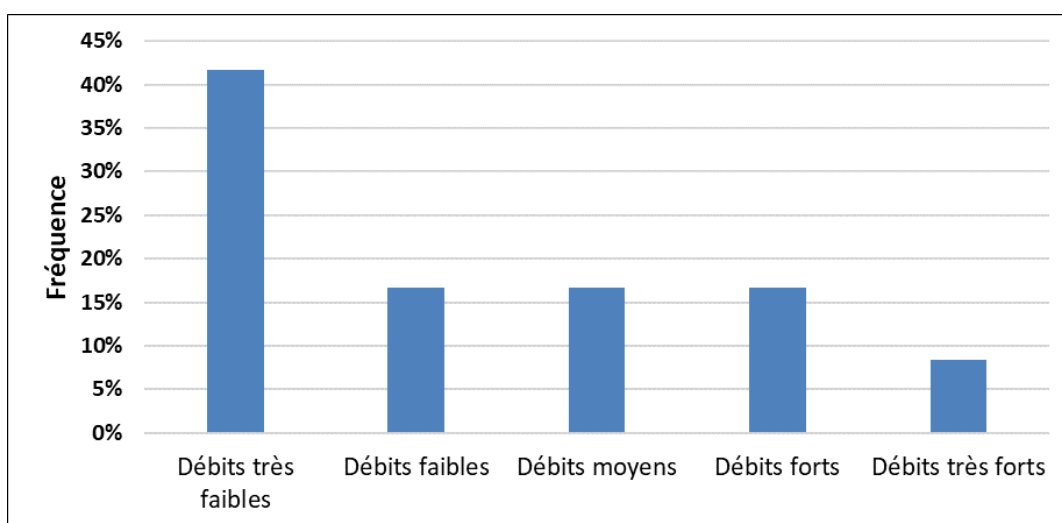


Figure 45 : Classification des débits de l'aquifère de Béli

La productivité de cette unité est donc relativement limitée, avec 50% des ouvrages présentant des débits inférieurs à 1.5 m³/h.

L.3.3.3. Unité hydrogéologique de la formation d'Irma

L'unité hydrogéologique de la formation d'Irma (en-dehors du site de forage 'Christine', traité distinctement dans le présent rapport) est caractérisée par des débits moyens de l'ordre de 7 m³/h, avec un maximum de 29 m³/h. 50% des ouvrages présentent des débits supérieurs à 3 m³/h.

Tableau 26 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation d'Irma

Formation d'Irma	Nombre forages	Min	Max	Moy	P10	P50	P90
Débit (m ³ /h)	15	0,53	28,80	6,88	0,54	3,00	18,00

La Figure 46 présente les fréquences des débits de la formation d'Irma. On notera que les débits très forts (sup à 10 m³/h) à moyens (2,5-5 m³/h) représentent au total cumulé plus de 65 % des ouvrages, ce qui tend à confirmer le potentiel d'exploitation relativement élevé de cette unité hydrogéologique.

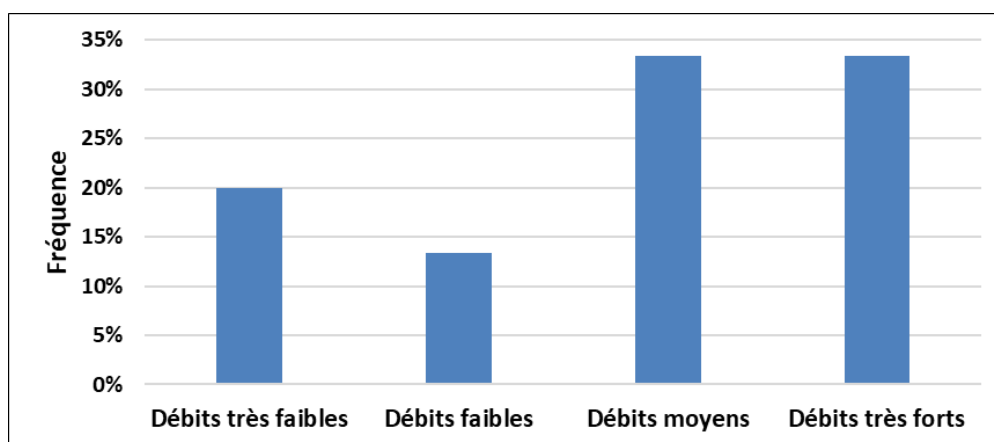


Figure 46 : Classification des débits de l'aquifère d'Irma

On notera toutefois que ces statistiques ne tiennent (volontairement) pas compte du site du forage Christine, étant donné la spécificité très locale des résultats observés au droit de ce site caractérisé par un contexte karstique très marqué. Pour rappel, et comme détaillé dans la section spécifique consacrée au site de forage Christine, les débits d'exploitation potentiels dans la zone du forage Christine peuvent atteindre 50 à 200 m³/h, avec des débits spécifiques souvent supérieurs à 50 m³/h/m et une transmissivité calculée de l'ordre de 10⁻² à 10⁻¹ m²/s.

Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère carbonaté sont donc très bonnes, et même excellentes dans les zones les plus karstifiées telles que celles rencontrées au niveau du forage Christine.

Les résultats des essais de pompage menés sur le site du forage Christine indiquent également que la nappe y est libre, avec des coefficients d'emménagement de l'ordre de 0.01 à 0.03.

L.3.3.4. Unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré

L'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré est caractérisée par des débits moyens de l'ordre de 6 m³/h, avec un maximum de 39 m³/h. Tout comme pour la formation d'Irma, 50% des ouvrages présentent des débits supérieurs à 3 m³/h.

Tableau 27 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré

Formation de Sarnyéré	Nombre forages	Min	Max	Moy	P10	P50	P90
Débit (m ³ /h)	52	0,4	39,2	5,8	0,8	3,2	12,0

La Figure 47 présente les fréquences des débits de la formation de Sarnyéré. On notera que les débits très forts (sup à 10 m³/h) à forts (5-10 m³/h) représentent au total cumulé plus de 40 % des ouvrages, ce qui tend à confirmer le potentiel d'exploitation relativement élevé de cette unité hydrogéologique.

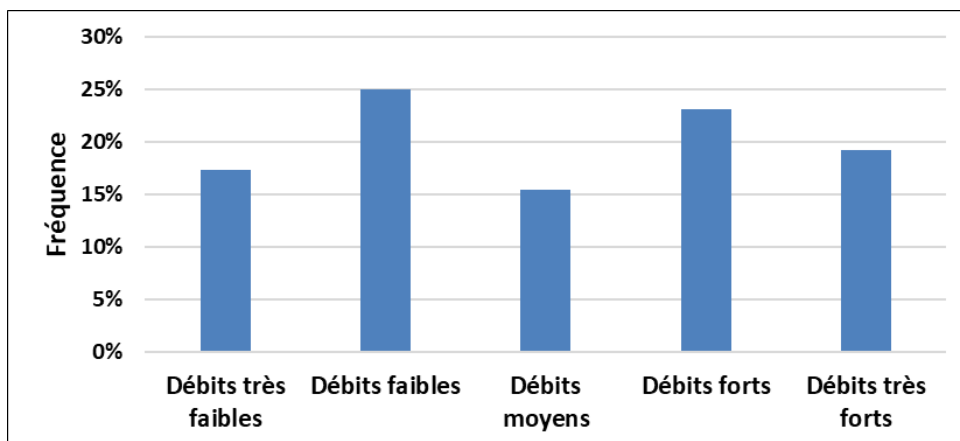


Figure 47 : Classification des débits de l'aquifère de Sarnyéré

Les caractéristiques hydrodynamiques et les potentialités aquifères de la formation de Sarnyéré sont assez similaires à celles de la formation d'Irma. En effet, ces deux formations superposées qui sont en continuité hydraulique présentent une lithologie assez similaire de calcaires dolomitiques, plus ou moins karstifiés selon les zones et les niveaux.

L.3.3.5. Unité hydrogéologique de la formation de Massi

L'unité hydrogéologique de la formation de Massi est caractérisée par des débits moyens de l'ordre de 3 m³/h, avec un maximum de 7 m³/h. 50 % des ouvrages présentent des débits inférieurs à 2 m³/h.

Tableau 28 : Productivité de l'unité hydrogéologique de la formation de Massi

Formation de Massi	Nombre forages	Min	Max	Moy	P10	P50	P90
Débit (m ³ /h)	6	0,9	7,2	3,3	1,2	2,1	6,6

La Figure 48 présente les fréquences des débits de la formation de Massi. Les débits faibles (1-2,5 m³/h) à très faibles (inf à 1 m³/h) représentent ensemble plus de 65% des ouvrages.

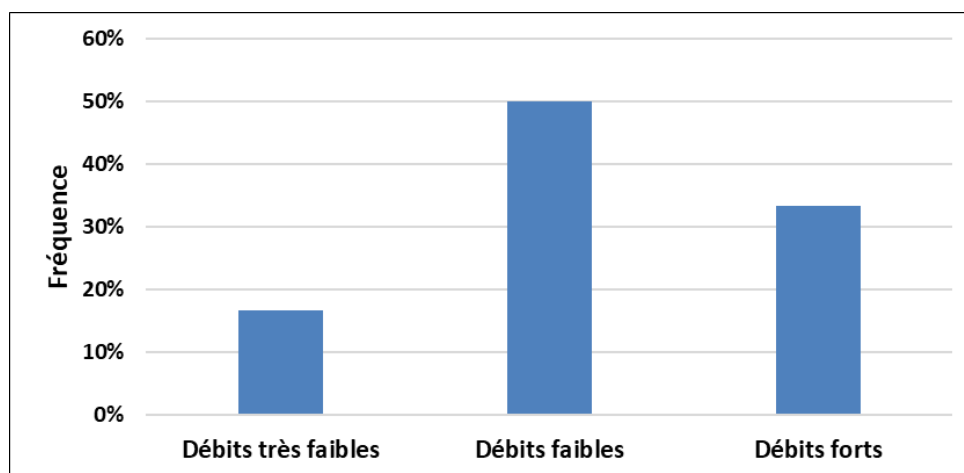


Figure 48 : Classification des débits de l'aquifère de Massi

L.3.3.6. Synthèse sur le bassin sédimentaire du Nord

Dans son ensemble, et à l'exclusion du site particulier de forage Christine (traité distinctement dans le présent rapport), le bassin sédimentaire du Nord est caractérisé par des débits moyens de l'ordre de 5,5 m³/h, avec un maximum de 39 m³/h.

Tableau 22 : Synthèse des valeurs des débit de pompage du bassin sédimentaire du Nord

Global sédimentaire Nord	Nombre forages	Min	Max	Moy	P10	P50	P90
Débit (m ³ /h)	94	0,2	39,2	5,5	0,7	2,5	12,0

Les unités hydrogéologiques d'Irma et de Sarnyéré présentent ensemble la moyenne de débits la plus élevée (de l'ordre de 6 à 7 m³/h), tandis que l'unité de la formation de Massi présente la moyenne de débits la plus faible (environ 3 m³/h).

On rappellera qu'aucune donnée n'est disponible pour les formations du Continental Terminal et du Quaternaire.

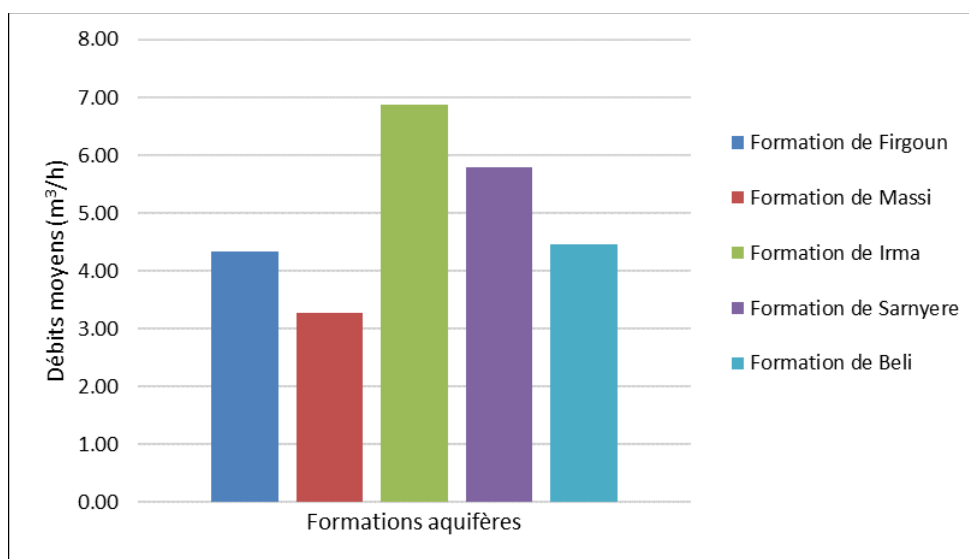


Figure 49 : Débits moyens observés dans chaque formation aquifère

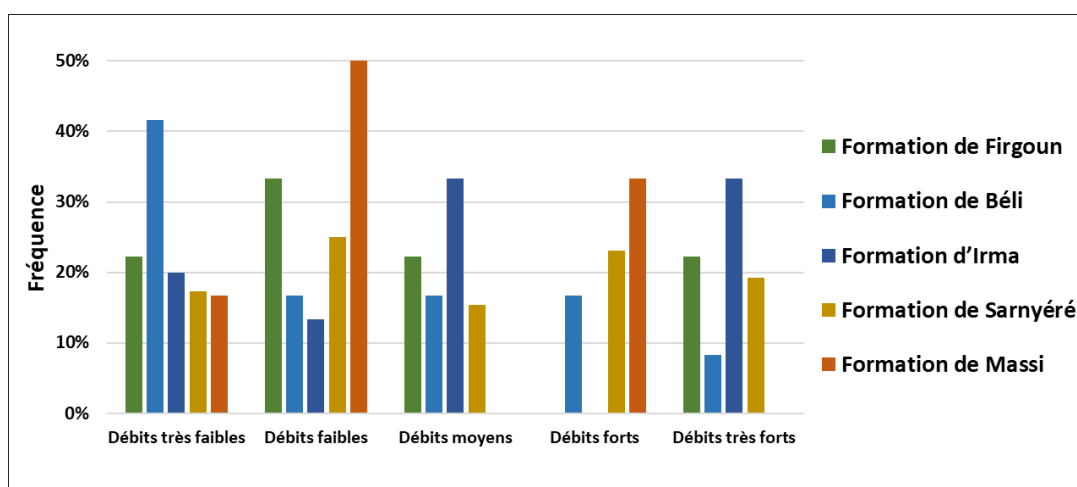


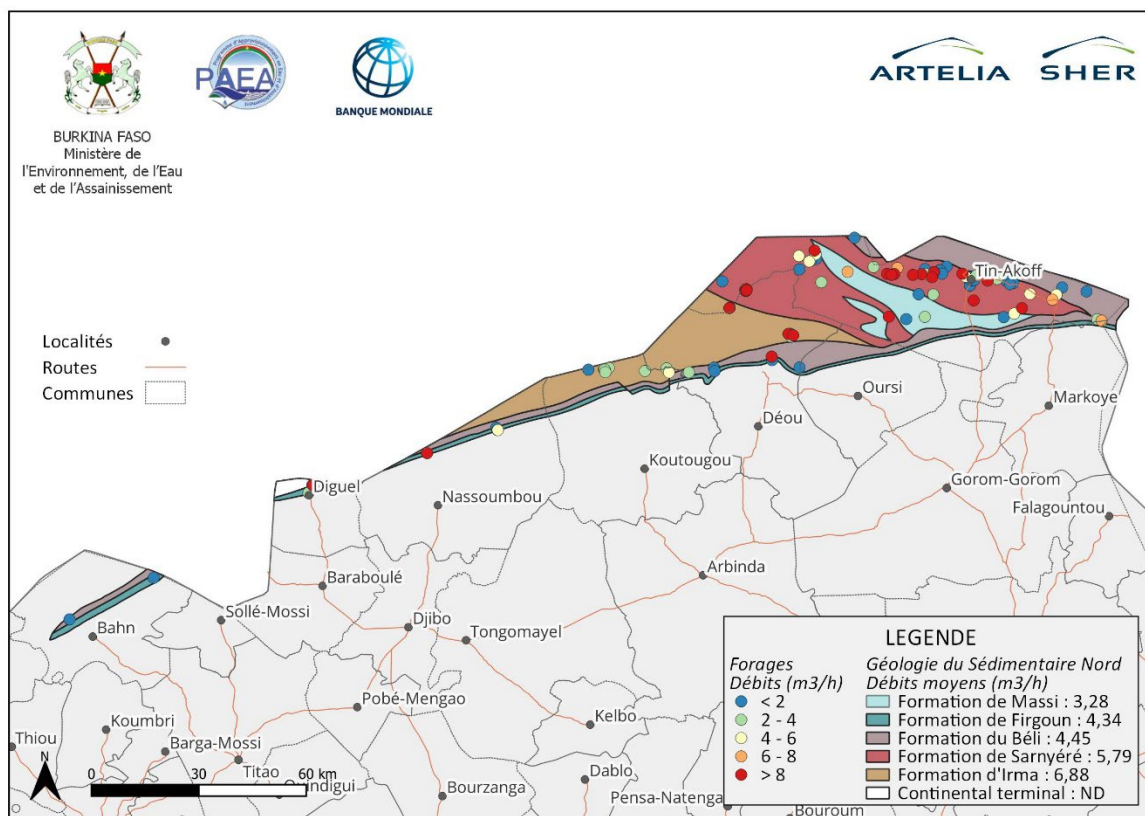
Figure 50 : Classes de débits par unité hydrogéologique

Ces observations permettent d'affirmer que les unités d'Irma et de Sarnyéré renferment l'aquifère le plus productif de la série sédimentaire du Nord.

C'est d'ailleurs dans ces formations carbonatées, localement karstifiées, que l'on trouve les forages très productifs du site « Christine ». Pour rappel, et comme détaillé dans la section spécifique consacrée au site de forage Christine, les débits d'exploitation potentiels dans la zone du forage Christine peuvent en effet atteindre 50 à 200 m³/h, avec des débits spécifiques souvent supérieurs à 50 m³/h/m et une transmissivité calculée de l'ordre de 10⁻² à 10⁻¹ m²/s.

Les propriétés hydrodynamiques de cet aquifère carbonaté sont donc très bonnes, et même excellentes dans les zones les plus karstifiées telles que celles rencontrées au niveau du forage Christine.

La carte reprise ci-après illustrent la distribution spatiale, et les valeurs moyennes par unité hydrogéologique des débits.



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, OMES 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 51 : Distribution spatiale des débits du bassin sédimentaire du Nord

L.3.4.Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères du bassin sédimentaire du Nord

Le Tableau 29 présente la synthèse des caractéristiques hydrogéologiques du bassin sédimentaire du Nord (compte non-tenu du site de forage Christine, traité distinctement dans le présent rapport).

On notera qu'aucune donnée de coefficient d'emménagement n'est disponible, ce qui limite les possibilités d'évaluation du caractère libre ou captif des aquifères rencontrés. Les parties supérieures des aquifères (50 à 100 premiers mètres), telles qu'exploitées par les différents forages répertoriés, laissent toutefois supposer que les nappes présentent un caractère libre dans ces parties supérieures captées.

Les communications hydrauliques entre les différents aquifères du bassin sédimentaire du Nord sont également peu caractérisées. Les niveaux schisto-argileux présents dans certaines formations du bassin

peuvent limiter la communication hydraulique entre les différents niveaux aquifères. Les données restent toutefois lacunaires, au niveau de cette évaluation.

Tableau 29 : Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères du bassin sédimentaire du Nord

Global sédimentaire Nord	Nombre forages	Min	Max	Moy	Ecart-type	CV (%)	P10	P50	P90
Profondeur forages (m)	118	8,0	130,0	63,0	22,4	36%	37,7	63,0	89,0
Épaisseur altération (m)	143	1,0	63,9	14,6	11,8	81%	3,8	12,0	28,0
Épaisseur altération saturée (m)	60	0,0	29,3	1,2	4,6	384%	0,0	0,0	0,4
Niveau Statique (m)	63	2,3	69,1	28,2	12,6	45%	14,3	25,8	44,1
Débit (m ³ /h)	94	0,2	39,2	5,4	6,8	124%	0,6	2,5	12,0

Le tableau ci-après reprend la synthèse des caractéristiques hydrogéologiques particulières relatives à la zone karstique du forage « Christine » (formation d'Irma).

Tableau 30 : Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques du site « Christine »

Nbre forages	Débits testés (m ³ /h)	Rabatement correspondant (m)	Débit spécifique (m ³ /h/m)	NS (m)	Transmissivité (m ² /s)	Coeff emmagas.
5	18 à 110	0.11 à 0.32	100 à 900	31 à 38	10 ⁻² à 10 ⁻¹	0.01 à 0.03

M. SUIVI ET ÉVOLUTION DES EAUX SOUTERRAINES

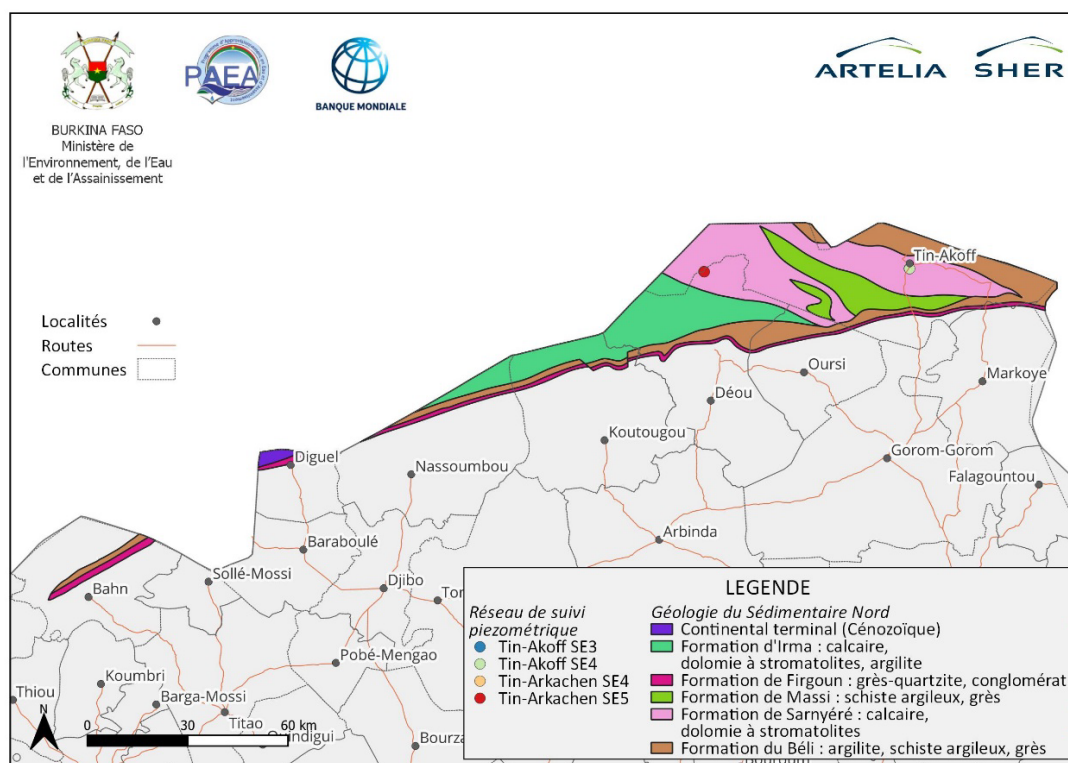
M.1. Suivi de la piézométrie

Le suivi de la piézométrie du bassin sédimentaire du Nord est assuré au travers du réseau piézométrique national (RPN) de la DEIE. Il s'agit du seul réseau de suivi disposant d'ouvrages de suivi dans cette zone.

Deux sites de suivi piézométrique, appartenant au RPN, sont localisés dans le bassin sédimentaire du Nord. Il s'agit des sites de Tin-Akoff (équipé en 2009) et de Tin-Arkachen (équipé en 2012). La figure ci-après illustre la localisation des deux sites.

Chacun de ces deux sites compte deux piézomètres, l'un étant situé en bas-fond, et l'autre en plateau. Le nombre total de piézomètres du RPN sur le bassin sédimentaire du Nord est donc de 4 points de mesures : Tin-Akoff SE3, Tin-Akoff SE4, Tin-Arkachen SE4, Tin-Arkachen SE5.

Les piézomètres des sites de Tin-Akoff et de Tin-Arkachen sont tous deux implantés dans la formation de Sarnyéré (calcaires dolomités).



Le Tableau 31 ci-après reprend les principales caractéristiques des piézomètres. Leur profondeur est d'environ 66 mètres à Tin-Akoff et de 151 et 122 mètres à Tin-Arkachen. Ils sont crépinés dans l'unité hydrogéologique de la formation de Sarnyéré.

La période de suivi démarre en 2009 pour le site de Tin-Akoff et en 2012 pour le site de Tin-Arkachen. Le suivi de ces dernières années n'est pas régulier, et est entravé par les problèmes d'accès aux sites liés à l'insécurité de la zone du Nord.

Tableau 31 . Caractéristiques des piézomètres du bassin sédimentaire du Nord

Province	Nom Piézo	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Altitude (m)	Prof (m)	Formation	Période de suivi
Oudalan	Tin-Akoff SE3	14°57'08"N	00°09'54.3"W	274.19	66,7	Sarnyéré	Depuis 2009
Oudalan	Tin-Akoff SE4	14°57'7.2"N	00°09'51.7"W	271.64	66,2	Sarnyéré	Depuis 2009
Oudalan	Tin-Arkachen SE4	14°57'2.2"N	00°44'8.7"W	274.88	122,5	Sarnyéré	Depuis 2012
Oudalan	Tin-Arkachen SE5	14°56'59.2"N	00°44'4.8"W	279.81	151,2	Sarnyéré	Depuis 2012

M.2. Variations temporelles de la piézométrie

L'analyse des variations temporelles des niveaux de nappe est présentée ci-après, pour les deux sites du RPN.

M.2.1. Site de Tin-Akoff

La Figure 53 illustre les fluctuations de la piézométrie observées de 2009 à 2020 dans le piézomètre de Tin-Akoff SE3, implanté dans la formation de Sarnyéré. La figure reprend également la pluviométrie mensuelle associée à la période de mesures de niveaux de nappe.

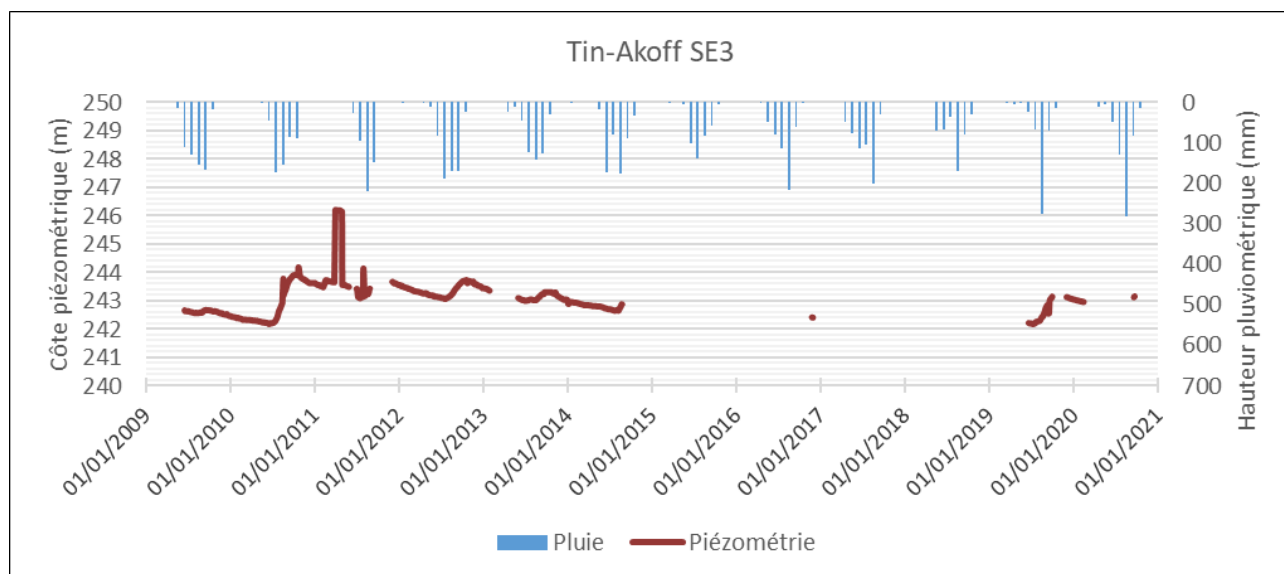


Figure 53 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Akoff SE3, et de la pluviométrie mensuelle

Entre 2009 et 2014, on observe des fluctuations piézométriques globales de l'ordre de 2 mètres.

Le Tableau 32 ci-après reprend les statistiques annuelles principales relatives aux niveaux de nappe de Tin-Akoff SE3. On observe que la variation saisonnière est très variable, de 0,2 m à 3 mètres.

Tableau 32 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Akoff SE3

Année	Moyenne (m)	Min (m)	Max (m)	Variation saisonnière (m)	Écart-type	Coef Variation
2020	31,2	31,0	31,2	0,2	0,1	0%
2019	31,6	31,0	32,0	1,0	0,4	1%
2014	31,4	31,2	31,8	0,6	0,1	0%
2013	31,0	30,7	31,2	0,5	0,1	0%
2012	30,8	30,5	31,1	0,6	0,2	1%
2011	30,3	28,0	31,1	3,1	1,0	3%
2010	31,3	30,0	32,0	2,0	0,7	2%
2009	31,6	31,5	31,7	-	0,1	0%

La Figure 54 illustre les fluctuations de la piézométrie observées de 2009 à 2020 dans le piézomètre de Tin-Akoff SE4, implanté dans la formation de Sarnyéré. La figure reprend également la pluviométrie mensuelle associée à la période de mesures de niveaux de nappe.

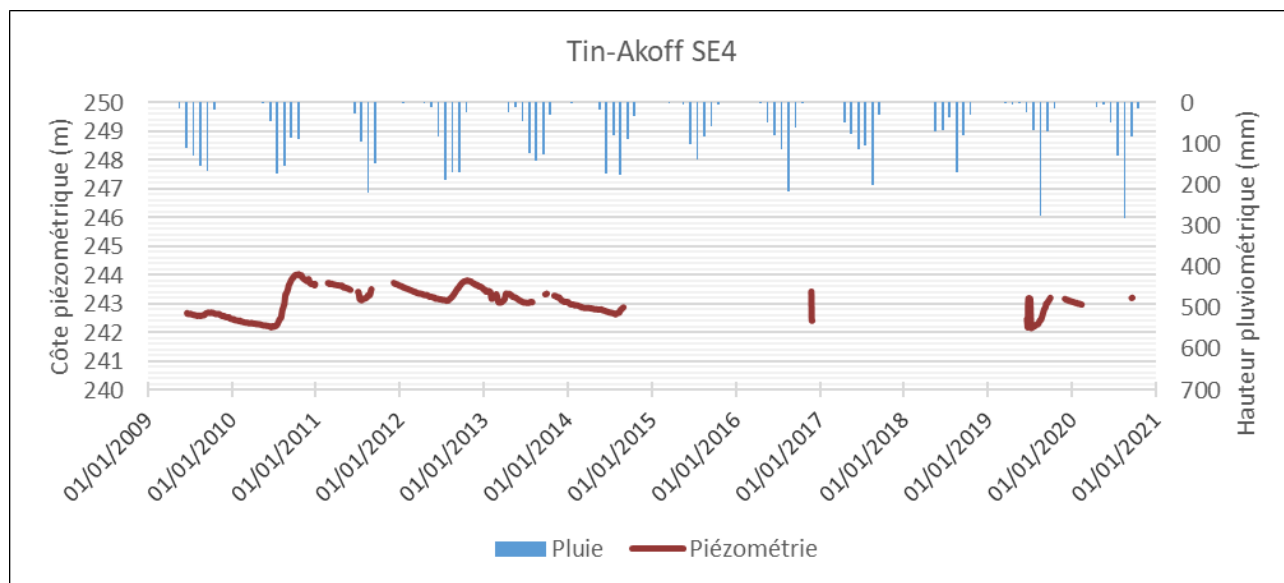


Figure 54 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Akoff SE4, et de la pluviométrie mensuelle

Entre 2009 et 2014, on observe des fluctuations piézométriques de l'ordre de 2 mètres.

Le Tableau 32 ci-après reprend les statistiques annuelles principales relatives aux niveaux de nappe du piézomètre Tin-Akoff SE4. On observe que la variation saisonnière est très variable, de 0,3 m à 1,9 mètres.

Tableau 33 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Akoff SE4

Année	Moyenne (m)	Min (m)	Max (m)	Variation saisonnière (m)	Écart-type	Coef Variation
2020	28,6	28,4	28,7	0,3	0,1	0%
2019	28,9	28,4	29,5	1,1	0,4	1%
2016	28,9	28,2	29,2	1,0	0,6	2%
2014	28,8	28,6	29,0	0,4	0,1	0%
2013	28,4	28,2	28,6	0,4	0,1	0%
2012	28,2	27,8	28,5	0,7	0,2	1%
2011	28,1	27,9	28,5	0,6	0,2	1%
2010	28,7	27,6	29,5	1,9	0,7	3%
2009	29,0	28,9	29,2	0,3	0,1	0%

La Figure 55 illustre également les fluctuations de la piézométrie observées de 2009 à 2020 au niveau des deux piézomètres, mais avec la pluviométrie annuelle associée à la période de mesures de niveaux de nappe.

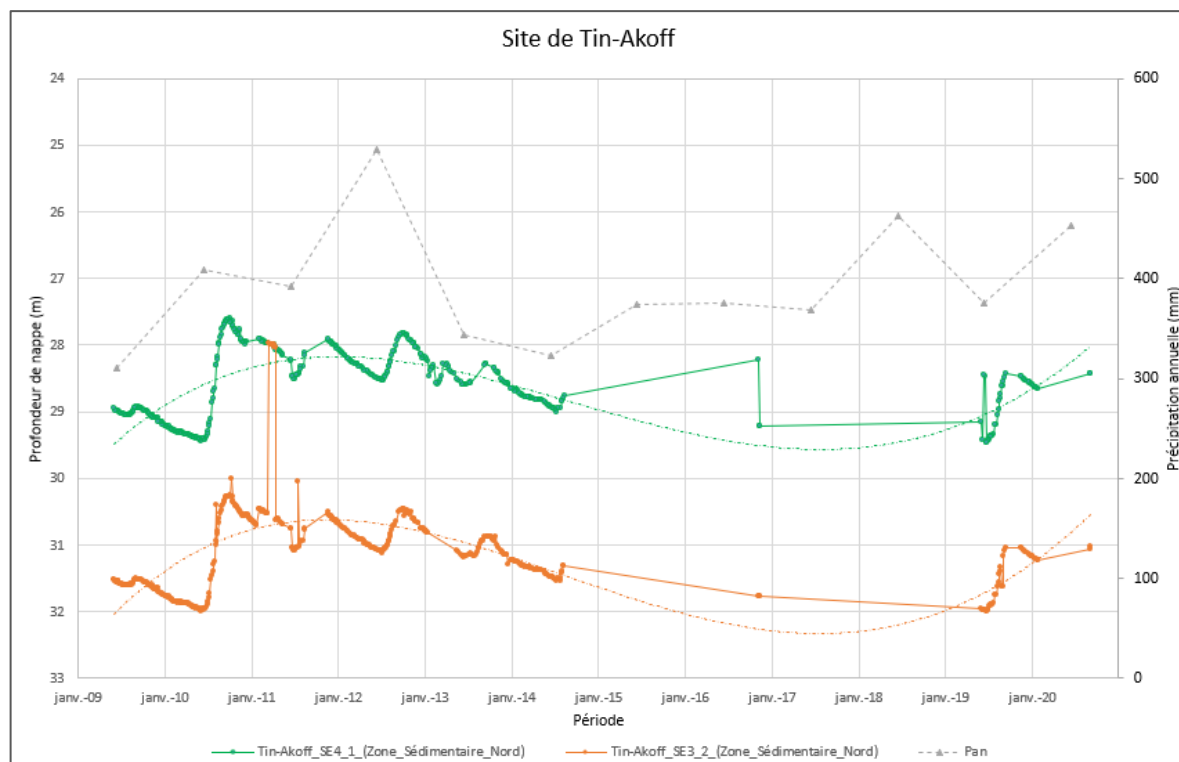


Figure 55 : Chroniques du niveau statique dans les piézomètres du site de Tin-Akoff et courbe de tendance polynomiale, et pluviométrie annuelle

Les mesures des piézomètres Tin-Akoff SE3 et Tin-Akoff SE4 ont été très irrégulières depuis 2009, avec essentiellement des données relativement continues entre juillet 2009 et août 2014, suivies par une période de 5 ans (2014 à 2019) présentant très peu de mesures. Une reprise des mesures fréquentes a ensuite été opérée, depuis mi-2019.

Au total, environ 460 mesures sont disponibles sur chacun des deux piézomètres de 2009 à 2020.

Sur le plan climatique, le site piézométrique se trouve dans la zone sahélienne, avec une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 380 mm et des maxima au mois d'août.

On observe des variations saisonnières assez franches et cycliques, avec des maxima de niveaux piézométriques observés entre octobre et novembre et des minima observés entre juillet et août. Le début de remontée saisonnière de la nappe est généralement observé début à mi-juillet, tandis que le début de la descente saisonnière est généralement observé début novembre. L'amplitude saisonnière moyenne est de l'ordre de 0.5 mètres.

Le léger décalage entre le début de la saison des pluies et le début de remontée de la nappe, qui s'observe également entre le pic pluviométrique et le pic piézométrique, est essentiellement dû à la profondeur de nappe rencontrée dans cette zone (environ 30 mètres). Il correspond donc principalement au transfert vertical de flux des précipitations dans la zone insaturée.

Le comportement de la nappe au droit des deux piézomètres est très similaire et très synchrone. Il indique les mêmes cycles saisonniers, et de manière globale une tendance à la baisse de la nappe de 2011 à 2019 avec des niveaux annuels moyens qui ont perdu environ 1 mètre sur cette période. La tendance ultérieure reste incertaine, étant donné le peu de mesures effectuées depuis mi-2019.

M.2.2. Site de Tin-Arkachen

La Figure ci-après illustre les fluctuations de la piézométrie observées au piézomètre de Tin-Arkachen SE4, implanté dans les formations calcaires de Sarnyéré, pour la période de 2012 à fin 2018. La figure reprend également la pluviométrie mensuelle associée à la période de mesures de niveaux de nappe.

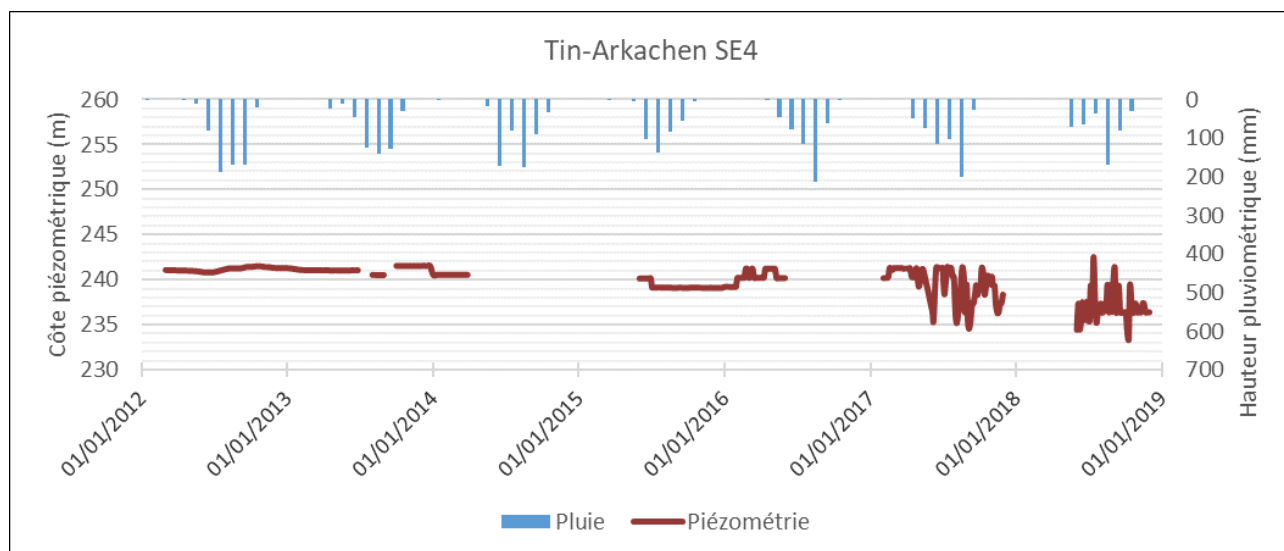


Figure 56 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Arkachen SE4, et de la pluviométrie mensuelle

On observe plusieurs périodes de lacunes de mesures (avril 2014 à juin 2015, juin 2016 à février 2017, novembre 2017 à juin 2018).

Entre 2012 et 2014 puis entre 2015 et 2016, on observe un niveau relativement stable et très peu de fluctuations piézométriques saisonnières. À partir de 2017, on observe par contre des fluctuations beaucoup plus marquées, pouvant dépasser 5 mètres d'amplitude intra-saisonnière.

Le tableau ci-après reprend les statistiques annuelles principales relatives aux niveaux de nappe. On observe que la variation saisonnière est de l'ordre d'un mètre jusque 2016, puis beaucoup plus importante à partir de 2017 (6 à 9 mètres).

Tableau 34 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Arkachen SE4

Année	Moyenne (m)	Min (m)	Max (m)	Variation saisonnière (m)	Écart-type	Coef Variation
2018	34,7	29,1	38,3	9,2	1,6	5%
2017	32,1	30,2	37,1	6,9	2,0	6%
2016	31,4	30,4	32,5	2,1	0,7	2%
2015	32,4	31,5	32,6	1,1	0,3	1%
2014	31,1	31,1	31,1	0,0	0,0	0%
2013	30,5	30,1	31,1	1,0	0,3	1%
2012	30,4	30,1	30,8	0,7	0,2	1%

La Figure 57 illustre les fluctuations de la piézométrie observées au piézomètre de Tin-Arkachen SE5, implanté dans les formations calcaires de Sarnyéré, pour la période de 2012 à fin 2018. La figure reprend également la pluviométrie mensuelle associée à la période de mesures de niveaux de nappe.

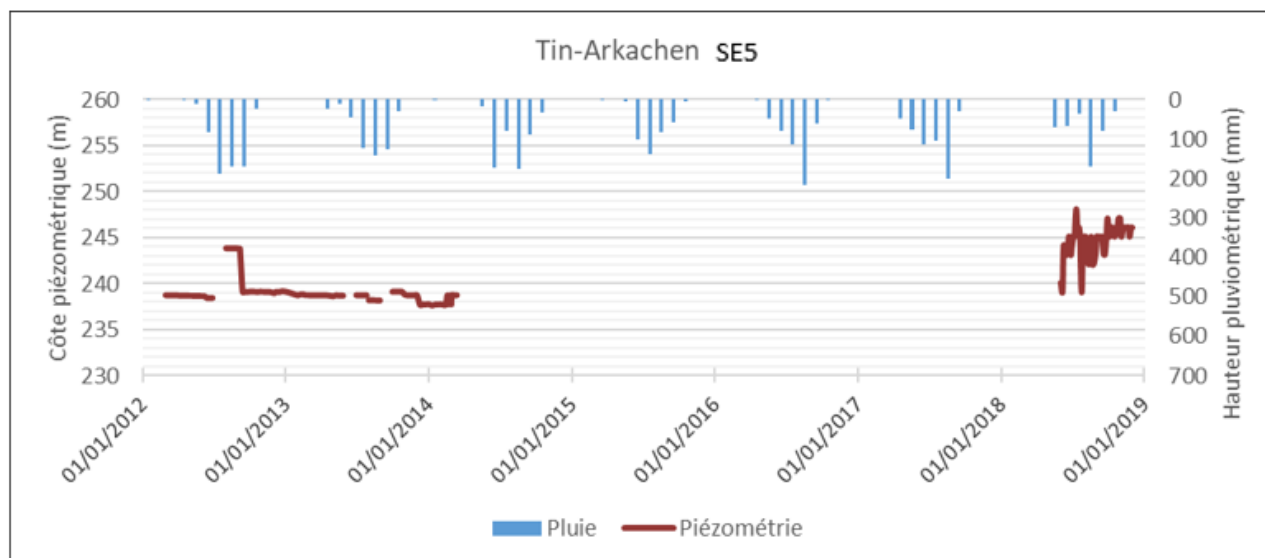


Figure 57 : Chroniques du niveau statique dans le piézomètre de Tin-Arkachen SE5, et de la pluviométrie mensuelle

On observe une longue période de lacunes de mesures (avril 2014 à juin 2018).

Entre 2012 et 2014, on observe un niveau relativement stable et très peu de fluctuations piézométriques saisonnières. A partir de 2018, on observe par contre des fluctuations beaucoup plus marquées, pouvant dépasser 5 mètres d'amplitude intra-saisonnière.

Le Tableau 32 ci-après reprend les statistiques annuelles principales relatives aux niveaux de nappe.

Tableau 35 : Statistiques annuelles de la piézométrie à Tin-Arkachen SE3

Année	Moyenne (m)	Min (m)	Max (m)	Variation saisonnière (m)	Écart-type	Coef Variation
2018	29,5	26,1	35,2	9,1	1,9	6%
2014	36,1	35,5	36,6	1,1	0,5	1%
2013	35,6	35,1	36,5	1,4	0,4	1%
2012	34,5	30,4	35,8	-	1,9	5%

La Figure 58 illustre également les fluctuations de la piézométrie observées de 2012 à fin 2018 au niveau des deux piézomètres, mais avec la pluviométrie annuelle associée à la période de mesures de niveaux de nappe.

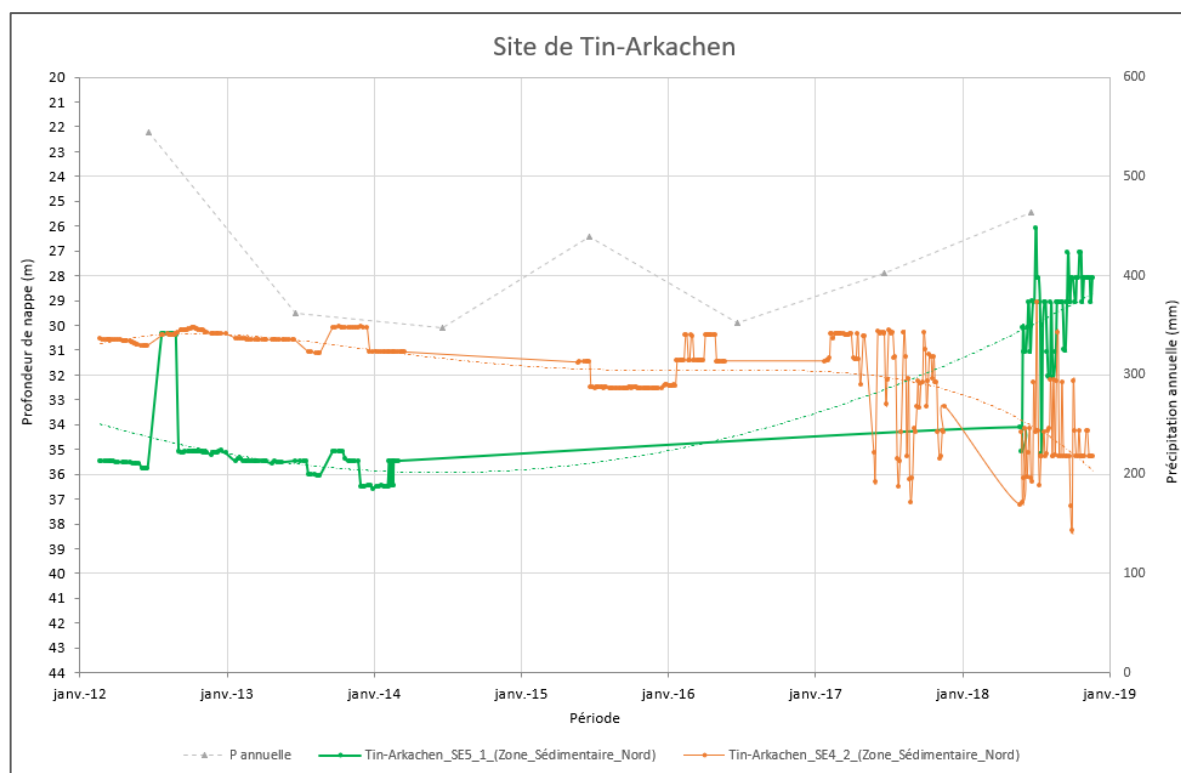


Figure 58 : Chroniques du niveau statique dans les piézomètres du site de Tin-Arkachen et courbe de tendance polynomiale, et pluviométrie annuelle

Les mesures des piézomètres Tin-Arkachen SE4 et SE5 ont été très irrégulières depuis 2012, avec essentiellement des données relativement continues entre 2012 et avril 2014, suivies par une période de 3 ans (mi-2014 à mi-2017) présentant très peu de mesures. Une reprise des mesures fréquentes a ensuite été opérée, depuis mi 2017, jusque fin 2018.

Au total, environ 350 mesures sont disponibles de 2012 à 2018 pour SE4, et 180 mesures pour SE5.

Sur le plan climatique, le site piézométrique se trouve dans la zone sahélienne, avec une pluviométrie annuelle moyenne de l'ordre de 380 mm et des maxima au mois d'août.

Sur la période 2012-2016, on observe un niveau relativement stable et pratiquement aucune variation saisonnière. Aucune corrélation de variation de niveaux de nappe avec les précipitations n'est donc observée sur cette période.

Sur la période de mesures plus récente, de mi 2017 à fin 2018, on observe des variations assez importantes de niveaux de nappe, très intra-saisonnières (cycles de fluctuations mensuelles voire intra-mensuelles). Ces variations, d'une amplitude pouvant dépasser 5 mètres sur une quinzaine de jours seulement, ne semblent pas corrélées aux précipitations et restent inexplicables. On constate de surcroît, sur cette même période, des comportements assez différents entre les piézomètres SE4 et SE5. Des pompages proches (non-répertoriés) pourraient être à l'origine de ces instabilités piézométriques. On notera notamment la présence du site de forage Christine, toutefois à une distance de 1.3 km qui semble trop élevée pour expliquer ces variations. Les périodes de mesures depuis mi 2017 ne sont pas suffisamment continues pour pouvoir analyser les éventuelles corrélations entre les fluctuations piézométriques serrées et les précipitations.

Remarque :

On peut soupçonner une inversion de la saisie des données de SE4 et SE5 à partir de mi 2018. En effet, si on inverse les données actuellement encodées telles que fournies par la DEIE, on obtient le graphique ci-après, qui semble plus cohérent dans l'allure générale.

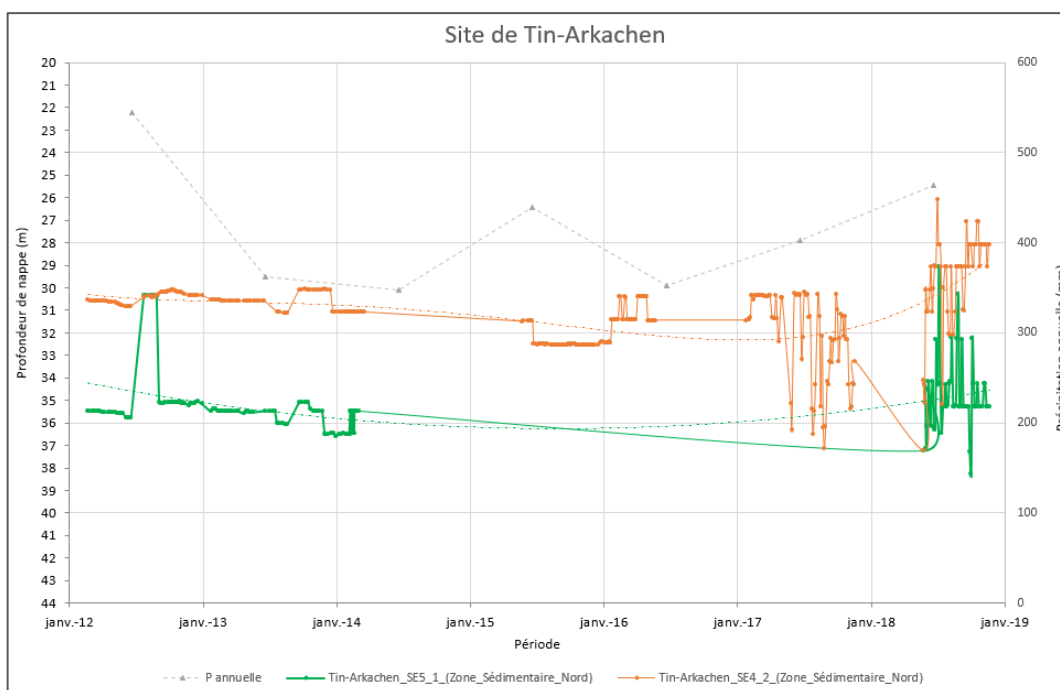


Figure 59 : Chroniques du niveau statique dans les piézomètres du site de Tin-Arkachen : tentative d'inversion des données de 2018

Les données d'août/septembre 2012 pour SE5 semblent également erronées, et correspondent à des mesures effectuées dans le SE4. Ces propositions de corrections seront soumises à la DEIE pour prise en compte dans la base de données centralisée de la DEIE.

N. HYDROCHIMIE

Les données disponibles sur l'hydrochimie des eaux souterraines du sédimentaire du Nord sont très peu nombreuses. La base de données OMES, et les autres bases de données disponibles sur les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines, comprennent très peu de données hydrochimiques. De surcroît, aucun point du réseau national de suivi de la qualité des eaux souterraines n'est situé dans le sédimentaire du Nord.

Les données disponibles, qui ont pu être valorisées dans le cadre de la présente étude, concernent d'une part des paramètres physico-chimiques extraits de la BD-OMES, et d'autre part des résultats d'analyses de la zone du forage Christine permettant de caractériser les faciès hydrochimiques. Les résultats sont repris ci-après.

N.1. Physico-chimie

Les données d'hydrochimie présentes dans la BD-OMES concernent uniquement quelques paramètres physico-chimiques, renseignés au niveau de 7 ouvrages.

Les résultats sont synthétisés dans le tableau ci-après.

Tableau 36 : Paramètres physiques des eaux du bassin sédimentaire du Nord selon des données OMES

OMES id	18371	18760	18761	18762	18763	18767	18768
Date analyses	08/07/10	07/02/05	10/01/05	07/01/05	06/01/05	08/01/05	08/01/05
Commune	DJIBO	TIN-AKOFF	TIN-AKOFF	TIN-AKOFF	TIN-AKOFF	TIN-AKOFF	TIN-AKOFF
Longitude	01°34'45,7"W	00°20'03"W	00°19'59"W	00°17'30"W	00°21'16"W	00°15'35"W	00°15'34"W
Latitude	14°32'26,5"N	14°52'00"N	14°52'05"N	14°58'50"N	14°59'49"N	14°59'06"N	14°59'09"N

Profondeur (m)	88,68	81,6	70,12	60,6	54,5	54,6	51,55
NS (m)	42,25	25,4	52,52	24,23	25,28	22,39	25
T °C		29,9	31,05	29,9	30,1	29,5	31,4
pH		7,3	6,9	6,7	6,8	6,6	6,8
CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	880	656	845	885	743	1085	694

N.1.1. Température

Les résultats des analyses d'eau des ouvrages montrent des valeurs de température comprises entre 29,5 °C et 31,4 °C.

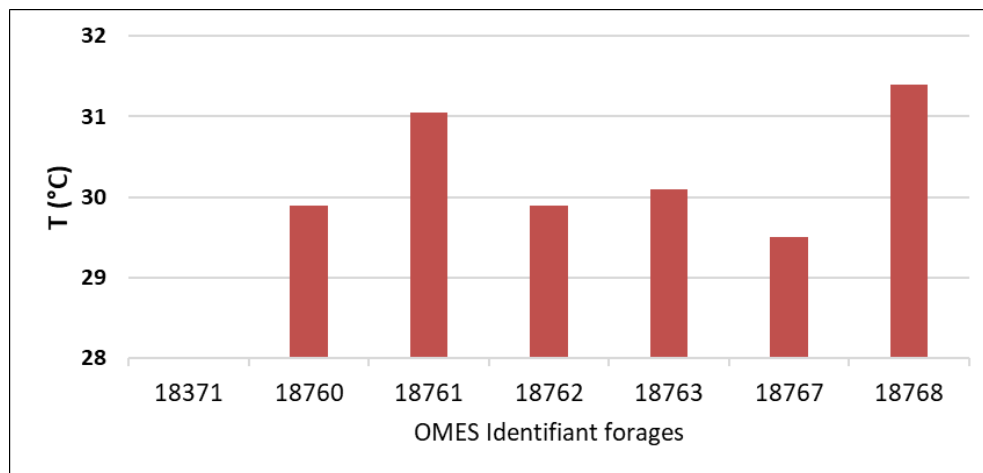
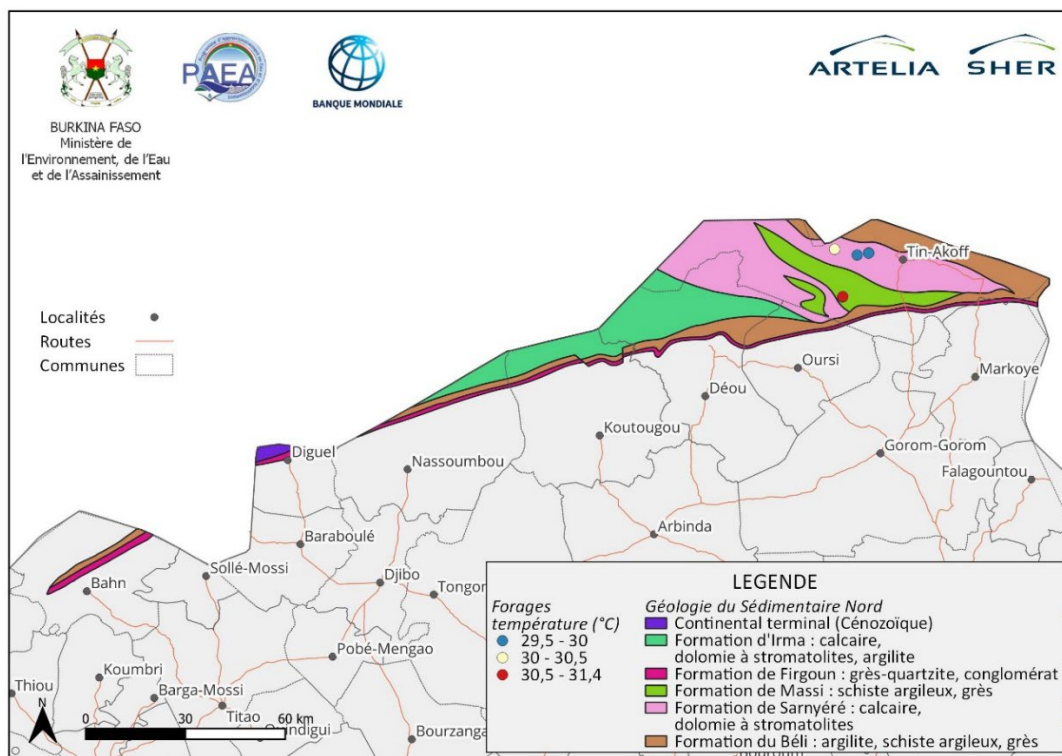


Figure 60 : Température des eaux souterraines des ouvrages OMES



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 61 : Distribution spatiale de la température des eaux souterraines du bassin sédimentaire du Nord

N.1.2. Potentiel Hydrogène pH

Le pH des ouvrages analysés varie entre 6,6 et 7,3. Ces valeurs sont caractéristiques des eaux souterraines et correspondent à des eaux faiblement acides pour tous les ouvrages à l'exception de l'ouvrage 18760 qui est faiblement basique.

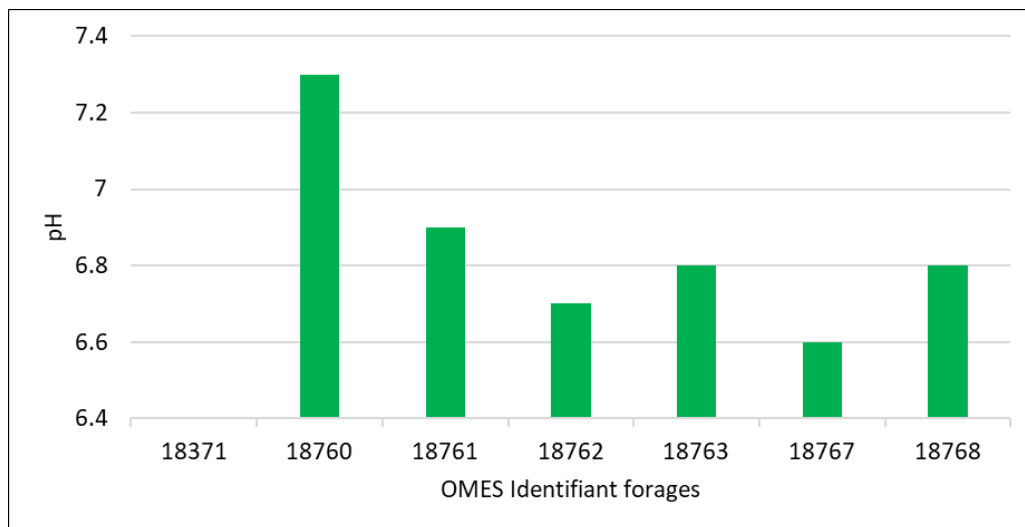
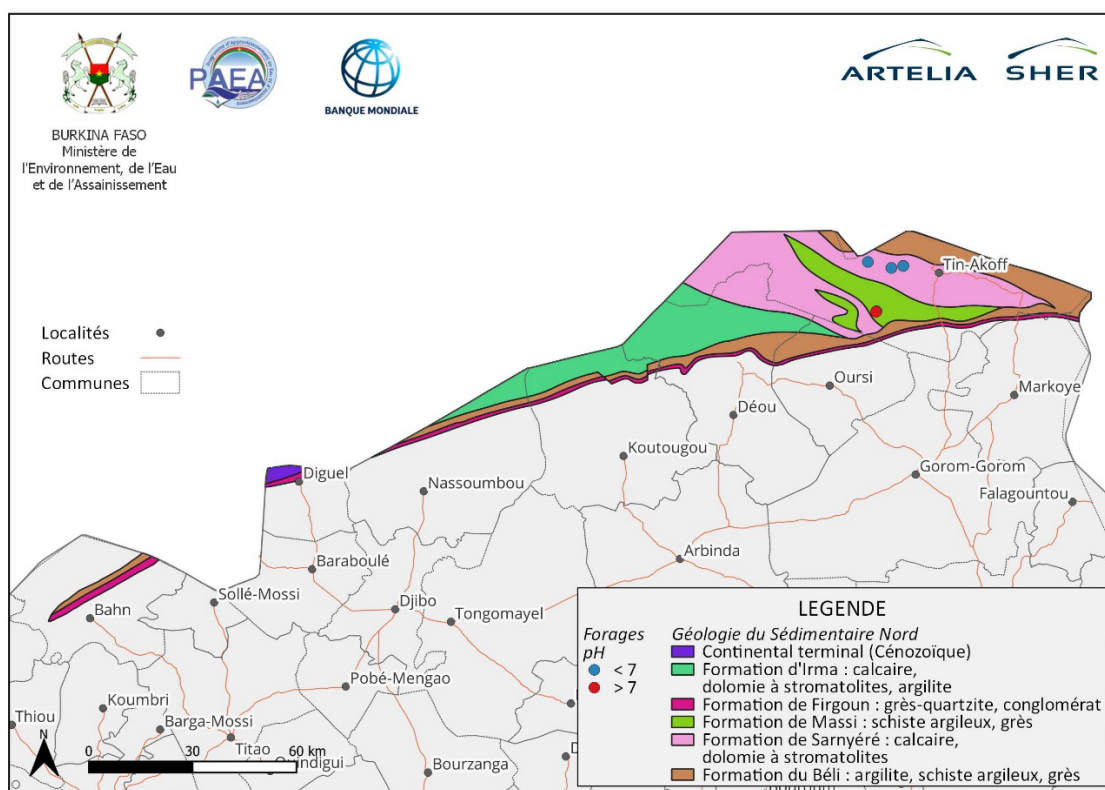


Figure 62 : pH des ouvrages OMES



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 63 : Distribution spatiale du pH du bassin sédimentaire du Nord

N.2. Conductivité électrique CE

La conductivité électrique des échantillons analysés est comprise entre 600 et 1.100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

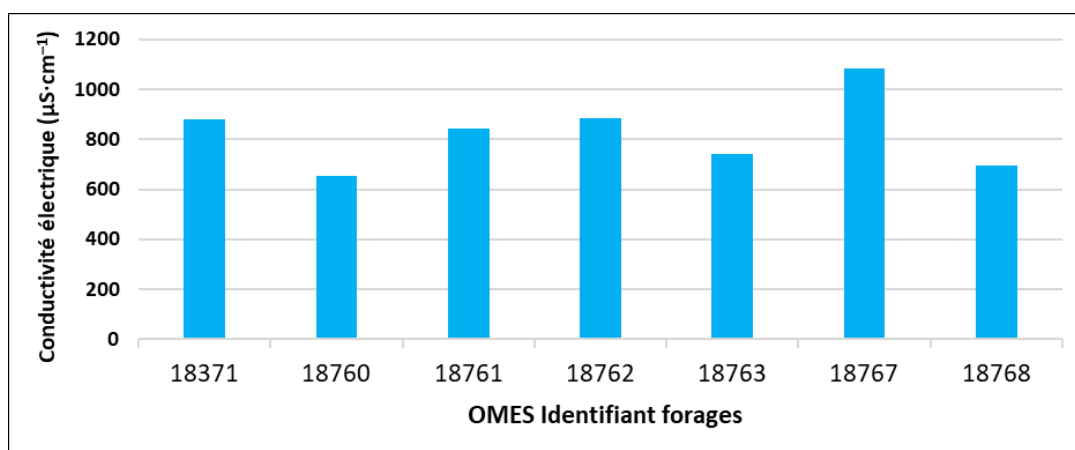
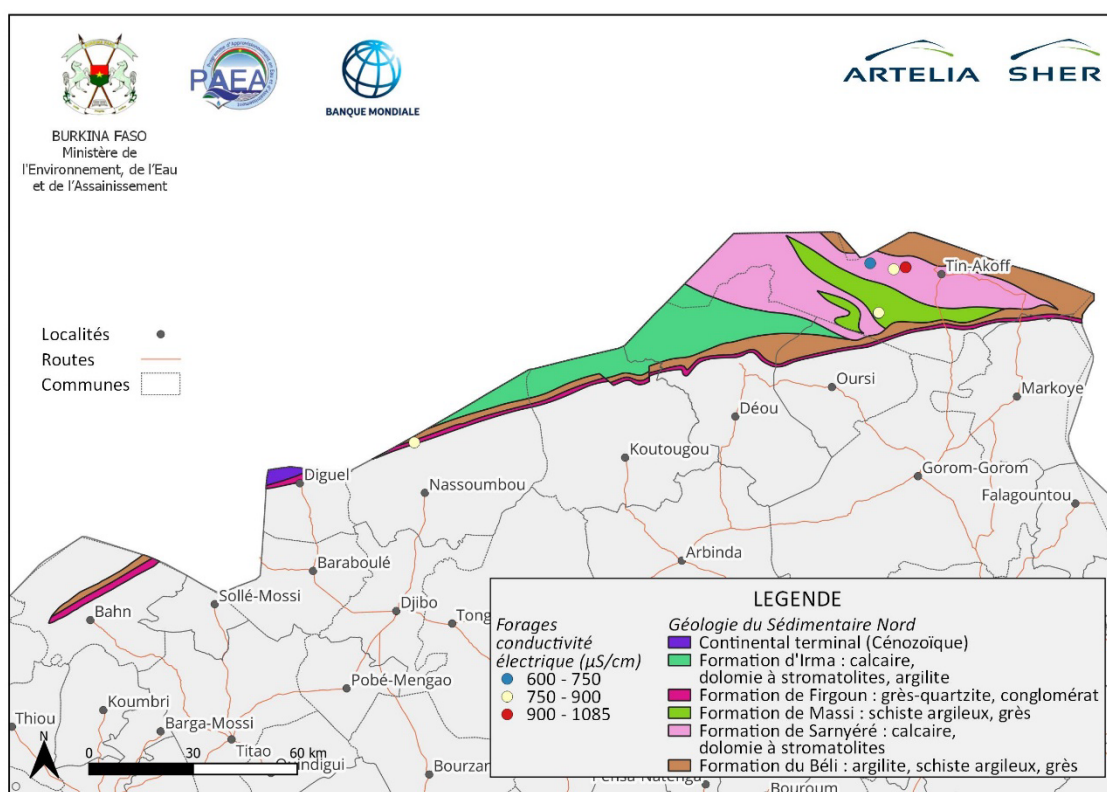


Figure 64 : Conductivité électrique des ouvrages OMES



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 65 : Distribution spatiale de la conductivité électrique du bassin sédimentaire du Nord

N.2.1.1. Faciès hydro-chimiques des eaux souterraines

Les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau au niveau du site Christine (forage Christine et piézomètres SE4B et SE5P), et au niveau de Tin Akoff ont été portés sur un Diagramme de Piper repris sur la figure ci-après.

Les résultats d'analyses physico-chimiques indiquent que les eaux souterraines ont un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Il s'agit de l'aquifère des formations carbonatées d'Irma et de Sarnyéré.

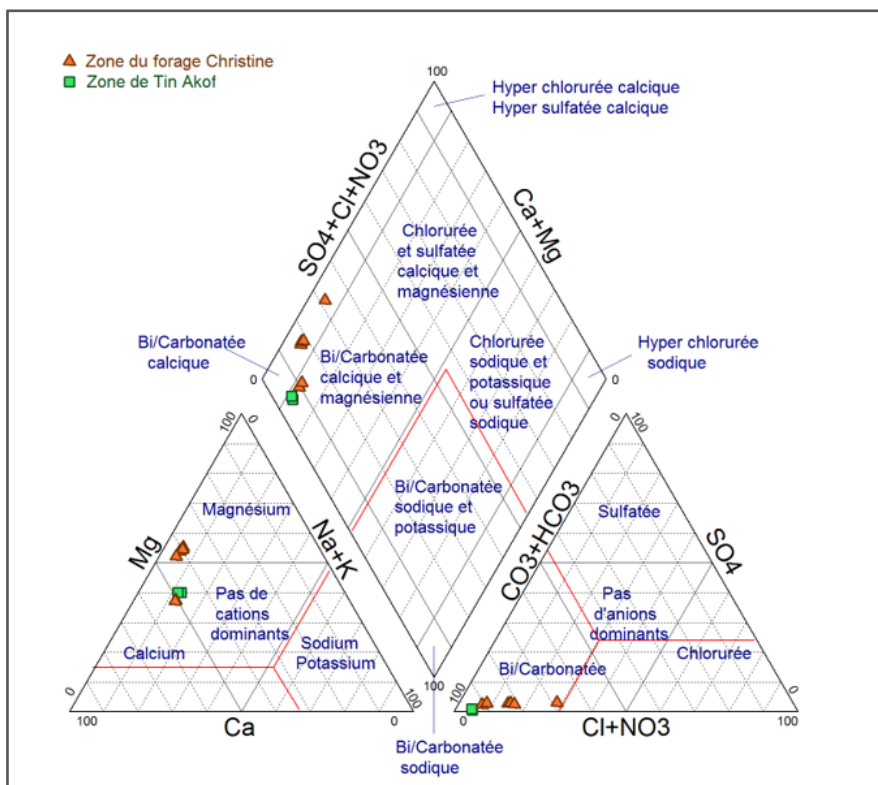


Figure 66 : Diagramme de Piper pour la zone du forage Christine et de Tin Akoff (source : CACI/CERTI, 2012)

O. ÉVALUATION DE LA RECHARGE DES AQUIFÈRES

O.1. Méthodes utilisées d'évaluation de la recharge

Compte tenu de la nature des données disponibles pouvant être capitalisées à cette fin, l'évaluation de la recharge des aquifères du bassin sédimentaire du Nord est réalisée d'une part par la méthode bilantaire spatialisée, et d'autre part par la méthode de cubatures des variations piézométriques.

Les résultats sont présentés ci-après.

O.2. Évaluation par approche bilantaire spatialisée

O.2.1. Méthodologie de l'approche bilantaire spatialisée

L'approche bilantaire spatialisée consiste à évaluer la recharge sur base du bilan hydrologique.

Le principe du bilan hydrologique pour un intervalle de temps donné repose sur la distribution de la pluie (Précipitations : P) en différents paramètres hydro-climatiques : l'évapotranspiration (ETR), le ruissellement (R), la recharge des nappes ou l'infiltration efficace (I) et le stockage d'eau dans le sol (ΔS).

Le schéma conceptuel du bilan hydrologique pour un calcul au pas de temps mensuel se traduit par la relation

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S$$

Avec

P : précipitation (mm),

ETR : évapotranspiration réelle (mm),

R : écoulement de surface (mm),

I : infiltration profonde ou recharge (mm),
 ΔS : variation du stock d'eau dans le sol (mm).

Les différents termes de cette équation sont quantifiés afin de pouvoir estimer la recharge.

L'évaluation de la recharge a été réalisée de manière spatialisée, c'est-à-dire en utilisant des paramètres distribués spatialement sur l'ensemble de la zone d'étude, à partir des données climatiques globales (FLDAS, WorldClim, TerraClimate, CHIRPS, FAO WaterPortal, etc.) et des données de classification de sols HWSD de la FAO (pour le calcul distribué de la RFU).

Les données hydro-climatiques collectées et traitées (principalement par QGIS et par Google Earth Engine) s'étendent sur une période de 30 années, allant de 1991 à 2020. Le pas de temps du traitement et du calcul de la recharge est mensuel.

Les méthodes spatialisées utilisées pour le calcul de l'ETP et/ou de l'ETR sont Thornthwaite, Turc, Caprio, FLDAS, Penman, et Penman-FAO. Différents résultats de calculs de la recharge sont donc obtenus, en fonction des différentes méthodes de calcul de l'ETP/ETR.

Les calculs d'ETR à partir de l'ETP sont réalisés par la méthode de bilan simplifié de Thornthwaite, au pas de temps mensuel sur une période continue de 30 années, de manière spatialisée. Les valeurs de RFU sont distribuées spatialement selon le type de sol, en utilisant la carte des sols HWSD de la FAO et la classification associée de RU/RFU.

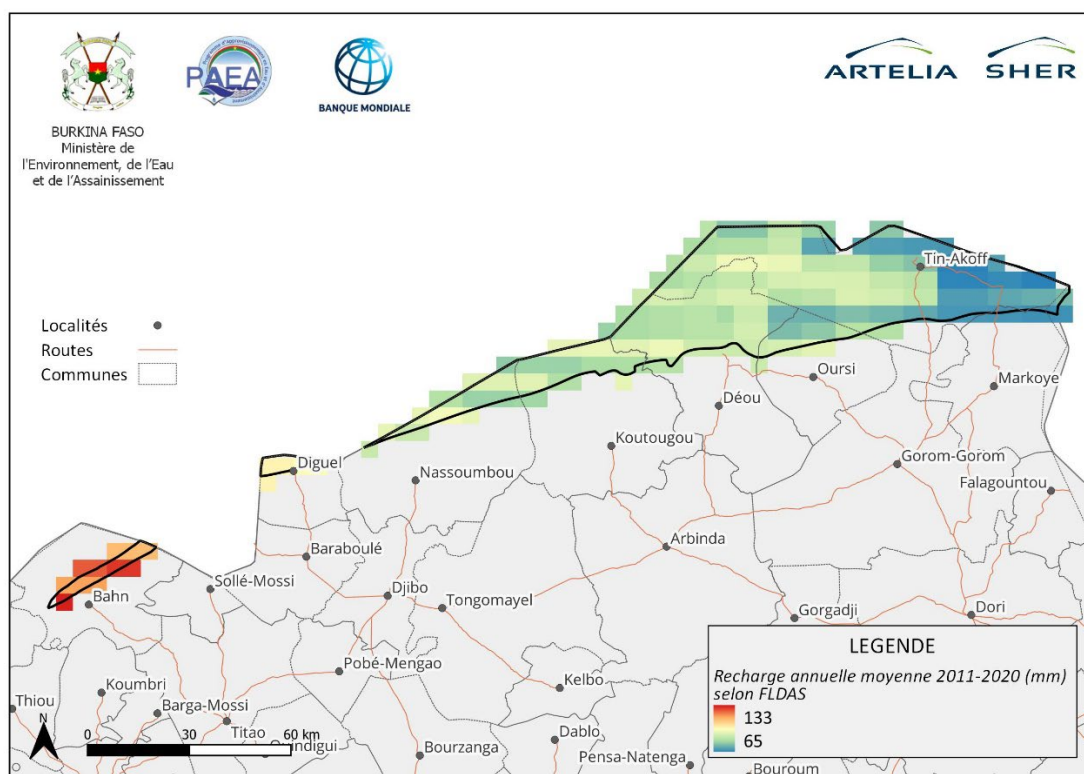
La distribution de l'Eau Utile entre le Ruissellement et l'Infiltration est réalisée à partir de données globales de ruissellement FLDAS (faisant intervenir la pente, le type de sols, l'occupation du sol, et la pluie), lesquelles ont été calées et validées sur base des données de coefficients de ruissellement disponibles pour une série de sous-bassins du Burkina Faso.

Les calculs réalisés permettent l'estimation de l'Eau Utile (pluie efficace) et de la Recharge de manière mensuelle et annuelle, sur la période 1991-2020. Les résultats sont fournis sous forme de rasters, ainsi que de statistiques zonales dérivées. À partir de ces résultats sur la période de 30 années, des statistiques sont générées (P10, P50, P90) et des moyennes interannuelles sont calculées (1991-2020, 2011-2020, etc.).

O.2.2. Principaux résultats obtenus

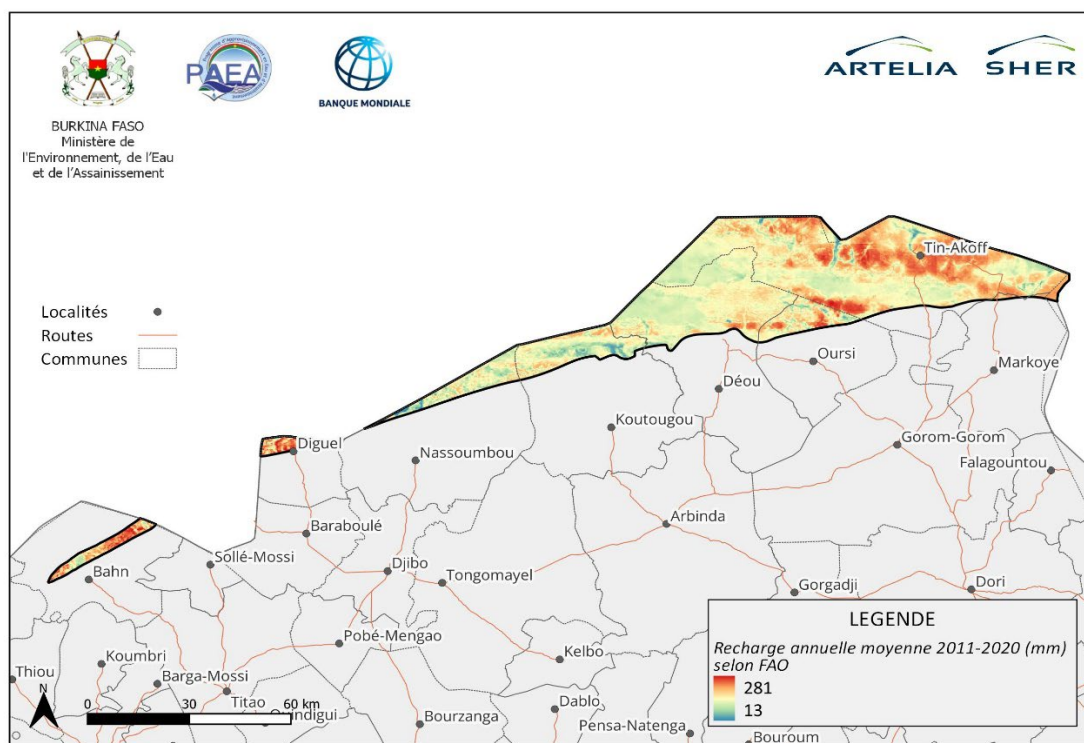
Les principaux résultats obtenus par l'approche bilantaire spatialisée sont repris ci-après à titre d'illustration et de synthèse. Les résultats complets sont mis à disposition sous format numérique (fichiers raster, et statistiques zonales complètes sous format Excel).

Les cartes reprises ci-après illustrent la distribution spatiale de la recharge annuelle d'une part selon la méthode de Penman-FAO (moyenne 2011-2020), et d'autre part selon la méthode FLDAS (moyenne 2011-2020).



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 67 : Répartition spatiale de la recharge annuelle selon FLDAS dans le sédimentaire Nord



Source de données : BNDT 2015, BUMIGEB 2003, ANAM 2021, ARTELIA/SHER 2022

Figure 68 : Répartition spatiale de la recharge annuelle selon Penman-FAO dans le sédimentaire Nord

L'évaluation selon la méthode FLDAS indique des valeurs de recharge annuelle (moyenne 2011-2020) variant spatialement entre 65 et 133 mm sur le sédimentaire Nord.

L'évaluation selon la méthode Penman-FAO indique des valeurs de recharge annuelle (moyenne 2011-2020) variant spatialement entre 13 et 280 mm sur le sédimentaire Nord.

Le graphique repris ci-après illustre les valeurs annuelles de recharge sur la période 1991-2020, pour chaque méthode d'évaluation.

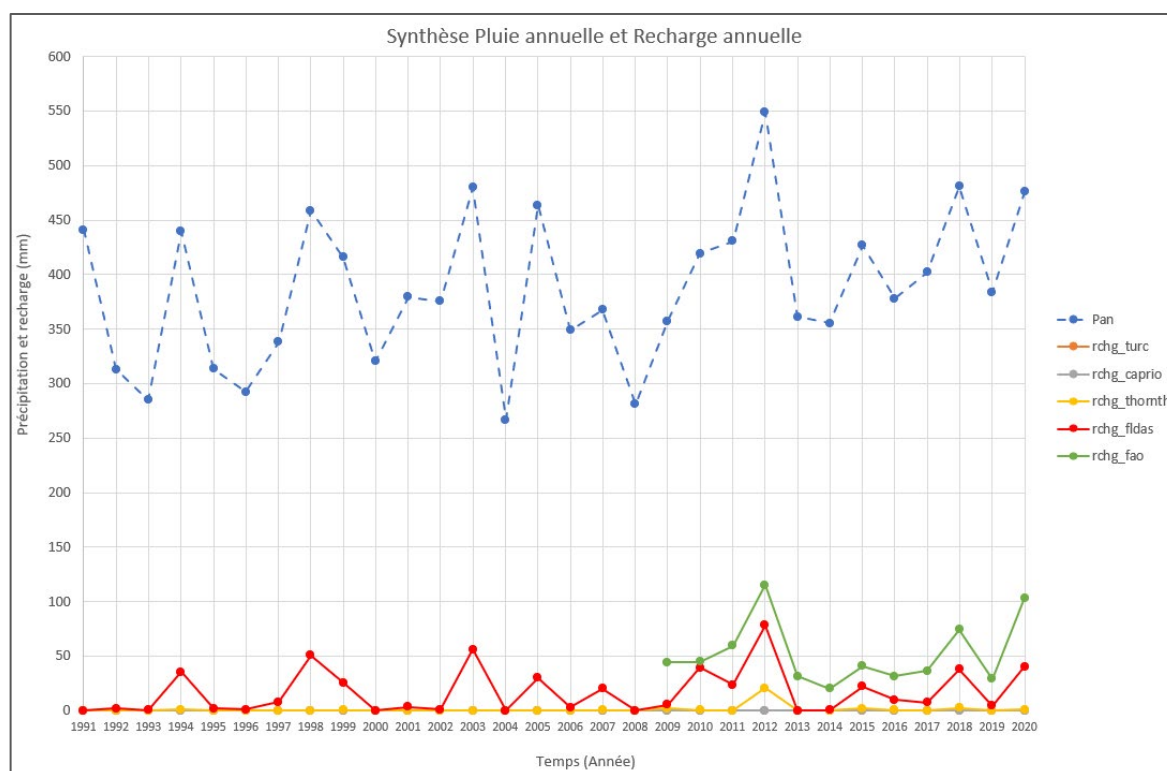


Figure 69 : Chroniques des valeurs annuelles de recharge et de précipitation sur le bassin sédimentaire du Nord (période 1991-2020)

Le Tableau 37 ci-après présente la synthèse des évaluations de recharge annuelle par approche bilantaire sur le bassin sédimentaire du Nord sur la période 1991-2020, pour les années P10, P50 et P90.

Tableau 37 : Synthèse des évaluations de recharge par approche bilantaire sur le bassin sédimentaire du Nord (période 1991-2020)

Paramètre	P10 (mm)	P50 (mm)	P90 (mm)
Précipitation	291,6	378,7	476,0
Recharge selon Turc	0	0	0
Recharge selon Caprio	0	0	0
Recharge selon FLDAS	0	6,3	41,1
Recharge selon Thornthwaite	0	0	1,8
Recharge selon Penman-FAO	29,1	42,5	100,5
Recharge selon Penman-ANAM	0	0	0

Le graphique ci-dessous illustre la distribution intra-annuelle (saisonnière) de l'infiltration globale depuis la surface du sol (reconstitution du stock en eau du sol + recharge vers la nappe) calculée selon la méthode Penman-FAO, pour les années P10, P50 et P90 de la période 2011-2020. On observe une distribution allant de juin à septembre, avec un maximum au mois d'août correspondant au mois le plus pluvieux. On notera que les valeurs représentent la somme mensuelle de la reconstitution du stock en eau du sol et de la recharge.

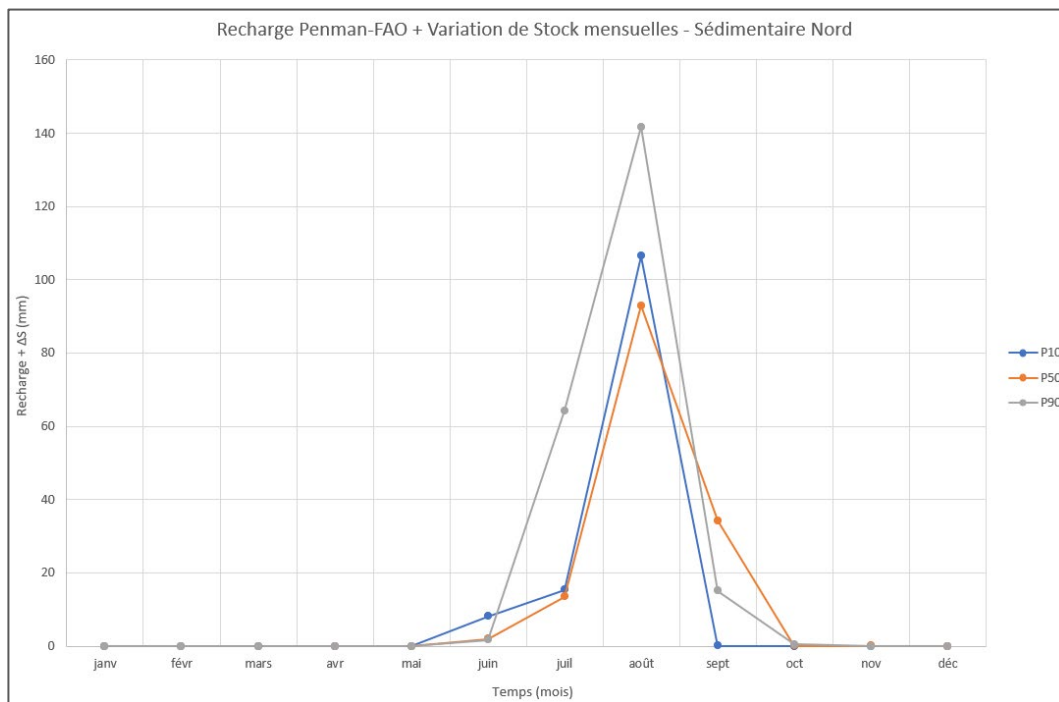


Figure 70 : Infiltration globale depuis la surface du sol (reconstitution du stock en eau du sol + recharge vers la nappe) calculée selon la méthode Penman-FAO (années P10, P50, P90)

O.3. Évaluation par cubatures des variations piézométriques

O.3.1. Méthode des cubatures de variations piézométriques

La méthode de cubatures des fluctuations de la nappe est l'une des plus utilisées pour l'estimation de la recharge des nappes, sur une grande variété de conditions climatiques. C'est une méthode qui est basée sur la variation du niveau piézométrique dans le temps, et sur la porosité efficace (ou de drainage) de l'aquifère (Obuobie et al. 2012). Le taux de recharge peut être estimé comme étant le produit de la variation positive du niveau de l'eau et la porosité efficace (de drainage) de l'aquifère. Selon (Obuobie et al. 2012), il y a deux hypothèses majeures inhérentes à cette technique :

- La fluctuation de la nappe phréatique dans les aquifères peu profonds non confinés est due uniquement à la recharge et l'évacuation des eaux souterraines ;
- La porosité de drainage de l'aquifère est connue et constante dans la période de fluctuation de la nappe phréatique ;

La porosité de drainage est un paramètre intrinsèque aux propriétés de l'aquifère. Par manque d'études spécifiques disponibles pour déterminer ce paramètre dans le bassin sédimentaire du Nord, les résultats des travaux de Gombert (1998) sur le bassin sédimentaire de Taoudeni dans le cadre du programme RESO ont

été considérés pour l'estimation de la recharge. Il s'agit des valeurs minimale, maximale et moyenne de porosité de drainage qui sont respectivement de 2 %, 5 % et 3,5%.

O.3.2. Résultats obtenus

La recharge calculée par méthode de fluctuation piézométrique a été évaluée à partir des sites piézométriques de Tin-Akoff et Tin-Arkachen.

O.3.2.1. Site de Tin-Akoff

Le Tableau 38 ci-après reprend les statistiques d'évaluation de recharge pour le site de Tin-Akoff.

Tableau 38 : Statistiques de la recharge du site de Tin-Akoff

Statistiques		Minimum	Maximum	Moyenne
Pluie (mm)		290	475	380
Porosité de drainage 2 %	Recharge (mm)	1,5	34,4	13,3
	Recharge en % de pluie	0,5%	7.2%	3.5%
Porosité de drainage 3,5 %	Recharge (mm)	2,7	60,3	23,3
	Recharge en % de pluie	0,9%	12.7%	6.1%
Porosité de drainage 5 %	Recharge (mm)	3,9	86,1	33,3
	Recharge en % de pluie	1.3%	18.1%	8.8%

Pour une porosité de drainage de 3,5%, la recharge annuelle moyenne sur la période 2009-2014 est de 23 mm.

La recharge du site de Tin-Akoff représente 0,9 % à 12,7 % de la pluie annuelle, avec une moyenne de 6,1 %.

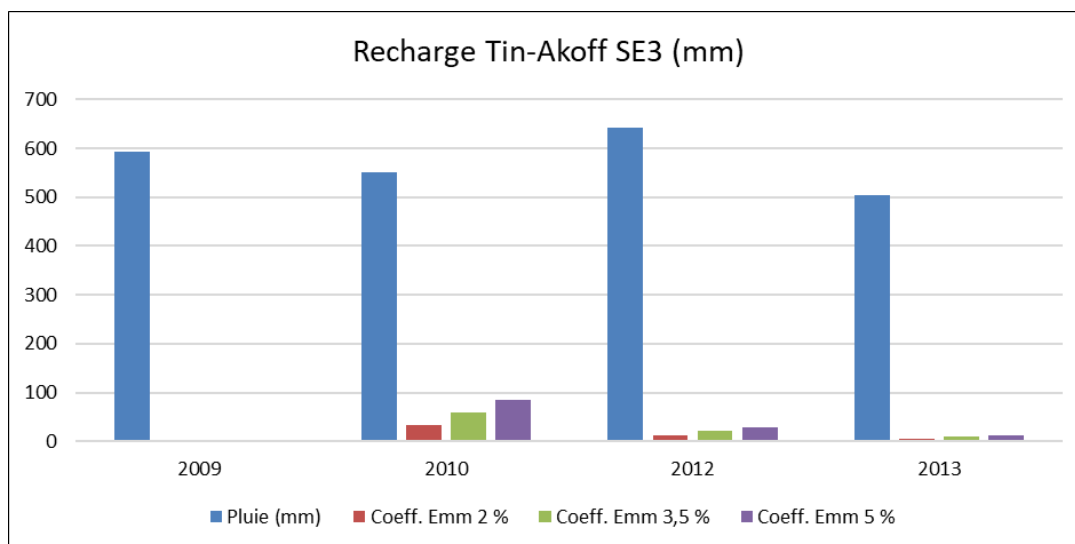


Figure 71 : Évolution de la recharge annuelle à partir du site de Tin-Akoff

Une analyse des débuts des premières pluies et du début des recharges (point le plus bas de la courbe de variation piézométrique) montre que les premières pluies commencent en juin et le début des recharges en juillet, ce qui correspond en moyenne à 1 mois de temps de réponse de la nappe pour la recharge.

Ce temps de réponse, similaire à celui observé par approche bilantaire, correspond à la consommation des précipitations pour l'ETR et pour la reconstitution du stock en eau du sol jusqu'à sa valeur maximale, puis au transfert des flux de percolation vers la nappe (située à une profondeur d'environ 30 mètres).

Le graphique ci-après illustre la distribution mensuelle de la recharge moyenne calculée à partir du site de Tin-Akoff, pour les 3 valeurs de porosité de drainage.

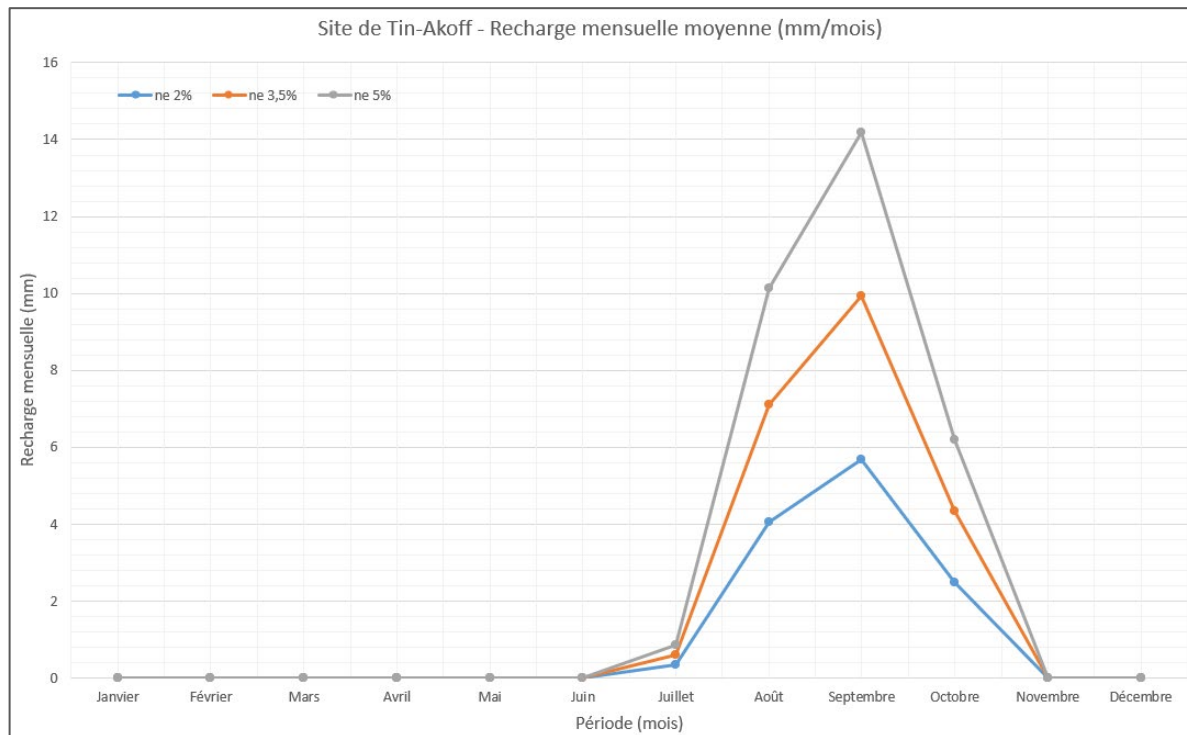


Figure 72 : Distribution mensuelle de la recharge moyenne calculée à partir des fluctuations piézométriques du site de Tin-Arkoff

O.3.2.2. Site de Tin-Arkachen

L'allure des chroniques de niveaux de nappe des piézomètres du site de Tin-Arkachen ne permet pas la mise en œuvre d'une évaluation par cubatures des fluctuations piézométriques. On constate en effet une longue période (depuis le début des mesures en 2012 jusqu'à mi 2016) caractérisée par des fluctuations extrêmement faibles, non-saisonnnières et non-corrélées aux précipitations, suivie d'une période débutant mi 2017 caractérisée par des fluctuations très serrées (cycles inférieurs à un mois) et très importantes (plus de 5 mètres d'amplitude), également non-corrélées aux précipitations.

Aucune évaluation quantifiée par cubatures des fluctuations piézométriques ne peut donc être réalisée pour ce site.

La longue période de stabilité des niveaux (depuis le début des mesures en 2012 jusqu'à mi 2016), sans fluctuations saisonnières, laisse toutefois supposer une faible influence de la recharge sur les niveaux de nappe au droit de cet ouvrage.

O.4. Synthèse des évaluations de la recharge

Les évaluations effectuées par la méthode bilantaire spatialisée et par la méthode des cubatures de variations piézométriques permettent de quantifier la recharge annuelle, et sa distribution mensuelle au cours de l'année.

Sur base des fluctuations saisonnières des niveaux de nappe des deux piézomètres du site de Tin-Akoff, la méthode des cubatures a permis d'estimer la recharge annuelle moyenne à environ 23 mm, soit environ 6 % des précipitations de l'année. Ces valeurs semblent réalistes au vu des faibles précipitations de la zone, et le comportement typiquement saisonnier de la nappe dans ces deux piézomètres (caractérisé par des cycles relativement réguliers de remontée et de récession) est un indicateur objectif du mécanisme de recharge saisonnière. On note que les résultats des deux piézomètres du site de Tin-Arkachen ne sont pas présentés dans cette synthèse parce que nous considérons qu'ils ne représentent pas la recharge de l'aquifère en lien avec les précipitations.

Sur base de ces valeurs annuelles déduites de la méthode des cubatures, il est estimé que les résultats de l'approche bilantaire spatialisée les plus pertinents sont ceux correspondant (i) à la méthode de FLDAS et (ii) à la méthode Penman-FAO. Ces deux méthodes reposent sur une évaluation annuelle de la recharge faisant directement intervenir l'ETR. Les évaluations mensuelles à partir de ces deux méthodes se rapportent à l'infiltration globale à partir de la surface du sol (somme de la reconstitution du stock en eau du sol et de la recharge vers la nappe). Ces deux méthodes reposant sur l'approche bilantaire spatialisée indiquent une recharge annuelle moyenne comprise entre 6 et 42 mm (soit 2 à 10 % des précipitations) cohérentes avec les évaluations obtenues par la méthode des cubatures de fluctuations piézométriques.

Sur le plan de la distribution mensuelle de la recharge, tant l'approche bilantaire spatialisée que la méthode des cubatures de variations piézométriques indiquent une recharge effective démarrant en juillet et intervenant principalement durant les mois d'août et septembre. Il existe donc, également à ce niveau, une cohérence dans les résultats des deux approches.

On notera également, tant pour l'approche bilantaire spatialisée que pour la méthode des cubatures de variations piézométriques, une très forte variation interannuelle.

La forte variabilité de la recharge d'une année à l'autre, résultant essentiellement du régime pluviométrique rencontré dans l'année considérée (quantité de précipitations, distribution temporelle et intensité des précipitations), implique qu'une estimation de la recharge qui serait basée sur une seule année, ou sur un nombre réduit d'années, aura très peu de représentativité. Il est donc recommandé, pour l'estimation de la recharge, de prendre en considération un nombre élevé d'années pour en déduire de manière pertinente des valeurs moyennes et une évaluation consolidée de la variabilité interannuelle.

P. EXPLOITATION DES EAUX SOUTERRAINES

P.1. Demande en eau et usages des eaux souterraines

Les usages et la demande en eau du bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso sont très peu documentés.

Les données existantes sur les usages et demandes en eau sont à l'échelle de la région du Nord (dont le bassin sédimentaire du Nord ne représente que 8 %) ou à l'échelle de l'espace de gestion de l'agence de l'eau du Liptako (dont bassin sédimentaire du Nord ne représente que 8,5 %).

P.2. Demande en eau pour la consommation humaine

La densité de population très faible de la zone couverte par le bassin sédimentaire du Nord (5,4 hab./km² en 2019, soit 10 fois moins que la moyenne nationale), et l'absence de grandes villes dans (et à proximité de) cette zone, limitent la demande en eau pour la consommation humaine au domaine de l'hydraulique rurale.

Les infrastructures d'approvisionnement en eau potable de la population dans le bassin sédimentaire du Nord sont donc principalement les forages équipés de pompes à motricité humaine, et les AEPS.

Aucun centre ONEA n'est présent dans le bassin sédimentaire du Nord. Les centres ONEA les plus proches sont ceux de Gorom Gorom, Arbinda, Essakane et Djibo. Ils sont tous situés à plus des 40 km de la limite du sédimentaire Nord.

La demande en eau pour la consommation humaine des populations résidentes sur le bassin sédimentaire du Nord a pu être estimée en réalisant des statistiques zonales sur les données issues du Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH) de 2019, ainsi que des projections effectuées aux horizons 2030 et 2050 sur base du taux d'accroissement annuel de 2.8%.

Les estimations de la demande en eau pour la consommation humaine sont reprises dans le tableau ci-après, en considérant la norme de 20 L/j/hab communément utilisée pour cette classe d'usage.

Tableau 39 : Estimation de la demande en eau pour la consommation humaine

Usage de l'eau	Demande spécifique (L/j/Hab)	Pop. 2019	Demande 2019 (millions m ³ /an)	Pop. 2030	Demande 2030 (millions m ³ /an)	Pop. 2050	Demande 2050 (millions m ³ /an)
Domestique	20	21.493	0,17	29.122	0,21	50.593	0,37

La demande en eau pour la consommation humaine est estimée à 0,17 million m³/an (RGPH 2019), soit 0,185 million m³ en 2022 sur base du taux d'accroissement de 2.8%. Sur base de ce même taux, la demande atteindrait 0,21 millions m³ en 2030, et 0,37 millions m³ en 2050.

Sur base de la superficie du bassin sédimentaire du Nord (environ 4.000 km²), la demande en eau de 2022 représente 0,04 mm/an seulement. La demande projetée en 2050 représente 0,09 mm/an. Ces valeurs sont très largement inférieures à la recharge des aquifères du bassin sédimentaire du Nord, rendant la pression quantitative sur la ressource en eau souterraine extrêmement faible.

Dans les zones où l'activité pastorale sédentaire est importante, ce qui est le cas de la zone du bassin sédimentaire du Nord, certains auteurs considèrent une norme de 75 L/j/hab pour la satisfaction des besoins en eau globaux (domestiques et bétail familial). Selon cette hypothèse, la demande globale (domestique et bétail) atteindrait 0,64 millions m³/an en 2022. Cette valeur représente 0,16 mm/an, rapportée à la superficie du bassin sédimentaire du Nord.

P.3. Demande en eau des secteurs miniers et industriels

La demande minière et industrielle ne semble pas concerner le bassin sédimentaire du Nord, hormis un permis accordé à la Sahelian Mining pour exploiter le calcaire sur les sites de Tin-Hrassan et de Tin-Dioulaf (réserves estimées à 20 millions de tonnes) (Machard, 2017). Les mines d'or concernent plutôt la zone de socle (mines d'or de la SOMIKA dans le Soum, de la SMB-SA dans le Yagha et d'IAMGOLD dans l'Oudalan). Le gisement de manganèse de Tambao, qui est probablement l'un des plus riches au monde, se trouve également dans la zone de socle, mais à proximité immédiate du bassin sédimentaire du Nord où un forage exploite déjà l'aquifère calcaire (Machard, 2017).

Le secteur industriel est quasi-inexistant et se résume à des mini-laiteries ou des moulins à grains. Les activités principales sont donc essentiellement pastorales et agricoles (Machard, 2017).

P.4. Demande en eau pour l'agriculture

Aucune donnée n'est disponible concernant la demande en eau pour l'agriculture irriguée dans le bassin sédimentaire du Nord, ni sur l'exploitation des eaux souterraines dans cette zone à des fins d'irrigation.

Les activités agricoles semblent majoritairement être liées aux cultures pluviales, et à la valorisation des ressources en eau de surface (cours d'eau temporaires, mares). L'exploitation actuelle des eaux souterraines du bassin sédimentaire du Nord pour l'agriculture est par conséquent supposée être limitée et non-significative sur le plan quantitatif.

Q. ESTIMATION DES RÉSERVES

À ce jour, le bassin sédimentaire du Nord du Burkina Faso n'a pas fait l'objet d'études de recherche appliquée portant sur l'estimation des réserves (totales, exploitables et renouvelables) en eaux souterraines.

Les seules données disponibles pour la réalisation de cette évaluation sont les données issues des forages d'hydraulique villageoise, les données générales sur les aquifères et leurs propriétés hydrogéologiques, et les données hydro-climatiques dont l'estimation de la recharge.

Q.1. Réserves totales

La réserve en eau totale d'un aquifère inclut la partie très profonde mais difficilement exploitable de l'aquifère présentant de telles caractéristiques géométriques, dans l'état actuel des techniques employées, du fait de sa grande profondeur.

C'est donc une réserve d'eau comprenant toutes les eaux logées dans l'aquifère considéré, que ces eaux soient techniquement exploitables ou non. L'estimation d'une telle réserve suppose des connaissances sur l'épaisseur des aquifères et leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Dans le cas du bassin sédimentaire du Nord, la profondeur totale des aquifères reste méconnue. En effet, les forages les plus profonds dépassent très rarement 80 mètres, la profondeur maximale des forages recensés étant de 130 m. De surcroît, l'absence de résultats d'essais de pompage permettant le calcul de la porosité efficace (hormis sur le site Christine) limite la possibilité d'estimation de ce paramètre.

Du fait de la méconnaissance des épaisseurs des aquifères et de la porosité des roches réservoir, l'évaluation des réserves totales du bassin sédimentaire du Nord reste approximative. Les valeurs de porosité issues des résultats de Gombert (1998) du bassin sédimentaire de l'Ouest ont également été utilisées. Les valeurs retenues pour l'évaluation sont de 2 % (minimum), 3.5% (moyenne) et 5 % (maximum).

Quant à l'épaisseur totale de l'aquifère, bien qu'étant inconnue elle est très variable selon la localisation concernée dans le bassin sédimentaire, celui-ci s'approfondissant vers le NO, une profondeur de plus de 1000 mètres pourrait être atteinte dans la partie burkinabè du bassin. Nous utiliserons, à titre de profondeur moyenne représentative, une valeur de 500 m sur l'ensemble du bassin sédimentaire du Nord.

Tableau 40 : Estimation des réserves totales en eau souterraine du bassin sédimentaire du Nord (Mm³= million de mètres cubes)

Entité hydrogéologique	Épaisseur représentative moyenne (m)	Superficie (km ²)	Porosité efficace (valeurs théoriques)	Volume Total (Mm ³)
Sédimentaire de Nord	500	4.029	0,02	40.290
			0,035	70.507
			0,05	100.725

Selon ces hypothèses conservatrices (l'épaisseur représentative du système aquifère du bassin étant vraisemblablement sous-estimée), le volume total d'eau souterraine est estimé entre 40 et 100 milliards m³, la valeur de référence étant de 70,5 milliards m³.

Q.2. Réserves exploitables

Les réserves en eau souterraine exploitables sont celles accessibles à plus faible profondeur par les forages réalisés dans le secteur (environ 100 m de profondeur actuellement, dans le bassin sédimentaire du Nord).

Une part de plus en plus importante de la réserve profonde est susceptible de devenir « facilement exploitable » (Machard, 2017), au fur et à mesure des avancées des technologies dans le domaine de la foration. Pour le bassin sédimentaire du Nord, au même titre que dans le bassin sédimentaire de Taoudeni à l'Ouest, il est aisément concevable, d'un point de vue technique et économique, de réaliser des forages de 200 mètres de profondeur pour l'alimentation en eau potable. Nous retiendrons donc à titre d'indicateurs les valeurs de 100 m et de 200 m pour l'évaluation des réserves (facilement) exploitables.

Tableau 41 : Estimation des réserves (facilement) exploitables en eau souterraine du bassin sédimentaire du Nord (Mm³ : million de mètres cubes)

Entité hydrogéologique	Superficie (km ²)	Profondeur (facilement) accessible (m)	Porosité efficace (valeurs théoriques)	Volume Total (Mm ³)
Sédimentaire de Nord	4.029	100	0,02	8.058
			0,035	14.101
			0,05	20.145
		200	0,02	16.116
			0,035	28.203
			0,05	40.290

Selon ces hypothèses, le volume d'eau souterraine (facilement) exploitable est estimé entre 8 et 40 milliards m³ (Tableau 41), la valeur de référence étant de l'ordre de 14 milliards m³ (porosité efficace de 0.035 et profondeur de 100 mètres).

Q.3. Réserves renouvelables

Les réserves renouvelables représentent la partie en eau des aquifères qui est renouvelée chaque année par infiltration des eaux de pluie vers les nappes d'eau souterraines. Ces réserves sont donc constituées par percolation des eaux de pluie après consommation par l'ETR et après comblement des réserves utiles (RU) en eau des parties supérieures des profils des sols. Ces réserves utiles sont définies comme la partie des eaux de pluie excédentaire à l'évapotranspiration réelle et au ruissellement de surface, s'infiltrant dans le sol pour reconstituer le stock en eau de la zone non saturée.

Les réserves en eaux souterraines renouvelables qui peuvent atteindre les horizons aquifères du bassin sédimentaire du Nord sont estimées à partir de l'évaluation de la recharge, précédemment développée dans le présent rapport. Cette évaluation de la recharge est réalisée d'une part selon la méthode bilantaire spatialisée, et d'autre part par la méthode des cubatures de variations piézométriques.

Les valeurs moyennes représentatives de la recharge sur le bassin sédimentaire du Nord sont comprises, selon les estimations de recharge réalisées dans le cadre de la présente étude, entre 10 et 40 mm/an pour une année moyenne. Une valeur représentative (et conservative) de 25 mm/an est donc proposée.

Tableau 42 : Réserves en eau renouvelables du bassin sédimentaire du Nord (Mm³ : millions de mètres cubes)

Entité hydrogéologique	Superficie (km ²)	Recharge (mm/an)	Volume renouvelable (Mm ³)
Sédimentaire de Nord	4.029	10	40
		25	100
		40	160

Selon ces hypothèses, le volume d'eau souterraine renouvelable est estimé entre 40 et 160 millions m³/an (Tableau 42) la valeur de référence étant de l'ordre de 100 millions m³ (correspondant à une recharge annuelle de 25 mm).

On comparera ces valeurs à la demande en eau domestique estimée précédemment, laquelle ne dépasserait pas 0,5 millions m³/an à l'horizon 2050.

Ces valeurs, appliquées à l'indice de stress hydrique de Falkenmark, indiquent une valeur d'indice de 4.000 m³/hab/an pour la population 2022, et de 2.000 m³/hab/an pour la population projetée en 2050. Ces valeurs demeurent supérieures à la limite de 1.700 m³/hab/an définissant le seuil de stress hydrique selon cet indice.

Il existe donc un fort potentiel d'exploitation des eaux souterraines renouvelables du bassin sédimentaire du Nord, qui pourrait être mis à profit tant pour le développement de l'accès à l'eau potable que pour le développement d'activités économiques (industrie, agriculture). Des opportunités de transferts d'eau en dehors du bassin sédimentaire du Nord, pour ces usages, pourraient également être identifiées.

R. SYNTHÈSE DES POTENTIALITES SUR LES AQUIFERES DU BASSIN SÉDIMENTAIRE DU NORD DU BURKINA FASO

Le bassin sédimentaire du Nord est caractérisé par des ressources en eau souterraines rencontrées à profondeur modérée (généralement moins de 30 m) et par conséquent facilement accessibles à partir de forages relativement peu profonds (moins de 70 m en moyenne).

Les aquifères rencontrés, classés au niveau de 7 unités hydrogéologiques, sont actuellement exploités par de nombreux ouvrages (puits et forages) dont plus de 152 sont recensés et documentés. L'usage principal de ces aquifères est la consommation humaine et l'abreuvement du bétail, dans un contexte très majoritairement rural.

Les aquifères les plus productifs, au sein desquels les débits observés en fin de foration sont les plus élevés, sont rencontrés au sein des unités hydrogéologiques de Sarnyéré et de Massi. Il s'agit donc des deux unités hydrogéologiques les plus favorables pour l'exploitation des eaux souterraines. Ces deux unités, caractérisées par une probable continuité hydraulique, formeraient un seul aquifère carbonaté au potentiel d'exploitation très intéressant et même remarquable dans les zones et niveaux les plus karstifiés. Le site de forage Christine, qui exploite cet aquifère, témoigne des caractéristiques hydrogéologiques très favorables rencontrées dans ce contexte karstique localisé, avec des débits pouvant dépasser 100 m³/h et des rabattements de nappe très limités. La transmissivité évaluée au droit de la zone karstique du site Christine est de l'ordre de 10⁻² à 10⁻¹ m²/s, correspondant (localement) à un excellent aquifère. Le coefficient d'emmagasinement, qui y est évalué entre 0.01 et 0.03, indique le caractère libre de la nappe exploitée.

Les débits moyens observés au niveau du sédimentaire Nord, compte non-tenu du site particulier Christine, sont de l'ordre de 4,3 m³/h (maximum 15 m³/h) pour la formation de Firgoun, 4,4 m³/h (maximum 28,8 m³/h) pour la formation de Béli, 6,9 m³/h (maximum 28,8 m³/h) pour la formation d'Irma, de 5,8 m³/h (maximum 39,2 m³/h) pour la formation de Sarnyéré, et 0,9 m³/h (maximum 7,2 m³/h) pour la formation de Massi. Aucun ouvrage captant les unités du Continental Terminal et du Quaternaire n'est répertorié.

On notera que les analyses statistiques et interprétations relatives aux différents paramètres considérés dans ce rapport reposent sur un nombre parfois limité d'ouvrages, ce qui peut influencer la représentativité statistique des résultats obtenus. Il convient donc de mettre en relation les résultats obtenus avec le nombre d'ouvrages concernés, lors de toute utilisation de ces résultats.

Aucune valeur de transmissivité ou de coefficient d'emménagement n'est disponible pour les formations du sédimentaire du Nord, en dehors de celles évaluées au niveau du site Christine.

Toutefois la configuration hydrogéologique rencontrée, dont notamment la variation saisonnière des niveaux de nappes dans les piézomètres suivis du réseau DEIE, indique que les niveaux aquifères rencontrés et exploités (dans leur partie supérieure donc) sont principalement des nappes libres.

Le taux de recharge des aquifères du bassin sédimentaire du Nord est relativement faible à modéré, compte tenu de la faible pluviométrie rencontrée dans cette zone sahélienne. Toutefois, la réaction saisonnière des piézomètres aux précipitations (au niveau du site de Tin Akoff essentiellement) confirme le caractère effectif du processus de recharge, avec des valeurs annuelles moyennes estimées de l'ordre de 10 à 40 mm, lesquelles sont cohérentes avec l'évaluation réalisée sur base bilantaire.

Les réserves renouvelables en eau souterraine correspondent à un volume renouvelable moyen estimé à environ 100 millions m³, ce qui permet une exploitation durable et renforcée de la ressource.

La disponibilité significative en eau souterraine renouvelable, et les propriétés hydrodynamiques relativement favorables des aquifères (essentiellement au niveau des formations carbonatées d'Irma et de Sarnyéré), permettent d'obtenir et de maintenir durablement des débits d'exploitation de l'ordre de 5 à 15 m³/h, voire localement beaucoup plus dans les zones karstiques. Cette situation permet de satisfaire très largement les besoins en eau potable des populations (vivant principalement en milieu rural), et d'envisager un développement économique dans la zone (industries, agriculture) reposant sur la valorisation des eaux souterraines, et ce à partir d'ouvrages ne dépassant pas 100 mètres de profondeur. Des transferts d'eau à courte ou moyenne distance vers des entités moins favorisées en zone de socle pourraient également être envisagés, au même titre que des AEP multi-villages, à partir d'ouvrages dont la productivité le permettrait (10 à 20 m³/h). Il en est ainsi pour le site particulier du forage Christine, dont les débits exploitables très élevés offrent des possibilités de développement économique et de transfert d'eau très intéressantes.

S. GESTION ET CAPITALISATION DES DONNÉES

Les données collectées dans le cadre de la présente étude ont été intégrées à la base de données BD-OMES de la DEIE, ainsi qu'aux bases de données cartographiques BD-SEVR et BD-CHGEO. Des traitements ont préalablement été réalisés sur ces données (gestion des doublons, erreurs de saisie, etc.) avant reprise dans les BDD précitées.

Les données exploitées ont également été valorisées au travers d'un SIG pour l'élaboration de nombreuses cartes thématiques, dont certaines sont reprises à titre d'illustration dans le présent rapport.

La collecte de données a pu mettre en évidence les lacunes actuelles en termes de disponibilité d'informations relatives aux caractéristiques hydrogéologiques des formations du sédimentaire du Nord du Burkina Faso, ainsi que l'intérêt de consolider d'une part les investigations sur le terrain et d'autre part les processus de partage et de capitalisation des données existantes (enrichissement des bases de données, dont BD-OMES).

T. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La présente étude de caractérisation géologique et hydrogéologique du bassin sédimentaire du Nord, menée dans le cadre du PAEA, a permis de collecter, d'exploiter et de synthétiser l'ensemble des données et informations existantes sur la zone d'étude.

Bien qu'aucune investigation de terrain n'ait malheureusement pu être menée compte tenu du contexte sécuritaire, la capitalisation des données et informations existantes a permis d'aboutir à une évaluation consistante et pertinente des potentialités aquifères du bassin sédimentaire du Nord, et de ses caractéristiques hydrogéologiques principales.

Avec plus d'une centaine d'ouvrages exploitant les eaux souterraines, principalement pour la consommation humaine, les aquifères du bassin sédimentaire du Nord présentent globalement des propriétés hydrogéologiques relativement favorables, et des potentialités d'exploitation durables intéressantes malgré le contexte climatique caractérisé par une pluviométrie relativement faible.

En effet avec des débits rencontrés généralement de l'ordre de 5 à 10 m³/h, lesquels peuvent atteindre et dépasser 25 m³/h, et compte tenu de la recharge effective (bien que modérée) rencontrée dans la zone, le bassin sédimentaire du Nord constitue une ressource en eau souterraine renouvelable intéressante pour contribuer à la satisfaction des besoins en eau des populations ainsi qu'au développement socio-économique de la zone concernée. Compte tenu de la densité très faible de la population actuelle dans la zone, de l'absence de grandes villes dans la zone et de l'absence d'exploitations agricoles ou industrielles très consommatrices, le taux d'utilisation actuel de la ressource en eau souterraine du bassin sédimentaire du Nord est extrêmement faible et permet d'envisager des développements futurs notamment sur le plan de l'AEP et sur le plan socio-économique (agriculture, élevage, industrie), ainsi que des transferts d'eau vers des zones de socle moins favorisées.

Il est recommandé, pour améliorer la connaissance, la gestion et l'exploitation des aquifères du sédimentaire du Nord, de :

- (1) Réaliser un forage profond de reconnaissance géologique et hydrogéologique, à une profondeur de l'ordre de 500 mètres ;
- (2) Réaliser des essais de pompage par paliers et longue durée sur une série d'ouvrages localisés dans les différentes formations hydrogéologiques, pour améliorer les connaissances sur les propriétés hydrodynamiques des aquifères et sur les potentialités d'exploitation ;
- (3) Réaliser une campagne d'échantillonnage et d'analyses physico-chimiques, pour améliorer la connaissance sur la qualité des eaux souterraines du bassin ;
- (4) Consolider l'évaluation de la recharge par l'utilisation de méthodes additionnelles dont la Méthode des Bilans Chlorures (MBC), ce qui impliquera des échantillonnages spécifiques pour l'acquisition de ces données ;
- (5) Consolider le suivi périodique des niveaux de nappe, (i) par l'ajout d'un ou deux piézomètres additionnels au réseau de suivi de la DEIE et (ii) par l'utilisation de sondes automatiques ;
- (6) Intégrer deux ouvrages au réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines de la DEIE ;
- (7) Améliorer la collecte et la capitalisation des données sur les eaux souterraines et sur leur exploitation, notamment par l'exploitation de l'application web d'encodage et de consultation de la BD-OMES de la DEIE ;

- (8) Réaliser des forages d'exploitation plus profonds (de l'ordre de 200 m à titre indicatif) visant à améliorer la productivité et augmenter les débits d'exploitation potentiels, dans une optique de valorisation renforcée de l'utilisation des eaux souterraines (AEP Multi-Villages et/ou transferts d'eau) ;
- (9) Favoriser le développement économique de la zone (industrie, agriculture) par la valorisation des potentialités aquifères qu'offre le bassin ;
- (10) Valoriser les ressources en eaux souterraines qu'offre le site de forage Christine, dans le cadre de projets de développements socio-économiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Barbé, L.L., Lebel, T., 1997. Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950–1990. *J. Hydrol., HAPEX-Sahel* 188–189, 43–73. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)03154-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03154-X)
- BARTHELET, D., 1975. Rapport de fin de mission sur les portions voltaïques des degrés carrés de Kandi et Kirtachi. Étude préliminaire du gisement d'Aloub Djouana. Ministère du commerce, du développement industriel et des mines, Direction de la géologie et des mines, République de Haute-Volta.
- Bertrand-Safarti, J., Moussine-Pouchkine, A., Affaton, P., Trompette, R., Bellion, Y., 1990. Cover sequences of the West African Craton : The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives. Springer-Verl. 65–82.
- C. CASTAING, M. BILLA, J.P. MILESI, D. THIEBLEMONT, J. LE METOUR, E. EGAL, C. GUERROT, A. COCHERIE, P. CHEVREMONT, M., M. TEGYEY, Y. ITARD (BRGM), B. ZIDA, I. OUEDRAOGO, S. KOTE, B.E. KABORE, C. OUEDRAOGO (BUMIGEB), J.C. KI, C. ZUNINO (ANTEA), 2003. Notice explicative de la Carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1 000 000.
- Caprio, J.M. The solar thermal unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration. In *Phenology and Seasonality Modeling*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1974; pp. 353–364.
- CPCS, 1967.- Classification française des sols. Edit. 1967. Laboratoire de géologie pédologie de l'ENSA Grignon, France
- Dakoure, D., 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso-Mali)-essai de modélisation (PhD Thesis). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Delfour, Géologie de la partie nord du cercle de Dori, Haute Volta, BRGM, 1965, 205 p., multigraphie, 7 pl. HT
- DELFOUR, J. et JEAMBRUN, M., 1970.- Notice explicative de la carte géologique au 1.200.000. Carte géologique de l'oudalan BRGM, Paris, France, 59 p.
- Dembele, Y., Somé, L., 1991. Propriétés hydrodynamiques des principaux types de sol du Burkina Faso. *IAHS-AISH Publ.* 217–227.
- DEYNOUX, M., 1983. Les formations de plate-forme d'âge Précambrien supérieur et Paléozoïque dans l'Ouest africain corrélation avec les zones mobiles. Pergamon Press 46–74.
- DEYNOUX, M., Affaton, P., Trompette, R., Villeneuve, M., 2006. Pan-African tectonic evolution and glacial events registered in Neoproterozoic to Cambrian cratonic and foreland basins of West Africa. *Journal Afr. Earth Sci.* 46, 397–426.
- DIOUF, M., NONGUIERMA, A., AMANI, A., Royer, A., 2001. Lutte contre la sécheresse au Sahel: résultats, acquis et perspectives au Centre régional AGRHYMET. *Sci. Chang. PlanétairesSécheresse* 11, 257–66.
- Direction Générale de l'Agence de l'Eau du Gourma, 2020. *PHYSIOGRAPHIE DE L'ESPACE DE COMPETENCE DE L'AGENCE DE L'EAU DU GOURMA (Rapport final)*.
- DJAH K. E., 2020. Évaluation de la recharge des aquifères du Burkina Faso par approche bilantaire et spatialisée. Mémoire de master, 2ie, 77p.
- Gombert P., Traoré S., 1998. Valorisation des débits interannuels de la source de la guinguette. Programme RESO, Assistance Technique Générale, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 10p

- Gourcy, L. & al, 2017. Rapport du projet régional de coopération technique – système du Liptako Gourma et de la Haute Volta. AIEA.
- HARGREAVES G.H. (1975) - Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, vol. 18, n° 5, p. 980-984. DOI : [10.13031/2013.36722](https://doi.org/10.13031/2013.36722)
- Hulme, M., Doherty, R., Ngara, T., New, M., Lister, D., 2001. African climate change: 1900-2100. *Clim. Res.* 17, 145–168. <https://doi.org/10.3354/cr017145>
- IRMAK S., IRMAK A., JONES J.W., HOWELL T.A., JACOBS J.M., ALLEN R.G. et HOOGENBOOM G. (2003-b) - Predicting daily net radiation using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 129, n° 4, p. 256-269. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:4(256)
- IRMAK S., IRMAK A. et JONES J.W. (2003-c) - Solar and net radiation based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 129, n° 5, p. 336-347. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:5(336)
- IWACO, B.V., 1993. Carte hydrogéologique du Burkina Faso, échelle 1:500.000 : Feuille Fada-N’Gourma (No. 60.451/28), BILAN D’EAU. Ouagadougou.
- JENSEN M.E. et HAISE H.R. (1963) - Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, vol. 89, p. 15-41. DOI: [10.1061/JRCEA4.0000287](https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000287)
- Kaboré, F., Gamene, S., Hien, D., 2016. Rapport final de l’inventaire des sources d’eau de l’espace de gestion de l’Agence de l’Eau du Gourma. Agence de l’Eau du Gourma.
- Kafando S., 2014. Amélioration des connaissances des ressources en eau souterraine au Burkina Faso : cas de la carte hydrogéologique de la région du Sahel. Mémoire, Université de Ouagadougou.
- Koussoube Youssouf, 2010. Hydrogéologie des séries sédimentaires de la dépression piézométrique du Gondo (Bassin du Sourou) - Burkina Faso / Mali. (Thèse UPMC)
- Lajaunie, M.-L., 2017. Annexe 1: Diagnostic sur les Eaux Souterraines. The World Bank.
- Lerner, D.N., 1990. Groundwater recharge in urban areas. *Atmospheric Environ. Part B Urban Atmosphere* 24, 29–33. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(90\)90006-G](https://doi.org/10.1016/0957-1272(90)90006-G)
- Machard, H., 2017. AMELIORATION DE LA CONNAISSANCE ET DE LA GESTION DES EAUX AU BURKINA FASO (Rapport définitif).
- MAH / Groupement CACI-CETRI, 2012. Etudes des potentialités du forage Christine dans la Province de l'Oudalan, Région du Sahel. Rapport de Synthèse.
- Moussine-Pouchkine, A. and Bertrand-Sarfati, J., 1997. Tectonosedimentary subdivisions in the neoproterozoic to Early Cambrian cover of the taoudenni Basin (Algeria-Mauritania-Mali). *Journal of African Earth Sciences*, 24(4): 425-443.
- Ouedraogo, Tégawendé Esther., 2018. ETUDE DES NAPPES AQUIFÈRES DU BASSIN DU NIGER AU BURKINA FASO Master de spécialisation en sciences et gestion de l'environnement dans les pays en développement Année académique : 2017-2018 URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/5593>
- OUEDRAOGO, O.F. (DGM), Equipe de projet SYSMIN, (coordination C. CASTAING, BRGM), 2003. Notice explicative de la cartographie géologique du Burkina Faso à 1/200 000 et 1/million
- PENMAN H.L. (1963) - *Vegetation and hydrology*. Édit. Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden (Angleterre), communication technique n° 53, 124 p. DOI : [10.1097/00010694-196311000-00014](https://doi.org/10.1097/00010694-196311000-00014)
- TABARI H. et TALAEE P.H. (2011) - Local calibration of the Hargreaves and Priestley-Taylor equations for Estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 16, n° 10, p.837-845. DOI : [10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000366](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000366)

- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R., 1955. The water balance. Centerton (N.J., U.S.A.), Drexel Institute of Climatology, Laboratory of Climatology, 8(1), 104 p
- Trompette, R., 1973. Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie (Bordure occidentale du bassin de Taoudéni, Afrique de l'Ouest). Un exemple de sédimentation du craton. Etude stratigraphique et sédimentologique, Marseille. 702 pp.
- Villeneuve, M., 2005. Paleozoic basins in West Africa and the Mauritanide thrust belt. J. Afr. Earth Sci. 166–195.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des ouvrages répertoriés

Base de données	Commune	Village	positif	type	x_utm	y_utm	Débit _m3/h	Alter- _m	Profon- _m	NS_m	Altér sat_m	Formation
BUMIGEB		Ariel (arae)			672738.45	1614387.07	1.5	1	47	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DIGUEL	Diguel	Non	Forage	619928.15	1596909.49	-	15	49	-	-	Formation de Firgoun
BUMIGEB		Ariel (arae)			672858.15	1614387.91	4.5	8	54	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe	Non	Forage	749521.87	1634020.63	-	8	70	-	-	Formation de Firgoun
BUMIGEB		Ariel (arae)			672404.75	1615030.21	1	16	70	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DEOU	Gargassa	Oui	Forage	753690.92	1631914.78	-	17.75	70.16	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DEOU	Gargassa	Oui	Forage	753560.09	1631833.21	-	8.82	72.12	-	-	Formation de Firgoun
OMES	BANH	Djem	Non	Forage	575989.57	1573395.46	-	8	75	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe	Non	Forage	749451.50	1634180.41	-	7	80	-	-	Formation de Firgoun
BUMIGEB		Bouressa			576658.77	1573126.62	0.65	20	80	-	-	Formation de Firgoun
OMES	OURS	Tinhantane	Oui	Forage	778008.90	1634758.97	-	24.4	80.82	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DEOU	Gargassa	Oui	Forage	753530.00	1631824.00	-	9.35	81	-	-	Formation de Firgoun
OMES	TIN-AKOFF	Bangao	Oui	Forage	792986.61	1639008.20	-	18.93	81.38	-	-	Formation de Firgoun
OMES	BANH	Seno-diao	Non	Forage	548458.20	1557295.99	-	38.25	85.68	-	-	Formation de Firgoun
OMES	BANH	Djem	Non	Forage	575997.72	1573677.65	-	24.83	88.6	-	-	Formation de Firgoun
OMES	BANH	Djem	Non	Forage	576297.70	1573576.68	-	6	100	-	-	Formation de Firgoun
OMES	DIGUEL	Diguel	Oui	Forage	620962.65	1599062.78	1.2	22	52	25.54	0	Formation de Firgoun
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe		Puit	749477.54	1633973.68	0.83	4	56	26.77	0	Formation de Firgoun
OMES	DIGUEL	Diguel	Oui	Puit	619910.10	1596919.36	3.6	22	90	27.2	0	Formation de Firgoun
OMES	DIGUEL	Diguel	Oui	Puit	621106.66	1599020.34	15	32	58	31.68	0.32	Formation de Firgoun
OMES	DJIBO	Piladi	Oui	Forage	653064.23	1608001.77	10.8	37.83	88.68	42.25	0	Formation de Firgoun
OMES	TIN-AKOFF	Intayalene		Forage	786864.30	1645291.94	-	14.4	81.6	25.4	0	Formation de Massi
OMES	TIN-AKOFF	Wassakore		Forage	814229.99	1645972.87	0.9	6	-	41.5	0	Formation de Massi
OMES	TIN-AKOFF	Massifigui	Oui	Forage	790422.03	1652375.10	1.7	8.73	-	45.7	0	Formation de Massi
OMES	TIN-AKOFF	Tin-zalayanane	Oui	Forage	817134.07	1646967.69	6	14.94	81.212	49.4	0	Formation de Massi
OMES	TIN-AKOFF	Intayalene	Oui	Forage	786982.10	1645447.13	1.5	28.5	70.12	52.52	0	Formation de Massi
OMES	TIN-AKOFF	Bangao	Oui	Forage	792182.82	1646060.67	2.4	18.43	81.17	59.8	0	Formation de Massi
OMES	TIN-AKOFF	Inabao		Forage	770590.55	1658634.40	7.2	-	-	69.15	-	Formation de Massi
OMES	DEOU	Gandafabou	Oui	Forage	738358.75	1642550.86	-	-	-	-	-	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Gandafabou	Non	Forage	741372.11	1641784.57	-	10.69	-	-	-	Formation d'Irma
OMES	GOROM-GOROM	Set-sere	Non	Forage	741372.11	1641784.57	-	13.51	-	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Fereriwo (ferililo)			754065.60	1641232.58	18	9	44	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Tounte			719998.34	1631582.10	4	10	49	-	-	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Soum-bella		Forage	689890.56	1629182.16	-	49	54	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Saba			729529.17	1636097.73	-	21	55	-	-	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Soum-bella		Forage	698138.78	1631307.51	0.53	52	55	-	-	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Soum-bella	Oui	Forage	703841.80	1631846.19	2.5	-	57.5	-	-	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Gountoure-kiri	Non	Forage	726780.68	1632536.30	-	3.35	62.8	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Fereriwo (ferililo)			754693.75	1641239.22	0.54	8	70	-	-	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Gountoure-gnegne	Oui	Forage	730293.73	1637792.95	-	19.13	72.17	-	-	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Gountoure-gnegne	Oui	Forage	731291.59	1636354.43	-	19.13	72.17	-	-	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Tounte	Oui	Forage	713975.70	1630963.06	3	-	72.39	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Gandafabou			737573.66	1648443.26	11.52	12	73	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Gandafabou			737662.50	1648536.34	28.8	18	73	-	-	Formation d'Irma
BUMIGEB		Gandafabou			742039.78	1647309.30	-	19	130	-	-	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Fererio	Oui	Forage	755394.38	1640889.86	18	9	44	2.38	6.62	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Soum-bella	Oui	Forage	702727.42	1631321.14	4	13	38	14.13	0	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Fererio		Forage	754871.39	1640561.08	0.54	8	70	15.9	0	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Soum-bella	Oui	Forage	702873.95	1630618.56	2.4	20.3	50.6	25.37	0	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Gountoure-kiri		Forage	720695.90	1630543.27	4.5	-	-	28.96	-	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Fererio		Forage	754730.82	1640554.06	2.4	26	-	30.96	0	Formation d'Irma
OMES	KOUTOUGOU	Soum-bella	Oui	Forage	702454.14	1631445.01	2.5	9.3	62.9	42.11	0	Formation d'Irma
OMES	DEOU	Gountoure-kiri	Non	Forage	718561.63	1631661.39	-	-	-	47.3	-	Formation d'Irma
OMES	TIN-AKOFF	Intangom	Oui	Forage	182272.45	1650725.83	7.18	37.5	63.7	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Intangom			180836.37	1652959.98	-	23	65	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Intangom		Forage	182212.63	1650726.63	-	25.65	67.35	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-ouest	Oui	Forage	787631.44	1660338.20	-	-	-	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Massifigui	Oui	Forage	795015.76	1651643.93	-	-	-	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Intangom	Oui	Forage	821285.24	1650450.29	-	-	-	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Massifigui	Non	Forage	794988.74	1651652.58	-	14.65	-	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-est	Non	Forage	793472.41	1656761.59	-	15	-	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-akof			804783.61	1657078.85	-	4	8	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akof	Non	Forage	804611.31	1656990.16	-	4	8	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-hassan			796445.90	1659065.33	-	1	21	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Ouassakore			816916.96	1655452.77	1.84	13	29	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Kacham			781629.37	1657993.48	-	3	32	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham	Non	Forage	784939.66	1657940.50	-	3	32	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Menzouvou			810437.45	1656936.52	2.5	26	37	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-akof			804783.55	1654741.01	0.8	6	40	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-hassan			796445.90	1659065.33	0.5	2	41	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-hassan		Forage	796445.89	1659065.33	0.5	2	41	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Fadar-fadar			761629.43	1663454.54	5.83	8	43	-	-	Formation de Samyere

BUMIGEB		Kacham			781629.37	1657993.48	12	6	47	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Fadar-fadar			761852.57	1662196.07	1.8	12	47	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Rafnamane	Oui	Forage	756983.67	1663053.52	6	4.8	54.2	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-hassan			792226.99	1659320.78	0.8	2	56	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Oui	Forage	760336.57	1661715.11	1.44	14.02	57.17	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Menzourou	Oui	Forage	812412.23	1656635.95	2.5	4.94	63.17	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Intangom	Non	Forage	817760.19	1650744.85	-	23	65	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-est	Oui	Forage	794179.63	1657120.46	8.2	22.12	65.23	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Oui	Forage	755527.73	1657262.58	-	10.18	72.18	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Oui	Forage	761010.60	1654754.29	-	8.11	72.21	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Oui	Forage	804991.07	1656758.52	-	5.9	80.12	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Inabao	Oui	Forage	772193.77	1666119.67	-	3.78	81.12	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-zalayanane	Oui	Forage	819039.04	1648165.20	-	20.18	81.46	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff		Forage	806634.92	1650304.30	-	51.5	81.7	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-est	Non	Forage	790215.55	1659754.80	-	17	82	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff		Forage	806542.44	1650518.44	-	16.99	82.15	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-akof			804783.61	1657078.85	2	4	83	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-est	Non	Forage	791286.60	1657984.05	-	5	85	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Tin-akof			804783.55	1654741.01	1	5	90	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Intangom	Non	Forage	817763.16	1650748.21	-	6	94	-	-	Formation de Samyere
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe	Non	Forage	741838.98	1653605.32	-	18	94	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Non	Puit	804796.86	1656977.03	-	15	97	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Non	Forage	809699.94	1656157.83	-	63.93	105.5	-	-	Formation de Samyere
BUMIGEB		Gandafabou			735468.01	1655801.40	-	17	112	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Non	Forage	763147.80	1655875.59	-	43.7	127	-	-	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Wassakore	Oui	Forage	814816.52	1656193.56	1.84	13	29	5.1	7.9	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Oui	Forage	806570.48	1657655.36	2.7	5.6	-	7.8	0	Formation de Samyere
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe		Forage	735556.19	1655958.78	0.6	25	-	8.22	16.78	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Intangom	Oui	Forage	821560.08	1652481.29	6	4	44	10.36	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-ouest	Oui	Forage	783611.33	1658016.55	12	6	47	14.2	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-rhassane i		Forage	794691.78	1658505.40	15.6	16	-	14.82	1.18	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Oui	Forage	804812.18	1656949.54	2	4	83	15.4	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff		Forage	804660.47	1656656.35	0.4	8	-	16.44	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-rhassane i	Non	Forage	794283.48	1658638.76	-	1	21	18.8	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff		Forage	804961.33	1656743.25	0.8	6	40	20.4	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Wassakore		Forage	815936.78	1655162.89	1.2	2	-	21.86	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff		Forage	805184.78	1656343.01	1	5	90	22	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Oui	Forage	805988.87	1656368.82	0.66	5.65	-	22.24	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-rhassane i	Oui	Forage	794718.86	1658490.23	9.9	32.32	54.6	22.39	9.93	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Oui	Forage	802677.42	1658097.89	9	15.3	48.5	22.92	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-est	Oui	Forage	791286.98	1657955.88	10	21.05	60.6	24.23	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff		Forage	803624.09	1657254.41	6	12	-	24.25	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Oui	Forage	757116.57	1659330.96	1.8	12	47	24.3	0	Formation de Samyere
OMES	GOROM-GOROM	Bosseye-dogabe	Oui	Forage	792457.58	1658074.80	4	10.35	-	24.75	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-rhassane ii	Oui	Forage	794747.61	1658582.86	3.9	17	51.55	25	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-ouest		Forage	782857.55	1657792.79	39.2	24	-	25.25	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-ouest	Oui	Forage	784509.18	1659688.59	6.6	9.05	54.5	25.28	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Menzourou	Oui	Forage	809699.94	1656157.83	12	55.2	81.4	25.87	29.33	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-rhassane i		Forage	798259.86	1660093.46	0.8	2	56	26	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Oui	Forage	759869.26	1661540.62	5.83	8	43	26.24	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-rhassane ii	Oui	Forage	797010.79	1658124.50	1.2	2.33	-	27.64	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar nord		Forage	761359.74	1664604.67	18	6	-	27.7	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud		Forage	763236.09	1655729.08	3.6	11	-	27.7	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Kacham-est	Oui	Forage	788852.23	1657787.82	12	19.97	-	27.74	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud		Forage	761650.94	1663670.21	1	5	-	29.38	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Massifigui		Forage	794547.04	1652302.66	4	6	-	29.96	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Inabao	Oui	Forage	777854.14	1659982.58	2.834	12.75	51.22	34.55	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Fadar-fadar sud	Oui	Forage	763476.95	1655848.47	-	36.5	75.5	36.36	0.14	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-akoff	Oui	Forage	805823.08	1650632.28	18	35	51.5	37.58	0	Formation de Samyere
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe		Forage	741999.48	1653696.60	2.1	13	-	38.06	0	Formation de Samyere
OMES	TIN-AKOFF	Tin-zalayanane	Oui	Forage	819345.72	1648501.55	9	24.9	63.17	39	0	Formation de Samyere
OMES	DEOU	Gandafabou-guelgobe	Oui	Forage	742348.15	1653804.19	11.52	12	73	39.9	0	Formation de Samyere
OMES	OURS	Deibere	Oui	Forage	782110.44	1646106.00	9	1.95	-	44.66	0	Formation de Samyere
BUMIGEB		Kassa			194671.56	1644842.93	2.5	15	35	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Kassa			195863.06	1644427.83	7.2	19	40	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Intangom			183456.06	1652002.25	6	4	44	-	-	Formation du Beli
OMES	MARKOYE	Goungam	Oui	Forage	191847.16	1652756.56	1.4	3.7	-	23.23	0	Formation du Beli
OMES	TIN-AKOFF	Intangom	Oui	Forage	185098.70	1654076.05	0.9	4.41	60.11	31.9	0	Formation du Beli
OMES	GOROM-GOROM	Gaigou	Non	Forage	815158.27	1658398.18	-	14.88	-	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Koma-lambé			553157.36	1561514.26	0.23	6	9	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Gargassa			757186.30	1631887.06	0.69	13	40	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Saba			733438.63	1630847.16	1.56	18	52	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Boullel			780984.71	1636457.22	-	33	54	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Gandafabou			733250.02	1631798.42	0.83	4	56	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Gandafabou			733250.02	1631798.42	-	8	70	-	-	Formation du Beli
BUMIGEB		Bangawo			793859.58	1640793.48	-	18	98	-	-	Formation du Beli
OMES	TIN-AKOFF	Inabao	Oui	Forage	772513.97	1668159.26	0.76	5.8	54.7	19.3	0	Formation du Beli
OMES	DEOU	Gountoure-kiri	Oui	Forage	726233.39	1630594.34	2.57	9.05	-	24.73	0	Formation du Beli
OMES	DEOU	Gandafabou	Oui	Forage	749359.57	1634968.70	28.8	18	73	39.8	0	Formation du Beli

Annexe 2 : Recueil des cartes