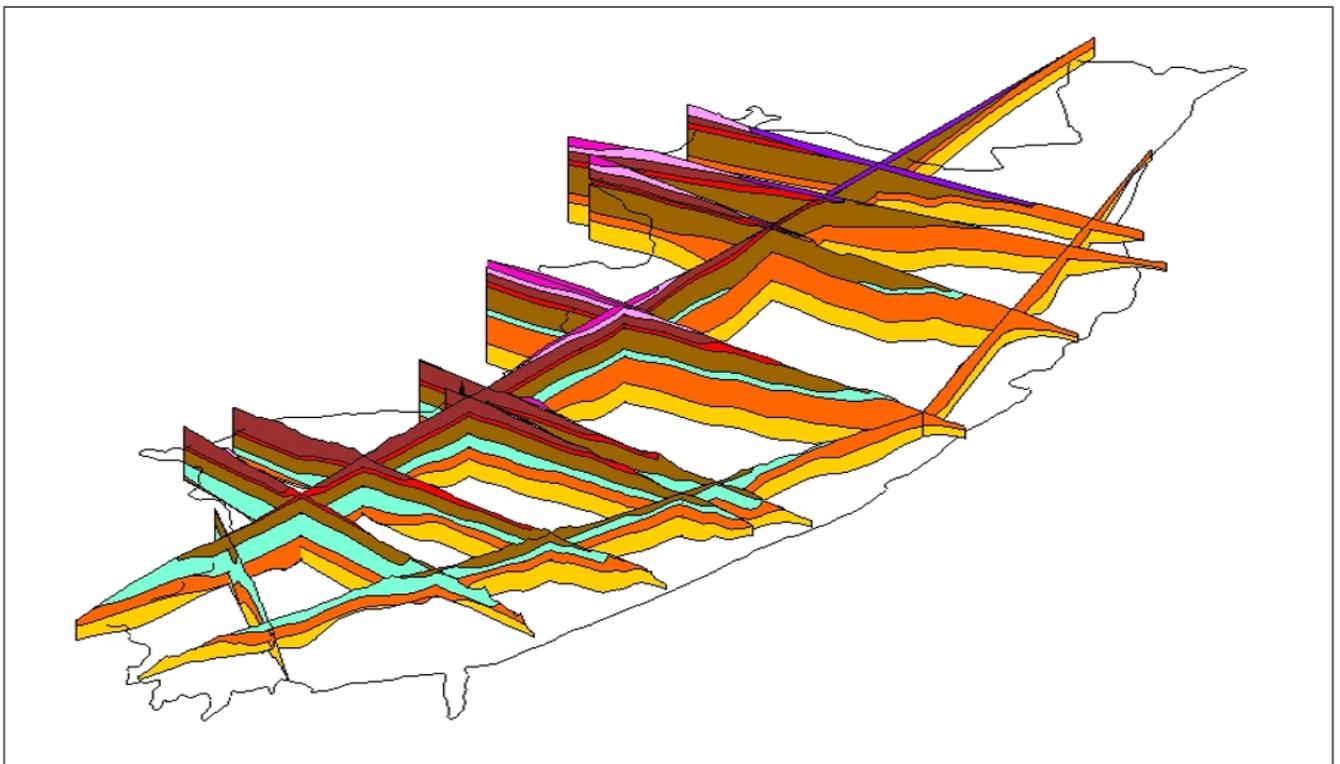




BURKINA FASO
Unité - Progrès - Justice



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



SYNTHESE ET VALORISATION DES ETUDES SUR LES RESSOURCES EN EAU

**MODELISATION GEOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU SEDIMENTAIRE DE L'OUEST DU BURKINA FASO
PHASE 1 : PREPARATION DES DONNÉES D'ENTREE, MODELE CONCEPTUEL
ET MODELE GEOLOGIQUE INITIAL**

RÉFÉRENCE : RT3.2.1

VERSION FINALE VF – 06/2023



Synthèse et valorisation des études sur les ressources en eau au profit du PAEA
Axe 3 : Elaborer des outils de gestion des ressources en eau souterraine
Résultat 3.2 : Un modèle de gestion des aquifères du bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso est réalisé
Activité 3.2.1 : Elaboration du modèle conceptuel, préparation des données d'entrée et modèle géologique initial

MODELISATION GEOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DU SEDIMENTAIRE DE L'OUEST DU BURKINA FASO

PHASE 1 : PREPARATION DES DONNÉES D'ENTREE, MODELE CONCEPTUEL ET MODELE GEOLOGIQUE INITIAL

Réf : RT.3.2.1	Version : VF	Date : 23/06/2023
Préparé par : DEROUANE Johan, avec la collaboration de TIDIANI Sidi Koné, BANDRE Levy Stéphane, HAKIMI Youcef, KUTANGILA Succes	Vérifié par : DEROUANE Johan et YENOU Lazare	

Réalisé avec l'appui scientifique de l'Université de Liège, faculté des Sciences Appliquées, Urban and Environmental Engineering

Table des matières

A.	INTRODUCTION ET CADRE DE L'INTERVENTION	11
A.1.	CONTEXTE GENERAL	11
A.2.	LE PAEA ET L'ETUDE SEVERE	12
B.	OBJECTIF DE L'ÉTUDE DE MODELISATION	13
C.	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE DE MODELISATION	13
C.1.	PHASAGE DE L'ETUDE	13
C.2.	APPROCHE CONCEPTUELLE POUR LA MODELISATION	14
C.3.	CHOIX DU LOGICIEL DE MODELISATION	15
C.4.	COLLECTE ET CAPITALISATION DES DONNEES EXISTANTES.....	16
C.5.	ELABORATION DU MODELE GEOLOGIQUE	16
C.6.	ELABORATION DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE.....	17
C.6.1.	<i>Objectifs poursuivis</i>	<i>17</i>
C.6.2.	<i>Paramétrisation du modèle</i>	<i>18</i>
C.6.3.	<i>Calage et validation du modèle</i>	<i>19</i>
C.6.4.	<i>Exploitation du modèle et définition de scénarios</i>	<i>19</i>
C.7.	MISE A DISPOSITION DU MODELE ET DES LICENCES.....	19
C.8.	COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES, TRANSFERT DE COMPETENCE ET FORMATION A LA MODELISATION	20
D.	DÉLIMITATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	20
E.	COLLECTE, TRAITEMENT ET CAPITALISATION DES DONNEES	23
E.1.	COLLECTE DES DONNEES.....	23
E.2.	TRAITEMENT ET CAPITALISATION DES DONNEES COLLECTEES	25
E.2.1.	<i>Elaboration de la base de données relative à la modélisation.....</i>	<i>25</i>
E.2.2.	<i>Enrichissement de la base de données relative à la modélisation</i>	<i>26</i>
F.	PREPARATION ET INTERPRETATION SYNTHETIQUE DES DONNEES UTILES A LA MODELISATION.....	30
F.1.	TOPOGRAPHIE ET GEOMORPHOLOGIE	30
F.1.1.	<i>Présentation générale.....</i>	<i>30</i>
F.1.2.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	<i>32</i>
F.2.	CLIMATOLOGIE.....	33
F.2.1.	<i>Présentation générale.....</i>	<i>33</i>
F.2.1.1.	Localisation des stations de l'ANAM	33
F.2.1.2.	Précipitations.....	34
F.2.1.3.	Températures	38
F.2.2.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	<i>40</i>
F.3.	HYDROGRAPHIE ET HYDROMETRIE	40
F.3.1.	<i>Présentation générale.....</i>	<i>40</i>
F.3.1.1.	Réseau hydrographique et bassins versants	40
F.3.1.2.	Réseau hydrométrique et données de débit des eaux de surface	41
F.3.2.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	<i>43</i>
F.4.	TYPES DE SOL.....	45
F.4.1.	<i>Présentation générale.....</i>	<i>45</i>
F.4.2.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	<i>47</i>
F.5.	CONTEXTE GEOLOGIQUE	48
F.5.1.	<i>Présentation générale.....</i>	<i>48</i>
F.5.1.1.	Extension et configuration géologique générale du bassin sédimentaire de Taoudeni	48
F.5.1.1.1.	Localisation et extension du bassin	48
F.5.1.1.2.	Configuration géologique générale du bassin	49
F.5.1.1.3.	Lithostratigraphie générale du bassin	50

F.5.1.2.	Configuration géologique générale de la bordure sud-est bassin de Taoudeni	52
F.5.1.3.	Contexte géologique du bassin de Taoudeni à l'ouest du Burkina Faso	52
F.5.1.3.1.	La couverture sédimentaire Néoproterozoïque	53
F.5.1.3.2.	Le Continental Terminal (CT)	61
F.5.1.3.3.	Le Quaternaire	61
F.5.1.3.4.	Les dolérites	62
F.5.1.3.5.	Superficies à l'affleurement	62
F.5.1.4.	Tectonique générale et géodynamisme de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni	63
F.5.1.4.1.	Structures majeures du bassin définies à partir des anomalies gravimétriques	63
F.5.1.4.2.	Principaux mouvements tectoniques à l'échelle régionale	65
F.5.1.4.3.	Principaux mouvements tectoniques à l'échelle du sud-ouest du Burkina Faso	66
F.5.1.4.4.	Synthèse par formation géologique	67
F.5.1.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	69
F.6.	CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	70
F.6.1.	<i>Unités hydrogéologiques rencontrées</i>	70
F.6.1.1.	Présentation générale	70
F.6.1.1.1.	Unité hydrogéologique des Grès Inférieurs (GI)	73
F.6.1.1.2.	Unité hydrogéologique des Grès de Kawara-Sindou (GKS)	73
F.6.1.1.3.	Unité hydrogéologique des Grès Fins Glauconieux (GFG)	73
F.6.1.1.4.	Unité hydrogéologique des Grès à Granules de Quartz (GGQ)	74
F.6.1.1.5.	Unité hydrogéologique des Siltites, Argilites et carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1)	74
F.6.1.1.6.	Unité hydrogéologique des Grès Fins Roses (GFR)	74
F.6.1.1.7.	Unité hydrogéologique des Siltites, Argilites et Carbonates de Samandeni-Kiebandi (SAC2)	75
F.6.1.1.8.	Unité hydrogéologique des Siltites et Grès-Quartzite de la passe de Fo (SQ)	75
F.6.1.1.9.	Unité hydrogéologique des Grès de Fo-Bandiagara (GFB)	75
F.6.1.1.10.	Unité hydrogéologique du Continental Terminal (CT)	76
F.6.1.1.11.	Unité hydrogéologique des alluvions du Quaternaire (ALL)	76
F.6.1.2.	Préparation des données d'entrée pour la modélisation	76
F.6.2.	<i>Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines</i>	76
F.6.2.1.	Présentation générale	76
F.6.2.1.1.	Débits en fin de foration	78
F.6.2.1.2.	Niveau statique et interaction eau de surface – eau souterraine	80
F.6.2.2.	Préparation des données pour la modélisation	82
F.6.3.	<i>Piézométrie</i>	83
F.6.3.1.	Elaboration de cartes piézométriques et directions d'écoulement	83
F.6.3.2.	Suivi et évolution des niveaux de nappe	88
F.6.3.2.1.	Réseau piézométrique national (RPN – DEIE)	88
F.6.3.2.2.	Réseau piézométrique de l'AEM	91
F.6.3.3.	Préparation des données d'entrée pour la modélisation	93
F.6.4.	<i>Paramètres hydrodynamiques</i>	94
F.6.4.1.	Transmissivités	94
F.6.4.2.	Coefficient d'emmagasinement	97
F.6.4.3.	Préparation des données d'entrée pour la modélisation	98
F.6.5.	<i>Recharge</i>	98
F.6.5.1.	Présentation générale	98
F.6.5.1.1.	Synthèse des évaluations existantes de la recharge dans la zone du sédimentaire de l'ouest	98
F.6.5.1.2.	Evaluation spatio-temporelle de la recharge par approche bilantaire	102
F.6.5.2.	Préparation des données d'entrée pour la modélisation	107
F.7.	SOURCES	107
F.7.1.	<i>Présentation générale</i>	107
F.7.1.1.	Sources du sédimentaire de l'ouest	107
F.7.1.2.	Sources de la zone de Bobo Dioulasso - Pessô	108
F.7.2.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	110
F.8.	PRELEVEMENTS EN EAUX SOUTERRAINES	110
F.8.1.	<i>Présentation générale</i>	110
F.8.1.1.	Prélèvements ONEA	110

F.8.1.2.	Prélèvements hydraulique rurale	114
F.8.1.3.	Prélèvements industriels et pour l'irrigation	115
F.8.1.3.1.	Prélèvements industriels	115
F.8.1.3.2.	Prélèvements agricoles	115
F.8.2.	<i>Préparation des données d'entrée pour la modélisation</i>	116
G.	ELABORATION DU MODELE CONCEPTUEL	116
G.1.	OBJECTIFS DU MODELE CONCEPTUEL	116
G.2.	APERÇU DES CHOIX CONCEPTUELS RELATIFS AUX MODELISATIONS EXISTANTES DANS LA ZONE DU SEDIMENTAIRE DE L'OUEST	117
G.3.	OBJECTIFS DE LA MODELISATION DANS LE CADRE DU PAEA	120
G.4.	CHOIX OPERES ET HYPOTHESES RETENUES DANS LE MODELE CONCEPTUEL	120
G.4.1.	<i>Etendue de la zone modélisée</i>	120
G.4.2.	<i>Identification des horizons géologiques et hydrogéologiques considérés</i>	122
G.4.3.	<i>Représentation des propriétés hydrodynamiques et des échanges entre horizons (hydro)géologiques</i> 122	
G.4.4.	<i>Régime de simulation (permanent / transitoire) et calibration du modèle</i>	124
G.4.5.	<i>Conditions aux limites du modèle</i>	124
G.4.6.	<i>Représentation de la recharge</i>	124
G.4.7.	<i>Représentation des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et représentation des sources</i> 125	
G.4.8.	<i>Représentation des prélèvements</i>	125
H.	MODELE GEOLOGIQUE INITIAL	125
H.1.	PHASAGE ET METHODOLOGIE D'ELABORATION DU MODELE GEOLOGIQUE	125
H.1.1.	<i>Elaboration du modèle géologique initial</i>	126
H.1.1.1.	Représentation de la surface topographique du modèle géologique	126
H.1.1.2.	Encodage des « boreholes »	127
H.1.1.3.	Création des cross-sections GMS	129
H.1.1.4.	Création du solide (modèle géométrique)	130
I.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	132
	BIBLIOGRAPHIE	134
	ANNEXES	136
	ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU LOGICIEL GMS ET DE MODFLOW	136

Liste des illustrations

Figure 1 : Logigramme de l'axe 3.....	12
Figure 2 : Approche conceptuelle pour la modélisation	15
Figure 3 : Délimitation de la zone d'étude au Burkina Faso (zone reprise en orange).....	21
Figure 4 : Extension des bassins sédimentaires rencontrés au Burkina Faso	22
Figure 5 : Extension de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (Mali & Burkina Faso).....	23
Figure 6 : Schéma conceptuel de capitalisation des données utiles à la modélisation	26
Figure 7 : Enrichissement des bases de données en vue de la modélisation	27
Figure 8 : Topographie de la zone d'étude (MNT SRTM30).....	31
Figure 9 : Topographie de la bordure sud du bassin de Taoudeni (Mali & Burkina Faso)	32
Figure 10 : Transformation du MNT en triangular irregular network (GMS).....	33
Figure 11 : Carte de localisation des stations climatiques de l'ANAM.....	34
Figure 12 : Précipitations annuelles moyennes sur la période 2011-2020	35
Figure 13 : Distribution des précipitations annuelles sur la période 1981-2020 pour les stations ANAM de Toeni, Kouka et Sindou.....	36
Figure 14 : Distribution des précipitations mensuelles moyennes sur la période 2016-2020 pour les stations ANAM de Toeni, Kouka et Sindou	37
Figure 15 : Distribution spatio-temporelle des précipitations mensuelles (moyenne 2011-2020).....	38
Figure 16 : Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes à Bobo Dioulasso sur la période 1990-2021	39
Figure 17 : Températures inter-mensuelles (période 2016-2021) minimales, maximales et moyennes à Bobo Dioulasso	39
Figure 18 : Réseau hydrographique de la zone d'étude et bassins versants	41
Figure 19 : carte du réseau hydrométrique national présent dans la zone d'étude	42
Figure 20 : Cotes altimétriques calculées des principaux cours d'eau pérennes.....	44
Figure 21 : Exemple de paramétrisation des conditions 'River' dans GMS (zone de Bobo Dioulasso).....	45
Figure 22 : Distribution des types de sol (selon HWSO FAO) dans la zone d'étude.....	46
Figure 23 : Carte des types de sols (HWSO FAO).....	46
Figure 24 : Taux de saturation (RFU/RFUmax) mensuel pour l'année 2008 (année médiane P50 de la période 1991-2020)	48
Figure 25 : Extension du bassin sédimentaire de Taoudeni.....	49
Figure 26 : Log stratigraphique du bassin de Taoudéni (d'après Trompette, 1973).....	51
Figure 27 : Extension et configuration de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni.....	52

Figure 28 : Carte géologique de la zone sédimentaire ouest du Burkina Faso	54
Figure 29 : Log stratigraphique du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso (ARTELIA-SHER, adapté de Ouédraogo 2008)	55
Figure 30 : Pourcentages de superficies « à l'affleurement » des formations du sédimentaire de l'ouest	63
Figure 31 : Anomalies gravimétriques dans la bordure SE du bassin de Taoudéni (in Bronner et al., 1980) ..	64
Figure 32 : Transects géologiques (Ouédraogo & Derouane 2008, VREO)	70
Figure 33 : Carte des unités hydrogéologiques du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso	72
Figure 34 : Localisation des ouvrages (BD-OMES).....	77
Figure 35 : Graphique de distribution des ouvrages par formation.....	78
Figure 36 : Débits en fin de foration moyens et maximums par formation.....	79
Figure 37 : Carte des débits en fin de foration (krigeage à partir de BD-OMES, ARTELIA-SHER).	80
Figure 38 : Carte des niveaux statiques obtenue par krigeage à partir de la BD-OMES	82
Figure 39 : Carte piézométrique du sédimentaire de l'ouest	83
Figure 40 : Carte piézométrique de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (rive droite du fleuve Niger, Mali & Burkina Faso)	86
Figure 41 : Localisation des coupes du sédimentaire de l'ouest (adapté de Derouane 2007, VREO)	87
Figure 42 : Coupes hydrogéologiques de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (coupe 3) et du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso (coupe 2) (adapté de Derouane 2007, VREO)	87
Figure 43 : Carte du réseau piézométrique national (partie sédimentaire de l'ouest).....	89
Figure 44 : Chronique piézométrique et pluviométrique du site RPN de Bondokuy	90
Figure 45 : Chronique piézométrique et pluviométrique du site RPN de Nouna	90
Figure 46 : Localisation des piézomètres opérationnels du réseau de suivi AEM et des piézomètres abandonnés localisés dans la zone.....	91
Figure 47 : Chronique de niveaux piézométriques du F4 (réseau AEM).....	93
Figure 48 : Chronique de niveaux piézométriques du PZ22 (réseau AEM).....	93
Figure 49 : Distribution spatiale des transmissivités.....	95
Figure 50 : Statistiques de transmissivités par formation géologique.....	96
Figure 51 : Distribution de la transmissivité par classe de valeur (logarithmique) et par formation	97
Figure 52 : Carte de recharge spatialisée interannuelle moyenne sur la période 1991-2020 (méthode Thorntwaite).....	104
Figure 53 : carte de recharge spatialisée intermensuelle sur la période 1991-2020 (méthode Thorntwaite)	105
Figure 54 : Recharge annuelle (méthode Thorntwaite) à Orodara et à Nouna sur la période 1991-2020....	106
Figure 55 : Recharge mensuelle moyenne (méthode Thorntwaite) à Orodara et Nouna	107
Figure 56 : Localisation des sources du sédimentaire de l'ouest.....	108

Figure 57 : Coupe hydrogéologique conceptuelle dans la zone de Bobo Dioulasso et des sources de Nasso (SOGREAH 1994).....	109
Figure 58 : Evolution temporelle du débit de la source de Nasso-Guinguette	109
Figure 59 : Localisation des centres ONEA et forages ONEA dans le sédimentaire de l'ouest	111
Figure 60 : Chronique de prélèvements ONEA aux sources de Nasso (ONEA 1 & 2).....	112
Figure 61 : Ouvrages (forages et sources) exploités par l'ONEA dans la zone de Nasso, et piézomètres du réseau de suivi AEM	113
Figure 62 : Prélèvements ONEA annuels à Bobo Dioulasso (sources, forages, total) sur la période 2010-2021	114
Figure 63 : Extension et limites de la zone modélisée	121
Figure 64 : Modèle d'écoulement de Toth (NGWA 1984)	123
Figure 65 : Transformation du MNT en TIN pour intégration de la topographie dans GMS	127
Figure 66 : Localisation des boreholes et des coupes dans GMS.....	128
Figure 67 : Edition et paramétrisation des boreholes (GMS).....	128
Figure 68 : Distribution des boreholes et TIN topographie (GMS).....	129
Figure 69 : Génération des cross-sections à partir des boreholes (GMS).....	129
Figure 70 : Cross-sections générées dans GMS.....	130
Figure 71 : Zoom sur la zone de Nasso : représentation de la faille de contact entre GGQ et SAC1 (sources de Nasso-Guinguette)	130
Figure 72 : Vue 3D du modèle géologique (Solid GMS)	131
Figure 73 : Vue 3D du modèle géologique, depuis la frontière Mali-Burkina (Bandiagara)	131
Figure 74 : Vue 3D de coupes générées librement à travers le modèle géométrique.	132

Liste des tableaux

Tableau 1 : Approche méthodologique : phasage de l'étude	13
Tableau 2 : Données capitalisées au sein de la BD-MOD pour la modélisation géologique et hydrogéologique	30
Tableau 3 : Liste des stations hydrométriques localisées dans la zone du sédimentaire de l'ouest	43
Tableau 4 : Typologie des types de sol et des valeurs associées de RFUmax et de RUmax	47
Tableau 5 : Groupes et formations du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso.....	53
Tableau 6 : superficies « à l'affleurement » des formations du sédimentaire de l'ouest.....	62
Tableau 7 : Principales manifestations tectoniques au Burkina Faso	65
Tableau 8: Distribution des ouvrages par formation, et principales caractéristiques (source : BD-OMES consolidée par ARTELIA-SHER)	78
Tableau 9 : Piézomètres du RPN localisés dans le sédimentaire de l'ouest	88
Tableau 10 : Piézomètres opérationnels du réseau de suivi AEM	92
Tableau 11 : Statistiques de transmissivités par formation géologique	96
Tableau 12 : Distribution de la transmissivité par classe de valeur (logarithmique) et par formation	97
Tableau 13 : Données disponibles de coefficients d'emmagasinement.....	98
Tableau 14 : Synthèse des évaluations existantes de la recharge dans le sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso	101
Tableau 15 : Liste et caractéristiques des centres ONEA du sédimentaire de l'ouest.....	111
Tableau 16 : Aperçu des principaux modèles (hydro)géologiques existants de la zone du sédimentaire de l'ouest.....	119

Liste des abréviations

AEM	Agence de l'Eau du Mouhoun
AEP	Approvisionnement en Eau Potable
ANAM	Agence Nationale de la Météorologie
BAD	Banque Africaine de Développement
BADEA	Banque Arabe pour le Développement Économique en Afrique
BD	Base des Données
BD-Bewaco	Base de Données Bilan d'Eau iWACO
BD-MOD	Base de Données MODélisation
BD-OMES	Base de Données Ouvrages de Mobilisation des Eaux Souterraines
BD-RESO	Base de Données des Ressources en Eau du Sud-Ouest
BD-SEVR	Base de Données Synthèse Et la Valorisation des Études sur les Ressources en Eau
BF	Burkina Faso
BNDT	Base National de Données Topographiques
BM	Banque Mondiale
B.R.G.M.	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina Faso
BUNASOLS	Bureau National des Sols
BV	Bassin Versant
CACI-C	Centrale d'Assistance et de Contrôle/Ingénieurs-Conseils
CDT	Climate Data Tools
CHIRPS	Climate Hazards InfraRed Precipitation with Stations
CIEH	Comité Inter-Etat de l'Équipement Hydraulique
CIRAD	Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
Coeff Emm	Coefficient d'Emmagasinement
CT	Continental Terminal
CV	Coefficient de variation
DD	Degré Décimal
DEIE	Direction des Études et de l'Information sur l'Eau
D.F.M.G	Direction Fédérale des Mines et de la Géologie
DGIH	Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques
DGPS	Differential Global Positioning System
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
DR	Domaine des résultats
DREA-EST	Direction Régionale de l'Eau et Assainissement de l'Est
DREA	Direction Régionale de l'Eau et de l'Assainissement
ERES	Etude des Ressources en Eau Souterraine
ET	EvapoTranspiration
ETP	Evapotranspiration Potentielle
ETR	Evapotranspiration réelle
EU	Eau Utile
FLDAS	Fews net Land Data Assimilation System
GP	Groupe de Pendjari
GFB	Grès de Fo-Bandiagara
GFR	Grès Fins Roses
GGQ	Grès à granules de quartz
GFG	Grès fins glauconieux
GI	Grès inférieurs
GKS	Grès de Kawara-Sindou
GMB	Groupe du Mont Boumbouaka
GMS	Groundwater Modelling System
HWSD	Harmonized World Soil Database

I	Infiltration profonde
IGB	Institut Géogrtaphique du Burkina
I.F.A.N	Institut Français d'Afrique Noire
INERA	Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
INO	Inventaire national des ouvrages hydrauliques
IOTA	Installations, Ouvrages, Travaux, Activités
Km	Kilomètre
L/hab/jour	Litre par habitant par jour
Ma	Million d'année
Max	Maximum
MEEA	Ministère de l'Environnement de l'Eau et de l'Assainissement
Min	Minimum
mm	millimètre
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NIB	Niveaux Inférieurs du Buem (Faciès plissé)
OMES	Ouvrages de Mobilisation des Eaux Souterraines
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
ORSTOM	Organisation pour la Recherche Scientifique et Terrestre d'Outre-Mer
P	Précipitations
PAEA	Programme d'Approvisionnement en Eau et d'Assainissement
PAGIRE	Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PN-AEP	Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable
PN-AEPA	Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement
PN-AEUE	Programme National D'Assainissement des Eaux Usées et Excréta
PN-AH	Programme National des Aménagements Hydrauliques
PN-GIRE	Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PPS	Programme de Pilotage et de Soutien
Q	Débit
QA	Quartzites de l'Atacora
QGIS	Quantum Geographic Information System
Qs	Débit spécifique
R	Ruissellement ou écoulement de surface
RESO	Ressources en Eau du Sud-Ouest
RFU	Reserve Facilement Utilisable
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RPN	Réseau piézométrique national
RU	Réserves Utiles
SAC	Siltstones-argilites-carbonates
SEVERE	Synthèse Et la Valorisation des Etudes sur les Ressources en Eau
SIG	Système d'Information Géographique
SNIEAU	Système national d'information sur l'eau
SOGREAH	Société Grenobloise d'Etudes et d'Application Hydrauliques
SQ	Siltites et quartzites
YSMIM	SYStème MINier
T	Température
TIN	Triangular irregular network)
USGS	United States Geological Survey
UTM	Universal Transverse Mercator
VREO	Programme de Valorisation des Ressources en Eau dans le Sud-Ouest du Burkina Faso
WBI	Wallonie-Bruxelles International

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 (PAGIRE) 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 3** travaille spécifiquement sur « **l'élaboration des outils de gestion des ressources en eau souterraine** » et vise à atteindre 3 Résultats :

- R.3.1 – Développement d'une base de données sur les ouvrages de mobilisation d'eau souterraine ainsi que d'un applicatif permettant de gérer cette base de données ;
- **R.3.2 – Réalisation et mise à disposition d'un modèle de gestion des aquifères du bassin sédimentaire de l'Ouest du Burkina Faso ;**
- R.3.3 - Actualisation de la carte hydrogéologique du Burkina Faso.

Le logigramme dans lequel s'inscrit l'axe 3 est repris à la figure suivante.

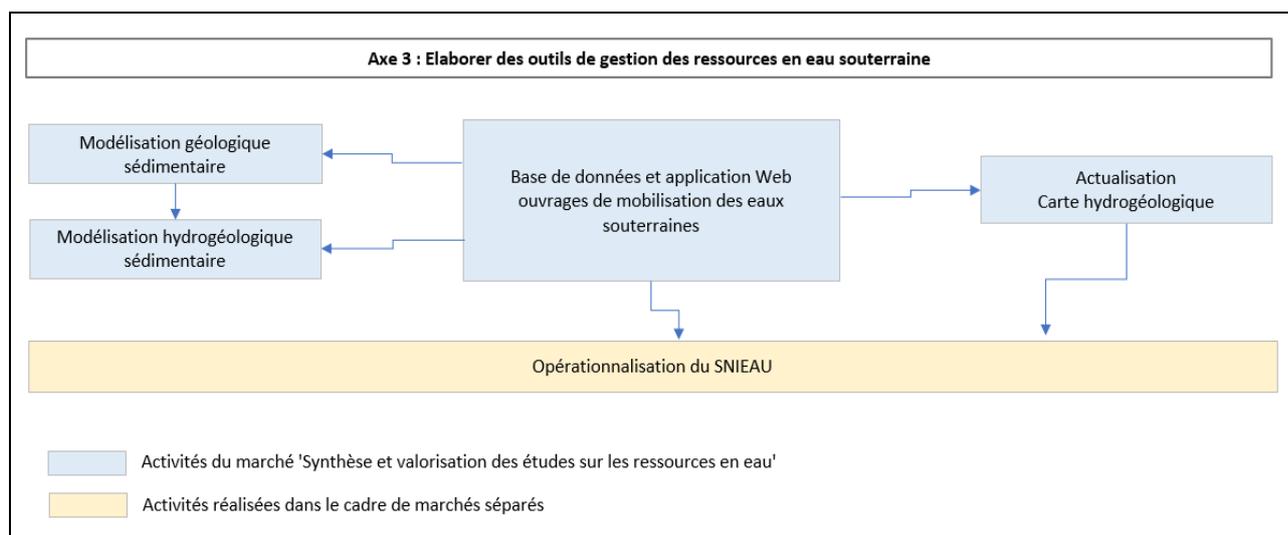


Figure 1 : Logigramme de l'axe 3

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre du résultat R3.2 « **Un modèle de gestion des aquifères du bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso est réalisé** ».

B. OBJECTIF DE L'ÉTUDE DE MODÉLISATION

L'objectif général de l'intervention relative au résultat 3.2 consiste en la réalisation et la mise à disposition d'un modèle de gestion des aquifères du bassin sédimentaire de l'Ouest du Burkina Faso (environ 42.500 km²).

Ce modèle de gestion sera composé d'une part d'un modèle géologique 3D reproduisant la géométrie et la structure des différentes formations géologiques rencontrées, et d'autre part d'un modèle hydrogéologique simulant les écoulements d'eaux souterraines dans les aquifères rencontrés au sein des formations géologiques du bassin sédimentaire de l'Ouest du Burkina Faso.

Le modèle de gestion à élaborer constituera un outil performant d'évaluation des ressources en eau souterraine, et de gestion durable de ces ressources dans un contexte d'augmentation des besoins et de pression quantitative croissante sur les aquifères de ce bassin. Le modèle constituera ainsi sur le long terme un précieux outil d'aide à la décision pour les gestionnaires des ressources en eau du pays, dont en première ligne les techniciens du MEEA.

C. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE L'ÉTUDE DE MODÉLISATION

C.1. Phasage de l'étude

Le développement de la modélisation géologique et hydrogéologique du sédimentaire de l'ouest est réalisé en plusieurs phases, afin d'optimiser le calendrier d'exécution de l'étude tout en tenant compte de la programmation retardée des travaux d'exécution des forages profonds.

Les principales phases relatives à la modélisation sont reprises ci-après :

Tableau 1 : Approche méthodologique : phasage de l'étude

Phase 1	Préparation des données d'entrée, élaboration du modèle conceptuel et du modèle géologique initial
Phase 2	Elaboration du modèle géologique actualisé, sur base des résultats de l'étude de prospection géophysique et des travaux de réalisation des forages profonds
Phase 3	Elaboration du modèle hydrogéologique (maillage, paramétrisation, calibration, exploitation)
Phase 4	Mise à disposition du modèle géologique et hydrogéologique, et formation à son utilisation

Le présent rapport concerne la **première phase de l'étude**, à savoir la préparation des données d'entrée, l'élaboration du modèle conceptuel, et l'élaboration du modèle géologique initial. Cette première phase peut en effet être réalisée de manière autonome sur base des données et informations existantes, préalablement à l'obtention des résultats des investigations de terrain prévues dans le cadre du PAEA dans la zone du sédimentaire de l'ouest (prospection géophysique, réalisation de diagraphies et de forages profonds de reconnaissance, réalisation d'une étude de caractérisation des sources).

La deuxième phase, consistant en l'élaboration du modèle géologique actualisé, ne pourra être entamée que lorsque les résultats de l'étude de prospection géophysique, des diagraphies et des travaux de réalisation des forages profonds prévus dans le cadre du PAEA, seront disponibles. Elle conditionne bien entendu le démarrage de la troisième phase, laquelle consiste en l'élaboration du modèle hydrogéologique. On notera toutefois, à ce propos, que les données d'entrée déjà disponibles et utiles au futur modèle hydrogéologique sont capitalisées dès la phase actuelle (phase 1).

Le modèle hydrogéologique sera élaboré en troisième phase, avec la poursuite de l'intégration des données d'entrée (nouvelles données), la paramétrisation du modèle, la calibration du modèle, et l'exploitation du modèle.

Enfin, la quatrième phase consistera en la mise à disposition du modèle géologique et hydrogéologique, et en la formation du personnel du MEEA à son utilisation.

C.2. Approche conceptuelle pour la modélisation

Nous proposons une approche de modélisation intégrée, mise en œuvre par l'utilisation d'un logiciel commun pour l'élaboration du modèle géologique et du modèle hydrogéologique. Comme nous le verrons dans la description des activités de développement des modèles géologique et hydrogéologique, cette approche présente de nombreux avantages et un niveau de performance beaucoup plus élevé qu'une approche basée sur deux modèles/logiciels distincts. Elle permet en effet une interaction totale entre le modèle géologique, qui contiendra toutes les propriétés non-seulement géologiques mais aussi hydrogéologiques des formations modélisées indépendamment du maillage, et le modèle hydrogéologique maillé. Cette méthode, dite de modélisation conceptuelle, permet de modéliser l'ensemble des caractéristiques des formations aquifères et du système dans son ensemble, de manière totalement indépendante du maillage qui sera ensuite appliqué au sein du modèle hydrogéologique. Cette approche permet ainsi la préservation totale de toutes les informations (géométries, propriétés, etc.) avec un niveau de détail natif indépendant du maillage et donc non altéré par celui-ci. Cette approche intégrée rendra également plus aisée l'utilisation de l'outil unique développé, à des fins de gestion dans le cadre des activités du MEEA.

L'intervention relative à la modélisation géologique et hydrogéologique est proposée selon la méthodologie suivante :

1. Collecte, mise en format, validation et valorisation par BD et SIG des données existantes
2. Réalisation et implémentation d'un modèle géologique 3D
3. Elaboration du modèle conceptuel
4. Elaboration du modèle hydrogéologique : implémentation du modèle conceptuel, réalisation du maillage, entrée des données d'input (sollicitations) et des conditions aux limites
5. Paramétrisation (paramètres hydrodynamiques) du modèle hydrogéologique
6. Calibration (calage) et validation du modèle d'écoulement
7. Exploitation du modèle réalisé : simulations de scénarios
8. Mise à disposition du modèle
9. Formation à l'utilisation du modèle

La méthodologie proposée peut être représentée selon le schéma ci-après :

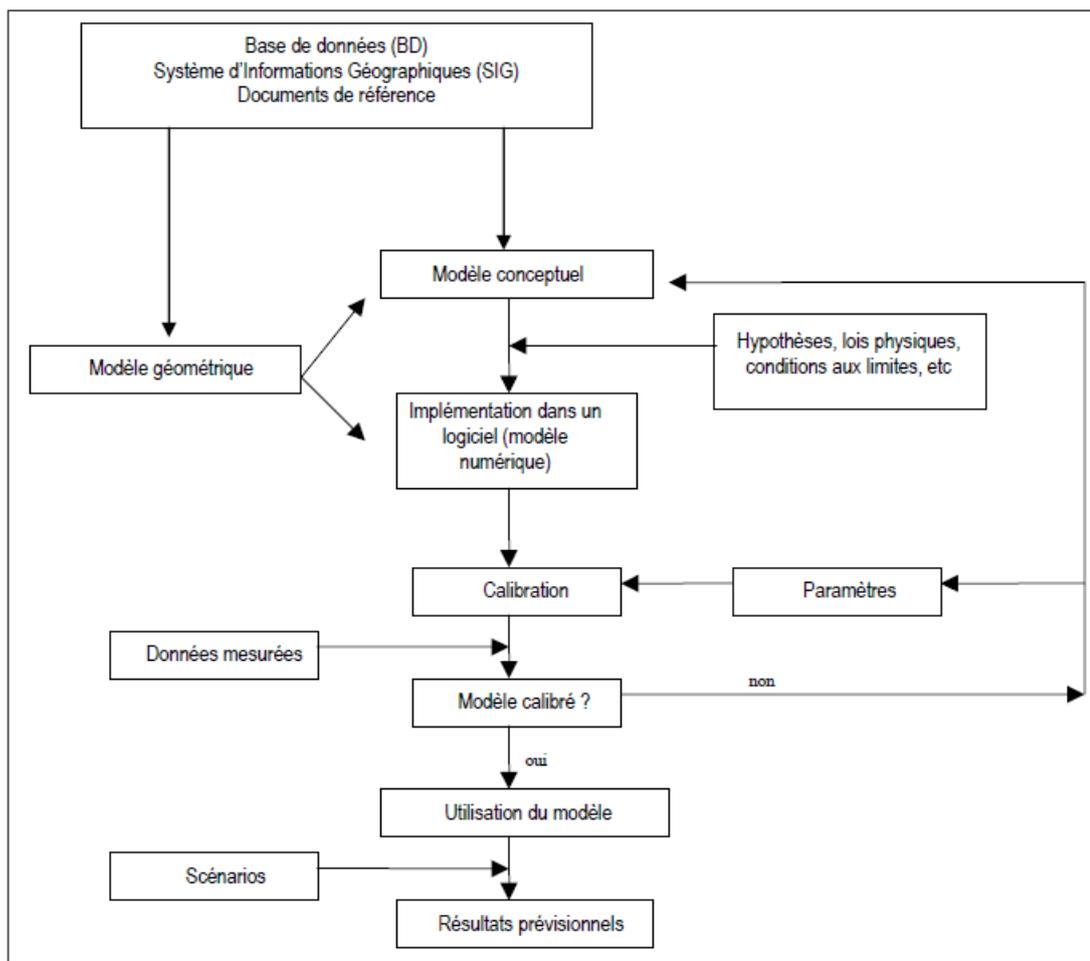


Figure 2 : Approche conceptuelle pour la modélisation

C.3. Choix du logiciel de modélisation

Conformément aux prescriptions des Termes de Référence, le code Modflow de l'USGS sera utilisé pour la modélisation hydrogéologique.

L'utilisation du logiciel Groundwater Modelling System (GMS)¹, développé et commercialisé par Aquaveo (USA), a été proposée par le groupement dans son offre technique ainsi que dans une note technique présentée en septembre 2021, et a fait l'objet d'une validation par l'UGP en octobre 2021.

Ce logiciel est reconnu internationalement depuis de nombreuses années, tant par la communauté scientifique que par les experts en modélisation, comme étant le plus performant et le plus robuste du marché. Il constitue ainsi la référence internationale en matière de modélisation basée sur le code Modflow. Ce logiciel fait de surcroît l'objet de développements constants, et d'une parfaite intégration avec les outils SIG actuels. La maintenance performante et la réactivité du support technique en sont également des atouts majeurs.

L'interface GMS intègre un module de modélisation géologique extrêmement performant, et offre une très grande inter-opérabilité entre ce module géologique et le module de modélisation hydrogéologique basée sur le code Modflow. Il s'agit dès lors d'un outil parfaitement adapté à l'approche intégrée décrite ci-avant,

¹ <https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction>

laquelle a par ailleurs déjà été mise en œuvre avec succès dans le cadre de la modélisation du programme VREO.

Une présentation du logiciel GMS et de MODFLOW est reprise en Annexe 1.

Conformément aux prescriptions des Termes de Référence, 4 licences du logiciel retenu GMS (version GMS Pro) ont été acquises (fin 2021) dans le cadre de l'étude. Ces licences seront mises à la disposition du MEEA au terme de l'étude, et seront préalablement partagées avec le personnel du MEEA dans le cadre des activités de formation et de renforcement de capacités.

C.4. Collecte et capitalisation des données existantes

Les données disponibles nécessaires à la modélisation géologique et hydrogéologique sont collectées, traitées et mises en format, dans la phase 1 de la présente étude de modélisation.

La capitalisation des données du sédimentaire de l'ouest repose principalement sur le résultat R1.1 de l'étude globale SEVERE, portant sur la collecte et la capitalisation des données sur les ressources en eau du Burkina Faso. Le rapport technique RT1.1 relatif à la collecte et à la capitalisation des données (août 2021) reprend en détail la méthodologie de collecte des données, les jeux de données collectés et traités, ainsi que les modalités et résultats de leur capitalisation au sein d'une base de données cartographique élaborée sous format postgre-postGIS (BD-SEVR). Ces éléments méthodologiques relatifs à la collecte et à la capitalisation des données ne sont donc pas développés plus avant dans le présent rapport.

Dans le cadre particulier de la modélisation géologique du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso, une base de données cartographique spécifique (BD-MOD) a été élaborée, sous format postgre-postGIS. Cette base de données cartographique, principalement alimentée par la BD-SEVR, intègre l'ensemble des données qui sont (i) pertinentes pour la modélisation géologique et hydrogéologique, et (ii) relatives à une zone géographique correspondant au bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso. La structure de la base de données, et les outils d'exportation vers des formats usuels de cartographie, permettent une interopérabilité totale avec le module SIG du logiciel GMS ainsi qu'une exploitation aisée dans les logiciels de cartographie standards dont QGIS en particulier.

La base de données BD-MOD permettra non-seulement l'alimentation du modèle géologique et hydrogéologique par les données d'entrée correspondantes, mais également la mise à jour ultérieure du modèle hydrogéologique lorsque de nouvelles données temporelles (à titre d'exemple les prélèvements annuels et les données piézométriques) seront disponibles dans le futur.

C.5. Elaboration du modèle géologique

Le modèle géologique en 3 dimensions du bassin sédimentaire de l'Ouest du Burkina Faso sera développé à l'aide du logiciel GMS présenté ci-avant. Ce modèle géologique 3D représentera en détail la géométrie des différentes couches du bassin, la structure de ces couches (y compris les discontinuités et accidents majeurs), et intégrera les propriétés géologiques et hydrogéologiques de chacune de ces couches.

Compte tenu de la complexité du contexte (hydro)géologique rencontré dans le bassin, le modèle géométrique présente un intérêt majeur et poursuit les objectifs suivants :

- Fournir une représentation en 3 dimensions, sur toute la zone d'étude, de l'extension et des limites des couches géologiques rencontrées ; à partir de cette représentation 3D complète, des coupes géologiques peuvent notamment être générées partout, et dans toutes les directions, au sein de la zone modélisée.
- Permettre la définition, et la génération automatique, des couches hydrogéologiques qui seront reprises dans le modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains. Le logiciel GMS offre en effet

la possibilité de convertir les couches géologiques du modèle géométrique en « unités hydrogéologiques », auxquelles peuvent être attribuées individuellement des valeurs de paramètres hydrodynamiques.

Le modèle géologique sera élaboré à partir des informations suivantes (liste non-exhaustive) :

- Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour la topographie de surface (SRTM-30m).
- Données géologiques existantes (coupes et logs de forages, diagraphies, etc.) à partir des documents techniques et bases de données d'ouvrages couvrant la zone du sédimentaire de l'ouest. On citera de manière non-exhaustive OMES, INO, BD-Bewaco, BD-RESO, BD-VREO, BD-PESO WBI, BADEA, ONEA, etc.
- Cartes géologiques, coupes géologiques et informations géologiques disponibles auprès du BUMIGEB.
- Données de géophysique issues de l'étude de prospection géophysique réalisée dans le cadre du PAEA.
- Données géologiques issues des diagraphies et des forages profonds réalisés dans le cadre du PAEA (forages profonds de reconnaissance).
- Expertise de spécialistes de la géologie du bassin sédimentaire de Taoudeni au Burkina Faso, et données capitalisées dans le modèle VREO.

L'exploitation et la capitalisation de l'ensemble de ces données reposera la base de données géographiques BD-MOD, élaborée dans le cadre de la présente étude et reprenant l'ensemble des données utiles à la modélisation géologique et hydrogéologique du sédimentaire de l'ouest.

L'ensemble des formations géologiques du bassin sédimentaire de l'Ouest seront représentées dans le modèle géologique. Il s'agit des horizons CT, GFB, SQ, SAC2, GFR, SAC1, GGQ, GFG, GKS, et GI, soit 10 couches. On notera toutefois que les résultats des forages profonds de reconnaissance pourraient amener à une révision de cette nomenclature.

Comme indiqué plus haut, le modèle géologique sera réalisé en deux phases : un premier modèle géologique (modèle initial) sera réalisé sur base des données et informations existantes, et un modèle actualisé sera élaboré en deuxième phase sur base des résultats des investigations de terrain menées dans le cadre du PAEA (prospection géophysique, réalisation de diagraphies et de forages profonds de reconnaissance). Le présent rapport (phase 1) reprend les résultats du modèle géologique initial.

Le modèle géologique initial consiste en une actualisation du modèle géologique réalisé en 2007 dans le cadre du Programme VREO, sur base de la capitalisation de données additionnelles collectées relatives à la période 2007-2022 (nouveaux forages, nouvelles cartes géologiques au 1/500.000ème + 1/200.000ème + 1/million, résultats de prospections géophysiques, etc.)

C.6. Elaboration du modèle hydrogéologique

L'élaboration du modèle hydrogéologique sera réalisée en troisième phase de l'étude, après finalisation du modèle géologique actualisé. La méthodologie détaillée d'élaboration du modèle hydrogéologique sera donc présentée dans le rapport relatif à cette troisième phase. Les principaux éléments méthodologiques sont toutefois présentés ci-après.

C.6.1. Objectifs poursuivis

Un modèle hydrogéologique du bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso sera développé à l'aide du logiciel GMS Pro, sur base du modèle géologique préalablement réalisé.

Le modèle hydrogéologique permettra de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la zone sédimentaire de l'ouest. Il permettra entre autres de mesurer la réponse de la nappe à la recharge ainsi qu'à l'exploitation actuelle ou future de la nappe (AEP, industrie, agriculture).

L'influence de ces diverses sollicitations sur le rabattement de la nappe, sur la baisse de débit des sources et sur la diminution des débits de base des cours d'eau, sera évaluée.

Les principaux résultats attendus de la modélisation hydrogéologique peuvent être formulés comme suit :

- évaluation des tendances régionales des écoulements dans la zone sédimentaire au Burkina Faso : identification des réservoirs hydrogéologiques et de leur géométrie ;
- évaluation des directions d'écoulement au sein des réservoirs identifiés, et quantification des flux d'eau souterraine dans ces réservoirs ;
- identification des exutoires des systèmes aquifères, et quantification des flux d'eau souterraine sortant des systèmes modélisés (flux vers les eaux de surface, flux sortants aux frontières du modèle, etc) ;
- évaluation des flux entrants d'eau souterraine dans la zone modélisée : quantification des zones de recharge et des flux entrants aux frontières du modèle ;
- estimation de la distribution régionale des paramètres hydrogéologiques ;
- simulation des impacts de l'exploitation des nappes du sédimentaire, et de l'augmentation des prélèvements, sur les niveaux de nappe, les débits des sources, et les débits de base des cours d'eau ;
- prédictions des effets de changements dans la recharge des nappes sur la piézométrie et sur les flux d'eau souterraine (volet changements climatiques) ;
- outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre de mesures de suivi des nappes (monitoring), ainsi que pour la gestion et l'exploitation des eaux souterraines du bassin sédimentaire.

On notera que la modélisation hydrogéologique prévue dans le cadre de la présente étude concerne la simulation des écoulements d'eau (flux d'eau) en milieu saturé, à l'échelle du bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso. La prestation prévue dans le cadre du PAEA, conformément aux termes de référence et à la note technique de septembre 2021 telle que validée, ne concerne pas la simulation de la propagation de polluants dans les aquifères, ni la réalisation de sous-modèles à l'échelle locale. Néanmoins, la méthodologie de modélisation retenue ainsi que le choix du logiciel intégré pour la modélisation géologique et hydrogéologique (GMS) permettront aisément le développement ultérieur de tels modèles dans le cadre d'autres prestations, à partir du modèle qui sera réalisé dans le cadre de la présente étude.

C.6.2. Paramétrisation du modèle

Après adoption du modèle conceptuel final relatif au modèle hydrogéologique, lequel précisera notamment le nombre de couches du maillage et les hypothèses de travail, les principales étapes d'élaboration du modèle hydrogéologique seront :

- l'importation de toutes les données SIG dans le module cartographique de GMS,
- la réalisation du maillage (basée sur l'inter-opérabilité avec le modèle géologique réalisé),
- la paramétrisation des conditions aux limites (frontières du modèle),
- la paramétrisation des conditions d'échanges avec les eaux de surface,
- la paramétrisation spatialisée de la recharge,
- l'introduction et la paramétrisation des sources,
- l'introduction et la paramétrisation des sollicitations (prélèvements),
- l'introduction et la paramétrisation spatialisée des paramètres hydrodynamiques.

La première phase de l'étude, qui concerne le présent rapport, vise entre-autres à préparer les données d'entrée déjà disponibles afin de faciliter leur intégration dans le futur modèle hydrogéologique.

C.6.3. Calage et validation du modèle

Le calage du modèle d'écoulement sera réalisé en régime permanent, et ensuite en régime transitoire.

Le calage portera sur les niveaux piézométriques calculés, qui seront comparés aux niveaux observés dans les différents points d'observation disponibles sur la zone d'étude (forages d'hydraulique villageoise, et piézomètres de suivi des nappes). En régime transitoire, les séries de chroniques piézométriques disponibles seront utilisées pour le calage. Le calage en régime transitoire sera le cas échéant ciblé sur les zones qui présentent un enjeu important (zones fortement exploitées, zones des sources à gros débit, etc.). En ce qui concerne les zones pour lesquelles les historiques de données sont limités ou lacunaires, une étude de sensibilité sera conduite en considérant des valeurs paramétriques communément admises (selon bibliographie) pour les milieux rencontrés.

Le calage sera également réalisé sur base de la comparaison des flux d'eau souterraine sortants vers les eaux de surface, en différents tronçons de rivière, avec les débits observés aux différentes stations de jaugeage (lames d'eau écoulées et hydrogrammes). On citera notamment les stations de Banzon, Samandeni et Nwokuy.

Enfin, le calage sera également réalisé sur base de la comparaison des flux d'eau souterraine sortants ponctuellement aux principales sources représentées explicitement dans le modèle (fonction drain), avec les débits observés des sources concernées ; ce type de contrôle sera particulièrement effectué au niveau des sources de Nasso-Guinguette et de Pessou.

Le pas de temps à considérer pour les simulations en régime transitoire sera précisé en fonction des données disponibles. En première approche, un pas de temps mensuel paraît compatible avec les objectifs poursuivis par l'étude et avec la disponibilité des données (généralement mensuelles), compte tenu notamment de la très grande superficie couverte par le modèle (42.500 km²).

Le calage en régime transitoire fera l'objet d'une validation, consistant à comparer les données simulées avec les données d'observation, sur une période temporelle n'ayant pas été utilisée pour la calibration.

C.6.4. Exploitation du modèle et définition de scénarios

Après calibration et validation, le modèle hydrogéologique sera exploité pour l'évaluation des tendances régionales des écoulements, l'évaluation des directions d'écoulement au sein des réservoirs identifiés, la quantification des flux d'eau souterraine dans ces réservoirs et des flux sortant des systèmes modélisés (flux vers les eaux de surface, flux sortants aux frontières du modèle, prélèvements), l'évaluation des flux entrants d'eau souterraine dans la zone modélisée (zones de recharge et flux entrants aux frontières du modèle).

Le modèle sera également exploité pour évaluer les impacts des prélèvements actuels sur le comportement des nappes du sédimentaire, sur les débits des sources et les débits de base des cours d'eau.

D'un point de vue prédictif, le modèle sera également utilisé pour évaluer les impacts sur le milieu (niveaux de nappes, débits de sources et débits de base de cours d'eau) dans différents scénarios. Ces scénarios seront établis en concertation avec le comité de suivi de l'étude. Les scénarios s'attacheront en particulier à l'augmentation des prélèvements (AEP, agriculture, industrie), et à la variation de la recharge potentiellement induite par les changements climatiques.

C.7. Mise à disposition du modèle et des licences

Au terme de l'étude, le modèle sera mis à disposition du MEEA. Il pourra être installé sur différents postes informatiques du MEEA, avec mise à disposition de 4 licences GMS Pro.

La base de données cartographiques BD-MOD, intégrant l'ensemble des jeux de données d'entrée et permettant une interopérabilité avec GMS, sera également entièrement mise à disposition.

C.8. Collaborations scientifiques, transfert de compétence et formation à la modélisation

La réalisation de la modélisation géologique et hydrogéologique s'appuie sur une collaboration scientifique avec le Département d'hydrogéologie de l'Université de Liège en Belgique (Faculté des Sciences Appliquées), lequel est par ailleurs également actif au sein du PAEA pour l'organisation de modules de formation en modélisation au profit des gestionnaires des ressources en eau du Burkina Faso (premier module de formation exécuté à Liège en septembre 2022).

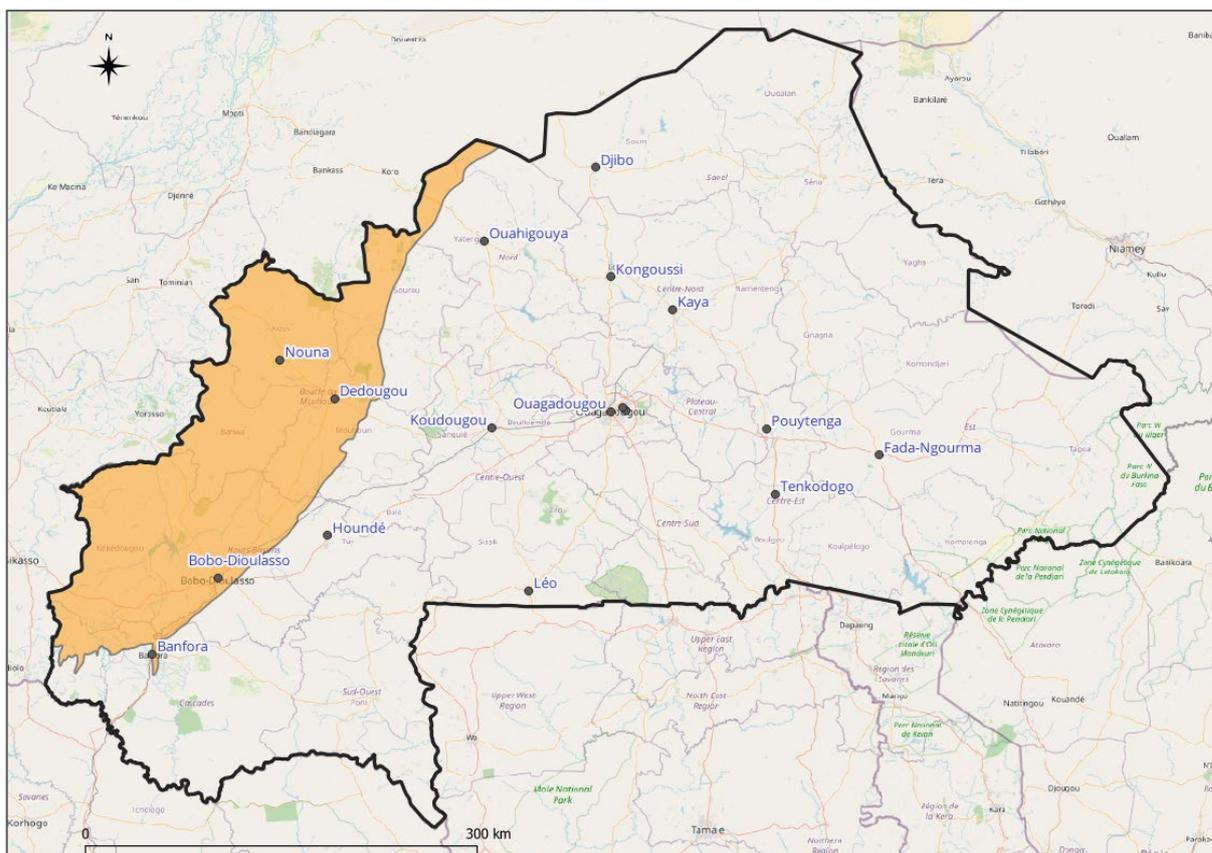
Dans le cadre de la présente étude en particulier, une attention est apportée au transfert de compétences et à la formation en matière de modélisation. Les techniciens désignés du MEEA (et d'éventuelles institutions partenaires) seront associés à toutes les phases de développement et d'exploitation du modèle, afin de bénéficier d'une formation 'en direct' durant l'exécution de l'activité.

En complément, il est prévu dans le cadre de la présente étude l'organisation de modules de formations spécifiques en modélisation, qui seront réalisés par le groupement SHER-ARTELIA en collaboration avec le Département d'hydrogéologie de l'Université de Liège cité plus haut.

On notera également une collaboration scientifique initiée en 2021 avec 2iE, en particulier dans le cadre du projet de thèse de M. Succès Kutangila intitulé « Ajout de la dimension eau souterraine dans la compréhension et la gestion des ressources en eau partagées dans la région du Sahel. Cas du bassin de Taoudéni », lequel prévoit également une modélisation géologique et hydrogéologique du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso.

D. DÉLIMITATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude correspond au « bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso ». D'une superficie d'environ 42.500 km², cette zone représente en réalité la partie ouest-burkinabé du bassin sédimentaire de Taoudéni.



Source : IGB, BUMIGEB, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 3 : Délimitation de la zone d'étude au Burkina Faso (zone reprise en orange)

Les limites d'extension de la zone sédimentaire du bassin de Taoudeni à l'ouest du Burkina Faso sont basées sur la carte géologique au 1/1.000.000ème réalisée par le BUMIGEB (2003), ainsi que la carte géologique au 1/500.000ème élaborée dans le cadre du Programme VREO (C. Ouedraogo, 2008).

Par rapport au réseau hydrographique, 79% de la zone d'étude sont situés dans le bassin versant national du Mouhoun, les 21% restants étant partagés entre les bassins versants nationaux de la Comoé et du Niger.

D'un point de vue socio-économique, la zone du sédimentaire de l'ouest est une zone stratégique présentant des enjeux majeurs, d'une part compte tenu de la population importante de la zone (plus de 3 millions d'habitants en 2022, dont près d'un million à Bobo Dioulasso), et d'autre part en raison de l'important développement économique dépendant de l'exploitation des ressources en eaux souterraines de ce bassin (industrie, fabrication de boissons, agriculture irriguée).

Il convient de noter que l'extension des terrains sédimentaires du bassin de Taoudeni se prolonge naturellement bien au-delà des frontières entre le Burkina Faso et le Mali, et que les limites de la zone d'étude le long de cette frontière ne correspondent dès lors pas aux limites d'extensions géologiques de ce bassin.

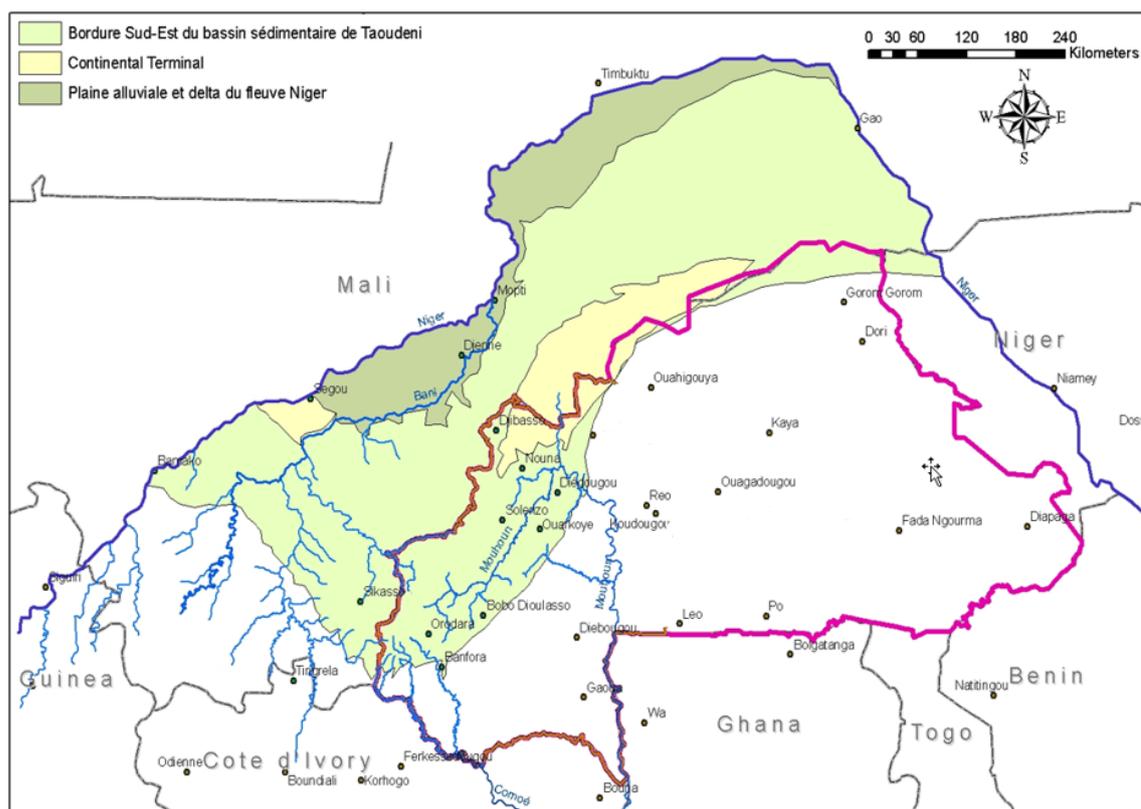
La figure reprise ci-après illustre l'extension globale du bassin sédimentaire de Taoudeni, lequel couvre une superficie d'environ 1,5 million km² et s'étend largement au Mali, en Mauritanie et en Algérie, et dont la partie burkinabè représente moins de 5% en bordure sud-est de bassin. La figure reprend également l'extension du bassin Voltaïen, rencontré à l'extrême est du Burkina Faso et qui se prolonge vers le sud au Ghana, au Togo et au Bénin.



Source : OpenStreetMap, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 4 : Extension des bassins sédimentaires rencontrés au Burkina Faso

D'un point de vue géologique, il est aussi utile de préciser l'extension de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni : il s'agit des terrains sédimentaires situés en rive droite du fleuve Niger, au Mali et au Burkina Faso. D'une superficie totale de l'ordre de 260.000 km², on constate que ce système majeur est essentiellement situé au Mali, tandis que sa partie située au Burkina Faso - qui fait l'objet de la présente intervention - n'en représente que 20 %.



Source : IGB, ARTELIA-SHER

Figure 5 : Extension de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (Mali & Burkina Faso)

E. COLLECTE, TRAITEMENT ET CAPITALISATION DES DONNEES

E.1. Collecte des données

La collecte, le traitement et la capitalisation des données ont été principalement réalisés dans le cadre des activités liées au résultat R1.1 de l'étude globale SEVERE, portant sur la collecte et la capitalisation des données sur les ressources en eau du Burkina Faso. Le rapport technique RT1.1 relatif à la collecte et à la capitalisation des données (livré en aout 2021) reprend en détail les processus de collecte, de traitement et de capitalisation des données mis en place à l'échelle de l'entièreté du territoire burkinabè.

Pour ce qui concerne en particulier la collecte de données dans la zone du sédimentaire de l'ouest, les sources d'informations et bases documentaires principales en relation avec la modélisation sont les suivantes (liste non-exhaustive) :

- Données techniques et informations issues des bases de données sur les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines (BDOMES globalisée et ses données-sources valorisées telles que INO, BEWACO, ERES SOGREA, RESO, VREO, PESO, BADEA, ONEA, DREEA, PNAEPA, etc.) ;
- Données et informations issues d'essais de pompage réalisés à partir d'ouvrages interceptant les terrains du sédimentaire de l'ouest (ERES, RESO, VREO, PESO, BADEA, ONEA, thèses et TFE, etc.) ;
- Données techniques et données d'exploitation des ouvrages de captage de l'ONEA interceptant les terrains du sédimentaire de l'ouest ;
- Données (séries temporelles) des réseaux piézométriques (DEIE, AEM, ONEA) et de suivi de la qualité des eaux souterraines (DEIE) ;

- Données (séries temporelles) de débits en eau de surface du réseau hydrométrique national (DEIE) ;
- Cartes géologiques du BUMIGEB, notices des cartes, et données associées aux cartes (versions 1/1.000.000 de 2003 et de 2017, version 1/200.000 de 2017) ;
- Carte géologique du Programme VREO au 1/500.000, et données associées à la carte (Clément Ouédraogo, 2008) ;
- Cartes hydrogéologiques au 1/500.000 du projet Bilan d'Eau, et notices associées (1993) ;
- Carte hydrogéologique du bassin du Kou au 1/100.000, notice associée, et données associées (projet PESO, 2010) ;
- Données topographiques : Modèle Numérique de Terrain (MNT) SRTM-30m, courbes de niveaux et points cotés IGB, et nivellements DGPS réalisés dans le cadre du Programme VREO ;
- Données cartographiques relatives à l'hydrographie, aux plans d'eau et aux bassins versants (DEIE, DGIH) ;
- Données hydro-climatologiques mensuelles des stations de l'ANAM (période 1981-2021) : P, T (min, max, moy), Evaporation, ETP, Humidité (min, max), insolation, Vent ;
- Données hydro-climatologiques globales spatialisées : WorldClim, CHIRPS, TerraClimate, FLDAS, CDT, FAO WaPor (période 1991-2021) : P, T, ET, Ruissellement ;
- Données cartographiques administratives (BNDT) ;
- Données cartographiques sur les types de sol (HWSD FAO et BUNASOL) ;
- Données cartographiques sur l'occupation du sol (LCC Copernicus 2020) ;
- Données cartographiques et techniques sur les sources, et séries temporelles de débits des sources (ERES, RESO, PESO, DEIE, DREEA, AEM, AEC, PAEA) ;
- Images satellites et mosaïque (Landsat-8 2013, Sentinel-2 2021)
- Données relatives à l'étude de prospection géophysique du sédimentaire de l'ouest (PAEA, en cours) ;
- Données relatives aux diagraphies et aux forages profonds de reconnaissance (PAEA, à réaliser) ;

En ce qui concerne le fonds documentaire, les principaux rapports et études collectés et capitalisés pour le sédimentaire de l'ouest sont repris ci-après (liste non-exhaustive) :

- Les rapports de l'étude des ressources en eau souterraine (ERES) de la zone sédimentaire de la région de Bobo Dioulasso (Sogreah Ingénierie, 1994) ;
- Les rapports du Programme RESO, dont les rapports sur la géologie et l'hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-ouest du Burkina Faso, les rapports relatifs à l'inventaire des ressources en eau, et les rapports relatifs aux travaux de forages d'hydraulique rurale (Programme RESO, 1998) ;
- Les rapports du projet d'hydraulique villageoise 310 forages (BADEA, 2005) ;
- Les rapports d'hydraulique rurale 500 forages (BAD 2003-2005) ;
- Les rapports du Programme VREO, dont le rapport sur la synthèse géologique de la région ouest du Burkina Faso (2006), le rapport sur la modélisation hydrogéologique du bassin sédimentaire, et les rapports relatifs aux travaux de forage (VREO, 2008) ;
- Les rapports des projets PESO d'appui à la gestion durable et à l'exploitation des ressources en eaux souterraines du Burkina Faso (PESO WBI, 2005 à 2012) ;
- Les rapports des études MCA d'Appui à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans les bassins du Mouhoun et de la Comoé (états des lieux, systèmes de suivi, modèles de gestion, SDAGEs) de 2011 à 2013 ;

- Les rapports d'exécution des forages de l'ONEA (Bobo Dioulasso, Dedougou, Orodara, etc.) (ONEA, 2002 à 2019) ;
- Les rapports de l'OSS relatifs au projet de gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau du Système Aquifère d'Iullemeden Taoudeni – Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT, OSS, 2014-2017)
- Le rapport de synthèse du suivi des ressources en eau (DEIE, 2019) ;
- Les thèses de Doctorat (dont R. Trompette 1973, D. Dakouré 2003, E. Sauret 2008, Y. Koussoubé 2010, J. Tirogo-Yofe 2016, B. Kouanda 2019) et mémoires de Master (Université de Ouagadougou, 2iE, Université de Bobo-Dioulasso, Université de Liège) relatifs à la géologie et à l'hydrogéologie des terrains sédimentaires de l'ouest du Burkina Faso.

L'ensemble du fonds documentaire relatif au sédimentaire de l'ouest est intégré à la BD-Biblio développée par SHER-ARTELIA et présentée dans le cadre du résultat 1.1 de l'étude.

On notera que la collecte de données ne se limite pas à la partie burkinabè du bassin de Taoudeni, mais qu'elle intègre également la partie malienne du bassin située en rive droite (sud) du fleuve Niger (bordure sud-est du bassin de Taoudeni). Cette extension dans la collecte de données vise à obtenir une meilleure compréhension du fonctionnement du système hydrogéologique rencontré dans le sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso, et à optimiser certains choix conceptuels à opérer pour la modélisation hydrogéologique. Les données collectées relatives à la partie malienne de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni concernent la cartographie géologique, la topographie, l'hydrographie, ainsi que diverses données techniques issues de travaux de forages d'hydraulique villageoise (dont niveaux statiques et paramètres hydrodynamiques).

E.2. Traitement et capitalisation des données collectées

E.2.1. Elaboration de la base de données relative à la modélisation

La capitalisation des données collectées repose, comme évoqué dans la section relative à la méthodologie d'étude, sur les travaux menés dans le cadre du résultat R1.1² de l'étude, lesquels ont notamment mené à l'élaboration de la base de données BD-SEVR.

Les données relatives au bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso, et ayant une utilité directe pour les travaux de modélisation, ont été extraites et consolidées au sein d'une base de données spécifique à la modélisation (BD-MOD, au format postgre-postGIS). Cette base de données centralisée permet de préparer et d'organiser les données d'entrée utiles à la modélisation du sédimentaire de l'ouest, et de stocker les données de sortie (output) de la modélisation hydrogéologique. Outre les données primaires pour la plupart extraites de la BD-SEVR, la base de données relative à la modélisation intègre également différentes données secondaires générées dans le cadre des travaux relatifs à la modélisation.

La base de données BD-MOD peut être exploitée au travers des outils tels que PgAdmin et QGIS, des logiciels de bureautique tels que MS.Excel et MS.Access ou leurs équivalents libres, et est bien entendu destinée à alimenter le modèle géologique et hydrogéologique du sédimentaire de l'ouest notamment au travers d'une interopérabilité avec le module SIG de GMS.

² Rapport technique RT1.1 relatif à la collecte et à la capitalisation des données sur les ressources en eau du Burkina Faso (ARTELIA-SHER, août 2021)

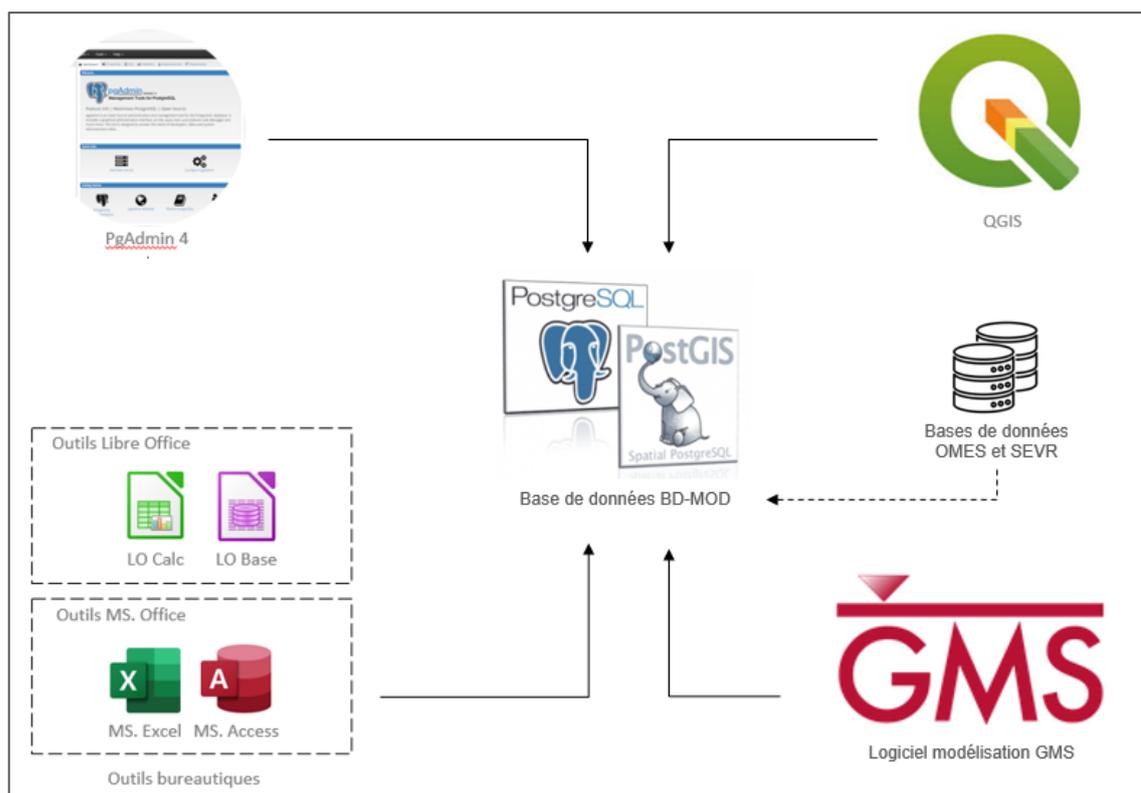


Figure 6 : Schéma conceptuel de capitalisation des données utiles à la modélisation

Les données collectées utiles à la modélisation ont été traitées et extraites sur l'emprise de la zone du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso (+ la bordure sud-est du bassin de Taoudéni au Mali pour certains types de données dont l'hydrographie, la topographie et les ouvrages). Les données à caractère géographique ont été mises en format, et projetées selon le système WGS84-UTM30N.

L'ensemble des données collectées, traitées et mises en format a ensuite été intégré à la BD-MOD.

E.2.2. Enrichissement de la base de données relative à la modélisation

Les bases de données BD-OMES (développée dans le cadre du résultat R3.1) et BD-SEVR (développée dans le cadre du résultat R1.1) alimentent les bases de données thématiques relatives (i) à la carte hydrogéologique (BD-CHGEO) et (ii) à la modélisation du sédimentaire de l'ouest (BD-MOD).

Pour les besoins de la modélisation géologique et hydrogéologique du sédimentaire de l'ouest, de nombreuses données techniques existantes et non-valorisées ont fait l'objet d'encodages additionnels et de reprises en base de données dans le cadre des travaux de première phase de modélisation dont le présent rapport fait état.

Ces nombreux encodages additionnels, réalisés par le groupement ARTELIA-SHER à partir de données hydrogéologiques générées dans le cadre de projets et programmes menés depuis plus de 30 années dans la zone du sédimentaire de l'ouest, permettent d'enrichir considérablement les jeux de données utiles à la modélisation. On citera notamment l'encodage de plusieurs centaines d'essais de pompage et résultats de ces essais (paramètres hydrodynamiques), de données piézométriques, de données lithologiques, de séries temporelles de débits de sources, de séries temporelles de volumes prélevés en forages, etc.

Ces encodages et reprises additionnels, réalisés principalement aux fins de modélisation du sédimentaire de l'ouest, permettront également d'enrichir la base de données relative à la carte hydrogéologique du Burkina

Faso. Ils ont, pour la plupart, été réalisés à partir de documents uniquement disponibles en format papier ou sous forme de pdf, ce qui représente une plus-value considérable pour la gestion et l'exploitation future des données hydrogéologiques au Burkina Faso.

Parmi les études (issues de projets et programmes menés dans la zone sédimentaire de l'ouest) capitalisées par encodages additionnels de données hydrogéologiques utiles à la modélisation, on citera sans être exhaustif l'étude ERES de SOGREAH (1994), le programme RESO (1998), le projet 310 forages d'hydraulique villageoise BADEA (2005), le projet BAD 500 forages d'hydraulique rurale (2003-2005), le programme VREO (2008), le projet PESO (2012), et les divers projets ONEA de développement de l'AEP dans la zone (2002-2018).

Ces encodages additionnels complètent les bases de données déjà alimentées et enrichies lors des travaux relatifs aux résultats R1.1, R3.1 et R3.3. Ils seront actualisés lors de la mise à disposition de nouvelles données relatives au sédimentaire de l'ouest, telles que les données issues des travaux de prospection géophysique en cours dans le cadre du PAEA, et des travaux de réalisation des forages profonds de reconnaissance (ainsi que les diagraphies associées) qui seront également menés dans le cadre du PAEA.

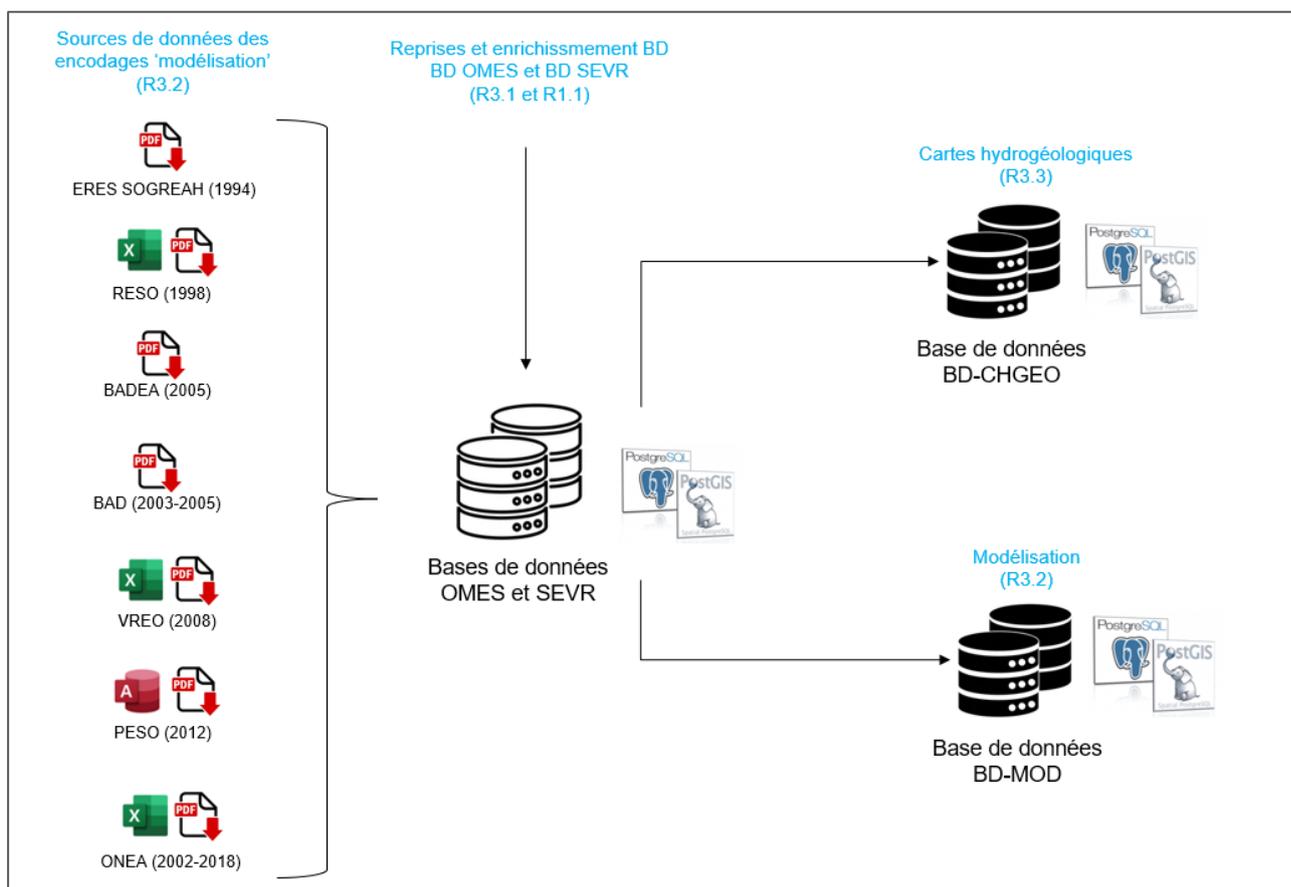


Figure 7 : Enrichissement des bases de données en vue de la modélisation

La base de données relative à la modélisation (BD-MOD), ainsi développée et enrichie, constitue le support centralisé d'alimentation (données d'entrée) du modèle géologique et hydrogéologique, et permet le stockage centralisé des principales données de sorties (output) du futur modèle hydrogéologique.

Les types de données intégrées à la base de données BD-MOD sont repris et renseignés dans le tableau présenté ci-après.

Type donnée	Format	Source & année, commentaire
1. Données administratives		
Limites pays, régions, provinces, communes	Polygone	IGB BNDT, 2015
Localités	Point	IGB BNDT, 2015
Population et densité de population	Table et Raster	INSD RGPH 2019, capitalisé SHER 2022 (projections 2030 et 2050)
Réseau routier	Ligne	IGB BNDT, 2015
2. Topographie		
Modèle Numérique de terrain	Geotiff	SRTM-30m, 2021
Cartes topographiques 1/200.000	Geotiff	IGB, 2014
Courbes de niveau	Lignes	IGB, 2014
Points cotés	Point	IGB 2014 et VREO 2008
Points cotés sur cours d'eau	Point	Produit dérivé SHER 2023
3. Climatologie		
Réseau Stations ANAM	Point	ANAM, 2021
Données ANAM (P, T, Eva, ETP, Hum, Ins, Vent)	Table	ANAM, période 1981-2021, mensuel
Données globales / mergees (P, T, ETR, ETP)	Raster / netCDF	CDT, CHIRPS, FLDAS, WorldClim, TerraClimate, FAO, période 1991-2021 (mensuel, annuel)
Isohyetes	Ligne	ARTELIA-SHER, dérivé de ANAM et globales, période 1991-2021 (mensuel, annuel)
4. Géologie		
Couche géologie 1/1.000.000	Polygone	BUMIGEB, 2003
Données structurales 1/1.000.000	Ligne	BUMIGEB, 2003
Couche géologie 1/200.000	Polygone	BUMIGEB, 2017
Données structurales 1/200.000	Ligne	BUMIGEB, 2017
Couche géologie 1/500.000	Polygone	VREO, 2008
Données structurales 1/500.000	Ligne	VREO, 2008
Épaisseur d'altération	Ligne et raster	SHER 2023, produit dérivé de OMES
Lithologie	Table	SHER 2023, produit dérivé de OMES
Lithologie	Table	Clément Ouédraogo, VREO 2008
5. Cartographie hydrogéologique		
Cartes hydrogéologiques 1/500.000 (5 + mosaïque)	Geotiff	Bilan d'eau 1993, scan HR SHER-ARTELIA
Carte hydrogéologique bassin du Kou 1/100.000	Vectorel + tiff	PESO, 2010
6. Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines		
Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines	Point	OMES, INO, BEWACO, DREAs, ERES, RESO, VREO, PESO, BADEA, ONEA, BUMIGEB, etc. (optimisé SHER 2023 : BD globalisée OMES)
Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines : données techniques (altitude, XY, diamètre, NS, profondeur forée, lithologie, épaisseur altération, profondeur crépines, débit fin foration, débit exploitation, essais et résultats, transmissivité, perméabilité, coeff d'emmagasinement, hydrochimie, etc.)	Tables attributaires	Optimisé SHER 2023 : BD OMES
Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines (partie malienne de la bordure sud-est du bassin)	Point	Thèse D. Dakouré, optimisé SHER 2023
7. AEP et prélèvements		
Centres ONEA + statut	Point	ONEA, 2023
Forages ONEA + caractéristiques	Point	ONEA, 2023

Sources exploitées ONEA	Point	ONEA, 2023
Volumes annuels prélevés ONEA (centres, forages, sources)	Table	ONEA, période 2010-2022
Volumes annuels prélevés autres (industrie, irrigation, etc.)	Table	Sources diverses, période 2010-2022
8. Sources		
Localisation des sources	Point	DEIE, AEM, AEC, RESO, ERES, PESO, VREO, ONEA (optimisé SHER 2022)
Caractéristiques des sources (dont altitude)	Table attributaire	PAEA + Produit dérivé SHER 2023
Débit des sources (séries temporelles)	Table	DEIE, AEM, AEC, RESO, ERES, PESO, VREO, ONEA (optimisé SHER 2022)
Volumes annuels prélevés sources ONEA	Table	ONEA, période 2010-2022
9. Piézométrie et niveaux de nappe		
Réseau piézométrique national RPN	Point	DEIE, 2021
Réseau piézométrique AEM	Point	AEM, 2021
Réseau piézométrique ONEA	Point	ONEA, 2022
Données (séries temporelles) de niveaux de nappe	Table	SHER 2023, à partir des mesures DEIE, AEM, PESO, ONEA (période 1980-2021)
Isopièzes	Ligne	SHER 2023, interpolation à partir des données asynchrones OMES et réseaux
Cotes piézométriques	Raster	SHER 2023, interpolation à partir des données asynchrones OMES et réseaux
Profondeur de nappe	Ligne et raster	SHER 2023, interpolation à partir de données asynchrones OMES et réseaux
Isopièzes et cotes piézométriques	Ligne et raster	SHER 2024, données d'output de la modélisation hydrogéologique
10. Flux d'eau souterraine		
Flux d'eau souterraine calculés par modélisation (flux entrants et sortants)	Point, ligne et table	SHER 2024, données d'output de la modélisation hydrogéologique
11. Qualité des eaux souterraines		
Réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines	Point	DEIE, 2021
Données (séries temporelles) de qualité	Table	DEIE, période 2012-2020
12. Paramètres hydrogéologiques		
Transmissivité, perméabilité, coefficient d'emmagasinement	Point	SHER 2023, produit dérivé de OMES
Transmissivité, perméabilité, coefficient d'emmagasinement	Raster et polygone	SHER 2023, interpolation à partir des données ponctuelles OMES
Transmissivité, perméabilité, coefficient d'emmagasinement	Table	SHER 2023, compilation par formation géologique à pd OMES et données liées
13. Recharge des aquifères		
Cartographie de recharge spatialisée calculée par approche bilantaire (cartes mensuelles et annuelles)	Raster	SHER 2022 et 2023, données mensuelles et annuelles calculées à pd bilans hydriques (période 1991-2021)
Evaluation de la recharge par cubatures des variations piézométriques	Points et attributs	SHER 2023, à pd données piézométriques du RPN (période 1980-2021)
Recharge projetée sur base de scénarios de changement climatique, évaluée par approche bilantaire spatialisée	Raster	SHER 2023-2024, à partir de données hydro-climatiques issues de scénarios de CC (données mensuelles / annuelles, horizon 2100)
14. Hydrographie		
Bassins hydrographiques et sous-bassins	Polygone	DEIE, 2003
Réseau hydrographique Burkina Faso	Ligne	IGB BNDT 2015, optimisé SHER 2022
Plans d'eau et retenues	Point	DEIE et DGIH, 2011
Plans d'eau et retenues	Polygone	IGB BNDT 2015, optimisé SHER 2022

Volumes annuels écoulés aux exutoires de bassins	Table	SHER, période 2000-2021
Volumes maximums stockés en retenues	Table	DEIE 2021, optimisé SHER 2022
Cotes altimétriques du réseau hydrographique	Point	Produit dérivé, SHER 2023
Réseau hydrographique, partie malienne de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni	Ligne	VREO, 2008
15. Débits en eau de surface		
Stations hydrométriques du réseau national	Point	DEIE, 2012 (actualisé 2022)
Débits mesurés en eau de surface (cours d'eau et retenues) à partir des stations du réseau DEIE	Table	DEIE, période 2000-2021
16. Occupation du sol		
Cartographie d'occupation du sol	Raster	LCC Copernicus, 2020
17. Types de sol		
Cartographie des types de sol	Raster + polygones	FAO HSWD, 2014 & 2023
Cartographie des types de sol	Raster + polygones	BUNASOL, 2016
Typologie des sols et propriétés hydriques associées (RU et RFU)	Table attributaire	FAO HSWD, 2014 & 2023
18. Images satellite		
Mosaïque image Sentinel-2 (20m)	Geotiff	Copernicus 2021, mosaiqué par SHER 2021
Mosaïque Landsat-8	Geotiff	Landsat 2013, mosaiqué par SHER 2021

Tableau 2 : Données capitalisées au sein de la BD-MOD pour la modélisation géologique et hydrogéologique

F. PREPARATION ET INTERPRETATION SYNTHETIQUE DES DONNEES UTILES A LA MODELISATION

La préparation des données d'entrée pour l'élaboration du modèle géologique et du modèle hydrogéologique est réalisée sur base des données disponibles, consolidées dans le cadre de la présente étude et intégrées à la base de données BD-MOD.

Les sections suivantes présentent, par thématique principale, les différents jeux de données constitués et l'interprétation synthétique qui en découle pour chaque thématique.

F.1. Topographie et géomorphologie

F.1.1. Présentation générale

La zone d'étude, au Burkina Faso, est caractérisée par une altitude comprise entre 749 et 245 mètres, soit une déclivité cumulée de 490 mètres. Les hauts reliefs sont naturellement localisés dans la région sud-ouest, tandis que la zone la plus basse correspond à la plaine du Sourou localisée au nord-est de la zone d'étude.

Le modelé des terrains de la couverture sédimentaire est caractérisé par des formes diversifiées telles que des falaises de grès (Banfora, Bobo Dioulasso ; Fô, Djibasso), avec reliefs ruiniformes, aiguilles ou pics et replats gréseux. Dans la série sédimentaire à l'Ouest, le mont de Ténakourou, coiffé de sa couronne latéritique, est le point culminant du Burkina Faso (749 m).

Ces formations sédimentaires forment un plateau caractérisé par des lignes douces et des vallonnements peu marqués. Le cuirassement latéritique est important et couvre de grandes superficies. Elles sont tabulaires et montrent un très léger pendage vers le Nord-Ouest.

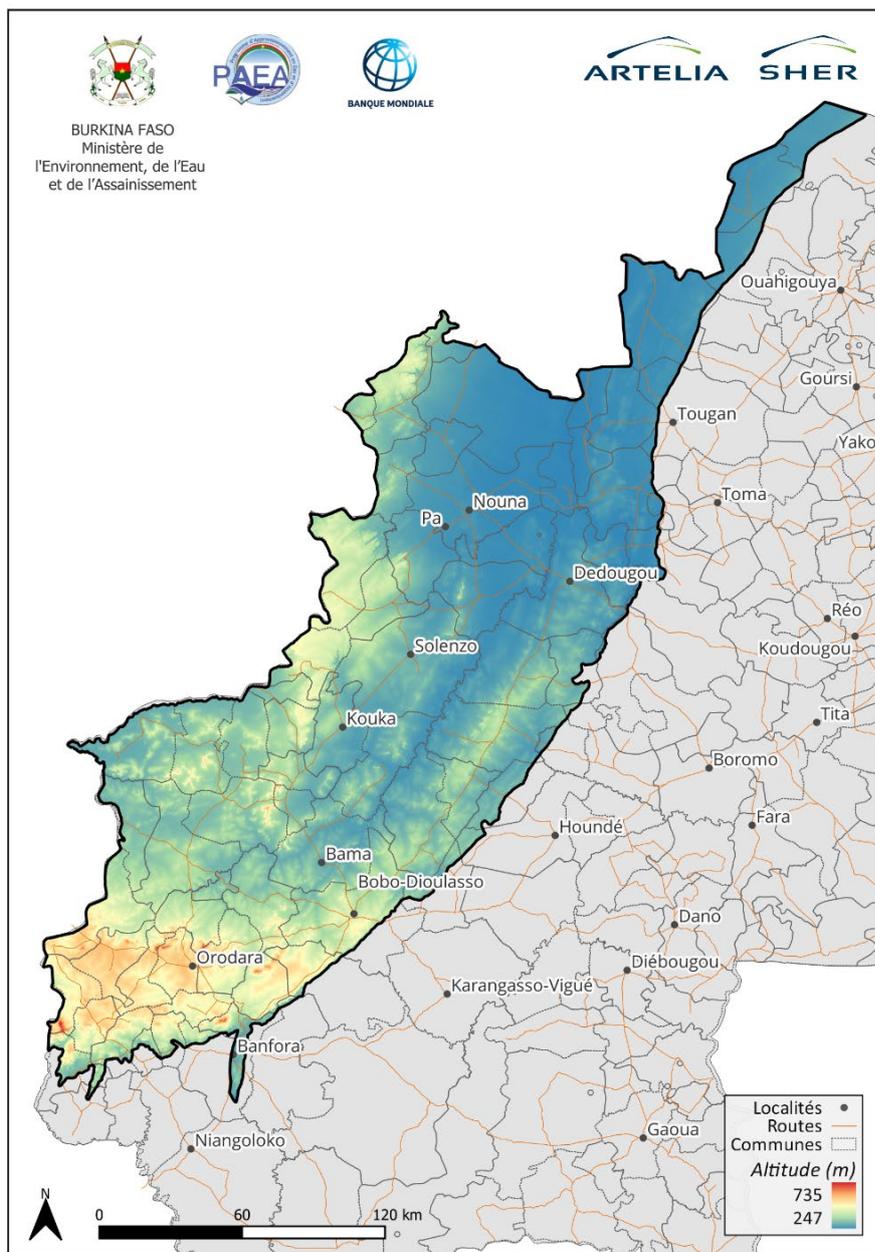
Dans sa partie Sud, le plateau a une altitude moyenne de 500 m. Il s'en dégage cependant, des collines isolées aux altitudes parfois supérieures à 700m.

La bordure du plateau est marquée par une falaise qui surplombe le socle cristallin ; sa hauteur est variable mais ne dépasse guère 200m. Cette falaise se découpe par endroits et donne, à l'érosion, des reliefs pittoresques en « dômes » (région de Fabédougou) ou en « aiguilles » (région de Sindou).

Vers le Nord, passé la latitude de Bobo-Dioulasso, la falaise s'estompe rapidement et disparaît. Dans le même temps, les altitudes s'abaissent progressivement et peuvent être inférieures à 300m au Nord de Dédougou.

À l'extrémité Nord-Ouest cependant, le massif de grès grossiers qui s'étire depuis la région de Fo jusque dans la région de Bandiagara au Mali, et forme le « plateau dogon » ou « plateau de Bandiagara », présente une allure discordante avec une altitude quasi constante de 400m.

Le référentiel utilisé pour la topographie est le MNT SRTM30m. La carte topographique de la zone d'étude est reprise ci-après.



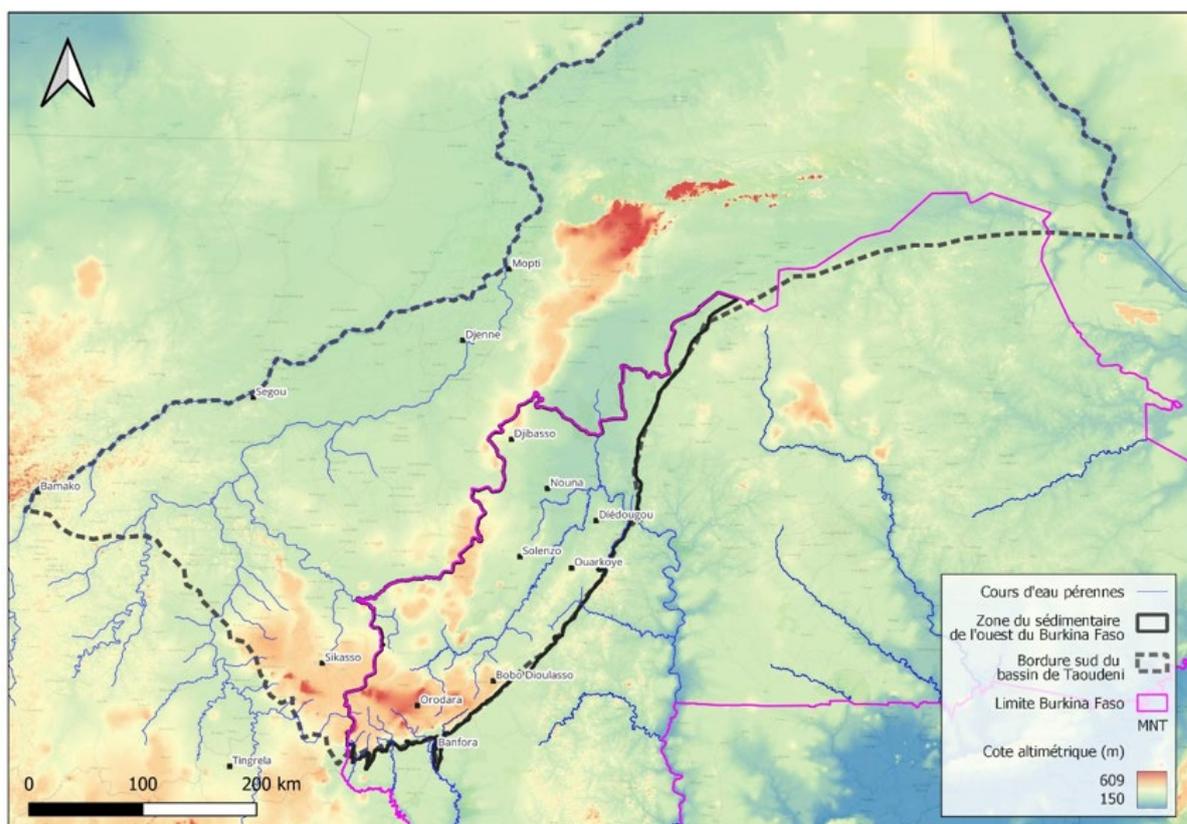
Source : IGB, SRTM, ARTELIA-SHER

Figure 8 : Topographie de la zone d'étude (MNT SRTM30)

Les données topographiques issues du MNT SRTM30 ont été consolidées localement à partir :

- des données numériques de l'IGB, à savoir 600 points cotés (shapefiles de type « point » projetés) présents sur la zone d'étude ;
- des données issues du relevé topographique réalisé au DGPS en 2007 dans le cadre du Programme VREO, soit environ 245 points sur la zone d'étude.

A l'échelle régionale, il est utile de présenter l'allure topographique de la bordure sud du bassin sédimentaire de Taoudeni : celle-ci est illustrée sur la figure reprise ci-après.



Source : IGB, SRTM, ARTELIA-SHER

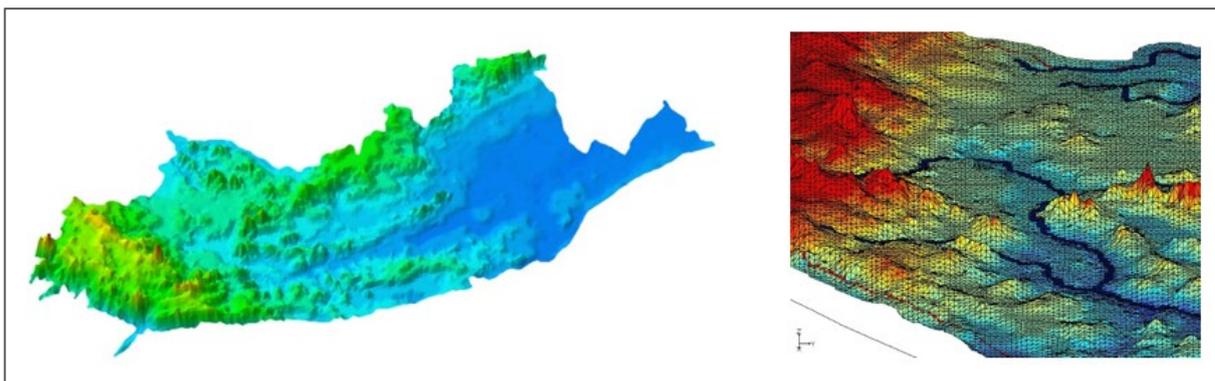
Figure 9 : Topographie de la bordure sud du bassin de Taoudeni (Mali & Burkina Faso)

On distingue clairement les bassins versants principaux, dont celui du fleuve Niger au Mali qui, via son affluent le Bani, recoupe la zone d'étude au nord-ouest de celle-ci, ainsi que le bassin du Mouhoun dans la zone d'étude.

F.1.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

Le modèle numérique de terrain (MNT) tel que consolidé a fait l'objet d'un découpage sur l'emprise (i) de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni et (ii) de la zone sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso.

Les MNT résultants ont été transformés en format TIN (triangular irregular network) dans GIS, afin notamment de permettre l'élaboration de la surface supérieure du solide (modèle géologique 3D) ainsi que l'altimétrie de la face supérieure de la première couche du maillage du modèle hydrogéologique.



Source : SRTM, ARTELIA-SHER

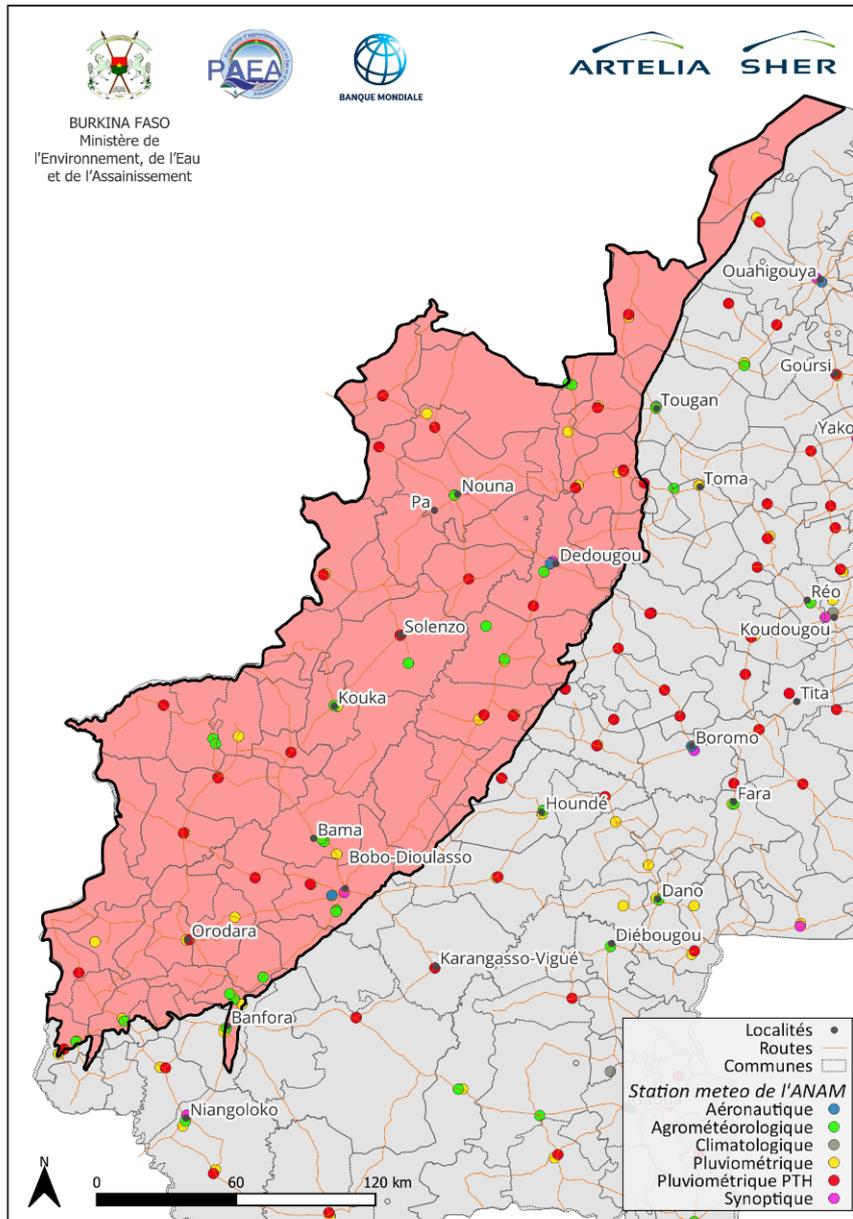
Figure 10 : Transformation du MNT en triangular irregular network (GMS)

F.2. Climatologie

F.2.1. Présentation générale

F.2.1.1. Localisation des stations de l'ANAM

La carte ci-après illustre la localisation des stations climatiques de l'ANAM. Au total, 74 stations sont répertoriées dans la zone du sédimentaire de l'ouest.

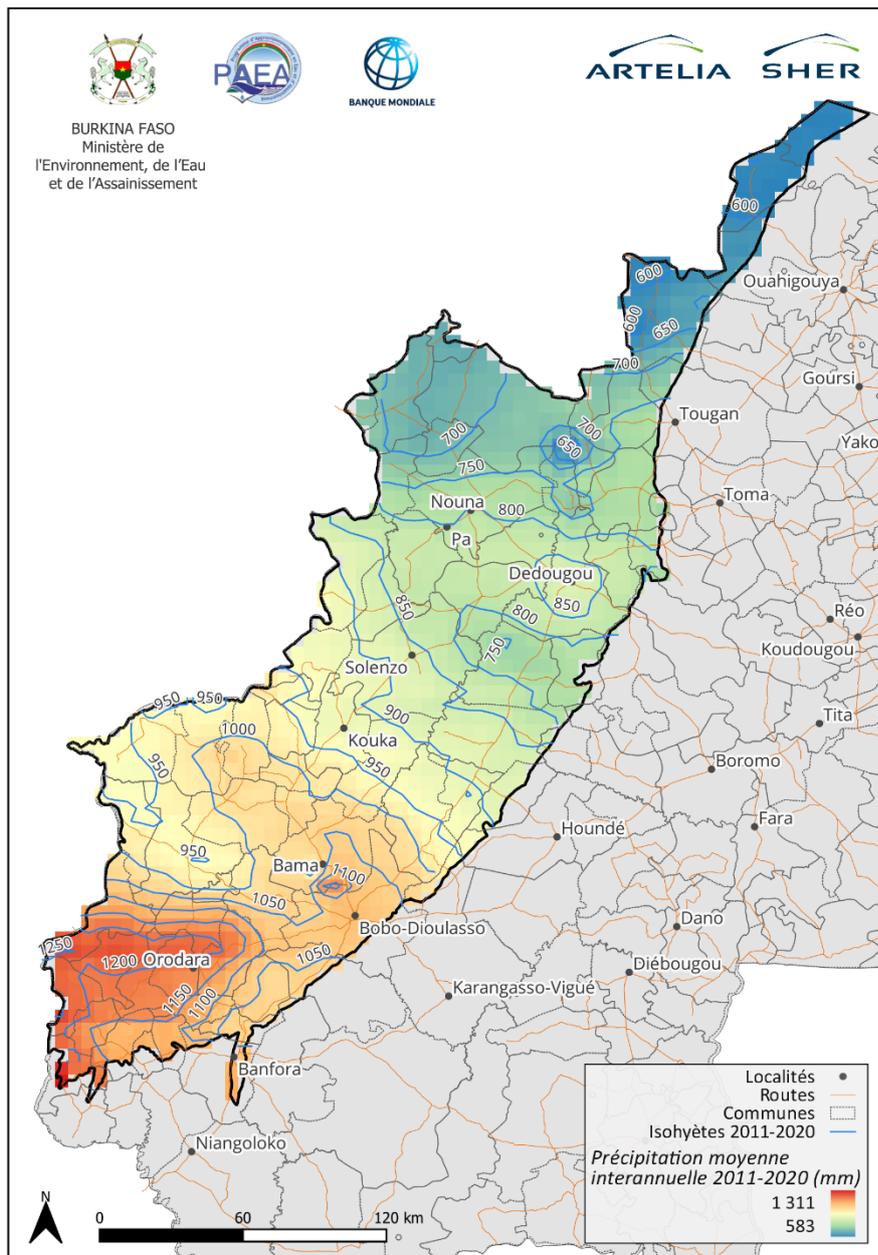


Source : ANAM, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 11 : Carte de localisation des stations climatiques de l'ANAM

F.2.1.2. Précipitations

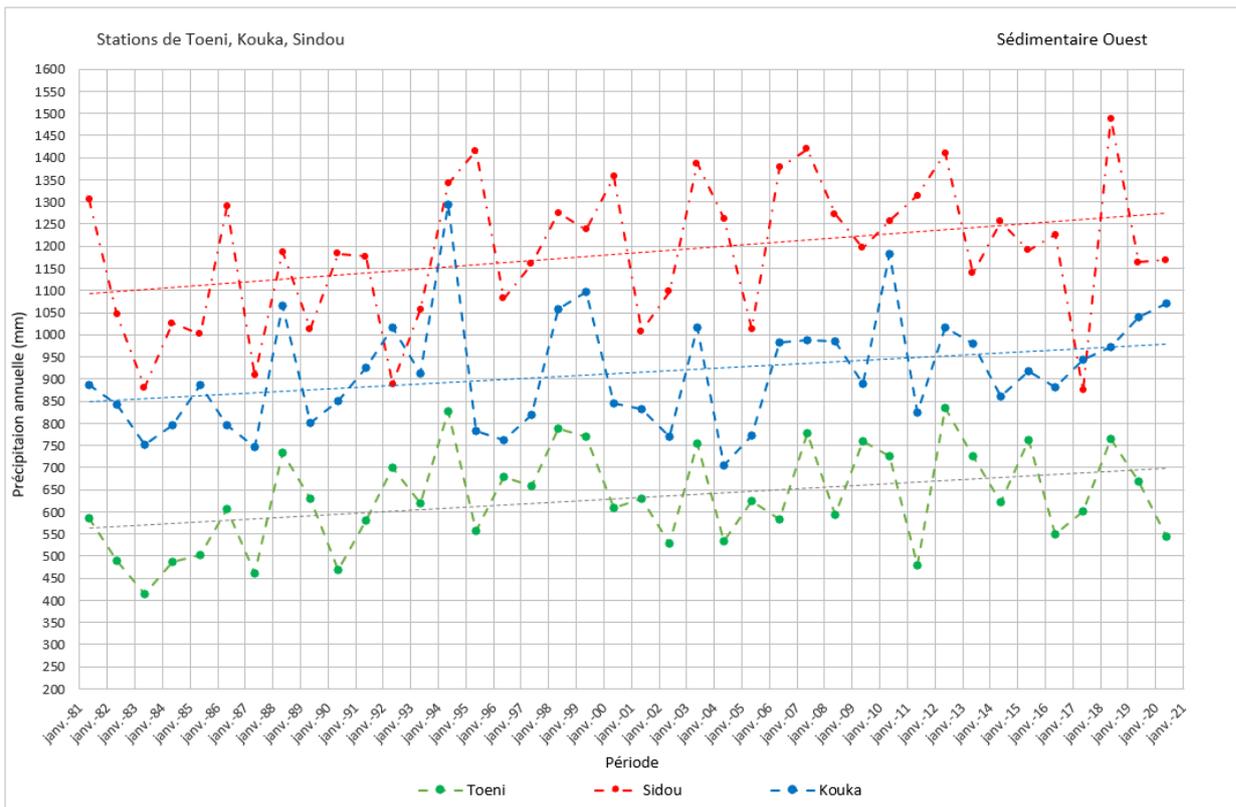
La carte ci-après illustre les précipitations annuelles moyennes de la période 2011-2020 sur la zone d'étude. Elles sont comprises entre 600 mm au nord-est et 1300 mm au sud-ouest, et témoignent d'un gradient pluviométrique très important sur la zone d'étude.



Source : ANAM, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 12 : Précipitations annuelles moyennes sur la période 2011-2020

La distribution spatio-temporelle des précipitations est illustrée sur la figure ci-après, pour la période 1981-2020, au niveau de 3 stations de l'ANAM réparties respectivement dans les parties nord-est (Toeni), centrale (Kouka) et sud-ouest (Sindou) de la zone d'étude.

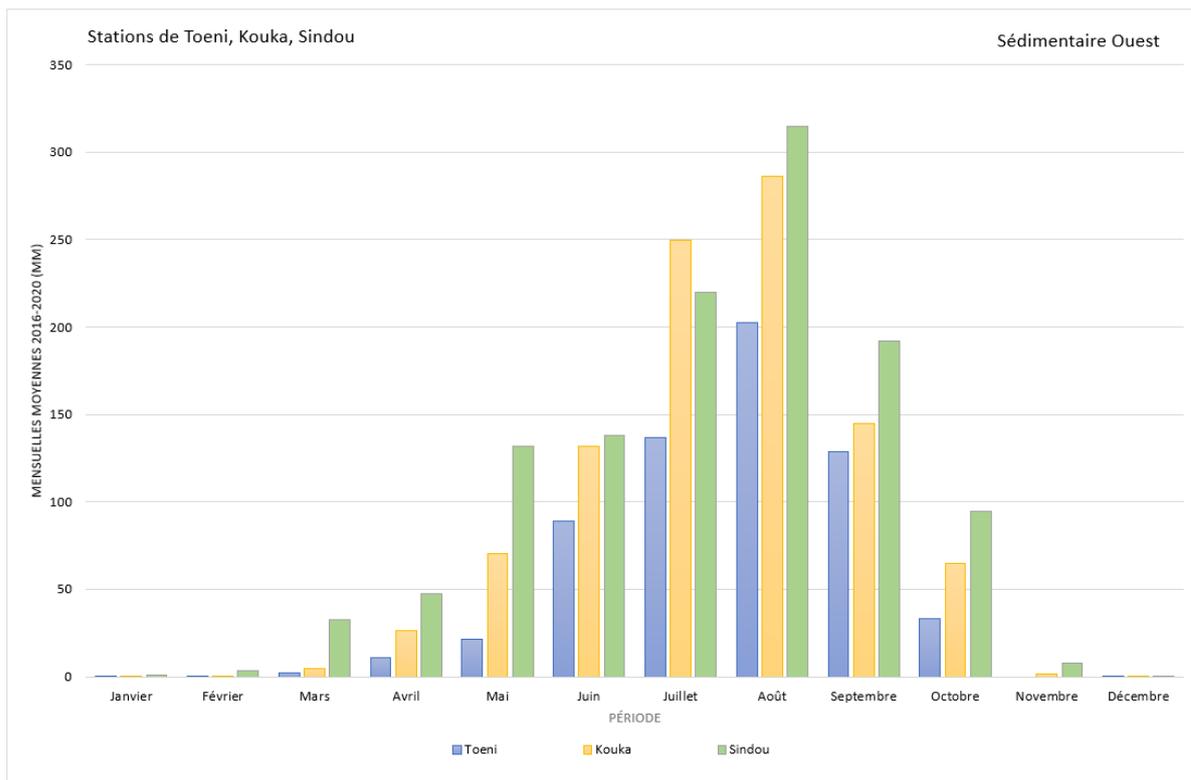


Source : ANAM, ARTELIA-SHER

Figure 13 : Distribution des précipitations annuelles sur la période 1981-2020 pour les stations ANAM de Toeni, Kouka et Sidou

On constate une augmentation globale des précipitations annuelles sur la période 1981-2020, pour l'ensemble du sédimentaire de l'ouest.

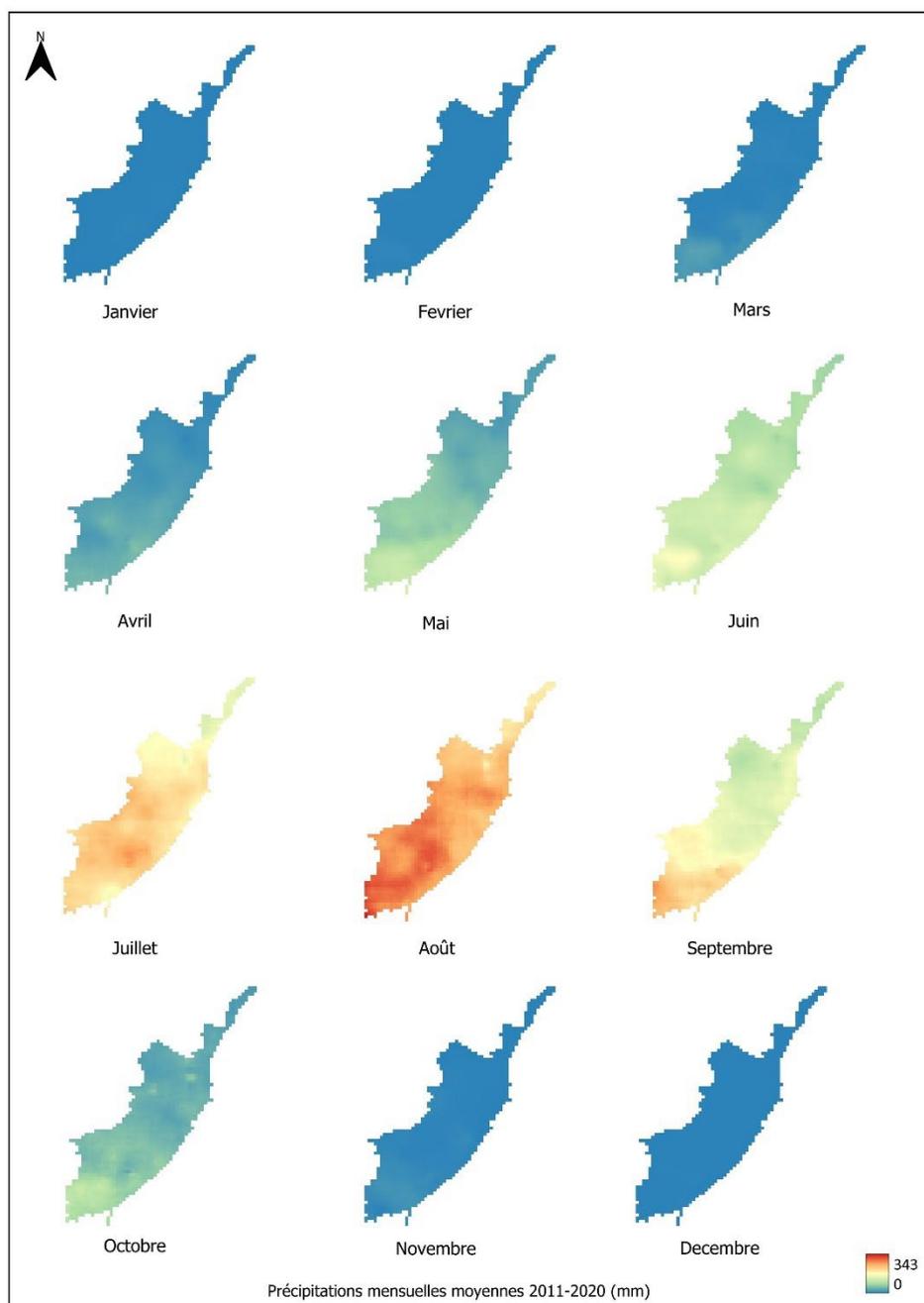
La distribution des précipitations mensuelles moyennes de ces 3 stations ANAM (période 2016-2020) est reprise sur la figure présentée ci-après.



Source : ANAM, ARTELIA-SHER

Figure 14 : Distribution des précipitations mensuelles moyennes sur la période 2016-2020 pour les stations ANAM de Toeni, Kouka et Sindou

La figure présentée ci-après illustre la distribution spatio-temporelle des précipitations mensuelles sur l'ensemble de la zone d'étude, sur la période 2011-2020 (source de données : CHIRPS + ANAM)

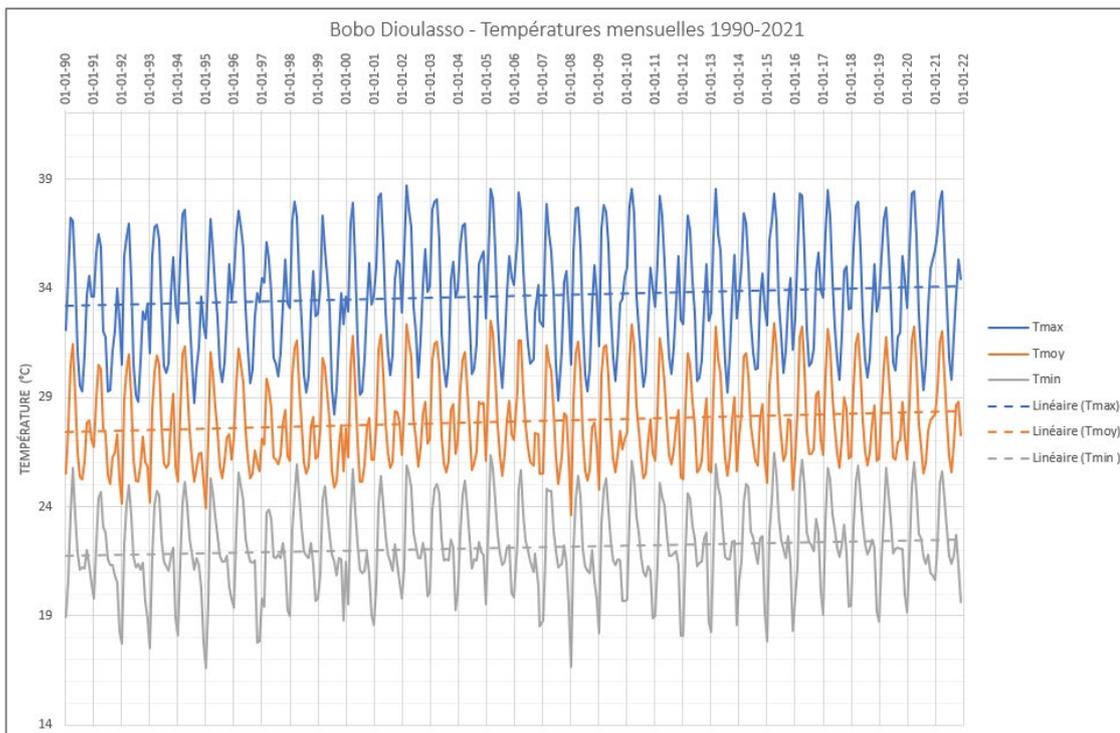


Source : ANAM, ARTELIA-SHER

Figure 15 : Distribution spatio-temporelle des précipitations mensuelles (moyenne 2011-2020)

F.2.1.3. Températures

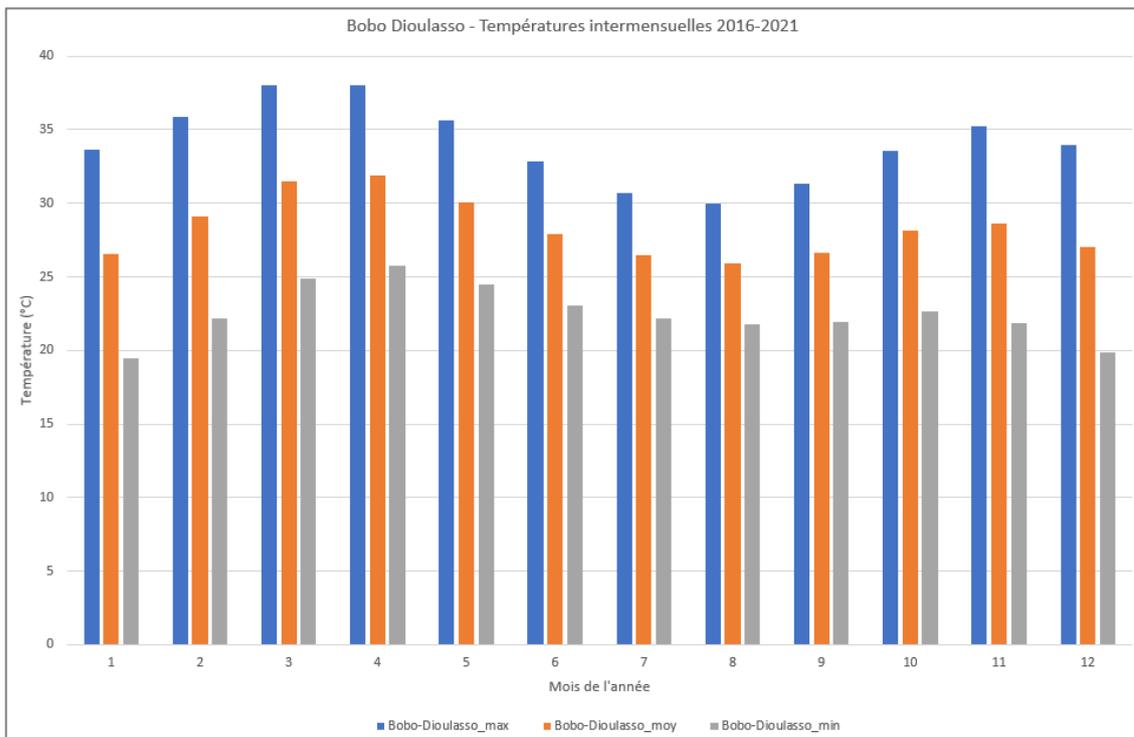
Les températures mensuelles (minimales, moyennes et maximales) de la zone d'étude sont illustrées à titre d'exemple ci-après pour la ville de Bobo Dioulasso sur la période 1990-2021 (source de données : ANAM).



Source : ANAM, ARTELIA-SHER

Figure 16 : Températures mensuelles minimales, maximales et moyennes à Bobo Dioulasso sur la période 1990-2021

On constate globalement une augmentation des températures moyennes sur cette période de 30 années.



Source : ANAM, ARTELIA-SHER

Figure 17 : Températures inter-mensuelles (période 2016-2021) minimales, maximales et moyennes à Bobo Dioulasso

Les températures mensuelles les plus élevées sont observées en mars et avril, tandis que les plus basses sont observées en décembre et janvier.

F.2.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

Les données climatologiques P et T sont capitalisées dans la base de données BD-MOD au pas de temps mensuel sur la période 1991-2020, d'une part sous format raster (geotiff et netCDF), et d'autre part en tables de données mensuelles 1991-2020 pour l'ensemble des stations de l'ANAM de la zone d'étude.

En combinaison avec d'autres données hydro-climatologiques (ETP/ETR, RFU, Ruissellement) également capitalisées au pas de temps mensuel sur la même période 1991-2020, le jeu de données complet permet l'évaluation spatialisée de la recharge par approche bilantaire (bilan hydrologique) au pas de temps mensuel sur la période 1991-2020 (voir section relative à la recharge).

Les données climatologiques sont donc capitalisées, en ce qui concerne la modélisation, aux fins d'évaluation temporelle de la recharge spatialisée des aquifères.

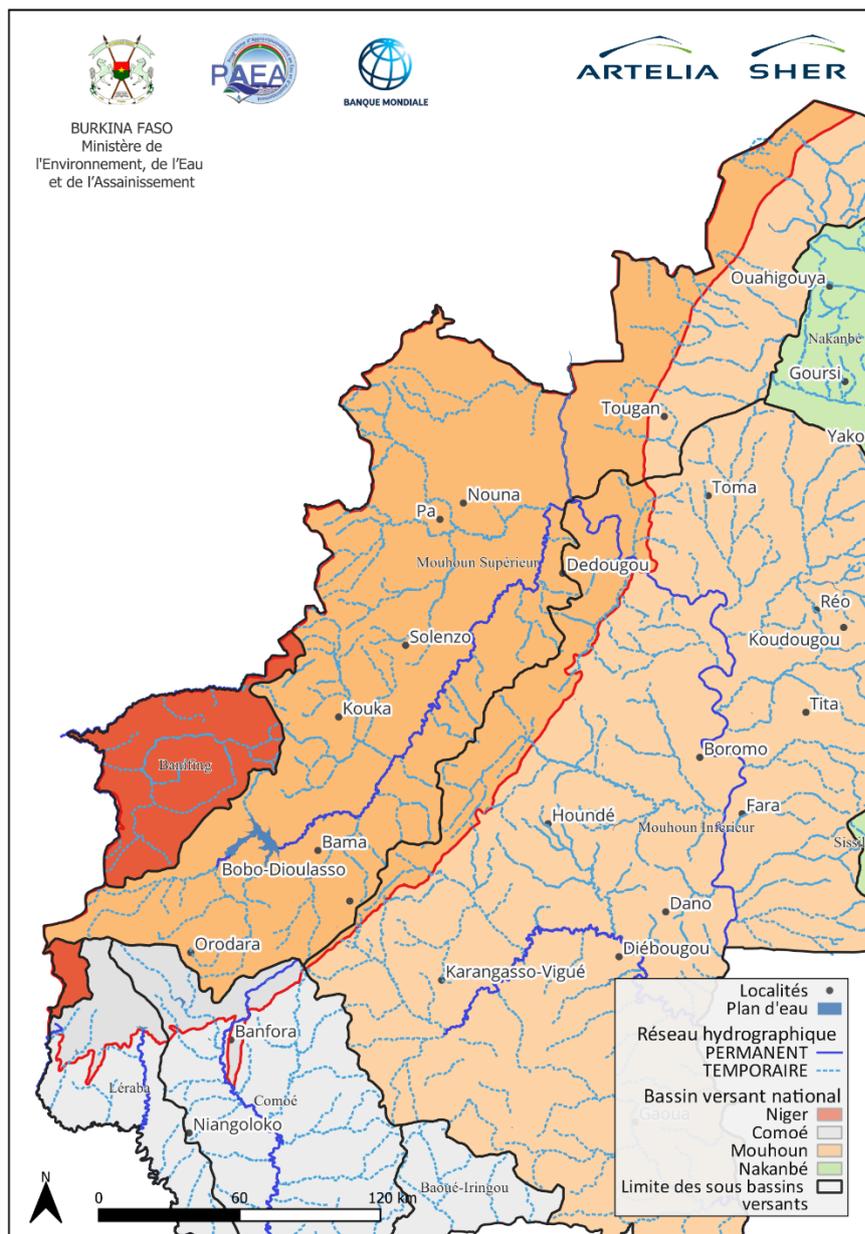
F.3. Hydrographie et hydrométrie

F.3.1. Présentation générale

F.3.1.1. Réseau hydrographique et bassins versants

Le réseau hydrographique principal de la zone d'étude est illustré, ainsi que les plans d'eau, sur la figure ci-après. Le cours d'eau principal est le Mouhoun, lequel traverse la zone d'étude du sud-ouest au nord-est sur pratiquement toute sa longueur.

On notera également, parmi les principaux cours d'eau pérennes, le cours d'eau Banifing, frontalier avec le Mali en limite ouest de zone d'étude, ainsi que la Comoé à l'extrême sud-ouest.



Source : DEIE, IGB, ARTELIA-SHER

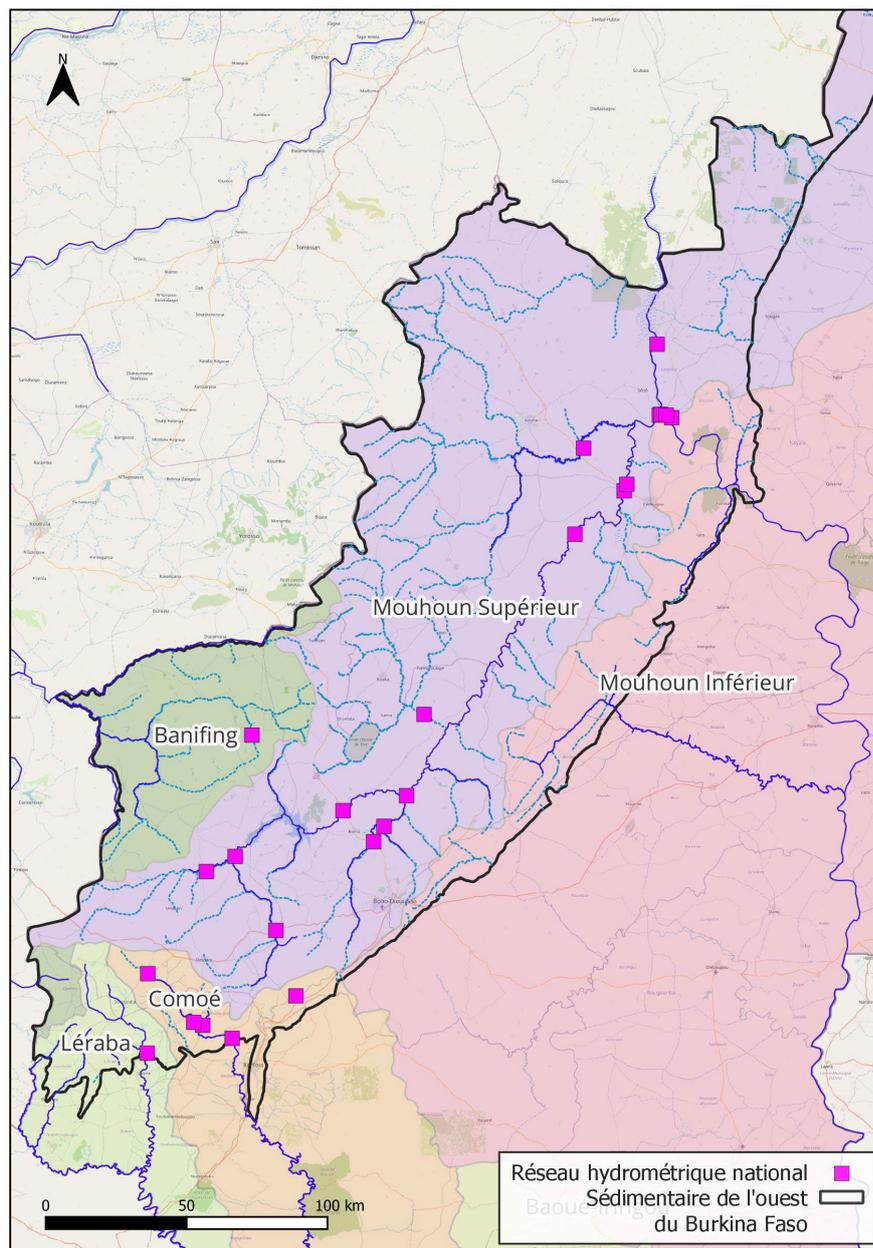
Figure 18 : Réseau hydrographique de la zone d'étude et bassins versants

Le plan d'eau principal est le barrage de Samandeni, avec une superficie d'environ 123 km².

F.3.1.2. Réseau hydrométrique et données de débit des eaux de surface

Les débits des eaux de surface sont évalués à partir des données du réseau de suivi hydrométrique national, lequel compte 25 stations hydrométriques situées dans la zone d'étude. Parmi celles-ci, 12 sont situées sur le cours du Mouhoun.

La figure présentée ci-après illustre la localisation des stations hydrométriques de la zone d'étude.



Source : DEIE, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 19 : carte du réseau hydrométrique national présent dans la zone d'étude

La liste des stations hydrométriques localisées dans le sédimentaire de l'ouest est reprise dans le tableau ci-après.

Nom	BV	Cours d'eau	Type	Id_BD
Badara	Mouhoun	Kou	Cours d'eau	MHN_BAD
Banzon	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_BAN
Barrage Bodiadiougou	Comoé	Lobi	Barrage/Lac	COM_BOD
Barrage de Douna	Comoé	Léraba orientale	Barrage/Lac	COM_DOU
Barrage de Toussiana	Comoé	Yannon	Barrage/Lac	COM_TOU
Barrage Moussodougou	Comoé	Comoé	Barrage/Lac	COM_MOU
Bonvalé	Mouhoun	Siou	Cours d'eau	MHN_BON
Bourasso	Mouhoun	Vouhoun	Cours d'eau	MHN_BOU
Confluence Kou-Mouhoun	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_KOU
Confluence Niamé-Baoulé	Mouhoun	Kou	Cours d'eau	MHN_NBA

Dingasso	Niger	Dougo	Cours d'eau	NIG_DIN
Guéna	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_GUE
Karfiguéla-Radier	Comoé	Comoé	Cours d'eau	COM_KRA
Lanviéra	Mouhoun	Plandi	Cours d'eau	MHN_LAN
Lery barrage	Mouhoun	Mouhoun	Barrage/Lac	MHN_LEB
Lery canal	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_LEC
Lery nord	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_LEN
Manimensso	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_MAN
Nwokuy amont	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_NWO
Nwokuy aval	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_NWA
Samandéni	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_SAM
Samogohiri	Comoé	Koba	Cours d'eau	COM_SAM
Tourouba	Mouhoun	Mouhoun	Cours d'eau	MHN_TOU
Yaran	Mouhoun	Sourou	Cours d'eau	MHN_YAR

Source : DEIE

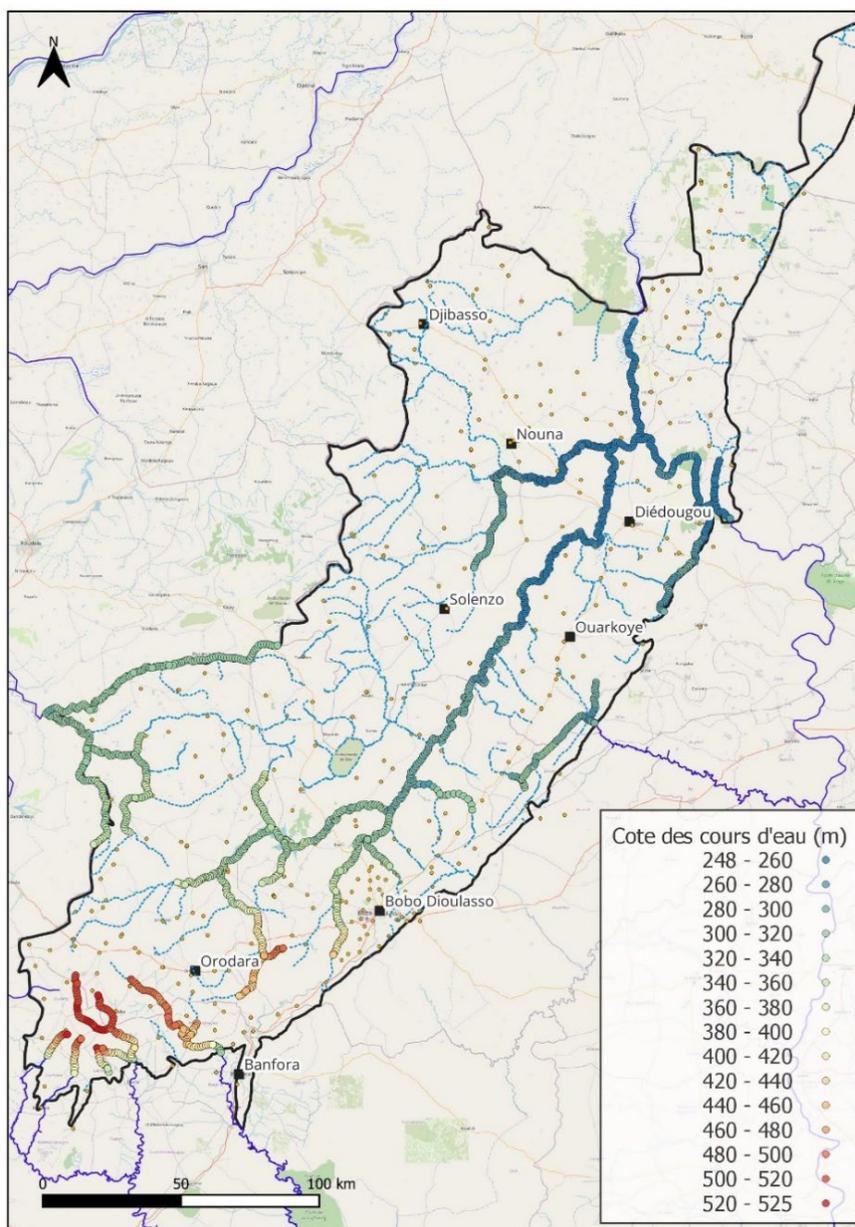
Tableau 3 : Liste des stations hydrométriques localisées dans la zone du sédimentaire de l'ouest

F.3.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

L'alimentation de la base de données BD-MOD repose sur :

- la capitalisation de la couche cartographique des cours d'eau (pérennes et temporaires) présents dans la zone d'étude ;
- la capitalisation de la couche des plans d'eau présents ;
- la réalisation de profils en long des principaux cours d'eau pérennes situés dans la zone d'étude, à partir des données numériques de l'IGB et du MNT consolidé : croisement par SIG (QGIS) des points-rivière avec le MNT afin de coter 450 points-rivière (soit 1 point/2 km) pour la réalisation des profils en long et pour leur implémentation dans le logiciel GMS.

La figure ci-après illustre le résultat du calcul des cotes altimétriques des principaux cours d'eau pérennes.



Source : DEIE, IGB, SRTM, ARTELIA-SHER

Figure 20 : Cotes altimétriques calculées des principaux cours d'eau pérennes

Ce travail permet d'obtenir les cotes altimétriques des cours d'eau pérenne, en tout point de la zone d'étude, en vue de la paramétrisation des conditions 'River' (échanges nappe-rivière) dans GMS pour la modélisation hydrogéologique.

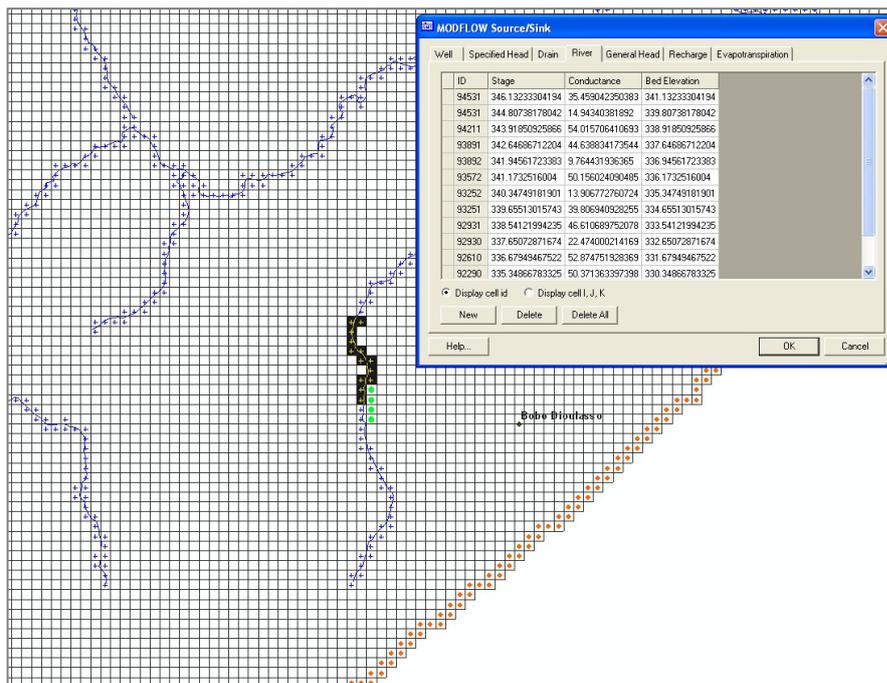


Figure 21 : Exemple de paramétrisation des conditions 'River' dans GMS (zone de Bobo Dioulasso)

- la capitalisation de la couche des stations du réseau hydrométrique, ainsi que la capitalisation des données mensuelles de débit relatives à ces stations sur la période 1991-2020. Cette capitalisation permettra la calibration et validation du modèle hydrogéologique au niveau des flux d'échange entre la nappe et les eaux de surface, sur base de l'évaluation des hydrogrammes en période d'étiage (débit de base). Cette évaluation concerne essentiellement les échanges entre la nappe et les cours d'eau pérennes principaux que sont le Mouhoun et le Banifing.

F.4. Types de sol

F.4.1. Présentation générale

La cartographie des types de sol de la zone d'étude est capitalisée d'une part par la base de données du BUNASOL (2016), et d'autre part par la base de données HWSO (2014) et HWSO 2.0 (2023) de la FAO.

La figure reprise ci-après illustre la distribution des types de sol établie selon la base de données HWSO de la FAO. La nomenclature considérée reprend 6 classes de sols, rencontrés dans la zone d'étude. Les sols de type 'limon fin' représentent 45% de la superficie de la zone d'étude.

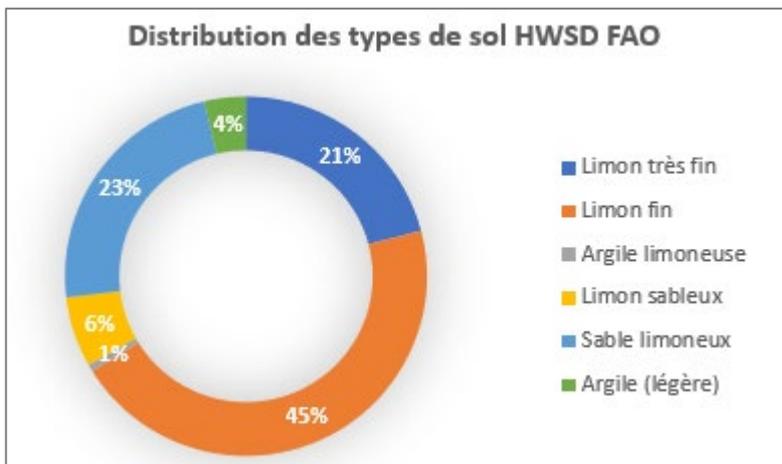


Figure 22 : Distribution des types de sol (selon HWSO FAO) dans la zone d'étude

La distribution spatiale des types de sol (selon HWSO FAO) est présentée sur la carte reprise ci-après.

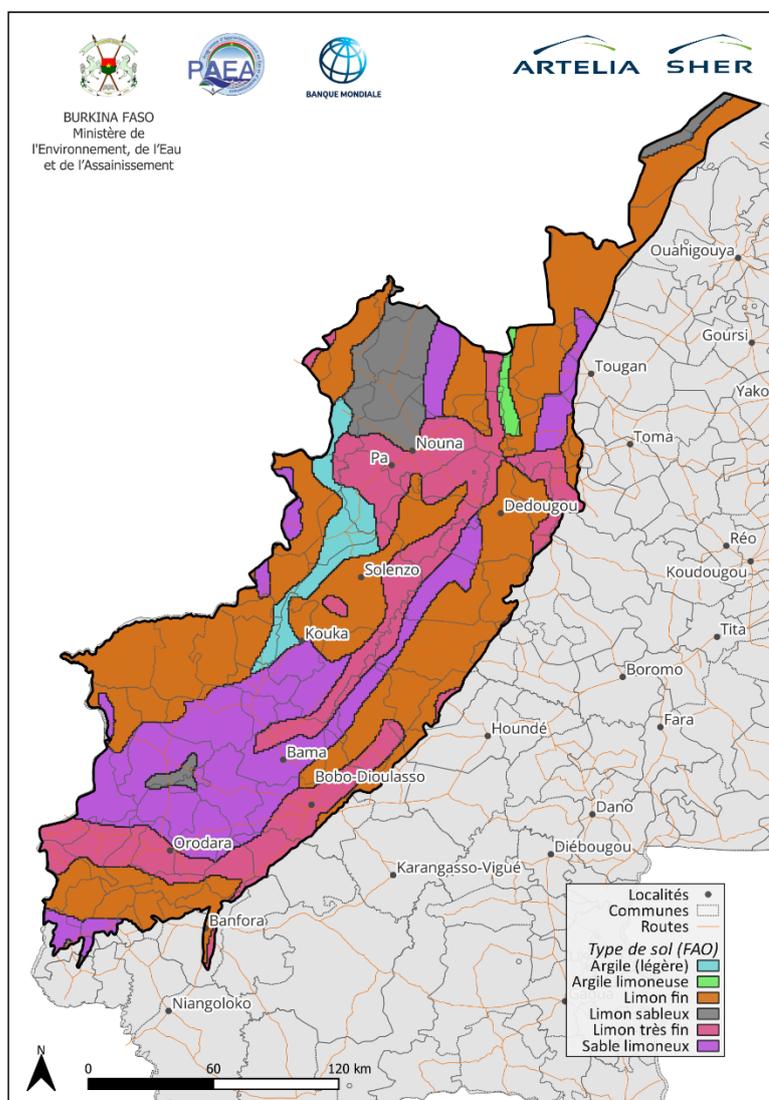


Figure 23 : Carte des types de sols (HWSO FAO)

F.4.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

La cartographie des types de sol selon BUNASOL et selon HWSD FAO est capitalisée en couches de polygones dans la base de données BD-MOD.

En ce qui concerne la couche HWSD-FAO, des valeurs de Réserve Utile maximale (RUmax) et de Réserve Facilement Utilisable maximale (RFUmax) sont déterminées pour chaque type de sol, conformément à la nomenclature établie par la FAO et aux propriétés associées pour chaque type de sol. L'association de ces paramètres aux polygones permet de définir, en tout point de la zone d'étude, les valeurs de RUmax et de RFUmax. Les valeurs de RFUmax interviennent, au niveau de la modélisation hydrogéologique, dans le cadre de l'évaluation de la recharge spatialisée par approche bilantaire.

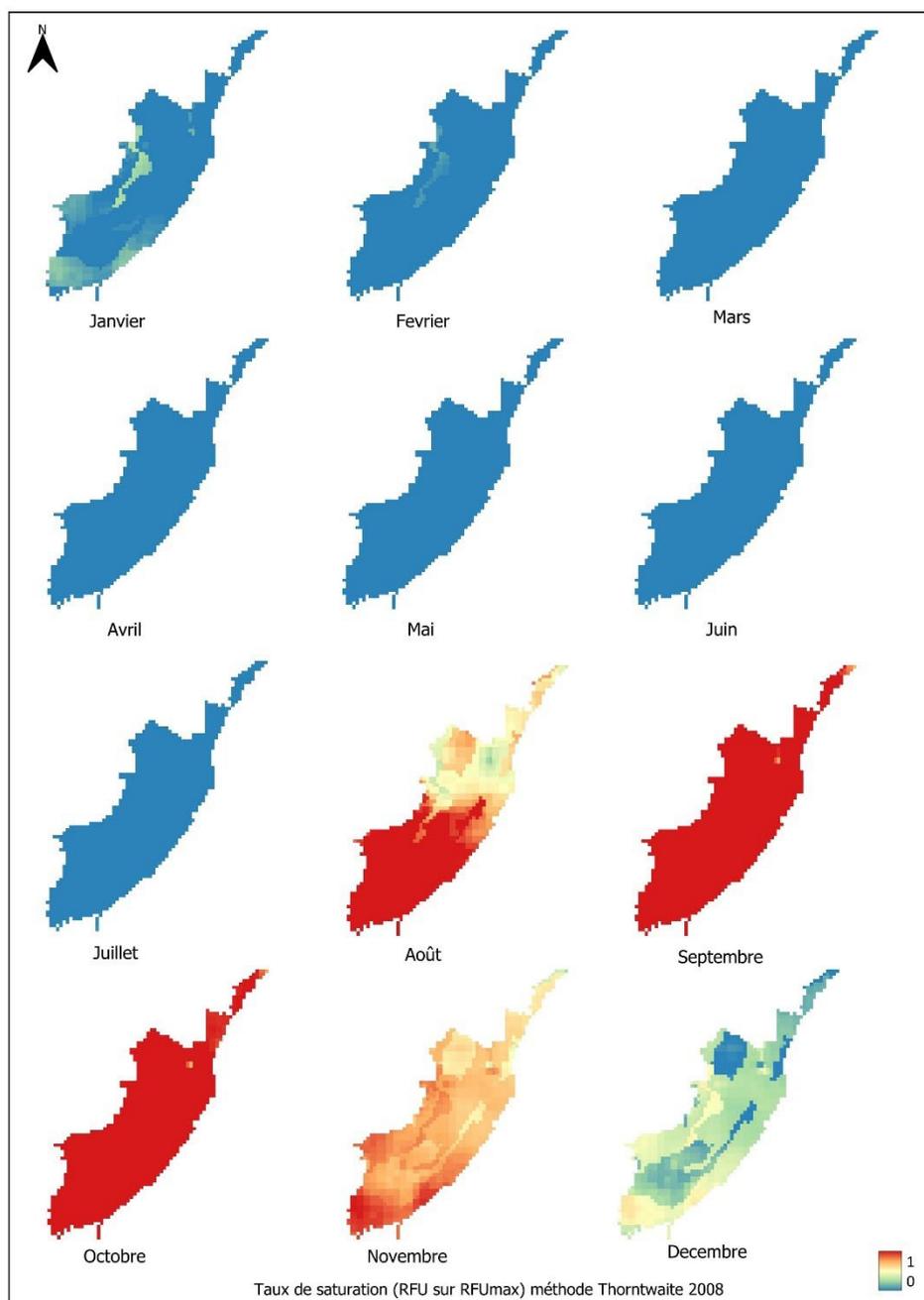
Type sol	RFUmax (mm)	RUmax (mm)
Limon très fin	110	165
Limon fin	110	165
Argile limoneuse	110	195
Limon sableux	85	120
Sable limoneux	80	120
Argile (légère)	125	225

Source : FAO

Tableau 4 : Typologie des types de sol et des valeurs associées de RFUmax et de RUmax

La mise en œuvre de cette approche bilantaire génère des valeurs calculées de RFU effective mensuelle en tout point pour chaque mois de la période 1991-2020 (soit 360 mois), capitalisées dans la BD-MOD sous forme de raster (netCDF et geotiff) couvrant la zone d'étude.

A titre d'exemple, la figure ci-après illustre le rapport RFU/RFUmax pour chaque mois de l'année médiane (2008) de la période 1991-2020. Selon l'approche bilantaire, l'eau utile qui génère une recharge des aquifères par infiltration est disponible lorsque ce rapport (taux de saturation du sol) est égal à 1. Cette situation est rencontrée, dans l'exemple illustré, de aout à octobre.



Source : ANAM, FAO, ARTELIA-SHER

Figure 24 : Taux de saturation (RFU/RFUmax) mensuel pour l'année 2008 (année médiane P50 de la période 1991-2020)

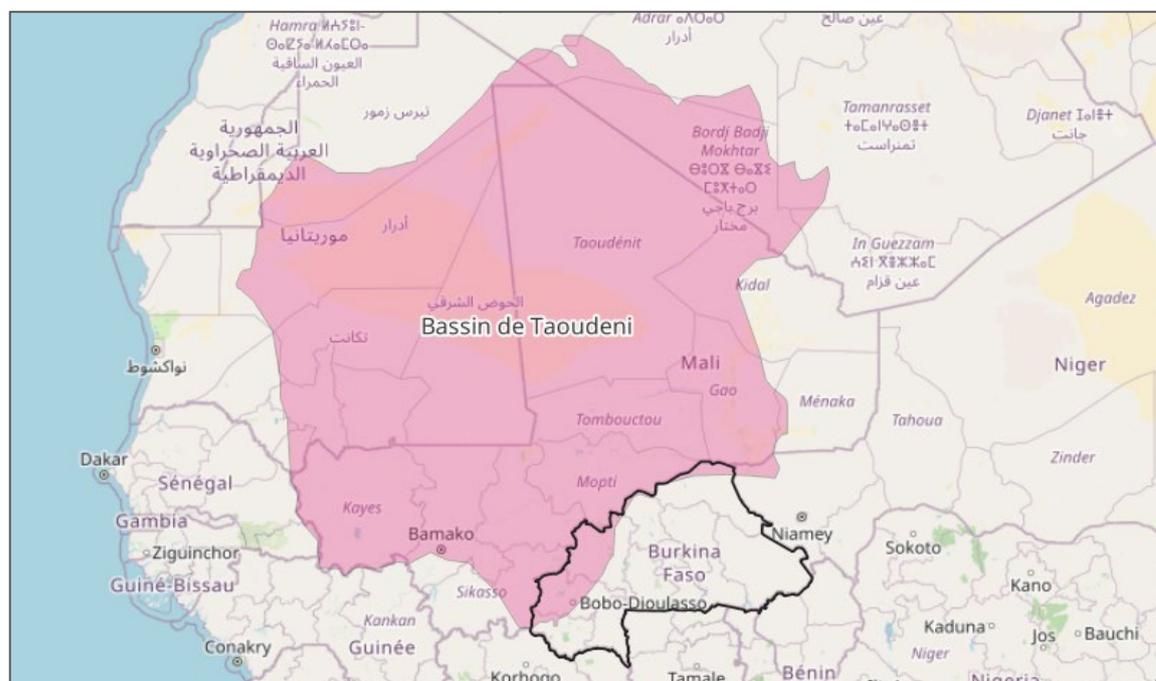
F.5. Contexte géologique

F.5.1. Présentation générale

F.5.1.1. Extension et configuration géologique générale du bassin sédimentaire de Taoudeni

F.5.1.1.1. 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 ci-après.



Source : OpenStreetMap, IGB, ARTELIA-SHER

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) couvrent environ 46 000 km². Ceci ne représente que 3% de la superficie totale du bassin de Taoudeni.

F.5.1.1.2. 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 pentes 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 panafricaine.

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.

F.5.1.1.3. 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).

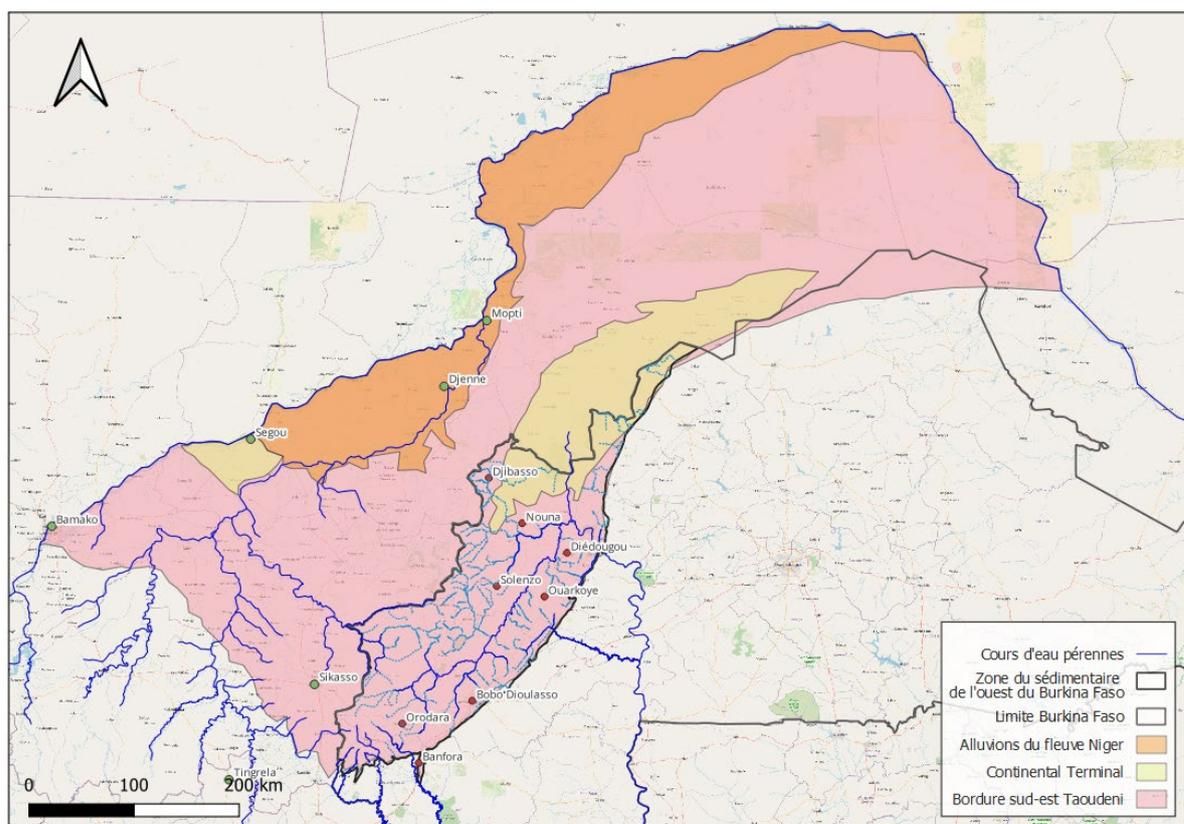
La stratigraphie des deux bassins n'est bien connue que sur leurs bordures dont les dépôts ont cependant pu être corrélés grâce au caractère régional des discontinuités sédimentaires, aux similitudes de faciès, aux rares données paléontologiques et enfin aux données géochronologiques (Deynoux, 1983; 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).

F.5.1.2. Configuration géologique générale de la bordure sud-est bassin de Taoudeni

D'un point de vue géologique et hydrogéologique, il est utile de présenter la configuration de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni : il s'agit des terrains sédimentaires situés en rive droite du fleuve Niger, au Mali et au Burkina Faso.

D'une superficie totale de l'ordre de 260.000 km², on constate que ce système aquifère majeur est essentiellement situé au Mali, tandis que sa partie située à l'ouest du Burkina Faso - qui fait l'objet de cette étude - n'en représente que 16 %.

La carte simplifiée présentée ci-après illustre la configuration simplifiée de cette bordure sud-est, en y distinguant les alluvions du fleuve Niger, le Continental Terminal, et de manière indifférenciée l'ensemble des autres formations sédimentaires présentes dans cette partie du bassin.



Source : OpenStreetMap, DEIE, BUMIGEB, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 27 : Extension et configuration de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni

F.5.1.3. Contexte géologique du bassin de Taoudeni à l'ouest du Burkina Faso

Le bassin de Taoudeni à l'ouest de Burkina Faso forme une bande allongée SSW-NNE adjacente à la frontière avec le Mali. C'est un domaine de roches sédimentaires reposant en discordance sur les formations granitiques et métamorphiques du socle Paléoprotérozoïque occupant la majeure partie du pays, entre autres, la chaîne Birimienne qui délimite au sud-est. À l'Ouest et au Nord du pays, il correspond à la bordure SE du vaste synclise de Taoudeni centré sur le craton ouest-africain. La lithologie est composée essentiellement d'une couverture sédimentaire Néoprotérozoïque avec une présence très limitée spatialement des formations terrigènes cénozoïques dans la dépression de la plaine du Gondo à l'extrémité nord du bassin. L'épaisseur totale est estimée à plus de 3000 m (Trompette, 1973 ; Bronner et al., 1980).

Du fait de la rareté des affleurements, les études qui ont porté sur cette partie du bassin, se sont heurtées à la difficulté d'établir une lithostratigraphie précise. Les limites de formation ont souvent varié ; des regroupements et subdivisions ont été proposés par différents auteurs depuis Sagatzky (1954) jusqu'au Trompette (1977).

Les différentes formations du bassin de Taoudéni au Burkina Faso s'empilent régulièrement les unes sur les autres en couches subhorizontales monoclinales affectées d'un léger pendage de 2° environ vers le NW ou le NNE. Elles sont intensément diaclasées sur les bordures et faillées vers le Sud dans la région de Bobo et vers le Nord dans la région de Dédougou. Localement elles peuvent être affectées de légers plissements du fait de la tectonique ou des intrusions doléritiques.

Avec ce pendage de 2°, les couches s'enfoncent de 35 m par km, ce qui amènerait la formation GKS, affleurant au sud du bassin, à près de 4000 m de profondeur vers la frontière malienne. Bien qu'aucun forage n'ait atteint le socle dans ces endroits, cette profondeur paraît excessive et il est possible que le pendage s'atténue vers le nord-ouest. Des pendages contraires qui sont liés à des accidents tectoniques ou à des intrusions doléritiques ou à des plissements suivant un axe Fô-Sanaba sont rencontrés localement.

F.5.1.3.1. La couverture sédimentaire Néoprotérozoïque

Il s'agit d'une sédimentation principalement détritique de milieu marin peu profond avec de rares intercalations de sédiments fluviaux. La sédimentation débute dans l'ensemble depuis le Néoprotérozoïque (1000 Ma environ) jusqu'au Cambrien.

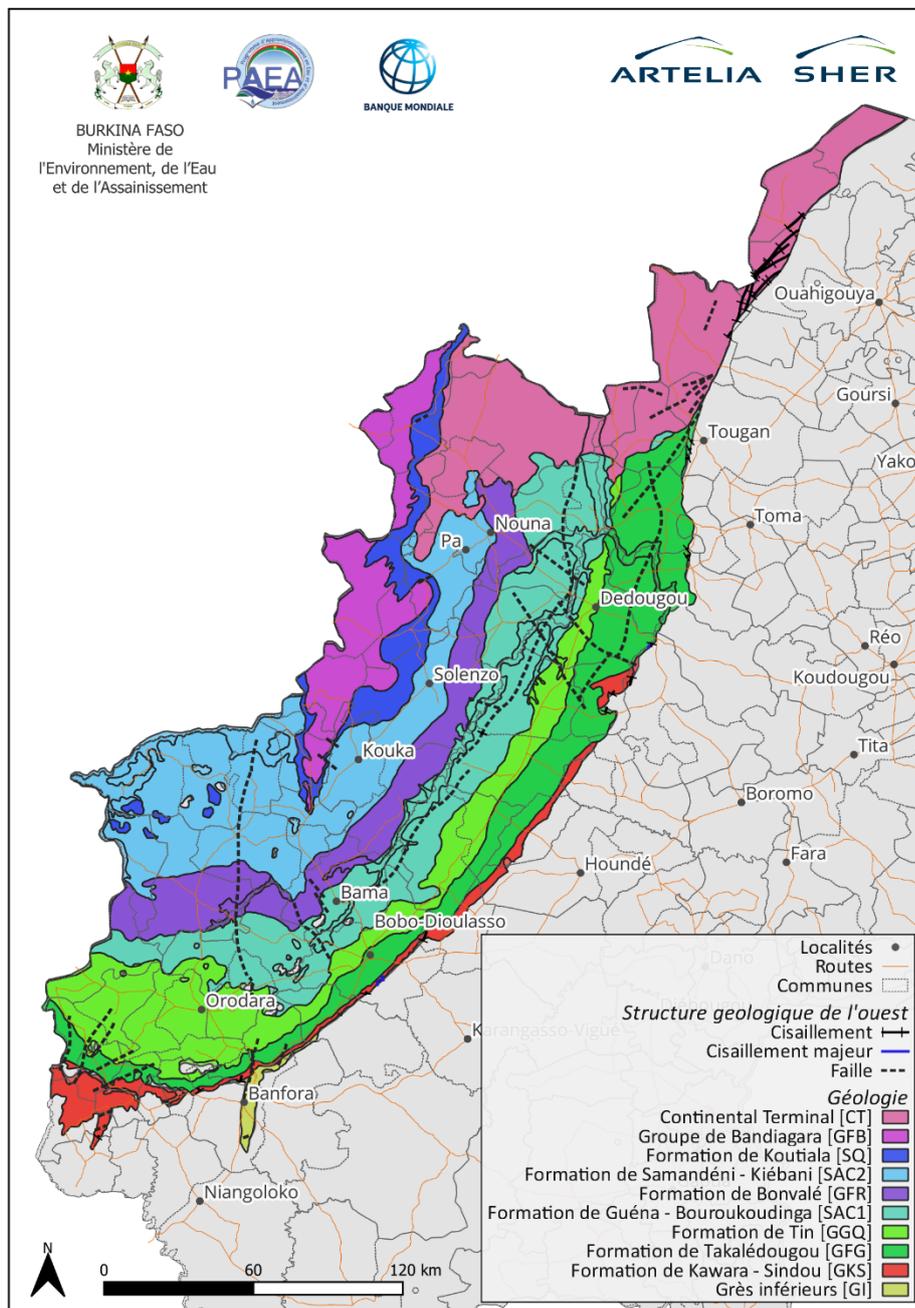
La stratigraphie et la sédimentologie de ces dépôts ont été particulièrement étudiées par Ouédraogo (1983) le long de coupes sériées sur les affleurements de bonne qualité des secteurs de Banfora, Bobo-Dioulasso et Fô. La lithostratigraphie formellement établie par cet auteur intéresse ainsi l'ensemble de la bordure sud-est du bassin de Taoudéni qui forme le soubassement sédimentaire du Burkina Faso occidental.

Neuf formations ont été distinguées (Ouédraogo, 1983, 1998, 2006). Elles se répartissent en quatre groupes décrits ci-dessous de la base vers le sommet (voir tableaux et figures ci-après) sachant que dans les anciens travaux, la série a été subdivisée en 3 groupes avec des appellations différentes des formations (entre parenthèse et en italique dans le tableau). La série est la plus complète au nord-est du bassin et la plus réduite au sud-ouest.

GROUPES	FORMATIONS
Groupe de Bandiagara	Grès de Fo-Bandiagara (GFB)
<i>Discordance angulaire et de ravinement</i>	
Groupe de Bobo	Siltites et Grès-quartzite de la passe de Fo (SQ) (<i>Grès de Koutiala</i>)
	Siltites, Argilites et Carbonates de Samandéni-Kiébané (SAC2) (<i>Schiste de Toun</i>)
	Grès fins roses (GFR) (<i>Grès de Bonvalé</i>)
	Siltites, Argilites et Carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1) (<i>Formation grés-schisto-dolomitique</i>)
	Grès à granules de quartz (GGQ) (<i>Formation de Tin</i>)
<i>Discordance de ravinement</i>	
Groupe de la Falaise	Grès fins glauconieux de Takalédougou (GFG) (<i>Grès de Sotuba</i>)
	Grès de Kawara-Sindou (GKS) (<i>Grès de base</i>)
<i>Discordance angulaire</i>	
Groupe de Banfora	Grès inférieurs (GI)
<i>Discordance majeure</i>	

Tableau 5 : Groupes et formations du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso

La carte présentée ci-après (adaptée de Ouédraogo, 2008) reprend les différentes formations géologiques du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso.



Source : BUMIGEB, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 28 : Carte géologique de la zone sédimentaire ouest du Burkina Faso

Au sein de cette succession de formations sédimentaires, tant le peu de données chronostratigraphiques fiables, que l'absence du repère lithostratigraphique qu'est le niveau glaciaire du Précambrien terminal, du moins sous son faciès caractéristique de tillite associée à des silixites et à de la dolomie à barytine, ne permettent pas de dater précisément les différentes formations. De ce fait, les corrélations avec les autres régions du bassin de Taoudéni restent hypothétiques et discutées (Zimmermann, 1960 ; Deynoux, 1983 ; Trompette, 1973 ; Ouedraogo, 1983). Ces comparaisons font du groupe supérieur de Bandiagara un équivalent des formations glaciaires de la base du supergroupe II de l'échelle stratigraphique classique du

bassin de Taoudéni établie par Trompette (1973). Les travaux les plus récents au Mali sud-oriental et au Burkina Faso occidental semblent confirmer l'idée que les dépôts glaciaires du Précambrien terminal (Néoprotérozoïque supérieur) sont représentés par les grès fluviatiles de la Formation de Fo – Bandiagara qui renferment des galets à facettes type dreikanTERS (Ouédraogo, 1983). Suivant cette hypothèse, la sédimentation du groupe de Bandiagara débute donc autour de 650-600 Ma, tandis que l'ensemble des groupes de Banfora, de la falaise et de Bobo occuperaient une tranche d'âge comprise entre 1000 Ma et 650 Ma. Ceci couvre les périodes du Néoprotérozoïque inférieur et moyen.

À part la falaise de Banfora, qui forme un affleurement rocheux continu, la plus grande partie du secteur d'étude est largement recouverte par d'épaisses formations latéritiques. Les affleurements apparaissent sporadiquement dans les zones découvertes et le long de certains cours d'eau (source : Sogreah Ingénierie, 1994).

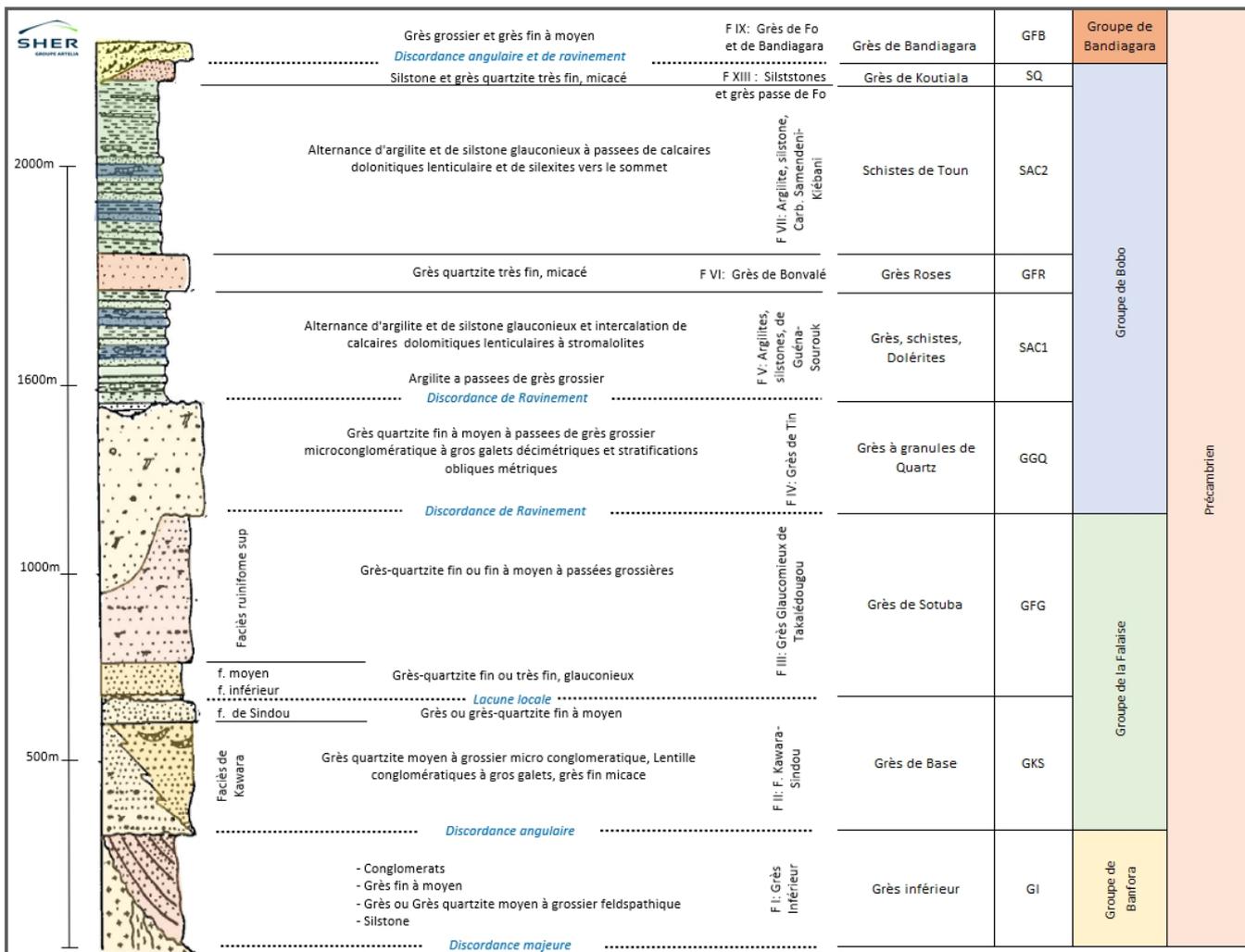


Figure 29 : Log stratigraphique du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso (ARTELIA-SHER, adapté de Ouédraogo 2008)

F.5.1.3.1.1. Groupe de Banfora

Formation des Grès Inférieurs (GI)

Situé à la base de la série stratigraphique en discordance sur le socle Paléoprotérozoïque, comporte une seule formation détritique fine : **Grès inférieurs (GI)**, d'extension limitée et qui correspond à une

sédimentation marine. Elle est localisée dans une zone de dépression du socle. Elle constitue le témoin d'une sédimentation marine antérieure, qui a été plissée et érodée avant le dépôt du groupe supérieur.

Cette formation est d'extension limitée et forme un biseau au pied de la falaise gréseuse tabulaire en bordure du socle. Dans la région de Banfora, elle forme une étroite bande qui s'avance en forme de langue sur une trentaine de kilomètres à l'intérieur du socle cristallin où elle dessine une structure synclinal faillée. Une réinterprétation du log de forage de Darsalamy pourrait indiquer leur existence probable jusque dans la région de Bobo-Dioulasso.

Au niveau de la falaise, la formation est constituée par des argilites et des siltites verts ou rouges alternant avec des grès et grès-quartzite fin à moyen à passées de grès feldspathiques grossiers microconglomératiques, à petites stratifications obliques (forage de Gnawaré du programme RESO, 1995). La caractéristique essentielle de cette formation en forage est sa couleur fortement marquée, à dominante rouge, ainsi que la présence de nombreuses zones fracturées ou fissurées.

Dans la « langue de Banfora », affleure la succession lithologique la plus complète. Elle débiterait par des microbrèches silicifiées à éléments de quartzite, de roche siliceuse et quartz hyalin, surmontées par des siltites et grès-quartzite fins, bruns à rosés, feldspathiques et glauconieux. On passerait ensuite à des grès grossiers rouges surmontés par un grès moyen, kaolinique blanc rosé à stratifications obliques tabulaires décimétriques et rares ripple-marks. La succession se termine par un niveau conglomératique à galets et gros blocs de grès et de quartz arrondis ou polyédriques émoussés.

L'épaisseur totale serait inférieure à 50 m dans la falaise mais atteindrait 300 m dans la langue de Banfora. Elle est limitée par deux discordances :

- Une discordance majeure sur le socle sous-jacent,
- Une discordance de ravinement qui se manifeste essentiellement par une différence de pendage d'environ 8° des grès de Kawara-Sindou.

La formation des Grès Inférieurs représente une formation résiduelle des assises basales du bassin de Taoudéni, préservée dans une paléo-dépression du socle. Elle est un témoin résiduel d'une sédimentation marine peu profonde. En effet, elle correspond à la première phase transgressive de la série sédimentaire. Elle a été légèrement basculée et plissée en gouttière synclinal par un événement tectonique antérieur au dépôt de la formation sus-jacente.

F.5.1.3.1.2. Groupe de la Falaise

Il est discordant sur le groupe de Banfora et sur le socle. Il comporte deux formations essentiellement gréseuses de granulométrie très variable, très grossière, conglomératique à très fine, d'une puissance maximale l'ordre de 800 m. Il s'agit dans l'ensemble d'une sédimentation marine peu profonde de type épicontinental (ripple-marks symétriques, glauconie, etc.), avec des épisodes fluviatiles plus ou moins marqués qui rappellent les épandages de type deltaïque. Cette interprétation mériterait une étude sédimentologique plus détaillée. Les figures de dessiccation et les galets éoliens sont l'indice d'un climat sans doute aride, chaud ou froid.

Ce groupe est composé des Grès de Kawara-Sindou (GKS) et des Grès fins glauconieux (GFG).

Formation des Grès de Kawara-Sindou (GKS)

La formation des Grès de Kawara-Sindou, anciennement appelée également « Grès de base », constitue la première assise presque continue de la bordure sud du bassin de Taoudéni bien qu'elle disparaisse vers le Nord-Est, dans la région de Dédougou (RESO, 1999). Dans la région de Banfora, elle repose en discordance sur les Grès Inférieurs ; partout ailleurs, elle repose directement sur le socle.

Les grès de Kawara-Sindou forment l'essentiel de la falaise gréseuse en bordure du socle, seulement bien marqués au Sud-Est depuis la frontière avec le Mali jusqu'à Bobo Dioulasso. À l'Ouest de Douna, leurs affleurements s'élargissent notablement et débordent sur la plaine : ils forment même deux « langues » de terrains sédimentaires s'avancant de quelques kilomètres dans le socle à Kangoura et Baguéra, à l'instar des grès inférieurs autour de Banfora. Plus au Nord, à l'Est de Dédougou, elle apparaît à nouveau en affleurement de faible extension à proximité du village de Fiè (Ouédraogo, 2002).

Cette formation est très épaisse dans la région occidentale de Négouéni-Kawara (350 m environ), elle s'amincit par la base vers l'Est dans la région de Toussiana (au moins 60 m), puis elle disparaît au Nord-Est de Béréba (cf forages BER-339, 340, et 341) où on signale une lacune locale de la formation GKS. La formation des GKS est très fracturée suivant deux directions prédominantes : SSE-NNO et SO-NE (Tirogo, 2017).

Sur l'ensemble, le terrain le plus représenté est un grès fin à moyen (RESO, 1999), de couleur blanchâtre à rose sauf dans les « langues » de Kangoura et de Baguéra où il devient nettement plus coloré (marron et noir). En revanche, la formation se subdivise en deux lithofaciès :

- La partie inférieure ou lithofaciès de Kawara, très épaisse à l'Ouest (300 m à Négouéni), présente une granulométrie variable. À l'Ouest ce sont des grès grossiers conglomératiques qui s'affinent vers le sommet. Cette unité comporte de nombreuses stratifications obliques tabulaires et ripple-marks rectilignes généralement dissymétriques, présentant parfois des bifurcations en forme de « diapason » et quelques structures de type « herring bones » et « quick-sand ». Vers l'Est, on passe à des grès fins de plus en plus grossiers au sommet avec des passées conglomératiques lenticulaires à gros galets décimétriques. Cette unité comporte également des stratifications obliques tabulaires et quelques ripple-marks. Vers l'Est, l'unité de Kawara s'amincit rapidement (200 m à Kawara, 56 m à Takalédougou, 5 m à Toussiana). La succession lithologique la plus complète s'observe à Kawara où se superposent deux séquences. La première séquence, granodécroissante, comprend un mince horizon basal de conglomérat, puis un grès micacé fin à moyen rougeâtre, passant à un grès fin rouge violacé, micacé, surmonté par un grès fin rougeâtre ou brun-noir. Cette séquence montre des litages horizontaux ou des stratifications obliques tabulaires et quelques « ripple marks ». La seconde séquence, granocroissante, est constituée de grès moyens à grossiers, rouge violacé, qui renferment vers le sommet d'épaisses lentilles conglomératiques à gros galets et blocs de quartz et de grès. Ces faciès grossiers et conglomératiques sont plus ou moins massifs. À Takalédougou, puis plus à l'Est encore, seule la partie supérieure grossière et conglomératique de la coupe de Kawara semble subsister, avec amincissement puis disparition des lentilles de conglomérat.
- La partie supérieure ou lithofaciès de Sindou repose en concordance sur le faciès de Kawara. Il est pratiquement constant en épaisseur (50 à 60 m) et il est affecté par une intense diaclasation qui lui donne, à l'érosion, un aspect ruiniforme ou en aiguille caractéristique dans la région de Sindou. Il est constitué de grès-quartzite fins à moyens gris avec à la partie inférieure de rares passées à gros galets décimétriques de grès-quartzite et des ripple-marks et stratifications obliques tabulaires à feuillets plans alternant avec un litage horizontal. La partie supérieure est franchement grossière et comporte de nombreuses stratifications obliques en gouttières à feuillets soulignés par des galets millimétriques à centimétriques de quartz et disposés en « graded-bedding ».

Postérieurement aux dépôts de la formation **GI** intervient une nouvelle transgression généralisée. Les niveaux de base de la formation **GKS** marquent en effet l'installation d'un milieu de plate-forme marin peu profond, avec d'abord des dépôts de plage (ripple-marks en diapason, etc.) auxquels succèdent des dépôts de milieu intertidal à subtidal (structure de type « herring bones », « quick-sand », etc.).

Vers le sommet, les horizons conglomératiques marquent la progradation de dépôts deltaïques. Le sommet du lithofaciès de Sindou présente un caractère franchement fluvial.

Formation des Grès Fins Glauconieux de Takalédougou (GFG)

La formation des Grès Fins Glauconieux de Takalédougou affleure largement, de façon continue, sur la bordure sud-orientale du bassin de Taoudéni et correspond au « grès de Sotuba » des anciens auteurs. Cette formation constitue le sommet de la falaise. Au Sud-Ouest, elle repose en concordance sur la formation GKS sous-jacente ; vers le Nord-Est, elle recouvre directement le socle cristallin, donc une lacune locale de la formation GKS, avant d'être masquée par le Continental terminal de la plaine du Gondo. Elle affleure en une mince bande située sur le rebord de la falaise (Toussiana) ou en retrait (Darsalamy).

La formation **GFG** peut être subdivisée en trois unités superposées (Ouédraogo, 1983). On remarque un épaississement de cette formation d'Est en Ouest comme avec les grès de Kawara-Sindou.

L'unité inférieure, épaisse d'environ 20 m, débute par des grès-quartzite fin ou très fin, silteux, souvent glauconieux, gris, à débit schisteux et figures de dessiccation alternant avec des grès-quartzite grossiers microconglomératiques souvent glauconieux, gris, à débit en plaquette.

Au-dessus, vient l'unité médiane épaisse d'environ 80m (cf forages de Darsalamy du programme RESO et BOB-549). Elle est composée d'un niveau d'argilite verdâtre à débit schisteux, des grès-quartzite fins à très fins et siltites généralement glauconieux et micacés, bien lités à très rares stratifications obliques tabulaires et figures de dessiccation polygonale. Vers le Nord-Est dans la région de Dédougou, passé la ligne Kona-Sanaba, le faciès argileux se développe au détriment du faciès gréseux et se charge en carbonates (Ouédraogo, 2002).

La partie supérieure, qui peut atteindre une épaisseur de 400m, présente un aspect ruiniforme remarquable et est souvent largement ravinée par la formation supérieure. Elle est constituée de grès-quartzite fin ou fin à moyen, à passées de grès grossiers gris, à nombreuses stratifications obliques tabulaires et plus rarement des structures en arête de poisson. Ces dépôts sont généralement bien stratifiés et présentent de nombreuses rides de vague ou de courant, de petites gouttières d'érosion et des flute casts. Vers le Nord-Est, dans la région de Dédougou, les passées grossières sont également glauconieuses.

On assiste à une nouvelle transgression marine avec, au début de la sédimentation, des périodes d'émersion. Puis s'installent des conditions marines franches de plateforme relativement profonde sans influence continentale, avec des régimes de courant assez faibles. La partie supérieure correspond à un environnement de moins en moins profond dominé pour l'essentiel par l'action des vagues.

F.5.1.3.1.3. Groupe de Bobo

Il est discordant sur le groupe de la Falaise. Il est constitué de 5 formations dont 4, fines et tendres, épaisses d'environ 1400 m, atteignant probablement 2000 mètres au nord de Bobo-Dioulasso. Ces formations sont responsables du relief pénéplané d'une grande partie de la région. Il débute par une sédimentation grossière fluviatile suivi par une sédimentation marine peu profonde (glauconie, stromatolites) à tendance sursalée (trémies de sels signalés par Trompette, 1977) de type « tidal flat » avec des périodes d'émersion (fentes de dessiccation, niveaux brêchiques dans les passées carbonatées), sous un climat sans doute chaud (stromatolite) et aride (fente de dessiccation).

Formation des Grès à Granules de Quartz (GGQ)

Cette formation, appelée anciennement « Formation de Tin » ou encore « grès à yeux de quartz », qui débute le groupe de Bobo ravine assez nettement les formations sous-jacentes. Elle affleure assez largement à l'Ouest, dans la région de Tin ; vers le Nord-Est, dans la région de Dédougou, elle se réduit en de minces lentilles discontinues. Elle forme une bande grossièrement parallèle à la falaise de Banfora.

Elle est formée de grès fluviaux caractéristiques. À l'affleurement, ils ne montrent qu'un seul faciès relativement homogène de grès fin à grossier localement chargé de graviers de quartz. La base de la formation est assez peu connue. Dans le détail ; l'essentiel de la formation est constitué de grès-quartzite feldspathique fin ou fin à moyen à passées de grès grossiers micro-conglomératiques. Localement on observe des intercalations de grès très fin bien classé, finement lité et micacé dans les lits et de rares argilites rougeâtres bien litées (cf. forages PZ7, PZ8 et PZ14 du programme RESO). Ils contiennent de petits galets millimétriques de quartz roulés et de rares galets décimétriques oblongs de grès-quartzite. Ces grès sont grossièrement stratifiés en bancs décimétriques à métriques où on rencontre des ripple-marks et plus généralement des stratifications obliques tabulaires décimétriques à métriques à feuillet plans et des gouttières de tailles métriques. Les feuillet des stratifications sont souvent soulignés par les granules de quartz.

Cette formation correspond à des dépôts fluviaux en tresses dans lesquels se ferait sentir une certaine influence éolienne.

Formation des Siltites, Argilites et Carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1)

Cette formation affleure mal. Elle est concordante sur la formation GGQ sous-jacente sauf au Nord de Dédougou, où elle repose directement sur la formation Gfg. Elle constitue un équivalent des « grès schisto-dolomitiques » ou « schisto-gréso-dolomitique » des anciens auteurs.

La formation SAC1 débute par une dizaine de mètres de grès grossiers brun-roux, glauconieux, contenant de minces intercalations de grès très fin, silteux, rose, bien lité et micacé et d'argilite verdâtre. Vient ensuite une alternance de grès-quartzite fin feldspathique et glauconieux, gris cendre à rosé, de siltite roux à débit en plaquettes et d'argilite verdâtre, micacée, à débit schisteux. Cette alternance argilite – siltite semble constituer l'essentiel de la formation avec par endroits de gros bancs de dolomie et calcaire dolomitique à stromatolites. Vers le Nord-Est, dans la région de Dédougou, passé la ligne Kona – Sanaba, la base grossière semble disparaître au profit des siltites, argilites et niveaux carbonatés.

Les horizons carbonatés ont jusque-là été considérés comme des niveaux lenticulaires. Les forages d'hydraulique exécutés dans le cadre de divers projets d'hydraulique villageoise (Programme RESO, « 500 forages BAD », etc.) ont recoupé à plusieurs endroits des niveaux carbonatés mais leur continuité latérale n'a pu être vraiment bien établie. Par contre, ces forages permettent de mettre en évidence au moins quatre niveaux stratigraphiques d'horizons carbonatés.

Ces roches carbonatées présentent deux faciès : les roches carbonatées granulaires (à oncolithes, endoclastes, rares oolithes, ...), les roches carbonatées homogènes qui comportent des stromatolites, de rares éléments détritiques terrigènes, des passées brêchiques et des passées comportant des fentes de dessiccation en coin.

Le passage de sédiments fluviaux à des sédiments marins francs semble se faire progressivement et correspond à une nouvelle transgression marine. Les structures sédimentaires et organiques indiquent un milieu de sédimentation marin peu profond, subtidal à intertidal, avec des eaux chaudes de salinité variable, faiblement agitées et de faibles apports détritiques.

Formation des Grès Fins Roses (GFR)

Cette formation, appelée anciennement « Grès de Bonvalé », est nettement visible sur les photographies aériennes et on peut la suivre depuis l'Ouest dans la région de Samorogouan, jusque vers le Nord-Est dans la région de Nouna. Sur le terrain, elle affleure bien dans les régions de Samorogouan, Bonvalé et Daboura-Sanaba. Elle est concordante sur la formation sous-jacente.

Épaisse d'une centaine de mètres, la formation **GFR** est constituée essentiellement de grès-quartzites fins à très fins, micacés et glauconieux, finement lités, à nombreux ripple-marks symétriques à crêtes ondulées ou linguloïdes. On observe localement des pastilles argileuses ainsi que des figures de charge (load cast).

Cette formation représente une période de sédimentation marine peu profonde entièrement détritique terrigène.

Formation des Siltites, Argilites et Carbonates de Samandéni-Kiébanani (SAC2)

Cette formation, appelée anciennement « Schistes de Toun », correspond à une vaste zone pénéplanée recouverte d'alluvions argileuses et de latérites. Les rares affleurements apparaissent dans la région de Samandéni, aux flancs de petites collines isolées, protégés de l'érosion par un recouvrement latéritique ou doléritique. Elle repose en concordance sur la formation GFR sous-jacente.

Sa partie inférieure est constituée par une alternance d'argilite silteuse et de siltite glauconieux qui contient des bancs de calcaire dolomitique à stromatolites. Le reste de la formation semble correspondre à des argilites vertes, bien litées, micacées, à débit schisteux et contenant des niveaux de calcaire dolomitique, de calcaire granulaire souvent complètement silicifié, de silexite ainsi que de rares bancs de grès très fin, silteux.

Une caractéristique de cette formation réside également dans l'intensité de l'altération des faciès carbonatés :

- La silicification est quasi permanente et souvent, la roche complètement silicifiée ne laisse entrevoir que la structure originelle granulaire ou laminée (stromatolitique).
- On observe également une importante micro-karstification par dissolution sélective ou par départ des granules carbonatées. Dissolution intense et silicification donnent à la roche un aspect spongieux.
- De fréquentes altérations talqueuses s'observent également dans les faciès carbonatés.

On assiste à nouveau à une sédimentation marine franche en milieu peu agité avec de faibles apports détritiques

Formation des Siltites et Grès-quartzite de la passe de Fo (SQ)

Cette formation affleure bien au pied de la falaise de Fo et semble reposer en concordance sur la formation précédente. Son sommet est raviné par la série sus-jacente ; elle constituerait donc la formation terminale du groupe de Bobo. Cette hypothèse est discutée par Bertrand- Sarfati et al. (1987) qui, à la suite de Bassot et al. (1981), placent une discordance majeure à la base des « grès de Koutiala », équivalent des « Siltites et Grès-quartzite de la passe de Fo ». Pour ces auteurs, cette formation **SQ** débiterait plutôt le groupe supérieur.

Elle est constituée de siltites roses à rouge, à minces passées argileuses très micacés, à stratifications obliques tabulaires, passant vers le sommet à des grès-quartzite très fins rose, à pastilles argileuses verdâtres, micacées, à stratifications obliques tabulaires à feuillets plans ou déformés.

On semble passer, avec cette formation, à un milieu marin encore moins profond à sédimentation détritique terrigène et des périodes de dépôts de type « mud flat » qui marquent une tendance à l'émersion

F.5.1.3.1.4. Groupe de Bandiagara

Formation des Grès de Fo-Bandiagara (GFB)

Il n'est représenté, au Burkina Faso, que par une seule formation discordante sur la partie supérieure du groupe de Bobo « la Formation des Grès de Fo-Bandiagara (**GFB**) ».

C'est une formation grossière, constituée par une alternance de bancs plus ou moins épais de grès grossiers à passées conglomératiques et de grès-quartzites fins à moyens. Les niveaux grossiers contiennent de nombreux galets centimétriques de quartz et grès-quartzite, parfois à facettes de type « dreikanter ». Cette formation comporte de nombreuses stratifications obliques tabulaires ou en gouttières à feuillet généralement courbes quelquefois contournés, soulignés par des galets.

La mer se retire à nouveau pour laisser place à une période d'érosion à laquelle succèdent des dépôts fluviaux en tresses, sous un climat probablement aride (galets éoliens) chaud ou froid, de courant assez fort dirigé globalement du Sud vers le Nord.

F.5.1.3.2. Le Continental Terminal (CT)

La dépression, peu marquée, de la plaine du Gondo s'allonge sur plus de 300 km dans une direction SW-NE au pied de la falaise de Bandiagara, sur la frontière entre le Mali et le Burkina. Elle est remplie de formations fluvio-lacustres qui reposent en discordance sur la couverture sédimentaire Néoprotérozoïque. Elles sont réduites aux extrémités Nord-Ouest et Est. Dans l'extrémité Est, ces formations reposent directement sur le socle Birimien.

Les sédiments sont argilo-gréseux, plus ou moins bariolés, rouges violacés à ocres, souvent rubéfiés, à niveaux silicifiés ou latéritisés attribués au Continental Terminal (CT). Au Nord de Djibo, au Burkina Faso, le sondage de reconnaissance exécuté par le projet SYSMIN recoupe plus de 30m d'argiles sableuses friables, brun-jaunâtre ou ocre, plus ou moins rubéfiés et des argiles rouge violacé, friables (Donzeau M. et al.2003). Les puissances, au Burkina Faso, ne dépassent pas 10 à 35 m, tandis qu'au Mali ces sédiments pourraient atteindre 100m dans l'axe de la dépression.

Defosse (1962) considère ces formations comme un complexe fluvio-lacustre de piedmont dû au démantèlement d'anciens reliefs et d'anciennes formations latéritiques. Elles sont attribuées à l'Éocène supérieur – Oligocène.

F.5.1.3.3. Le Quaternaire

Les formations superficielles du quaternaire sont représentées essentiellement par les latérites et les alluvions argileuses provenant de la décomposition du substratum gréseux (Dakoure, 2003 ; Tirogo, 2017) :

- Le recouvrement latéritique est très important dans la région. Il se présente sous forme de plateau à surface indurée, horizontale ou pentue, ou sous forme de collines à morphologie douce. Le recouvrement latéritique est un caractère dominant des paysages pénéplaines ou tabulaires qui caractérisent la plus grande partie du secteur d'étude. Ces latérites, qu'on observe partout, se présentent sous forme de plateaux étendus, buttes témoins, cuirasses indurées. L'épaisseur de ces latérites varie selon la nature des formations sur lesquelles elles reposent (socle ou formations sédimentaires). Ces formations sont très diverses. Les auteurs y distinguent plusieurs phases d'induration qui jalonnent l'histoire géologique très récente depuis l'éocène jusqu'à l'époque actuelle.
- Les formations d'altération ou de recouvrement sont des formations de décomposition du substratum gréseux. Elles sont constituées de sables plus ou moins argileux, à argiles plus ou moins sableuses avec une épaisseur pouvant atteindre 40 m dans certains endroits (Sogreah Ingénierie, 1994).
- Les alluvions argileuses récentes et actuelles se rencontrent le long des principaux cours d'eau. Selon Sauret (2016), leur étendue le long de la rivière du Kou est inférieure à 750 m de large en amont vers Dindéresso et environ 1000 m de large en aval vers Bama, avec une épaisseur allant de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Cette extension reste intrinsèquement liée aux crues et décrues subies par la rivière Kou lors d'épisodes pluvieux intenses survenus dans le bassin (averses, orages...) au fil du

temps.

F.5.1.3.4. Les dolérites

Elles affleurent abondamment au sud bassin de l'ouest de Burkina Faso et se présentent sous forme de sills grossièrement concordants, de dykes (filons) et de necks (Sogreah Ingénierie, 1994 ; Gombert, 1998). Ces dykes et sills n'affleurent que très rarement et se retrouvent à différents niveaux de profondeur sous les sédiments.

Le faciès courant est une roche sombre à cassure esquilleuse qui se débite en boules. La structure doléritique est nette sur certains affleurements. Sur d'autres, cependant, on observe une différenciation plus grenue, gabbroïque.

De nombreux dykes à minéraux magnétiques dont certains sont de très grande extension à l'échelle du bassin sédimentaire (jusqu'à 500 km) ont été mis en évidence. Les orientations sont variées, principalement N105, N45, N130 et plus rarement N60. Deux filons caractéristiques, grossièrement parallèles et de direction N45 environ, prennent naissance au nord de Bobo-Dioulasso et s'étirent presque en continu jusque dans la région de Gassan à environ 50 km au nord de Dédougou (Ouédraogo, 2006). De nombreux sills ont été également mis en évidence à la faveur d'un levé aéroporté réalisé par le BRGM en 2003 dans le cadre du projet SYSMIN (Projet 7 ACP BK074) Ces sills sont particulièrement bien développés dans une bande N-S passant à l'ouest de Bobo-Dioulasso.

Dans la zone de Bama, au nord de Nasso, on voit les dolérites allongées sur plusieurs kilomètres dans la direction de Banakélédaga. À la faveur de cette roche cristalline ferrugineuse, une épaisse cuirasse latéritique ferrugineuse s'est développée.

À l'Ouest de Banfora, un échantillon de dolérite recoupant à la fois le socle et les grès du GKS, aurait donné un âge de 250 +/- 13 Ma, par la méthode K/A sur roche totale. D'autres résultats comparables auraient été obtenus au Mali. Ainsi, toutes ces manifestations magmatiques devraient être rattachées au Permien et plus jeune probablement (Kutangila, 2019).

F.5.1.3.5. Superficies à l'affleurement

Le tableau ci-après reprend les superficies « à l'affleurement » des formations géologiques décrites plus haut.

Formation	Superficie (km ²)	% sédimentaire ouest
Formation de Samandéni - Kiébani [SAC2]	7 447	17.6
Formation de Guéna - Souroukoudinga [SAC1]	6 887	16.3
Formation de Takalédougou [GFG]	6 270	14.8
Continental Terminal [CT]	6 092	14.4
Formation de Tin [GGQ]	5 280	12.5
Formation de Bonvalé [GFR]	4 190	9.9
Groupe de Bandiagara [GFB]	3 078	7.3
Formation de Koutiala [SQ]	1 172	2.8
Formation de Kawara - Sindou [GKS]	1042	2.5
Grès inférieurs [GI]	178	0.4

Tableau 6 : superficies « à l'affleurement » des formations du sédimentaire de l'ouest

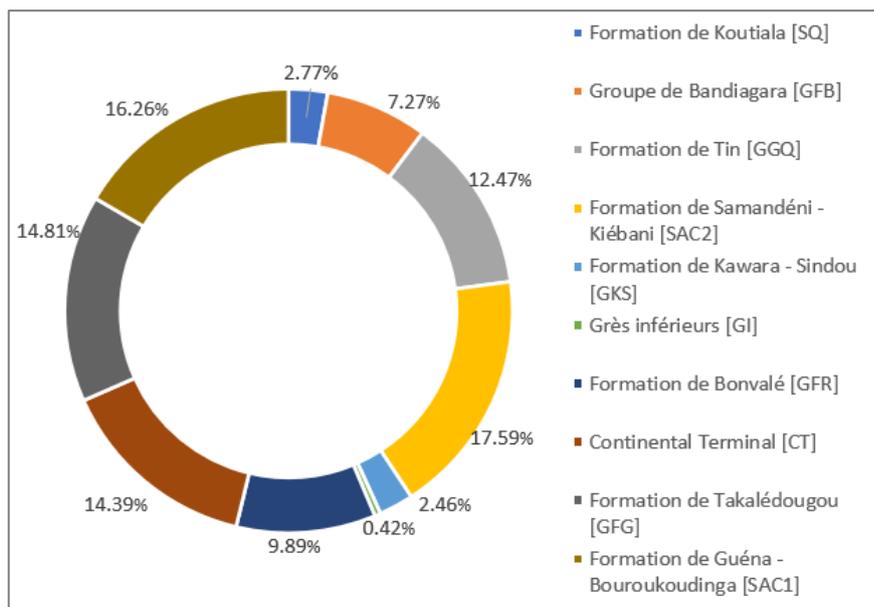


Figure 30 : Pourcentages de superficies « à l'affleurement » des formations du sédimentaire de l'ouest

Les formations présentant les superficies les plus importantes sont le SAC2 (17.6%), le SAC1 (16.3%), le GFG (14.8%), le CT (14.4%) et le GGQ (12.5%).

Il est à noter que les alluvions du Quaternaire recouvrent partiellement ces formations, essentiellement dans la plaine alluviale du Mouhoun, sur une superficie d'environ 2.300 km².

On notera également que les filons doléritiques affleurent dans le bassin sur une superficie cumulée d'environ 450 km² (sur base de la cartographie au 1:500.000, Ouédraogo 2008).

F.5.1.4. Tectonique générale et géodynamisme de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni

F.5.1.4.1. Structures majeures du bassin définies à partir des anomalies gravimétriques

La répartition des masses rocheuses ainsi que la fracturation dans le socle ont dû influencer la sédimentation sur la bordure du bassin de Taoudeni. Les formations gréseuses grossières qui constituent le plateau de Bandiagara à l'Ouest du secteur, forment une bande étroite qui s'allonge depuis Fo au Burkina jusqu'à Douentza au Mali, dans une direction SSW-NNE conforme aux directions birimiennes. Au Nord de Fo, ces formations s'épaississent considérablement, passant de 50 m environ dans la région de Fo à plus de 1000 m au Mali sud-oriental (Keita, 1981). Suivant l'axe de ce plateau apparaissent des anomalies gravimétriques positives (voir figure ci-après).

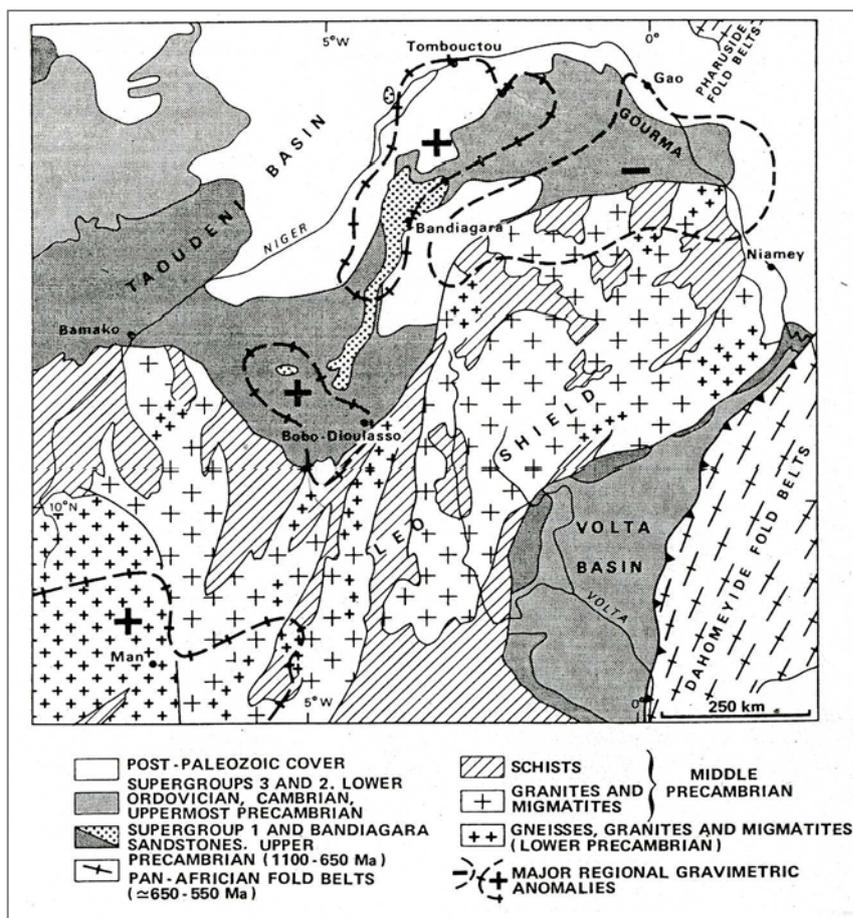


Figure 31 : Anomalies gravimétriques dans la bordure SE du bassin de Taoudéni (in Bronner et al., 1980)

Ces anomalies gravimétriques pourraient matérialiser une zone à intrusions basiques ou ultrabasiques (Bayer et Lesquer, 1978) qui auraient contrôlé une subsidence accusée. Pour d'autres auteurs (Moussine-Pouchkine et Sarfati, 1978 ; Lesquer et Moussine-Pouchkine, 1980), cet axe correspondrait à un couloir d'effondrement, branche méridionale de l'aulacogène du Gourma.

Le levé géophysique aéroporté exécuté dans le cadre du projet SYSMIN 7 ACP BK074 a mis en évidence, au Nord-Ouest de Dédougou, une zone d'approfondissement brutale du socle passant de 2000m de profondeur à 4500m sous les sédiments.

Pour étudier cette structure, des coupes sériees ont été réalisées du Nord vers le Sud (cf toutes les coupes in VREO, 2008) qui montrent que cet approfondissement est lié à la présence de deux failles majeures orientées N30° à N40° quasi-parallèles à la direction des couches. Ces failles qui ont joué en « escalier » représenteraient la limite Est d'un graben, branche méridionale de l'aulacogène du Gourma.

Cette structure s'atténuerait rapidement vers le Sud dans la région de Bobo-Dioulasso où elle se terminerait comme une sorte de gouttière dont la limite Ouest serait contrôlée par un accident majeur NS, la faille de Banfora. Cette faille subméridienne borde la pointe du plateau de Fo-Bandiagara et se prolonge vers le Sud, dans la région de Banfora où elle limite l'extension vers l'Ouest des dépôts sédimentaires.

À l'Ouest de cet accident le socle est moins profond ; et c'est également dans cette zone que l'on observe le plus d'occurrences doléritiques. Le projet SYSMIN y a mis en évidence des sills de grandes ampleurs à différents niveaux de la série sédimentaire dont la mise en place serait liée à l'ouverture de l'Atlantique Sud au Jurassique inférieur (Castaing et al., 2003).

Dans l'Adrar mauritanien, bordure Nord-Ouest du bassin de Taoudéni, le graben de Tagant- Richat présente des caractéristiques comparables avec une épaisseur de sédiments pouvant dépasser 5000m (Bronner et al., 1980).

Au Sud, dans la région de Banfora, le panneau de terrains sédimentaires qui constituent la formation des Grès inférieurs est plissé par un événement épirogénique suivi d'une période d'émersion antérieure au dépôt de la formation de Kawara-Sindou.

Les formations gréseuses du groupe de la falaise sont intensément diaclasées. Cette diaclasation qui s'amplifie vers l'Ouest est moins visible dans le groupe de Bobo plus argileux. Elle affecte également la formation de Fo-Bandiagara. Cette diaclasation est en relation avec un réseau de grandes fractures qui affectent l'ensemble des formations (Ouedraogo, 1983).

Dans la région de Banfora, d'autres failles de moindre importance sont mises en évidence. Elles sont orientées NW-SE et découpent le secteur en compartiments grossièrement parallèles, affaissés ou relevés les uns par rapport aux autres en touche de piano (Ouedraogo, 1992).

En résumé, les formations sédimentaires de la bordure du bassin de Taoudéni au Burkina Faso sont essentiellement affectées par deux événements majeurs :

- L'orogénèse panafricaine autour de 600 Ma qui plisse les terrains à l'extrême Nord du Burkina et réactive les principaux accidents du socle ;
- Et l'ouverture de l'atlantique au Jurassique inférieur, période au cours de laquelle les intrusions doléritiques, qui ont débuté au Paléoproterozoïque Terminal (1810 Ma) - Mésoproterozoïque, culminent en intensité dans toute l'Afrique de l'Ouest.

F.5.1.4.2. Principaux mouvements tectoniques à l'échelle régionale

De nombreuses manifestations tectoniques ont intéressé les terrains d'Afrique de l'Ouest. Cependant, la plupart d'entre elles datent d'avant la période de dépôt de la série sédimentaire qui a débuté vers 1300 - 1000 Ma (cfr tableau ci-après). Néanmoins, de nombreux indices plaident pour l'existence d'une tectonique synsédimentaire ou postsédimentaire : existence de zones faillées, basculement de couches, intrusions doléritiques, repérage de passages fracturés en forages, photolinéaments, escarpements récents, ...

Orogénèse	Datation	Principales manifestations
Libérienne	2 700 - 2 600 Ma 2 400 - 2 300 Ma 2 170 Ma	Plissement Et Métamorphisme Morcellement Tectonique Intrusions Magmatiques
Eburnéenne	2 100 - 1 950 Ma 1 800 - 1 750 Ma	Plissement Et Métamorphisme Intrusions Post-Tectoniques
Panafricaine	550 ± 100 Ma	Plissement Et Métamorphisme
Hercynienne	250 Ma	Intrusions Doléritiques

Tableau 7 : Principales manifestations tectoniques au Burkina Faso

L'orogénèse panafricaine serait la première susceptible d'avoir affecté la série sédimentaire. En fait, elle a essentiellement touché l'extrême nord et l'extrême sud-est du pays où elle a provoqué des plissements ou du métamorphisme. La zone couverte par le programme RESO a manifestement été épargnée, bien la possibilité de réactivation de structures tectoniques antérieures au niveau du socle ne soit pas totalement exclue : ces rejeux auraient alors pu affecter la série sédimentaire.

On trouve également de nombreuses intrusions doléritiques qui recoupent le socle ou la série sédimentaire. Hottin & Ouedraogo (1975) indiquent que les dykes de direction NNE à N-S se rencontrent surtout aux deux extrémités du pays et notamment, dans le Sud-Ouest, en bordure du sillon birrimien de Banfora et à l'ouest de Bobo-Dioulasso. A Wolonkoto, à l'ouest de Banfora, un échantillon de dolérite intrusive à la fois dans le

socle et dans les grès de Kawara-Sindou a été daté de 250 ± 13 Ma: elle est ainsi contemporaine des dykes datés de 260-275 Ma dans le Gourma, au Mali. Pour ces auteurs, « les dolérites tholéitiques, intrusives au Permien dans les sédiments du Précambrien A du Sud-Ouest, soulignent un épisode généralisé dans le bassin de Taoudéni, contemporain des derniers mouvements hercyniens ».

On notera qu'en Afrique de l'Ouest, les dolérites ont pu se mettre en place jusqu'au Jurassique, ce qui fait dire aux précédents auteurs que « la possibilité d'existence, en Haute-Volta, de venues doléritiques d'âge différent des émissions datées du Permien doit donc être envisagée ». En clair, cela n'exclut pas que des mouvements tectoniques aient pu se produire dans la région au cours de l'ère Secondaire.

Par ailleurs, Petit (1994) mentionne l'existence d'une phase tectonique à l'Eocène. Elle aurait notamment relevé le socle par rapport aux terrains sédimentaires par l'intermédiaire d'un « escalier de failles » que les descriptions ne permettent malheureusement pas de localiser précisément sur le terrain.

Enfin, il est important de signaler que cet auteur mentionne l'existence d'un séisme survenu en 1942 en Côte-d'Ivoire, aux environs de Koloko. La structure tectonique incriminée se trouve dans le socle et son prolongement septentrional vient mourir vers Banfora.

F.5.1.4.3. Principaux mouvements tectoniques à l'échelle du sud-ouest du Burkina Faso

Les arguments en faveur d'une tectonique postsédimentaire, susceptible d'avoir affecté la série sédimentaire, sont nombreux. La carte des photolinéaments tracée par Ouédraogo (1988) permet de visualiser la densité de structures visibles en photographies aériennes, bien que toutes ne soient pas des accidents tectoniques : on verra plus loin que des similitudes dans le groupement en familles directionnelles permettent de supposer que c'est le cas de nombre d'entre elles.

F.5.1.4.3.1. Dans le contact socle-sédimentaire

L'examen de la carte géologique du Burkina Faso au 1/1 000 000 montre le rôle probable des paléostructures du socle dans le guidage de la sédimentation du bassin. Cela est par exemple le cas avec le grand sillon birrimien orienté NNE-SSW qui s'étend de Kampti à Houndé puis Safané : la limite socle-sédimentaire entre Dédougou et Tougan se situe exactement dans le prolongement de la limite orientale de cette paléostructure. On est donc en droit de penser qu'elle a dû rejouer pendant la sédimentation.

F.5.1.4.3.2. Dans la falaise de Banfora

Bien que modeste dans son dénivelé, la falaise de Banfora est l'un des rares reliefs de cette région avec sa célèbre consœur, la falaise de Bandiagara. Ces deux escarpements sont d'ailleurs globalement orientés NE-SW, ce qui correspond à la direction de certaines structures du socle. Comme précédemment, des sillons birrimiens existent dans le prolongement de la falaise: entre Banfora et Bobo-Dioulasso, il s'agit de celui qui court de Ténado à Koungouri.

Petit (1994) interprète la portion de la falaise de Banfora qui est rectiligne sur 60 km comme « un escarpement de ligne de faille inversée qui reproduit un cas classique de bordure de synclise en région tropicale ». Cela résulterait d'une subsidence du centre du bassin sédimentaire qui aurait eu pour effet de soulever sa bordure le long d'une faille inverse: ce type de contact sédimentaire-socle est un « glynt » typique pour les géomorphologues. Ailleurs, au niveau de Darsalamy, cet auteur mentionne également « un contact majeur en escalier de failles » avec 50 à 100 m de rejet: il semble plutôt que le décalage observé entre l'altitude du socle au pied de la falaise (380 m) et à la base du forage de Darsalamy (210 m) corresponde au pendage de la bordure de la série sédimentaire qui atteindrait ici 3°.

Quoiqu'il en soit, en se rendant sur le terrain, on ne peut qu'être frappé par la « fraîcheur » de l'escarpement de la falaise de Banfora dans sa partie sublinéaire entre Takalédougou et Pala. À proximité de l'ancien village de Takalédougou, à l'extrémité orientale du périmètre sucrier de la SOSUCO, la falaise présente en effet un pan subvertical haut d'une centaine de mètres : on imagine mal cette structure avoir été créée il y a plusieurs centaines de millions d'années. Il s'agit manifestement d'une forme tectonique jeune ou fortement rajeunie par des rejeux récents: en témoigne également le modeste talus d'éboulis raccordé au glacis d'érosion. Tout porte à croire en l'existence d'un rajeunissement récent de cette structure avec superposition du talus d'éboulis subactuel au paléoglacis.

Une autre observation concerne l'orientation de la falaise de Banfora à l'Ouest de Bérégadougou : les documents satellitaires montrent nettement que la ligne de front est découpée en secteurs successivement orientés NNE-SSW et NNW-SSE. Ces deux directions sont celles des structures tectoniques qui affectent le socle. Il est difficile de ne pas voir là l'influence d'une tectonique postsédimentaire. Petit (1994) mentionne l'existence d'accidents Est-Ouest entre Kaouara et Négouéni: selon lui, ils résulteraient du rejeu d'« une faille importante et de deux fossés synclinaux » situés dans le socle à Niankorodougou et Baguéra.

Une photointerprétation des linéaments de la bordure de la série sédimentaire a été réalisée à partir des documents satellitaires Landsat au 1/200 000. On observe un secteur de 350 km² situé entre Léguéma et Pala, à l'est de Bobo-Dioulasso. Les 35 photolinéaments repérés fournissent une densité de l'ordre de 0,1 linéament/km² et se répartissent en trois grandes familles directionnelles:

- N 050 ± 20°, orientation de la falaise de Banfora, qui regroupe 37 % des linéaments,
- N 110 ± 20°, parallèle à l'accident de la Guinguette avec une fréquence de 34 %,
- N 160 ± 20°, correspondant à l'accident tectonique majeur de la vallée du Niamé, mais également du Houet et du Yacouba, avec 11 % de fréquence.

F.5.1.4.3.3. Dans la langue de Banfora

Dans son ensemble, la langue de Banfora est une structure grossièrement longiligne, orientée N-S. Elle se trouve dans l'axe d'un sillon birrimien qui fût probablement subsident lors du dépôt des grès inférieurs et qui a certainement guidé la sédimentation.

F.5.1.4.4. Synthèse par formation géologique

En analysant les données existantes, le programme RESO a pu ressortir ces conclusions concernant les manifestations de la tectonique locale et régionales reconnaissables dans les formations du Néoprotérozoïque.

F.5.1.4.4.1. Mouvements synsédimentaires et tectonique locale

Des indices tectoniques, stratigraphiques et sédimentologiques laissent penser qu'une phase tectonique a pu prendre place à la fin de la période de dépôt des grès inférieurs (GI) ou immédiatement après.

Par ailleurs, l'analyse du terrain et des photographies aériennes montrent l'existence de fractures dans les grès de Kawara-Sindou (GKS), depuis l'échelle métrique jusqu'à l'échelle plurikilométrique.

Le faciès supérieur des grès fins glauconieux (GFG), lorsqu'il est présent, montre un aspect ruiniforme caractéristique. À l'instar de ce qui se passe pour le faciès de Sindou, au sommet des grès de Kawara-Sindou, Ouédraogo penche pour l'influence d'une forte diaclasation de ces affleurements. Dans quelques forages, il est en outre signalé l'existence de niveaux fracturés ou fissurés.

Dans les grès à granules de quartz (GGQ), de nombreux arguments plaident en faveur de l'existence de discontinuités tectoniques : cela est notamment sur le trajet du couloir faillé de Banfora ou au niveau des sources de Nasso, au contact avec les siltstones-argilites-carbonates.

Il existe de nombreuses discontinuités tectoniques dans les siltstones-argilites-carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1), notamment sur le trajet du couloir faillé de Banfora ou au niveau des sources de Nasso, au contact avec les grès à granules de quartz.

Quant aux grès fins roses (GFR), la tectonique locale ne se traduit que par la mention de zones fracturées dans certaines coupes de forages.

Au niveau des bancs carbonatés ou silicifiés de la formation des Siltites, Argilites et Carbonates de Samandéni-Kiéban (SAC2), la tectonique locale se traduit par la mention de zones fracturées dans certaines coupes de forages.

Finalement, les manifestations tectoniques à petite échelle ne sont pas mentionnées dans la formation des Siltites et Grès-quartzite de la passe de Fo (SQ) et celle des Grès de Fo-Bandiagara (GFB) compte tenu du faible nombre de forages dans ces formations.

F.5.1.4.4.2. Tectonique régionale

La faille de bordure du couloir de Banfora semble avoir joué un rôle essentiel dans la tectonique locale et régionale : jeu en effondrement ou en décrochement provoquant un affaissement du compartiment oriental. Ce jeu est scellé par le dépôt des grès à granules de quartz mais son tracé, jalonné par de nombreuses venues doléritiques, se poursuit jusqu'à Fo.

Il existe de nombreux accidents tectoniques dans les grès de Kawara-Sindou (Gi) dont le plus important est la faille subméridienne de Banfora. Par ailleurs, des mouvements synsédimentaires ont créé de fortes variations d'épaisseur au sein du faciès de Kawara.

La carte géologique du programme RESO montre de nombreux accidents tectoniques dans les grès fins glauconieux (Gfg). Leur direction oscille du NW au NE et le plus important d'entre eux est la faille subméridienne de Banfora, dont le tracé est jalonné de venues doléritiques.

Les grès à granules de quartz (Ggq) sont plus épais à l'Ouest de la faille de Banfora qui a ainsi dû rejouer pendant leur sédimentation. Cependant, l'accident qui limite sa bordure orientale est scellé par la discordance de cette formation.

On trouve de nombreux linéaments plurikilométriques dans les siltstones-argilites-carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1) qui sont affectés, et localement décalés, par les grands accidents de la bordure occidentale du couloir faillé de Banfora.

Il existe de nombreux accidents d'importance kilométrique visibles en télédétection dans les grès fins roses (Gfr). Cette formation est par ailleurs affectée par les grands accidents de la bordure occidentale du couloir faillé de Banfora.

Il existe de nombreux accidents d'importance kilométrique visibles en télédétection dans les siltstones-argilites-carbonates de Samandéni-Kiéban (SAC2). Cette formation est par ailleurs affectée par les grands accidents de la bordure occidentale du couloir faillé de Banfora.

Il existe de nombreux accidents d'importance kilométrique visibles en télédétection dans la formation des Siltites et Grès-quartzite de la passe de Fo (SQ) et celle des Grès de Fo-Bandiagara (GFB), dont ceux du couloir faillé de Banfora.

En résumé, les formations sont en général très fracturées surtout dans les niveaux gréseux où on rencontre des diaclases et des failles. Les diaclases sont particulièrement visibles sur le bord de la falaise, où la roche affleure. Elles suivent deux directions prédominantes : SSE-NNO et SO-NE. Elles affectent toutes les formations, mais surtout les GKS, ce qui est à l'origine de son aspect ruinforme (aiguilles de Sindou) et les Ggq. Les Gfg et les SAC sont moins diaclasés. Autour de Bobo-Dioulasso, des failles ont été mises en évidence sur le terrain et par les coupes géologiques tracées à partir des données de forage (Sogreah Ingénierie, 1994).

Elles sont à rejet vertical, à orientation SSE-NNO. Leur rejet, difficile à estimer, serait de l'ordre d'une centaine de mètres. Une prospection géophysique a montré que la zone des sources de Nasso Guinguette est recoupée par un réseau de failles et diaclases ouvertes qui serait d'ailleurs à l'origine de ces sources (Talbaoui, 2009).

F.5.1. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

Les données collectées relatives à la géologie du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso on fait l'objet d'une capitalisation au sein de la base de données BD-MOD, en vue de l'élaboration du modèle géologique 3D.

Les principales données capitalisées sont reprises ci-après :

- Couche SIG (polygones) des formations géologiques du sédimentaire de l'ouest (1:500.000, adaptées de Ouédraogo 2008)
- Couche SIG (lignes) des éléments structuraux linéaires (BUMIGEB 2003 et 2018)
- Couche SIG (polygones) des principales unités géologiques de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (Mali-Burkina Faso)
- Logs stratigraphiques de forages de la zone du sédimentaire de l'ouest (MEEA DEIE, DREEAs, ERES SOGREA, RESO, VREO, PESO, BADEA, ONEA, etc.)
- Données de lithologie de la base de données BD-OMES et des bases de données projets (BEWACO, RESO, VREO, PESO, etc.)
- Coupes géologiques réalisées en 2006-2007 par M. Clément Ouédraogo dans le cadre du Programme VREO. Il s'agit de 18 coupes géologiques (transects), fournies sur support papier à une échelle horizontale de 1/200.000 et verticale de 1/10.000. Les coupes (transects) ont été encodées et importées dans le module 'borehole' de GMS.

La figure ci-après présente la localisation des transects réalisés.

Les caractéristiques hydrogéologiques de la série du Sédimentaire au Burkina Faso peuvent notamment être évaluées par l'interprétation des données quantitatives et qualitatives disponibles sur la zone d'étude. Sur l'ensemble de cette zone, on dénombre plus de 8.500 forages pour lesquels des données sont disponibles (BD-OMES consolidée) et permettent, selon les cas, une analyse statistique par formation (hydro)géologique ou globale sur le bassin.

La série sédimentaire au Burkina Faso peut être conceptuellement représentée à l'échelle de la zone d'étude, selon plusieurs auteurs, par une nappe d'eau souterraine unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche. En effet, bien qu'il existe des niveaux imperméables séparant différents horizons géologiques de la série, l'extension horizontale de ces niveaux localisés reste limitée par rapport à la superficie du bassin : ces niveaux contribuent dès lors uniquement à mettre en charge une partie de la nappe aquifère, et la vision que l'on peut en dégager sur le nombre d'aquifères dépendra dès lors de l'échelle spatiale à laquelle on se situe. Sur le plan géologique, la série sédimentaire est majoritairement constituée de roches réservoirs potentielles sur plus des 3/4 de son épaisseur : il s'agit surtout de grès et de carbonates. Ainsi, du socle à la base du SAC1, on observe systématiquement un contact grès sur grès sur environ 1 000 m d'épaisseur, à l'exception d'un banc discontinu d'argilite qui, à la base des grès fins glauconieux, rend localement captif les grès de Kawara-Sindou.

On observe également d'épaisses couches d'argilites localement imperméables dans les formations SAC1 et SAC2, cependant la continuité latérale et en profondeur de ces « aquicludes » n'est nullement démontrée à ce stade puisque des forages productifs existent de part et d'autre, dans le même niveau stratigraphique.

Par ailleurs, les discontinuités observées à différents niveaux (fissures, fractures, failles) sont à l'origine, au sein de la roche réservoir, d'un réseau interconnecté de vides potentiellement aquifères : cette porosité secondaire se superpose à la porosité primaire, matricielle, de la roche réservoir, et permet localement la circulation d'eau souterraine au sein de terrains réputés imperméables comme les argilites. Il est difficile d'envisager un compartimentage étanche des niveaux aquifères lorsque des forages profonds, réalisés dans les mêmes grès autour de Sikasso (Mali), montrent l'existence de niveaux fracturés et aquifères jusqu'à près de 400 m de profondeur.

La réalisation de forages profonds, dont la profondeur prévisionnelle devrait atteindre 500 à 1000 m, est prévue dans le cadre du PAEA au niveau du sédimentaire de l'ouest. Les résultats de ces forages profonds, et des tests qui y seront effectués, devraient permettre de consolider ou de préciser les hypothèses conceptuelles formulées à ce stade sur la continuité hydraulique des différentes formations géologiques rencontrées dans cette partie du bassin.

Les unités hydrogéologiques du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso sont définies sur base du référentiel géologique au 1:500.000ème (Ouédraogo, VREO 2008), lequel actualise (en maintenant la même nomenclature de formations géologiques) le référentiel géologique au 1:million du Bumigeb (2003).

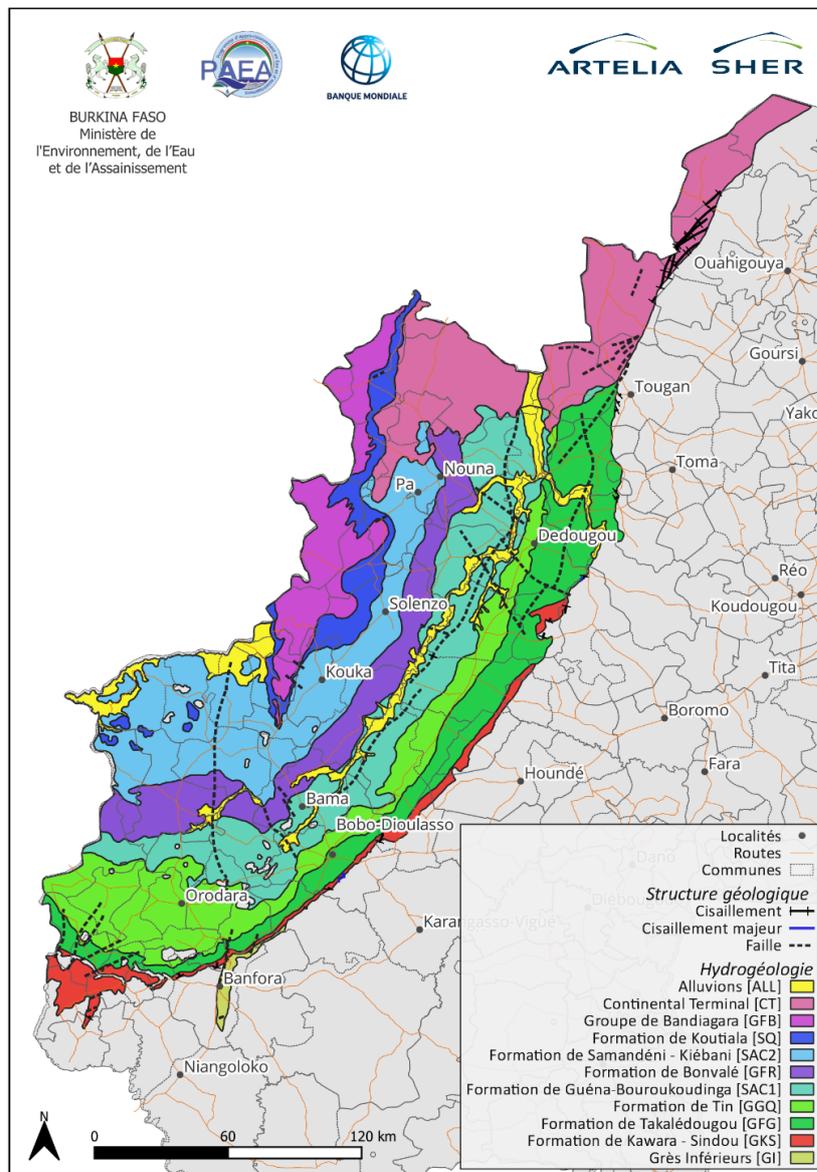
Les formations géologiques du bassin ont en effet, depuis plus de 30 ans, constitué dans les différentes études et dans les différents projets menés depuis les années 1990, le référentiel géographique et géométrique commun pour la capitalisation des données hydrogéologiques et pour l'interprétation du contexte hydrogéologique rencontré. On citera notamment les travaux de thèse de Dakouré (2003), Sauret (2013), Tirogo (2016), Kouanda (2019), et les études menées dans le cadre des projets ERES (1994), RESO (1999), VREO (2008), PESO (2010), MCA (2012-2013), etc.

Les 11 unités hydrogéologiques du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso sont les suivantes (de la plus ancienne à la plus récente) :

- Unité hydrogéologique des grès inférieurs (GI)
- Unité hydrogéologique des grès de Kawara-Sindou (GKS)

- Unité hydrogéologique des grès fins glauconieux (GFG)
- Unité hydrogéologique des grès à granules de quartz (GGQ)
- Unité hydrogéologique des siltites, argilites et carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1)
- Unité hydrogéologique des grès fins roses (GFR)
- Unité hydrogéologique des siltites, argilites et carbonates de Samandéni-Kiébani (SAC2)
- Unité hydrogéologique des siltites et grès-quartzite de la passe de Fo (SQ)
- Unité hydrogéologique des grès de Fo-Bandiagara (GFB)
- Unité hydrogéologique du Continental Terminal (CT)
- Unité hydrogéologique des alluvions du Quaternaire (ALL)

La figure présentée ci-après illustre la carte des unités hydrogéologiques du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso.



Source : IGB, BUMIGEB, ARTELIA-SHER

Figure 33 : Carte des unités hydrogéologiques du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso

F.6.1.1.1. Unité hydrogéologique des Grès Inférieurs (GI)

L'unité hydrogéologique des grès inférieurs (GI) affleure sur une étroite bande d'une quinzaine de kilomètres de part et d'autre au pied de la falaise de Banfora sur environ 200 km² de superficie. D'une puissance variable qui peut atteindre 300 m, elle repose en discordance sur le socle Paléoprotérozoïque.

L'unité hydrogéologique GI est constituée de conglomérats et grès fins à grossiers avec des argilites et des siltites. Elle est marquée par la présence de nombreuses zones fracturées ou fissurées. Des passées argileuses existent localement au sein des formations sédimentaires mais elles ne se retrouvent pas d'un forage à l'autre.

Les zones de contact entre les grès inférieurs et les grès de Kawara-Sindou GKS, situés au-dessus, ne montrent pas de niveaux imperméables continus susceptibles d'isoler ces deux types de roches réservoir. On peut dès lors supposer une continuité hydraulique entre ces formations, en particulier dans la langue de Banfora.

F.6.1.1.2. Unité hydrogéologique des Grès de Kawara-Sindou (GKS)

L'unité hydrogéologique de la formation des grès de Kawara-Sindou constitue la première assise presque continue de la bordure sud du bassin de Taoudéni en particulier depuis la frontière malienne, et vers le sud-ouest, où elle est bien marquée à l'affleurement en forme de bande mince sur environ 1.270 km². En bordure du socle, elle forme l'essentiel de la falaise gréseuse de Banfora. Vers le nord et l'est, elle disparaît de l'affleurement et elle est enfouie sous les formations plus récentes à des profondeurs qui dépassent quelques centaines de mètres.

L'épaisseur de l'unité GKS varie de 60 à 350 m. Elle est constituée essentiellement par des grès fins à moyen souvent bien classés.

Le contact entre les grès de Kawara-Sindou et le socle se fait localement par l'intermédiaire d'un mince banc conglomératique : il doit ainsi exister une continuité hydraulique entre ces formations. Le contact avec les grès inférieurs, grès sur grès, doit également assurer la continuité hydraulique des écoulements souterrains. Bien que des passées d'argilites existent localement, elles ne se retrouvent pas d'un forage à l'autre et semblent donc être discontinues. En revanche, un niveau particulier existe au contact avec les grès fins glauconieux : visible en continuité d'Ouest en Est, il passe des grès fins à des argilites. Vers Darsalamy, ces dernières mettent localement en charge la nappe des grès de Kawara-Sindou et forment donc *localement* une limite imperméable (RESO, 1999).

F.6.1.1.3. Unité hydrogéologique des Grès Fins Glauconieux (GFG)

L'unité hydrogéologique des Grès fins glauconieux (Gfg) affleure largement, de façon continue, sur la bordure sud-orientale du bassin. A l'affleurement, elle constitue le sommet de la falaise en une bande continue large d'une dizaine de kilomètres sur environ 5.400 Km².

Leur épaisseur va de 100 à 600 m. Ils sont constitués de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès très fin, avec parfois un aspect schisteux. Vers le sommet, la formation se termine par des grès fins à moyens à passées grossières.

Son toit est formé par une couche quasi imperméable d'argiles à passées gréseuses, ce qui rend la nappe captive. Quant à son mur, il consiste en de argiles ocre de couleur rouge ou verte imperméables. L'inventaire RESO de 1996 a noté l'existence de nombreuses sources qui soulignent le tracé de la falaise et qui se trouvent assez haut en altitude.

Au sommet, le contact de la formation Gfg avec la formation des grès à granules de quartz Ggq, au-dessus, est souvent masqué à l'affleurement par des latérites: en forage, vers Samogan, il semble se produire au niveau d'un banc argilosableux dont la continuité à grande échelle n'est cependant pas démontrée.

F.6.1.1.4. Unité hydrogéologique des Grès à Granules de Quartz (GGQ)

L'unité hydrogéologique des grès à granules de quartz (**Ggq**) affleure assez largement à l'Ouest du bassin de Taoudeni en bande grossièrement parallèle à la falaise de Banfora sur environ 5.300 km² et elle se réduit en de minces lentilles discontinues au Nord-Est.

Son épaisseur varie de 300 à 600 m. Elle est composée de grès quartzites fins à moyens avec des passées des grès grossiers à gros galets.

L'unité de grès à granules de quartz est souvent située entre deux couches imperméables : la base imperméable des siltites, argilites et carbonates de Guéna-Souroukoundinga **SAC1**, sus-jacents, et le toit des grès fins glauconieux **Gfg** constitué d'une couche d'argile plus ou moins gréseuse. Il existe de nombreuses sources qui traduisent un niveau piézométrique élevé : sources de la Koba, de Diolé, de Diéri, ... Dakouré (2003) a montré que cette unité possède le niveau piézométrique le plus haut de toute la série sédimentaire, y compris par rapport aux formations encaissantes.

Le contact avec les grès fins glauconieux **Gfg**, en-dessous, est difficile à observer à l'affleurement. En revanche, le sommet de cette formation serait localement caractérisé par un niveau de grès plus coloré et plus fin (sauf autour de Nasso) qui passerait à une alternance de grès fin et de siltstone dans la formation des siltstones-argilites-carbonates, au-dessus.

F.6.1.1.5. Unité hydrogéologique des Siltites, Argilites et carbonates de Guéna-Souroukoundinga (SAC1)

L'unité hydrogéologique des Siltstones, Argilites et Carbonates de Guéna-Souroukoundinga (**SAC1**) affleure difficilement sur l'ensemble de bassin de Taoudeni au Burkina Faso.

L'épaisseur totale de la formation pourrait dépasser 300 m. Elle est composée essentiellement de grès très fins alternés avec des niveaux d'argilite, de siltstone et de carbonates. Elle couvre une superficie d'environ 7.300 km².

Le contact avec la formation des grès fins roses **Gfr**, au-dessus, semble se faire par disparition progressive des intercalations de schistes et de calcaires : la roche s'enrichit ainsi en matériaux plus grossiers (grès fins).

Il est difficile de savoir s'il y a ou non continuité hydraulique au sein de cette formation. Les grès et les carbonates y sont reconnus comme étant généralement aquifères ainsi que, localement, les siltstones et les argilites (Pindja BAD). Ces dernières s'avèrent cependant aquicludes, sur le plan hydrogéologique, lorsqu'elles sont suffisamment épaisses et (ou) argileuses, de même qu'elles peuvent mettre en charge la nappe lorsque la topographie est favorable. Leur continuité dans l'espace n'est cependant pas démontrée et la formation elle-même est entourée de part et d'autre de terrains gréseux et aquifères (grès à granules de quartz et grès fins roses). Il se peut donc que les argilites forment localement une barrière imperméable, notamment au sommet des siltstones-argilites-carbonates ou dans la zone d'artésianisme: la nappe apparaît alors confinée et en charge, avec des temps moyens de séjour de l'eau de plusieurs milliers d'années (4 200 ans à Fon BOAD). Ce rôle d'écran doit favoriser la remontée des eaux souterraines vers la surface et créer à ce niveau une ligne de sources ou de fortes interactions avec le réseau hydrographique: on verra plus loin que c'est effectivement ce qui se produit localement.

F.6.1.1.6. Unité hydrogéologique des Grès Fins Roses (GFR)

L'unité hydrogéologique des grès fins roses (**GFR**) est visible sur les photographies aériennes et affleure continuellement au centre du bassin de Taoudeni depuis l'Ouest dans la région de Samorogouan, jusque vers le Nord-Est dans la région de Nouna, sur environ 4.000 km².

Elle est constituée de grès quartzites très fins micacés, en bancs épais et compacts. Cette formation a une épaisseur moyenne d'une centaine de mètres. Elle contient une nappe peu épaisse, avec des niveaux statiques très peu profonds. Cette nappe est captée par les puits traditionnels villageois dans les départements de Bama et de Sakaby (Kutangila, 2019).

Le contact des grès fins roses avec la formation située au-dessus, le **SAC2**, semble franc : le GFR est gréseux jusqu'au sommet, tandis que la base du SAC2 serait d'emblée schisteuse ou carbonatée.

L'important banc gréseux des grès fins roses forme donc un niveau repère d'autant plus caractéristique qu'il s'intercale dans les deux formations plutôt tendres des siltstones-argilites-carbonates de Guéna-Souroukoudinga (SAC1) et de Samandéni-Kiébanani (SAC2). Une certaine continuité hydraulique peut exister d'Est en Ouest dans cette formation du fait de la présence de cet important banc gréseux recoupé dans tous les forages.

F.6.1.1.7. Unité hydrogéologique des Siltites, Argilites et Carbonates de Samandéni-Kiébanani (SAC2)

L'unité hydrogéologique des Siltstones, Argilites et Carbonates de Samandéni-Kiébanani (**SAC2**) se situe dans toute la partie nord-ouest de la zone sédimentaire Ouest, vers la frontière malienne. Elle est soit en rare affleurement aux flancs de petites collines isolées soit recouverte d'alluvions argileuses et de latérites.

Son épaisseur varie de 400 à 700 m, et elle est constituée d'une alternance d'argilites et de siltstones glauconieux à passées calcaires dolomitiques. Elle couvre une superficie d'environ 7.200 km².

Le contact entre la formation **SAC2** et la formation **SQ** sus-jacente et franchement gréseuse se fait localement par l'intermédiaire d'un niveau parfois épais d'argile. À Kiébanani, le contact semble direct entre les schistes de la formation **SAC2** et les grès de la formation **GFB**, en l'absence apparente de la formation **SQ**.

Les variations de faciès et d'épaisseur de cette formation sont importantes d'un site à l'autre, ce qui ne semble pas en mesure de faire obstacle aux circulations souterraines. Néanmoins, des forages négatifs ont été recensés dans certaines zones où, par exemple, les argilites sont plus épaisses (partie centrale vers Ndorola).

F.6.1.1.8. Unité hydrogéologique des Siltites et Grès-Quartzite de la passe de Fo (SQ)

L'unité hydrogéologique des siltites et quartzites (**SQ**) affleure en minces bande au pied de la falaise de Fo.

L'épaisseur de la formation pourrait atteindre 50 m. Elle est constituée de siltstones et grès quartzites très fins micacés. Elle couvre une superficie d'environ 1.800 km².

L'existence d'un niveau d'argilite entre la formation **SQ** et la formation **SAC2** située en-dessous, semble potentiellement faire écran aux circulations souterraines. Aucune ligne de sources n'apparaît toutefois dans le paysage au contact de ces formations.

F.6.1.1.9. Unité hydrogéologique des Grès de Fo-Bandiagara (GFB)

L'unité hydrogéologique des Grès de Fo-Bandiagara (**GFB**) constitue les sommets des reliefs vers la frontière malienne. Son épaisseur est d'environ 50 à 100 m. Elle est constituée de grès grossiers à fin, en bancs épais et compacts. Sa superficie est d'environ 2.900 km².

Le contact entre cette formation et la formation **SQ**, en-dessous, se fait grès contre grès et ne saurait interrompre ces circulations. La continuité hydraulique semble donc totale au sein de ces deux terrains qui pourraient éventuellement héberger une nappe perchée.

F.6.1.1.10. Unité hydrogéologique du Continental Terminal (CT)

Le Continental Terminal (CT) est une formation argilo-sableuse plus ou moins bariolée, datant du Néogène. Le CT forme une nappe de grande extension au Burkina Faso faisant environ 6.700 km² en sub-affleurement dans la zone d'étude. Les différents auteurs lui attribuent une puissance allant de 10 - 30 mètres à 100 mètres.

Cette nappe, généralement peu productive, est principalement exploitée en hydraulique rurale à l'aide de puits traditionnels, ou de forages à faible débit (Gramont et al., 2017).

F.6.1.1.11. Unité hydrogéologique des alluvions du Quaternaire (ALL)

Les alluvions sablo-argileuses récentes se rencontrent le long des principaux cours d'eau. Leur superficie cumulée est d'environ 1.600 km² au niveau de la plaine du Mouhoun, et d'environ 750 km² au niveau de la plaine du Banifing.

Il existe pour certains tronçons des principaux cours d'eau pérennes (Mouhoun et Banifing) une connexion hydraulique entre les alluvions et les grès sous-jacents, caractérisée par des échanges de flux de la nappe des grès vers celle des alluvions. La comparaison des niveaux de nappe avec les cotes topographiques des cours d'eau permet de déterminer les tronçons de cours d'eau à caractère drainant et en équilibre avec la nappe.

F.6.1.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

La couche SIG (polygones) des unités hydrogéologiques a été intégrée à la base de données BD-MOD.

En fonction des choix qui seront opérés dans le cadre de l'élaboration et de la consolidation ultérieure du modèle hydrogéologique conceptuel, notamment en ce qui concerne le regroupement de formations géologiques ainsi que la distinction entre niveaux aquifères, aquicludes et aquitards, les informations attributaires associées à la couche SIG des unités hydrogéologiques seront enrichies et permettront un traitement approprié des données cartographiques en support à la modélisation hydrogéologique.

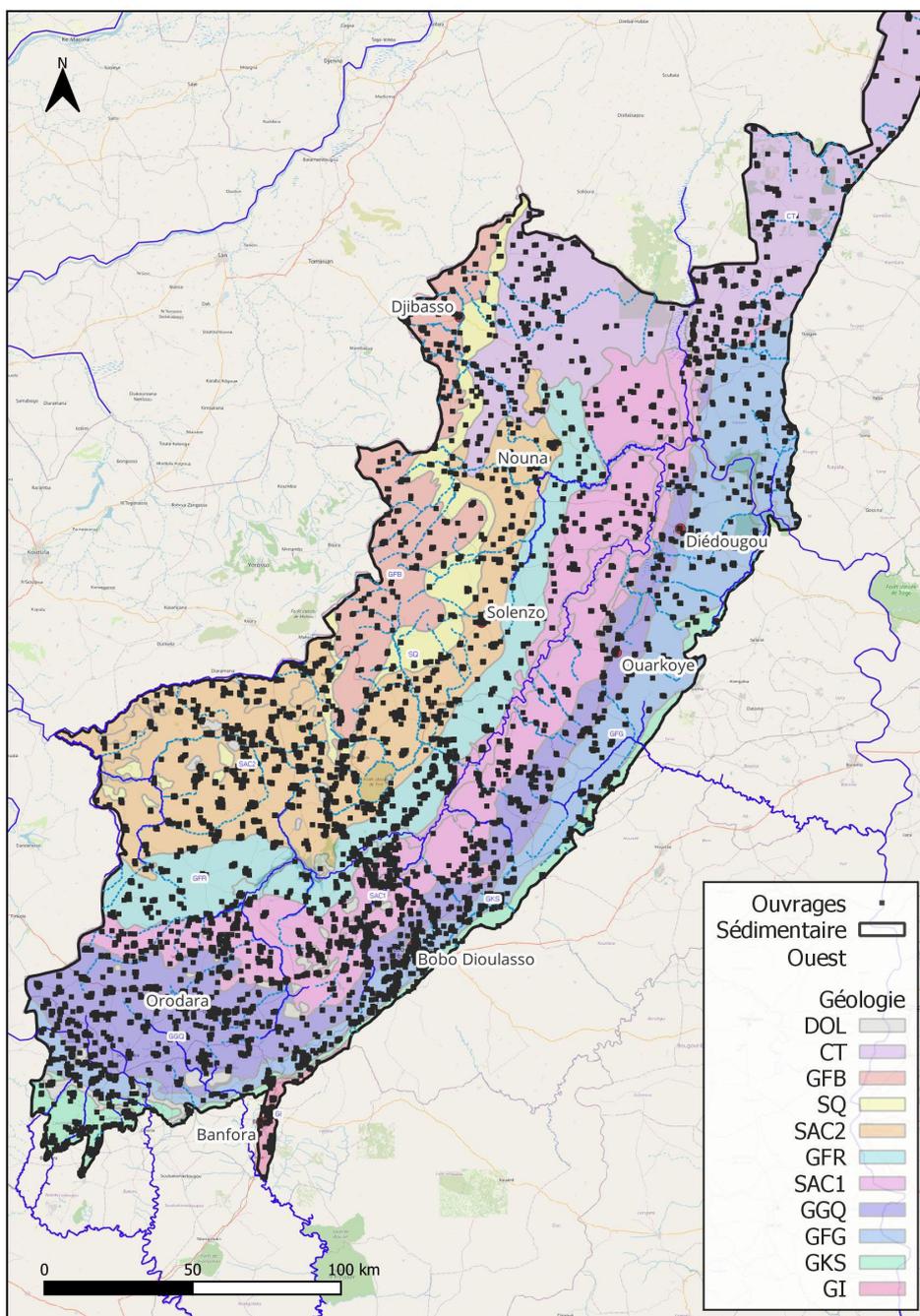
F.6.2. Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines

F.6.2.1. Présentation générale

La base de données BD-OMES, laquelle a fait l'objet d'une consolidation dans le cadre de la présente étude (rapport technique RT3.1), a fait l'objet d'une extraction sur la zone du sédimentaire de l'ouest.

On dénombre ainsi environ 8.750 ouvrages, répartis sur l'ensemble de la zone du sédimentaire de l'ouest.

La carte reprise ci-après illustre la localisation des ouvrages.



Source : DEIE, BUMIGEB, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER
 Figure 34 : Localisation des ouvrages (BD-OMES)

Le tableau ci-après reprend la distribution des ouvrages par formation hydrogéologique, ainsi que les statistiques (min, max, moyenne) associées aux principales caractéristiques de ces ouvrages.

Formation	Ouvrages		Débits fin foration				Profondeur forée				Niveau statique			
	Nombre	%	Qmoy (m ³ /h)	Qmin (m ³ /h)	Qmax (m ³ /h)	Q (nbre)	Prof moy (m)	Prof min (m)	Prof max (m)	Prof (nbre)	NS moy (m)	NS min (m)	NS max (m)	NS (nbre)
CT	526	6.0%	9.7	0.1	50.0	400	77.0	13.0	154.0	366	33.8	3.3	74.6	390
GFB	270	3.1%	8.9	0.2	58.0	178	63.1	6.7	139.2	166	16.9	1.4	47.4	165
GFG	1198	13.7%	11.2	0.1	203.0	647	75.6	6.0	239.0	691	20.5	1.5	117.6	458
GFR	876	10.0%	5.9	0.1	50.0	280	66.8	5.0	159.8	339	16.1	2.6	46.7	175
GGQ	1661	19.0%	11.1	0.2	415.0	827	58.5	3.5	311.0	902	16.2	0.5	82.5	590
GI	100	1.1%	5.4	0.3	39.0	48	62.7	8.7	200.0	82	12.6	3.6	22.6	27
GKS	395	4.5%	4.5	0.2	19.8	205	47.9	3.9	174.0	270	10.9	2.0	111.0	155
SAC1	1609	18.4%	11.0	0.1	350.0	671	64.2	1.5	310.0	775	16.8	0.4	111.5	439
SAC2	1899	21.7%	11.4	0.1	260.0	598	58.2	5.0	207.8	696	13.8	1.4	59.5	468
SQ	230	2.6%	9.5	0.1	40.0	112	56.7	8.5	122.5	112	18.2	4.9	43.9	88
TOTAL	8764	100.0%	10.0	0.1	415.0	3966	63.9	1.5	311.0	4399	18.7	0.4	117.6	2955

Tableau 8: Distribution des ouvrages par formation, et principales caractéristiques (source : BD-OMES consolidée par ARTELIA-SHER)

La distribution des ouvrages par formation est illustrée sur le graphique ci-après. Les principales formations exploitées sont le SAC2, le SAC1 et le GGQ, qui totalisent ensemble environ 60% des ouvrages de la zone sédimentaire ouest. Les formations les moins exploitées sont les GI, SQ et GFB.

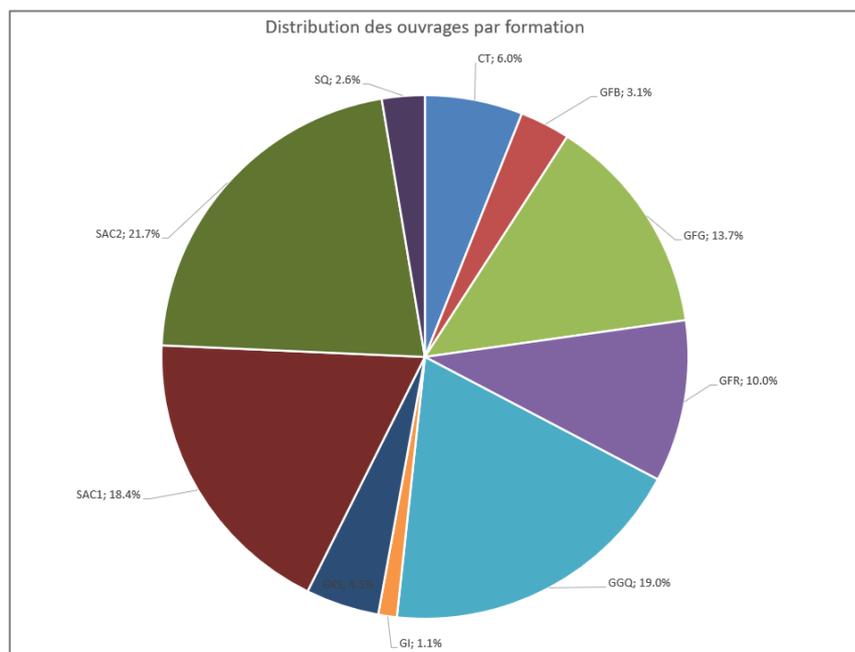


Figure 35 : Graphique de distribution des ouvrages par formation

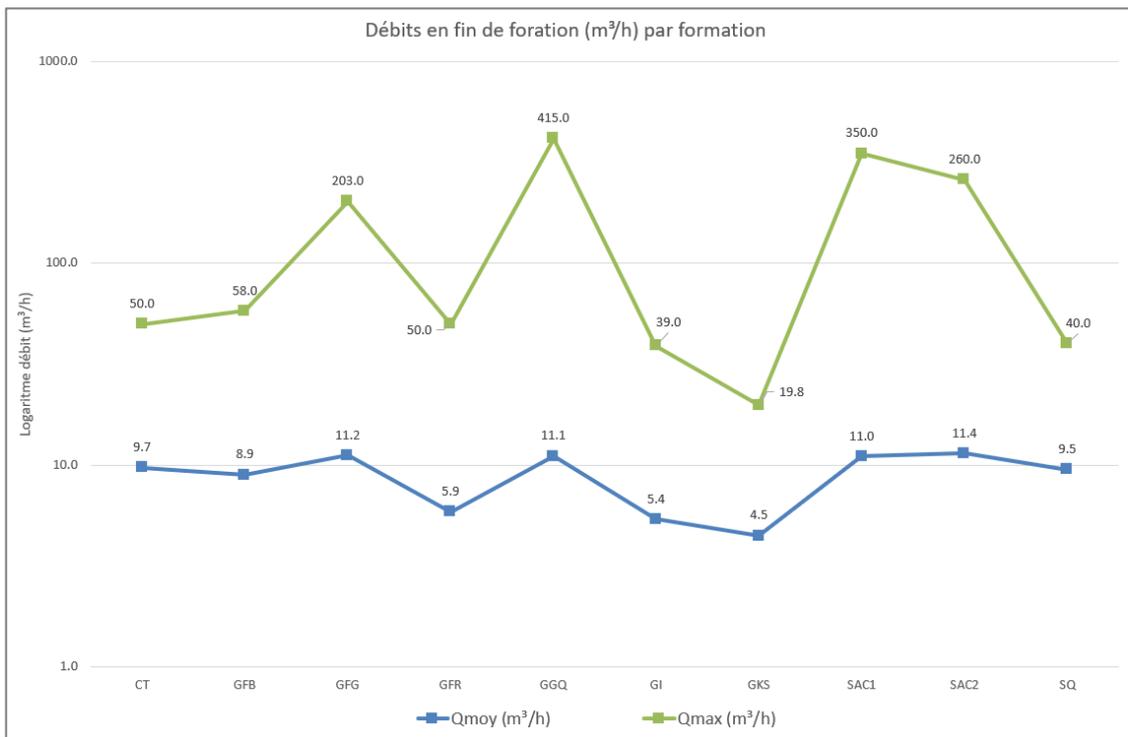
Les profondeurs forées moyennes sont de l'ordre de 64 mètres sur l'ensemble du sédimentaire de l'ouest (env. 4.400 données). La moyenne par formation la plus élevée est observée dans le CT (77 m), en relation avec les niveaux statiques plus profonds rencontrés dans cette formation (voir plus loin). Les forages les plus profonds sont toutefois rencontrés dans le GGQ et dans le SAC1, avec des valeurs dépassant 300 m dans la zone de Bobo Dioulasso au contact entre ces deux formations (forages ONEA).

F.6.2.1.1. Débits en fin de foration

Les débits en fin de foration atteignent une moyenne de 10 m³/h sur l'ensemble de la zone sédimentaire ouest. Les valeurs moyennes par formation les plus élevées sont rencontrées dans le GGQ, le SAC1, le SAC2 et le GFG.

Les débits les plus élevés par forage sont observés dans le GGQ (415 m³/h), dans le SAC1 (350 m³/h), dans le SAC2 (260 m³/h) et dans le GFG (203 m³/h).

Le graphique ci-après reprend les débits moyens et maximums par formation.

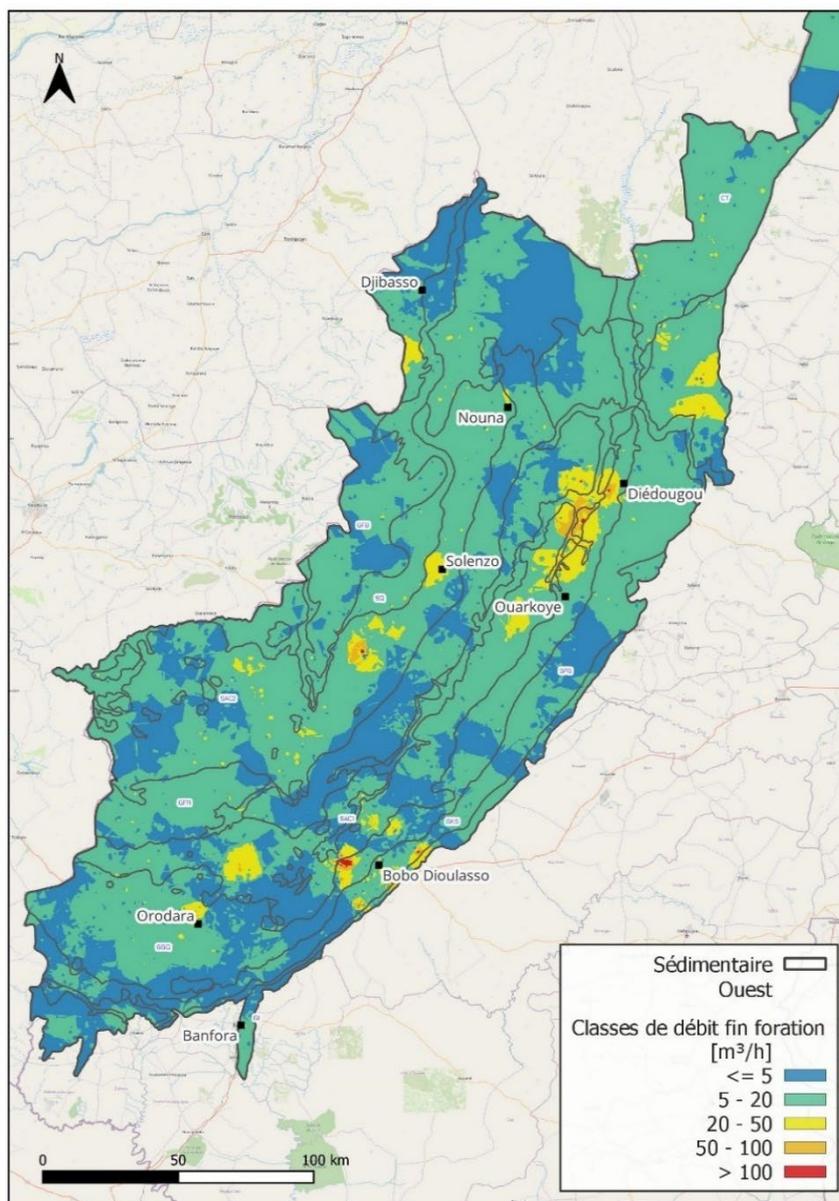


Source : DEIE (BD-OMES), ARTELIA-SHER

Figure 36 : Débits en fin de foration moyens et maximums par formation

La carte reprise ci-après illustre la distribution spatiale des débits observés en fin de foration (krigeage à partir de la BD-OMES, sur base d'environ 4.000 données).

On y observe clairement les zones à gros débit rencontrées dans les formations GGQ et SAC1 (notamment au contact entre ces deux formations) en particulier dans la zone de Bobo Dioulasso et sur l'axe Dédougou-Ouarkoye. On y observe également les zones à débits élevés rencontrés dans le SAC2.



Source : DEIE, OpenStreetMap, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 37 : Carte des débits en fin de foration (krigeage à partir de BD-OMES, ARTELIA-SHER).

F.6.2.1.2. Niveau statique et interaction eau de surface – eau souterraine

Les niveaux statiques mesurés dans les forages (soit environ 3.000 points d'observation sur la zone du sédimentaire de l'ouest) sont illustrés sur la carte ci-après. Ils sont compris entre 0 et 120 mètres environ par rapport au niveau du sol.

Les niveaux statiques moyens sur l'ensemble du sédimentaire de l'ouest sont de l'ordre de 18 mètres. les niveaux moyens les plus élevés sont rencontrés dans le CT, où ils atteignent une moyenne de 34 mètres. Les niveaux individuels les plus profonds sont mesurés dans le SAC1, le GKS et le GFG, avec des valeurs dépassant 100 mètres.

L'interprétation de la carte des niveaux statiques permet notamment la consolidation des hypothèses relatives aux tronçons de rivières supposés en équilibre avec la nappe. On constate à ce sujet que le

Mouhoun, cours d'eau pérenne, est en équilibre avec la nappe sur une grande partie de son tracé. Il semble toutefois se décrocher en sa partie aval dans la zone d'étude, approximativement à partir de Dédougou. Les profondeurs de nappe mesurées en aval de ce point, à proximité du cours d'eau, sont en effet supérieures à 20 mètres.

Il en va de même pour le Sourou, qui est probablement décroché sur toute l'étendue de son tracé dans la zone d'étude.

De manière plus globale, les niveaux statiques sont supérieurs à 20 mètres sur pratiquement tous les points d'observation situés dans le bassin du Sourou (au sein de la zone d'étude) : il n'existe dès lors pas d'exutoire naturel de la nappe dans cette zone.

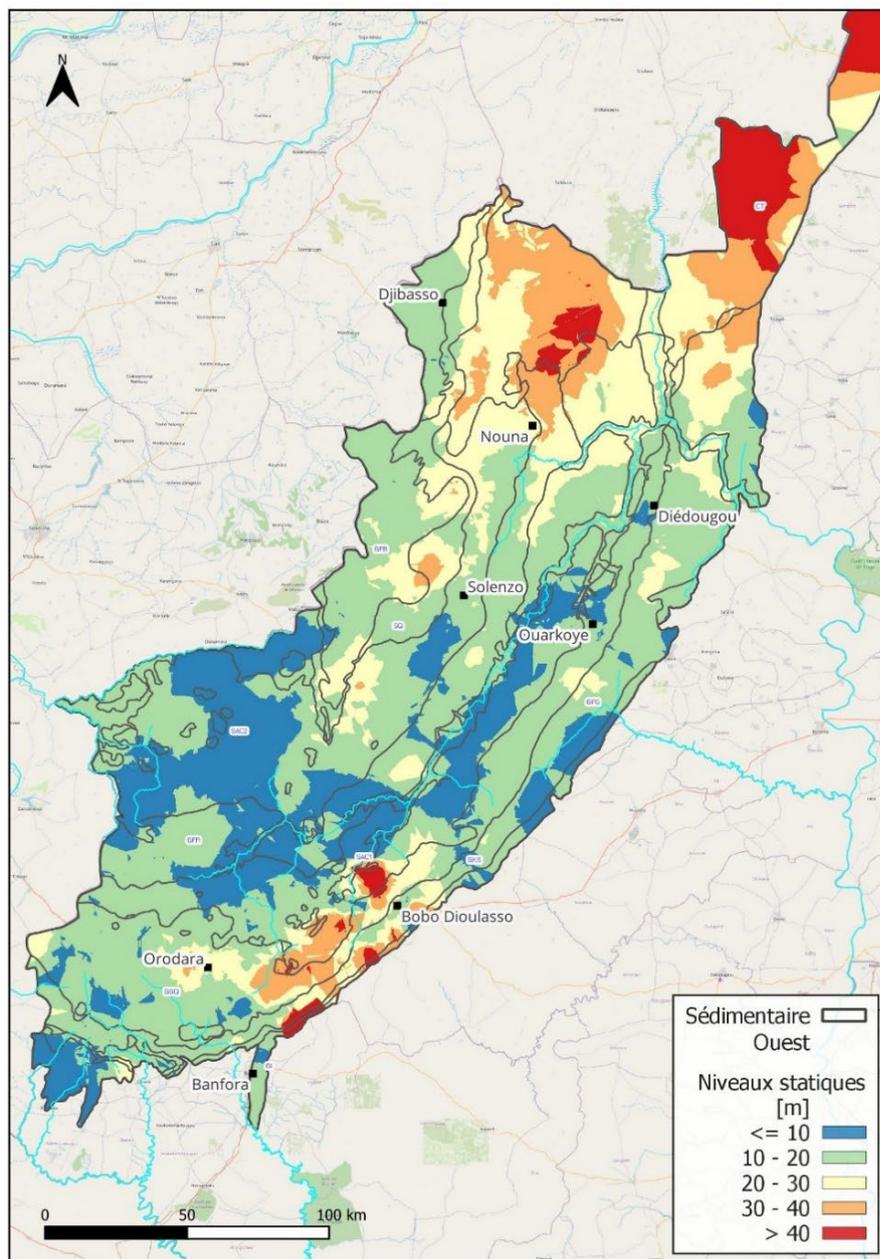
La zone que couvre le Continental Terminal est également caractérisée par l'absence d'exutoire naturel de la nappe dans la zone d'étude, et par un approfondissement généralisé de celle-ci, avec des niveaux statiques également supérieurs à 20 mètres.

Sur ces deux zones adjacentes couvrant le nord de la zone d'étude, les écoulements souterrains ne sont donc plus drainés par les eaux de surface ; il s'agit de l'extrémité Sud-Ouest de la "dépression du Gondo" centrée sur le Continental Terminal, dont le noyau est observé plus au nord en dehors de la zone d'étude, et dont l'origine est encore à ce jour sujette à débat.

Par ailleurs, l'examen conjoint des cartes des niveaux statiques et des cartes piézométriques indique que les cours d'eau principaux du bassin du Banifing, notamment ceux correspondant à la frontière administrative avec le Mali, ont un caractère drainant très marqué et sont probablement en équilibre avec la nappe. Le caractère permanent de cet équilibre reste toutefois à établir, sur base d'une analyse plus fine des données hydrologiques.

Les interactions eaux de surface - eaux souterraines, permettant l'identification des exutoires naturels de la nappe, peuvent être observées et caractérisées par l'interprétation des hydrogrammes des cours d'eau pérennes prenant naissance au sein même de la zone sédimentaire (Mouhoun, Comoé, Banifing). Ces observations en eaux de surface sont en cohérence avec la piézométrie mesurée, caractéristique de bassins de drainage, et avec les niveaux statiques observés.

D'un point de vue plus ponctuel, les interactions eaux de surface - eaux souterraines s'illustrent également au travers des quelques zones de sources dont certaines sont particulièrement importantes voire exceptionnelles, telles les sources de "Nasso-Guinguette" dans la région de Bobo-Dioulasso, avec un débit actuel de l'ordre de 7.200 m³/h : la zone d'alimentation de ce chapelet de sources dépasse vraisemblablement le bassin versant du Kou et devrait s'étendre vers les hauts-bassins (région de Orodara), selon un schéma s'écartant dès lors de la notion de bassin de drainage. Le principe de fonctionnement de ces sources, de même que l'évaluation de leur caractère renouvelable, demeurent également parmi les hypothèses conceptuelles qui sont formulées par les différents auteurs repris dans la littérature.



Source : DEIE, OpenStreetMap, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 38 : Carte des niveaux statiques obtenue par krigeage à partir de la BD-OMES

F.6.2.2. Préparation des données pour la modélisation

La base de données BD-OMES a fait l'objet d'une extraction de l'ensemble des ouvrages localisés dans la zone du sédimentaire de l'ouest. Ces ouvrages, ainsi que leurs caractéristiques, ont été importés dans la BD-MOD.

Hormis les forages de l'ONEA (AEP en zone urbaine ou multi-village), très peu de données de prélèvement sont disponibles pour les ouvrages répertoriés dans la BD-OMES. La capitalisation des données relatives aux prélèvements, et l'évaluation de ceux-ci, sont reprises en section F.8 du présent rapport.

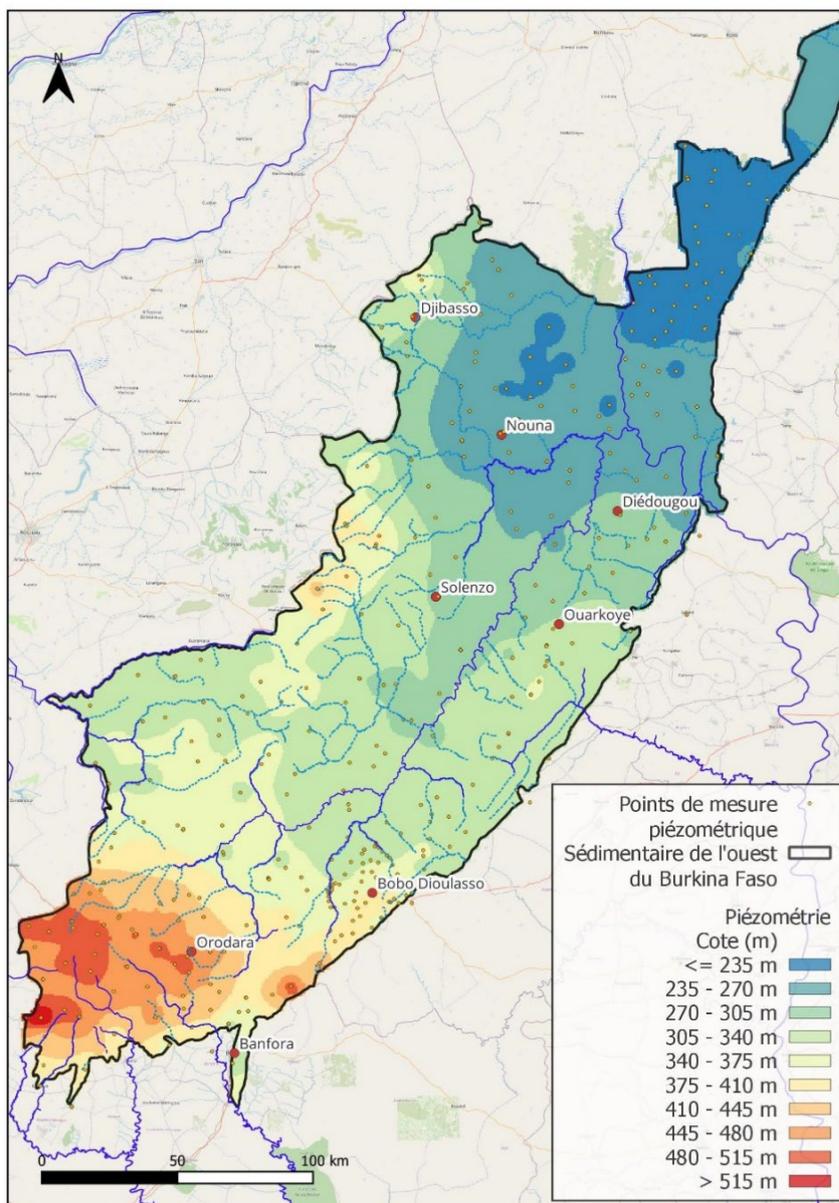
F.6.3. Piézométrie

F.6.3.1. Elaboration de cartes piézométriques et directions d'écoulement

L'attribution de cotes topographiques relativement précises aux différents ouvrages répertoriés dans la zone d'étude au Burkina Faso (par relevé DGPS pour 250 d'entre-eux, et par croisement SIG avec le MNT SRTM30 consolidé pour les 800 autres), permet l'élaboration de cartes piézométriques. En effet, des données de niveaux statiques mesurés sont disponibles pour la plupart de ces ouvrages.

A l'échelle de la zone d'étude (bassin sédimentaire au Burkina Faso), une carte piézométrique a ainsi été réalisée sur base de 250 points cotés par DGPS (VREO 2008), auxquels s'ajoutent 200 forages sélectionnés (proches de bornes IGB), soit au total 450 points présentant une distribution spatiale cohérente.

La carte piézométrique relative à la zone du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso est reprise ci-après.



Source : DEIE, OpenStreetMap, IGB, ARTELIA-SHER

Figure 39 : Carte piézométrique du sédimentaire de l'ouest

L'analyse des données piézométriques donne lieu aux commentaires suivants :

- Les cartes piézométriques sont réalisées à partir des ouvrages existants sur la zone d'étude, lesquels captent généralement à une profondeur relativement limitée (<200 m) les premiers horizons aquifères rencontrés. L'intégration de tous ces points au sein d'une même interpolation, indépendamment de l'horizon qu'ils captent, suppose un équilibre hydrostatique global à l'échelle de la zone d'étude, et repose par conséquent sur l'hypothèse d'un aquifère unique multi-couches. Il s'agit d'une hypothèse retenue, à ce stade d'avancement des développements, dans le modèle conceptuel. Il est dès lors pertinent, sur base de cette hypothèse, de réaliser une carte piézométrique unique agrégeant tous les horizons du sédimentaire. On constate à ce propos que la parfaite cohérence des isopièzes sur l'ensemble de la zone d'étude tend à appuyer l'hypothèse d'aquifère unique multi-couche, à cette échelle.
- La zone d'étude au Burkina Faso présente des cotes piézométriques moyennes comprises entre 635 et 165 mètres d'altitude.
- L'identification des crêtes hydrogéologiques présentes sur la zone d'étude au Burkina Faso permet de distinguer différents bassins d'alimentation hydrogéologiques. On constate une très grande concordance entre les crêtes topographiques définissant les principaux bassins versants (Mouhoun, Comoé, Banifing), et les crêtes hydrogéologiques identifiées. Il en résulte, au niveau des écoulements d'eau souterraine dans les aquifères du sédimentaire, une concordance globalement homogène entre les bassins hydrogéologiques identifiés et les principaux bassins versants. Cette concordance repose, rappelons-le, sur les mesures piézométriques réalisées en des ouvrages captant les aquifères supérieurs (à moins de 200 mètres de profondeur). Bien que l'on ne puisse exclure un comportement hydrodynamique différent, et donc des directions d'écoulements différentes, dans les couches aquifères profondes, cette hypothèse n'est pas retenue dans le modèle conceptuel en son stade actuel. Nous considérons en effet pour le sédimentaire, à l'échelle de la zone d'étude, la présence d'un système aquifère multi-couches mais à comportement continu en termes de pression hydrostatique. La poursuite des développements à réaliser dans le cadre du PAEA devrait permettre de confirmer cette hypothèse, ou au contraire de nous amener à considérer des transferts importants d'eau souterraine par couches profondes vers un exutoire situé hors du Burkina Faso, tel que les fleuves Niger et Bani par exemple (modèle bi- ou tri-modal de Toth). Dans un tel cas, la réalisation de cartes piézométriques agrégeant tous les horizons du sédimentaire ne s'avérerait plus pertinente.
- L'identification des crêtes hydrogéologiques sur la zone d'étude permet de distinguer 4 principaux bassins hydrogéologiques :
 - Le bassin hydrogéologique du Mouhoun, couvrant pratiquement 80% de la zone d'étude, qui draine la grande majorité des eaux souterraines de la zone sédimentaire du Burkina selon un axe nord-nord-est vers la plaine du Sourou et, plus en aval encore, hors de la zone couverte par le Programme VREO en direction de la dépression du Gondo. Le caractère drainant du cours d'eau Mouhoun apparaît clairement au niveau de l'allure piézométrique observée. L'extension du tronçon supposé en équilibre avec la nappe sera détaillé plus loin (interactions nappes-rivières). Il est à noter que la zone d'alimentation (= de recharge) de ce bassin hydrogéologique semble entièrement située au Burkina Faso, au sein même de la zone d'étude. Les seuls flux sortants naturels d'eau souterraine sont situés au niveau du tronçon de rivière Mouhoun en équilibre avec la nappe, et au niveau de la limite nord-nord-est de la zone d'étude (frontière malienne et limite nord du BV Sourou). On notera par ailleurs que ce bassin d'alimentation hydrogéologique recoupe tous les horizons géologiques présents dans la zone d'étude selon la typologie retenue.
 - Le bassin hydrogéologique du Banifing, qui draine les eaux souterraines selon un axe nord-ouest en direction du Mali. Les principaux cours d'eau de ce bassin, dont ceux longeant la frontière

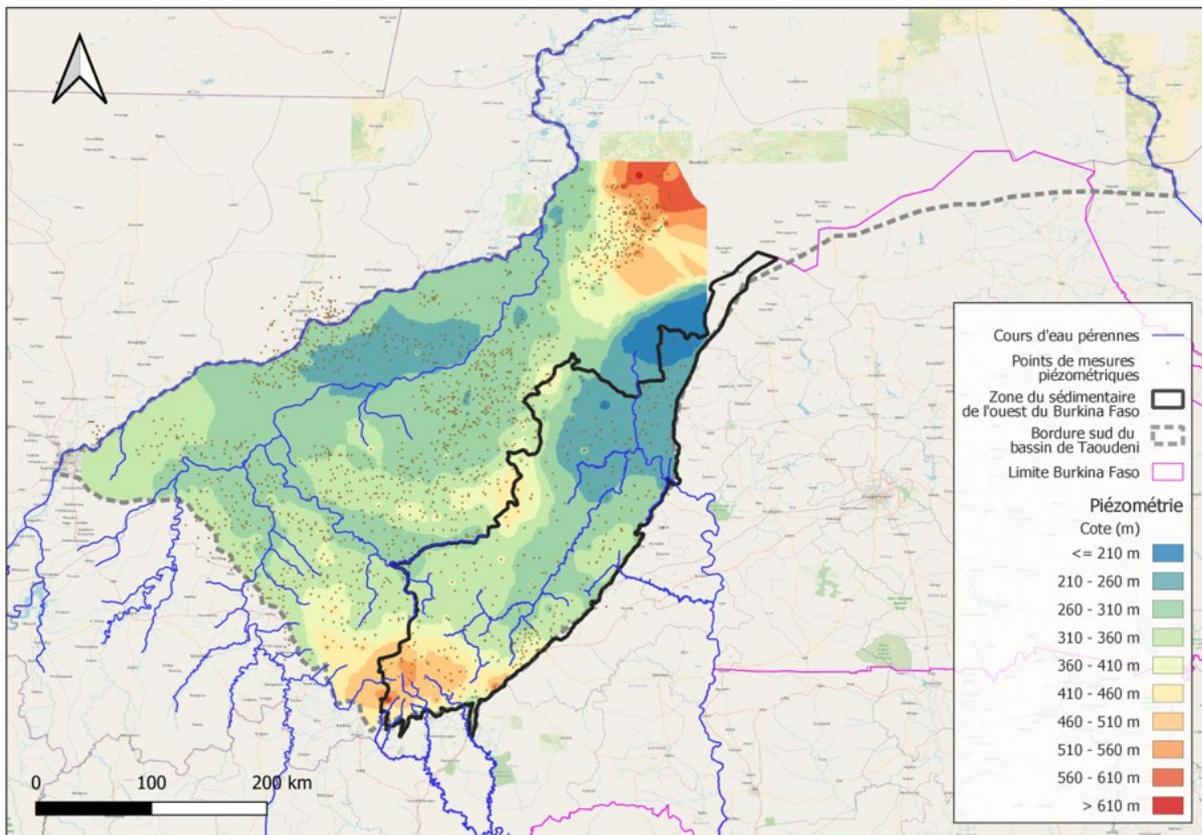
avec la Mali, ont un effet drainant visible au niveau de l'esquisse piézométrique. Les flux d'eau souterraine sortants de la zone d'étude sont localisés en ce bassin au niveau de la frontière malienne ; les écoulements souterrains se dirigent ensuite au Mali probablement en direction des exutoires principaux que représentent les fleuves Bani et Niger.

- Le bassin hydrogéologique de la Comoé, qui couvre l'extrême sud-ouest de la zone d'étude. Les flux d'eau souterraine sont globalement dirigés, en ce bassin, vers l'ouest en direction du Mali où ils quittent la zone d'étude au niveau de la frontière, et vers le sud où ils quittent la zone sédimentaire à l'intérieur du Burkina Faso en direction du socle cristallin.
- Le bassin hydrogéologique Bougouriba-Grand Balé, dont la crête hydrogéologique longe la falaise de Bobo-Banfora et son extension nord, c-à-d en bordure intérieure de la zone sédimentaire. Son extension dans la zone d'étude est dès lors relativement limitée. Ce bassin présente des flux d'eau souterraine globalement dirigés vers le sud-est, qui quittent rapidement la zone sédimentaire en direction du socle cristallin.
- La frontière administrative entre le Burkina et le Mali correspond globalement, sur une grande partie de la zone d'étude, aux limites de bassins versants principaux. La concordance globale observée entre les limites de bassins versants principaux et les limites de bassins hydrogéologiques, implique dès lors l'absence d'échanges d'eau souterraine entre ces deux pays sur une grande partie de la frontière administrative. En d'autres termes, la frontière administrative entre le Mali et le Burkina constitue sur une grande partie de la zone d'étude une crête hydrogéologique de partage des eaux souterraines. Il en va notamment ainsi, comme on l'observe aisément sur l'esquisse piézométrique, de l'extension sud-ouest de la falaise de Bandiagara qui marque clairement le partage des eaux souterraines le long de la frontière malienne. Les seuls échanges majeurs d'eau souterraine entre ces deux pays sont dès lors ceux mentionnés plus haut, à savoir principalement au nord de la zone d'étude au niveau du Continental Terminal et du Sourou, à l'ouest au niveau de la cuvette piézométrique du Banifing, ainsi qu'au sud-ouest dans le bassin de la Comoé. Cette interprétation est à rapporter aux hypothèses retenues dans le modèle conceptuel, mais n'exclut pas à ce stade des connaissances des échanges profonds plus importants.
- On notera enfin, en matière de gestion intégrée transfrontalière des ressources eaux, qu'au niveau de la zone d'étude aucun flux d'eau souterraine dans les terrains sédimentaires ne semble provenir du Mali. Les échanges transfrontaliers mentionnés au point repris ci-avant sont donc exclusivement des flux sortants du Burkina Faso. En d'autres termes, l'entièreté des flux d'eaux souterraines circulant dans la zone sédimentaire étudiée au Burkina Faso provient des pluies infiltrées dans le sédimentaire au Burkina Faso.
- Compte tenu de l'analyse de la piézométrie telle que reprise ci-avant, et de la compréhension des processus d'écoulement d'eaux souterraines dans la zone d'étude, il n'y a pas lieu de définir des limites de zone à modéliser (pour la modélisation mathématique des écoulements souterrains) différentes des limites du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso. En effet, la concordance des limites administratives avec des limites physiques, tant hydrologiques qu'hydrogéologiques, permettra de définir des conditions aux limites pertinentes en ces tronçons, tandis que les conditions qui seront imposées sur les tronçons de frontières présentant des flux sortant depuis le Burkina vers le Mali permettront de quantifier ces flux.

En complément, et afin de situer la zone d'étude dans son contexte régional à l'échelle de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni, la carte piézométrique réalisée avec une précision satisfaisante sur la zone sédimentaire du Burkina Faso a été étendue à l'ensemble de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni, avec les données supplémentaires de forages du Mali (environ 1000 points de mesure, mais dont les cotes

topographiques sont parfois imprécises et pour lesquels les données peuvent s'avérer difficilement validables).

La figure reprise ci-dessous illustre une esquisse de la piézométrie sur l'ensemble de cette zone de bordure sud-est du bassin de Taoudeni, qui couvre 260.000 km².



Source : DEIE, IGB, OpenStreetMap, VREO, ARTELIA-SHER

Figure 40 : Carte piézométrique de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (rive droite du fleuve Niger, Mali & Burkina Faso)

On distingue clairement d'une part le niveau de base que constitue le fleuve Niger au Mali, et au Burkina Faso le niveau de base représenté par le fleuve Mouhoun avec en sa prolongation aval la dépression du Gondo. Entre ces deux entités principales, on retrouve la crête hydrogéologique majeure entre le Burkina Faso et le Mali, matérialisée par la falaise de Bandiagara et son extension sud-ouest. On distingue également clairement les seuls flux d'eau souterraine sortant de la série sédimentaire du Burkina Faso vers le Mali, au niveau du bassin du Banifing.

Des coupes verticales ont également été réalisées afin de fournir une représentation explicite de la topographie et de la piézométrie. Parmi les coupes réalisées, deux d'entre-elles sont présentées ci-dessous.

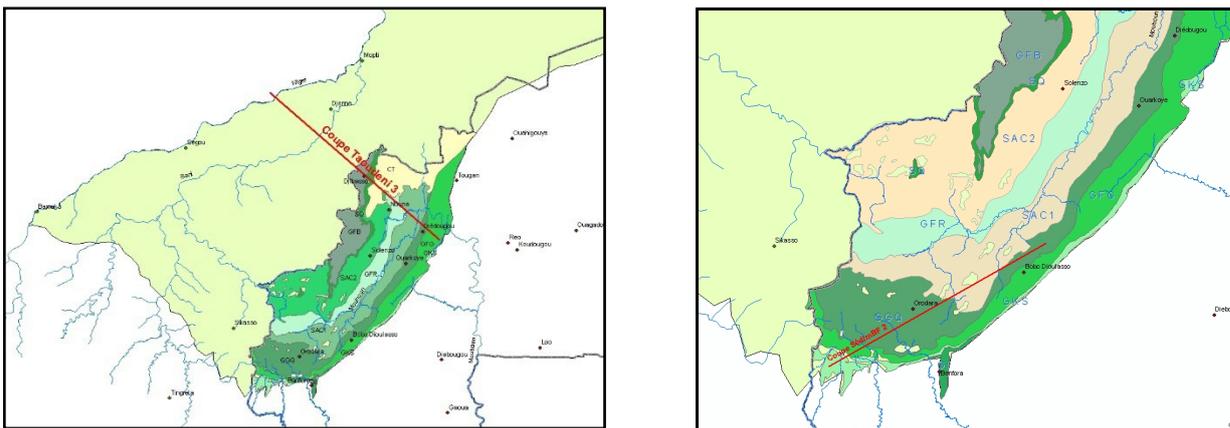


Figure 41 : Localisation des coupes du sédimentaire de l'ouest (adapté de Derouane 2007, VREO)

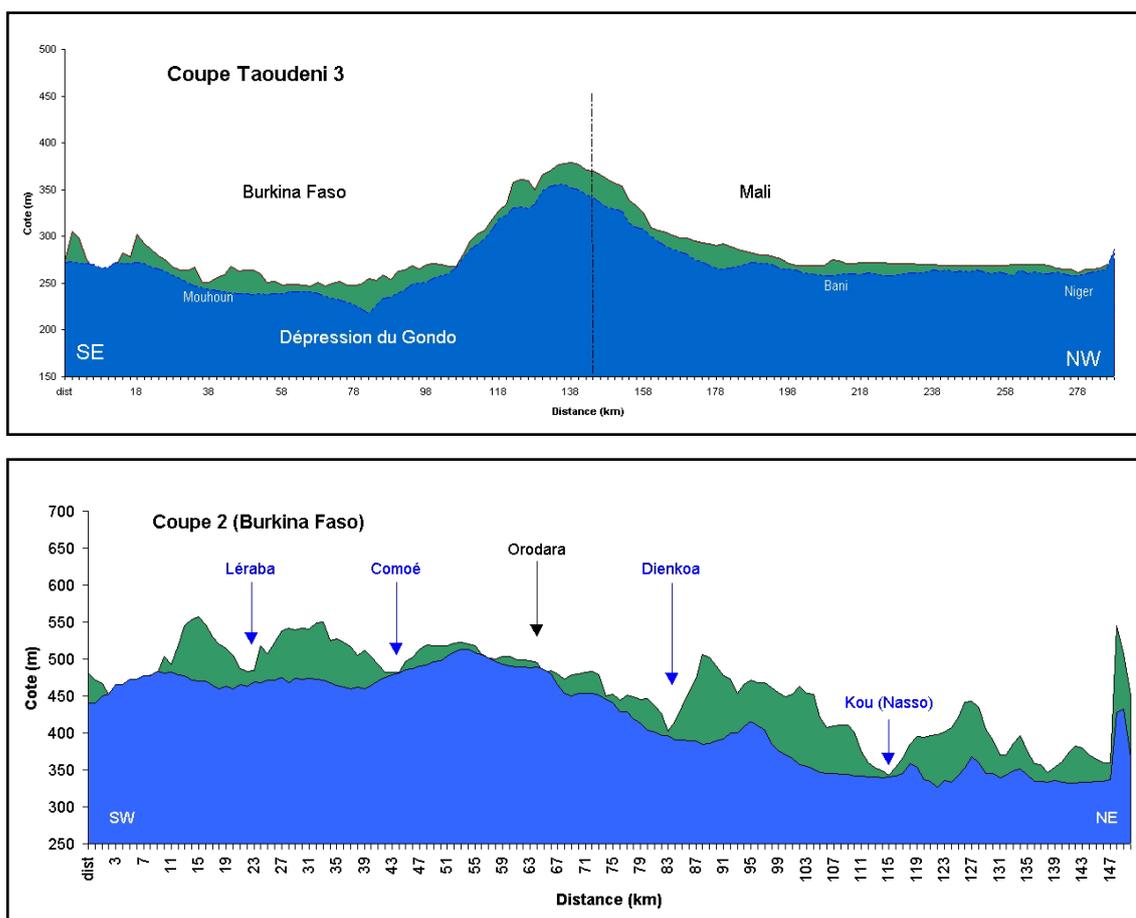


Figure 42 : Coupes hydrogéologiques de la bordure sud-est du bassin de Taoudeni (coupe 3) et du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso (coupe 2) (adapté de Derouane 2007, VREO)

La coupe Taoudeni 3 permet de visualiser le comportement hydrogéologique de l'extrémité de la zone d'étude au Burkina Faso au niveau de la plaine du Gondo, la falaise de Bandiagara qui constitue une crête hydrogéologique majeure, et enfin la plaine du Niger dont les niveaux piézométriques sont supérieurs à la dépression du Gondo.

La coupe 2 (Burkina Faso) permet de visualiser la zone d'alimentation potentielle des sources de Nasso, qui comme on peut le constater dépasse probablement très largement les limites du bassin versant du Kou et

peuvent atteindre la région d'Orodara. En effet, l'allure piézométrique laisse supposer des écoulement bi-modaux, avec une composante superficielle qui suit approximativement la topographie au niveau des différents sous-bassins, et une composante majeure plus profonde qui peut au niveau d'un gradient régional SO-NE présenter des écoulements dirigés depuis les hauts reliefs de la région de Orodara vers les sources de Nasso.

F.6.3.2. Suivi et évolution des niveaux de nappe

Les données temporelles permettant le suivi des niveaux de nappe ont été collectées et capitalisées, à partir des ouvrages (piézomètres pour la plupart) faisant l'objet (ou ayant fait l'objet par le passé) d'un suivi périodique. Ces données sont intégrées à la BD-OMES, et une extraction a été réalisée pour les ouvrages de suivi situés dans la zone du sédimentaire de l'ouest.

Les bases de données consolidées et capitalisées sont celles relatives à l'étude ERES (SOGREAH 1994), au programme RESO (1998), au programme VREO (2008), au projet PESO (2010), ainsi qu'aux réseaux de suivi actuels que sont le réseau piézométrique national (RPN, DEIE) et le réseau piézométrique de l'AEM.

La capitalisation des données relatives à ces deux réseaux de suivi, lesquels sont actuellement opérationnels, est détaillée dans les sous-sections qui suivent.

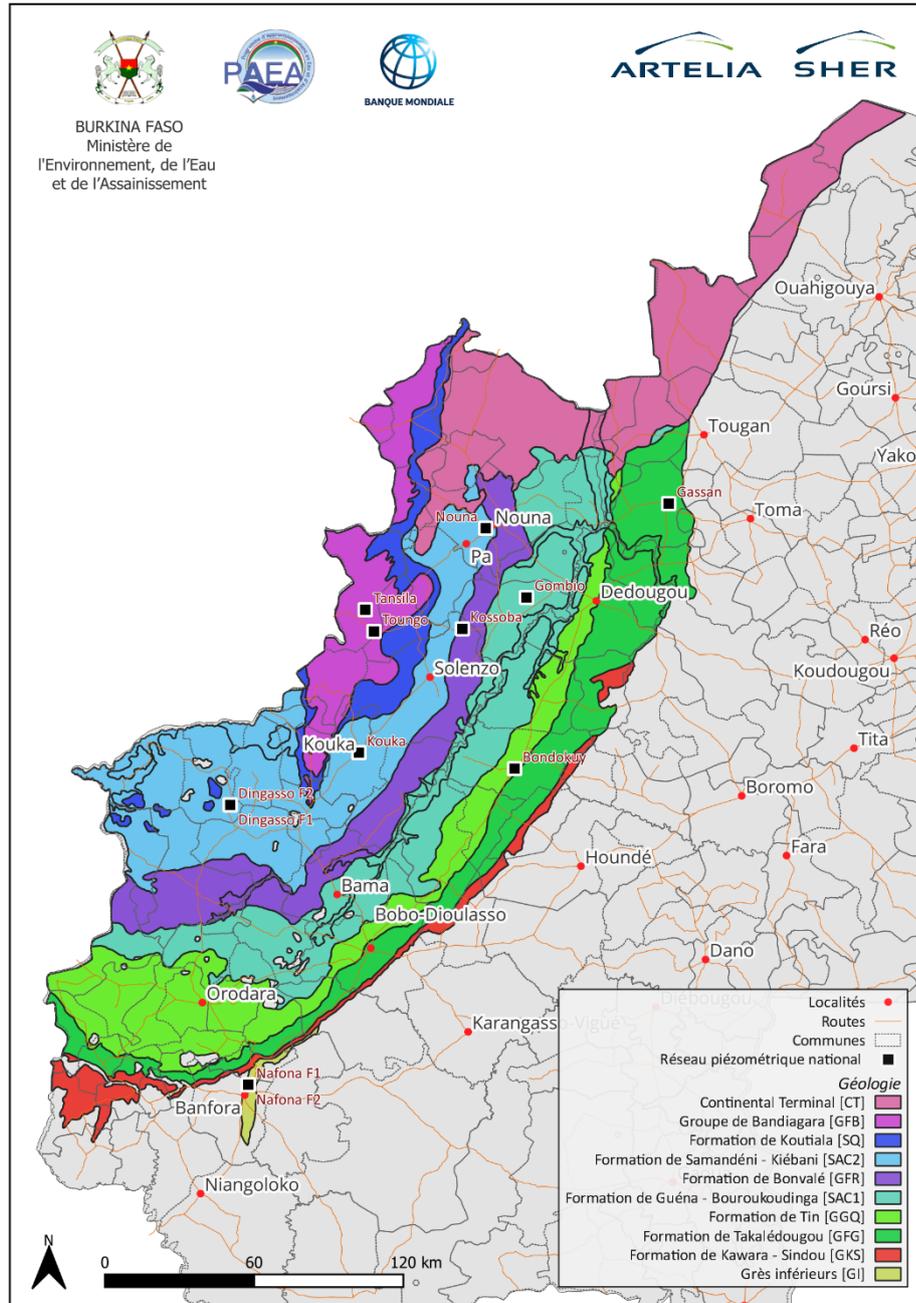
F.6.3.2.1. Réseau piézométrique national (RPN – DEIE)

Au total, on dénombre 12 piézomètres du RPN dans le sédimentaire de l'ouest, répartis dans 10 sites distincts. Le tableau repris ci-après présente les principales caractéristiques de ces piézomètres.

Nom	Formation	Date min	Date max	NS min (m)	NS max (m)	NS moy (m)	Nbre data
Bondokuy	GGQ	10-12-04	24-11-20	15.28	17.55	16.30	936
Dingasso F1	SAC2	18-08-89	28-11-20	0.02	4.74	2.05	1125
Dingasso F2	SAC2	18-08-89	28-11-20	0.02	4.77	2.03	1155
Gassan	GFG	15-12-04	30-11-20	0.33	13.93	11.34	1086
Gombio	SAC1	13-12-04	30-11-20	6.06	17.22	12.56	893
Kossoba	GFR	09-12-04	29-11-20	3.36	8.14	5.83	1191
Kouka	SAC2	09-12-04	29-11-20	10.27	18.30	14.84	953
Nafona F1	GI	01-12-85	29-11-20	1.36	11.88	8.75	1058
Nafona F2	GI	01-12-85	29-11-20	1.40	12.13	8.94	983
Nouna	SAC2	21-02-05	30-11-20	0.66	7.48	4.16	1196
Tansila	GFB	21-02-05	29-11-20	7.11	15.33	10.27	992
Toungo	GFB	18-11-08	30-11-20	1.92	9.50	6.41	652

Tableau 9 : Piézomètres du RPN localisés dans le sédimentaire de l'ouest

La carte reprise ci-après illustre la localisation des sites du RPN situés dans le sédimentaire de l'ouest.



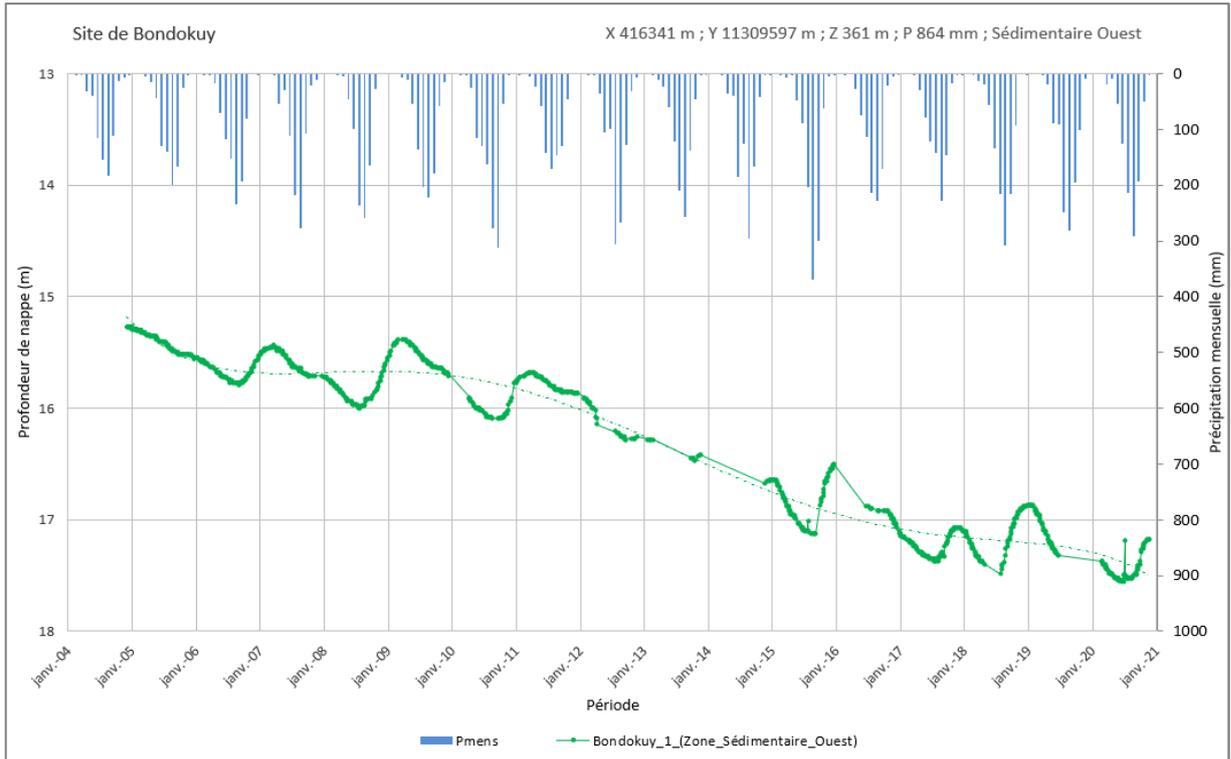
Source : DEIE, IGB, BUMIGEB, ARTELIA-SHER

Figure 43 : Carte du réseau piézométrique national (partie sédimentaire de l'ouest)

Les valeurs mesurées les plus anciennes datent de 1984, et le nombre total de mesures par piézomètre est compris entre 650 et 1.200 environ.

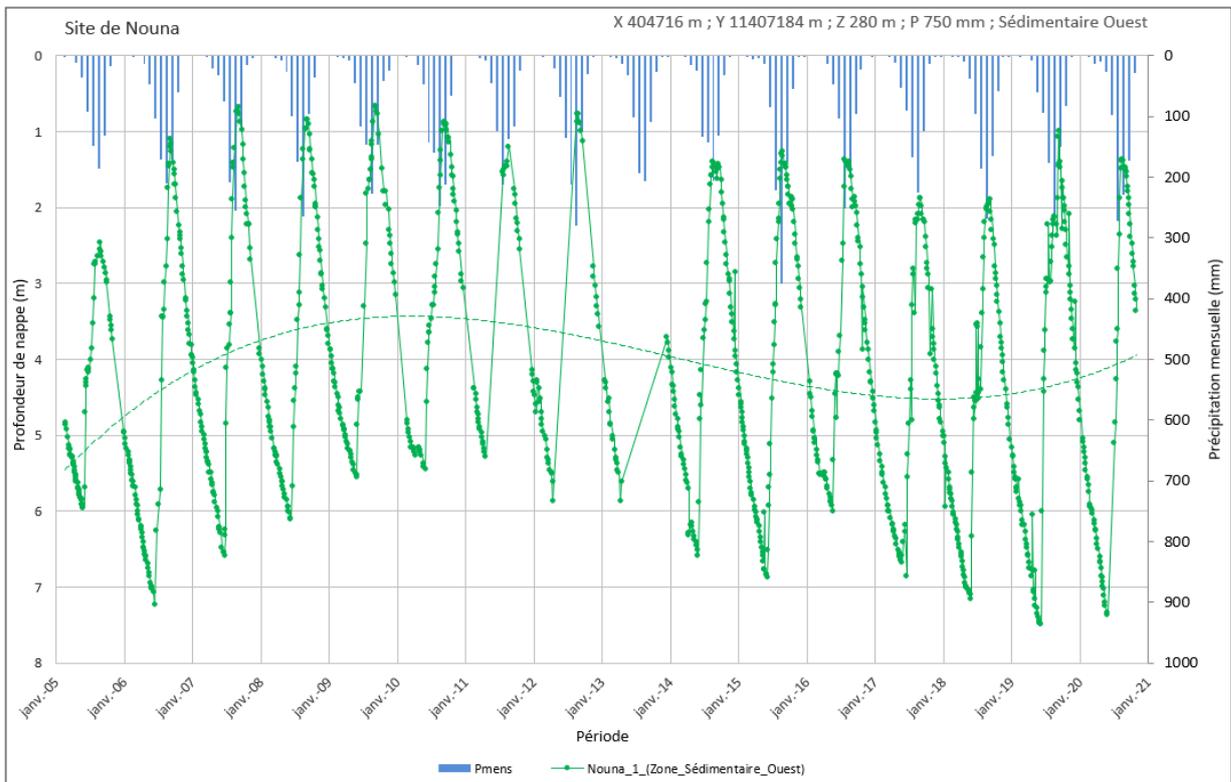
On notera globalement la faible densité de piézomètres du RPN dans la zone (1 pt/3.500 km²), et l'absence de piézomètre dans les formations GKS, GFB, SQ et CT.

A titre d'exemple, les figures ci-après illustrent les chroniques de niveaux piézométriques pour deux piézomètres du RPN (Bondokuy et Nouna), ainsi que la pluviométrie mensuelle associée. De tels graphiques sont réalisés pour l'ensemble des points du RPN.



Source : DEIE, ANAM, ARTELIA-SHER

Figure 44 : Chronique piézométrique et pluviométrique du site RPN de Bondokuy



Source : DEIE, ANAM, ARTELIA-SHER

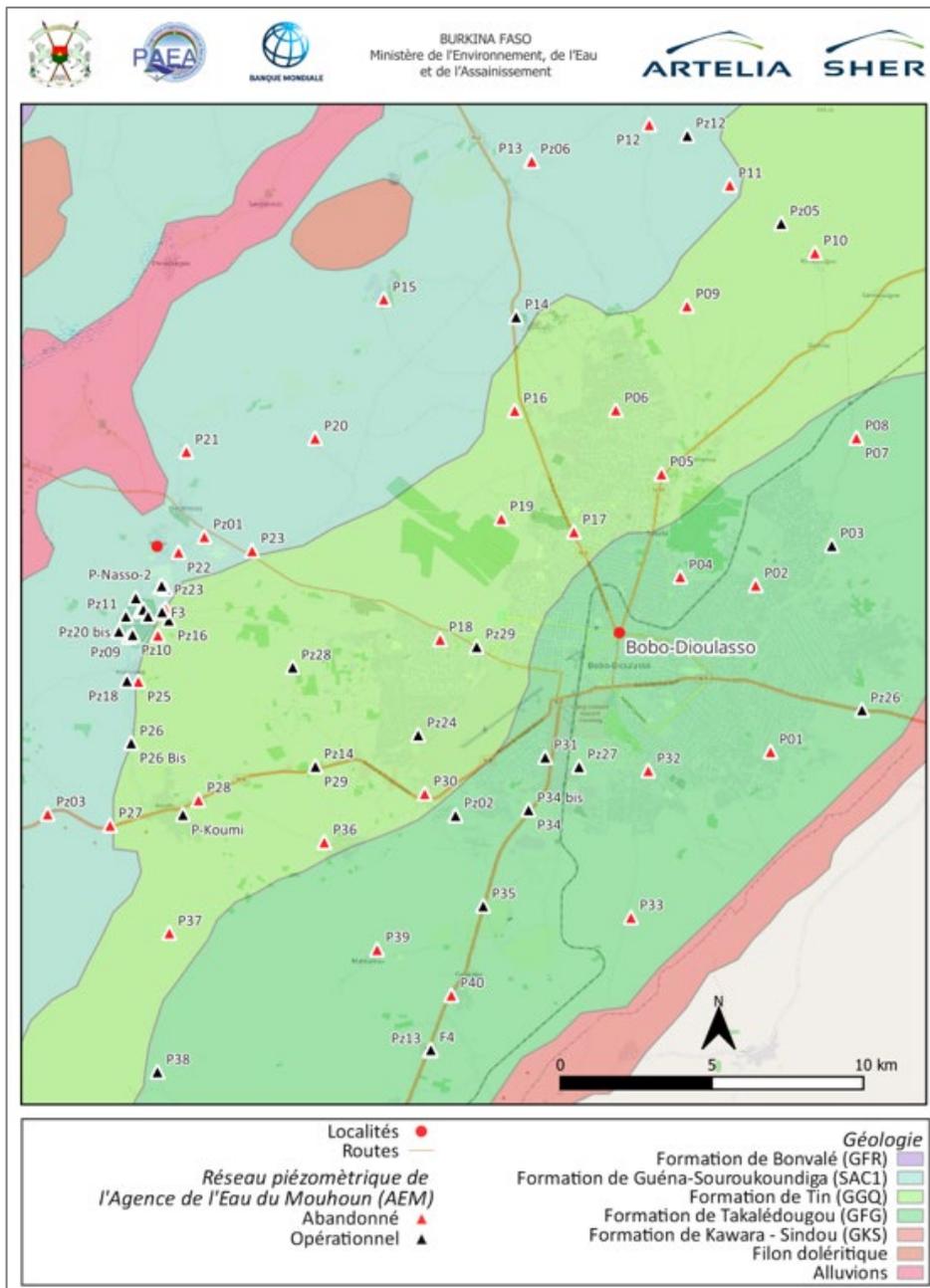
Figure 45 : Chronique piézométrique et pluviométrique du site RPN de Nouna

F.6.3.2.2. Réseau piézométrique de l'AEM

La carte reprise ci-après illustre la localisation des sites du réseau piézométrique de l'AEM situés dans le sédimentaire de l'ouest. Elle reprend également les piézomètres abandonnés pour lesquels des données sont disponibles et capitalisées, issues des différents projets réalisés dans la zone (ERES SOGREA, RESO, VREO, PESO).

La zone concernée est située autour de la ville de Bobo Dioulasso, principalement dans le bassin du Kou.

On dénombre 78 piézomètres répertoriés, dont 34 sont toujours opérationnels et relevés, les 44 autres étant abandonnés (bouchés, inaccessibles, etc.).



Source : DEIE, IGB, BUMIGEB, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 46 : Localisation des piézomètres opérationnels du réseau de suivi AEM et des piézomètres abandonnés localisés dans la zone

Le tableau ci-après reprend la liste et les caractéristiques principales des piézomètres opérationnels et suivis, intégrés au réseau piézométrique de l'AEM. Les données les plus anciennes datent des années 1993-94.

La plupart des piézomètres sont situés dans les formations GFG, GGQ et SAC1, s'agissant des trois formations géologiques rencontrées dans la zone concernée.

Nom	Formation	Date min	Date max	NS min (m)	NS max (m)	NS moy (m)	Nbre data
F4	GFG	12-08-94	28-05-21	16.81	22.28	19.07	166
P03	GFG	08-11-87	28-05-21	1.18	4.72	3.29	168
P14	SAC1	23-01-95	28-05-21	83.57	87.44	85.34	153
P26Bis	SAC1	12-01-07	28-05-21	28.22	29.38	28.51	102
P31	GFG	24-01-95	28-05-21	18.78	22.53	20.62	161
P34bis	GFG	12-01-07	28-05-21	4.90	9.87	7.33	105
P35	GFG	06-09-94	28-05-21	11.80	16.43	14.28	172
Pkoumi	GGQ	27-06-18	28-05-21	25.05	26.55	25.57	16
PNaso1	SAC1	27-06-18	28-05-21	0.29	1.69	1.06	16
PNaso2	SAC1	27-06-18	28-05-21	0.61	2.09	1.50	16
PNaso3	SAC1	27-06-18	28-05-21	1.60	3.80	3.00	15
Pz02	GFG	06-09-94	28-05-21	3.65	7.95	6.35	161
Pz05	GGQ	30-08-94	28-05-21	10.98	12.96	12.12	174
Pz07bis	SAC1	22-07-93	28-05-21	0.86	2.81	2.07	158
Pz08	SAC1	23-11-93	28-05-21	0.10	0.92	0.40	170
Pz10	SAC1	22-07-93	28-05-21	4.00	4.68	4.29	177
Pz11	SAC1	22-07-93	28-05-21	8.19	9.56	9.03	171
Pz12	SAC1	30-08-94	29-04-21	16.69	20.77	19.34	169
Pz15	GGQ	06-08-93	28-05-21	4.14	7.26	5.61	172
Pz16	GGQ	27-07-93	28-05-21	4.31	9.24	7.27	180
Pz18	SAC1	22-07-93	28-05-21	18.77	19.95	19.28	171
Pz20bis	SAC1	22-07-93	28-05-21	11.60	12.60	11.99	166
Pz22	SAC1	26-07-93	28-05-21	8.71	9.82	9.36	178
Pz23	SAC1	22-07-93	28-05-21	2.70	6.81	4.19	166
Pz29	GGQ	30-04-08	28-05-21	58.74	66.43	63.30	84

Source : AEM, PESO

Tableau 10 : Piézomètres opérationnels du réseau de suivi AEM

A titre d'exemple, les figures ci-après illustrent les chroniques de niveaux piézométriques pour deux piézomètres du réseau de suivi AEM (F04 et PZ22). De tels graphiques sont réalisés pour l'ensemble des points du réseau de suivi AEM, ainsi que pour les piézomètres abandonnés pour ce qui concerne les données historiques disponibles.

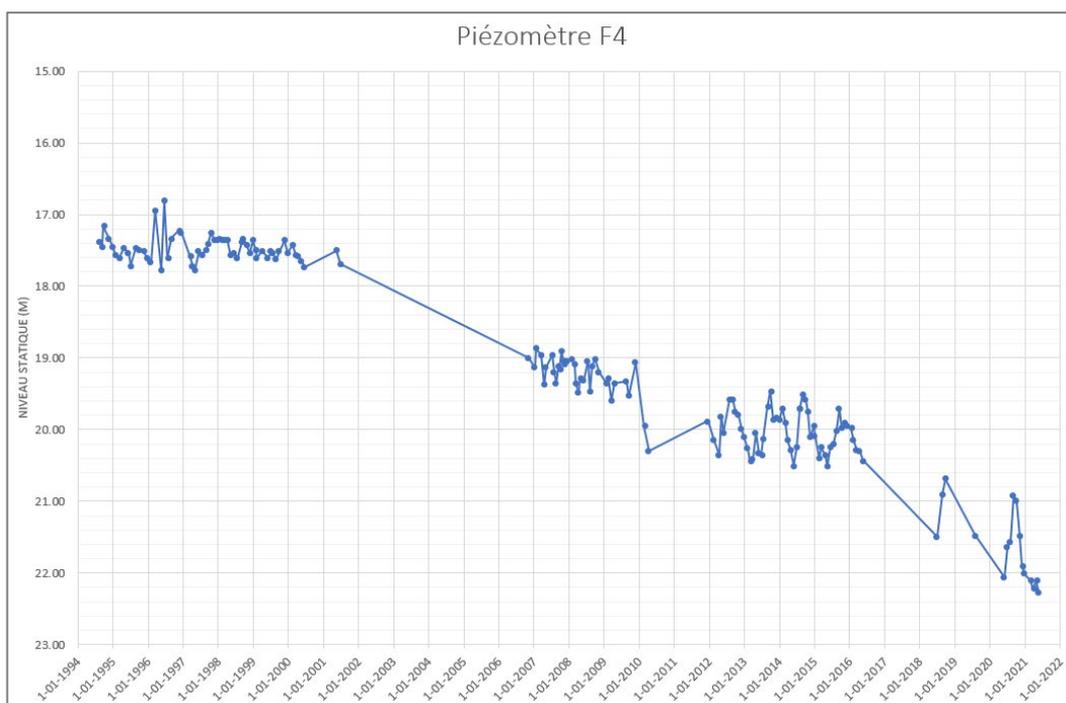


Figure 47 : Chronique de niveaux piézométriques du F4 (réseau AEM)

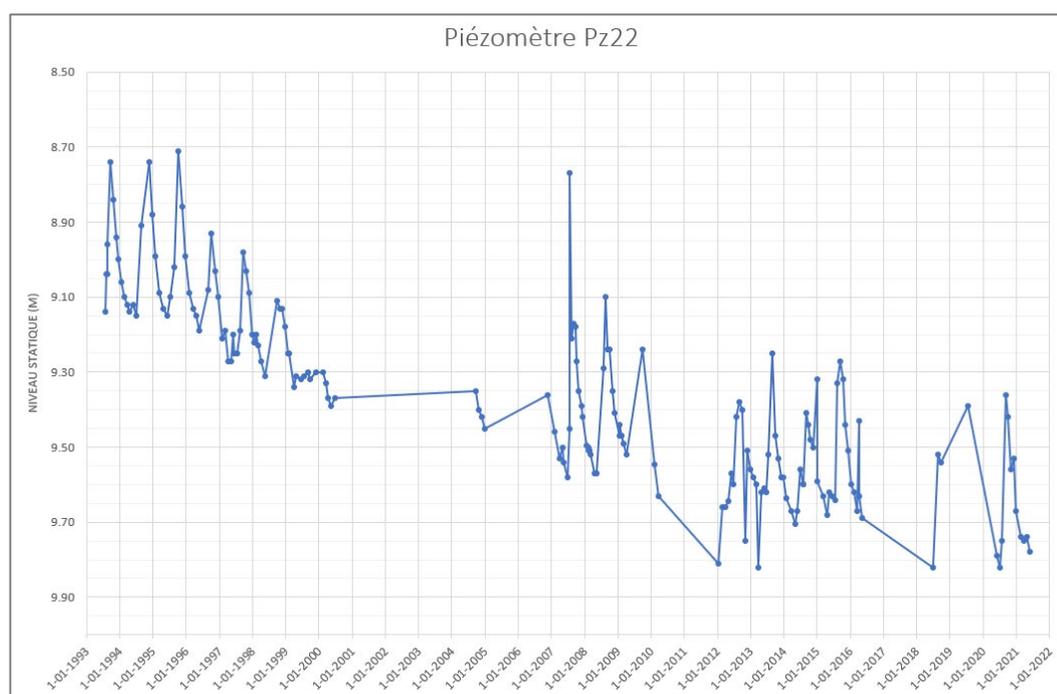


Figure 48 : Chronique de niveaux piézométriques du PZ22 (réseau AEM)

F.6.3.3. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

Les données d'entrée capitalisées pour la modélisation concernent tant les isopièzes (cartes piézométriques) que les chroniques de niveaux piézométriques. En effet, les simulations prévues en régime transitoire nécessiteront une paramétrisation et un calage reposant autant que possible sur des données temporelles.

Ainsi, la base de données BD-MOD a été alimentée par :

- L'extraction et la reprise des cotes piézométriques des ouvrages de la BD-OMES utilisés pour l'élaboration

des cartes piézométriques ;

- Les courbes isopièzes et les rasters de piézométrie, générés à partir des données ponctuelles ;
- La localisation des piézomètres, et les séries temporelles de niveaux statiques, issues des réseaux de suivi DEIE, AEM et historiques (ERES, RESO, VREO, PESO)

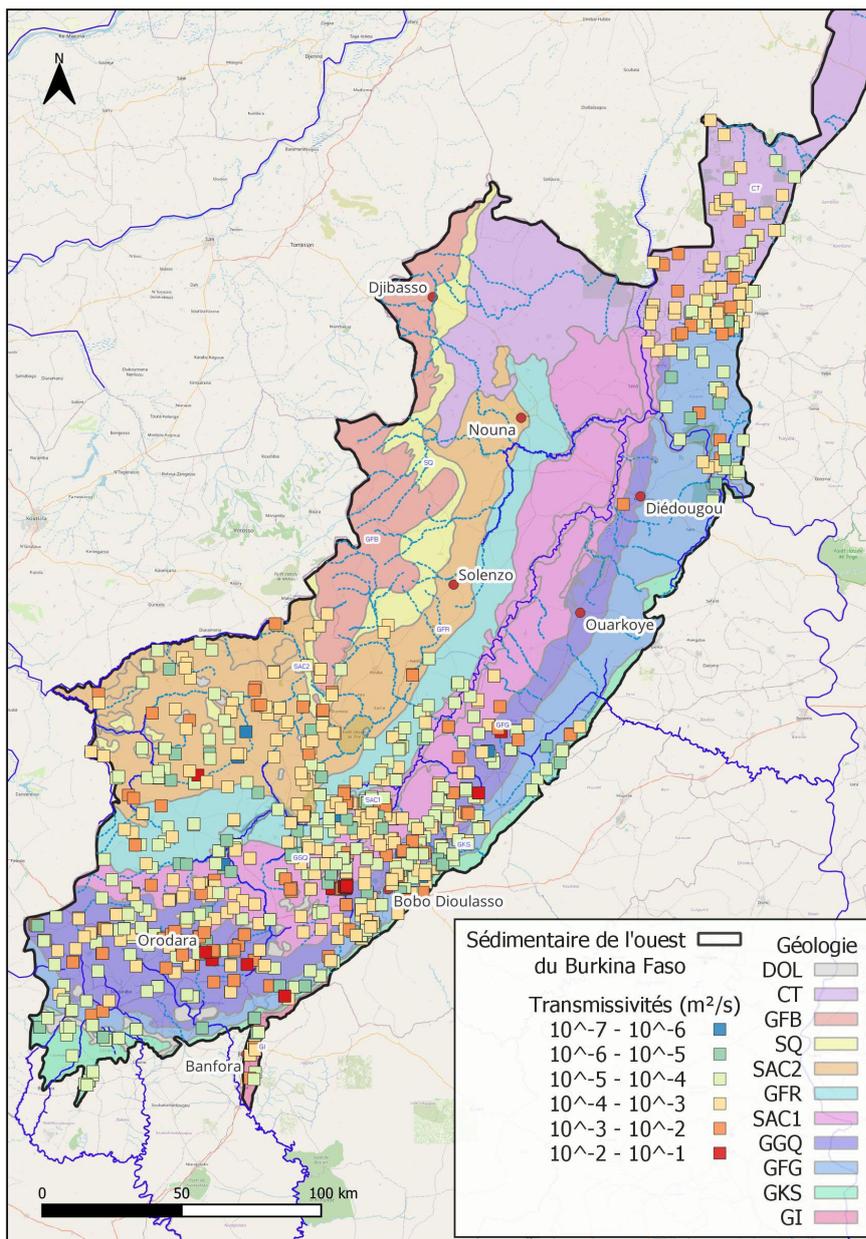
F.6.4. Paramètres hydrodynamiques

Les principaux paramètres hydrodynamiques utiles en relation avec la modélisation en régime transitoire des écoulements en milieu saturé sont la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

Un important travail de collecte et d'encodage de données a été réalisé par le groupement ARTELIA-SHER dans le cadre de la présente étude, étant donné que ces paramètres ne sont pas repris dans les bases de données du MEEA. La capitalisation de ces données, de manière globalisée au sein de la BD-MOD, offre d'intéressantes perspectives d'exploitation sur une base totalement spatialisée à partir d'un nombre significatif de données.

F.6.4.1. Transmissivités

La carte reprise ci-après illustre la distribution spatiale des valeurs de transmissivités, issues de résultats d'essais de pompage dont les données ont pu être collectées et exploitées.



Source : DEIE, IGB, BUMIGEB, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 49 : Distribution spatiale des transmissivités

Au total, les données de transmissivité de 965 points distincts (forages) situés dans le sédimentaire de l’ouest ont été capitalisées. Elles proviennent principalement des projets/programmes ERES SOGREA, RESO, VREO, PESO, PN-AEPA et BADEA, ainsi que de données collectées auprès des DREEA, des agences de l’eau, de la DEIE et de l’ONEA.

Les données de transmissivité reposent sur des interprétations d’essais de pompage réalisés, en fonction des projets et études concernés, selon les méthodes d’essai par paliers (enchainés ou non), d’essai de type CIEH, et d’essai longue durée. Un fichier reprenant l’ensemble des points capitalisés, les résultats des essais et la mention du type d’essai et interprétation, a été constitué et fait partie des annexes numériques du présent rapport.

Les tableaux et graphiques ci-après reprennent de manière synthétique les principaux résultats par formation géologique.

Formation	Transmissivités (m ² /s)			Nombre pts
	Moyenne	Min	Max	
CT	4.3E-04	3.7E-06	2.0E-03	64
GFB	6.0E-04	3.9E-04	8.0E-04	2
GFG	4.7E-04	1.0E-06	1.0E-02	177
GFR	6.7E-04	2.6E-06	2.0E-02	85
GGQ	2.4E-03	1.0E-06	6.0E-02	234
GI	4.3E-04	5.6E-06	1.4E-03	14
GKS	1.5E-04	3.0E-06	2.7E-03	25
SAC1	2.1E-03	6.1E-07	7.4E-02	248
SAC2	8.3E-04	8.3E-07	2.2E-02	105
SQ	1.4E-03	3.8E-05	8.0E-03	11

Tableau 11 : Statistiques de transmissivités par formation géologique

On observe des transmissivités moyennes par formation de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m²/s. Les plus élevées (moyennes # 10^{-3} m²/s) étant rencontrées dans le GGQ et le SAC1, en parfaite concordance avec la forte productivité et les débits très élevés rencontrés dans ces deux formations. Les valeurs individuelles (par forage) les plus élevées sont de l'ordre de 1 à 5×10^{-2} m²/s, rencontrées principalement dans le GGQ, le SAC1 et le SAC2.

Le graphique ci-après illustre ces statistiques par formation (échelle logarithmique).

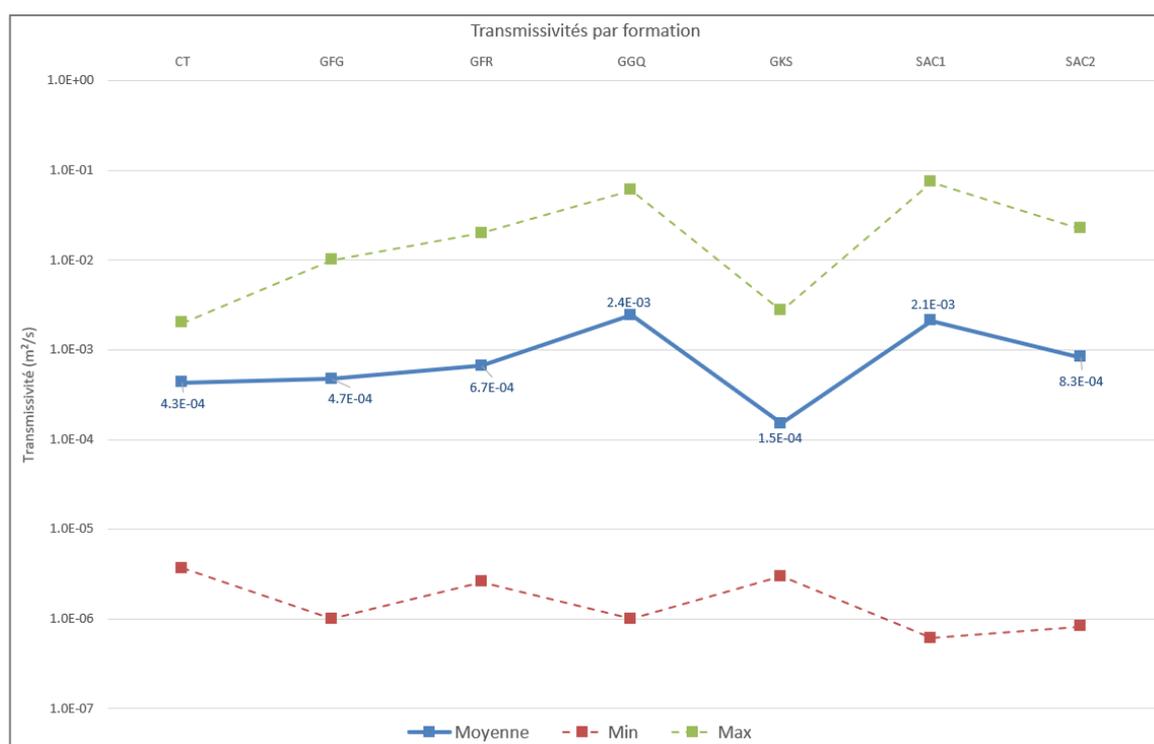


Figure 50 : Statistiques de transmissivités par formation géologique

Le tableau et le graphique ci-après illustrent la distribution de la transmissivité par classe de valeur (logarithmique) et par formation.

Formation	T (m ² /s) : % par classe						Nombre points
	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁶	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ à 10 ⁻³	10 ⁻³ à 10 ⁻²	10 ⁻² à 10 ⁻¹	
CT	0%	2%	19%	64%	16%	0%	64

GFB	0%	0%	0%	100%	0%	0%	2
GFG	0%	15%	40%	34%	11%	1%	177
GFR	0%	7%	44%	40%	8%	1%	85
GGQ	0%	8%	29%	38%	21%	5%	234
GI	0%	7%	36%	36%	21%	0%	14
GKS	0%	24%	68%	4%	4%	0%	25
SAC1	1%	13%	31%	39%	10%	6%	248
SAC2	1%	10%	30%	41%	17%	1%	105
SQ	0%	0%	18%	55%	27%	0%	11

Tableau 12 : Distribution de la transmissivité par classe de valeur (logarithmique) et par formation

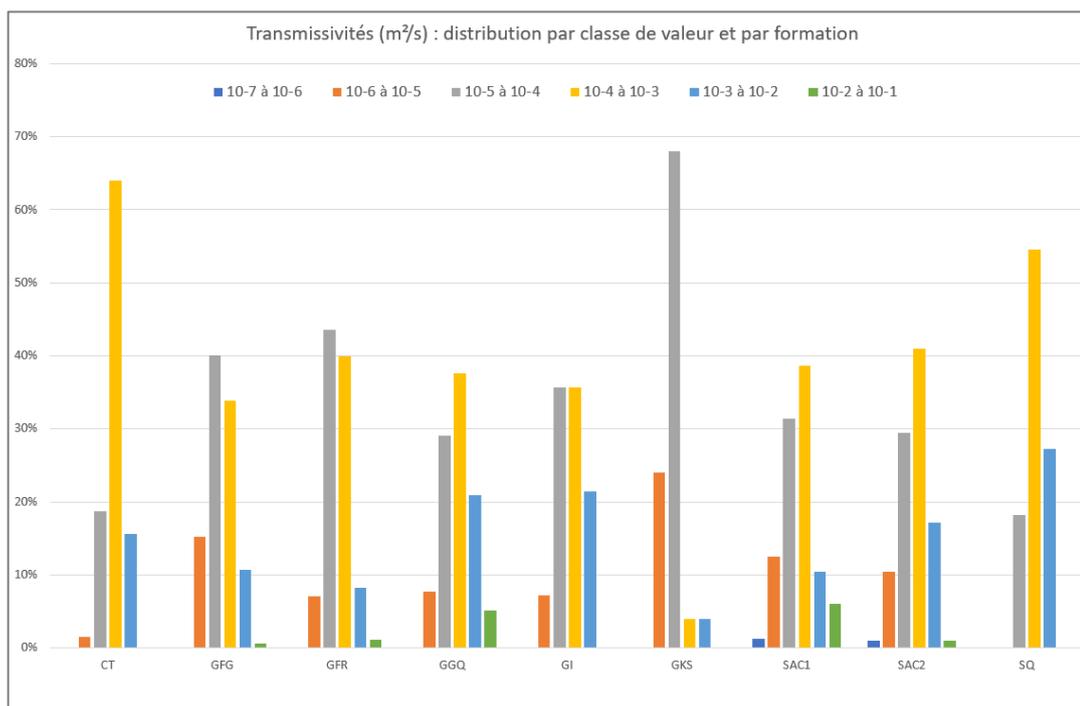


Figure 51 : Distribution de la transmissivité par classe de valeur (logarithmique) et par formation

F.6.4.2. Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement constitue indiscutablement le paramètre hydrogéologique pour lequel les données disponibles sont les moins nombreuses sur la zone du sédimentaire de l'ouest, à l'instar de l'ensemble du Burkina Faso d'ailleurs. En effet, l'acquisition de ce type de donnée sur le terrain nécessite la réalisation d'essais de pompage dans les règles de l'art avec mesures de rabattement en régime transitoire dans (au minimum) un ouvrage distinct du point de pompage. Ce type de mode opératoire, nécessitant la présence de points d'observation et la prise de mesures dans ceux-ci, est peu couramment mis en œuvre dans le cadre des programmes d'hydraulique rurale qui sont pour la plupart à l'origine de la grande majorité des données hydrogéologiques disponibles.

Les valeurs sont reprises dans le tableau ci-après. Elles restent à prendre avec toutes les précautions d'usage, les graphiques d'interprétation des essais de pompage concernés ainsi que les méthodes de calcul n'étant pas toujours disponibles.

Code / nom	X_UTM	Y_UTM	Coeff emmagas.	Formation
PZ Kangala	256089	1213328	0.0368	GGQ
Forage BOAD (PZ Darsalami)	350648	1221149	0.00381	GFG

97/RESO/140	265363	1227551	0.00261	GGQ
Satiri Piézo	386656	1264383	0.00226	GGQ
F3 (ERES)	343423	1237507	0.00055	SAC1
Pz15	343476	1237469	0.00055	GGQ
Pz13	352264	1222917	0.00015	GFG
P13	352334	1223145	0.0001	GFG
FORAGE BOAD (PZ)	247559	1225841	0.000035	GGQ
97/RESO/263	280278	1215616	0.0000292	GGQ

Tableau 13 : Données disponibles de coefficients d'emmagasinement

Les valeurs, disponibles pour les formations GGQ, SAC1 et GFG, sont comprises entre 3×10^{-5} et 3×10^{-2} . Elles sont caractéristiques de nappes libres à semi-captives.

Une consolidation du jeu de données pour ce type de paramètre semble recommandée. En ce sens, une poursuite de la collecte et de la capitalisation de données additionnelles possiblement existantes sera mise en œuvre dans le cadre de la poursuite des activités concernant le sédimentaire de l'ouest.

F.6.4.3. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

Les données de transmissivité de 965 points distincts (forages) situés dans le sédimentaire de l'ouest, ainsi que les données de coefficient d'emmagasinement, ont été capitalisées. Elles proviennent principalement des projets/programmes BOAD, ERES SOGREA, RESO, VREO, PESO, PN-AEPA et BADEA, ainsi que de données collectées auprès des DREEA, des agences de l'eau, de la DEIE et de l'ONEA.

L'ensemble des données de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement ont été intégrées à la BD-MOD, de manière spatialisée.

Pour ce qui concerne la transmissivité, les valeurs statistiques ont également été intégrées par formation à la BD-MOD.

En première approche de modélisation, et avant toute calibration, les données de transmissivité moyennes par formation sont introduites au niveau des différents matériaux du modèle solide (*GMS > material properties*). Une spatialisation intégrant une différenciation au sein de formations sera réalisée dans le cadre de la poursuite des activités de modélisation hydrogéologique (paramétrisation fine et calage).

F.6.5. Recharge

F.6.5.1. Présentation générale

L'évaluation de la recharge des aquifères du sédimentaire de l'ouest est réalisée d'une part par la réalisation d'une synthèse des évaluations existantes (littérature de la zone d'étude), et d'autre part par approche bilantaire spatialisée. Cette dernière permet en effet une évaluation à la fois temporelle et spatialisée, utile pour la paramétrisation discrétisée de la recharge sur l'ensemble de la zone modélisée et pour la réalisation de simulations en régime transitoire.

F.6.5.1.1. Synthèse des évaluations existantes de la recharge dans la zone du sédimentaire de l'ouest

La zone du sédimentaire de l'ouest a déjà fait l'objet de plusieurs évaluations de la recharge, au niveau de différents projets et d'études scientifiques. On citera notamment l'étude SOGREA (ERES 1994), la thèse de

Dr Dakouré (2003), le programme VREO (Derouane, 2008), la thèse de Dr Sauret (2013), la thèse de Dr Tirogo (2016), et la thèse de Dr Kouanda (2019).

Les principaux résultats de ces évaluations, ainsi que les extensions spatiales concernées, sont repris dans le tableau présenté ci-après.

Zone d'étude	Auteur	Méthode	Échelle temporelle	Échelle spatiale	Données utilisées	Recharge (mm/an)
Bassin sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso	Sogreah Ingénierie	Bilan hydrique	1930-1940	Bassin versant du Kou	Pluie, RFU, ETR, Ruis, ΔS	248
Bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (BURKINA FASO - MALI)	Denis Dakouré	Bilan de Thornthwaite	1981-1990	Bassin versant du Kou	Pluie, RFU, ETR, Ruis, ΔS	75 à 120
		Cubature des variations piézométriques	1997-1998	Bassin versant du Kou	Données piézométriques, porosité de drainage	16
		Modèle hydrologique à réservoirs (O'Donnell)	1961-1991	Bassin versant de Kou	P, ETP, Ruis, Qbase	127
		Modélisation hydrodynamique des écoulements souterrains	1995 à 1999	Bassin de Taoudéni (1/3 au Burkina Faso + 2/3 au Mali)	Géométrie du réservoir, les conditions aux limites et les paramètres structuraux du système aquifère	0 à 47
Bassin du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso	Johan Derouane	Modélisation hydrogéologique – Modflow 2000	2005 - 2008	Zone sédimentaire de l'Ouest	-	-
Portion du bassin du Kou	Elie Serge Gaëtan SAURET	Bilan hydrique selon ETP Thornthwaite	1961-2010	Portion du bassin du Kou	Pluie, RFU, ETR, Ruis, ΔS	6 à 119
		Bilan hydrique selon FAO 56 de Penman- Monteith	1961-2011	Portion du bassin du Kou	Pluie, RFU, ETR, Ruis, ΔS	2.3 à 62
Bassin du Kou	Justine Tirogo	Bilan hydrique selon ETP Thornthwaite	1961-2014	Bassin versant du Kou	Pluie, RFU, ETR, Ruis, ΔS	79 à 202
		Fluctuations des niveaux piézométriques	1995 - 2014	Bassin du Kou	Piézomètres, porosité de drainage	4 à 105

Mouhoun supérieur-Sourou	Bouraiïma KOUANDA	4 modèles type filtre numérique récursif (Recursive Digital Filters = RDF)/ bilan hydrique	1960-2013	Mouhoun sup (Samendeni et Nwokuy)	Débit de base, conductivité électrique	38 à 52
		modélisation hydrologique (modèle SWAT)/ bilan hydrique	1963-2013	Mouhoun sup (Samendeni et Nwokuy)	Données d'occupation du sol, types de sol, topographiques, climatiques, hydrométriques	124 à 170

Tableau 14 : Synthèse des évaluations existantes de la recharge dans le sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso

F.6.5.1.2. Evaluation spatio-temporelle de la recharge par approche bilantaire

F.6.5.1.2.1. Approche méthodologique

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 de l'ANAM, 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 données globales de précipitations, en particulier, ont fait l'objet de traitements (données CHIRPS avec corrections de biais par CDT) afin d'être calées sur les données (mensuelles) des stations climatiques de l'ANAM.

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 pour les périodes mensuelles, annuelles, intermensuelles et interannuelles.

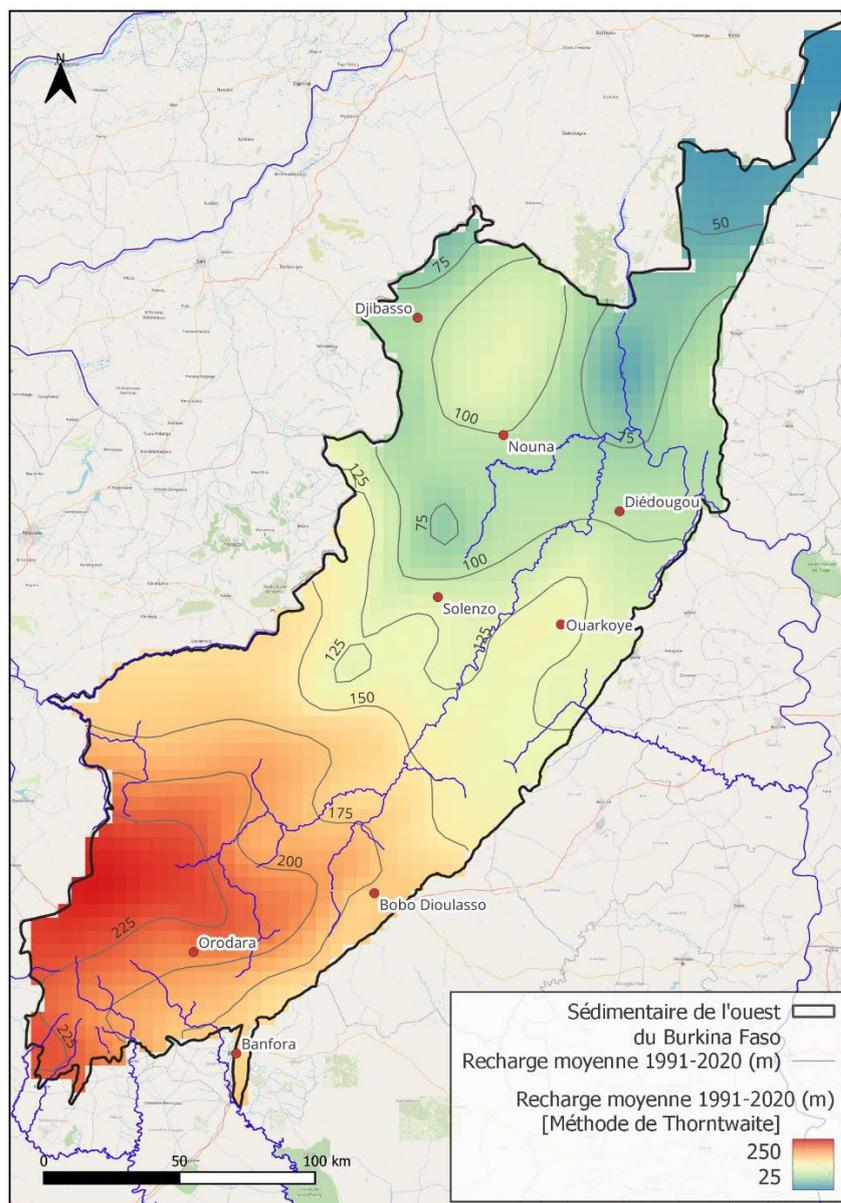
On notera que l'évaluation de la recharge des aquifères du Burkina Faso fait l'objet d'un rapport technique spécifique (RT1.3.1.), en cours d'élaboration. Le présent rapport ne reprend donc que les principaux éléments utiles en relation avec la modélisation, de manière synthétique, et ne se veut pas exhaustif sur le traitement de cette thématique de recharge des aquifères.

L'aspect « influence du changement climatique » et l'utilisation de modèles climatiques (variations de la pluviométrie et du bilan hydrologique) sont des éléments qui pourront être pris en compte dans l'élaboration de scénarios, étant donné leur impact sur la recharge sous l'influence de nombreux autres paramètres (profondeur de la nappe, occupation des sols, végétation, etc.).

F.6.5.1.2.2. 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).

La carte reprise ci-après illustre à titre d'exemple la distribution spatiale de la recharge interannuelle moyenne (période 1991-2020) selon la méthode bilantaire de Thorntwaite.

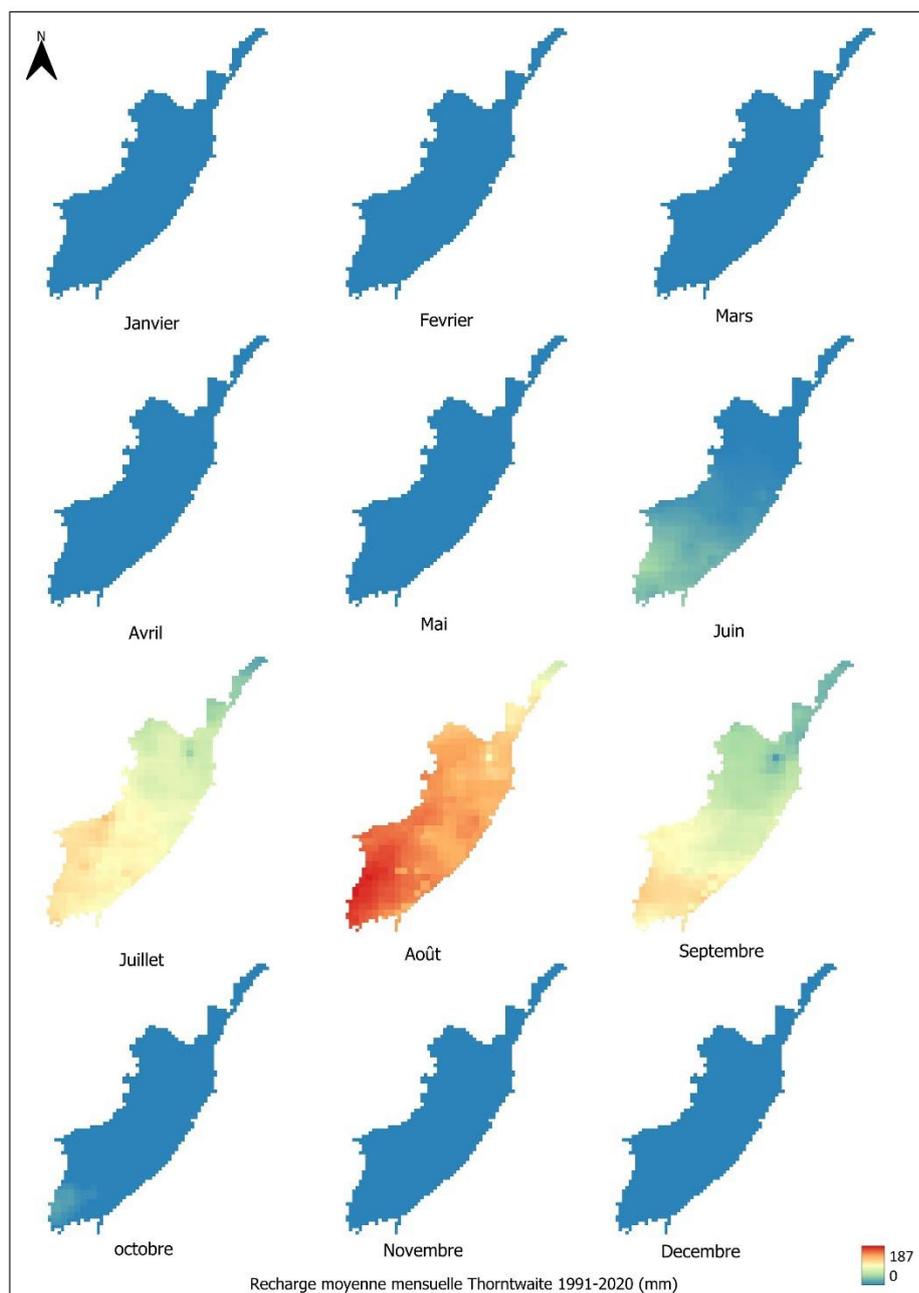


Source : ANAM, DEIE, IGB, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 52 : Carte de recharge spatialisée interannuelle moyenne sur la période 1991-2020 (méthode Thorntwaite)

Sur base de cette évaluation pluriannuelle moyenne, on observe un gradient spatial très marqué, avec des valeurs maximales de l'ordre de 200 à 250 mm/an localement dans la partie sud-ouest, et avec des valeurs minimales ne dépassant pas 25 mm/an à l'extrême nord de la zone sédimentaire. De manière générale, et quelle que soit la méthode bilantaire utilisée (méthodes de calculs des ETP et ETR), ce gradient SO-NE est observé.

La carte reprise ci-après illustre à titre d'exemple la distribution spatiale de la recharge intermensuelle moyenne sur la période 1991-2020 (valeurs intermensuelles moyennes illustrées de janvier à décembre).



Source : ANAM, FAO, ARTELIA-SHER

Figure 53 : carte de recharge spatialisée intermensuelle sur la période 1991-2020 (méthode Thorntwaite)

On observe, sur base mensuelle et selon cette méthode, une recharge débutant principalement en juillet, atteignant un maximum en août et se terminant en septembre.

A titre d'illustration, le graphique ci-dessous reprend la variation annuelle de la recharge sur la période 1991-2020 (méthode bilantaire Thorntwaite) pour les localités d'Orodara et de Nouna. On observe une forte variabilité annuelle, liée aux conditions météorologiques dont essentiellement les précipitations. Les valeurs moyennes sur cette période sont de 200 mm environ pour Orodara, et 100 mm environ pour Nouna.

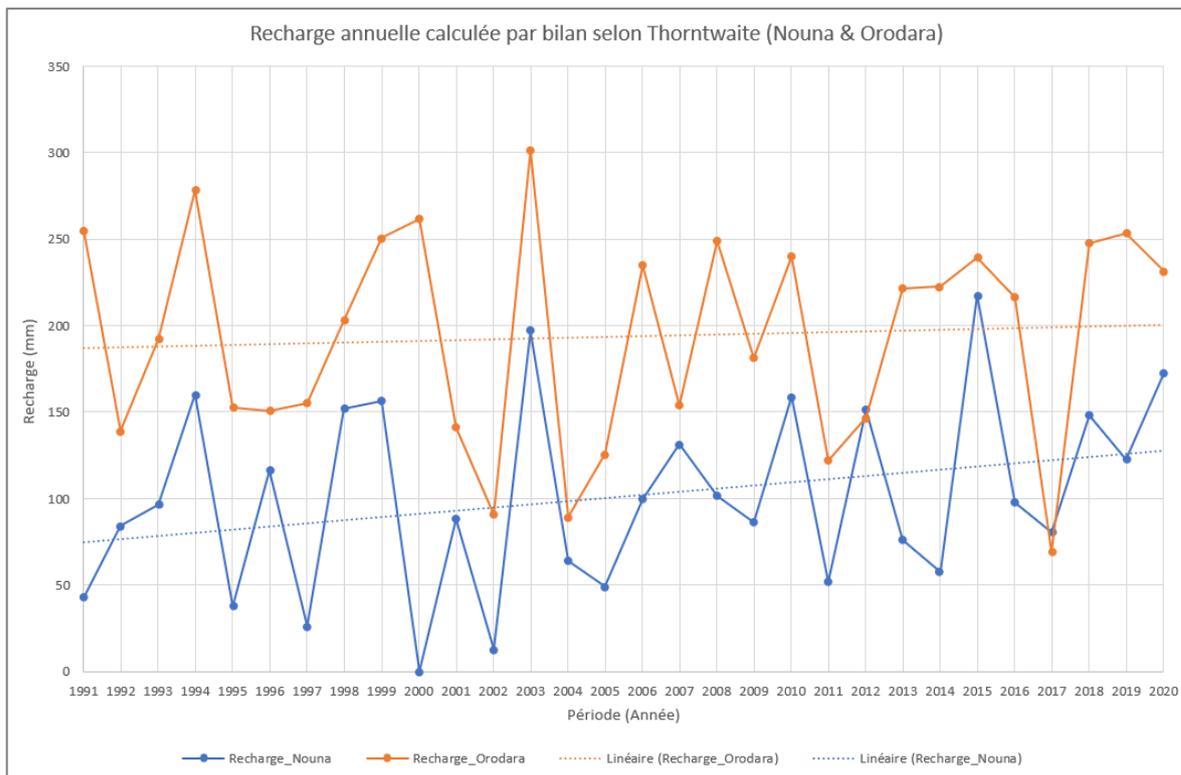


Figure 54 : Recharge annuelle (méthode Thorntwaite) à Orodara et à Nouna sur la période 1991-2020

Le graphique ci-après reprend, pour ces deux localités, les valeurs mensuelles moyennes de la période 1991-2020. On y observe la période de recharge couvrant les mois de juillet à septembre principalement, avec un maximum au mois d'août.

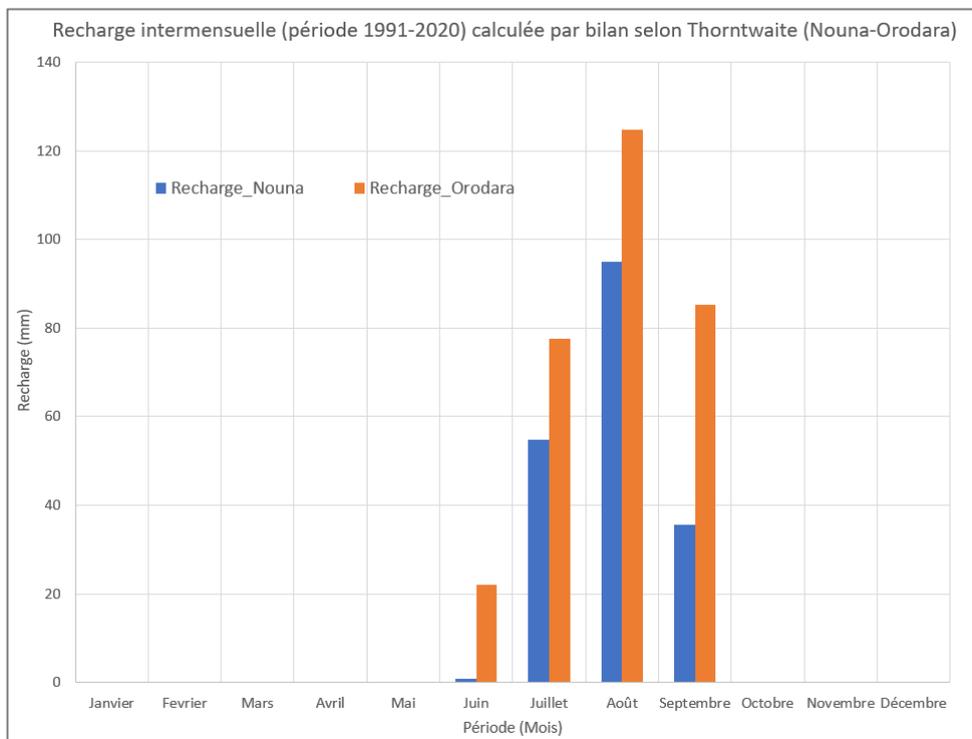


Figure 55 : Recharge mensuelle moyenne (méthode Thorntwaite) à Orodara et Nouna

F.6.5.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

Les évaluations de la recharge par approche bilantaire spatialisée ont permis de générer un jeu de données complet, intégré à la BD-MOD, constitué pour chaque méthode d'évaluation de :

- Rasters mensuels de recharge pour la période 1991-2020 (soit 30 x 12 raster)
- Rasters annuels de recharge pour la période 1991-2020 (soit 12 raster)
- Rasters interannuels et intermensuels sur différentes périodes (1991-2020, 2011-2020)
- Transformation des rasters en polygones pour intégration au module MAP de GMS
- Production de statistiques zonales à partir des rasters.

En outre, les paramètres intermédiaires (P, ETP, ETR, RFU, EU, RUISS) intervenant dans l'approche bilantaire spatialisée ont également été capitalisés sous les mêmes formats spatialisés et temporels que ceux repris ci-avant.

L'ensemble des produits issus de cette approche sera largement décrit et capitalisé, à l'échelle du Burkina Faso, dans le cadre du rapport technique RT1.3.1. (rédaction en cours) relatif à l'évaluation de la recharge des aquifères du Burkina Faso.

F.7. Sources

F.7.1. Présentation générale

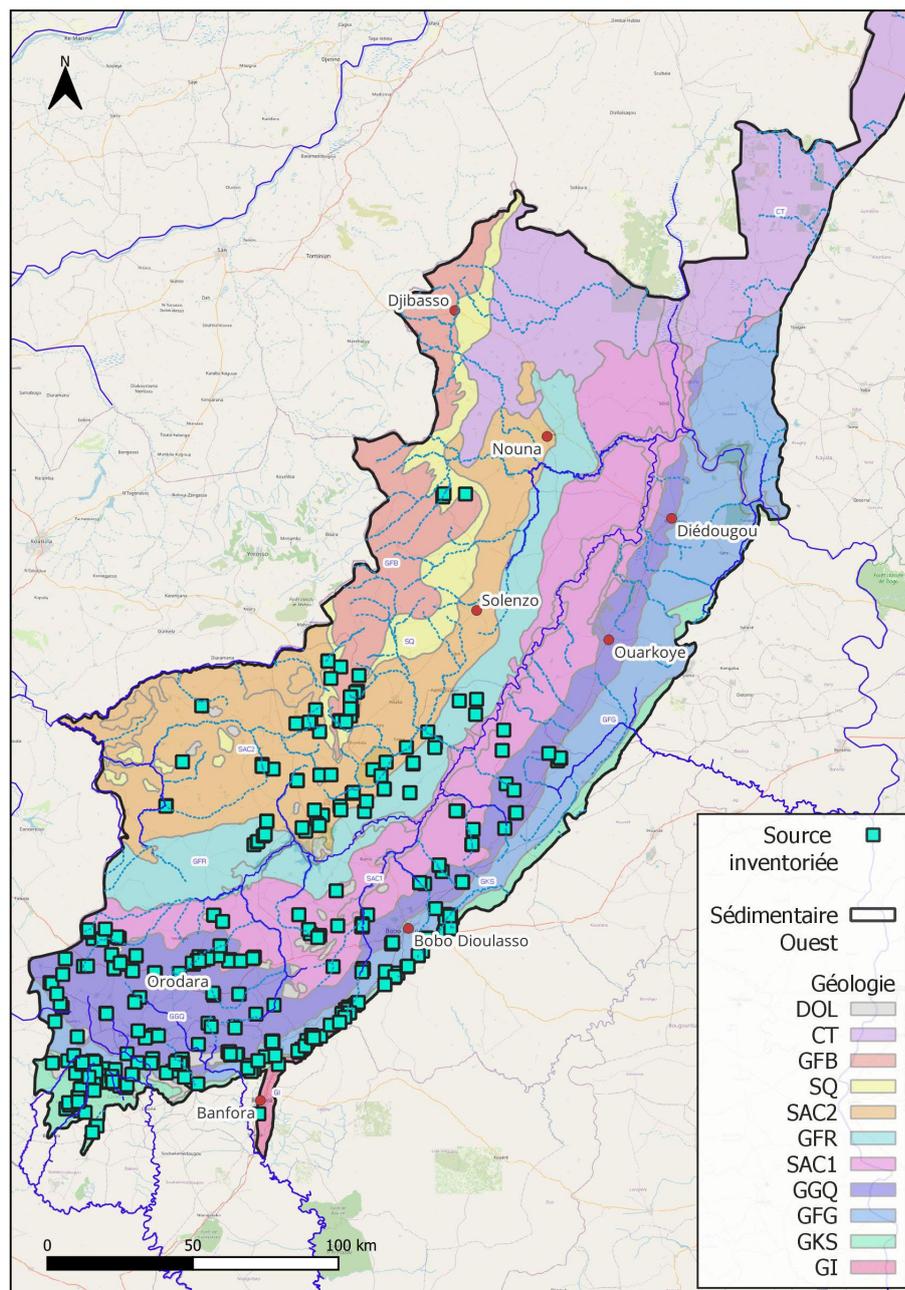
F.7.1.1. Sources du sédimentaire de l'ouest

De nombreuses sources sont répertoriées dans la zone du sédimentaire de l'ouest. Divers inventaires ont, par le passé, été réalisés dont notamment dans le cadre de l'étude ERES, des programmes RESO et VREO, du projet PESO, et des états des lieux des Agences de l'Eau.

Une caractérisation des sources est également réalisée dans le cadre du PAEA DR3, au travers de l'étude de « Réalisation du nivellement piézométrique des sources et estimation des quantités d'eau prélevées dans le sédimentaire de l'ouest » (CACI, étude en cours). 142 sources sont caractérisées (localisation, topographie, lame d'eau, mesures de débits et de qualité de l'eau) dans le cadre de cette étude.

Un fichier SIG consolidé, reprenant les 142 sources de l'étude PAEA ainsi que les principales sources additionnelles issues des études précédentes citées plus haut, a été élaboré. Il totalise 395 sources inventoriées (142 sources étude PAEA + 253 sources additionnelles) dans le sédimentaire de l'ouest et géoréférencées, toutes reprises au sein de la BD-SEVR et exportées dans la BD-MOD.

La carte reprise ci-après illustre la localisation de ces sources.



Source : DEIE, IGB, BUMIGEB, OpenStreetMap, ERES, RESO, VREO, PESO, PAEA, ARTELIA-SHER

Figure 56 : Localisation des sources du sédimentaire de l'ouest

F.7.1.2. Sources de la zone de Bobo Dioulasso - Pessô

On notera en particulier dans la région de Bobo Dioulasso les importantes sources de Nasso-Guinguette, qui présentent un débit cumulé actuel de l'ordre de $7.200 \text{ m}^3/\text{h}$ (soit $2 \text{ m}^3/\text{s}$), ainsi que les sources de Pessô ($500 \text{ m}^3/\text{h}$ environ).

La coupe conceptuelle ci-dessous (SOGREAH 1994) illustre le contexte hydrogéologique particulier des sources de Nasso, émergeant au droit d'une faille au contact du GGQ supérieur et du SAC1.

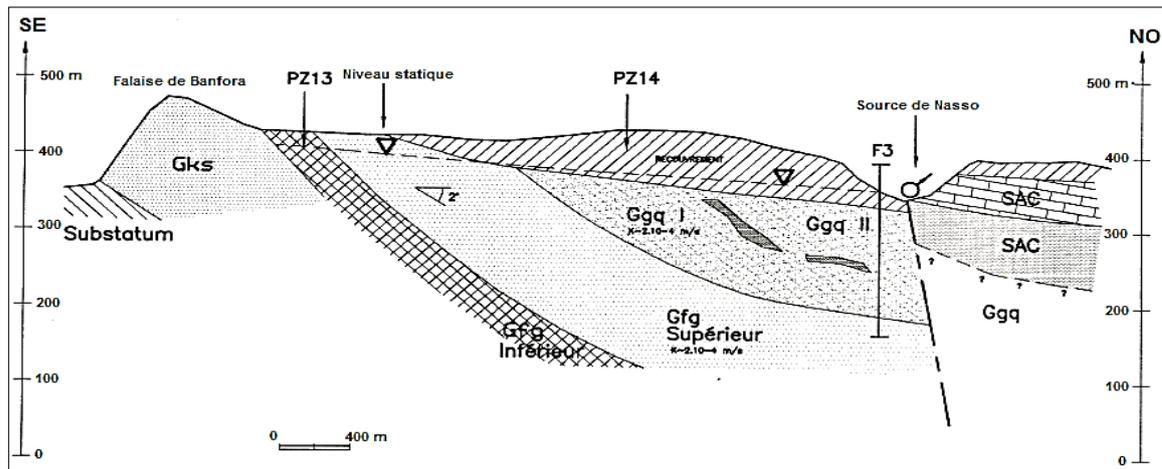


Figure 57 : Coupe hydrogéologique conceptuelle dans la zone de Bobo Dioulasso et des sources de Nasso (SOGREAH 1994)

Des chroniques de débit des sources les plus importantes (sources de Nasso-Guinguette essentiellement) ont été collectées dans le cadre de la présente étude. La périodicité des mesures est malheureusement très aléatoire (au gré des projets mis en œuvre dans la zone et des moyens de l'Administration) et lacunaire.

Le graphique ci-dessous illustre la chronique de débits de la source de Nasso-Guinguette de 1991 à 2011. On y constate une diminution significative du débit, laquelle est probablement accentuée depuis lors suite à l'augmentation massive des prélèvements de l'ONEA par forages dans la zone d'alimentation des sources.

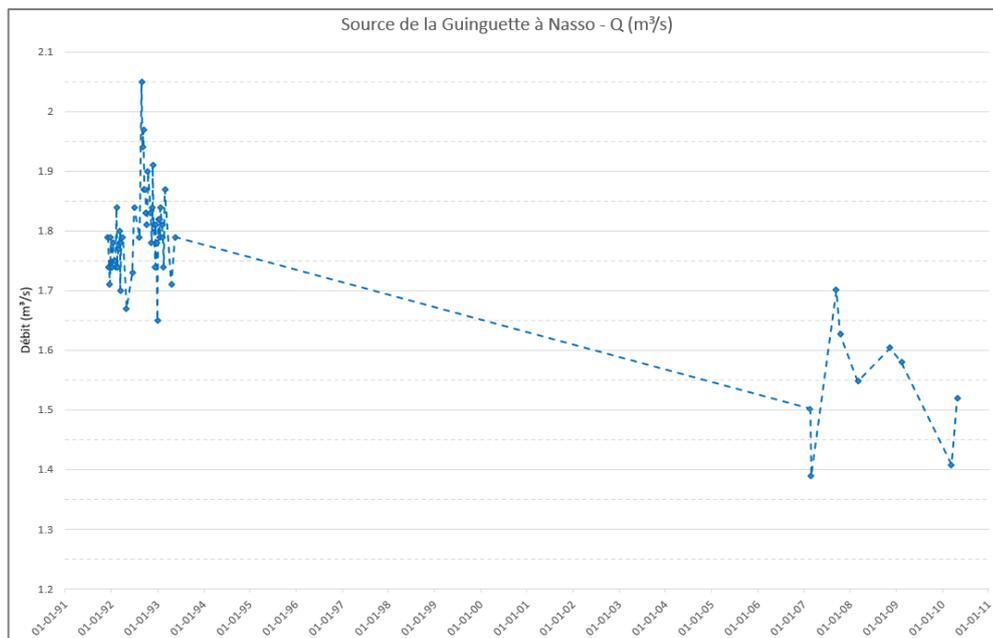


Figure 58 : Evolution temporelle du débit de la source de Nasso-Guinguette

On citera également, parmi les sources répertoriées présentant des débits importants, les sources ONEA 1 (500 m³/h environ) et ONEA 2 (120 m³/h environ) situées à Nasso et exploitées par l'ONEA pour l'AEP, et la source de Pessô (environ 500 m³/h).

Une actualisation des jaugeages des sources présentant des débits exceptionnels, dont notamment celles citées ci-avant, est très fortement recommandée étant donné le contexte d'augmentation significative des

prélèvements par forage dans leurs zones d'alimentation et les risques qui en découlent d'impact quantitatif significatif sur le débit des sources.

F.7.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

La base de données BD-SEVR, élaborée dans le cadre de la présente étude, intègre l'ensemble des données collectées sur les sources du Burkina Faso (localisation, caractéristiques, chroniques de débit, qualité de l'eau).

La collecte de données relatives aux sources a intégré les inventaires de l'étude ERES, des programmes RESO et VREO, du projet PESO, des états des lieux des Agences de l'Eau, ainsi que de la base de données de l'inventaire PAEA des sources.

Une extraction et une fusion a été réalisée pour les sources du sédimentaire de l'ouest issues de ces inventaires (395 sources distinctes géoréférencées reprises en BD), et importée dans la BD-MOD avec les chroniques liées (mesures temporelles disponibles de débit). Le système de coordonnées géographiques a été harmonisé préalablement à l'importation.

F.8. Prélèvements en eaux souterraines

F.8.1. Présentation générale

La zone du sédimentaire de l'ouest fait l'objet de nombreux prélèvements d'eau souterraine, principalement pour l'AEP, pour l'hydraulique rurale, et dans une moindre mesure pour des usages industriels et d'irrigation.

La base de données BD-OMES répertorie plus de 8.000 ouvrages de mobilisation des eaux souterraines dans cette zone.

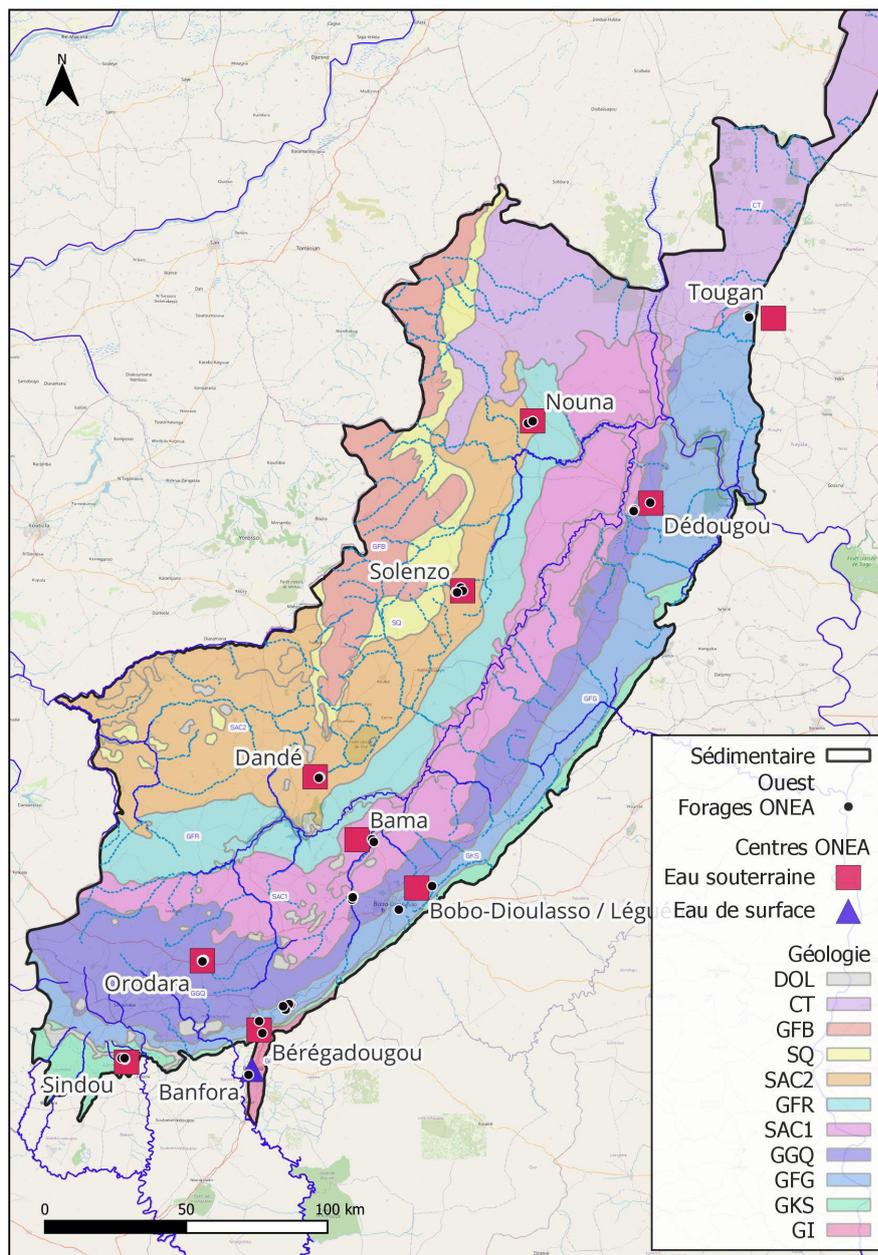
La population actuelle (2023) dans la zone est estimée à 3.2 millions habitants, et atteindra 4 millions en 2030 (d'après RGPH 2019, avec taux d'accroissement appliqué de 2.8%).

Les sections qui suivent aborderont les prélèvements en eau souterraine relatifs à l'AEP en milieu urbain (ONEA), à l'hydraulique villageoise, aux usages industriels, et à l'irrigation.

F.8.1.1. Prélèvements ONEA

On dénombre actuellement 10 centres ONEA dont les forages sont situés dans la zone du sédimentaire de l'ouest. La carte ci-après illustre la localisation de ces centres, ainsi que les forages qui y sont associés.

Le tableau ci-après reprend la liste des centres ONEA concernés, ainsi que les prélèvements annuels sur la période 2018-2021. Ils atteignent un total d'environ 13 millions m³ en 2021.



Source : DEIE, ONEA, IGB, BUMIGEB, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 59 : Localisation des centres ONEA et forages ONEA dans le sédimentaire de l'ouest

Centre	X_UTM	Y_UTM	Volumes annuels prélevés en eau souterraine (m ³ /an)			
			2018	2019	2020	2021
Bama	344 945	1 258 540				
Bérégadougou	310 283	1 190 641				
Bobo-Dioulasso / Léguéma	366 025	1 241 271	8 321 860	9 301 850	9 974 728	10 516 086
Dandé	330 109	1 280 980				
Dédougou	448 894	1 378 613	921 812	1 035 890	1 171 224	1 121 323
Nouna	407 052	1 407 920	310 628	315 814	320 078	287 872
Orodara	290 207	1 215 356	407 347	441 336	480 781	485 740
Sindou	263 375	1 179 178	91 011	110 301	138 840	140 497
Solenzo	382 289	1 347 328	56 579	56 585	61 043	71 113
Tougan	492 266	1 444 266	273 264	276 444	322 067	306 840

Tableau 15 : Liste et caractéristiques des centres ONEA du sédimentaire de l'ouest

On dénombre au total, à ce jour, 47 forages exploités par l'ONEA pour l'AEP et répartis au niveau des 10 centres ONEA décrits plus haut.

La répartition de ces forages par formation géologique est la suivante : 13 GGQ, 12 GFG, 10 SAC2, 8 SAC1, 4 GKS.

Les données de prélèvements en eau souterraine à partir des forages AEP de l'ONEA ont été collectées par forage sur base annuelle pour la période 2010-2021 (actualisation en cours pour 2022).

Les données de consignes d'exploitation des forages (débit d'exploitation, nombre d'heure / jour, etc) ont également été collectées pour les années 2020 et 2021 (actualisation en cours pour 2022).

Les prélèvements en eau souterraine effectués par l'ONEA concernent également les sources ONEA1 et ONEA2 situées à Nasso dans la zone de la forêt classée Nasso-Guinguette (zone de Bobo Dioulasso). Les données de prélèvement ont été collectées, et capitalisées, sur base annuelle sur la période 2003-2021 (actualisation en cours pour 2022).

Les volumes annuels prélevés à partir de ces sources sont également en augmentation sensible, passant de 5.2 millions m³ en 2003 à 9 millions m³ de 2018 à 2020. Le graphique ci-après illustre la chronique de prélèvements concernée.

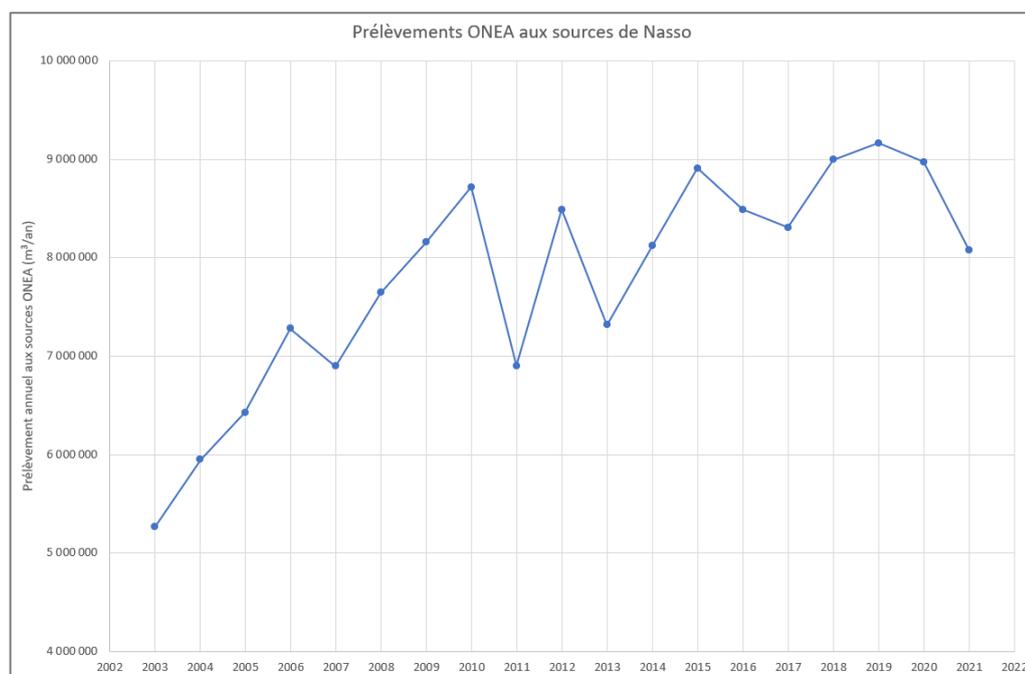
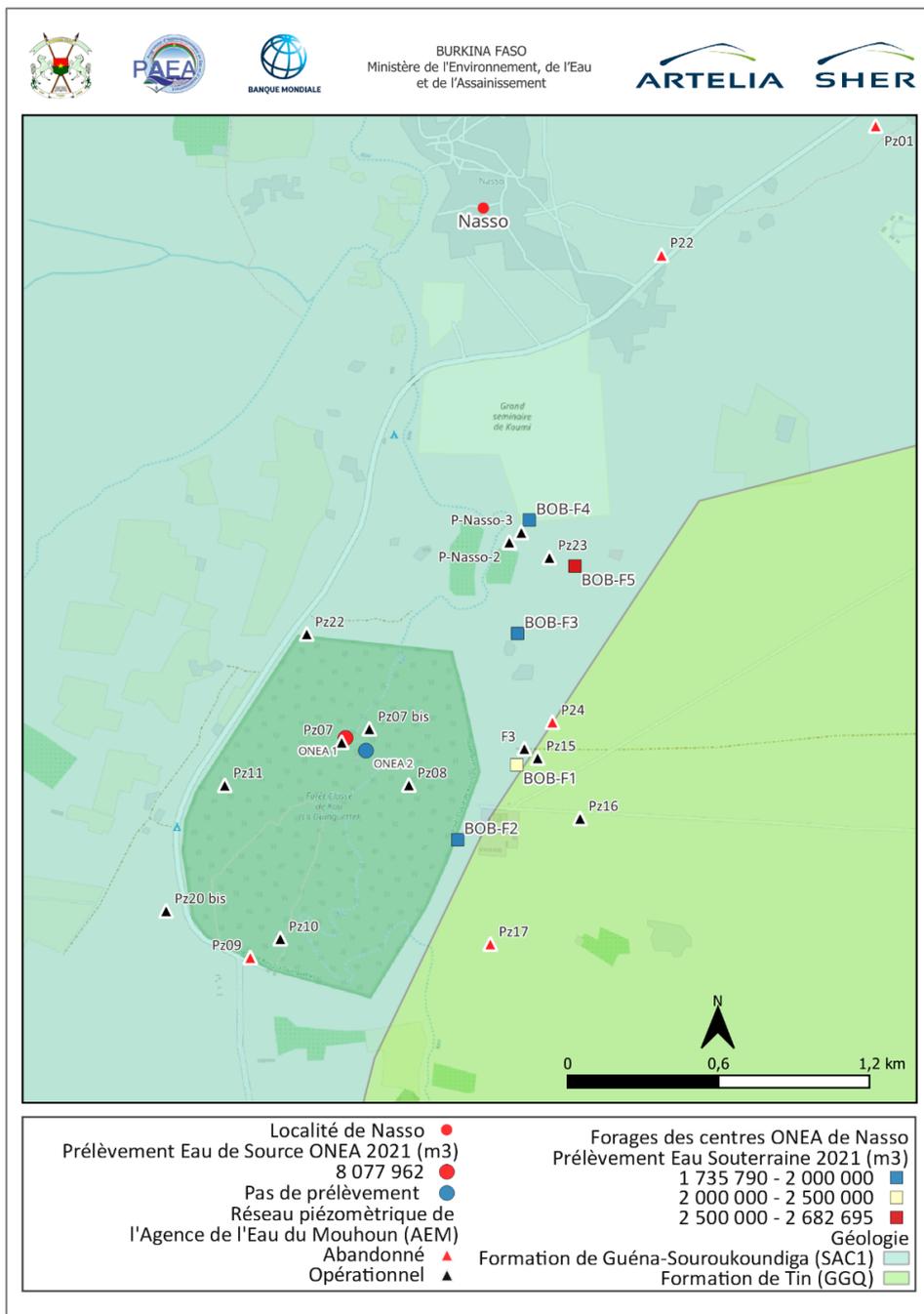


Figure 60 : Chronique de prélèvements ONEA aux sources de Nasso (ONEA 1 & 2)

La figure ci-après illustre la localisation des ouvrages ONEA (forages et sources) dans la zone de Bobo Dioulasso (bassin du Kou), ainsi que les piézomètres (réseau AEM) recensés dans la zone. Il s'agit en effet d'une zone stratégique sur le plan socio-économique et à enjeu majeur sur le plan de la gestion et de l'exploitation des ressources en eau souterraine, avec des débits importants (atteignant 400 m³/h pour certains forages), des volumes annuels prélevés en eau souterraine très élevés (atteignant en 2021 10 millions m³ pour les forages et 8 millions m³ pour les sources), et une population desservie de plus en plus importante (près d'un million d'habitants pour la ville de Bobo Dioulasso en 2022).



Source : DEIE, ONEA, IGB, BUMIGEB, AEM, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 61 : Ouvrages (forages et sources) exploités par l'ONEA dans la zone de Nasso, et piézomètres du réseau de suivi AEM

Au niveau de Bobo Dioulasso, les volumes prélevés à partir de forages ONEA ont très significativement augmenté, passant d'environ 3 millions m³/an en 2010 à plus de 10 millions m³/an en 2021.

La figure ci-après illustre à titre de synthèse l'évolution des prélèvements en eau souterraine par l'ONEA à Bobo Dioulasso sur la période 2010-2021. On constate une augmentation significative (> 60%) des prélèvements sur cette période de 10 années. On notera que ces prélèvements étaient de 6 millions m³/an environ au début des années 2000 ; ils ont donc triplé en vingt ans.

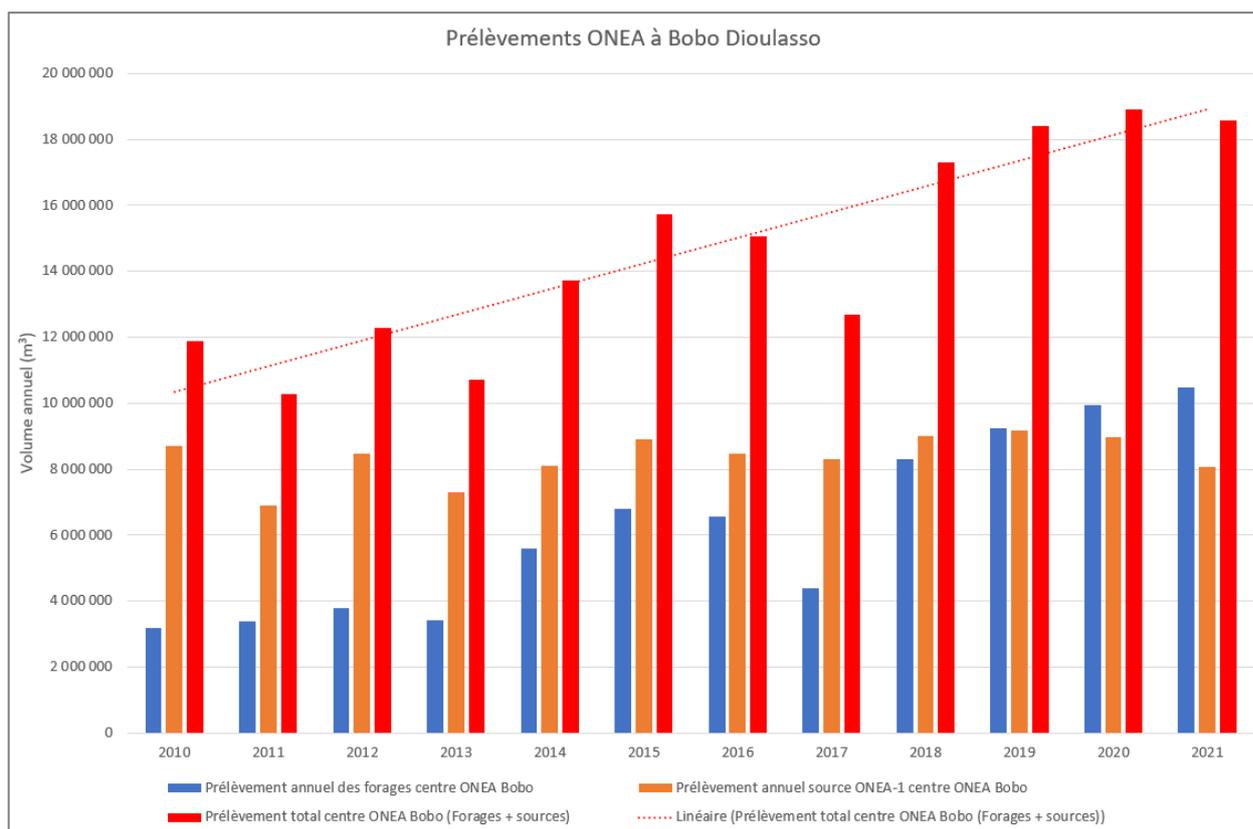


Figure 62 : Prélèvements ONEA annuels à Bobo Dioulasso (sources, forages, total) sur la période 2010-2021

F.8.1.2. Prélèvements hydraulique rurale

Aucune donnée reposant sur des mesures de débit ou prélèvement à partir d'ouvrages de mobilisation des eaux souterraines n'est actuellement disponible pour ce qui concerne les usages domestiques en milieu rural.

La demande en eau pour la consommation humaine des populations résidentes sur la zone sédimentaire ouest en dehors des zones desservies par l'ONEA 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 2023 et 2030 sur base du taux d'accroissement annuel de 2.8%. Ces estimations sont réalisées en considérant la norme de 20 L/hab./jour communément utilisée pour cette classe d'usage.

Afin de spatialiser la demande et donc les prélèvements estimés en eau souterraine concernés par cet usage, les données RGPH de population par localité (et leur évolution temporelle sur base d'un taux d'accroissement annuel de 2.8%) ont été exploitées, avec géoréférencement et spatialisation de l'information pour chaque localité non desservie par l'ONEA.

Au total, la population située dans le sédimentaire de l'ouest en dehors des zones desservies par l'ONEA est estimée sur cette base à 1.46 millions habitants (exploitation du RGPH2019), soit 1.63 millions habitants estimés en 2023 et 2 millions habitants en 2030.

La demande en eau associée, tenant compte de l'allocation retenue de 20 L/hab/jour, est de l'ordre de 12 millions m³ pour 2023 et de 14.6 millions m³ à l'horizon 2030. La spatialisation de l'information par localité permet de distribuer spatialement cette demande au niveau de chaque localité, et de la traduire en prélèvement spatialisé pour ce qui concerne les usages domestiques en dehors des zones desservies par l'ONEA. Cette évaluation repose sur une hypothèse d'utilisation exclusive des eaux souterraines pour les

usages domestiques, ce qui semble globalement refléter la situation rencontrée dans la zone du sédimentaire de l'ouest.

On notera que l'étude de « Réalisation du nivellement piézométrique des sources et estimation des quantités d'eau prélevées dans le sédimentaire de l'ouest » (CACI, étude en cours) menée dans le cadre du PAEA DR3 devrait, à son terme, amener une évaluation consolidée des prélèvements domestiques effectués dans les eaux souterraines au niveau du sédimentaire de l'ouest.

F.8.1.3. Prélèvements industriels et pour l'irrigation

F.8.1.3.1. Prélèvements industriels

L'activité industrielle la plus importante de la zone sédimentaire de l'ouest est rencontrée à Bobo-Dioulasso. Elle y est très diversifiée, et couvre tous les secteurs : agro-alimentaire, chimique, métallurgique, etc. Une enquête a permis de faire la synthèse de ces usagers (Tirogo, 2016). La plupart de ces industries sont localisées dans la zone dite industrielle au secteur 20 de la ville de Bobo-Dioulasso. Dans la politique d'extension de la ville, une deuxième zone industrielle, située à la sortie de Bobo-Dioulasso sur la route de Bama, est en cours de développement et compte actuellement environ cinq industries fonctionnelles.

On dénombre quatre sociétés industrielles (SN CITEC, BRAKINA, SBFA, FILSAH) qui prélèvent environ 1500 m³/j. En plus de ces usagers, d'autres prélèvements par forages, dont le cumul est estimé à environ 150 m³/j, sont effectués par une dizaine de sociétés de production d'eau de consommation en sachets et en bouteilles sur la quarantaine recensées. Aux côtés de ces deux types d'usagers, on dénombre quatre services publics exploitants de la nappe (SONABHY, SONABEL, Abattoir, Bobo-Inter) qui prélèvent environ 600 m³/j.

Le volume d'eau souterraine prélevé par l'ensemble de ces usagers est estimé entre 2000-2500 m³/j, soit 730.000 à 910.000 m³/an.

La spatialisation de ces informations, sur base de la localisation des industries concernées, a permis de distribuer spatialement les prélèvements concernés.

On notera à nouveau que l'étude de « Réalisation du nivellement piézométrique des sources et estimation des quantités d'eau prélevées dans le sédimentaire de l'ouest » (CACI, étude en cours) menée dans le cadre du PAEA DR3 devrait, à son terme, amener une évaluation consolidée des prélèvements industriels effectués dans les eaux souterraines au niveau du sédimentaire de l'ouest.

F.8.1.3.2. Prélèvements agricoles

Les surfaces irriguées à partir des eaux souterraines, estimées à environ 160 ha, sont principalement situées dans la plaine alluviale du Kou et sont alimentées par des puits et puisards qui captent la nappe dans sa partie superficielle (nappe alluviale essentiellement, à moins de 10 m de profondeur). Le nombre de points de prélèvement exploités par les irrigants a été estimé à 225 (Sauret, 2013). Ces prélèvements s'effectuent par pompage à partir de pompes délivrant un débit maximum de 60 m³/h (Sauret, 2013).

Ils sont effectués durant la période de contre saison sur la durée des cycles culturels entre les mois de novembre et avril. Le volume total prélevé est estimé à 4,15 millions de m³ soit environ 22 900 m³/j sur la période, pour ce qui concerne cette zone à haute vocation agricole et dont les besoins en eau sont assurés par les eaux souterraines (nappe alluviale essentiellement).

On notera à nouveau que l'étude de « Réalisation du nivellement piézométrique des sources et estimation des quantités d'eau prélevées dans le sédimentaire de l'ouest » (CACI, étude en cours) menée dans le cadre du PAEA DR3 devrait, à son terme, amener une évaluation consolidée des prélèvements agricoles effectués dans les eaux souterraines au niveau du sédimentaire de l'ouest.

Pour ce qui concerne les usages agricoles (irrigation), la distribution temporelle des valeurs annuelles de prélèvements pourra être effectuée à un pas de temps mensuel, permettant de viser les périodes effectives de prélèvement (novembre à avril).

F.8.2. Préparation des données d'entrée pour la modélisation

L'ensemble des données de prélèvements en eaux souterraines (AEP urbain ONEA à partir de forages et de sources, hydraulique rurale en zones non desservies par l'ONEA, usages industriels et agricoles) ont été spatialisées, et intégrées à la base de données BD-MOD.

Une actualisation de ces données est toutefois à prévoir, en deuxième phase d'activité, pour ce qui concerne les prélèvements pour usages domestiques hors zones desservies par l'ONEA, pour les usages industriels, et pour les usages agricoles. Cette consolidation sera basée sur les résultats attendus de l'étude PAEA DR3 « Réalisation du nivellement piézométrique des sources et estimation des quantités d'eau prélevées dans le sédimentaire de l'ouest ».

La capitalisation des données de prélèvements au sein de la BD-MOD comprend une table spatiale reprenant les points de prélèvements ainsi que leurs caractéristiques, et une table liée reprenant les chroniques de prélèvements. Afin d'alimenter le modèle en données d'entrée mensuelles, les données annuelles seront distribuées temporellement de manière homogène (prélèvements AEP ONEA, usages domestiques, usages industriels) et en fonction des périodes d'irrigation pour l'usage agricole.

G. ELABORATION DU MODELE CONCEPTUEL

G.1. Objectifs du modèle conceptuel

Le modèle conceptuel, en matière de modélisation, consiste en une représentation conceptuelle de la réalité, souvent simplifiée, destinée à être implémentée dans le logiciel de modélisation sous les contraintes qu'impose celui-ci.

Ainsi, une série d'hypothèses doivent être formulées afin de représenter un milieu physique - et des processus - souvent complexes, sous une forme simplifiée compatible d'une part avec les outils de modélisation utilisés, et d'autre part avec les objectifs poursuivis par la modélisation et le degré de précision des données disponibles.

Les options à considérer, et les hypothèses à retenir en matière de représentation conceptuelle du milieu physique, concernent notamment :

- L'extension de la zone à modéliser ;
- L'identification des différents horizons (hydro)géologiques à considérer explicitement ;
- La représentation des propriétés hydrodynamiques et des échanges entre horizons (modélisation hydrogéologique 2D, 3D-HUF, quasi-3D, 3D) ;
- Le régime de simulation (permanent et/ou transitoire), ainsi que la période et le pas de temps de simulation dans le cas du régime transitoire ;
- Les conditions aux limites du modèle (limites latérales et en base du modèle) ;
- La représentation de la recharge ;
- La représentation des interactions eaux de surface – eaux souterraines ;

- La représentation des sources ;
- La représentation des prélèvements ;

Les choix à opérer au niveau de ces éléments doivent être adaptés :

- Aux objectifs poursuivis de la modélisation ;
- Aux spécificités du logiciel de modélisation utilisé ;
- Aux données disponibles et au niveau de précision de celles-ci ;
- Aux performances informatiques ;
- Au volume de travail considéré pour la prestation.

G.2. Aperçu des choix conceptuels relatifs aux modélisations existantes dans la zone du sédimentaire de l'ouest

La zone du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso a déjà fait l'objet de modélisation géologiques/hydrogéologiques par le passé.

Le tableau présenté ci-après reprend une synthèse des caractéristiques et choix conceptuels des principaux modèles hydrogéologiques déjà réalisés dans la zone du sédimentaire de l'ouest.

Il s'agit en particulier des modèles SOGREA (ERES 1994), thèse de Dr Dakouré (2003), programme VREO (Derouane, 2008), thèse de Dr Sauret (2013), thèse de Dr Tirogo (2016).

Etude / Projet	Année	Etendue zone modélisée	Formations géologiques concernées	Nombre de couches ; Regroupement de formations en couches	Permanent / transitoire ?	Logiciel utilisé
ERES SOGREAH	Juillet 1994	Région de Bobo- Dioulasso (1300 km ²)	<ul style="list-style-type: none"> • La formation des grès de Kawara-Sindou (GKS) • La formation des grès fins glauconieux de Takalédougou (Gfg) • La formation des grès à granule de quartz (Ggq) • Les siltstones, argilites et carbonates se Guéna – Souroukoudinga (SAC) 	4 couches, 2 nappes : 1) La nappe des grès GKS 2) La nappe des grès Gfg-Ggq-SAC	<ul style="list-style-type: none"> • Régime Permanent (les deux aquifères) • Régime transitoire (uniquement Gfg-Ggq-SAC) 	MONA (Régime Permanent) ESTRA (Régime transitoire)
Thèse Dakouré	Février 2003	Partie sud-est du bassin de Taoudéni (le nord-ouest du Burkina et le sud-est du Mali) : Entre les latitudes 11° et 15° et les longitudes 3° et 8°. Superficie environ 180.000 km ² .	<ul style="list-style-type: none"> • Les Grès inférieurs, • Les grès de Kawara-Sindou, • Les grès fins, • Les grès à granules de quartz, • Les Siltstones, Argilites et Carbonate de Guéna-Souroukoudinga, • Les grès fins roses, • Les Siltstones, Argilites et Carbonates de Samanden-iKiébani, • Les Siltstones et quartzites de la passe de Fo, • Les grès de Fo-Bandiagara. 	9 couches, 1 aquifère : Réservoir multicouche ou multi-strate mais unique	<ul style="list-style-type: none"> • Régime permanent • Régime transitoire (dans le sous-bassin du kou ?) 	Processing-Modflow
Thèse Sauret	Juin 2013	Une portion du bassin du Kou, (15,4% de la plaine)	<ul style="list-style-type: none"> • La formation des Silstones Argilites et Carbonates de Guéna-Souroukoudinga (SAC1), • La formation de Grès à Granules de Quartz (Ggq), 	3 couches, 2 aquifères : 1) La nappe alluviale 2) La nappe semi-captive à	/	La quantification des échanges « nappe-rivière » par la résolution de

		alluviale faisant au total 1860 km ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Les formations superficielles représentées par des latérites, des alluvions argileuses ou sablo-argileuses. 	drainance des grès fins rougeâtres et à granules de quartz		l'équation bilantaire
Thèse Tirogo	Juillet 2016	Bassin du Kou (1860 km ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Les Grès de Kawara-Sindou (GKS), • Les Grès fins glauconieux (Gfg), • Les Grès à granules de quartz (Ggq), • Les Siltstones, Argilites et Carbonates (SAC1) • Les Grès fins roses (Gfr). 	5 couches, 1 aquifère : Une nappe unique contenue dans un aquifère multicouche	<ul style="list-style-type: none"> • Régime permanent • Régime transitoire 	Visual Modflow
VREO Derouane	Mars 2008	La limite d'extension des terrains sédimentaires du bassin de Taoudeni au Burkina Faso (environ 41.000 km ²)	<ul style="list-style-type: none"> • Les Grès Inférieurs (Gi), • Les Grès de Kawara-Sindou (GKS), • Les Grès Fins Glauconieux (Gfg), • Les Grès à Granules de Quartz (Ggq), • Les Siltstones, Argilites et Carbonates de Guena-Souroukoundinga (SAC1), • Les Grès Fins Roses (Gfr), • Les Siltstones, Argilites et Carbonates de Samandeni-Kiébanani (SAC2), • Les Siltstones et Quartzites de Fo (SQ), • Les Grès de Fo-Bandiagara (GFB). 	9 couches, 1 aquifère : Une nappe d'eau souterraine unique hébergée au sein d'un aquifère multicouche	Régime permanent	GMS 6.0

Tableau 16 : Aperçu des principaux modèles (hydro)géologiques existants de la zone du sédimentaire de l'ouest

G.3. Objectifs de la modélisation dans le cadre du PAEA

Le modèle conceptuel doit être adapté aux objectifs poursuivis par la modélisation. Les objectifs visés dans le cadre du PAEA, et les résultats attendus, sont repris ci-après.

Le modèle hydrogéologique prévu vise à mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique du système aquifère de la zone sédimentaire de l'ouest. Il doit permettre entre autres de mesurer la réponse de la nappe à la recharge ainsi qu'à l'exploitation actuelle ou future de la nappe (AEP, industrie, agriculture). L'influence de ces diverses sollicitations sur le rabattement de la nappe, sur la baisse de débit des sources et sur la diminution des débits de base des cours d'eau, devra pouvoir être évaluée.

Les principaux résultats attendus de la modélisation hydrogéologique peuvent être formulés comme suit :

- évaluation des tendances régionales des écoulements dans la zone sédimentaire au Burkina Faso : identification des réservoirs hydrogéologiques et de leur géométrie ;
- évaluation des directions d'écoulement au sein des réservoirs identifiés, et quantification des flux d'eau souterraine dans ces réservoirs ;
- identification des exutoires des systèmes aquifères, et quantification des flux d'eau souterraine sortant des systèmes modélisés (flux vers les eaux de surface, flux sortants aux frontières du modèle, etc) ;
- évaluation des flux entrants d'eau souterraine dans la zone modélisée : quantification des zones de recharge et des flux entrants aux frontières du modèle ;
- estimation de la distribution régionale des paramètres hydrogéologiques ;
- simulation des impacts de l'exploitation des nappes du sédimentaire, et de l'augmentation des prélèvements, sur les niveaux de nappe, les débits des sources, et les débits de base des cours d'eau ;
- prédictions des effets de changements dans la recharge des nappes sur la piézométrie et sur les flux d'eau souterraine (volet changements climatiques) ;
- outil d'aide à la décision pour la mise en œuvre de mesures de suivi des nappes (monitoring), ainsi que pour la gestion et l'exploitation des eaux souterraines du bassin sédimentaire.

On notera que la modélisation hydrogéologique prévue dans le cadre de la présente étude concerne la simulation des écoulements d'eau (flux d'eau) en milieu saturé, à l'échelle du bassin sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso. La prestation prévue dans le cadre du PAEA, conformément aux termes de référence et à la note technique de septembre 2021 telle que validée, ne concerne pas la simulation de la propagation de polluants dans les aquifères, ni la réalisation de sous-modèles à l'échelle locale. Néanmoins, la méthodologie de modélisation retenue ainsi que le choix du logiciel intégré pour la modélisation géologique et hydrogéologique (GMS) permettront aisément le développement ultérieur de tels modèles dans le cadre d'autres prestations, à partir du modèle qui sera réalisé dans le cadre de la présente étude.

G.4. Choix opérés et hypothèses retenues dans le modèle conceptuel

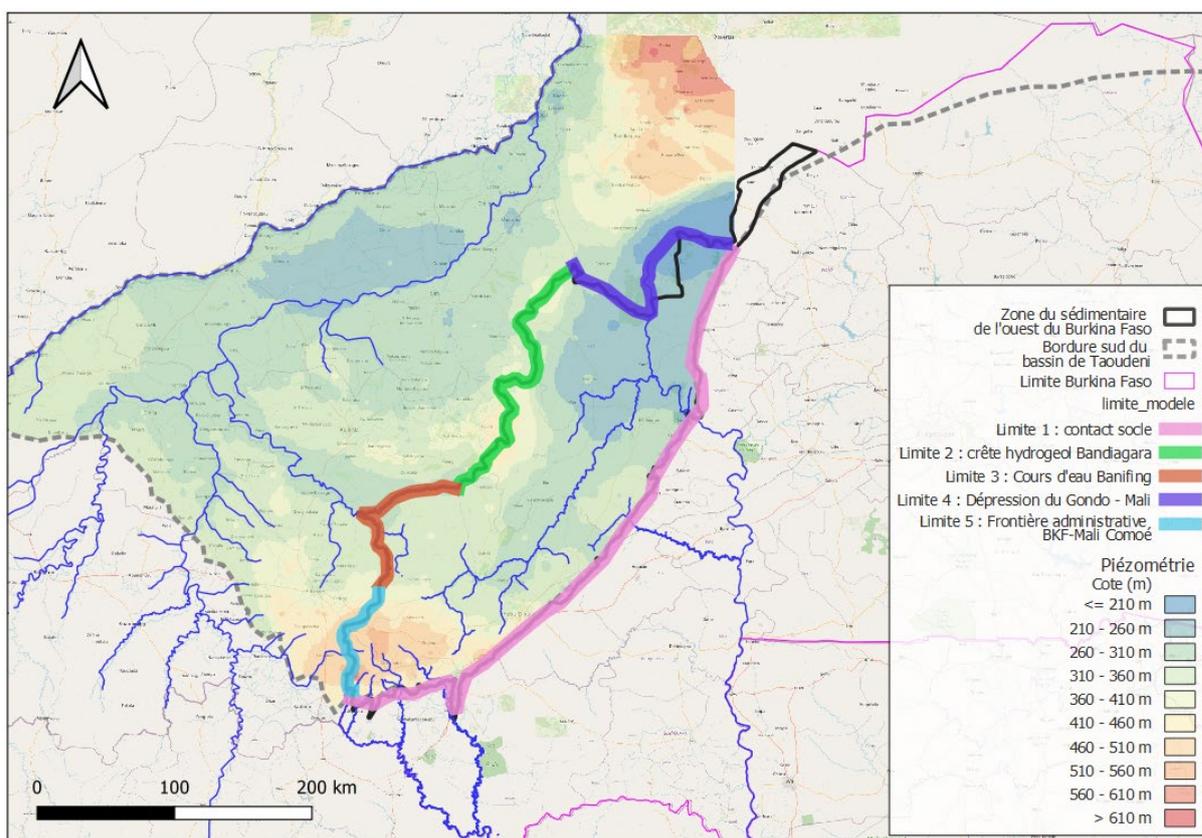
G.4.1. Etendue de la zone modélisée

L'extension de la zone à modéliser correspond à la zone du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso.

L'étendue de la zone, de l'ordre de 42.500 km², permet de représenter les processus d'écoulement des eaux souterraines à une échelle compatible avec les objectifs de la modélisation géologique et hydrogéologique. Comme signalé précédemment, elle ne permet pas la simulation détaillée de processus d'écoulements qui présenteraient un caractère particulièrement local, ni la simulation des processus physico-chimiques de propagation de polluant.

Les limites latérales de la zone modélisée sont reprises ci-après. Elles sont notamment basées sur les résultats de l'interprétation de la configuration piézométrique de la bordure sud du bassin de Taoudeni (voir section F.6.3.1), sur la configuration géologique (limite d'extension des terrains sédimentaires du bassin), et en dernier lieu (en l'absence de limite physique proche pouvant être considérée) sur base administrative (limites nationales).

1. Limite du contact entre les terrains sédimentaires et le socle cristallin, dans la partie Est de la zone modélisée (= limite d'extension des terrains sédimentaires) ;
2. Crête hydrogéologique longeant globalement la frontière administrative entre le Burkina Faso et le Mali, au niveau de la falaise de Bandiagara ;
3. Tronçons drainants de confluence du cours d'eau Banifing, longeant la frontière administrative entre l'ouest du Burkina Faso et le Mali (flux d'échanges eaux de surface – eaux souterraines) ;
4. Partie sud-est de la dépression du Gondo, au niveau de la frontière administrative nord-ouest du Burkina Faso avec le Mali (flux sortants vers le centre de la dépression et vers le Mali) ;
5. Limites administratives entre le sud-ouest du Burkina Faso et le Mali, au niveau du bassin de la Comoé (flux sortants) ;



Source : DEIE, IGB, BUMIGEB, SRTM, OpenStreetMap, ARTELIA-SHER

Figure 63 : Extension et limites de la zone modélisée

La frontière administrative entre le Mali et le Burkina constitue sur une grande partie de la zone d'étude une crête hydrogéologique de partage des eaux souterraines. Il en va notamment ainsi, comme on l'observe aisément sur l'esquisse piézométrique, de l'extension sud-ouest de la falaise de Bandiagara qui marque clairement le partage des eaux souterraines le long de la frontière malienne. Les seuls échanges majeurs d'eau souterraine entre ces deux pays sont dès lors ceux en section F.6.3.1, à savoir principalement au nord

de la zone d'étude au niveau du Continental Terminal et du Sourou, à l'ouest au niveau de la cuvette piézométrique du Banifing, ainsi qu'au sud-ouest dans le bassin de la Comoé.

Compte tenu de l'analyse de la piézométrie telle que reprise en section F.6.3.1, et de la compréhension des processus d'écoulement d'eaux souterraines dans la zone d'étude, il n'y a pas lieu de définir des limites de zone à modéliser (pour la modélisation mathématique des écoulements souterrains) différentes des limites du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso. En effet, la concordance des limites administratives avec des limites physiques, tant hydrologiques qu'hydrogéologiques, permettra de définir des conditions aux limites pertinentes en ces tronçons, tandis que les conditions qui seront imposées sur les tronçons de frontières présentant des flux sortant depuis le Burkina vers le Mali permettront de quantifier ces flux.

Sur le plan vertical, la zone modélisée ne va pas au-delà du contact entre la base des terrains sédimentaires et le toit du socle cristallin.

G.4.2. Identification des horizons géologiques et hydrogéologiques considérés

Les horizons géologiques considérés pour la modélisation géologique sont les 10 formations géologiques suivantes, selon la carte géologique au 1/500.000ème du sédimentaire de l'ouest (Ouédraogo, VREO 2008) : CT, GFB, SQ, SAC2, GFR, SAC1, GGQ, GFG, GKS, GI.

Au niveau du modèle géologique 3D, les variations verticales de faciès et les hétérogénéités verticales en matière de caractéristiques géologiques des terrains sédimentaires seront représentées à un niveau agrégé de détail correspondant à ces horizons géologiques.

Au niveau du modèle hydrogéologique, ces horizons géologiques seront également considérés à titre de référentiel, ainsi que la couche superficielle quaternaire des alluvions telle que cartographiée (Plaine alluviale du Mouhoun et du Banifing principalement) sur la carte géologique au 1/500.000ème (2008).

En fonction du contexte hydrogéologique tel qu'il sera précisé au terme (i) de la réalisation de la prospection géophysique et des forages profonds prévus dans le cadre du PAEA et (ii) de la caractérisation géologique et hydrogéologique actualisée du sédimentaire de l'ouest qui en découlera, des regroupements parmi les horizons géologiques distincts au sein de couches uniques (au niveau du maillage) pourront être opérés.

A l'inverse, des couches intercalaires au sein d'horizons géologiques spécifiques (ou au contact entre 2 horizons géologiques superposés) pourront être définies dans le maillage, dans l'hypothèse où des horizons intercalaires à fort contraste de perméabilité (aquifère/aquiclude/aquitard) qui présenteraient une extension spatiale significative et un rôle hydrogéologique majeur seraient rencontrés. Elles seront, dans ce cas, définies dans GMS-Modflow soit explicitement par une couche intercalaire à faible perméabilité, soit implicitement par une fonction de *leakance* (= « quasi-3D ») entre deux couches.

Le modèle hydrogéologique sera dès lors un modèle 3D (avec éventuelles fonctions de *leakance* quasi-3D entre certaines couches), dont le nombre de couches (au niveau du maillage) et la configuration géométrique seront définis et précisés lors de la phase d'élaboration du modèle hydrogéologique.

G.4.3. Représentation des propriétés hydrodynamiques et des échanges entre horizons (hydro)géologiques

Le milieu aquifère rencontré est caractéristique d'un réservoir hétérogène à porosité de fissures ; il peut toutefois être représenté valablement, à l'échelle de travail retenue, par une équation d'écoulement supposant un milieu poreux continu, selon la notion d'élément de volume représentatif (EVR). Les hétérogénéités peuvent ainsi être représentées par les variations de valeurs des paramètres hydrodynamiques à l'échelle d'un élément de volume représentatif (EVR) correspondant à la taille de la maille du modèle réalisé, tandis que les axes de fissuration majeurs peuvent être représentés soit

implicitement par un facteur d'anisotropie, soit explicitement au niveau d'un maillage adapté à la configuration de ces axes.

Le contexte hydrogéologique du Sédimentaire de l'ouest sur la zone d'étude peut être représenté, à cette échelle, par un aquifère unique à caractère multi-couche. Même si les paramètres hydrodynamiques (tels que la perméabilité) présentent une variation verticale représentative des différents horizons, une continuité hydraulique est supposée sur toute l'étendue de la zone d'étude, tant horizontalement que verticalement. Cette hypothèse de base devra faire l'objet d'une validation en cours de modélisation : on ne peut en effet pas exclure à ce stade, compte tenu du contexte géologique rencontré, l'existence de circulations profondes d'eau souterraine dont les flux diffèrent de ceux observés dans les premiers niveaux aquifères. En effet, le contexte géologique rencontré est caractéristique d'un bassin sédimentaire de grande étendue (bassin de Taoudeni) et de profondeur importante (>1000 mètres), avec en surface la présence de bassins versants locaux (Mouhoun, Kou, Banifing, etc) drainant les eaux souterraines superficielles, ainsi qu'en aval la présence d'exutoires régionaux importants (tels que le Fleuve Niger et le Bani, au Mali) qui peuvent drainer des eaux souterraines profondes. Les hypothèses de validité du modèle de Toth (NGWA, 1984), caractérisé par un système d'écoulements souterrains à deux ou trois niveaux (local, intermédiaire, régional), peuvent donc être rencontrées (voir figure ci-après).

La présence d'aquifères distincts et isolés dans le bassin sédimentaire de l'ouest, sans communication hydraulique entre eux sur une extension significative, ne peut également pas être exclue à ce stade. La réalisation des forages profonds prévus dans le cadre du PAEA devrait permettre de consolider le modèle conceptuel à ce niveau. D'un point de vue strictement local, de telles configurations sont connues, notamment dans les zones d'artésianisme rencontrées aux environs d'Orodara (forage artésien de Fon, à titre d'exemple). Les choix à ce niveau seront donc définis et précisés lors de la phase d'élaboration du modèle hydrogéologique.

On notera que les différents hydrogéologues ayant été confrontés à la zone d'étude qui nous occupe ont opté pour une hypothèse d'aquifère unique multi-couches (Ph. Gombert programme RESO, thèse de Dr Dakouré, J. Derouane et D. Dakouré programme VREO, thèse de Dr Tirogo, modélisation OSS GICREAIT) sans prise en compte d'aquifères distincts isolés par des niveaux aquitards/aquicludes d'extension majeure et sans prise en compte d'un système d'écoulement souterrain bi- ou tri-modal reposant sur le modèle de Toth.

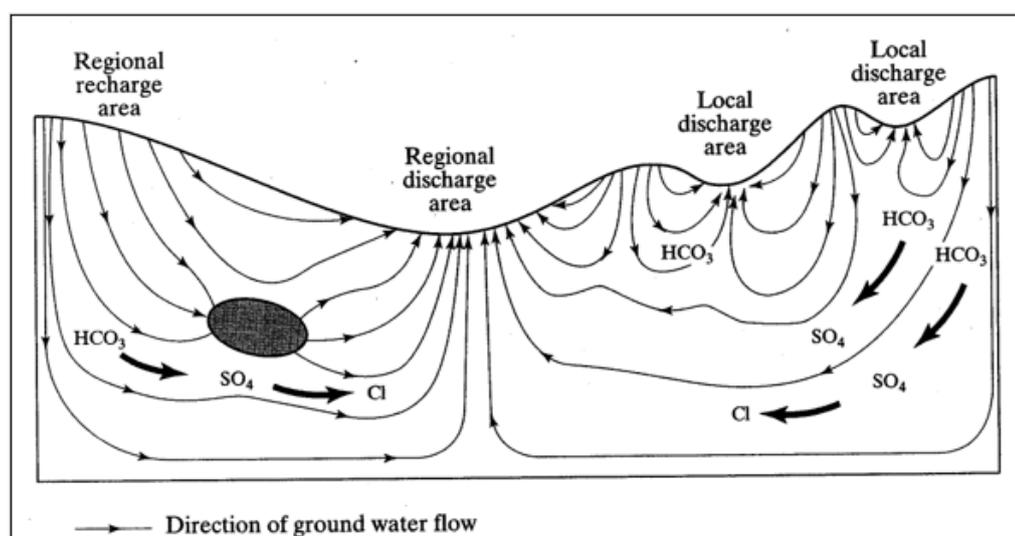


Figure 64 : Modèle d'écoulement de Toth (NGWA 1984)

Si dans le cas d'un aquifère unique multicouche la non prise en compte du contexte paléo-hydrogéologique ne devrait pas avoir d'incidence significative, cet aspect pourrait se révéler plus pertinent dans le cas

d'aquifères distincts. Il faudra alors, dans ce second cas, considérer les données isotopiques (radioéléments pour la datation, isotopes stables pour les conditions paléoclimatiques associées).

G.4.4. Régime de simulation (permanent / transitoire) et calibration du modèle

Le modèle hydrogéologique fera l'objet de simulation (i) en régime permanent et (ii) en régime transitoire.

La calibration du modèle en régime permanent précèdera la réalisation de simulations en régime transitoire.

La période considérée pour les simulations en régime transitoire débutera en l'année 2000, afin de disposer de données disponibles et fiables de types hydro-climatologiques (évaluation de la recharge), hydrologiques (débits de base des cours d'eau), piézométriques (chroniques temporelles), de débits des sources, et de prélèvements en eau souterraine.

Le pas de temps considéré pour la modélisation en régime transitoire sera annuel sur l'ensemble de la période 2000-2022, et mensuel sur une période plus limitée (qui pourrait à priori être fixée à 3 années). Les données d'entrée, tels que la recharge et les prélèvements (à titre d'exemple), seront intégrés au modèle à ces pas de temps. Le pas de temps de calcul numérique sera d'un mois, et pourra le cas échéant être réduit à une durée plus courte pour des raisons de problèmes numériques éventuels de convergence.

La calibration du modèle d'écoulement portera sur les niveaux piézométriques aux points d'observation et sur leurs variations (chroniques temporelles), sur les flux sortant au niveau des sources (débit des sources), et sur les flux sortant au niveau des cours d'eau (débit de base).

Les données d'output du modèle hydrogéologique (niveaux piézométriques, flux) en régime transitoire seront annuelles sur l'ensemble de la période, et mensuelles sur une période réduite (3 années à priori).

G.4.5. Conditions aux limites du modèle

Les conditions aux limites (= aux frontières) du modèle hydrogéologique seront précisées lors de l'élaboration du modèle hydrogéologique. En première approche et sur base du modèle conceptuel actuel, les choix suivants sont identifiés :

- Conditions de Neumann (flux imposé à valeur nulle) au niveau de la limite 1 (contact avec le socle) et au niveau de la limite 2 (crête hydrogéologique Bandiagara) ;
- Conditions de Dirichlet (hauteur piézométrique imposée) ou de Cauchy (flux dépendant d'une hauteur piézométrique) au niveau de la limite 4 (zone de la dépression du Gondo au nord-est) et au niveau de la limite 5 (sud-ouest, zone frontalière Comoé). Les conditions de Dirichlet seront paramétrées avec des hauteurs piézométriques variables (une valeur par pas de temps) pour les simulations en régime transitoire.
- Flux verticaux nuls au contact entre la base du sédimentaire et le socle sous-jacent.
- Conditions de Dirichlet (hauteur piézométrique imposée) au niveau de la limite 3 (cours d'eau Banifing en frontière de modèle)

G.4.6. Représentation de la recharge

La recharge de la nappe sera introduite de manière spatialisée, compte tenu de la grande variation spatiale de ce paramètre sur l'étendue de la zone d'étude.

La recharge sera matérialisée par l'utilisation de la fonction 'recharge' (Recharge Package) de GMS, à partir des données spatialisées et temporelles de recharge calculées au pas de temps mensuel et au pas de temps annuel par l'approche bilantaire.

G.4.7. Représentation des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines, et représentation des sources

La représentation explicite des échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines sera matérialisée par l'utilisation de la fonction 'rivière' (River Package RIV) de GMS.

La représentation explicite des sources sera matérialisée par l'utilisation de la fonction 'drain' (Drain Package DRN) de GMS.

G.4.8. Représentation des prélèvements

Les prélèvements ponctuels dans les eaux souterraines seront matérialisés par l'utilisation de la fonction 'well' (Well Package WEL) de GMS.

H. MODELE GEOLOGIQUE INITIAL

Le modèle géologique est un modèle représentant en 3 dimensions la structure géologique des différents horizons du sédimentaire sur la zone d'étude.

Compte tenu de la complexité du contexte (hydro)géologique rencontré, le modèle géométrique présente un intérêt majeur et poursuit les objectifs suivants :

- Fournir une représentation en 3 dimensions, sur toute la zone d'étude, de l'extension et des limites des couches géologiques rencontrées. A partir de cette représentation 3D complète, des coupes géologiques peuvent notamment être générées partout, et dans toutes les directions, au sein de la zone modélisée.
- Permettre la définition, et la génération automatique, des couches hydrogéologiques qui pourront être reprises dans le modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains. Le logiciel GMS offre en effet la possibilité de convertir les couches géologiques du modèle géométrique en « unités hydrogéologiques », auxquelles peuvent être attribuées individuellement des valeurs de paramètres hydrodynamiques.

H.1. Phasage et méthodologie d'élaboration du modèle géologique

Le modèle géologique 3D est réalisé sur le logiciel GMS (fonction 'Solid'), afin de permettre une interaction totale entre le modèle géologique et le modèle hydrogéologique de simulation des écoulements en milieu saturé (GMS-Modflow). Il couvre la totalité du sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso, soit environ 42.500 km².

Un modèle géologique 3D de la zone du sédimentaire de l'ouest a déjà été élaboré, en 2007-2008, dans le cadre du programme VREO (Derouane, 2008). L'élaboration du modèle géologique en sa version PAEA repose dès lors, au départ, sur celui réalisé en 2008.

Le modèle géologique dit 'initial' (au sens des prestations PAEA), précède la capitalisation des résultats (non disponibles à ce jour) des travaux de géophysique menés actuellement dans le sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso, et des résultats des travaux de forages profonds (non entamés à ce jour) également prévus dans le cadre du PAEA. Le modèle géologique initial consiste donc en une actualisation du modèle géologique de 2008, sur base des nouvelles données géologiques disponibles correspondant à la période 2008-2022. Ces actualisations concernent essentiellement la capitalisation de la carte géologique au 1/500.000ème de VREO 2008 (qui n'était pas finalisée ni disponible lors de l'élaboration du modèle VREO), des données liées aux

cartes géologiques 1/200.000 et 1/million de BUMIGEB 2018, des données lithologiques résultant des forages réalisés sur la période 2008-2022, donc en particulier les forages réalisés pour l'ONEA durant cette période dans les zones de Bobo Dioulasso, de Dédougou, de Orodara, de Pala, de Kouka, de Beregadougou, etc.

Une deuxième phase d'élaboration du modèle géologique (actualisation du modèle géologique initial) sera mise en œuvre lorsque les résultats des travaux de géophysique menés actuellement dans le sédimentaire de l'ouest du Burkina Faso, et des résultats des travaux de forages profonds, seront disponibles.

Les données de base pour la réalisation du modèle géométrique sont :

- la topographie ;
- la carte géologique de la zone d'étude ;
- les données lithologiques relatives aux forages existants dans la zone d'étude ;
- les coupes géologiques extrapolées réalisées dans le cadre du programme VREO (C. Ouedraogo, expert géologue).

Il est important de noter que le modèle géométrique, en son état actuel, repose essentiellement sur des observations de forage, lesquelles n'existent que pour les 100 à 200 premiers mètres de profondeur, et repose au-delà de cette profondeur sur une extrapolation de la position verticale des différents contacts d'horizons profonds basée essentiellement sur le pendage moyen observé (coupes géologiques extrapolées, C. Ouedraogo 2007). Une correction est apportée par la prise en compte de la carte de profondeur du sommet du socle cristallin, obtenue par géophysique aéroportée. Les

Le modèle géométrique est réalisé à l'aide du logiciel GMS. Les différentes étapes de réalisation du modèle géométrique sont les suivantes :

- géoréférencement des coupes géologiques VREO
- création de 200 points (forages fictifs) sur ces coupes, et géoréférencement de ces points
- encodage dans GMS des profils géologiques des 200 points (module « borehole »)
- construction dans GMS des coupes reliant les 200 points (module « cross-section »)
- encodage dans GMS de profils additionnels relatifs aux données actualisées 2008-2022
- transformation dans GMS des profils et coupes en modèle géométrique 3D solide (module « solid »)

On notera que la base de l'horizon GI ne peut être retenue individuellement comme niveau inférieur de base du modèle, en l'absence de données fiables sur sa cartographie altimétrique. Cet horizon, dont l'extension spatiale sub-affleurante est négligeable (moins de 0,5% de la superficie de la zone d'étude), est donc repris dans le modèle géologique de manière agrégée avec l'horizon GKS.

H.1.1. Elaboration du modèle géologique initial

Les principales étapes d'élaboration du modèle géologique initial, ainsi que les résultats obtenus, sont repris de manière synthétique ci-après.

H.1.1.1. Représentation de la surface topographique du modèle géologique

L'intégration dans GMS de la topographie est réalisée par la transformation du Geotiff MNT (MNT SRTM30m consolidé par les données topographiques de terrain) en Triangular Irregular Network (TIN).

Les figures ci-après illustrent les résultats à titre d'exemple.

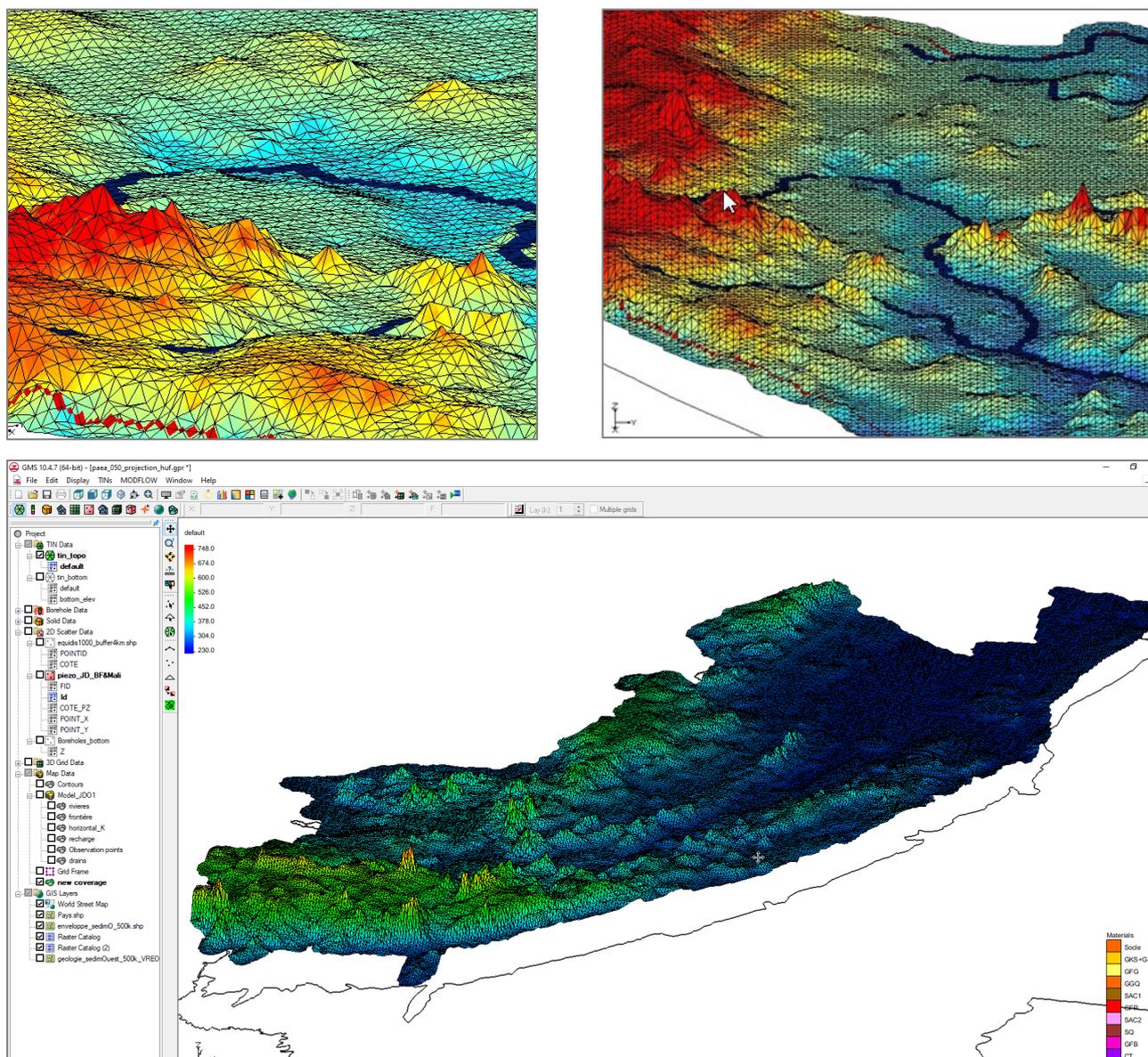
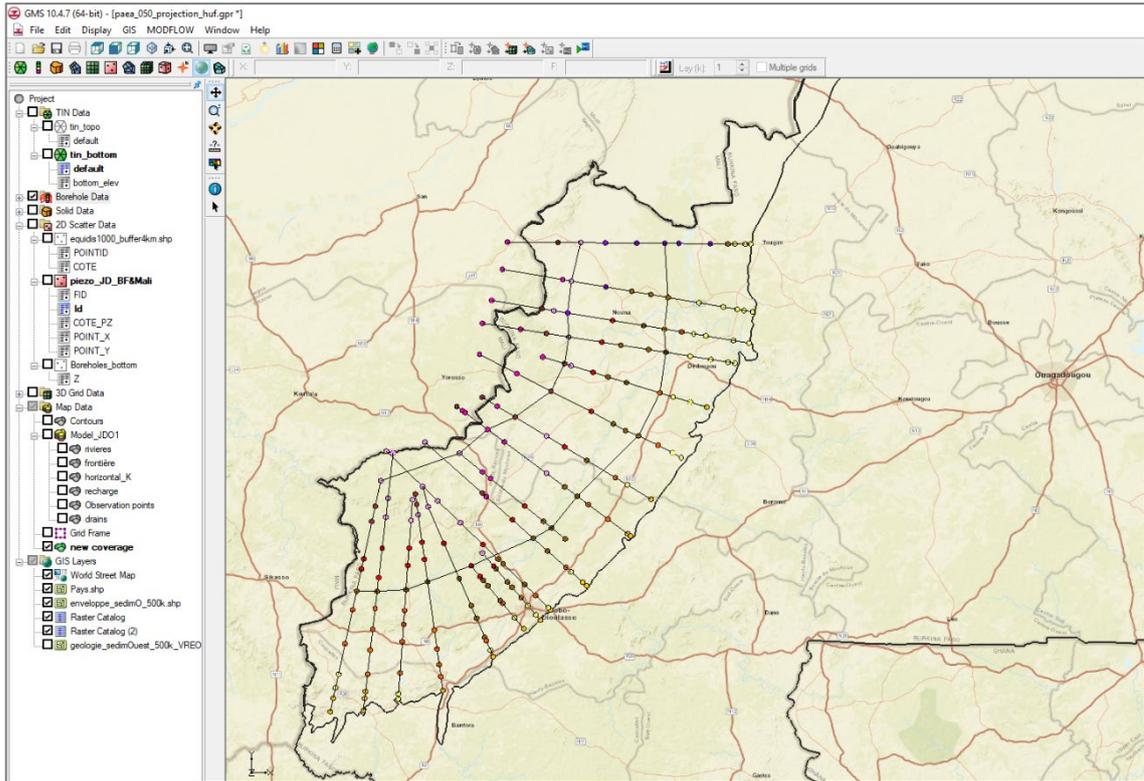


Figure 65 : Transformation du MNT en TIN pour intégration de la topographie dans GMS

H.1.1.2. Encodage des « boreholes »

Les coupes géologiques réalisées dans le cadre du programme VREO (C. Ouédraogo 2008), ainsi que les données lithologiques additionnelles (dont les forages récents réalisés sur la période 2008-2022), ont été capitalisées dans GMS au niveau du module 'Borehole'. Environ 200 *boreholes* ont ainsi été créés sur l'ensemble de la zone faisant l'objet de la modélisation géologique, afin de générer le modèle géologique 3D (module *solid* de GMS).

Les figures ci-après illustrent la distribution spatiale des *boreholes* et coupes, ainsi qu'un exemple d'édition et de paramétrisation d'un *borehole*.



Source : DEIE, IGB, OpenStreetMap, VREO, ARTELIA-SHER

Figure 66 : Localisation des boreholes et des coupes dans GMS

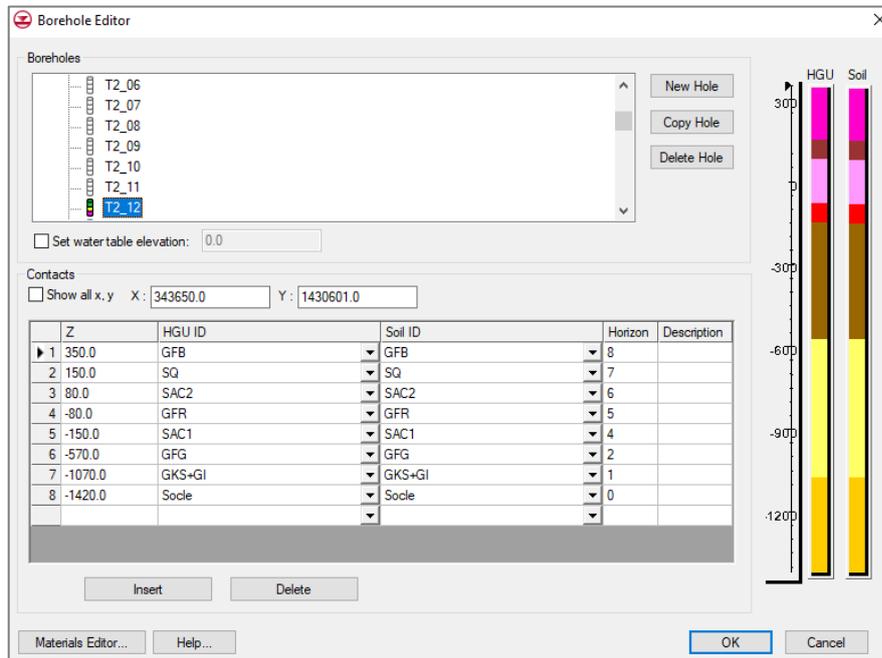


Figure 67 : Edition et paramétrisation des boreholes (GMS)

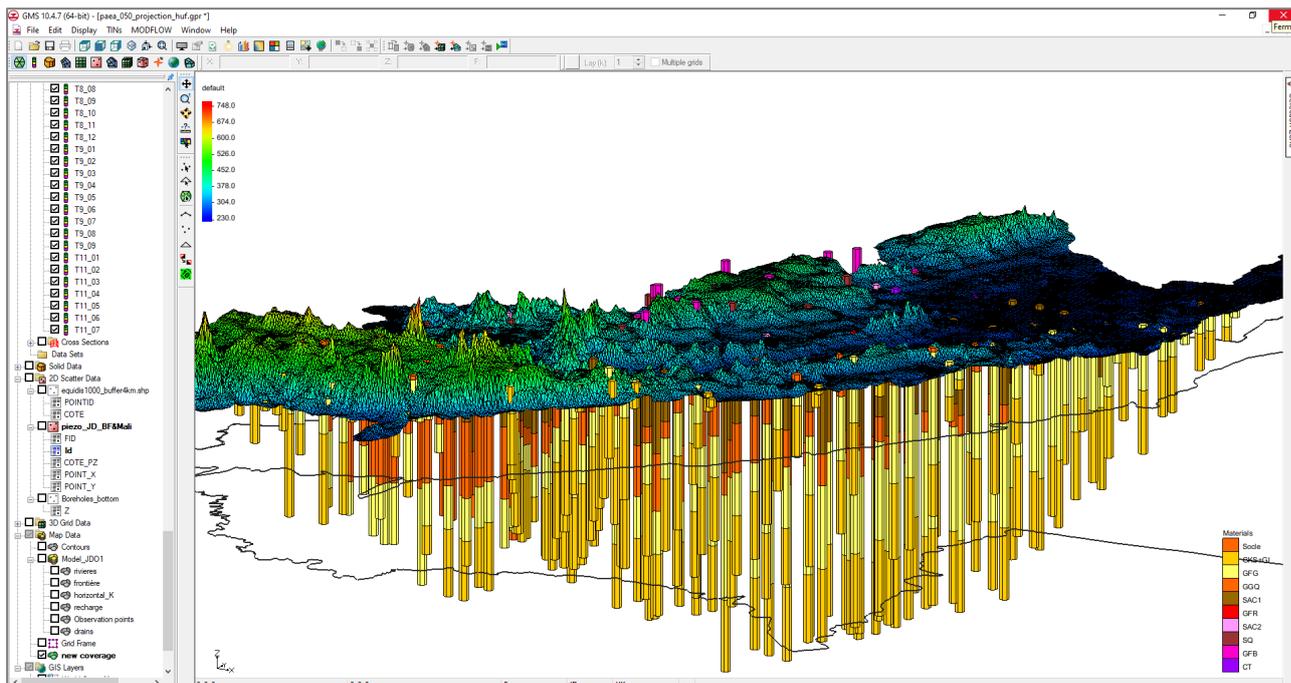


Figure 68 : Distribution des boreholes et TIN topographie (GMS)

H.1.1.3. Création des cross-sections GMS

En vue de la création du modèle géologique 3D, tous les contacts géologiques (soit maximum 10 horizons) des 200 boreholes encodés dans GMS sont reliés entre eux dans le module GMS « *cross-section* ». Les arcs de liaison entre contacts équivalents d'un point à l'autre ne sont pas nécessairement des droites : GMS permet la représentation de formes libres.

Les figures ci-après illustrent la génération des *cross-sections* GMS à partir des *boreholes*.

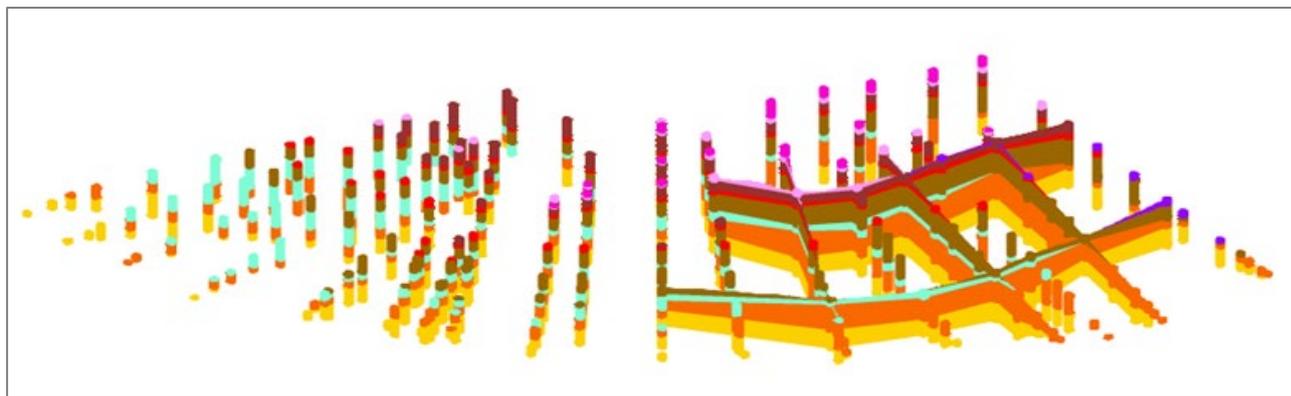


Figure 69 : Génération des cross-sections à partir des boreholes (GMS)

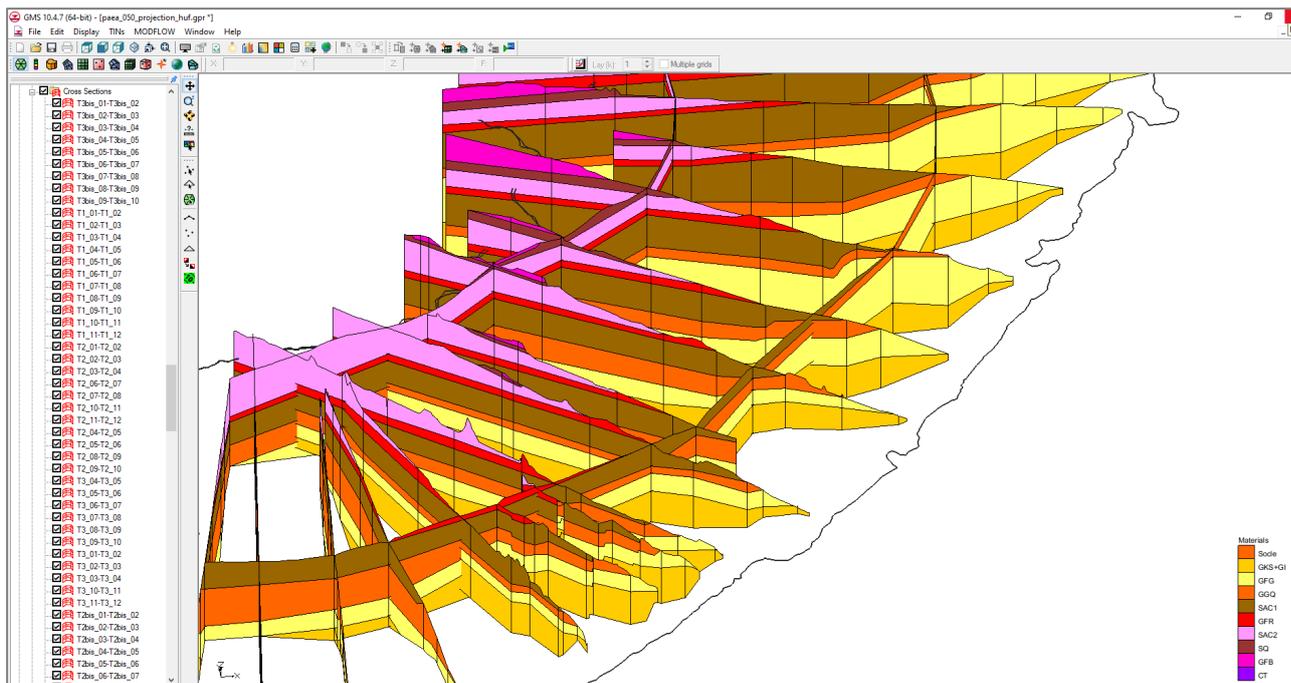


Figure 70 : Cross-sections générées dans GMS

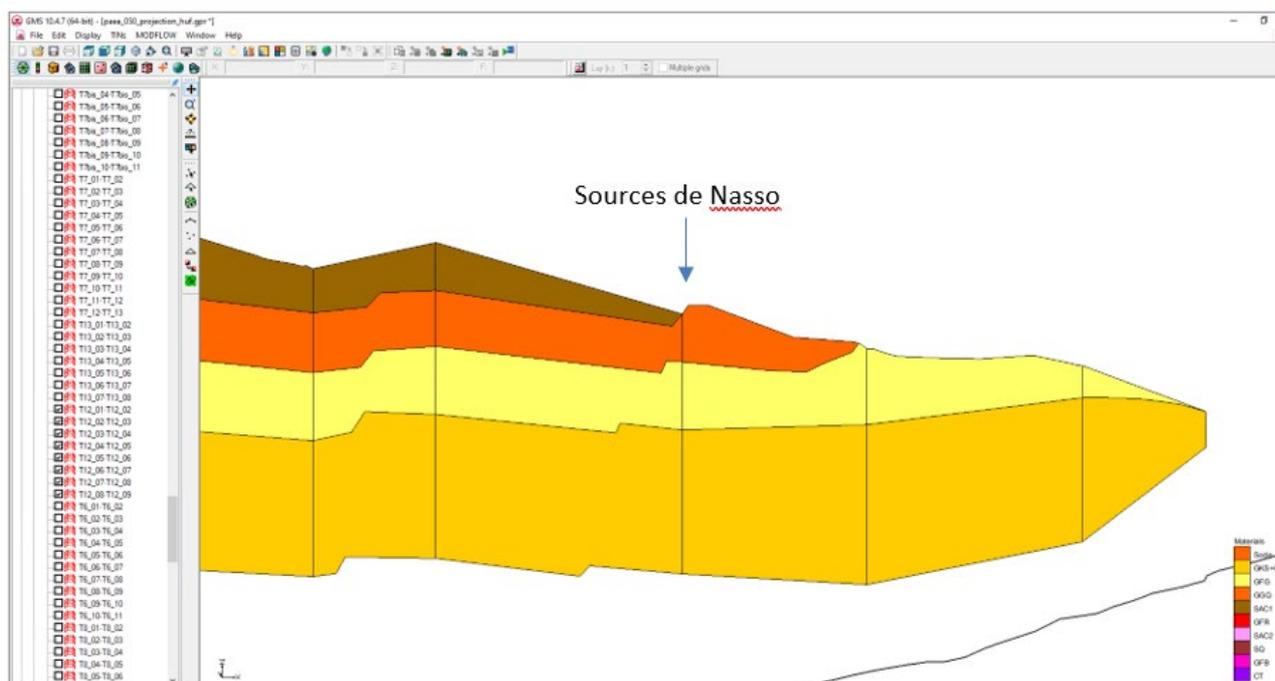


Figure 71 : Zoom sur la zone de Nasso : représentation de la faille de contact entre GGQ et SAC1 (sources de Nasso-Guinguette)

H.1.1.4. Création du solide (modèle géométrique)

Le module « *solid* » de GMS est utilisé pour convertir toutes les données encodées de boreholes et de cross-sections en un élément 3D représentant le modèle géométrique dans sa globalité. Ce solide 3D peut être utilisé pour la visualisation 3D de la géométrie de la zone d'étude, pour la visualisation 3D de chaque couche individuellement, pour la réalisation automatique de coupes verticales à travers le solide en tout endroit de celui-ci et dans toutes les directions, et enfin en support à la réalisation du maillage 2D, quasi-3D ou 3D du modèle mathématique à réaliser pour la simulation des écoulements souterrains.

Les figures reprises ci-après illustrent quelques vues et applications du modèle géométrique solide 3D.

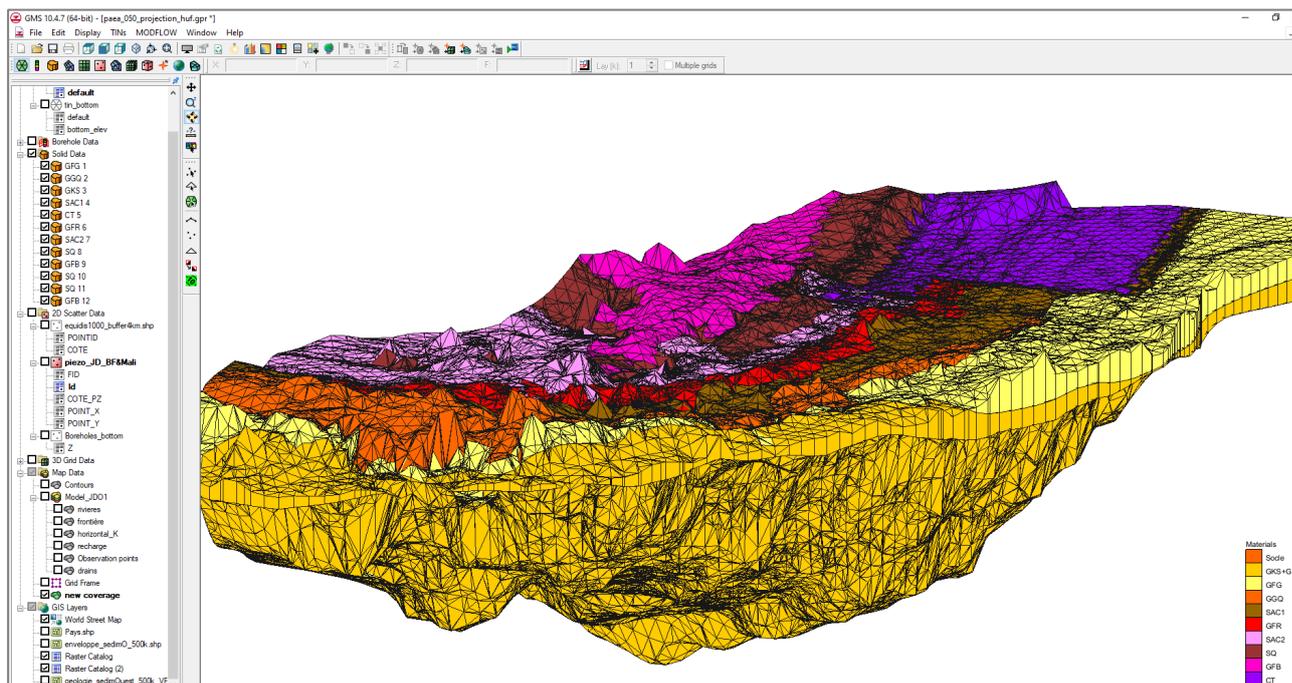


Figure 72 : Vue 3D du modèle géologique (Solid GMS)

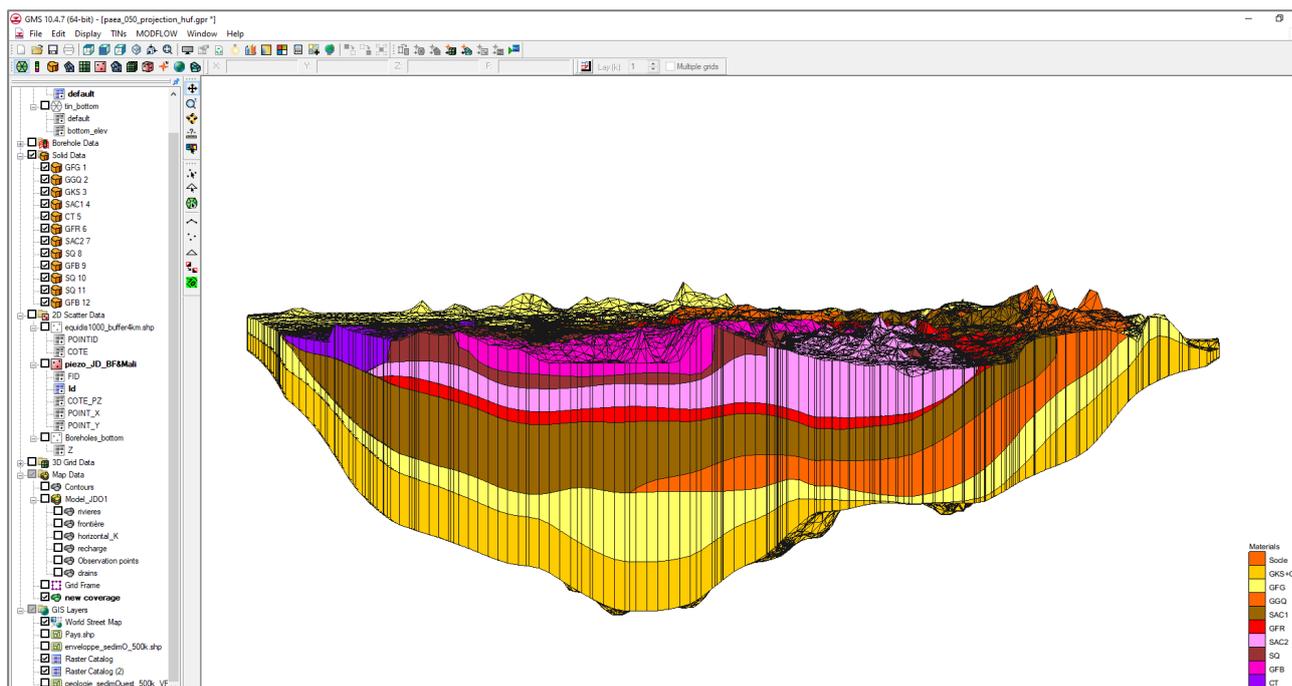


Figure 73 : Vue 3D du modèle géologique, depuis la frontière Mali-Burkina (Bandiagara)

La figure ci-après illustre une vue 3D de coupes générées librement à travers le modèle géométrique. On observe notamment la remontée du socle, et la disparition en biseau du GGQ.

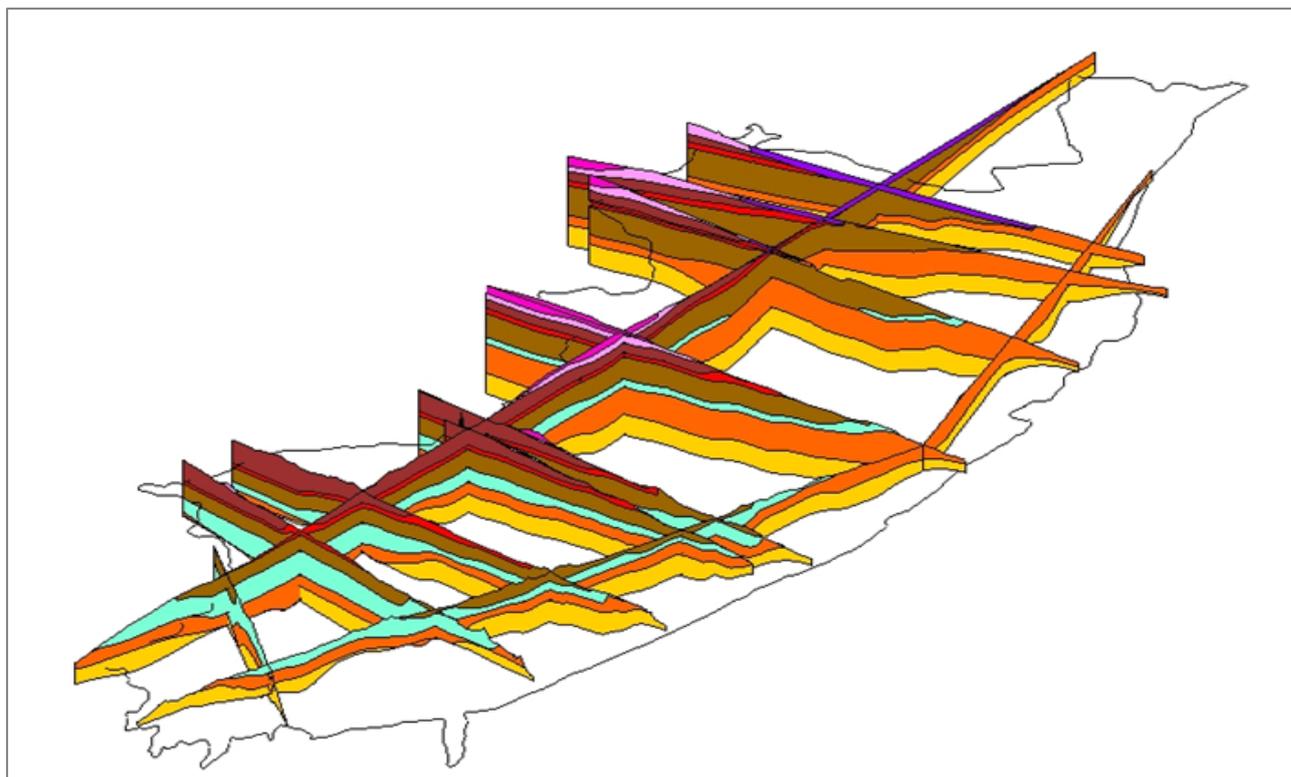


Figure 74 : Vue 3D de coupes générées librement à travers le modèle géométrique.

Le modèle géologique 3D initial, tel que réalisé à ce stade, sera actualisé en phase 2 sur base des résultats des travaux de prospection géophysique en cours dans la zone sédimentaire ouest dans le cadre du PAEA, et sur base des résultats des forages profonds (ainsi que les divers tests liés tels que diagraphies) prévus dans le cadre du PAEA.

Chaque horizon du modèle géologique peut être paramétré dans GMS sur le plan lithologique, géologique, pétrographique, etc. Des propriétés hydrogéologiques peuvent également être assignées à chaque horizon, pour intégration assistée au modèle hydrogéologique.

I. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La modélisation géologique et hydrogéologique du sédimentaire de l'ouest vise d'une part à mieux comprendre et maîtriser le contexte géologique et hydrogéologique ainsi que les processus d'écoulement des eaux souterraines dans cette zone à fort potentiel et à enjeux socio-économiques majeurs, et d'autre part à permettre une meilleure gestion de ces ressources en eau souterraine dans un contexte d'augmentation des besoins et de changement climatique.

Les modèles géologique et hydrogéologique en cours d'élaboration se veulent avant tout être des outils de gestion, dynamiques et opérationnels, utilisables au quotidien par les gestionnaires des ressources en eau du Burkina Faso (DGRE essentiellement). Ils se démarquent, en ce sens, des modèles précédents dont l'appropriation et la pérennité d'utilisation s'est avérée problématique.

Pour atteindre cet objectif opérationnel et pérenne, la conception de la démarche de modélisation repose sur une base de données active (BD-MOD), constamment et aisément actualisable, qui intègre à la fois les données d'entrée (inputs) et les résultats (outputs) du modèle, pour une exploitation et une capitalisation optimales et durables. La démarche repose également, en parallèle, sur une appropriation adéquate par les gestionnaires au travers à la fois de modules de formation spécifiques et de coaching continu.

La première phase des activités de modélisation, dont le présent rapport fait état, consiste (i) à collecter et à valoriser l'ensemble des données disponibles à ce jour pour constituer la base de données d'entrée alimentant le modèle, (ii) à poser les choix et hypothèses constituant le modèle conceptuel, et (iii) à élaborer le modèle géologique initial.

Cette première phase anticipe la mise à disposition de données additionnelles fondamentales sur la zone concernée, lesquelles seront générées et capitalisées au terme (i) de l'étude de prospection géophysique en cours dans la zone du sédimentaire de l'ouest et (ii) des travaux de forages profonds et tests associés (dont diagraphies) prévus pour 2024 dans le cadre du PAEA. Ces données additionnelles permettront dès lors d'actualiser et de consolider les résultats de la présente première phase, tant pour le modèle géologique que pour le modèle hydrogéologique.

A titre de recommandations, les attentes particulières formulées à ce stade sont (i) l'obtention des données issues du réseau de suivi hydrométrique (débit des cours d'eau), prioritairement en conditions d'étiage, (ii) les données consolidées de prélèvements de l'ONEA sur la période 2000-2022, (iii) les résultats (en format exploitable) de l'étude en cours de nivellement des sources et de quantification des prélèvements (CACI, PAEA DR3), et bien entendu (iv) les résultats des prospections géophysiques en cours ainsi que des forages profonds et test associés prévus en 2024 dans le cadre du PAEA.

Les perspectives de poursuite des développements, sur cette base, consistent en deuxième phase (i) en la capitalisation des résultats des études et travaux du PAEA cités plus haut pour consolider le modèle géologique, (ii) en l'élaboration du modèle hydrogéologique et en l'exploitation de celui-ci, (iii) à l'opérationnalisation de la base de données BD-MOD à titre d'outil de gestion pérenne du modèle (inputs et outputs), et (iii) au transfert de compétences par la poursuite des modules de formation en modélisation et par la mise en place d'un coaching continu au profit des agents désignés de la DGRE pour une exploitation autonome et durable de cet outil de gestion.

BIBLIOGRAPHIE

- AIEA RAF 7011 (2012) « Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés dans la région du Sahel »
- AIEA RAF 7019 (2018) « Ajout de la dimension des eaux souterraines dans la compréhension et la gestion des ressources en eau partagées dans la région du Sahel »
- Castaing, C., Metour, J. L., Billa, M., Donzeau, P., CHEVREMONTE, P., Egal, E., ... al. (2003). Carte géologique et minière du Burkina à 1/ 1 000 000 du Burkina Faso. Burkina Faso.
- COWI – MCA (2012). Rapport d'état des lieux des ressources en eau du bassin de la Comoé.
- COWI – MCA (2012). Rapport d'état des lieux des ressources en eau de l'espace de compétence de l'Agence de l'eau du Mouhoun.
- Dakouré, D. (2003). Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du Bassin de Taoudéni (Burkina Faso-Mali)-Essai de modélisation (Thèse de Doctorat). Université Paris VI-Pierre et Marie Curie, Paris, France.
- Derouane, J. (2008). Modélisation hydrogéologique du bassin sédimentaire (Rapport final) (p. 101). Direction Générale des Ressources en Eau. Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques.
- Derouane, J. & Dakouré, D. (2007). Hydrogeological structure of the aquifer system in the Taoudeni sedimentary basin, Burkina Faso. In « Aquifer Systems Management: Darcy's Legacy in a World of Impending Water Shortage ». CRC Press, 1st Edition.
- Gombert, P. (1998). Synthèse sur la géologie et l'hydrogéologie de la série sédimentaire du sud-ouest Du Burkina Faso, et rapports annexes de détail hydrogéologique de chaque formation. Programme RESO. Sous-programme Ressources en Eau.
- Huneau & al. (2011). Flow pattern and residence time of groundwater within the south-eastern Taoudeni sedimentary basin (Burkina Faso, Mali). Journal of Hydrology 129(6) : 423-439
- Kouanda, B. (2019). Modélisation intégrée du complexe Mouhoun supérieur – Sourou dans le contexte de changement climatique. Thèse de doctorat, 2iE Ouagadougou, Burkina Faso.
- Kutangila, M. S. (2019). Caractérisation hydrogéologique des aquifères du bassin sédimentaire de Taoudéni, bordure sud-est, Burkina Faso (Mémoire d'ingénieur). L'institut 2iE, Burkina Faso.
- MEA DGRE (2020). Synthèse du suivi des ressources en eau, année 2019.
- OSS (2014-2017) Rapports relatifs au projet GICRESAIT de Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau du Système Aquifère d'Iullemeden Taoudeni – Tanezrouft et du Fleuve Niger.
- Ouedraogo, C. (1983) Etude géologique des formations sédimentaires du bassin précambrien supérieur et paléozoïque du Taoudéni en Haute Volta (Thèse de doctorat). Université de Poitiers, France.
- Ouedraogo, C. (2006). Synthèse géologique de la région Ouest du Burkina Faso (Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest (P/VREO) No. Rapport définitif). Ouagadougou, Burkina Faso: Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques.
- Sauret, E. S. G. (2013). Étude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso) (Thèse de Doctorat). Université de Liège (ULG), Liège, Belgique.

Sogreah Ingénierie. (1994). Etude des ressources en eau souterraine de la zone sédimentaire de la région de Bobo Dioulasso (No. Rapport final). Ouagadougou, Burkina Faso: Direction des Etudes et de la Planification. Ministère de l'Eau.

Tirogo, J. Y. (2016). Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso (Thèse de Doctorat). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI; Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement.

Trompette, R. (1973). Le Précambrien supérieur et le Paléozoïque inférieur de l'Adrar de Mauritanie (bordure occidentale du bassin de Taoudeni, Afrique de l'Ouest), un exemple de sédimentation de craton. Étude stratigraphique et sédimentologique - TOME 2 (Séries 2 et 3) (Thèse de Doctorat). Université de Provence - Aix-Marseille I.

ANNEXES

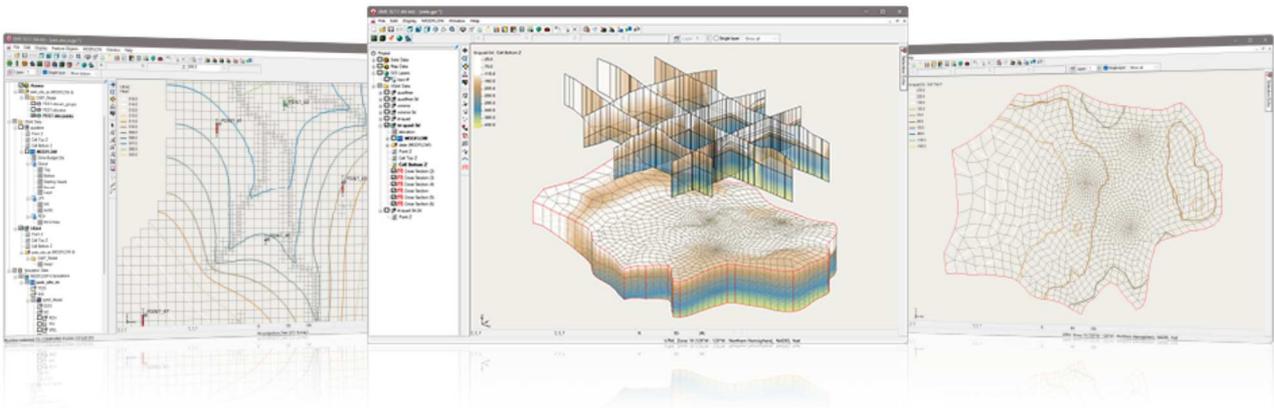
ANNEXE 1 : DESCRIPTION DU LOGICIEL GMS ET DE MODFLOW



GMS - Groundwater Modeling System



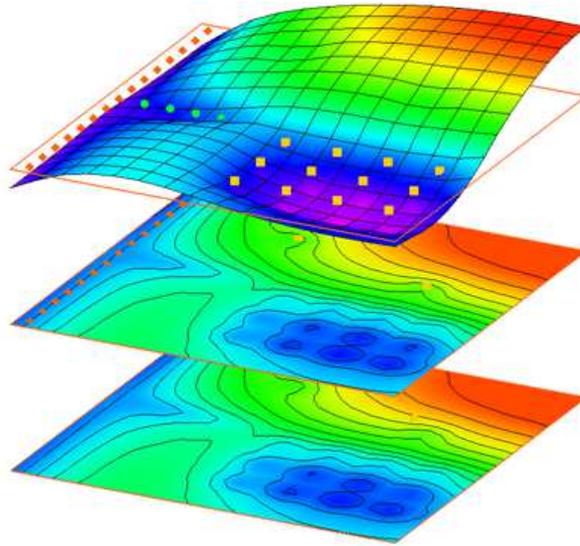
*Create 3D models
with speed & simplicity using
GMS - the most intuitive & capable platform
for groundwater & subsurface simulations*



“I’ve used GMS for over 15 years on a wide variety of modeling and visualization projects. The conceptual model approach/tools and continuing improvements to the software allow me to efficiently develop cost-effective models for clients who are always concerned about their budget. The Aquaveo development team is very responsive to questions/suggestions and the online discussion group is a great forum for both users and developers...”

- **Sean Czarniecki, P.E., Sr. Project Engineer**
AECOM

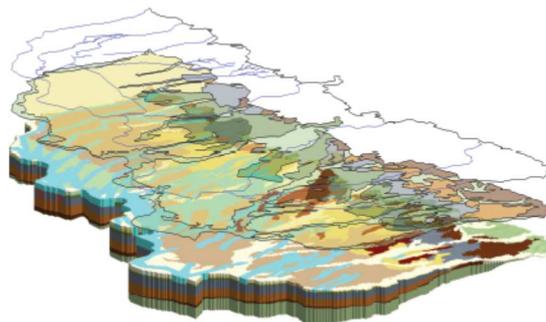
[read more...](#)



Speed up & simplify model building with the conceptual model approach in GMS

We pioneered conceptual modeling and have refined it over many years. That's why GMS is the quickest and most intuitive groundwater modeling interface available. Construct a high level representation of the model using familiar GIS objects: points, arcs and polygons and easily update the model as needed. Conceptual modeling in GMS [starts at \\$2,815](#) (including 3D visualization)

For models with simple geometry and boundary conditions, use the grid approach and edit values directly in the grid.

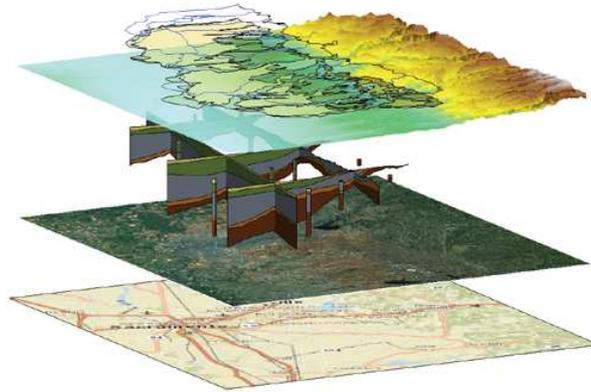


3D visualization optimized for performance

GMS is the most advanced software system available for performing groundwater simulations in a three-dimensional environment.

- Interact with models in true 3D
- Optimized OpenGL graphics for improved hardware rendering

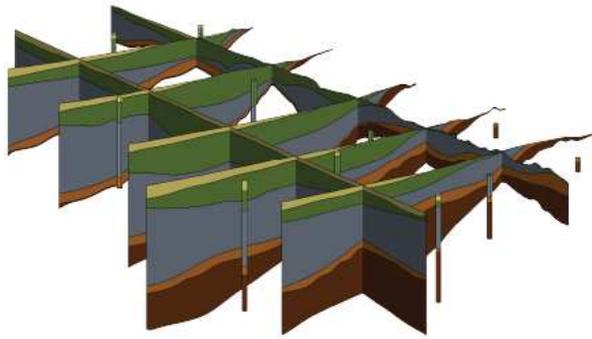
- Create photo-realistic renderings
- Generate animations for PowerPoint or web presentations
- Drape images over the model and control the opacity
- Annotations – Add north arrows, scale bars, reference images, company logos, and more



Import a variety of data formats & imagery

Models require data from many different sources. That's why GMS is built to easily import numerous file types:

- Raster images including georeference and projection support
- Topographical maps & elevation data
- Borehole data including stratigraphy and geophysical data
- Native MODFLOW files
- MODFLOW files from Visual MODFLOW, Groundwater Vistas and PM Win
- Web data services such as TerraServer
- ArcGIS geodatabases and shapefiles
- CAD files including .dwg, .dgn, and .dxf formats
- Worldwide projection support including Cartesian and Geographic Systems
- File Import wizard for delimited text files and spreadsheets



Advanced subsurface characterization

From cross-section editing to advanced probability statistics, GMS offers unparalleled subsurface modeling tools.

- Generate iso-surfaces from 3D data to visualize plumes
- Cut cross-sections anywhere through 3D data
- 2D & 3D geostatistics – Kriging, IDW and Natural Neighbor
- Robust and fast algorithms to create solids from horizons



Software from an industry leader

GMS is developed by Aquaveo, an engineering services company with many years of experience developing groundwater modeling solutions.

- Step-by-step tutorials and how-to videos
- Online product documentation
- Phone and email technical support

- Regularly scheduled training courses taught by expert modelers
- On-site training available
- Professional consulting services

GMS 10.7 System Requirements

- **Operating System:** Windows 10
- **RAM:** 16GB or more recommended
- **CPU:** GMS software is CPU intensive. Some models and utilities integrated with GMS can take advantage of multiple processor cores simultaneously. We recommend the fastest CPU your budget allows.
- **Storage:** Recommended storage amount will vary depending on individual data requirements. Latest versions of GMS are very disk I/O intensive.
 - Mechanical hard drive: Basic performance
 - SATA solid state drive: Better performance
 - NVMe solid state drive: Best performance
- **Graphics:** A dedicated graphics card is better than integrated graphics. A basic or mid-range nVidia card designed for gaming works best.
- **Display Resolution:** 1920 x 1080 or greater

Follow Us:



Aquaveo Development Partners:



US Army Corps
of Engineers®

*Engineer Research and
Development Center*



esri Partner Network
Sponsor



U.S. Department of Transportation
**Federal Highway
Administration**

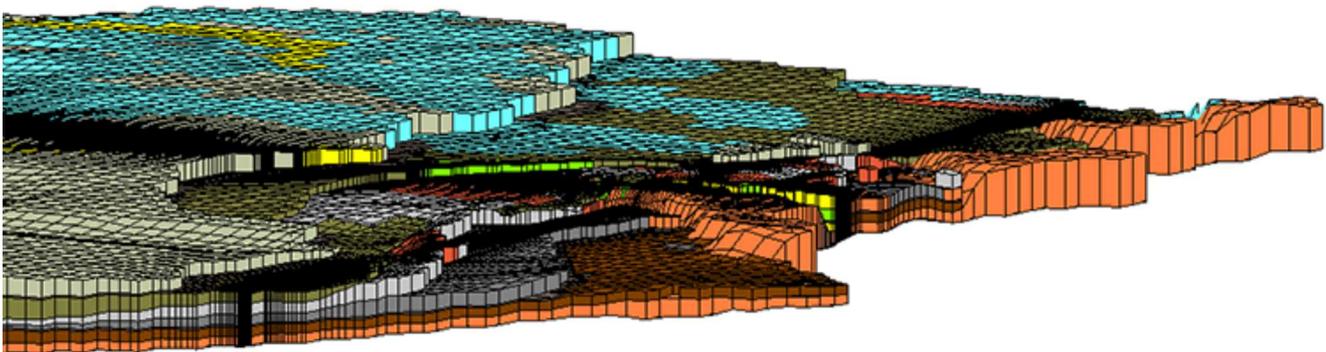
Copyright © 2021 Aquaveo, LLC. All rights reserved.
[Privacy policy](#)

Tel: +01 801-691-5528
Email: info@aquaveo.com



MODFLOW Modeling with GMS

Advanced three-dimensional groundwater modeling with MODFLOW



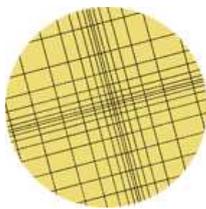
Dedication to MODFLOW support

- All versions of MODFLOW supported: 6, USG, LGR, NWT, 2005, 2000, 96, 88
- Many MODFLOW packages supported (see table below) with more to come
- Guaranteed to read any model that MODFLOW can run
- Support for MODFLOW related packages such as MODPATH, MT3DMS, MT3D-USGS, RT3D, PEST, and built in ZONEBDGT
- Full suite of manual and automated calibration tools including PEST, Parallel PEST, Monte Carlo simulations, calibration targets, plots and charts
- Large model support (grid cells, stress periods) with smart memory management and caching for maintained responsiveness
- Transient data support in real date/time format
- Interpolation of transient data
- Stochastic Simulation tools including Monte Carlo, Latin Hypercube, Gaussian Field, T-PROGS (better than indicator kriging) and Risk Analysis wizard for capture zone and transport analysis.

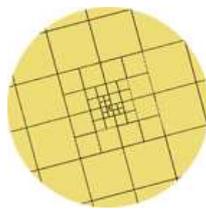
MODFLOW Package	Description
BAS6	Basic Package
BCF6	Block Centered Flow Package
CHD1	Time Variant Specified Head Package
DE4	Direct Solver
DRN1	Drain Package
DRT1	Drain Return Package
EVT1	Evapotranspiration Package

ETS1	Evapotranspiration Segments Package
GAGE	Gage Package
GHB1	General Head Boundary Package
GMG	Geometric Multi-Grid
HFB1	Horizontal Flow Barrier Package
HUF	Hydrogeologic Unit Flow Package
LAK3	Lake Package
LPF	Layer Property Flow Package
MNW1	Multi-Node Well 1 Package
MNW2	Multi-Node Well 2 Package
NWT	Newton Solver
OUT1	Output Control
PCG2	Preconditioned Conjugate Gradient Method
PCGN	Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control
RCH1	Recharge Package
RIV1	River Package
SAMG	Algebraic MultiGrid for Systems Solver
SFR2	Streamflow-Routing Package
SIP	Strongly Implicit Procedure
SOR	Slice-Successive Overrelaxation Method
SUB	Subsidence Package
STR1	Stream-Routing Package
SWI	Seawater Intrusion Package
WEL1	Well Package
UPW	Upstream Weighting Flow Package
UZF1	Unsaturated-Zone Flow Package

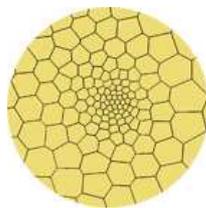
Structured or Unstructured Grid Options



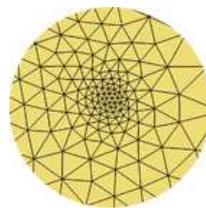
MODFLOW
Traditional Grid



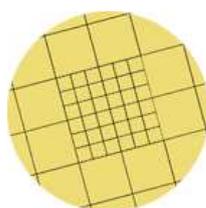
MODFLOW-USG
Quadtree Grid



MODFLOW-USG
Voronoi Grid



MODFLOW-USG
TriQuad Grid



MODFLOW-LGR
Local Grid

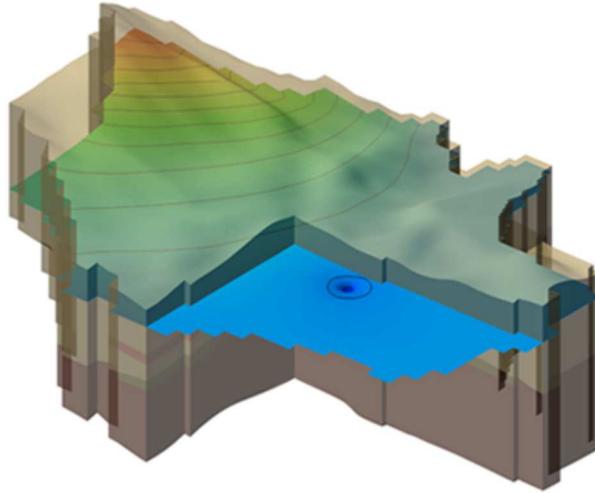
GMS Supported Models

- [MODFLOW](#)
- [MODFLOW-USG](#)
- [MODFLOW-LGR](#)
- [MODPATH](#)
- [MT3DMS](#)
- [PHT3D](#)
- [SEAWAT](#)
- [RT3D](#)
- [SEAM3D](#)
- [MODAEM](#)
- [UTEXAS](#)
- [SEEP2D](#)
- [FEMWATER](#)
- [FEFLOW](#)

GMS Supported Utilities

GMS 10.0 supports a wide variety of structured and unstructured MODFLOW grids to provide the right solution for your modeling needs. Current GMS 10.0 licenses with MODFLOW receive MODFLOW-USG for free!

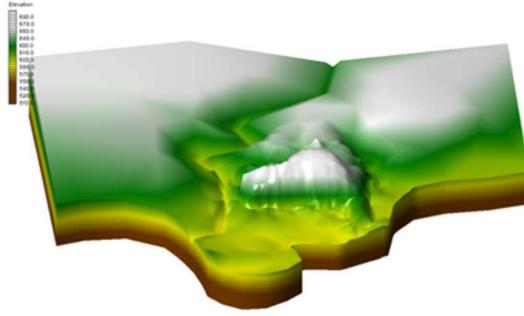
- [PEST & Parallel PEST](#)
- [T-PROGS](#)
- [SAMG Solver](#)
- [ZONEBUDGET](#)



Full 3D visualization

From cross-section editing to advanced probability statistics, GMS offers unparalleled subsurface modeling tools.

- Real time panning, zooming and rotating in 3D
- Optimized OpenGL graphics for improved hardware rendering
- Texture mapping of images on surfaces
- Transparency of contours, texture maps, surfaces, iso-surfaces
- Light source and specularity
- Cut away views to see the inside
- 3D cross sections at any angle
- Iso-surfaces
- Create animation videos - create fly-bys, animate transient data, moving cross sections

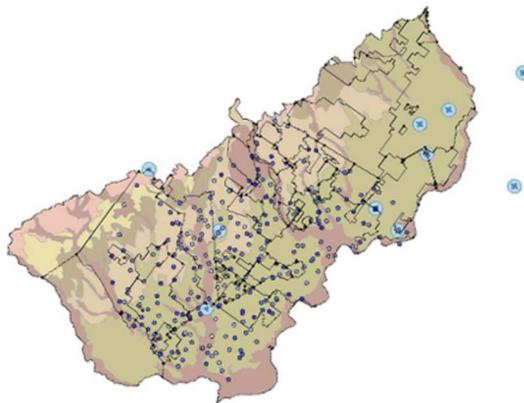


Conceptual modeling

Discover the power and capabilities of MODFLOW & GMS with a **free 2-week trial**. Visit the [Download Center](#) for the latest full installation of GMS. A collection of GMS and MODFLOW tutorials are also available to help make learning GMS quick and easy.

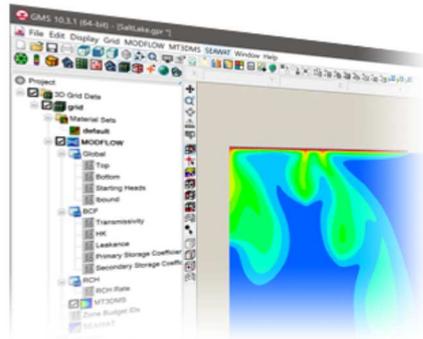
The MODFLOW tutorials provide step-by-step instructions for:

- Grid independent representation of model features using GIS type objects (points, arcs and polygons)
- Grid independent representation of stratigraphy using solids
- Grid independent representation of stratigraphy using point data and interpolation to MODFLOW layers
- Display of background images of maps, aerial photos etc.
- 2D and 3D interpolation and geostatistics including kriging



GIS integration

- Tight integration with GIS data
- Open Geodatabases and Shapefiles directly in GMS
- Export Geodatabases and Shapefiles
- Integration with [Arc Hydro Groundwater](#) for powerful report and map generation inside ArcMap
- Worldwide global projection support including Cartesian and geographic (lat/lon)



User friendly interface

- Standard, intuitive, user-friendly windows interface
- Annotation tools for report generation
- Many step-by-step tutorials
- Complete help system
- Active forums with contributions from users and developers
- Full phone and email tech support
- Regularly scheduled training courses with expert modelers. On-site training available

Follow Us:



Aquaveo Development Partners:



**US Army Corps
of Engineers**®

*Engineer Research and
Development Center*



esri Partner Network
Silver



U.S. Department of Transportation
**Federal Highway
Administration**

Copyright © 2021 Aquaveo, LLC. All rights reserved.
[Privacy policy](#)

Tel: +01 801-691-5528
Email: info@aquaveo.com

MODFLOW and Related Programs | U.S. Geological Survey

Originally developed and released solely as a groundwater-flow simulation code when first published in 1984, MODFLOW's modular structure has provided a robust framework for integration of additional simulation capabilities that build on and enhance its original scope. The family of MODFLOW-related programs now includes capabilities to simulate coupled groundwater/surface-water systems, solute transport, variable-density flow (including saltwater), aquifer-system compaction and land subsidence, parameter estimation, and groundwater management.

MODFLOW Development Plans, March 3, 2022

The USGS Water Mission Area actively develops and supports the MODFLOW suite of programs. Ongoing efforts include providing maintenance and support for existing versions of MODFLOW such as MODFLOW 6, MODFLOW-2005, MODFLOW-NWT, MODFLOW-USG, MODPATH, MT3D-USGS, and related and supporting programs such as FloPy and PEST++. Current development efforts are focused on adding new capabilities to MODFLOW 6. These development efforts include:

Extension of MODPATH to track particles in MODFLOW 6 models that use Discretization by Vertices (DISV) and fully unstructured (DISU) grids.

Parallelization of the MODFLOW 6 multi-model framework for High-Performance Computing (HPC) using the Message Passing Interface (MPI). Preliminary versions of MODFLOW 6 with this new capability have been used to solve groundwater models with billions of model cells. This new parallelization capability is being developed in a general manner that can be easily extended for future MODFLOW model types (for example GWT); applied at local, regional, and continental scales; and can be used on desktops and HPC systems.

In addition to these ongoing efforts, future efforts may include development of new surface water, pipe network, and heat transport models. The USGS plans to continue these development efforts to meet the needs of the USGS, our stakeholders, and the needs of the hydrologic modeling community. Users are encouraged to track MODFLOW developments through our version-controlled [MODFLOW 6 repository](#).

MODFLOW Versions

The USGS releases multiple versions of MODFLOW. This page focuses on MODFLOW versions that are part of USGS water enterprise software that is funded, developed, and maintained by the USGS Water Resources Mission Area. There is a [core MODFLOW version](#), which is developed and

maintained by the USGS Water Mission Area, and there are advanced versions. The core MODFLOW version is the one that is under active development and is often the most widely used and most thoroughly tested version. MODFLOW 6 is presently the core MODFLOW version distributed by the USGS, but MODFLOW-2005 (the previous core version) is still actively maintained and supported. Advanced MODFLOW versions include specialized MODFLOW variants and versions of MODFLOW that use newer formulations. These advanced MODFLOW versions are also available from the USGS.

There have been six major releases of the core MODFLOW version: MODFLOW-84, MODFLOW-88, MODFLOW-96, MODFLOW-2000, MODFLOW-2005, and MODFLOW 6. The first three versions of the code, MODFLOW-84, MODFLOW-88 and MODFLOW-96, were based on the initial conceptualization of the program as a groundwater-flow model only. Specific aspects of a groundwater-flow system are simulated by these codes by use of independent, modular-programming components called "**Packages**," such as the Well Package and River Package. MODFLOW's modular design was further expanded with the release of MODFLOW-2000 by the addition of "**Processes**," which are defined as parts of the code that solve a major equation or set of related equations and that consist of sets of the underlying packages. The part of the code that solves the groundwater-flow equation became the Groundwater Flow (GWF) Process. Although additional processes have been developed for MODFLOW, the GWF Process remains a core process on which other MODFLOW simulation capabilities are built. The primary change in MODFLOW-2005 from MODFLOW-2000 is the approach used by MODFLOW-2005 for managing internal data.

MODFLOW 6 is the newest core version and uses a new format of blocks and keywords for input of model data. It was written from scratch using an object-oriented design. MODFLOW 6 presently supports one type of process model — the GWF Model. Other models may be added in the future, such as a groundwater transport model, a surface-water model, and a pipe network model, for example. Underlying MODFLOW 6 is a framework that allows developers to add new models and the interactions between models. A key feature of the new MODFLOW 6 framework is the ability to solve multiple, tightly coupled, numerical models in a single system of equations. These may be multiple models of the same type or of different types. MODFLOW 6 is an entirely new version of MODFLOW.

Core Versions

[MODFLOW 6](#): current core version

[MODFLOW-2005](#): previous core version

MODFLOW Variants: Newer, specialized, or advanced versions of MODFLOW for use by experienced modelers

[MODFLOW-NWT](#): MODFLOW-NWT uses a Newton-Raphson formulation to improve solution of unconfined groundwater-flow problems.

[MODFLOW-USG](#): MODFLOW-USG uses an unstructured-grid approach to simulate groundwater flow and tightly coupled processes using a control volume finite-difference formulation.

[GSFLOW](#): GSFLOW is a coupled groundwater and surface-water flow model based on the USGS Precipitation-Runoff Modeling System (PRMS), MODFLOW-2005, and MODFLOW-NWT.

[GWM](#): The Groundwater Management (GWM) Process for MODFLOW-2000 and MODFLOW-2005 is used to simulate groundwater management

MODFLOW-Based Particle Tracking and Solute Transport

[MODPATH](#): MODPATH is a particle-tracking post-processing model that computes flow paths using output from MODFLOW.

[MT3D-USGS](#): MT3D-USGS is a groundwater solute transport simulator for MODFLOW.

[SEAWAT](#): SEAWAT is a combined version of MODFLOW and MT3DMS for simulation of variable-density groundwater flow and transport.

Parameter Estimation and Uncertainty Analysis

[PEST++](#): PEST++ is an objected-oriented universal parameter estimation code written in C++ that can be used to calibrate MODFLOW models.

MODFLOW Utilities, Post Processors, and Graphical User Interfaces (GUIs)

[FloPy](#): FloPy is a Python package for creating, running, and post-processing MODFLOW-based models.

[GRIDGEN](#): GRIDGEN is a program for generating layered quadtree grids for MODFLOW-USG.

[GW Chart](#): GW_Chart is a graphing application for MODFLOW, Zonebudget, and other codes. GW_Chart also converts binary cell-by-cell flow files to text files.

[ModelMuse](#): ModelMuse is a GUI for MODFLOW 6, MODFLOW-2005, MODFLOW-LGR, MODFLOW-NWT, MODFLOW-CFP, MODFLOW-LGR, MODFLOW-OWHM, MT3DMS, MT3D-USGS, SUTRA, WellFootprint, PHAST, MODPATH, and ZONEBUDGET.

[ModelViewer](#): Model Viewer is a program for 3D visualization of groundwater-model results.

[ZONEBUDGET](#): ZONEBUDGET is a program for computing subregional water budgets for MODFLOW.

Links to additional MODFLOW related software, including legacy and superseded software, are available through the [USGS Water Resources Groundwater Software](#) page.

Running MODFLOW

MODFLOW is a command line executable program written in FORTRAN that reads ASCII text and binary input files and writes ASCII text and binary output files. Although experienced MODFLOW

users may be able to create MODFLOW input files by hand, most MODFLOW users rely on a graphical user interface (GUI) to prepare the input files and post-process the output files. The MODFLOW program itself does not generate contour plots or any other type of graphical output. These plots must be generated from MODFLOW results using other software programs. The USGS distributes several free pre- and post-processors for MODFLOW. Commercial GUIs are also available for sale by private vendors.

Online MODFLOW Guide

Most MODFLOW versions are periodically updated. Some of these updates include changes to the format of the input and output files. These changes are described with release notes that are distributed with each program. The USGS also provides online guides for several MODFLOW versions. These online guides contain up-to-date input instructions and other helpful information. The [MODFLOW-2005 guide can be found online](#). An online guide is not presently available for MODFLOW 6; an up-to-date user guide is included in the MODFLOW 6 distribution.

Where to Go From Here

Successful use of MODFLOW typically requires a college-level modeling course or professional training on groundwater modeling. In some situations, the USGS can provide training to governmental agencies with a cooperative agreement with the USGS; agencies can contact their cooperating USGS office for additional information. MODFLOW courses are also offered by several private companies. Those with groundwater modeling experience can [download MODFLOW](#). For instructions on MODFLOW installation, please refer to the section "Installation and Execution" in the MODFLOW 6 [Release Notes](#), provided with the download.

While training is recommended, those interested in self study are encouraged to begin by:

reading the [report documenting the initial release of MODFLOW 6](#)

reviewing materials on the MODFLOW software page, and running the test problems available for download with [MODFLOW](#)