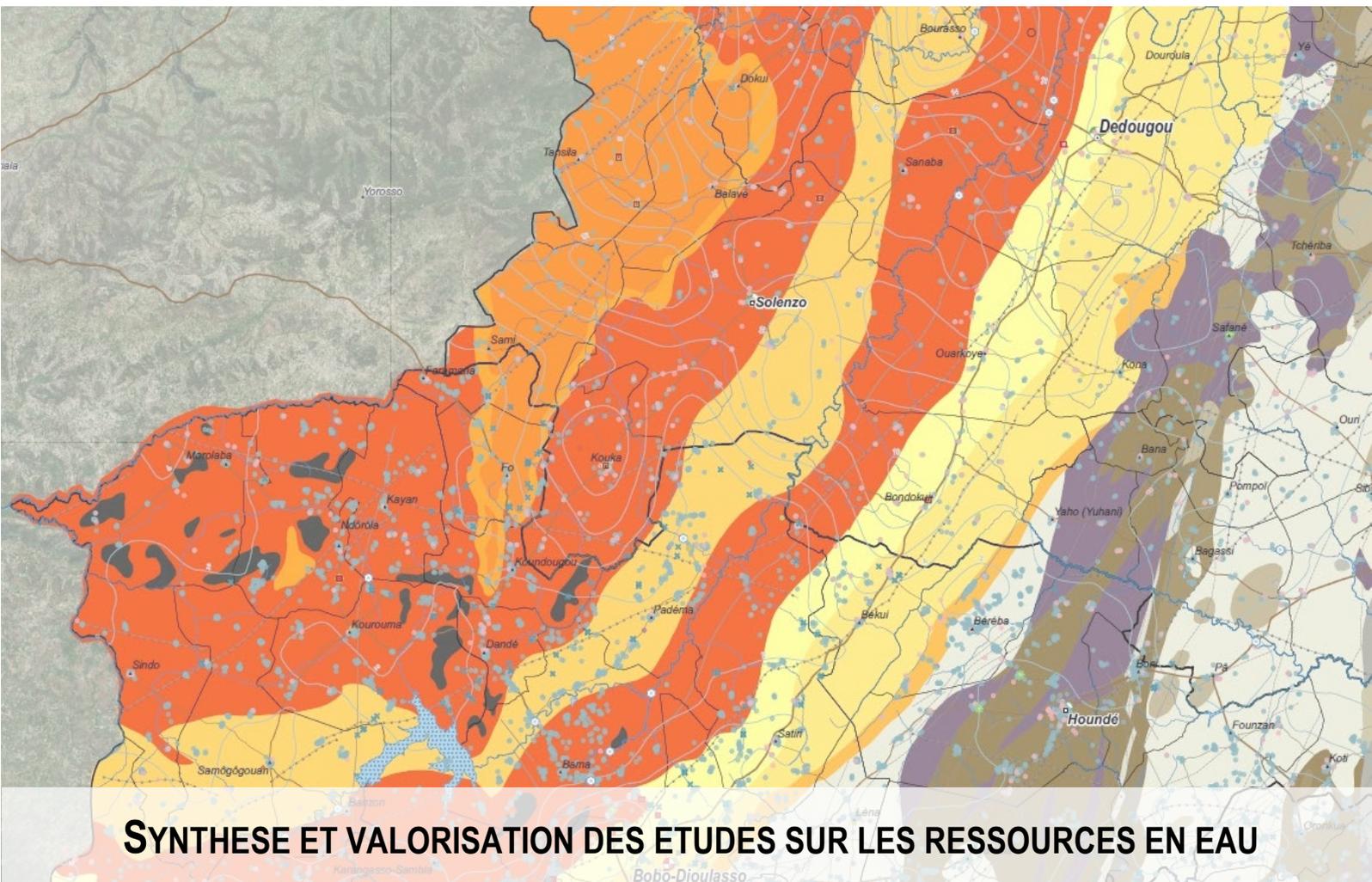




BURKINA FASO
Unité - Progrès - Justice



Ministère de l'Environnement,
de l'Eau et de l'Assainissement
Programme d'Approvisionnement en Eau
et d'Assainissement (PAEA)



SYNTHESE ET VALORISATION DES ETUDES SUR LES RESSOURCES EN EAU

RAPPORT TECHNIQUE RT3.3

ACTUALISATION DE LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE DU BURKINA FASO – PHASE 1

RÉFÉRENCE : RT.3.3-P1

VERSION FINALE – décembre 2022



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 3.3 – Actualisation de la carte hydrogéologique du Burkina Faso
Activité 3.3.1 – Analyse de la carte hydrogéologique actuelle, des besoins et des contraintes Activité 3.3.2 – Elaboration du modèle conceptuel et réalisation de la nouvelle carte hydrogéologique Activité 3.3.3 – Développement du prototype de carte hydrogéologique et d'un applicatif de visualisation Activité 3.3.4 – Réalisation de la nouvelle carte hydrogéologique

RAPPORT TECHNIQUE RT3.3-P1 :

Actualisation de la carte hydrogéologique du Burkina Faso

Phase 1 : Prototype de carte hydrogéologique et d'application web

Réf : RT3.3-P1	Version : Finale VF01	Date : 23/12/2022
Préparé par Geoffroy Detry, avec la collaboration de Alexandre Maignard, Orane Boswell, Tidiani Koné, Levy Stéphane Bandré, Johan Derouane		Vérifié par : Johan Derouane, Chef de mission

Table des matières

A.	<i>Introduction</i>	8
A.1.	Cadre de l'intervention	8
A.1.1.	Contexte.....	8
A.1.2.	Le PAEA et la SEVERE	9
A.2.	Thématique et phasage des activités du Résultat 3.3	10
A.2.1.	Cadre thématique	10
A.2.2.	Relations avec les études et travaux du DR3 du PAEA	11
A.3.	Méthodologie	12
A.4.	Structuration du rapport	13
B.	<i>Analyse des cartes hydrogéologiques et inventaire des données</i>	14
B.1.	Analyse des cartes hydrogéologiques de référence	14
B.1.1.	La carte hydrogéologique du Burkina Faso (1993)	14
B.1.2.	La carte hydrogéologique du bassin du Kou (2010).....	15
B.1.3.	L'initiative d'actualisation du BUMIGEB (2019).....	17
B.1.4.	La carte hydrogéologique de Wallonie (Belgique, 2008-2022).....	18
B.2.	Comparaison des cartes hydrogéologiques	20
B.3.	Inventaire des données retenues	25
B.3.1.	Les données administratives.....	27
B.3.2.	Les foyers de population.....	28
B.3.3.	Les réseaux routiers et ferrés	28
B.3.4.	Les zones de compétence des Agences de l'Eau	28
B.3.5.	Les zones de compétence et centres opérationnels de l'ONEA	28
B.3.6.	Les données géologiques	29
B.3.7.	Les données pédologiques.....	31
B.3.8.	Les données hydrologiques	31
B.3.9.	Les données hydro-climatiques	35
B.3.10.	Les données topographiques.....	36
B.3.11.	Les Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines et l'intégration des réseaux	37
B.3.12.	Les ouvrages hydrauliques.....	44
B.3.13.	Le réseau hydrométrique.....	44
B.3.14.	Les zones de protection de captage	44
B.3.15.	Les aires classées	44
B.3.16.	Les séries temporelles de mesures	44
B.3.17.	Les produits hydrogéologiques dérivés	48
B.4.	Conclusion sur l'inventaire des données	54
C.	<i>BD-CHGEO : Développement et enrichissement</i>	55
C.1.	Méthodologie de modélisation	55
C.2.	Dénomination et organisation générale	57
C.3.	Modèle de données	58
C.3.1.	Formalisme	58
C.3.2.	Modèle et dictionnaire	59

C.4.	Environnement logiciel	61
C.5.	Alimentation de la BD-CHGEO	62
C.6.	Règles de gestion de la BD-CHGEO	65
C.7.	Contrôle qualité.....	65
C.8.	Mise à jour de la BD-CHGEO.....	65
C.9.	Perspectives et évolutions du modèle de la BD-CHGEO.....	67
D.	<i>Actualisation de la carte hydrogéologique papier</i>	68
D.1.	Structure de la carte	68
D.2.	Format et maillage.....	69
D.3.	Contenu de la carte	71
D.4.	Prototype de la carte	72
D.5.	Prototype de notice explicative.....	75
E.	<i>Proposition d'un applicatif interactif.....</i>	77
E.1.	Le cloud comme option privilégiée	77
E.2.	Analyse comparative des solutions WebGIS	78
E.3.	Mise en place de l'application	81
E.4.	Mise à disposition de services Web	86
E.4.1.	Service de visualisation (WMS).....	86
E.4.2.	Service d'accès aux données (WFS et WFS-T).....	86
F.	<i>Conclusion.....</i>	87
	<i>Bibliographie</i>	88
	<i>Annexes.....</i>	90
	<i>ANNEXE 1 – Diagramme de la BD-CHGEO.....</i>	90
	<i>ANNEXE 2 – Dictionnaire de la BD-CHGEO</i>	90
	<i>ANNEXE 3 – Code-source de la BD-CHGEO</i>	90
	<i>ANNEXE 4 – Prototype de Carte hydrogéologique actualisée</i>	90
	<i>ANNEXE 5 – Prototype de notice explicative</i>	90

Liste des illustrations

Figure 1 : Logigramme de l'axe 3.....	9
Figure 2 : Chronogramme du R.3.3	11
Figure 3 : Structure de la carte hydrogéologique du Burkina Faso (projet Bilan d'Eau, 1993).....	14
Figure 4 : Carte hydrogéologique du Burkina Faso (Bilan d'Eau, 1993) - Mosaïque.....	15
Figure 5 : Structure de la carte hydrogéologique du bassin versant du Kou	16
Figure 6 : Carte hydrogéologique du bassin versant du Kou.....	17
Figure 7 : Structure de la carte hydrogéologique actualisée du BUMIGEB.....	18
Figure 8 : Structure de la carte hydrogéologique de Wallonie	19
Figure 9 : Carte hydrogéologique de Chastre-Gembloux (Wallonie, Belgique)	20
Figure 10 : Normalisation des chroniques de mesure.....	28
Figure 11 : Discontinuités entre planches géologiques 2003 et 2018 au 1/200.000.....	30
Figure 12 : Divergence du niveau de détails entre la carte géologique 2003 et 2018.....	30
Figure 13 : Plans d'eau consolidés.....	33
Figure 14 : Sources consolidées du Burkina Faso.....	34
Figure 15 : Table de la chronique des mesures de débits sur les sources	34
Figure 16 : Isohyètes et précipitations interannuelles 2011-2020.....	36
Figure 17 : Carte hypsométrique du Burkina Faso (900m)	37
Figure 18 : Table des ouvrages OMES dans la BD-CHGEO	38
Figure 19 : Appartenance des OMES aux réseaux piézométriques.....	41
Figure 20 : Ouvrages de l'ONEA suivi par des mesures de volumes prélevés.....	43
Figure 21 : Cartes de profondeurs forées	50
Figure 22 : Carte des niveaux statiques.....	51
Figure 23 : Carte des épaisseurs d'altération.....	51
Figure 24 : Carte des épaisseurs d'altération saturée.....	52
Figure 25 : Carte des débits en fin de foration.....	52
Figure 26 : Carte de la recharge annuelle moyenne (méthode bilantaire, THORNTHWAITE).....	53
Figure 27 : Carte de la profondeur du toit du socle cristallin sous le sédimentaire de l'Ouest.....	53
Figure 28 : BD-CHGEO - Modèle simplifié	56
Figure 29 : BD-CHGEO – Vue synoptique du modèle physique	60
Figure 30 : Illustration du dictionnaire de données	61
Figure 31 : Vue de la BD-CHGEO implémentée	62
Figure 32 : Alimentation de la BD-CHGEO.....	63

Figure 33 : Protocole de mise à jour de la BD-CHGEO	66
Figure 34 : Structure de la carte hydrogéologique actualisée	68
Figure 35 : Maillage théorique de la carte hydrogéologique	70
Figure 36 : Maillage optimisé de la carte hydrogéologique	70
Figure 37 : Vue synoptique de la planche #1 de la carte hydrogéologique	73
Figure 38 : Vue à l'échelle du contexte hydrogéologique de la région de Bobo-Dioulasso.....	73
Figure 39 : Carte secondaire de caractérisation géométrique.....	74
Figure 40 : Légende associée à la carte hydrogéologique principale.....	75
Figure 41 : Page de couverture de la notice explicative	76
Figure 42 : Architecture de QGIS Cloud.....	80
Figure 43 : Flux de travail du gestionnaire de la BD-CHGEO	81
Figure 44 : Connexion BD-CHGEO automatiquement ajoutée par QGIS Cloud	81
Figure 45 : Vue d'ensemble de l'application WebGIS	82
Figure 46 : Fonctionnalités de l'application WebGIS	85
Figure 47 : Disponibilité d'un service web de visualisation.....	86

Liste des tableaux

Tableau 1 – Comparaison de contenu des cartes hydrogéologiques	21
Tableau 2 – Inventaire des données retenues dans la BD-CHGEO	25
Tableau 3 – Inventaire de l'entrepôt de données maillées.....	27
Tableau 4 – Reprise des bases de données RESO et VREO	38
Tableau 5 – Reprise d'ouvrages provenant de bases de données annexes.....	40
Tableau 6 – Séries temporelles reprises dans la BD-CHGEO	46
Tableau 7 – Bases de données contributrices.....	57
Tableau 8 – Formalisme de la BD-CHGEO	58
Tableau 9 – Exemple de formalise de la BD-CHGEO.....	59
Tableau 10 – Tables de la BD-CHGEO Vs Référentiels.....	64
Tableau 11 – Couches de la BD-CHGEO exploitée sur la carte	71
Tableau 12 – Analyse de solutions WebGIS Cloud.....	80

Liste des abréviations

A.X.X	Activité X.X
AE	Agence de l'Eau
AEM	Agence de l'Eau du Mouhoun
AEP	Approvisionnement en eau Potable
AID	Agence internationale de développement
ANAM	Agence Nationale de la Météorologie
APEFE	Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger
BADEA	Banque Arabe pour le Développement Economique de l'Afrique
BD	Base de Données
BD-CHGEO	Base de données de la Carte hydrogéologique du Burkina Faso
BD-OMES	Base de données des Ouvrages de Mobilisation des Eaux Souterraines
BD-SEVR	Base de données de l'Etude de Synthèse et la valorisation des études sur les ressources en eau au Burkina
BEWACO	Bilan d'Eau iWACO
BKF	Burkina Faso
BM	Banque Mondiale
BMH	DREA de la Boucle du Mouhoun
BNDT	Base Nationale de Données Topographiques
BUMIGEB	Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina
BV	Bassin versant
DD	Degrés Décimaux
DEIE	Direction des Etudes et de l'Information sur l'Eau
DESO	Direction des Eaux souterraines
DMS	Degrés-Minutes-Secondes
DG	Direction Générale
DGARNE	Direction Générale de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement
DGIH	Direction Générale des infrastructures Hydrauliques
DIRH	Direction de l'Inventaire des Ressources Hydraulique
DGRE	Direction Générale des Ressources en Eau
DPE	Direction de la Planification et des Etudes
DR	Domaine de Résultat
DSI	Direction des Services Informatiques
ETL	Extraction, Transformation, Loading
FLDAS	Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System
FHV	Forages Hydraulique Villageoise
GAAS	GIS As a Service
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
HWSD	Harmonised World Soil Database
IGB	Institut Géographique du Burkina Faso
IAAS	Infrastructure As a Service
IOTA	Infrastructures, Ouvrages, Travaux et Activités
IWACO	International Water Consult
MEA	Ministère de l'Eau et de l'Assainissement
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MS	Microsoft
MV	Multi-Village
ODD	Objectif de Développement Durable
OMD	Objectifs du Millénaire pour le Développement
OMES	Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines
ONEA	Office national de l'eau et de l'assainissement
PAAS	Platform As a Service
PADSEA	Programme d'Appui au Développement du Secteur Eau et Assainissement

PADSEM	Projet d'appui au développement du Secteur minier
PAEA	Programme d'Approvisionnement en Eau et d'Assainissement
PAGIRE	Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PDI	Pentaho Data Integration
PESO	Projet d'Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso
PGEA	Programme Gouvernance du secteur de l'Eau et Assainissement
PHV	Projet Hydraulique Villageoise
PN-AEPA	Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable et Assainissement
PN-AEP	Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable
PN-AEUE	Programme National d'Assainissement des Eaux Usées et Excrétas
PN-AH	Programme National des Aménagements Hydrauliques
PNDES-EA	Plan National de Développement Economique et Social – Composante Eau et Assainissement
PN-GIRE	Programme national Gestion intégrée ressources en eau
R.X.X	Résultat X.X
RESO	Programme de Valorisation des Ressources en Eau du Sud-Ouest
RGPH	Recensement général de la population et de l'habitation
RT	Rapport technique
S2	Sentinel-2
SAAS	Software As a Service
SEVERE	Synthèse et la valorisation des études sur les ressources en eau au Burkina
SGBD	Système de Gestion de Base de Données
SHGEO	Service Hydrogéologie
SHP	Shapefile
SIEPRE	Service de l'information, des Etudes et de la Promotion de Recherche sur l'Eau
SIG	Système d'Information Géographique
SNIEAU	Système National d'Information sur l'Eau
SP-GIRE	Secrétariat Permanent pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau
SPW	Service public de Wallonie
SQE	Service Qualité des Eaux
SQL	Structured Query Language
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TDR	Termes de Référence
UGP	Unité de Gestion du Programme
UHG	Unité Hydrogéologique
UTM	Universal Transverse Mercator
VM	Vue matérialisée
VREO	Programme de valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest du Burkina
WBI	Wallonie-Bruxelles International
WGS	World Geodetic System
WFS	Web Feature Service
WFS-T	Transactional Web Feature Service
WMS	Web Map Service

A. INTRODUCTION

A.1. Cadre de l'intervention

A.1.1. Contexte

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.1.2. Le PAEA et la 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 **trois 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.**

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, 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.a).

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.

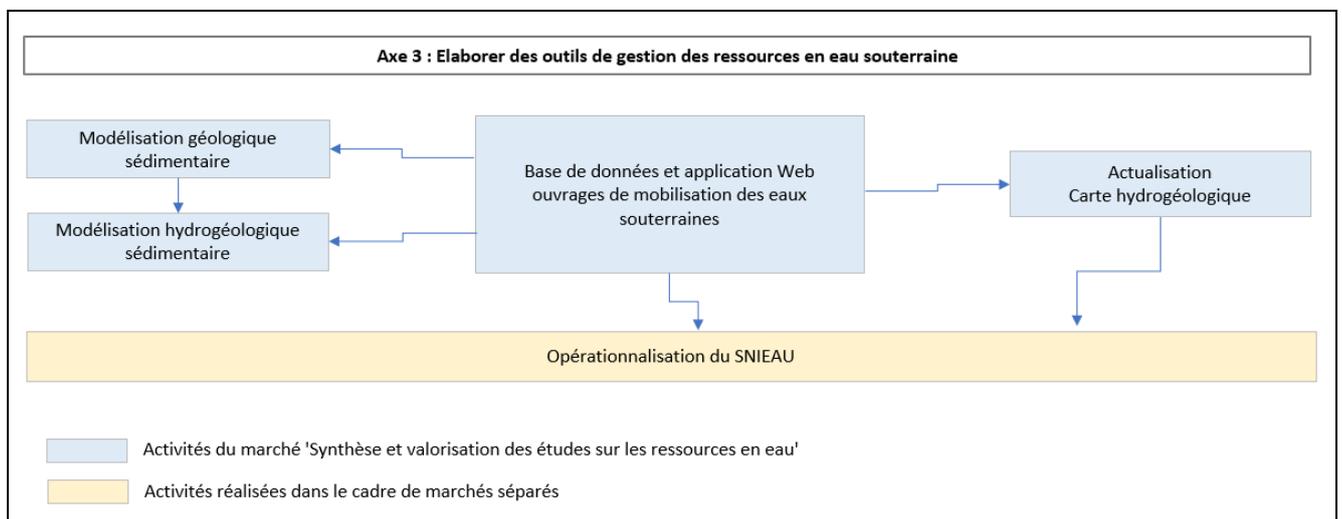


Figure 1 : Logigramme de l'axe 3

Le présent rapport s'inscrit dans les activités du R.3.3 « **Actualisation de la carte hydrogéologique du Burkina Faso** »

A.2. Thématique et phasage des activités du Résultat 3.3

A.2.1. Cadre thématique

Le R.3.3 de l'Axe 3 de la SEVERE est focalisé sur l'exploitation et la diffusion de données hydrogéologiques actualisées collectées auprès des détenteurs de données en la matière ou produites dans le cadre du PAEA. En termes de données, l'objectif est de disposer d'une base de données centrale reprenant des informations hydrogéologiques de référence dont la temporalité se concentre sur les 25 dernières années. Cette base de données sera ensuite exploitée pour générer les cartes hydrogéologiques au format papier.

Un prototype de carte hydrogéologique attractif sera proposé par le Groupement. Le nombre de cartes générées sera basé sur un nouveau maillage. Les cartes seront accompagnées par une notice explicative dont le canevas sera proposé dans le présent rapport.

En vue de valoriser les données de la carte hydrogéologique et d'étendre le spectre de diffusion à des solutions modernes, le Groupement proposera également un prototype d'application de visualisation interactive de type WebGIS, et ce malgré le fait que ce type d'outils soit davantage intégré dans le périmètre de développement du marché [**Opérationnalisation du SNIÉAU**] (PAEA-DR3) qui doit assurer l'accès à toutes les données relatives au secteur de l'eau. Le rapport exposera le choix de la solution technique retenue et un prototype fonctionnel « Carte Hydrogéologique du Burkina Faso » sera proposé. En marge des développements autour de cet applicatif, le Groupement proposera également un service Web de visualisation (*Web Map Service – WMS*) permettant la réutilisation des données hydrogéologiques diffusées au sein du WebGIS dans d'autres plateformes tel que des logiciels-SIG (ex. QGIS).

De ce fait, les produits cartographiques envisagés dans le R.3.3 sont les suivants :

- (1) Les cartes hydrogéologiques en version papier et version numérique ;
- (2) L'applicatif de visualisation des données sur Internet (WebGIS) ;
- (3) Un service Web de visualisation sur interface SIG (WMS) ;
- (4) La base de données relationnelle BD-CHGEO.

Le R.3.3 compte 6 activités permettant de couvrir l'ensemble de ces tâches :

- (1) Etat de l'art : Analyse de la carte hydrogéologique actuelle, des besoins et des contraintes;
- (2) Base de données : Elaboration du modèle conceptuel et mise en place de la BD de la carte hydrogéologique (BD-CHGEO) ;
- (3) Alimentation et Qualité : Consolidation des données de référence et alimentation de la base de données CHGEO en données.
- (4) Produits cartographiques : Développement du prototype de carte hydrogéologique papier et de l'applicatif de visualisation ;
- (5) Evolution des produits : Développements évolutifs autour de l'application de visualisation ;
- (6) Rapportage et tenue de formation.

Ces activités peuvent être transposées en phases réparties dans le temps. Bien que certaines phases se chevauchent entre elles, un continuum a permis d'étaler la réalisation du R.3.3 sur une durée de 6 mois en Année 2 du projet (2022). Cette durée n'intègre pas certaines périodes d'actualisation de données et d'évolution des produits cartographiques vers les versions définitives, qui sont prévues en année 3 et 4 du projet (2023, 2024). Pour cela, le rapport reprend l'ensemble des résultats de la première phase du R.3.3, à savoir une base de données relationnelle implémentée et alimentée, le prototype de carte hydrogéologique, une maquette de notice explicative et une proposition d'application de visualisation interactive. Ces éléments sont soumis à validation avant d'entamer la Phase 2 du R.3.3 plus tard dans le projet et qui consistera en une actualisation des données et à la production des documents finaux.

A.3. Méthodologie

Les travaux du R.3.3 ont été réalisés par une équipe d'experts du Groupement SHER-ARTELIA. Cette équipe était constituée comme suit :

- M. Johan Derouane, chef de mission ;
- M. Geoffroy Detry, expert international en bases de données et développement Web ;
- M. Alexandre Maignard, expert international d'appui en SIG et bases de données ;
- Mme Orane Boswell, expert d'appui en géomatique ;
- M. Tidiani Koné et M. Stéphane Levy Bandré, experts d'appui en hydrogéologie.

L'équipe a travaillé sur place au Burkina Faso et à distance à travers de nombreuses vidéoconférences.

Les activités du R.3.3 ont démarré par un inventaire des cartes hydrogéologiques existantes au Burkina Faso, que ce soit au niveau national ou sur des étendues plus locales. A ce titre, les experts du Groupement ont encadré deux mémoires de fin de master d'étudiants de 2iE qui concernaient respectivement « l'élaboration d'un SIG consolidé des ressources en eau et contribution à l'actualisation des cartes hydrogéologiques du Burkina Faso » (TIDIANI, 2022) et « l'apport du SIG et de l'analyse multicritère à l'estimation des zones de recharge préférentielle en zone de socle » (BANDRE, 2022). Cet investissement a permis de lancer les travaux d'état de l'art et de modélisation. Des entretiens avec les institutions de référence (DEIE, BUMIGEB) ont notamment été réalisés dans ce cadre. Enfin, la carte hydrogéologique de Wallonie (Belgique) a été ajoutée à l'analyse afin de dégager des jeux de données utiles à intégrer à la nouvelle carte du Burkina Faso.

L'analyse de l'ensemble des cartes a permis d'établir un inventaire des données devant figurer dans la base de données de la carte hydrogéologique (BD-CHGEO). Cet inventaire reprend la liste des couches de données de référence à reprendre avec, pour chacune d'entre elles, l'intitulé de la donnée source et son répertoire/sa base de données d'origine. Cette compilation a servi de prémices à l'élaboration du modèle conceptuel de la BD-CHGEO mais également à identifier les couches devant apparaître sur la partie principale ou les encadrés secondaires de la carte papier.

Un modèle conceptuel de données de la BD-CHGEO a été élaboré puis implémenté sous un SGBD libre. Ce canevas a ensuite été enrichi des données thématiques identifiées par l'inventaire. D'une manière générale, la BD-CHGEO est vue comme une base de données « produit », ce qui signifie qu'elle exploite en grande majorité les couches stockées dans d'autres référentiels. Dans le cadre du R.3.3, l'alimentation de la BD-CHGEO s'est appuyé sur les bases de données BD-SEVR et BD-OMES produites respectivement par le R.1.1 et le R.3.1 de la SEVERE. Suite à l'inventaire, les couches chargées dans la BD-CHGEO ont pu être classées en trois catégories, permettant de quantifier l'effort d'intégration à produire :

- (1) Les jeux de données déjà capitalisés dans la BD-SEVR et la BD-OMES. Ces couches ont été transférées dans la BD-CHGEO via le développement d'une passerelle de chargement implémentée dans l'outil ETL « Pentaho Data Integration » (PDI – Kettle). Plusieurs jeux de données sources ont dû être actualisés ou consolidés avec chargement (ex. Table des ouvrages de la BD-OMES) ;
- (2) Les jeux de données identifiés comme utile pour la BD-CHGEO mais non capitalisés dans les BD-SEVR et BD-OMES lors de l'alimentation de ces dernières. Ces couches de référence ont d'abord fait l'objet d'une intégration dans la base de données source ad-hoc (soit SEVR ou OMES) avant d'être transférées à la BD-CHGEO. Cela a permis de rester au plus près de la notion de base de données « produit » pour considérer la BD-CHGEO ;
- (3) Les jeux de données spécifiques à la BD-CHGEO. Il s'agit de couches de données thématiques produits par le Groupement par modélisation (interpolation, krigeage, etc.). Ces traitements exploitaient les données brutes mais les résultats vectoriels sont propres à la BD-CHGEO. Ces couches ont été intégrées à cette dernière sans faire l'objet d'une reprise dans un des référentiels.

Enfin, des produits cartographiques ont été prototypés, à savoir :

- La version actualisée de la carte hydrogéologique au format papier (et pdf) : mise en place du canevas de carte, définition du format, de l'échelle et du découpage en feuilles, choix du SIG-logiciel et production des cartes.
- L'appliquatif WebGIS interactif : choix de la solution, interopérabilité avec le SIG-Logiciel de production des cartes en version papier, développement des services web et mise en place de la solution.
- Les Web Map Services (WMS), reposant sur la structure de l'appliquatif WebGis.

Les activités A.3.3.1 (état de l'art), A.3.3.2 (modélisation de la BD-CHGEO) et A.3.3.3 (enrichissement de la BD-CHGEO) ont été menées chronologiquement. L'activité A.3.3.4 a fait l'objet d'un chevauchement. La tâche A.3.3.5 est la continuité de l'Activité A.3.3.4 et est envisagée en Année 3 du projet (2023) afin de bénéficier des actualisations des données de référence (ex. intégration des forages profonds dans la BD-OMES, etc.). L'Activité A.3.3.3 va également dans ce sens en prévoyant plusieurs périodes de consolidation, actualisation et intégration de données dans la BD-CHGEO en Années 3 et 4 (2023 et 2024). Le présent rapport est lui-même le résultat de l'Activité A.3.3.6

Le présent rapport détaille les méthodologies mises en place et les résultats obtenus pour les activités A.3.3.1 à A.3.3.4. Suite à cela, un module de formation pourra être organisé afin que les thématiciens puissent s'approprier les outils au mieux.

A.4. Structuration du rapport

Le présent rapport se structure de la manière suivante :

- La présente introduction;
- Partie 1 – « Analyse de l'existant et inventaire de données hydrogéologiques » qui comprend :
 - o Une analyse comparative des cartes hydrogéologiques existantes ou de référence pour le Groupement ;
 - o L'inventaire détaillé des données retenues pour l'actualisation de la carte hydrogéologique
- Partie 2 – « Développement de la BD-CHGEO » qui comprend :
 - o La stratégie de modélisation ;
 - o L'organisation générale de la base de données ;
 - o Le modèle et le dictionnaire de données ;
 - o L'alimentation de la base de données
 - o Les perspectives et évolutions de la BD-CHGEO.
- Partie 3 – « Produits et outils de la carte hydrogéologique » qui comprend
 - o Les caractéristiques et le processus d'élaboration des cartes hydrogéologiques au format papier
 - o Les développements autour de l'application WebGIS interactive
 - o L'exploitation d'un service web de visualisation des données hydrogéologiques
- Les conclusions
- Des annexes

PARTIE 1 – ANALYSE DE L'EXISTANT ET INVENTAIRE DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES

B. ANALYSE DES CARTES HYDROGÉOLOGIQUES ET INVENTAIRE DES DONNÉES

B.1. Analyse des cartes hydrogéologiques de référence

Ce chapitre compile les résultats de l'analyse des différentes cartes hydrogéologiques en vigueur au Burkina Faso. L'analyse porte essentiellement sur la structure de chaque support et sur le contenu qu'ils offrent. Il en résulte une image fiable des différentes initiatives nationales.

Afin d'élargir le spectre des travaux entrepris en matière de réalisation de cartes hydrogéologiques, le Groupement a également analysé la carte hydrogéologique de Wallonie (Belgique).

B.1.1. La carte hydrogéologique du Burkina Faso (1993)

La dernière carte hydrogéologique du Burkina Faso couvrant l'ensemble du territoire est un produit au 1/500.000 élaborée lors du projet « Bilan d'Eau » par la Direction de la Planification et des Etudes de l'époque (DPE qui appartenait au Ministère de l'Eau), avec l'assistance technique du bureau d'études IWACO BV. Les notices explicatives sont datées de septembre 1993, ce qui laisse supposer que la temporalité des données exploitées se concentre entre 1988 et 1992. En matière de points d'eau, les données exploitées provenaient de la base de données BEWACO.

La carte couvre l'ensemble du territoire national via 6 feuilles avec leur notice respective : Bobo-Dioulasso, Dori, Fada N'Gourma, Gaoua Ouagadougou et Tenkodogo (DIRH, 1993). La structure de la carte est illustrée à la figure suivante.

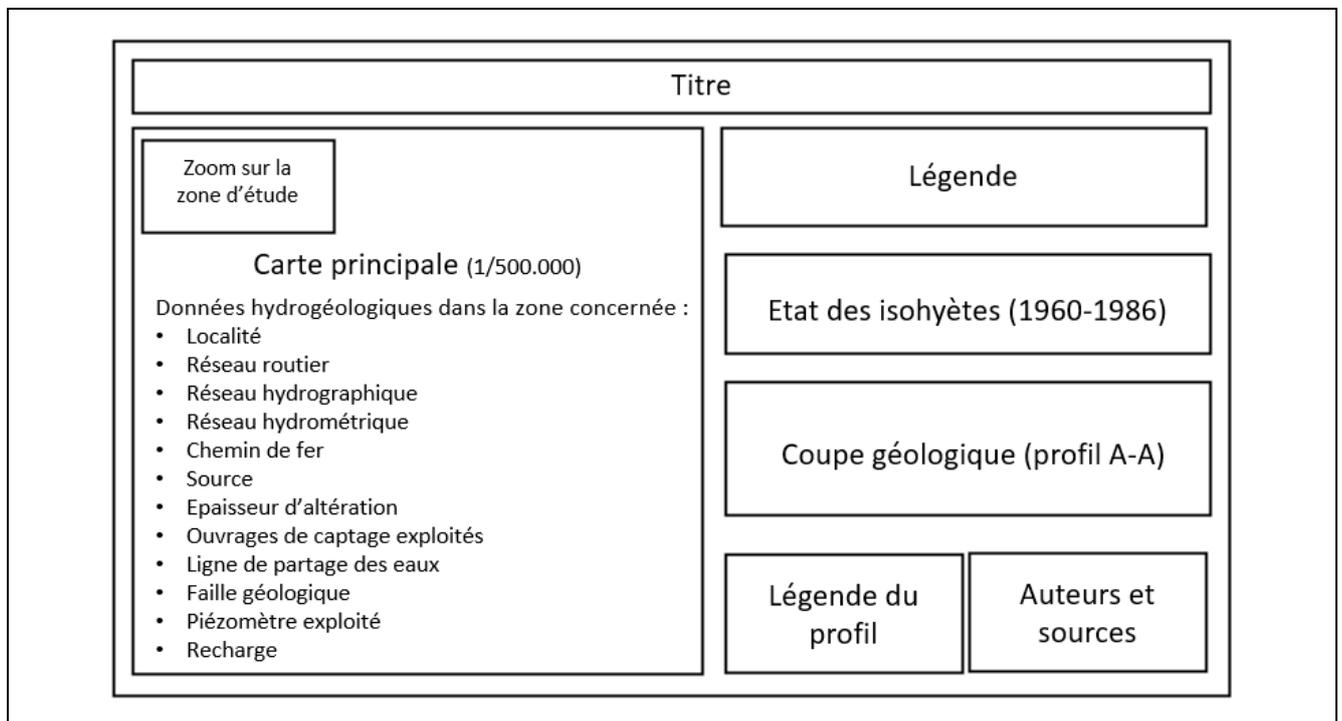
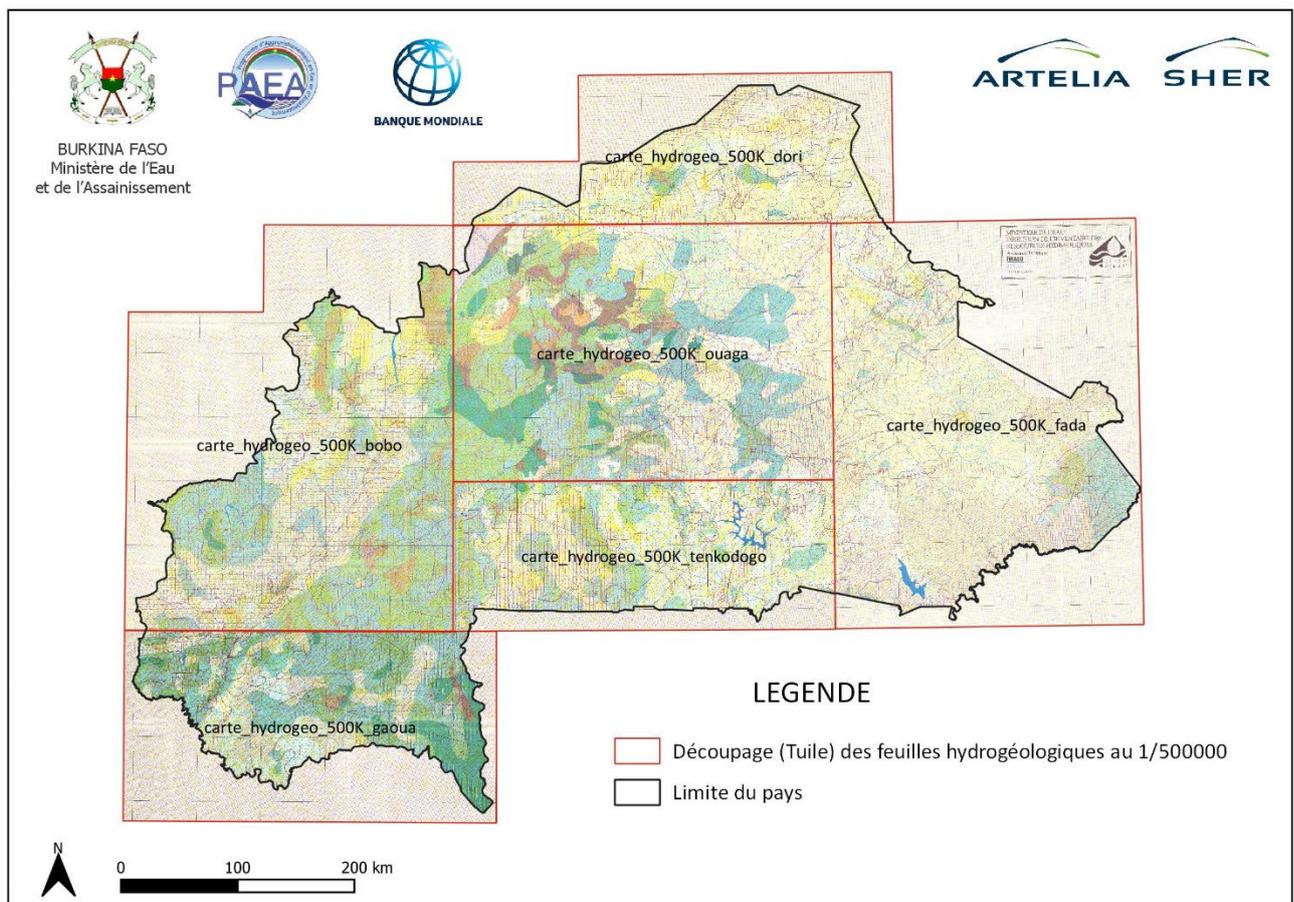


Figure 3 : Structure de la carte hydrogéologique du Burkina Faso (projet Bilan d'Eau, 1993)

La carte principale est donc à une échelle de 1/500.000 tandis que la carte secondaire représentant l'état des isohyètes est au 1/250.000

Les images scannées des différentes feuilles ont été fournies au Groupement au format *.jpg. Ces images étaient de mauvaise qualité et certaines feuilles n'étaient pas lisibles. Aussi, le Groupement a pris l'initiative de scanner les cartes papiers en très haute résolution (numérisation réalisée le 05/05/2021). Les scans pèsent en moyenne 500 Mo et sont disponibles au format *.Tif.

Les images scannées ont été géoréférencées en UTM 30N. Un nettoyage a été réalisé pour éliminer les légendes et affiner les superpositions aux coutures. Ensuite, une mosaïque a été créée afin de disposer d'un produit cartographique continu sur l'ensemble du territoire (format GeoTiff). La couche de données maillée est disponible et exploitable dans un logiciel-SIG. Elle pèse plus de 4 Go mais présente l'ensemble des cartes d'un sol bloc. Aussi, les feuilles sont fournies individuellement, avec un tuilage associé.



Source : DPE-IWAVO, 1993

Figure 4 : Carte hydrogéologique du Burkina Faso (Bilan d'Eau, 1993) - Mosaïque

Cette carte nécessite une actualisation tant sur la forme que le fond. De nouveaux jeux de données doivent être représentés, soit en utilisant des données récentes, soit en modélisant certains phénomènes via des traitements SIG avancés.

B.1.2. La carte hydrogéologique du bassin du Kou (2010)

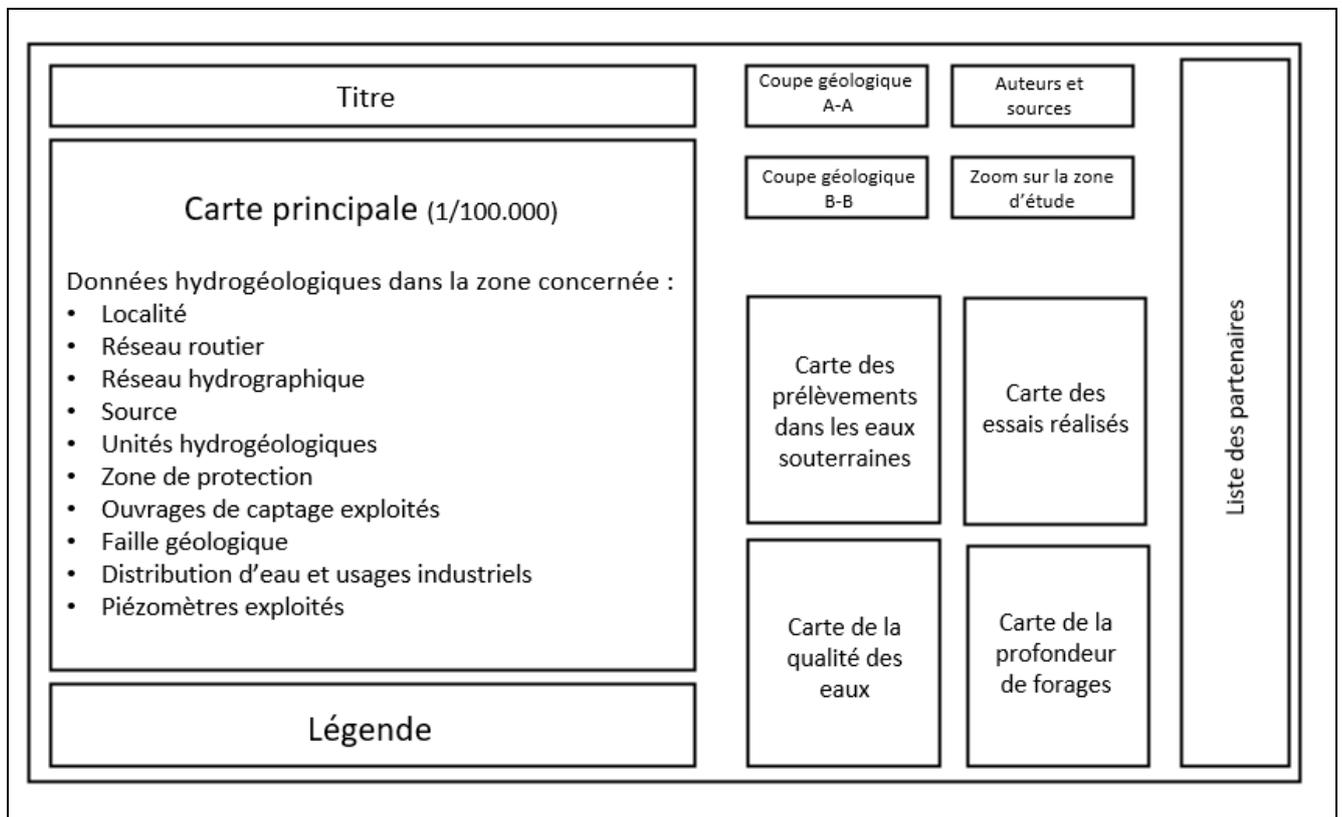
La carte hydrogéologique du bassin versant du Kou a été produite dans le cadre du projet d' « Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso » (2005-2010). Ce projet avait été financé par l'association de deux bailleurs belges, à savoir i) Wallonie-Bruxelles International (WBI) et ii) l'Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger (APEFE). La coordination scientifique et administrative du projet a été confiée à l'Université de Liège (Secteur Geo- Hydrogéologie du

Département ArGenCo) et à la Direction Générale de l'Agriculture, des Ressources Naturelles et de l'Environnement (DGARNE) du Service Public de Wallonie.

Le Kou est un affluent du fleuve Mouhoun. Le bassin versant est situé dans la Région des Hauts Bassins et englobe une grande partie de la ville de Bobo-Dioulasso. En quatre années d'exécution effective, le projet a eu l'occasion de collecter un grand nombre d'informations sur les ressources en eau souterraine de sa zone d'étude. Le produit « carte hydrogéologique » représente la synthèse de l'état des lieux des connaissances existantes relatives à l'hydrogéologie de la zone étudiée à l'époque.

Il s'agit d'une carte produite au format A0 via le logiciel-SIG ArcGIS. Les données sont issues de la base de données spatiale BD-PESO de type « *ESRI Personal Geodatabase* ». Cette base de données valorise des informations issues notamment des projets RESO et VREO. La carte est accompagnée d'une notice explicative (GARDIN & al., 2010). Cette carte, en plus de présenter le contexte hydrogéologique, communique des informations sur la qualité et la profondeur des eaux souterraines, l'exploitation des aquifères, leurs propriétés hydrogéologiques.

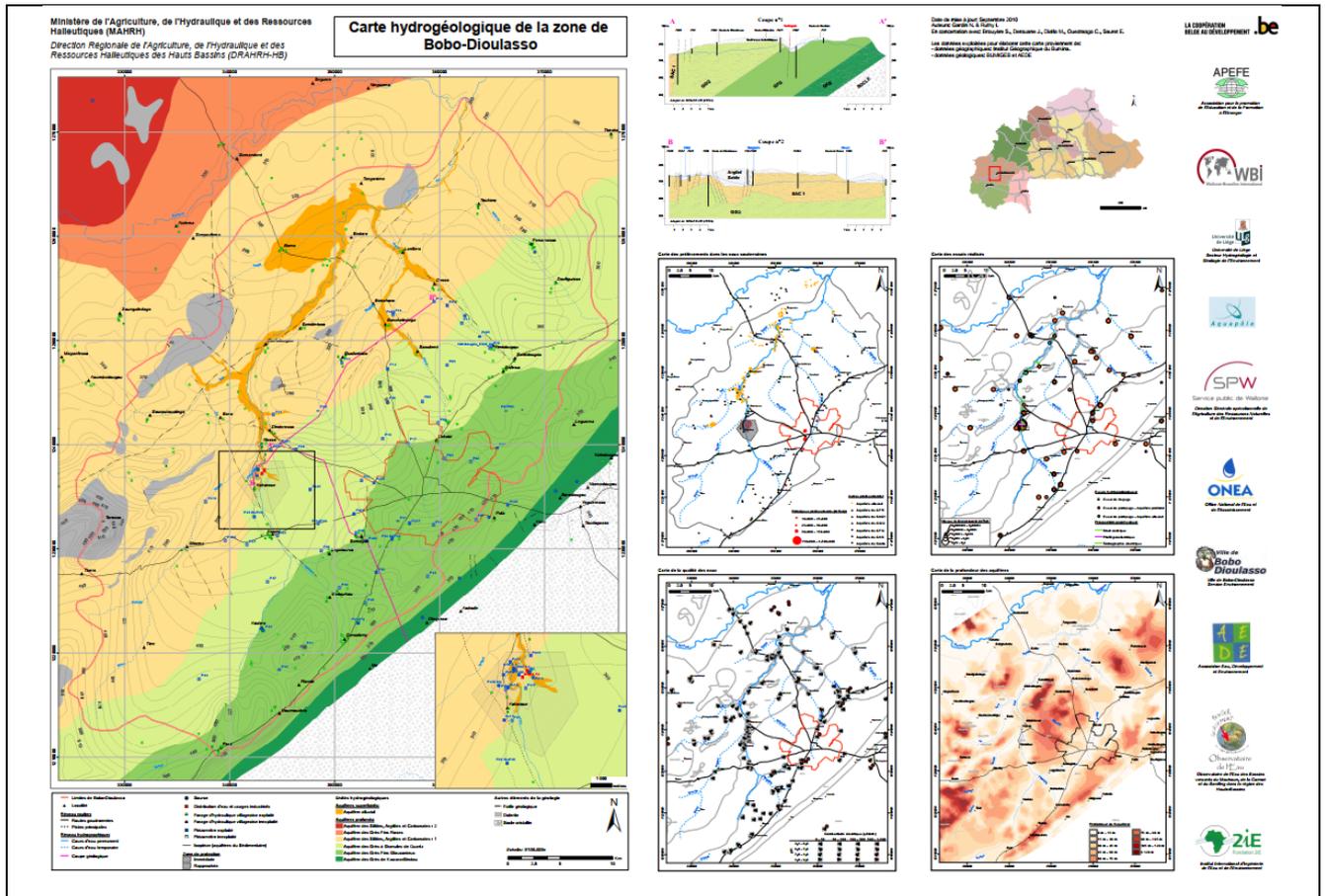
Le canevas suivi pour la réalisation de la carte hydrogéologique est illustré à la Figure 5.



Source : ULG-DGARNE, 2010

Figure 5 : Structure de la carte hydrogéologique du bassin versant du Kou

La carte principale se trouve à une échelle de 1/100.000. Les 4 cartes thématiques sont au 1/250.000.



Source : ULG-DGARNE, 2010

Figure 6 : Carte hydrogéologique du bassin versant du Kou

Bien qu'établie à une échelle locale, la carte hydrogéologique du bassin du Kou est très inspirante, notamment au niveau du canevas utilisé et des phénomènes modélisés. Elle inclut en outre la seule zone de protection des captages connus au Burkina Faso. La BD-PESO peut donc être considérée comme une source de données fiable qui pourra venir alimenter les BD-SEVR et BD-OMES et dès lors également la BD-CHGEO.

B.1.3. L'initiative d'actualisation du BUMIGEB (2019)

Le BUMIGEB a connu une actualisation des données géologiques en 2017, et ce via le Projet d'« Appui au Développement du Secteur minier » (PADSEM - AID) mis en place en 2012. Cette actualisation a permis la réalisation des cartes géologiques au 1/200.000 et la révision de la carte géologique au 1/1.000.000.

Une rencontre présentielle s'est tenue le 10/11/2022 entre les responsables du Groupement et la personne de contact au BUMIGEB. Cet entretien a permis de disposer de plus amples informations sur les motivations de l'actualisation et sur l'état des travaux.

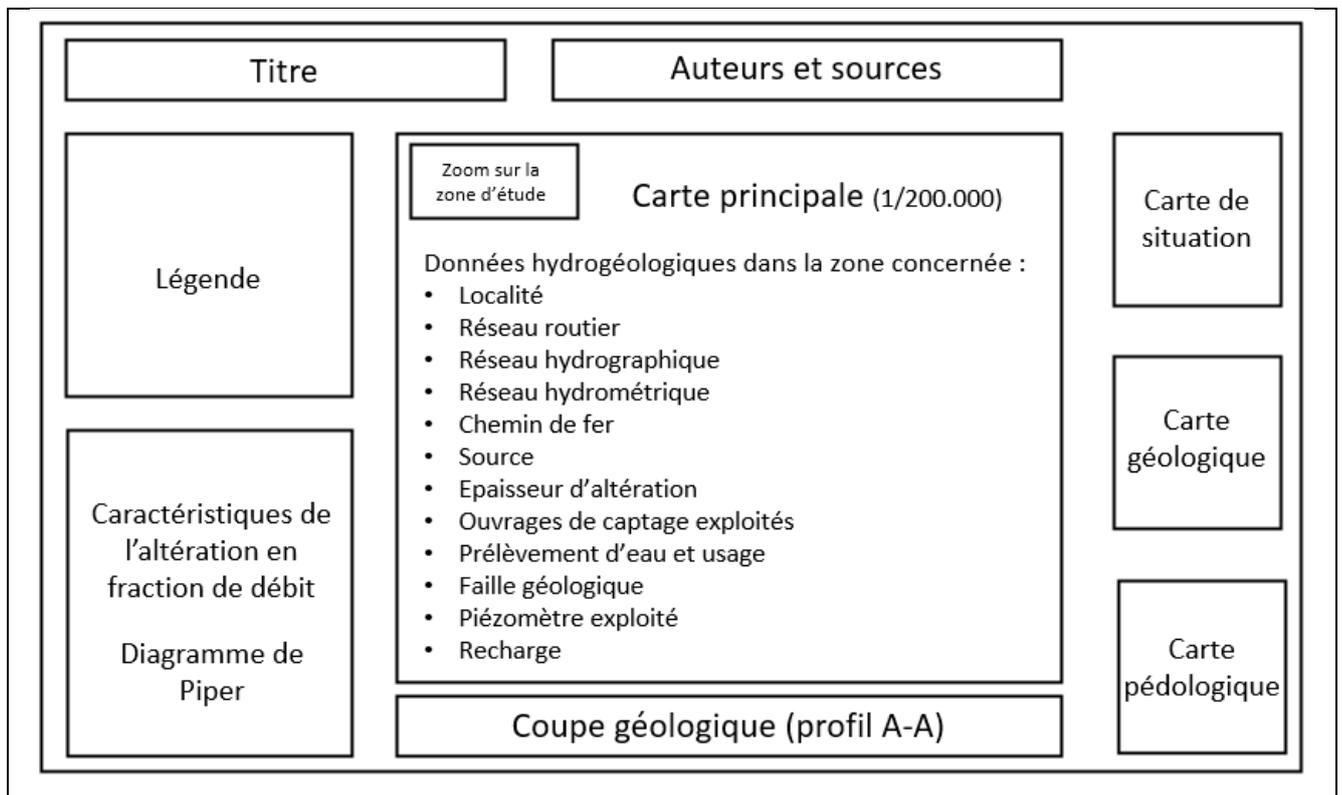
Il ressort que le BUMIGEB a entamé des actions en vue d'actualiser la carte hydrogéologique du Burkina Faso afin de poursuivre les travaux d'actualisation menés au niveau de la carte géologique, surtout ceux touchant le référentiel au 1/200.000. La volonté est de réaliser, pour chaque degré carré (26 au total), une carte hydrogéologique (ou carte de potentialité selon la dénomination du BUMIGEB) et d'harmoniser les jeux de données, sachant que la carte hydrogéologique de 1993 a été établie au 1/500.000, et disposer d'un outil d'aide à la décision plus précis et plus performant.

Les travaux sont en cours. Deux réalisations cartographiques ont été effectuées entre 2018 et 2022 sur les degrés carrés de Pô et de Tenkodogo. Un processus de validation de ces produits est prévu pour la fin de l'année 2022

et réunira des acteurs du domaine de l'eau qui pourront apporter les amendements et leurs recommandations. A ce jour, la date de fin du projet demeure indéterminée.

Le BUMIGEB et la DEIE disposent toutes deux d'un service hydrogéologique, qui produit des données de référence qui sont mutuellement capitalisées. La participation du SHGEO de la DEIE dans les travaux d'actualisation du BUMIGEB se réalise au travers des ateliers de validation.

Le Groupement s'est procuré le canevas de carte adopté par le BUMIGEB. Il est illustré à la Figure suivante.



Source : BUMIGEB, 2021

Figure 7 : Structure de la carte hydrogéologique actualisée du BUMIGEB

B.1.4. La carte hydrogéologique de Wallonie (Belgique, 2008-2022)

La carte hydrogéologique de Wallonie est portée par la Direction des Eaux souterraines du Service public de Wallonie (SPW-DESO). Depuis le 1er décembre 2015, l'entièreté du territoire de la Région wallonne est couverte par la carte hydrogéologique, soit 119 cartes établies au format A0 à une échelle de 1/25.000 pour la carte principale¹. Une application de visualisation WebGIS des données est également disponible en ligne.

L'édition et la diffusion des cartes hydrogéologiques dépendent de la révision des cartes géologiques, qui ont été éditées en 2018. L'état d'actualisation des cartes varie d'une planche à l'autre. On retrouve des planches actualisées en 2006 et d'autres en 2018. Une nouvelle actualisation est prévue fin 2022.

La méthodologie de réalisation de la carte hydrogéologique de Wallonie est bien documentée. Elle est essentiellement basée sur un travail de synthèse des données existantes provenant de sources multiples et variées (DESO, 2022). Ces données sont en outre complétées par des campagnes de mesures et de recherches d'information sur le terrain. Les informations récoltées sont ensuite stockées dans une banque de données

¹ Voir <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/application.htm>

spatiale relationnelle "BDHydro" de type « Esri File Geodatabase ». La base de données se compose d'un grand nombre d'entités spatiales de référence. D'une manière générale, le contenu est plus riche que la carte hydrogéologique du Burkina Faso, surtout en ce qui concerne les aspects géologiques, les informations complémentaires relatives à la nappe ainsi qu'en terme d'isohypses de la base et du toit et des aquifères.

Le modèle de la carte hydrogéologique est illustré à la Figure 8.

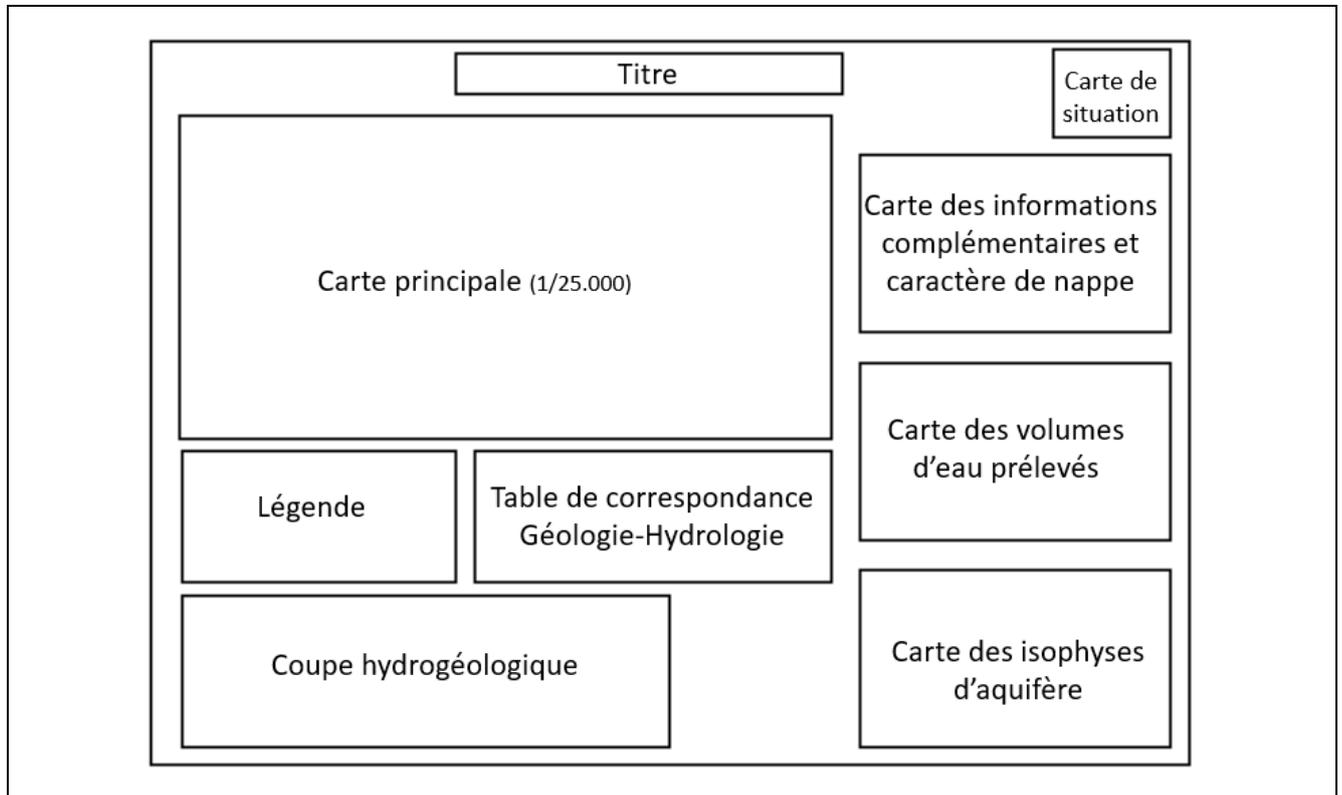
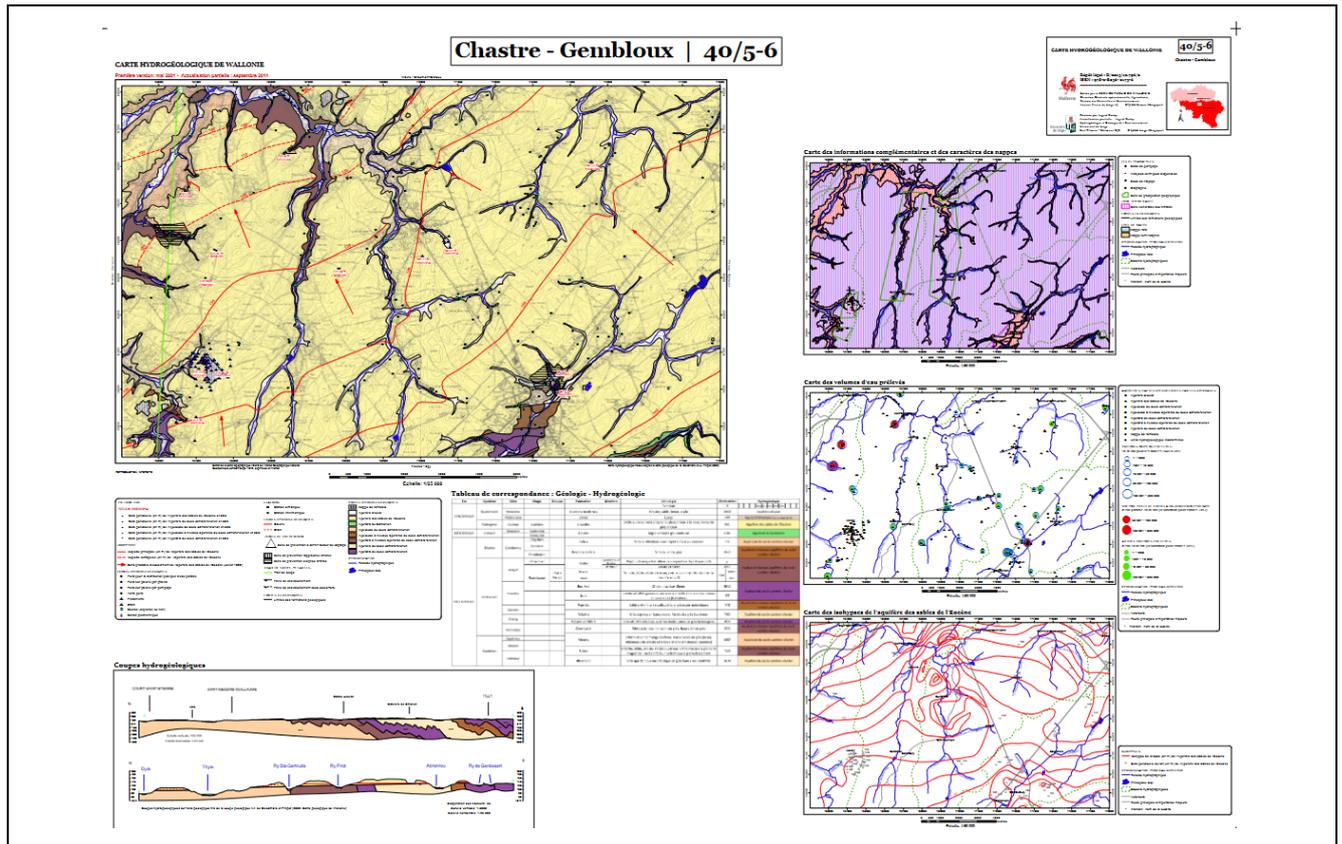


Figure 8 : Structure de la carte hydrogéologique de Wallonie

Chaque planche se compose d'une carte principale à l'échelle 1/25.000 et de trois cartes secondaires à l'échelle 1/50.000. Une coupe hydrogéologique et un tableau de correspondance Géologie-Hydrogéologie sont également fournis. Les cartes sont accompagnées de leur notice explicative.



Source : SPW, DGO3, 2014

Figure 9 : Carte hydrogéologique de Chastre-Gembloux (Wallonie, Belgique)

L'atout principal de la carte de Wallonie réside dans la prise en compte d'éléments essentiels relatifs aux aquifères (nature et extension des aquifères, sens d'écoulement, etc.). Le modèle de données est riche et permettra d'identifier ou de modéliser certaines données qui ne se trouvent pas sur les cartes nationales.

B.2. Comparaison des cartes hydrogéologiques

Ce chapitre reprend les résultats de l'analyse comparative menée au niveau du contenu de chaque carte hydrogéologique analysée au point précédent. Les informations contenues dans chacune des cartes hydrogéologiques par thématique à la fois sur la carte principale et sur les cartes secondaires sont comparées. La comparaison ne concerne pas les éléments de forme ni le canevas.

Le *Tableau 1* reprend le résultat de la comparaison. Les couches notées [(X)] signifient que les informations n'apparaissent pas sur la carte mais dans le tableau de correspondance Géologie-Hydrogéologie.

Tableau 1 – Comparaison de contenu des cartes hydrogéologiques

	Carte Burkina Faso de 1993	Carte du BV du Kou 2010	Carte de Wallonie
Echelle	1/500.000	1/100.000	1/25.000
Système de coordonnées géographiques	WGS84	UTM 30N	Lambert 72
Carte principale			
Caractéristique d'altération			
<i>Epaisseur d'altération (m)</i>	X		
<i>Epaisseur d'altération saturée (m)</i>	X		
Géologie - Hydrogéologie			
<i>Ere</i>			(X)
<i>Système</i>			(X)
<i>Série</i>			(X)
<i>Etage</i>	X		(X)
<i>Formation</i>	X		(X)
<i>Membre</i>			(X)
<i>Abréviation</i>			(X)
<i>Lithologie</i>			(X)
<i>Limites géologiques</i>			X
<i>Unités hydrogéologiques</i>		X	X
<i>Traits de coupe</i>	X	X	X
<i>Failles et autres éléments géologiques remarquables</i>	X	X	X
Administratif et Infrastructures			
<i>Chefs-lieux de province</i>	X		
<i>Chefs-lieux de commune</i>	X		
<i>Frontières</i>	X		X
<i>Routes principales</i>	X	X	
<i>Routes secondaires</i>	X	X	
<i>Chemin de fer</i>	X		
<i>Limite communale</i>		X	
<i>Localités</i>		X	
<i>Stations climatiques</i>			X

	Carte Burkina Faso de 1993	Carte du BV du Kou 2010	Carte de Wallonie
Eau de surface			
<i>Cours d'eau principaux</i>	X	X	X
<i>Cours d'eau secondaires</i>	X	X	X
<i>Lignes principales de partage des eaux</i>	X		
<i>Lignes secondaires de partage des eaux</i>	X		
<i>Lignes tertiaires de partage des eaux</i>	X		
<i>Lacs / Barrages principaux (polygone)</i>	X		X
<i>Barrages secondaires (polygone)</i>	X		
<i>Barrages secondaires (point)</i>			
<i>Berges des rivières à large lit</i>			X
<i>Stations hydrométriques</i>	X		X
Eau souterraine			
<i>Lignes d'égale profondeur de la nappe</i>	X	X	X
<i>Sens d'écoulement</i>			X
<i>Forages</i>			
<i>Forages classés selon débit</i>	X		
<i>Forages classés selon état d'exploitation</i>		X	
<i>Champ de captage</i>	X		
<i>Piézomètres (réseaux principal et secondaires)</i>	X		X
<i>Piézomètres classés selon état d'exploitation</i>	X	X	
<i>Piézomètres avec côte</i>			X
<i>Sources</i>		X	X
<i>Distribution d'eau et usages industriels</i>		X	X
<i>Puits naturels</i>			X
<i>Puits naturels (phénomènes karstiques)</i>			X
<i>Zones de prévention</i>			X
Cartes secondaires			
Recharge			
<i>Infiltration faible</i>	X		
<i>Infiltration bonne</i>	X		
<i>Infiltration très bonne</i>	X		
Pluviométrie	1/2.500.000		
<i>Cumuls mensuels</i>	X		
<i>Isohyètes annuelles</i>	X		
Plan de situation	1/6.800.000		
<i>Provinces</i>	X	X	
<i>Chefs-lieux de province</i>		X	
<i>Pays frontaliers</i>	X	X	

	Carte Burkina Faso de 1993	Carte du BV du Kou 2010	Carte de Wallonie
Coupe (hydro)géologique			
<i>Caractéristiques d'altération</i>	X		
<i>Formations géologiques</i>	X		
<i>Unités hydrogéologiques</i>		X	X
<i>Surface piézométrique</i>			X
Prélèvements dans les eaux souterraines		1/85.000	1/50.000
<i>Limites administratives</i>		X	X
<i>Localités</i>		X	X
<i>Routes principales</i>		X	X
<i>Cours d'eau principaux</i>		X	X
<i>Cours d'eau secondaires</i>		X	X
<i>Principaux prélèvements (quantité)</i>		X	X
<i>Autres prélèvements (aquifère)</i>		X	
<i>Aquifères sollicités</i>			X
<i>Prélèvements pour distribution publique (quantité)</i>			X
<i>Autres prélèvements (quantité)</i>			X
Essais réalisés		1/85.000	
<i>Limites administratives</i>		X	
<i>Localités</i>		X	
<i>Routes principales</i>		X	
<i>Cours d'eau principaux</i>		X	
<i>Cours d'eau secondaires</i>		X	
<i>Formations (hydro)géologiques</i>		X	
<i>Essais hydrogéologiques</i>		X	
<i>Prospection géophysique</i>		X	
<i>Classes de transmissivité</i>		X	
Qualité des eaux		1/85.000	
<i>Limites administratives</i>		X	
<i>Localités</i>		X	
<i>Routes principales</i>		X	
<i>Cours d'eau principaux</i>		X	
<i>Cours d'eau secondaires</i>		X	
<i>Formations (hydro)géologiques</i>		X	
<i>Essais hydrogéologiques</i>		X	
<i>Conductivité électrique</i>		X	
<i>pH</i>		X	

	Carte Burkina Faso de 1993	Carte du BV du Kou 2010	Carte de Wallonie
Profondeur des aquifères		1/85.000	
<i>Limites administratives</i>		X	
<i>Localités</i>		X	
<i>Routes principales</i>		X	
<i>Cours d'eau principaux</i>		X	
<i>Cours d'eau secondaires</i>		X	
<i>Formations (hydro)géologiques</i>		X	
<i>Profondeur de l'aquifère</i>		X	
Informations complémentaires et caractère des nappes			1/50.000
<i>Analyses complémentaires disponibles</i>			X
<i>Diagraphie</i>			X
<i>Zones vulnérables</i>			X
<i>Limites géologiques</i>			X
<i>Type de couverture (nappe affleurant ou couverture imperméable)</i>			X
<i>Réseau hydrographique</i>			X
<i>Berges des rivières à large lit</i>			X
<i>Principaux lacs</i>			X
<i>Bassins hydrographiques</i>			X
<i>Limites administratives</i>			X
<i>Routes principales</i>			X
<i>Localités</i>			X
Isohypses de la base et du toit et des aquifères			1/50.000
<i>Isohypses</i>			X
<i>Limites géologiques</i>			X
<i>Failles</i>			X
<i>Type de nappe (libre ou captive)</i>			X
<i>Réseau hydrographique</i>			X
<i>Berges des rivières à large lit</i>			X
<i>Principaux lacs</i>			X
<i>Bassins hydrographiques</i>			X
<i>Limites administratives</i>			X
<i>Routes principales</i>			X
<i>Localités</i>			X

Ce tableau synthétique a permis de procéder à une sélection des couches à intégrer dans la BD-CHGEO. Comme indiqué ci-avant, il faut noter les singularités de la carte hydrogéologique de Wallonie en termes d'aquifère et d'informations géologiques. Ces couches de données, bien que présentes dans le modèle conceptuel de la BD-CHGEO, peuvent difficilement être alimentées. En effet, il n'y a pas de couches spécifiques d'aquifères identifiées à ce jour par la DEIE. Au niveau du contexte géologique, le Groupement reste dépendant des données officielles fournies par le BUMIGEB.

B.3. Inventaire des données retenues

Le croisement entre les données reprises usuellement sur les différentes cartes (voir *Tableau 1*) et les données disponibles dans les bases de données de référence (BD-SEVR, BD-OMES, BUMIGEB, BD-PESO, etc.) a permis d'établir un inventaire exhaustif des jeux de données candidats à faire partie de la BD-CHGEO. Le *Tableau 2* reprend l'inventaire des données vectorielles de manière synthétique en les catégorisant par thématique. Les jeux de données de type « raster » utilisés pour la modélisation ou pour la représentation des cartes hydrogéologiques ne seront pas stockés au niveau de la BD-CHGEO mais dans un entrepôt de données annexe. Les couches raster sont reprises dans le *Tableau 3*. La suite du chapitre explicite les différentes couches de données, leur provenance et le travail d'actualisation/de consolidation qui a été réalisé le cas échéant.

Tableau 2 – Inventaire des données retenues dans la BD-CHGEO

Nom de la donnée	Représentation	Base de données source	Identifiant de la couche en BD
1. Couches administratives et maillages			
Limites nationales	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_pays
Région	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_region
Province	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_province
Commune	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_commune
Localités	Point	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_localite
Agglomérations	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_agglomeration
Pays limitrophes	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_pays_monde
Aires protégées	Polygone	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_aire_classe
Réseau routier (principal et secondaire)	Linéaire	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_res_routier
Réseau ferré	Linéaire	BD-SEVR	sevr_ancillaire.d_res_vfer
Maillage des cartes hydrogéologiques actualisées	Polygone	BD-SEVR	A produire par R.3.3
2. Zones de compétence			
Zones de compétence de Agences de l'Eau	Polygone	BD-SEVR	sevr_esp_comp.d_zone_agence_eau
Zones de compétence des Directions Régionales de l'ONEA	Polygone	BD-SEVR	sevr_esp_comp.d_zone_dr_onea
Centres opérationnels de l'ONEA	Point	BD-SEVR	sevr_esp_comp.d_centre_onea
3. Couches hydrologiques			
Bassins versants internationaux	Polygone	BD-SEVR	sevr_hydro.d_bassin_versant_international
Bassins versants nationaux	Polygone	BD-SEVR	sevr_hydro.d_bassin_versant_national
Sous-bassins versants	Polygone	BD-SEVR	sevr_hydro.d_sous_bassin_versant
Réseau hydrographique principal et secondaire	Linéaire	BD-SEVR	sevr_hydro.d_reseau_hydro_principal
Plans d'eau	Polygone	BD-SEVR	sevr_hydro.d_plan_eau
Sources	Point	BD-SEVR BD-PESO	- sevr_hydro.d_source - PESO - Table « Source »
4. Couches géologiques			
Limites géologiques et lithologies associées	Polygone	BD-SEVR	sevr_geologie.d_geologie_1000k
Unités hydrogéologiques	Polygone	-	A dériver des limites géologiques par R.3.3
Failles et autres éléments géologiques remarquables	Linéaire	BUMIGEB	Données BUMIGEB 2018 Mil_I_struct.shp / Mil_I_filon.shp
5. Couches pédologiques			
Carte des sols du BUNASOLS	Polygone	BD-SEVR	sevr_pedologie.d_sol_bunasols

Carte des sols de la FAO	Polygone	BD-SEVR	sevr_pedologie.d_sol_fao
6. Couches hydro-climatologiques			
Isohyètes	Linéaire	BD-SEVR + projet	- sevr_climat.d_isohyete - Actualisation par R.3.3
Stations climatiques	Point	BD-SEVR	sevr_climat.d_station_meteo_anam
7. Ouvrages de mobilisation d'eau souterraine			
Ouvrages de mobilisation avec caractéristiques associées (profondeur totale forée, débit en fin de forage, niveau statique, épaisseur d'altération, état d'exploitation, usage, résultats d'essai, résultats de la qualité des eaux, lithologie, etc.)	Point	BD-OMES	omes_ouvrage.d_ouvrage
Zone de protection de captage	Polygone	BD-PESO	Table [ZoneProtection]
Ouvrages hydrauliques (retenues)	Point	BD-SEVR	sevr_ouv_hydro.d_retenue_dgih
8. Réseaux divers			
Réseau hydrométrique principal	Point	BD-SEVR	sevr_reseau.d_station_hydrometrique
Réseau principal de suivi de la qualité des eaux souterraines	Point	BD-SEVR	sevr_reseau.d_station_qualite_eau_sout
Réseaux piézométriques principaux et secondaires (DEIE, ONEA, Agences de l'Eau du Mouhoun)	Point	BD-SEVR	sevr_reseau.d_piezometre_deie sevr_reseau.d_piezometre_onea sevr_reseau.d_piezometre_aem
9. Séries temporelles de mesures			
Volumes d'eau prélevés par Centre ONEA	Table	BD-SEVR	sevr_esp_comp. d_chronique_centre_onea_volume_preleve
Volumes d'eau prélevés par Forages ONEA	Table	BD-OMES	omes_ouvrage. d_chronique_ouvrage_onea_volume_preleve
Débits mesurés aux sources	Table	BD-SEVR	sevr_hydro.d_source_mesure
Chronique de mesures piézométriques	Table	BD-SEVR BD-PESO	- sevr_reseau.d_mesure_piezo_deie - Table [obsNiveauPiezometrique]
Mesures des paramètres physico-chimiques de qualité des eaux souterraines	Table	BD-SEVR	sevr_reseau.d_mesure_qualite_eau_sout
10. Produits hydrogéologiques dérivés des travaux de modélisation			
Lignes d'égale profondeur de nappe	Linéaire		A produire par R.3.3
Lignes d'égales altitude de nappe (isopieze)	Linéaire		A produire par R.3.3
Débit en fin de foration	Linéaire		A produire par R.3.3
Epaisseur d'altération	Linéaire		A produire par R.3.3
Epaisseur d'altération saturée	Linéaire		A produire par R.3.3
Profondeur forée	Linéaire		A produire par R.3.3
Profondeur du toit du socle	Linéaire		A produire par R.3.3
Sens d'écoulement de la nappe	Linéaire		A produire par R.3.3
Recharge	Linéaire		A produire par R.3.3

En marge de ces couches vectorielles, plusieurs jeux de données de type « raster » ont été exploités pour la production de couche dérivée ou la réalisation des cartes en version papier.

Tableau 3 – Inventaire de l'entrepôt de données maillées

Nom de la donnée	Représentation
Modèle numérique de terrain SRTM 30m	Raster
Modèle numérique de terrain SRTM 90m	Raster
Mosaïque d'images Sentinel-2 (12/2020)	Raster
Données climatologiques globales issues du projet « Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System » (FLDAS – NASA ²)	Raster

Les tableaux ci-dessus démontrent que la collecte et la capitalisation des données réalisées dans le cadre du R.1.1 – [Collecte et capitalisation des données de ressources en eau (SHER-ARTELIA, 2021.b) et R.3.1 – [Développement d'une base de données sur les OMES] (SHER-ARELIA, 2022.a & 2022.b) de la SEVERE ont été dans le bon sens puisque de nombreux jeux de données sont disponibles dans les bases de données produites lors de ces activités. Ce constat renforce la volonté de considérer la BD-CHGEO comme une base de données « produit » qui puise la plupart de ses informations dans d'autres référentiels, avec comme les conséquences suivantes :

- Les données sont maintenues au plus près des gestionnaires. A priori, les jeux de données ne seront jamais modifiés ou édités directement mais bénéficieront des actualisations réalisées au niveau des référentiels considérés comme source authentique (base de données dont le contenu validé et mis à jour par un gestionnaire unique) ;
- A travers la BD-CHGEO, les experts thématiques disposent des ressources nécessaires pour générer leurs propres produits dérivés (voir la liste dans la section 10 du Tableau 2) qui peuvent être stockés sous forme vectorielle dans la BD-CHGEO.

La méthodologie proposée dans le cadre du R.3.3 n'intègre donc pas une campagne de collecte spécifique. Cependant, plusieurs couches identifiées dans les bases de données ont fait l'objet d'une consolidation que ce soit en termes de contenu ou au niveau de leur modèle de données qui n'était pas normalisé. D'autres jeux de données ont dû être actualisés ou enrichis. Dès lors, il est utile de décrire brièvement chaque jeu de données candidat afin d'identifier les traitements réalisés dans le cadre du R.3.3. Cette description vient compléter l'état des lieux des données sur les ressources en eau décrits dans le Rapport Technique du R.1.1 (SHER-ARTELIA, 2021.b).

B.3.1. Les données administratives

Les limites administratives (pays, régions, provinces et communes) proviennent de la BD-SEVR qui a capitalisé les données de la BNDT (version 2015) de l'IGB. La codification imaginée par le Groupement pour établir un identifiant unique des entités a été conservée (SHER-ARTELIA, 2021.b).

Il faut noter que le jeu de données communal a été enrichi des données démographiques issues du cinquième Recensement général de la population et de l'habitation (5ème RGPH) réalisé en 2019. Ces données avaient été capitalisées en tant que table liée dans la BD-SEVR mais ont été intégrées à la table spatiale dans la BD-CHGEO. Des statistiques de projection de population en 2030 et 2050 ont été calculées par le Groupement en appliquant un taux d'accroissement national annuel de 2,8% établi par la Banque Mondiale (BM, 2021). Ces informations ont été ajoutées dans la BD-SEVR car elles n'avaient pas été capitalisées lors du R.1.1.

Les limites des pays limitrophes proviennent d'un jeu de données généralisé en libre téléchargement.

² Voir <https://ldas.gsfc.nasa.gov/ldas#>

B.3.2. Les foyers de population

La couche de données des localités a été transférée depuis la BD-SEVR. Initialement, elle provient de la BNDT. Les données démographiques du 5^{ème} RGPH et les projections de population en 2030 et 2050 ont été ajoutées aux localités de plus de 5.000 habitants, ce qui apporte une valeur ajoutée à la couche étant donné que les données brutes du RGPH ont été extraites manuellement, de même que la mise en correspondance des deux sources de données. Cette dernière tâche a été particulièrement fastidieuse étant donné qu'elle s'est basée sur les toponymes. Pour le reste, le modèle de données n'a pas connu d'évolution.

La couche polygonale des principales agglomérations du Burkina Faso a été nettoyée et intégrée à la BD-SEVR. Une liaison a été réalisée afin d'intégrer la commune d'appartenance au jeu de données. Sur cette base, les données ont été chargées dans la BD-CHGEO sans modification de modèle.

B.3.3. Les réseaux routiers et ferrés

Les réseaux routiers et ferrés sont issus de la BNDT (thèmes 02 et 03). Le réseau ferré a été capitalisé dans la BD-SEVR à partir de la couche [RFE_Voie_ferree.shp] car il ne figurait pas dans les couches intégrées lors du R.1.1. Les modèles de données des deux réseaux de communication n'ont pas subi de modifications.

B.3.4. Les zones de compétence des Agences de l'Eau

La couche des zones de compétence des Agences de l'Eau est celle capitalisée dans la BD-SEVR. Le modèle de données n'a pas été modifié.

B.3.5. Les zones de compétence et centres opérationnels de l'ONEA

La couche des zones de compétence de l'ONEA est celle capitalisée dans la BD-SEVR. Pour rappel, cette couche avait été digitalisée dans le cadre des travaux du R.1.1.

Le nombre de centres opérationnels ONEA est resté inchangé par rapport aux travaux du R.1.1. La couche compte donc 60 centres ONEA. La table des volumes prélevés par Centre ONEA a été normalisée afin de créer une série temporelle permettant d'être actualisée sans modifier la structure de la table. Ce traitement a été appliqué aux autres chroniques de mesures identifiées dans l'inventaire (voir Tableau 2 – Section 9). La normalisation consiste à reprendre à créer un champ de type « date » reprenant la référence temporelle et d'y associer les mesures. Cela permet d'éviter la multiplication d'attributs et de devoir modifier la structure de la table à chaque nouvelle campagne. Le processus de normalisation est illustré à la figure suivante.

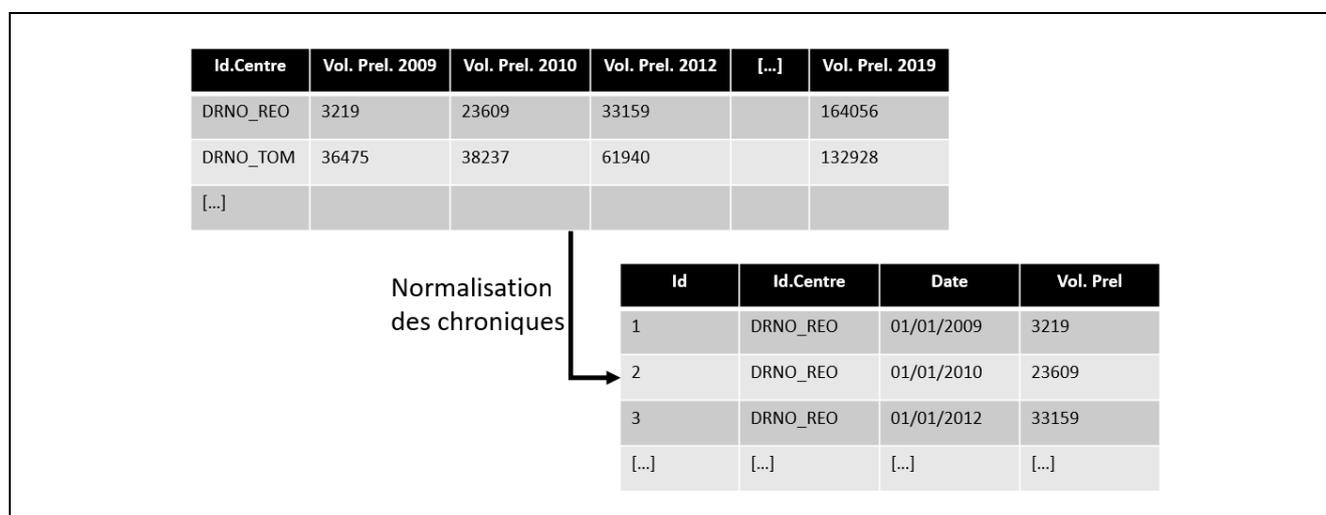


Figure 10 : Normalisation des chroniques de mesure

Cette nouvelle structure a été transférée dans la BD-CHGEO. L'identifiant du Centre ONEA attribué par le Groupement permet de faire le lien entre un centre et sa chronique de volumes prélevés. Un traitement en SQL a permis de générer une vue [chgeo_ancillaire.vm_centre_onea] présentant le centre, sa localisation, les volumes prélevés par année et quelques statistiques associées (dernière année de mesure, dernière valeur de volume, nombre total d'années pour lesquelles des volumes ont été prélevés). Ces traitements sont réalisés au niveau de la BD-CHGEO mais il aurait tout aussi bien pu l'être dans la BD-SEVR.

Il faut constater des données manquantes dans la chronique des volumes prélevés. Comme souligné dans le RT.1.1, les années 2011, 2013 et 2014 sont absentes. En outre, il n'y a pas de mesures fournies à partir de 2020. Des correspondances ont été transmises à l'ONEA afin de disposer d'une chronique consolidée et actualisée.

B.3.6. Les données géologiques

Dans le cadre des travaux du R.3.3, l'exploitation d'un référentiel cartographique de géologie surfacique est primordiale notamment afin de représenter et de caractériser les unités hydrogéologiques du Burkina Faso. Dans ce cadre, les référentiels les plus pertinents et couvrant l'ensemble du pays sont ceux du BUMIGEB.

Deux jeux de données co-existent : i) la version de référence 2003 et ii) celle de 2018, qui est une actualisation de la première version. Chaque jeu de données est disponible aux échelles suivantes :

- 1/200.000 : la couverture nationale des planches de 2003 est partielle. Elle est complétée par des planches de 2018. La mosaïque sur l'ensemble du pays au 1/200.000 est donc assurée par un mélange de planches de 2003 et 2018.
- 1/1.000.000 : à ce niveau, la couverture nationale est complète tant pour la version 2003 que pour 2018.

Le Groupement a entrepris une analyse comparative et de qualité des informations reprises dans chaque jeu de données afin de valoriser celui à utiliser pour les traitements ultérieurs. Les constats sont les suivants :

- Les couches géologiques reprises sur les planches au 1/200.000 sont disjointes d'une planche à l'autre. Cela se marque lorsqu'on passe d'une planche de 2003 à une planche voisine actualisée en 2018. Ces discontinuités sont illustrées à la Figure 11. D'une manière générale, il n'est donc pas possible d'exploiter les couches surfaciques hybrides au 1/200.000 au titre de référentiel cartographique à l'échelle nationale pour la représentation cartographique et la caractérisation des unités hydrogéologiques en raison des nombreuses discontinuités entre planches contigües. Ce jeu de données est donc écarté.
- La couche surfacique 1/1.000.000 de la version 2003 est beaucoup plus détaillée que l'actualisation de 2018, essentiellement en ce qui concerne les zones sédimentaires. Les niveaux de détails de chaque carte sont illustrés à la Figure 12 qui représente la zone du Sédimentaire Ouest.

En conclusion, **la couche géologique au 1/1.000.000 de 2003 du BUMIGEB doit être privilégiée**. C'est d'ailleurs cette version qui est exploitée par toutes les bases de données et les documents de référence tant anciens que récents sur l'hydrogéologie du Burkina Faso.

Cette décision a fait l'objet d'une note transmise à l'UGP du PAEA le 29 juin 2022.

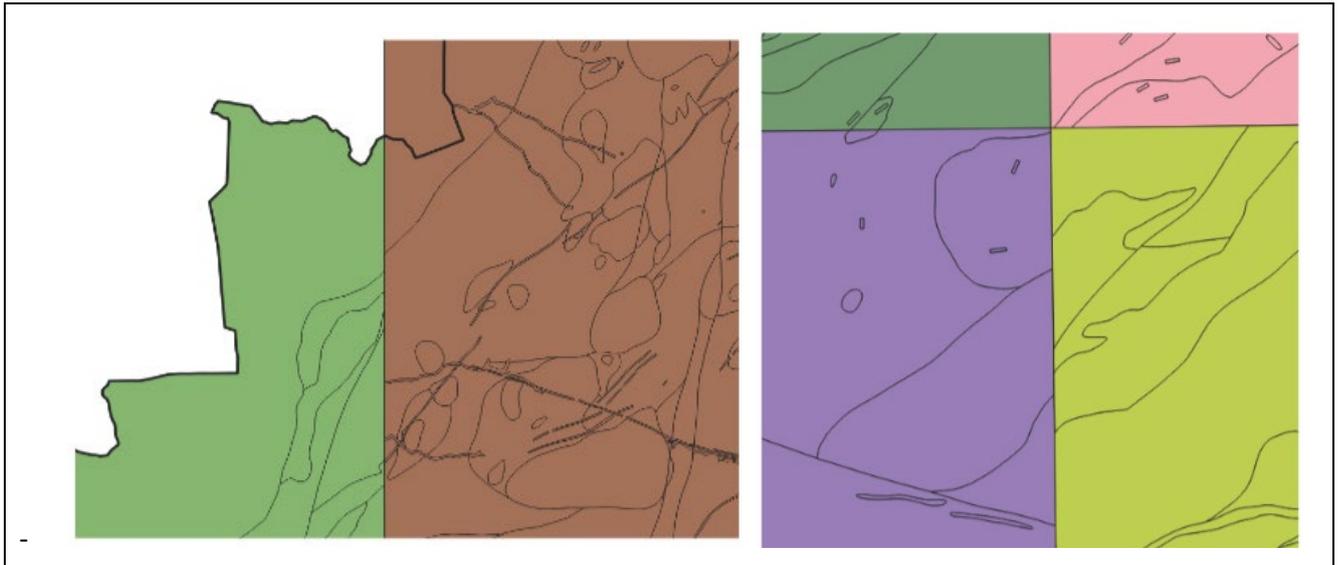
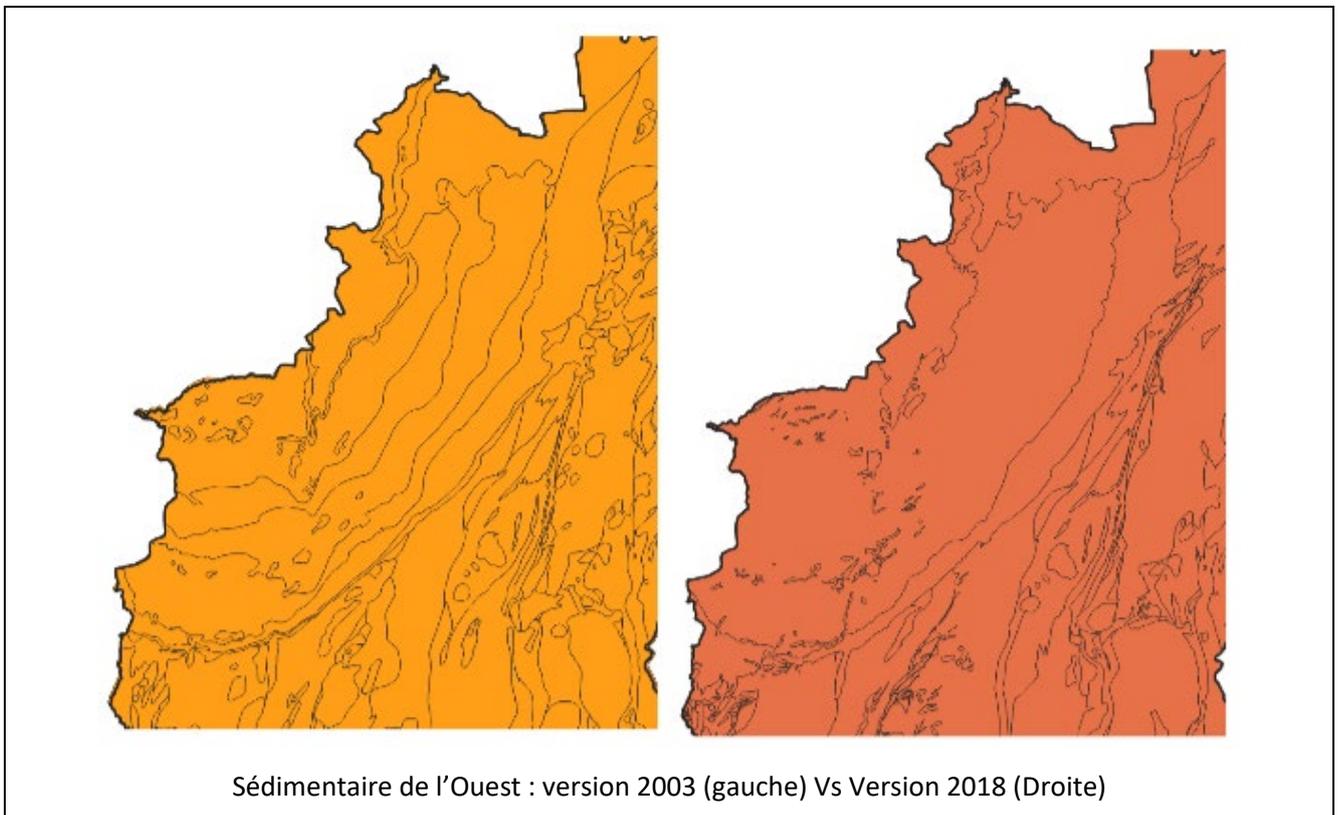


Figure 11 : Discontinuités entre planches géologiques 2003 et 2018 au 1/200.000



Sédimentaire de l'Ouest : version 2003 (gauche) Vs Version 2018 (Droite)

Figure 12 : Divergence du niveau de détails entre la carte géologique 2003 et 2018

Une fois le référentiel géologique établi, le Groupement a dérivé les Unités hydrogéologiques. Le principe de définition d'unités hydrogéologiques permet, à partir du référentiel cartographique géologique du BUMIGEB, de définir et de cartographier à des niveaux hiérarchisés :

- les grands ensembles hydrogéologiques rencontrés au Burkina Faso, que sont les bassins sédimentaires du Nord, de l'Est et de l'Ouest, et les zones du socle cristallin et métamorphique ;
- les formations hydrogéologiques rencontrées dans les bassins sédimentaires du Nord, de l'Est et de l'Ouest, selon la terminologie et la typologie communément utilisées dans les travaux, études scientifiques et projets relatifs à l'hydrogéologie tels que mis en œuvre depuis plus de 25 ans au Burkina Faso ;

- les différentes lithologies rencontrées, au niveau de détail cartographique le plus fin disponible de manière continue sur l'ensemble du Burkina Faso.

Dès lors, 3 niveaux d'Unités hydrogéologiques sont venus enrichir le jeu de données

- Unités hydrogéologiques de premier niveau (UHG_01) : il s'agit de la catégorie principale, qui peut également être dénommée « Zones hydrogéologiques » ;
- Unités hydrogéologiques de deuxième niveau (UHG_02) : il s'agit d'une sous-catégorie des Unités de premier niveau [UHG_01]. Elles correspondent aux « Unités hydrogéologiques » qui figureront sur les cartes hydrogéologiques.
- Unités hydrogéologiques de troisième niveau (UHG_03) : il s'agit d'une sous-catégorie des Unités de deuxième niveau [UHG_02]. Elles reprennent la géologie.

La couche des limites géologiques de 2003 au 1/1.000.000 stockée dans la BD-SEVR a été adaptée et les trois attributs UGH_* ont été alimentés. La couche consolidée a ensuite été transférée à la fois dans la BD-OMES et dans la BD-CHGEO.

Contrairement au référentiel géologique, les couches relatives aux **éléments cartographiques linéaires** (ex. faille, filons, cisaillement, etc.) **et ponctuels** sont mieux fournies et détaillées dans la version 2018. Les jeux de données provenant de cette version ont donc été capitalisés dans la BD-SEVR et ensuite transférés à la BD-CHGEO. On retrouve :

- Le linéaire des failles, cisaillement et chevauchement [Mil_I_struct.shp – v.2018] ;
- Le linéaire des filons [Mil_I_filon.shp – v.2018].

Ces deux couches présentaient un modèle de données commun et sont donc intégrées dans la même table [chgeo_geologie.d_element_geol] au niveau de la BD-CHGEO.

B.3.7. Les données pédologiques

Deux jeux de données sont intégrés à la BD-CHGEO en provenance de la BD-SEVR, à savoir :

- Les sols du BUNASOLS. Elles ont été obtenues auprès du BUNASOLS au format Shapefile et constitue la couche pédologique de référence au Burkina Faso.
- La carte des sols de la FAO provenant de la base de données harmonisée sur les Sols HWSD (Harmonised World Soil Database)³.

Ces deux couches n'avaient pas été intégrées dans la BD-SEVR lors des activités du R.1.1. Elles ont donc été traitées lors du R.3.3. Les tables de la BD-SEVR ont servi de base à l'alimentation des données pédologiques dans la BD-CHGEO.

B.3.8. Les données hydrologiques

Plusieurs jeux de données de référence hydrologiques sont intégrés dans la BD-CHGEO : la hiérarchie des bassins versants, le réseau hydrographique, les plans d'eau et les sources.

Les lignes de partage des eaux sont présentes via l'intégration des couches relatives aux **bassins versants internationaux, nationaux et aux sous-bassins versants**. Ces couches avaient fait l'objet d'un important travail de consolidation dans le cadre du R.1.1. Il faut noter que des attributs supplémentaires sont venus enrichir les jeux de données des bassins versants nationaux et les sous-bassins, à savoir :

³ <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/>

- Les volumes interannuels écoulés (2000-2020) en Millions de mètres cubes et en millimètres ;
- Les volumes interannuels stockés (2000-2020) en Millions de mètres cubes et en millimètres ;
- Les volumes interannuels totaux (2000-2020) , soit la somme des volumes écoulés et des volumes stockés, en Millions de mètres cubes et en millimètres.

Ces volumes ont été calculés par le Groupement lors de l'Activité 1.3.3 – [Actualisation de l'état des lieux des ressources en eau de surface] (SHER-ARTELIA, 2022.c).

Les jeux de données enrichis ont été chargés dans la BD-CHGEO à partir de la BD-SEVR.

Les travaux de consolidation du **réseau hydrographique** entrepris dans le cadre du R.1.1 a été poursuivi de manière à éliminer le maximum de discontinuités au droit des retenues. Le travail de consolidation des données a été réalisé dans la BD-SEVR. Les données ont ensuite été chargées dans la BD-CHGEO. Le modèle de données reste inchangé.

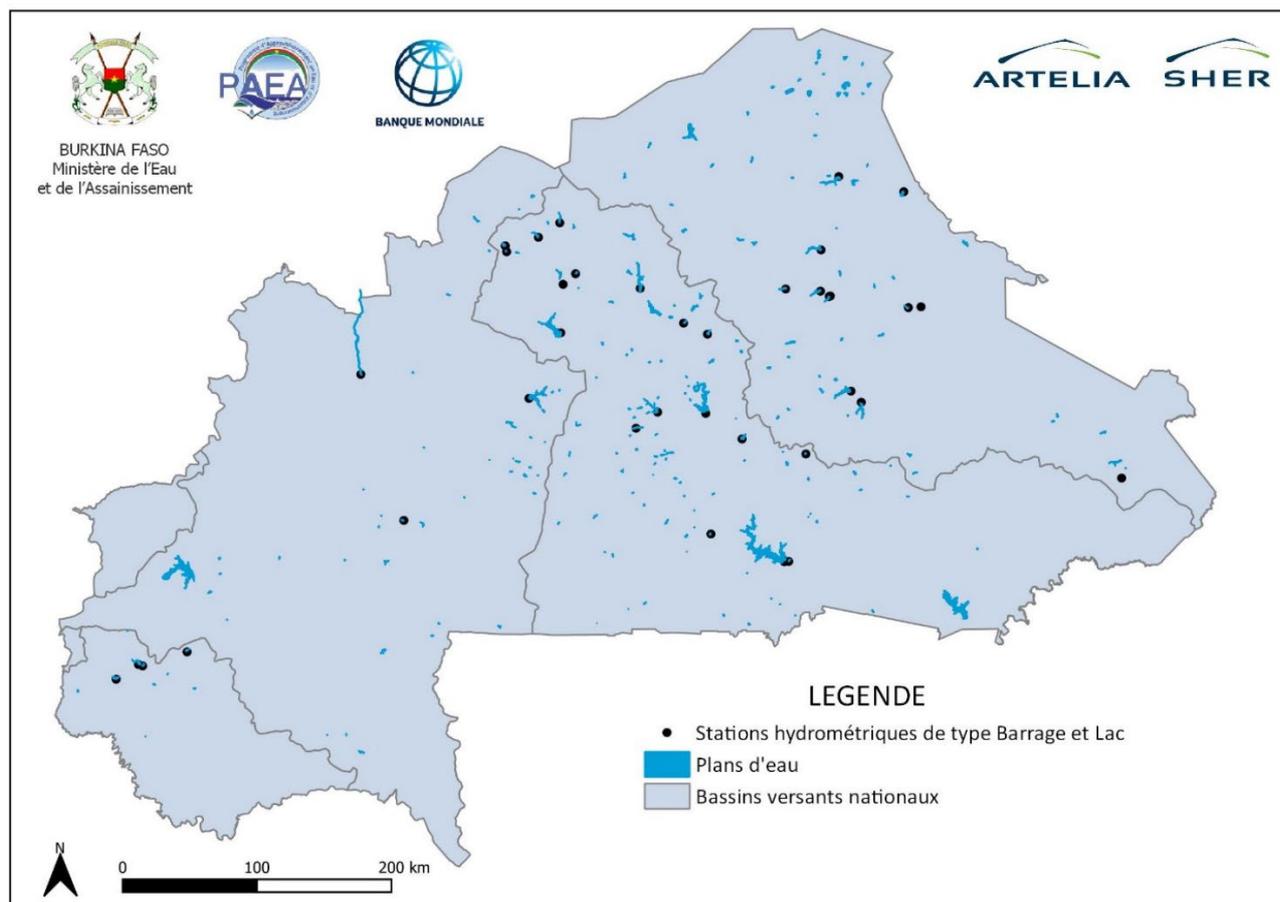
Un travail important a été réalisé au niveau de la consolidation de la couche des **plans d'eau**. En effet, il est nécessaire de disposer de l'emprise des principaux lacs et barrages au niveau de la carte hydrogéologique. Cependant, en comparant la couche de la BNDT i) au réseau de stations hydrométriques de la DEIE et ii) aux statistiques par retenues transmises par la DEIE (volumes interannuels 2000-2020, capacité de la retenue et coefficient de remplissage). On constate des omissions importantes en termes de données. Par exemple, le barrage de Samendeni n'est pas repris dans la couche alors que des statistiques sont disponibles.

D'autre part, la couche des plans d'eau de la BNDT reprend un grand nombre de petits lacs ou de barrages sous régime temporaire. Ces entités introduisent beaucoup de bruit dans la couche, si bien qu'elle ne pouvait être exploitée telle quelle dans la carte hydrogéologique.

La consolidation des plans d'eau s'est appuyée sur la méthodologie suivante :

- Filtre appliqué sur la couche [HYD_Surface_eau.shp] de la BNDT afin de ne garder que les entités d'une certaine importance. Les entités suivantes ont été conservées :
 - o Prise en compte uniquement des plans d'eau de type « barrage » et « lac ». Les plans d'eau de type « fleuve » sont considérés dans le réseau hydrographique.
 - o Prise en compte de l'ensemble des plans d'eau à régime permanent et analyse visuelle de chacun d'entre eux. Plusieurs plans d'eau très petits et isolés ont été considérés comme du bruit et écartés de la sélection. D'une manière générale, tous les plans d'eau d'une superficie de plus de 1 km² ont été conservés. Le reste a fait l'objet d'une interprétation sur base d'images satellites Sentinel-2 (12/2020)
 - o Prise en compte des plans d'eau temporaire de plus de 1 km² ainsi que de ceux présentant un nom.
- Les entités filtrées ont été comparées au réseau hydrométrique de la DEIE qui identifie des stations de type « barrage et lac ». La couche des plans d'eau a été mise en cohérence avec le réseau, ce qui a nécessité une digitalisation de certaines entités (ex. Samendeni). La digitalisation a été réalisée sur base d'images satellite Sentinel 2. Dans certains cas, les cartes topographiques au 1/200.000 sont venues appuyer l'interprétation.
- Le même travail a été réalisé pour mettre en conformité les plans d'eau avec les données statistiques récoltées à la DEIE. Chaque plan d'eau bénéficiant de statistiques se retrouvent effectivement dans la cartographie.
- Une harmonisation toponymique a été effectuée, ce qui a nécessité une recherche bibliographique ainsi que sur le web.

Au final, la couche consolidée comprend 211 plans d'eau : 198 barrages dont 31 permanents et 23 lacs (10 permanents).



Source : BNDT, 2015, Sentinel-2, 2020

Figure 13 : Plans d'eau consolidés

La couche de données consolidée a été intégrée au référentiel BD-SEVR et chargée dans la BD-CHGEO.

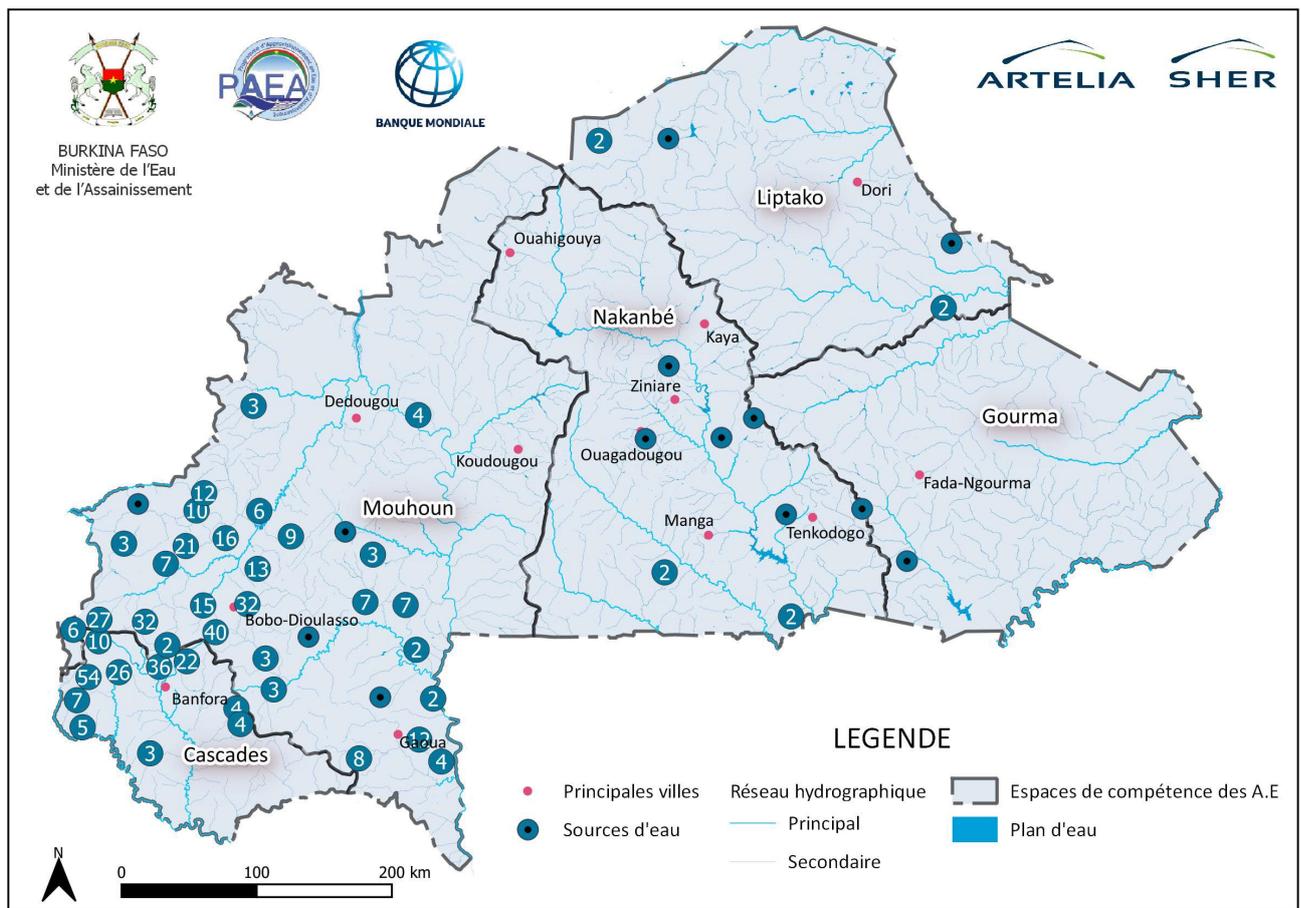
Enfin, la thématique hydrologique de la BD-CHGEO est complétée par un jeu de données spatial identifiant les **Sources**.

Une couche reprenant les sources avait été constituée par la Agences de l'Eau lors des travaux du R.1.1. Elle comportait 226 sources. Ce fichier avait été transmis au Groupement par l'intermédiaire de la DEIE et avait été capitalisé dans la BD-SEVR.

Dans le cadre des travaux du R.3.3, ce jeu de données a été complété par deux autres bases de données de référence, à savoir :

- La BD-RESO (MS.Access) qui contient une table [SOURCES] reprenant 251 enregistrements. Après nettoyage de la table, 239 sources ont été capitalisées. Elles ont été spatialisées à l'aide des coordonnées Lat/Long en WGS 84 converties en système UTM 30N.
- La BD-PESO (MS.Access) dont la table [Source], déjà spatialisée, reprend 37 enregistrements. L'ensemble des points ont été capitalisés.

Dès lors, la table de la BD-SEVR [sevr_hydro.d_source] contient à présent **502 sources spatialisées**. Ces données ont été chargées dans la BD-CHGEO.



Source : AE, 2021 ; RESO, 1996-1999 ; PESO, 2005-2010

Figure 14 : Sources consolidées du Burkina Faso

En marge de l’enrichissement de la table spatiale, les chroniques de débits (m³/h) disponibles pour certaines sources ont également été capitalisées. Seules les sources extraites de la BD-RESO disposent de cette information. On ne la retrouve pas dans la base de données des AE, ni dans PESO.

Les débits mesurés pour les sources de la BD-RESO sont directement intégrés à la table [SOURCES]. Les données extraites font état de 152 mesures valides. Une table spécifique [sevr_hydro.d_source_mesure] a été ajoutée au modèle de la BD-SEVR. Elle adopte la structure normalisée des séries temporelles (cf. Figure 10) et ce afin de permettre une alimentation aisée dans le futur. Chaque mesure est liée à la source spatialisée, ce qui permet de valoriser les chroniques dans des produits cartographiques et d’extraire des statistiques générales.

msrc_id [PK] integer	msrc_src_id character varying (25)	msrc_debit double precision	msrc_date date	msrc_methode character varying (255)
337	RESO_147	15	1996-05-07	ESTIMATION
338	RESO_149	50	1996-05-07	JAUGEAGE
339	RESO_152	10	1996-05-10	ESTIMATION

Figure 15 : Table de la chronique des mesures de débits sur les sources

B.3.9. Les données hydro-climatiques

Les jeux de données hydro-climatiques intégrés dans la BD-CHGEO sont : les stations météorologiques, les isohyètes couvrant la période 1931-2015 et un deuxième jeu d'isohyètes pour la période 2011-2020 générée par le Groupement dans le cadre des travaux sur le R.3.3.

Le **réseau de stations météorologiques** intégré dans la BD-CHGEO provient directement de la BD-SEVR, par capitalisation de la table spatiale [sevr_climat.d_station_meteo_anam]. Comme indiqué dans le RT.1.1, le réseau météorologique et le suivi des indicateurs pluviométriques et climatiques sont assurés par l'ANAM. L'Agence est donc considérée comme source authentique à ce niveau. Le modèle de données n'a pas évolué.

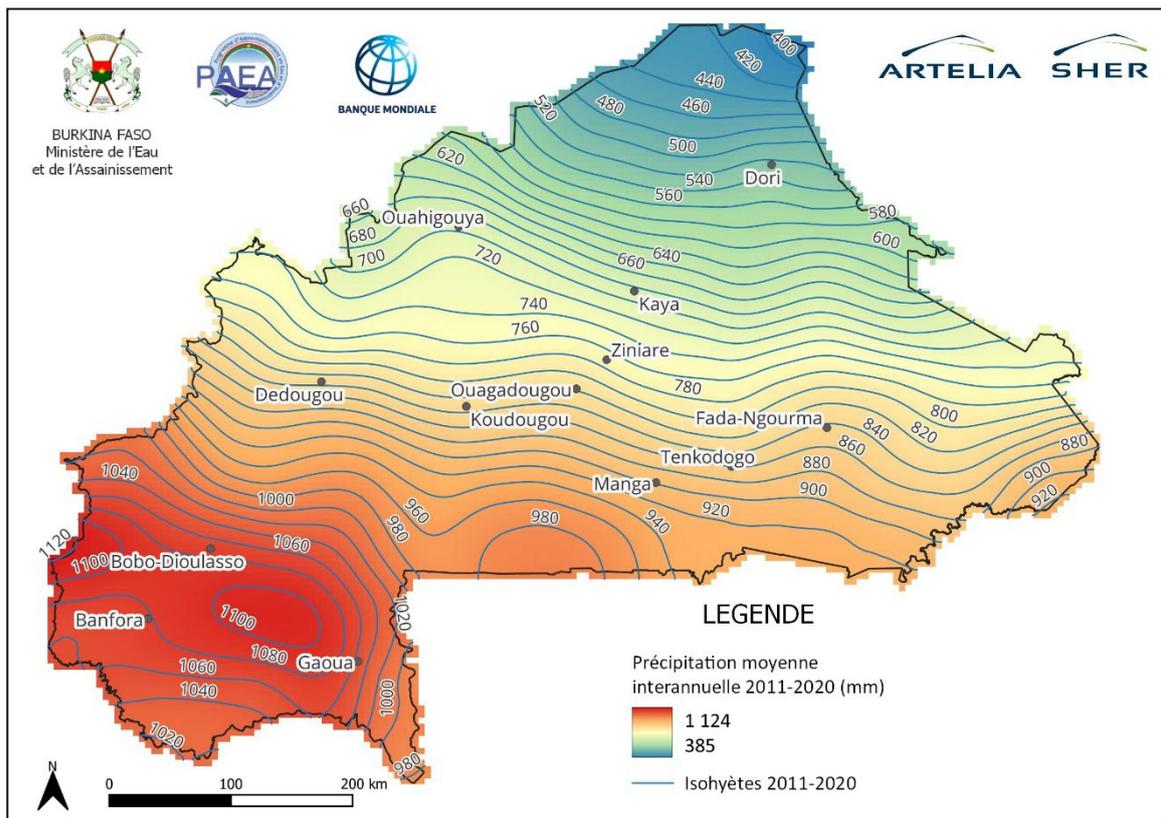
La couche linéaire relative à la **migration des isohyètes pour la période 1931 à 2015** a également été chargée dans la BD-CHGEO. Cette couche avait été produite dans le cadre du R.1.1 et est stockée dans la BD-SEVR. Le modèle de données n'a pas subi de modifications.

Enfin, une nouvelle couche est venue enrichir la section des données hydro-climatiques, à savoir les **isohyètes couvrant la période 2011 à 2020**. Ce jeu de données a été produit à partir des données de l'ANAM et des données « FLDAS » mises à disposition gratuitement via le projet « Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System » (FLDAS) de la NASA.

Le projet FLDAS produit des séries temporelles hydrologiques globales s'étalant de 1982 à ce jour, à une résolution spatiale de 0,1° (environ 10 km, NASA, 2022) et à une résolution temporelle d'environ 1 mois. Il s'agit de jeux de données à l'échelle mondiale, ce qui explique la faible résolution, qui ne permet pas de détecter des variations spatiales inférieures à 10 km. Il faut également tenir compte que plusieurs variables sont indirectement estimées à partir d'autres, comme les entrées de précipitations qui sont utilisées pour estimer l'évapotranspiration (McNALLY & al., 2017). Néanmoins, le produit offre une résolution temporelle permettant de réaliser des analyses mensuelles et disposer de séries temporelles complètes sur de larges périodes. L'utilisation des données FLDAS pour représenter les dynamiques climatiques au Burkina Faso a été validée par une analyse comparative menée par E.DJAHA dans le cadre de son travail de fin de master 2iE « *Evaluation de la recharge des aquifères du Burkina Faso par une approche bilantaire et spatialisée* » suivi par le Groupement (DJAHA, 2022). Cette approche intégrait la validation des données FLDAS, lesquelles sont ajustées vis-à-vis des données de l'ANAM. Dans le cadre du projet, les données mensuelles et annuelles de type raster disponibles sur la période de 1991 à 2020 ont été téléchargées et stockées dans un entrepôt de données.

Les traitements opérés pour l'obtention de la couche raster et du vecteur lissé de Précipitations se sont exécutés comme suit :

- i) Capitalisation des données mensuelles et annuelles de l'ANAM et de FLDAS.
- ii) Création du raster [moyenne annuelle 2011-2020] via QGIS [Outil *Raster Calculator*].
- iii) Filtrage du raster généré en [ii] via l'outil [Raster Filter → Simple Filter] (extension SAGA). Les paramètres d'entrée sont un filtre doux (smooth), un Kernel en carré et un rayon de 4.
- iv) Création du linéaire via l'outil d'extraction de contours [Courbe de niveau].



Source : SHER-ARTELIA, 2022

Figure 16 : Isohyètes et précipitations interannuelles 2011-2020

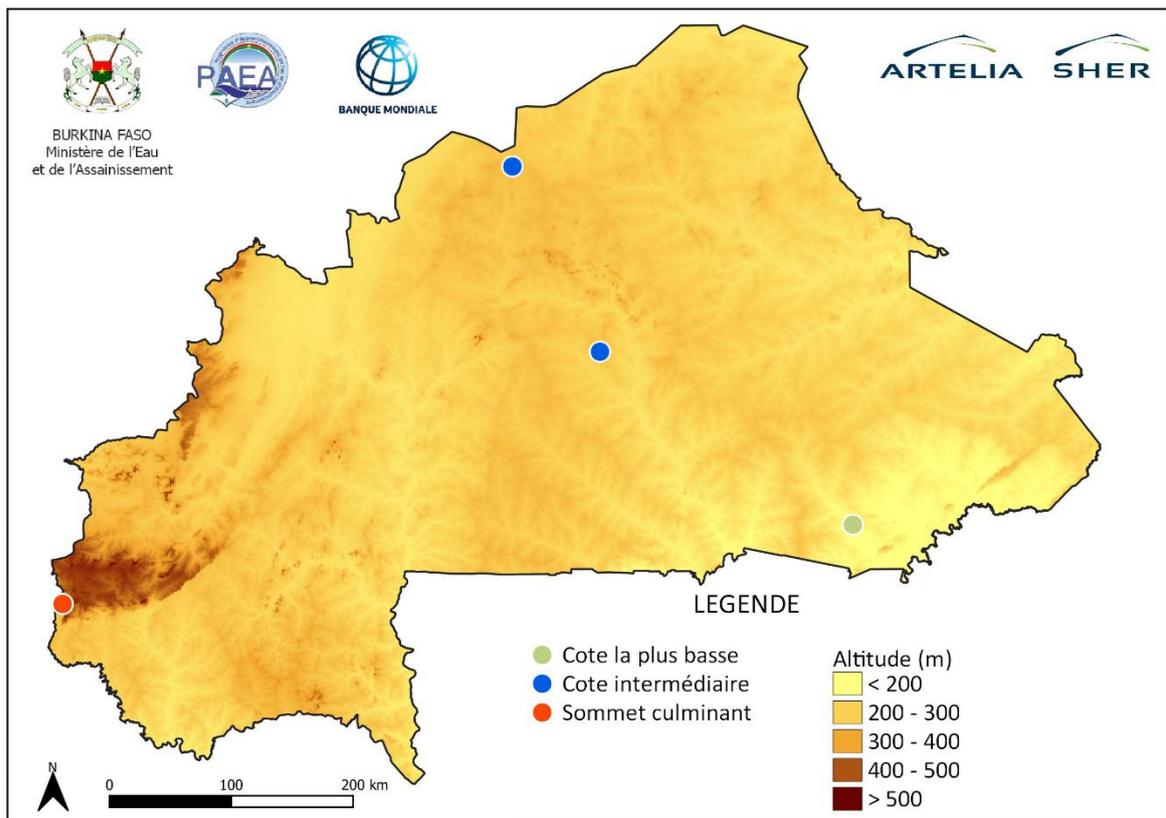
La couche ainsi produite a directement été intégrée dans la BD-CHGEO sans capitalisation dans d'autres référentiels. En effet, il est considéré qu'il s'agit d'une couche « produit » uniquement dédiée au périmètre de la carte hydrogéologique.

On notera que les données hydro-climatiques mensuelles et annuelles de type raster capitalisées dans le cadre de l'étude SEVERE concernent non-seulement les Précipitations, mais également la Température, l'ETP, l'ETR, la RFU, l'Eau Utile, le Ruissellement et la Recharge. Ces éléments sont principalement exploités dans le cadre de l'évaluation spatialisée de la recharge des aquifères, menée dans le cadre de la présente étude SEVERE (activité A.1.3.1) et qui fera l'objet d'un rapport technique spécifiquement dédié à cette thématique (RT.1.3.1).

B.3.10. Les données topographiques

Le Groupement a exploité plusieurs modèles numériques de terrain capitalisés dans le cadre du R.1.1 via des jeux de données téléchargés via le portail officiel EarthExplorer de l'USGS. Un MNT à 30 mètres a notamment été produit. Ces couches sont relativement lourdes et sont utilisées essentiellement dans les logiciels-SIG. En revanche, elles sont trop volumineuses pour être visualisées dans l'application interactive WebGis.

Le Groupement a donc téléchargé et traité un autre SRTM à une résolution plus faible de 900 mètres afin de proposer ce jeu de données en visualisation et dans les services web associés.



Source : NASA, SRTM, 2022

Figure 17 : Carte hypsométrique du Burkina Faso (900m)

B.3.11. Les Ouvrages de mobilisation des eaux souterraines et l'intégration des réseaux

Les **ouvrages de mobilisation** ont une importance capitale dans la réalisation de la carte hydrogéologique, que ce soit en termes de données d'entrée pour la génération de produits dérivés que pour la description des contextes hydrogéologiques.

La table de la BD-CHGEO reprenant les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines est basée sur l'ensemble de la BD-OMES mise en place par le Groupement dans le cadre des travaux du R.3.1. A partir de la BD-OMES, une vue dédiée à la BD-CHGEO a été préparée. Elle reprend toutes les informations utiles à la réalisation des cartes hydrogéologiques. Les informations reprises dans cette vue sont schématisées dans la Figure suivante.

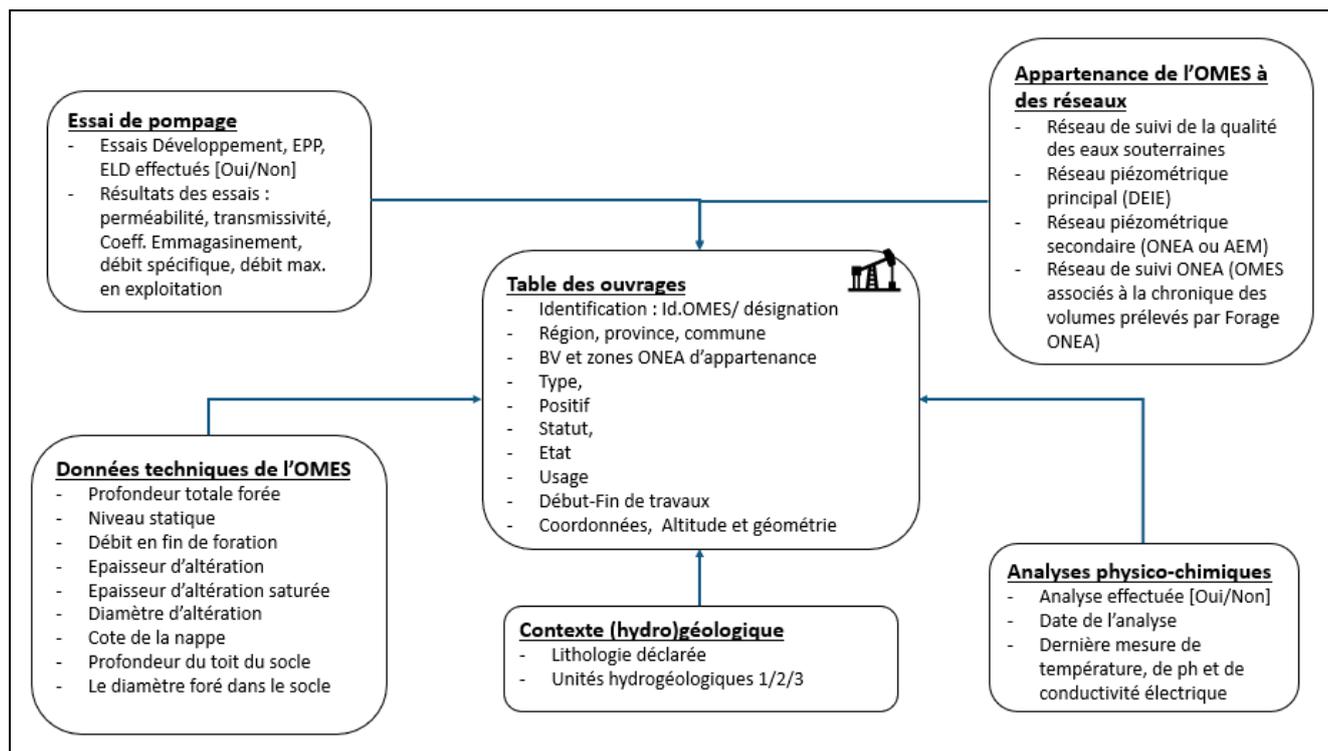


Figure 18 : Table des ouvrages OMES dans la BD-CHGEO

Par rapport à ce modèle et à la couche de données générées par le R.3.1, plusieurs tâches fondamentales de consolidation et d'actualisation des données ont été réalisées. Ces travaux ont été menés dans la base de données de référence, à savoir la BD-OMES, avant d'être répercutés dans la BD-CHGEO. Ils sont listés ci-dessous par catégorie.

- **Reprise de bases de données dans la BD-OMES**

Depuis la livraison du rapport RT.3.1, la base de données des ouvrages de mobilisation des eaux souterraines, a connu deux périodes d'actualisation majeures :

1. Juillet 2022 – Reprise des bases de données RESO et VREO

Cette phase d'actualisation a concerné la reprise de **l'ensemble des bases de données RESO (1996-1999) et VREO (2004-2008)**. En effet, les données antérieures à 2015 (2017 pour la Région du Centre-Est) étaient censées avoir été capitalisées par la DEIE lors de l'initiative de collecte menée entre 2014 et 2017 (cf. SHER/ARTELIA, 2022a & 2022b). Dans les faits, ce n'était pas le cas et des omissions avaient été constatées. Le Tableau 4 reprend le nombre de points identifiés dans les bases de données RESO et VREO, ceux capitalisés dans le R.3.1 et l'effort de reprise entrepris au niveau du R.3.3 afin de disposer d'un jeu de données enrichi.

Tableau 4 – Reprise des bases de données RESO et VREO

Base de données	Nombre d'OMES dans la base de données	Nombre d'OMES capitalisé par le R.3.1 (BD-OMES)	Nombre d'OMES non capitalisés
RESO	10.456	2.318	8.138
VREO	465	211	254

Le nombre d'ouvrages dans RESO provient d'une redéfinition des requêtes à partir des tables de données brutes. En effet, les requêtes préprogrammées dans la base de données MS.Access faisait état d'un nombre d'ouvrages moins important.

La reprise des bases de données n'est pas une tâche aisée. En effet, il ne suffit pas d'ajouter les nouveaux ouvrages dans la base de données existante mais il faut vérifier si les points sont correctement localisés et s'ils n'entrent pas en conflit spatial avec d'autres points déjà présents dans le jeu de données. Enfin, il faut analyser la qualité intrinsèque de l'information technique et éliminer les valeurs aberrantes, quitte à déclasser l'ouvrage. Tous les OMES ne sont donc pas candidats à la reprise.

Le contenu des BD RESO et VREO a été spatialisé et des croisements ont été réalisés avec les limites de commune, ce qui a permis de mettre en évidence les points mal localisés et de les traiter. De nombreux points ont pu être relocalisés (erreurs grossières dans le jeu de coordonnées ou repositionnement via les indications administratives). Des analyses spatiales ont été menées au sein même des jeux de données (points se trouvant à 1 mètre l'un de l'autre) et vis-à-vis de la table des ouvrages afin d'identifier les points dupliqués et ne reprendre que les points dont l'information est pertinente ou plus complète que celle déjà encodée.

Au final, la reprise a permis de compter un total de 10.399 ouvrages provenant de la BD-VREO et 405 ouvrages associées à la BD-VREO. Cette intégration est importante, non seulement en termes d'amélioration de la quantité de points dans OMES mais également au niveau de la prise en compte de données techniques associées à ces points. En effet, ces bases de données sources comportent des résultats d'essais de pompage et d'analyses physicochimiques qu'il est précieux de capitaliser tenant compte des traitements à réaliser dans les autres volets de l'étude.

2. Octobre 2022 – Reprise de bases de données OMES tierces

Le deuxième cycle d'actualisation de la BD-OMES a eu lieu au cours du second semestre 2022. Les bases de données suivantes ont été jugées d'intérêt et ont été capitalisées :

- La **base de données du projet d'hydraulique villageoise 310 Forages dans les provinces du Mouhoun, des Balé, des Banwa et de la Kossi** de 2005 (BADEA – Cf. TECSULT, 2005). Cette base de données compte en fait 371 ouvrages et avait déjà fait l'objet d'une intégration dans la première version de la BD-OMES. Elle a été réanalysée en profondeur, notamment pour tenter de capitaliser des données d'essais de pompage, ce qui n'a pas pu être le cas. En revanche, quelques nouveaux ouvrages ont pu être insérés ainsi que des détails concernant les venues d'eau et les analyses physico-chimiques.
- La **base de données réalisé en 2018 par COWI dans le cadre de la réalisation d'AEP multi-villages du projet PN-AEPA**. Elle reprend 2.389 ouvrages avec des résultats d'analyses physicochimiques. En revanche, il n'y a pas de données relatives aux essais de pompage. Après analyse du fichier, il s'avère que 650 ouvrages, soit $\frac{1}{4}$ des enregistrements, n'ont pu être capitalisés faute de coordonnées correctes (mauvaise localisation). D'autres points correspondaient à des ouvrages déjà capitalisés et, dans ce cas, une analyse comparative a été réalisée afin d'actualiser la BD-OMES si l'ouvrage de la base de données « COWI » s'avérait être plus fiable. Finalement, 1.311 ouvrages issus de cette base de données sont venus enrichir la table OMES de la BD-OMES.
- La **base de données des AEP Multi-Villages de l'ONEA réalisée dans le cadre du PN-AEPA**. Il s'agit à l'origine d'un fichier MS.Excel comprenant 29 enregistrements avec des résultats d'essais de pompage (développement et essais par paliers mais pas de résultats globaux). Trois points sont mal localisés et une base de données de l'ONEA contenant des points similaires avait déjà été capitalisée. Une analyse comparative a été réalisée pour mettre à jour les données techniques. Finalement 10 nouveaux ouvrages ont été ajoutés.

- Une **base de données de 9 forages de type AEP urbain de l'ONEA dans les villes de Bobo-Dioulasso et Dédougou**. Le fichier MS.Excel reprend 9 forages de l'ONEA avec toutes les caractéristiques associées (venues d'eau, résultats d'essais de pompage, lithologie, résultats d'analyses physicochimiques, etc.). Les données ont été encodées manuellement à partir des fiches techniques disponibles au format .pdf. Les données de 3 ouvrages existants ont été mises à jour et 6 nouveaux ouvrages ont été ajoutés.
- La **base de données du projet « Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso »** (BD-PESO, dernière mise à jour le 26/08/2010). Cette base de données reprend 591 ouvrages. La table distingue des piézomètres, des forages et des puits traditionnels. Certains ouvrages disposent de données de transmissivité. Concernant les piézomètres, une série temporelle de mesures de niveau d'eau est associée. Pour le reste, il faut distinguer des données lithologiques, de venues d'eau et d'analyses physico-chimiques. Après analyse, 488 nouveaux ouvrages ont été capitalisés.

Le Tableau 5 présente un récapitulatif du deuxième cycle de reprise des ouvrages dans la BD-OMES.

Tableau 5 – Reprise d'ouvrages provenant de bases de données annexes

Base de données	Nombre d'ouvrages	Nombre de nouveaux ouvrages capitalisés par le R.3.3 (BD-OMES)	Nombre d'ouvrages qui existaient déjà dans la BD-OMES	Nombre d'ouvrages non capitalisés
PHV 310 Forages	371	2	358	11
PN-AEPA, AEP-MV COWI	2.389	1.311	219	859
PN-AEPA, AEP-MV ONEA	29	10	18	1
AEP ONEA – Bobo-Dédougou	9	6	3	0
BD-PESO	591	488	62	41

Au final, 1.817 nouveaux ouvrages provenant de bases de données non traitées dans la R.3.1 ont été capitalisés via les activités du R.3.3.

- Intégration des stations du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines

Le réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines de la DGRE comporte **44 stations**. Il avait été capitalisé dans la BD-SEVR via les activités du R.1.1. Au niveau de la BD-SEVR, ce réseau est envisagé comme une table spatiale individuelle.

Lors de l'actualisation des données OMES du R.3.3, la décision a été prise d'intégrer les stations du réseau de suivi directement dans la table des ouvrages ainsi que de reprendre les mesures physico-chimiques associées aux stations en tant que série temporelle dans la table des mesures de la BD-OMES [omes_analyse.d_analyse_physicochimique].

La table des ouvrages de la BD-OMES a donc été enrichie de 44 ouvrages supplémentaires. Afin de pouvoir facilement générer le réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines, chaque station du réseau est identifiée

par la référence de la station préfixé de la chaîne de caractère « SQE_ ». Le réseau peut donc être reconstitué par la requête SQL suivante (la clause conditionnelle est à reporter dans QGIS au niveau du filtre de la couche).

```
SELECT * FROM omes_ouvrage.d_ouvrage WHERE omes_designation ilike 'SQE%'
```

De cette manière, la table des ouvrages dans la BD-OMES n'a pas subi de changement de modèle.

Par contre, lors de la constitution de la vue qui est chargée dans la BD-CHGEO, un attribut [omes_res_qual_eau_sout] indique clairement le réseau en présentant une valeur « Oui » pour les ouvrages considérés comme des stations de mesure de la qualité des eaux souterraines. Cet attribut est intégré dans le modèle de données de la table des ouvrages au niveau de la BD-CHGEO.

- **Intégration des réseaux piézométriques principaux et secondaires**

Au même titre que les stations de suivi de la qualité des eaux souterraines, les réseaux piézométriques principaux et secondaires ont été intégrés dans la table des ouvrages de la BD-OMES, alors que dans la BD-SEVR, il s'agit de tables individuelles.

L'intégration a concerné

- (1) le réseau piézométrique principal géré par la DEIE et comptant 108 stations.
- (2) le réseau piézométrique secondaire géré par l'ONEA consolidé dans le cadre du R.1.1 et comportant 72 stations. Plus de la moitié des stations figuraient déjà dans le jeu de données.
- (3) le réseau piézométrique spécifique de l'Agence de l'Eau du Mouhoun qui se compose de 25 stations. 15 d'entre-elles sont liées à des données capitalisées lors de la reprise de la BD-PESO.

Il y a donc 205 piézomètres intégrés à la table des ouvrages. Le modèle de cette dernière n'a pas été modifié. Dès lors, chaque réseau piézométrique peut être reconstitué aisément en considérant les requêtes SQL suivantes :

```
SELECT * FROM omes_ouvrage.d_ouvrage WHERE omes_designation ilike ' PZO_DEIE%';
SELECT * FROM omes_ouvrage.d_ouvrage WHERE omes_designation ilike ' PZO_ONEA%';
SELECT * FROM omes_ouvrage.d_ouvrage WHERE omes_designation ilike ' PZO_AEM%';
```

Au niveau du modèle de données de la BD-CHGEO, la table des ouvrages intègre directement l'appartenance des OMES à leur réseau respectif via des attributs spécifiques, tels qu'illustré à la Figure suivante :

omes_id [PK] integer	appartenance_res_piezo_deie character varying (3)	appartenance_res_piezo_onea character varying (3)	appartenance_res_piezo_aem character varying (3)
3802	[null]	Oui	[null]
11235	[null]	[null]	Oui
18686	[null]	Oui	[null]
19163	Oui	[null]	[null]
21158	[null]	Oui	[null]

Figure 19 : Appartenance des OMES aux réseaux piézométriques

Le rapprochement « OMES Vs Piézométrie » apporte une plus-value considérable que ce soit au niveau de la cohérence des données, de la facilité de retrouver des informations techniques sur un réseau particulier ou dans la production de la carte hydrogéologique.

- **Intégration des forages exploités et suivis par l'ONEA**

La mise en cohérence de la table des ouvrages de la BD-OMES s'est poursuivie en intégrant les ouvrages de l'ONEA faisant l'objet d'un **suivi au niveau des mesures annuelles de volumes d'eau prélevés**.

En fin du deuxième trimestre 2022, l'ONEA a fourni un fichier MS.Excel au Groupement reprenant les volumes annuels prélevés sur certains de ses ouvrages. Le fichier comptait 552 enregistrements avec, en attribut, l'identité du forage et les coordonnées X/Y exprimées en UTM 30N. La reprise de ce fichier a été assurée dans le cadre du R.3.3. Plusieurs difficultés ont été constatées :

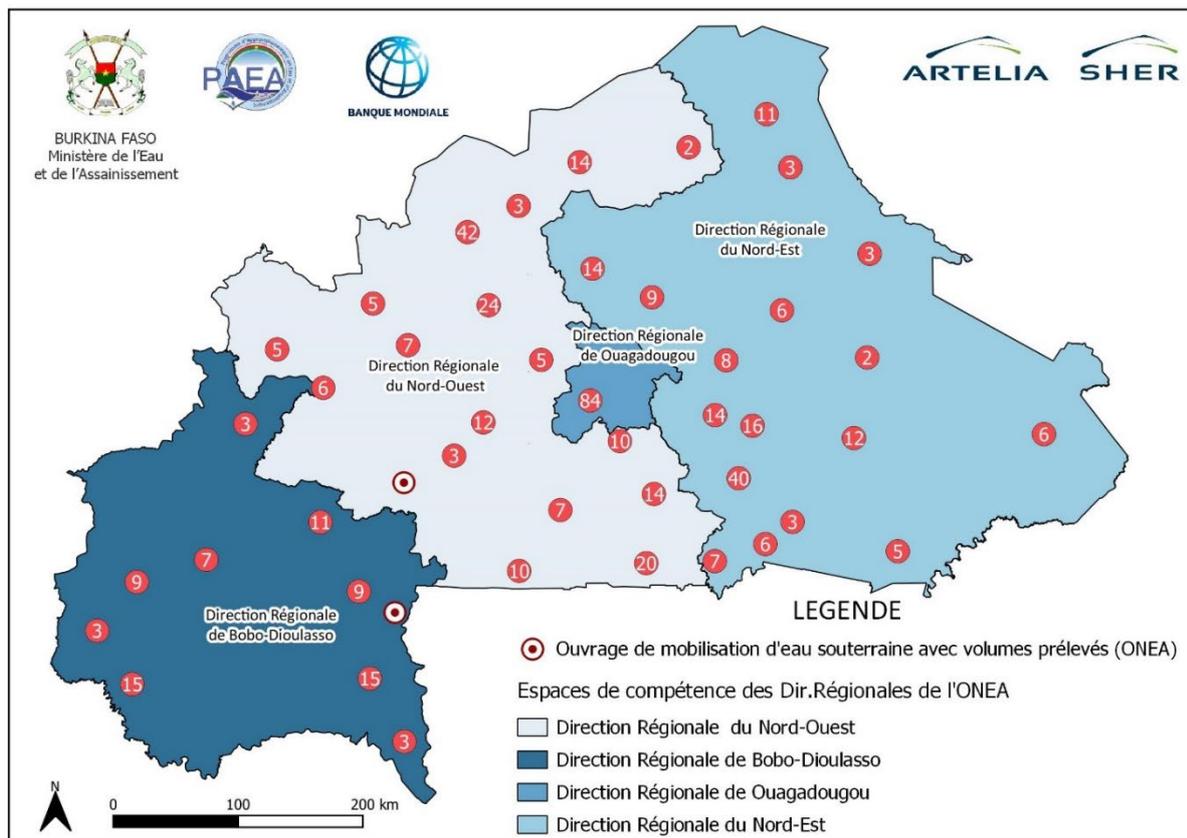
- Il n'y avait pas de correspondance automatique entre le fichier MS.Excel des volumes et le fichier source transmis par l'ONEA et qui avait servi de base à la spatialisation des ouvrages. Pourtant, dans les deux cas, le gestionnaire des données est l'ONEA. Un certain nombre de conséquences découle de ce constat :
 - Un ouvrage identifié porteur de la même identité dans les deux fichiers peut être localisé à deux endroits différents. Dans ce cas, quelle est la bonne référence ?
 - A l'inverse, deux ouvrages d'identité différente sont situés au même endroit, et le forage du fichier de localisation a un correspondant dans la table des volumes mais localisé à un troisième lieu. Dans ce cas, comment parvenir à consolider les jeux de données ?
- Plusieurs jeux de coordonnées d'ouvrages sans correspondance dans le fichier de localisation étaient erronés ou encodés dans des systèmes de référence différents.
- Quelques enregistrements apparaissent totalement dupliqués (au niveau des volumes et des coordonnées).

Le fait que l'ONEA fournisse deux fichiers sans correspondance immédiate entre eux alors que les phénomènes représentés sont les mêmes provoque une incertitude sur la qualité des jeux de données finaux

Un travail important a été mené au niveau du Groupement pour pouvoir établir des points de convergence entre le fichier des volumes et les ouvrages ONEA repris dans la BD-OMES. Ce travail de rapprochement s'est appuyé d'une part sur les coordonnées (analyse spatiale de proximité entre un ouvrage-volume et son équivalent dans OMES) et d'autre part par la référence à l'ouvrage (identité similaire gérée par le même centre ONEA indépendamment des coordonnées). Ensuite, une analyse de distance des points proches a permis d'associer le volume au point OMES le plus proche. Si ce point venait de BEWACO ou d'une base de données ancienne, son identité était modifiée au bénéfice du nom de l'ouvrage ONEA.

Cette méthodologie de reprise a permis d'associer 515 enregistrements de volumes à leur équivalent dans OMES (soit 93% des enregistrements). Les 37 volumes sans correspondance ne présentent pas de coordonnées et il n'a pas été possible de retrouver un ouvrage ONEA existant dans OMES disposant d'une identité similaire.

Dans un premier temps, le jeu de données consolidée enrichi de l'identifiant OMES a été intégré dans la BD-OMES de manière non normalisée, c'est-à-dire avec autant d'attributs que d'années de prélèvement. Dans un second temps, cette table a été normalisée pour constituer une série temporelle correctement structurée (cf. Figure 10). La table reprenant cette chronique [omes_ouvrage.d_chronique_ouvrage_onea_volume_preleve] a ensuite été chargée dans la BD-CHGEO (cf. Part, Chroniques).



Source : ONEA, 2021-2022

Figure 20 : Ouvrages de l'ONEA suivi par des mesures de volumes prélevés

- Autres mises à jour de la BD-OMES

D'autres tâches ont été réalisées sur la BD-OMES dans le cadre des travaux du R.3.3.

- Révision des valeurs proposées pour les usages des ouvrages. Introduction de la distinction entre les AEP Urbain, AEP Multi-Village et AEP Simplifié. Mise à disposition d'une catégorie générique « Hydraulique rurale ». Complétude du champ relatif aux usages dans la table des ouvrages.
- Calcul des valeurs d'altitude [omes_altitude] à l'aide du MNT SRTM 30m pour les ouvrages qui ne disposaient pas d'une valeur d'altitude empirique.
- Contrôle qualité de toutes les valeurs numériques à l'aide de valeurs seuils définies pour chaque paramètre. Exécution du contrôle de qualité global et traitements des incidences.
- Adaptation du code SQL de la vue des ouvrages [omes_ouvrage.v_ouvrage] afin d'intégrer les attributs suivants :
 - La cote de la nappe suivant le calcul [altitude (ou cote_MNT) – Niveau statique] ;
 - L'épaisseur d'altération saturée via le calcul [Epaisseur d'altération – Niveau statique] ;
 - L'appartenance aux Unités Hydrogéologiques respectivement de niveau 1, 2 et 3 ;
 - L'appartenance à la zone de compétence ONEA ;
 - L'appartenance au réseau de stations de suivi de la qualité des eaux souterraines ;
 - L'appartenance aux réseaux piézométriques principaux et secondaires ;
 - L'appartenance au réseau d'ouvrages suivis par l'ONEA en termes de volumes prélevés ;

La vue des ouvrages [omes_ouvrage.v_ouvrage] consolidée a donc pu être chargée dans la BD-CHGEO, au niveau de la table [chgeo_ouvrage.d_ouvrage].

- **Intégration de la base de données des ouvrages AEP du PAEA-DR1**

La base de données des ouvrages AEP du PAEA-DR.1 a été fournie au Groupement via le PAEA (PAEA – 11/2022). Le jeu de données se trouve dans un fichier MS.Excel qui reprend l'ensemble des données administratives et techniques relatives aux forages déjà réalisés, ce inclus les résultats d'essais de pompage, les analyses chimiques, etc. La base de données se trouve dans l'état d'alimentation brut réalisé par le PAEA et nécessite un nettoyage et une révision des seuils de valeurs. L'intégration se réalisera dans la BD-OMES et les données seront transférées à la BD-CHGEO via les canaux de chargement mis en place par le projet.

B.3.12. Les ouvrages hydrauliques

Le jeu de données spatial reprenant les barrages réalisés ou réhabilités depuis 2012 a été intégré à la BD-CHGEO en provenance de la BD-SEVR. Les données brutes sont maintenues par la Direction Générale des Infrastructures Hydrauliques (MEA-DGIH).

La couche a été intégrée telle quelle sans nécessiter de transformation au niveau du modèle.

B.3.13. Le réseau hydrométrique

En plus du réseau de suivi de la qualité des eaux souterraines et des réseaux piézométriques, intégrés tous deux dans la table des OMES, le réseau des stations hydrométriques a été repris dans la BD-CHGEO, en tant que table individuelle [chgeo_reseau.d_station_hydrometrique]. Cette couche a été consolidée dans le cadre du R.1.1 et n'a pas fait l'objet de reprise au niveau du R.3.3.

B.3.14. Les zones de protection de captage

Une couche de données au format Shapefile a été récupérée de la BD-PESO et reprend les zones de protection de captage dans la Région de Bobo-Dioulasso. Ces zones ont été générées par le projet « Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso » en considérant la délimitation des zones de protection des captages de Nasso figurant dans un des rapports du projet VREO (SHER, 2009).

Cette nouvelle couche a été intégrée à la BD-SEVR [sevr_omes.d_zone_protection_captage] puis transférée dans la BD-CHGEO [chgeo_ouvrage.d_zone_protection_captage].

B.3.15. Les aires classées

Une couche de données au format Shapefile a été récupérée (IGB, 2012) et reprend les aires classées au Burkina Faso, à savoir les forêts classées, les concessions, les enclaves, les réserves, etc. Elle a été intégrée à la BD-SEVR et ensuite chargée dans la BD-CHGEO.

B.3.16. Les séries temporelles de mesures

Comme évoqué précédemment, plusieurs chroniques de mesures ont été structurées dans les bases de données de référence et sont venues alimenter la BD-CHGEO. Chaque chronique est stockée au sein d'une table individuelle normalisée. Ces tables sont liées à leur réseau respectif via un identifiant unique.

En associant la chronique à son réseau spatial de référence, il a été possible de construire des **vues matérialisées** associant, pour chaque station du réseau d'appartenance, les informations suivantes :

- Les unités hydrogéologiques d'appartenance;
- La date de première et de dernière mesure ;
- La dernière mesure observée ;
- Le nombre de mesures prises ;

- Les mesures annuelles.

Les vues matérialisées « dénormalisent » l'information et permettent de la présenter et de l'exploiter au mieux dans les produits dérivés (carte hydrogéologique et WebGIS).

Les différentes chroniques et leurs caractéristiques sont reprises dans le Tableau 6.

Tableau 6 – Séries temporelles reprises dans la BD-CHGEO

Chronique	Fichier source	Référentiel	Schéma d'appartenance dans CHGEO	Table dans la BD-CHGEO	Table spatiale liée	Vue matérialisée	Statistiques associées par station
Chronique de débits mesurés pour les sources	BD-RESO	BD-SEVR	chgeo_hydrologie	d_chronique_source_debit	Table des sources d_source	vm_source	Date de dernière mesure Dernière mesure de débit Nombre de mesures de débit
Chronique de volumes prélevés par Centre ONEA	ONEA	BD-SEVR	chgeo_ancillaire	d_chronique_centre_onea_volume_preleve	Table des centres ONEA d_centre_onea	vm_centre_onea	Date de dernière mesure Dernière mesure de volume Nombre total de mesures de volume (interannuel) Volumes prélevés par an (de 2009 à 2022)

Chronique de volumes prélevés par Ouvrages ONEA	ONEA	BD-OMES	chgeo_ouvrage	d_chronique_ouvrage_onea_volume_preleve	Table des ouvrages (filtre sur réseau des ouvrages ONEA suivis) d_ouvrage	vm_ouvrage_onea_volume	Date de dernière mesure Nombre total de mesures de volume (interannuel) Volumes prélevés par an (de 2010 à 2022)
Chronique de niveaux piézométriques de la DEIE (+ PESO)	DEIE PESO	BD-OMES	chgeo_ouvrage	d_chronique_piezometre	Table des ouvrages (filtre sur les ouvrages appartenant au réseau piézométrique de la DEIE) d_ouvrage	Seulement réseau DEIE vm_piezometre_deie_chronique_ns	Niveaux statiques moyens, min et max et nombre de mesures par an (de 1978 à 2022)
Chronique des mesures de paramètre physico-chimiques de qualité des eaux souterraines	DEIE	BD-SEVR	chgeo_reseau	d_chronique_qualite_eau_sout	Table des ouvrages (filtre sur les ouvrages appartenant au réseau QES) d_ouvrage	vm_station_qualite_esout	Un attribut / paramètre mesuré avec la dernière mesure du paramètre pour les différentes stations

B.3.17. Les produits hydrogéologiques dérivés

Fort des jeux de données décrits dans les sections précédentes et intégrées dans la BD-CHGEO, le Groupement a procédé à la génération de couches cartographiques à haute valeur ajoutée. Ces couches peuvent être considérées comme des produits du R.3.3 en tant que tel.

Les traitements réalisés ont permis de produire un raster et un linéaire vectoriel lissé pour chaque produit. La méthodologie employée est commune à toutes les couches, excepté pour la recharge, à savoir :

- (1) Création du raster via ArcGIS. En effet, il a été observé que le traitement tournait en boucle dans QGIS en raison du trop grand nombre de points. Pour la création du raster, la méthode géostatistique de *Krigeage ordinaire (Ordinary Kriging)* qui est communément utilisée (ESRI, 2022). Le jeu de données des ouvrages de la BD-OMES (omes_ouvrage.d_ouvrage) est utilisé en entrée de traitement. La couche doit être filtrée pour ne conserver que les ouvrages présentant une valeur pour le paramètre souhaité (profondeur totale forée, épaisseur d'altération, débit en fin de forage, niveau statique, etc.).
- (2) Filtrage du raster généré en [1] via l'outil [Raster Filter → Simple Filter] (extension SAGA de QGIS). Les paramètres d'entrée sont un filtre doux (smooth), un Kernel en carré et un rayon de 4.
- (3) Création du linéaire via l'outil d'extraction de contours [Courbe de niveau].

Les produits générés sont les suivants.

La profondeur totale de l'ouvrage

La profondeur totale forée représente la hauteur totale de l'ouvrage, de la surface jusqu'à sa base.

La couche des ouvrages OMES est filtrée pour ne conserver que les ouvrages présentant une valeur de profondeur totale forée dans les seuils de tolérance retenus ($1 < \text{omes_prof_tot} < 2500\text{m}$).

La Figure 21 illustre les couches produites.

Le niveau d'eau statique

Le niveau d'eau statique représente la profondeur mesurée de la nappe, depuis le point de repère en surface.

La couche des ouvrages OMES est filtrée pour ne conserver que les ouvrages présentant une valeur de niveau statique dans les seuils de tolérance retenus ($0 < \text{omes_ns_fin_travaux} < 500\text{m}$).

La Figure 22 illustre les couches produites.

L'épaisseur d'altération

L'épaisseur d'altération correspond à l'épaisseur des terrains meubles ou peu consolidés (altérites), surmontant généralement le « bed-rock » induré.

L'épaisseur de l'altération donne des renseignements utiles relatifs à l'implantation des forages. Certaines couches d'altération sont en effet propices à la recharge et à la mobilisation des eaux souterraines, surtout en zone de socle cristallin.

La couche des ouvrages OMES est filtrée pour ne conserver que les ouvrages présentant une valeur d'épaisseur d'altération dans les seuils de tolérance retenus ($0 < \text{omes_epais_alteration} < 200\text{m}$).

La Figure 23 illustre les couches produites.

L'épaisseur d'altération saturée

L'épaisseur d'altération et l'épaisseur d'altération saturée sont étroitement liées (via la position du niveau de la nappe). L'épaisseur d'altération saturée s'obtient par soustraction entre l'épaisseur d'altération et le niveau statique de la nappe. L'épaisseur d'altération saturée représente dès lors un milieu principalement poreux dont les vides interstitiels sont complètement remplis d'eau.

L'épaisseur de la zone altérée saturée permet notamment de déterminer les réserves en eau de la partie altérée (facilement accessible et souvent productive) du système aquifère. En zone de socle particulièrement, ce paramètre peut être corrélé avec la productivité des ouvrages.

La couche des ouvrages OMES est filtrée pour ne conserver que les ouvrages présentant une valeur d'épaisseur d'altération saturée dans les seuils de tolérance retenus ($0 < \text{omes_epais_alteration_sat} < 200\text{m}$).

La Figure 24 illustre les couches produites.

Le débit en fin de foration

Le débit en fin de foration est le débit observé en cours de travaux de forage, lors de l'atteinte de la profondeur maximale du forage. A défaut de donnée renseignée, le débit de développement peut également être capitalisé.

La couche des ouvrages OMES est filtrée pour ne conserver que les ouvrages présentant une valeur de débit en fin de foration dans les seuils de tolérance retenus ($0 < \text{omes_debit_fin_travaux} < 800 \text{ m}^3/\text{h}$).

La Figure 25 illustre les couches produites.

La recharge des aquifères

La recharge demeure sans doute la composante de l'écoulement souterrain la plus difficile à quantifier spatialement ou temporellement en raison de sa variabilité et de la difficulté de mesures directes sur le terrain. Néanmoins, la détermination des zones de recharge des eaux souterraines est indispensable pour l'évaluation des réserves renouvelables en eaux souterraines et pour une gestion durable de celles-ci.

Les données utilisées comme input pour la carte hydrogéologique sont les couches rasters mensuelles calculées sur la période 1991-2020 (mm) selon l'approche bilantaire spatialisée, à partir de la méthode ETP-THORNTHWAITE et bilan simplifié THORNTHWAITE.

La méthodologie de création de la couche de recharge est distincte des autres produits. Elle se base sur les étapes suivantes :

- (1) Calcul et création via QGIS des couches raster mensuelles de recharge selon THORNTHWAITE, par la méthode de bilan simplifié THORNTHWAITE appliquée spatialement par itération mensuelle continue sur la période de 30 années (1991-2020) ;
- (2) Création d'une couche raster de la recharge annuelle moyenne 1991-2020 (mm) selon THORNTHWAITE à partir de QGIS [Calculatrice raster]. La création de ce raster correspond à la somme des rasters mensuels pour chaque année. Sur cette base, la moyenne des rasters annuels 1991-2020 est générée ;
- (3) Filtrage du raster et création des contours sur base de la méthodologie commune.

La Figure 26 illustre les couches produites.

On notera que, dans le cadre de l'activité A.1.3.1 de l'Etude SEVERE, d'autres méthodes d'évaluation spatialisée de la recharge sont implémentées. Le rapport technique RT.1.3.1 sera spécifiquement dédié à l'évaluation de la recharge. Il détaillera les différentes méthodes utilisées, le traitement des données d'entrée, les calculs et les résultats obtenus. Ces différents résultats seront également capitalisés dans les notices explicatives de chacune des planches constituant la carte hydrogéologique (Phase 2 du R.3.3).

La profondeur du toit du socle cristallin

La profondeur du toit du socle cristallin, sous les terrains de couverture du sédimentaire, permet d'évaluer l'épaisseur des terrains sédimentaires et la distribution spatiale de ce paramètre. Ces données sont notamment utiles pour connaître la géométrie des aquifères du sédimentaire, et pour élaborer un modèle géologique en trois dimensions.

Au Burkina Faso, la cartographie de la profondeur du toit du socle cristallin n'est disponible qu'au droit de la zone sédimentaire de l'Ouest.

Deux évaluations de ce phénomène ont été réalisées :

- Dans le cadre du programme VREO (2006) via l'élaboration d'un modèle géologique en trois dimensions de la zone sédimentaire de l'Ouest (OUEDRAOGO, 2006).
- Dans le cadre du PAEA (07/2022) via l'Etude de contribution de la géophysique aéroportée à la recherche d'aquifères profonds dans le bassin sédimentaire occidental du Burkina à partir de l'interprétation des données aéromagnétiques existantes (SOME, 2022).

A ce stade de l'étude, seules les données générées dans le cadre du programme VREO ont été exploitées, étant donné qu'elles ont été fournies dans un format exploitable SIG, contrairement aux données PAEA de 2022 qui ont été livrées dans un format image inexploitable par les outils géomatiques.

La Figure 27 illustre les couches produites.

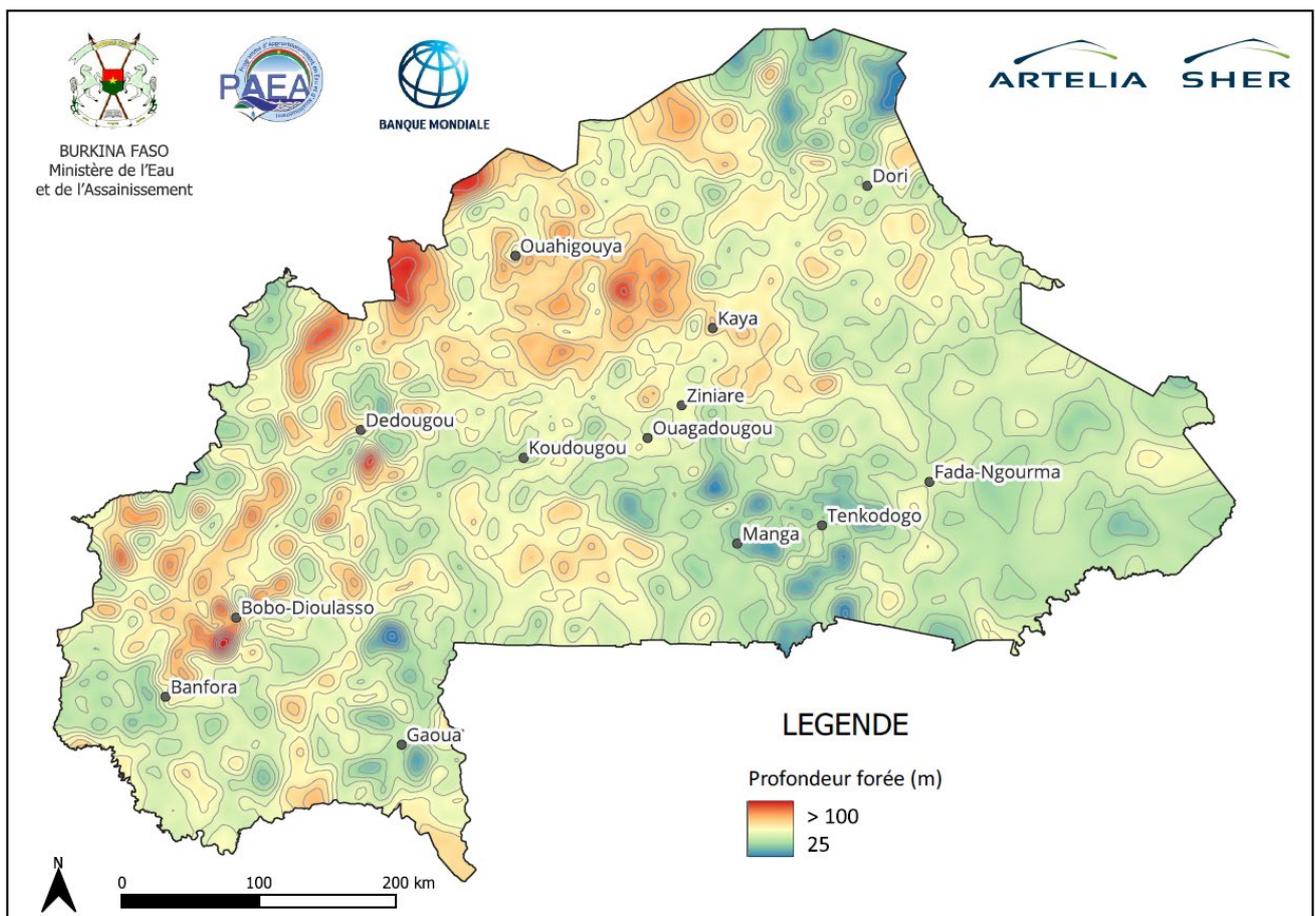


Figure 21 : Cartes de profondeurs forées

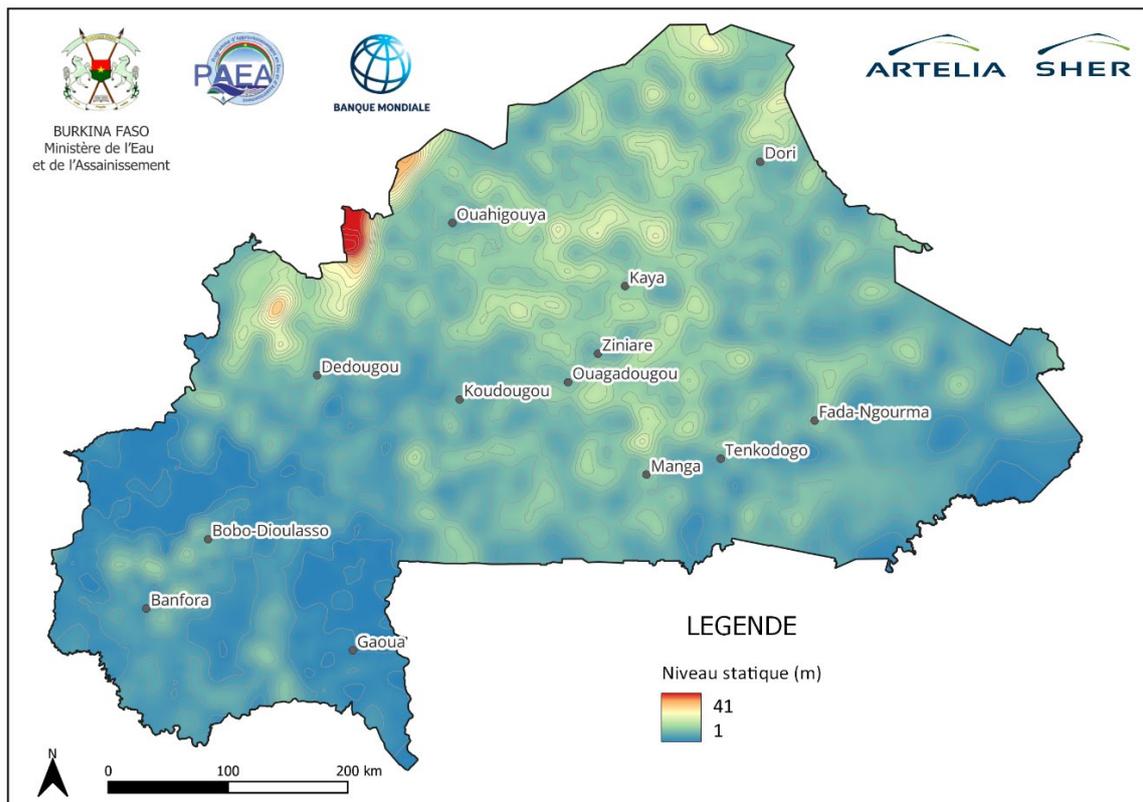


Figure 22 : Carte des niveaux statiques

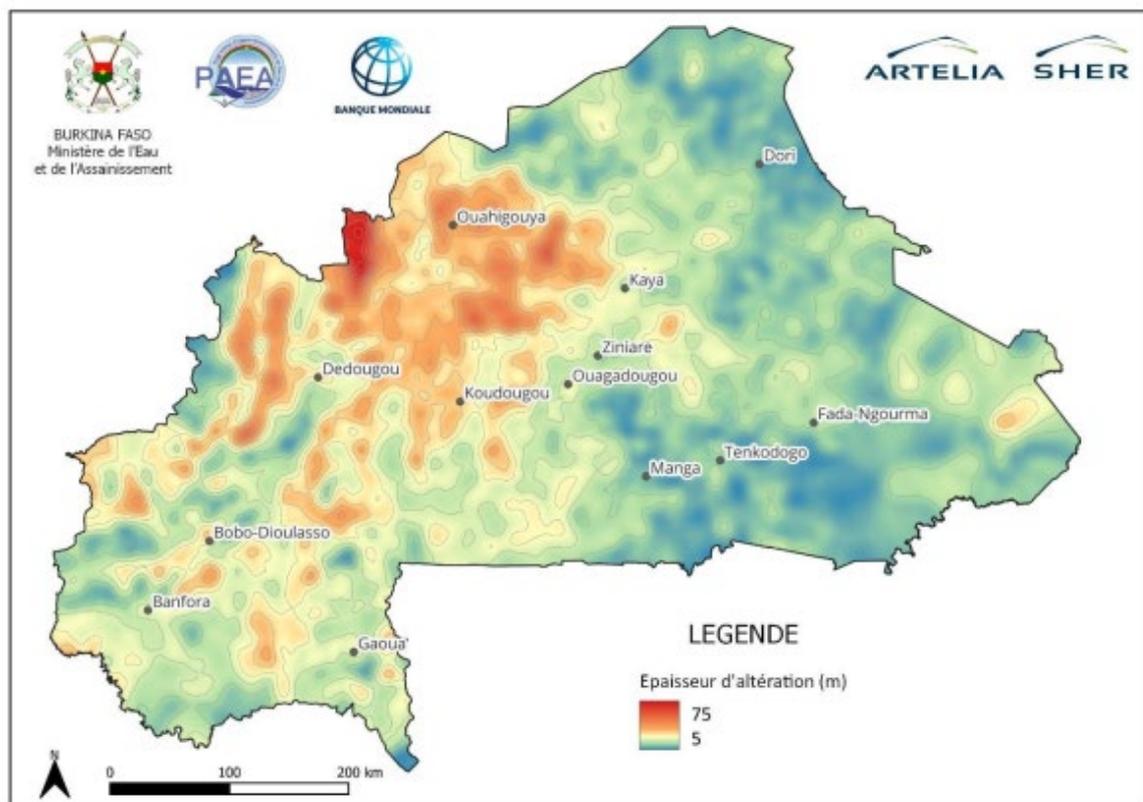
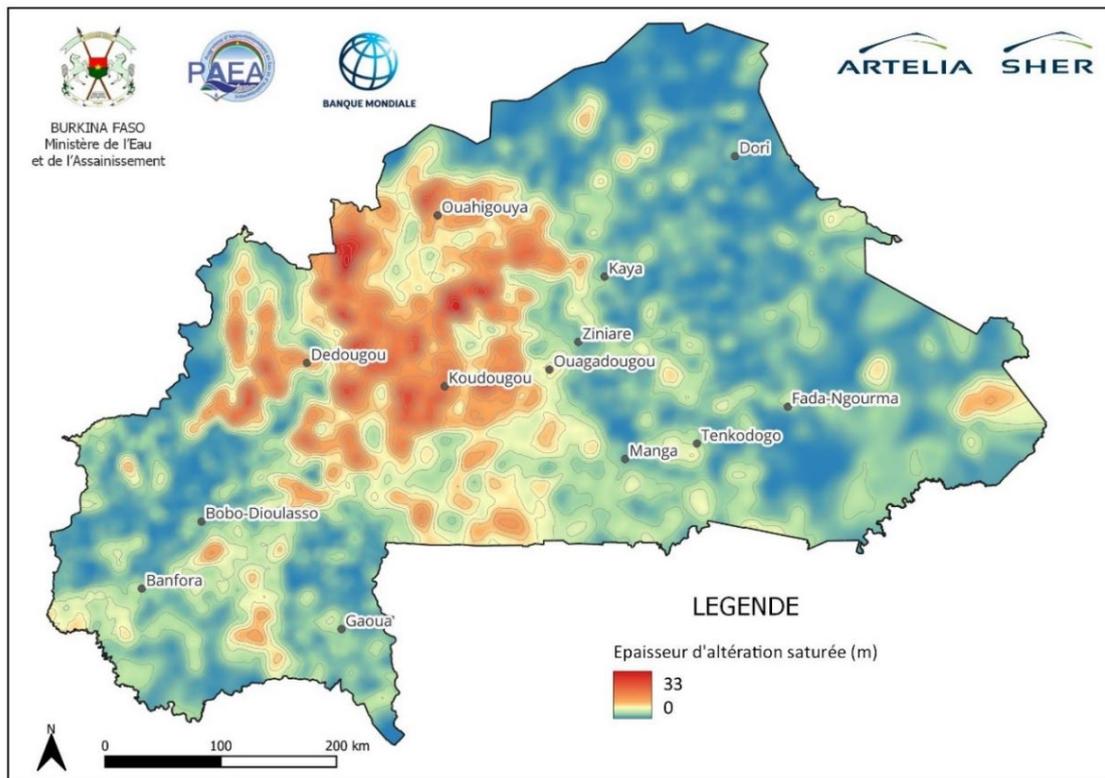
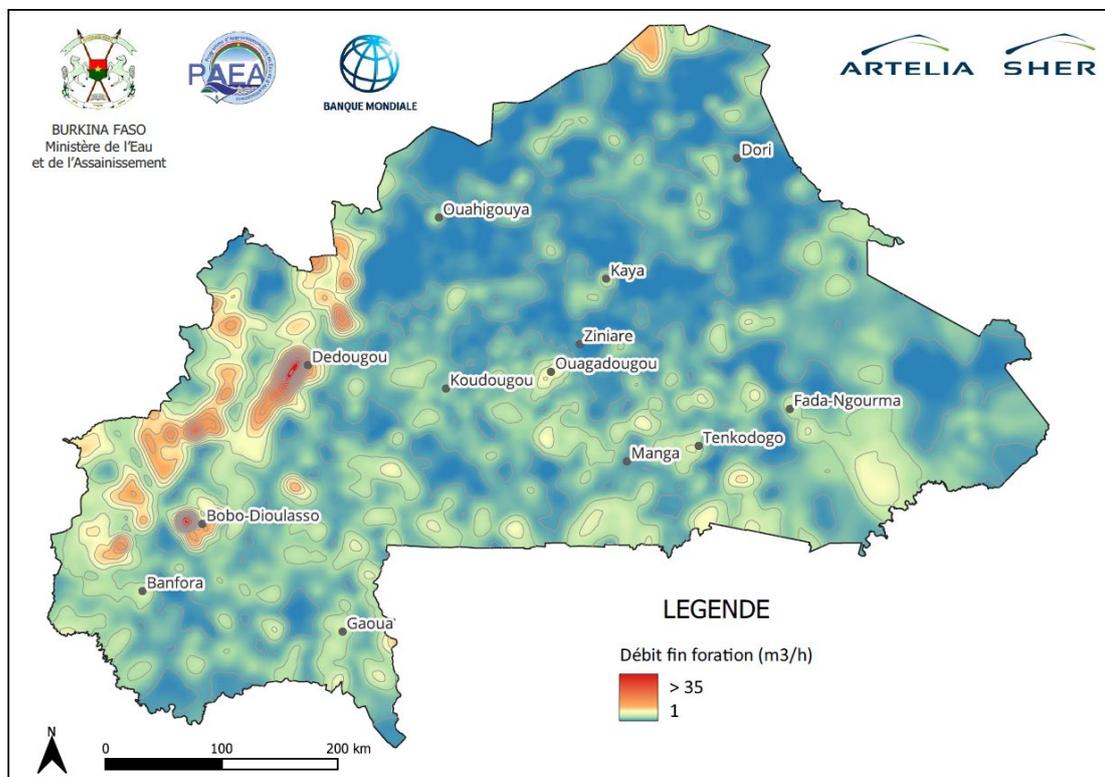


Figure 23 : Carte des épaisseurs d'altération



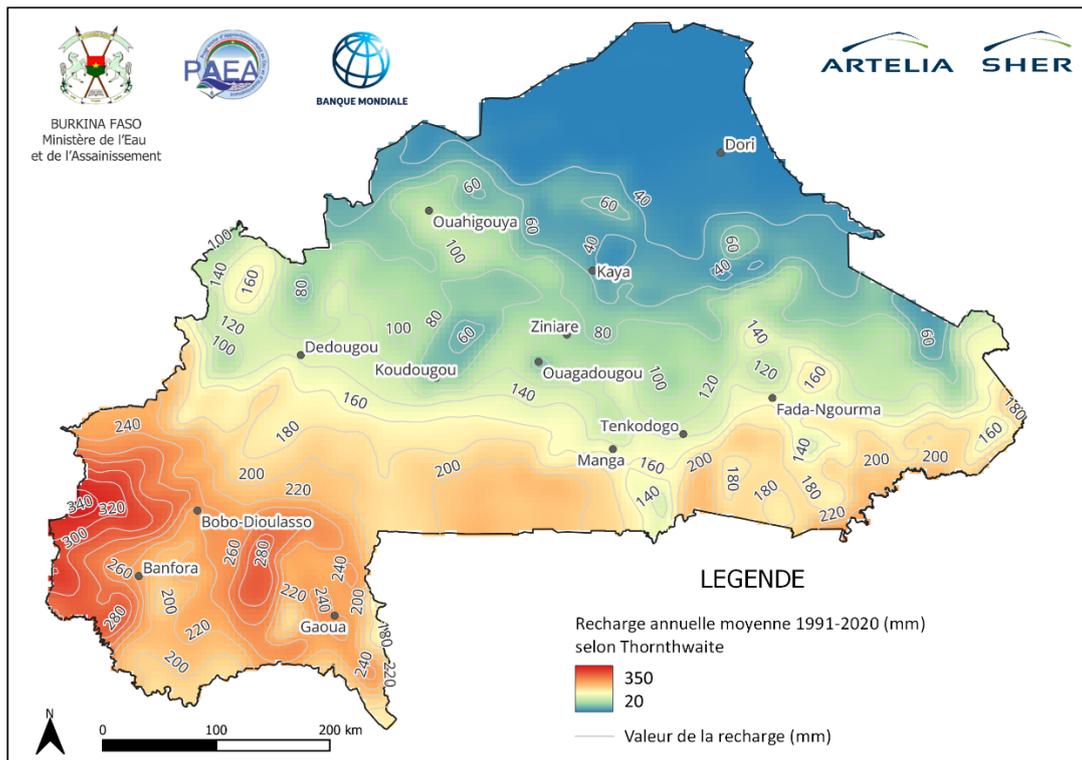
Source : SHER-ARTELIA, 2022

Figure 24 : Carte des épaisseurs d'altération saturée



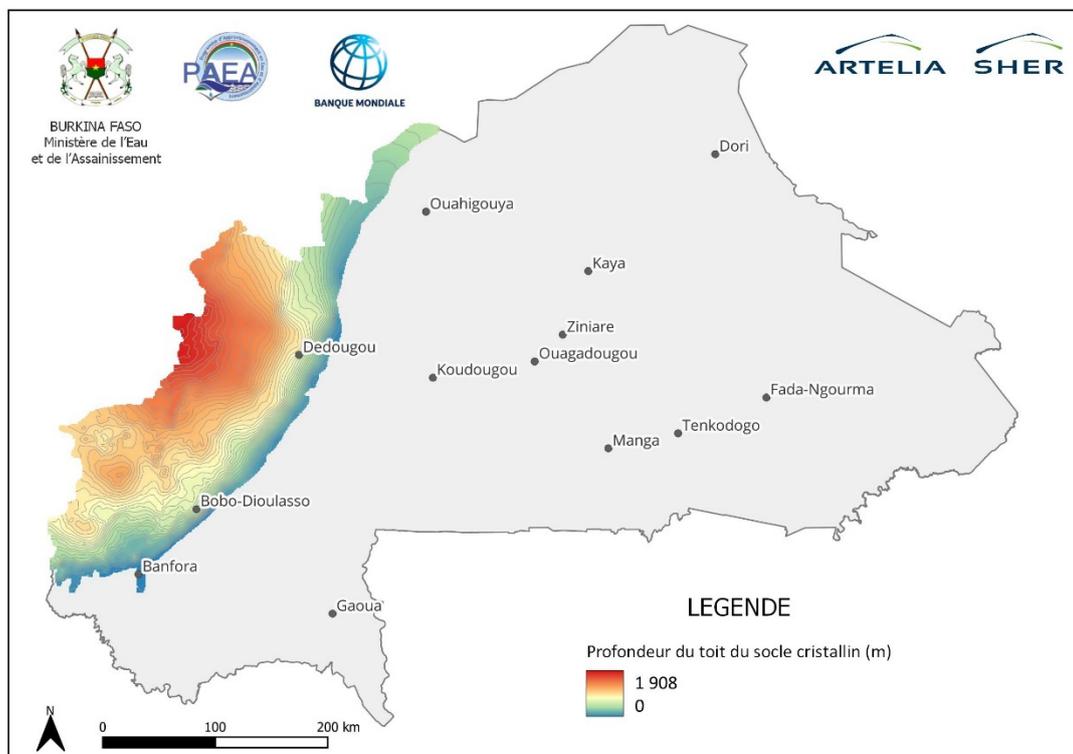
Source : SHER-ARTELIA, 2022

Figure 25 : Carte des débits en fin de foration



Source : SHER-ARTELIA, 2022

Figure 26 : Carte de la recharge annuelle moyenne (méthode bilantaire, THORNTHWAITE)



Source : SHER-ARTELIA, 2022 (adapté de VREO, 2006)

Figure 27 : Carte de la profondeur du toit du socle cristallin sous le sédimentaire de l'Ouest

B.4. Conclusion sur l'inventaire des données

Les cartes hydrogéologiques de référence ont été comparées entre elles, tant au niveau du contenu que de la forme. Sur cette base, un inventaire des couches utiles à reprendre a été établi. Cet inventaire a été enrichi par l'analyse de la carte hydrogéologique de Wallonie (Belgique), souvent citée en référence internationale, et qui a permis la prise en compte de jeux de données supplémentaires.

L'inventaire a servi de base à la collecte de données. A ce niveau, la capitalisation des informations sur les ressources en eau réalisée dans le cadre des activités du R.1.1 s'est avérée précieuse et très complète par rapport aux attentes du produit « carte hydrogéologique ». A ce titre, l'initiative du Groupement de créer une base de données relationnelle des ressources en eau (BD-SEVR) a été judicieuse. Les couches de données ont été rapidement identifiées, à la fois grâce aux connaissances acquises par les experts mais également par le fait que la base de données était largement documentée. Des efforts de consolidation menés sur certains jeux de données ont permis d'améliorer la qualité globale du référentiel. De même, toutes les opérations d'actualisation ont été réalisées directement dans la BD-SEVR, ce qui concrétise le fait que la base de données soutenant la carte hydrogéologique est une base de données « produit », c'est-à-dire qu'elle tire profit des couches de référence stockées dans les bases de données maîtresses mais qu'aucune intervention d'édition ne doit avoir lieu à ce niveau, hormis pour les quelques données générées par le projet, mais qui sont en majorité issues de processus d'interpolation.

Le même constat s'applique à la base de données des ouvrages de mobilisation des eaux souterraines (BD-OMES), qui constitue la référence en la matière et qui est le résultat des activités menés au niveau du R.3.1. Cette base de données n'est pas figée dans le temps. Le Groupement a procédé à deux cycles d'actualisation depuis sa livraison, et ce avec l'objectif de disposer de données les plus représentatives et les plus complètes possibles et, partant, renforcer les produits finaux tels que la carte hydrogéologique. L'actualisation de la BD-OMES a concerné la prise en compte de bases de données et d'inventaires présentant un nombre élevé d'ouvrages ou des caractéristiques techniques intéressantes. De plus, les réseaux de suivi de qualité des eaux souterraines et les réseaux piézométriques ont été intégrés en tant qu'ouvrages, permettant ainsi de disposer d'une vue globale des points d'eau.

Au terme de l'inventaire, le Groupement dispose de toutes les informations pour réaliser un prototype des cartes hydrogéologiques. Il possède tous les jeux de données identifiés par l'inventaire. Ceux-ci sont prêts à intégrer la base de données de la carte hydrogéologique (BD-CHGEO), tant au niveau de leur structure que de leur contenu. Plusieurs produits thématiques propres à la carte hydrogéologique ont déjà été générés et sont disponibles pour l'intégration.

Les chapitres suivants seront consacrés à la constitution de la BD-CHGEO et de sa valorisation dans les produits cartographiques papiers et interactifs.

PARTIE 2 - ELABORATION DE LA BD-CHGEO

C. BD-CHGEO : DÉVELOPPEMENT ET ENRICHISSEMENT

Ce chapitre compile l'ensemble des tâches réalisées pour disposer d'une base de données soutenant la production des cartes hydrogéologiques et la diffusion des données via des services web ou des applications interactives. Les aspects suivants seront parcourus :

- La vision de la BD-CHGEO et la méthodologie d'identification des entités du modèle ;
- la construction du modèle de données, ce y compris le formalisme utilisé
- les différentes règles de gestion mises en œuvre dans le modèle ;
- L'enrichissement des tables du modèle.

C.1. Méthodologie de modélisation

La carte hydrogéologique en vigueur au Burkina Faso souffre d'un manque d'actualisation puisqu'elle a été établie il y a 30 ans, avec les bases de données et les outils technologiques de l'époque. La constitution d'une base de données hydrogéologique doit donc servir cette actualisation. Elle s'inscrit dans un continuum logique au sein du DR3 après la constitution du référentiel sur les ressources en eau (BD-SEVR, produit du R.1.1, SHER-ARTELIA, 2021.b) et la base de données technique sur les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines (BD-OMES, produit du R.3.1, SHER-ARTELIA, 2022.a & 2022.b).

La méthodologie de modélisation a été explicitée au chapitre B – [Analyse des cartes hydrogéologiques et inventaire des données]. Elle a consisté en une analyse du contenu des cartes hydrogéologiques de référence et à traduire chaque information en un jeu de données localisable dans un référentiel ou disponible chez son producteur. D'une manière générale, on retiendra que les critères suivants ont dicté le choix des entités :

- L'information modélisée doit normalement se retrouver sur une ou plusieurs cartes hydrogéologiques, à moins qu'elle soit considérée comme primordiale pour les travaux d'interpolation ou pour compléter des séries temporelles ;
- L'information doit être accessible. Si elle n'a pas été capitalisée dans des bases de données, elle doit disposer d'une haute probabilité à être collectée ou mise à disposition. Ce critère permet d'éviter au plus possible la présence de tables vides dans la base de données ;
- Les entités de la BD-CHGEO doivent pouvoir être connectées à des référentiels actualisés par les structures gestionnaires. Il faut privilégier une approche directe dans l'alimentation de la BD-CHGEO, ce qui signifie que des jeux de données consolidés et interprétés sont privilégiés ;
- Les couches doivent être exploitables pour le métier et apporter une plus-value. Les informations qui ne sont jamais demandées par les acteurs du secteur ou qui n'entreront d'aucune façon dans la réalisation de produits cartographiques ne sont pas jugées prioritaires.

Comme indiqué précédemment, la BD-CHGEO n'est pas considérée comme un référentiel de données mais bien comme un produit qui est alimenté et actualisé par des bases de données sources. Cette vision entraîne des répercussions tant au niveau du modèle de données que de la gestion du contenu. Au niveau de la conception du modèle, la BD-CHGEO se caractérise par les points suivants :

- Les tables sont modélisées au plus près du modèle du producteur. Etant donné que la majorité des couches proviennent d'autres référentiels, l'alimentation et l'actualisation des données sera plus aisée si la structure des entités dans la BD-CHGEO est proche voire similaire à celle des tables de référence. Idéalement, ce sont les bases de données de référence qui doivent assurer la transformation de modèle ou l'ajout de champs supplémentaires (par exemple via des règles de calcul, cf. l'épaisseur d'altération saturée) et ce en amont

de l'intégration dans la BD-CHGEO. En d'autres termes, elles doivent fournir des jeux de données « prêt à l'emploi » à la BD-CHGEO. Cette transformation peut être réalisée au moyen de vues, matérialisées ou non. Pour rappel, une **vue** est une table virtuelle représentant le résultat d'une requête sur la base. Une vue classique n'est jamais stockée. Elle est uniquement affichée et s'adapte dynamiquement au contenu des tables sources. Les **vues matérialisées** se comportent de la même manière qu'une vue classique mais sont stockées physiquement sur le disque. Cela rend les traitements beaucoup plus rapides. Néanmoins, une vue matérialisée doit être rafraîchie manuellement. Elle sera donc utilisée pour des données sources qui bougent très peu (ex. des chroniques de mesures), pour conserver des requêtes lourdes et complexes ou encore pour faire de la réplication de tables.

- La BD-CHGEO n'implique pas la mise en place d'un grand nombre de relations ni la prise en compte d'un grand nombre de table typologique fixant des domaines de valeurs. Bien que la base de données soit relationnelle, le nombre de relations entre entités doit rester limitées. En effet, ces contraintes d'intégrité sont vérifiées dans les référentiels sources. La BD-CHGEO consomme la plupart du temps des données consolidées qui implémentent et valident déjà ces relations. La Figure 28 illustre la simplification du modèle de la BD-CHGEO en considérant la relation entre les OMES et la table typologique des usages. Au sein de la BD-OMES, les ouvrages doivent respecter les valeurs définies pour les différents usages. Une relation de clé étrangère lie les deux tables et permet de garantir l'intégrité des données [1]. La vue construite dans la BD-OMES exploite la relation entre les deux tables maitresses et fournit, pour chaque ouvrage, le type de manière littérale [2]. Cette vue est le produit consolidé qui est transféré à la BD-CHGEO via une passerelle de données [3]. Le modèle de la BD-CHGEO ne comporte pas de table typologique (inutile car l'identifiant de l'usage n'est pas utilisé à ce niveau) ni par conséquent de relation [4]. Il est donc allégé et simplifié par rapport à celui de la BD-OMES.

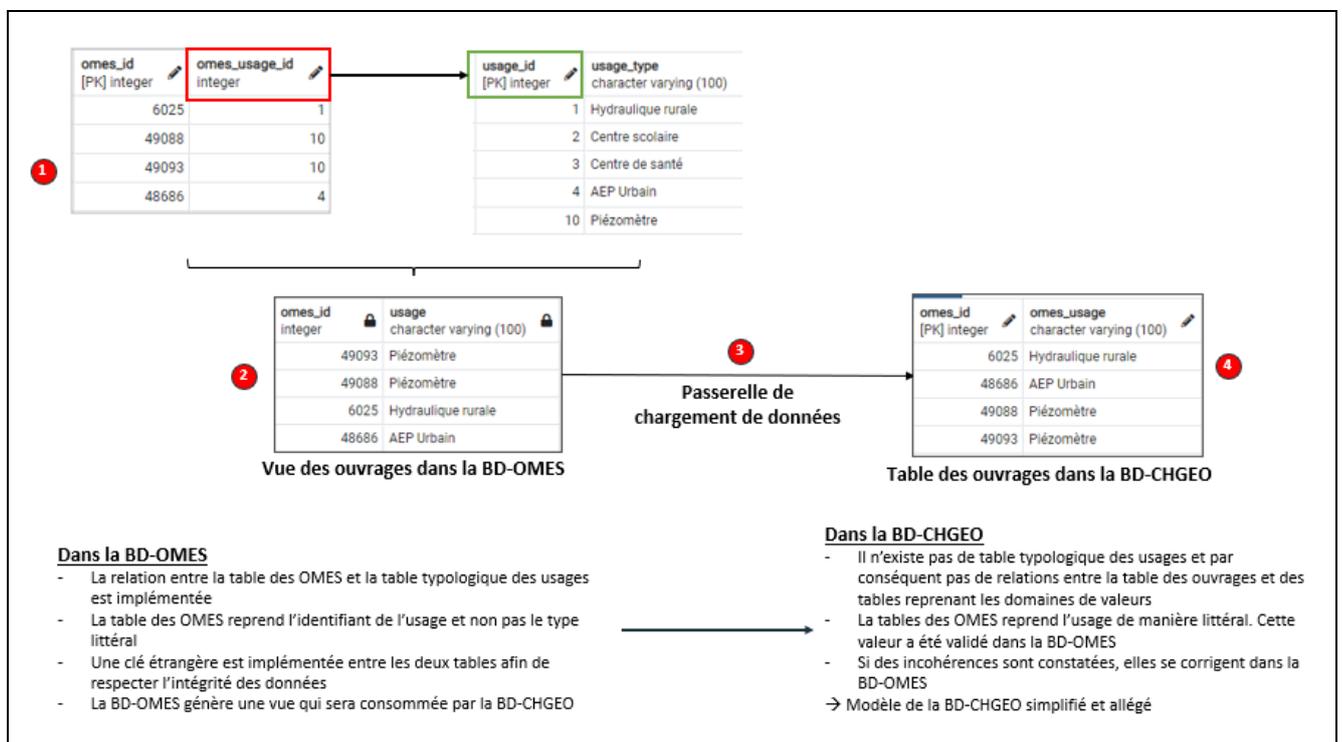


Figure 28 : BD-CHGEO - Modèle simplifié

- La BD-CHGEO contient un nombre plus important d'entités isolées, c'est-à-dire sans relation avec d'autres tables. C'est le cas par exemple de données ancillaires (réseaux routiers et ferrés) ou l'ensemble des couches produites par interpolation.

- La BD-CHGEO n'implique pas non plus la mise en place d'un modèle de qualité tel que celui déployé dans la BD-OMES. En effet, le contenu des données a déjà dû faire l'objet de contrôle par les gestionnaires des référentiels. Il est inutile de reproduire l'effort à ce niveau. De même, le nombre de règles de gestion est fortement restreint. En effet, le respect des valeurs dans leur domaine de tolérance a déjà été validé, ce qui simplifie les procédures à mettre en place au niveau de la base de données « produit ».

Au niveau de la gestion du contenu, les incidences détectées ne se règlent pas dans la BD-CHGEO mais doivent être remontées au niveau des gestionnaires des bases de données contributrices, qui les répercuteront éventuellement aux producteurs de données s'ils ne sont pas responsables de la matière. Dès lors, toute actualisation ou édition de données dans la BD-CHGEO est à proscrire, sans quoi la chaîne de gestion des données sera rompue et il ne sera plus possible de savoir où se trouve la version de référence.

Le Tableau 7 reprend la liste des bases de données considérées comme référentiel de données pour la BD-CHGEO.

Tableau 7 – Bases de données contributrices

#	Intitulé	Gestionnaire	Version	Utilisation dans la BD-CHGEO
1	BD-OMES	DEIE	2022	il s'agit de la base de données de référence contenant les informations techniques sur les OMES. Elle permet d'alimenter la table des ouvrages, certaines chroniques et a servi de base aux traitements d'interpolation
2	BD-SEVR	DEIE	2021	Elle constitue la référence pour un grand nombre de jeux de données ancillaires, hydrologiques, géologiques et de réseau de suivi

Idéalement, la BD-SEVR devra être intégrée et, à terme, remplacée par la BD-SNIEAU.

C.2. Dénomination et organisation générale

La base de données s'appelle la « Base de données de la carte hydrogéologique », en abrégé la « BD-CHGEO ». Elle est organisée selon différents schémas. Le schéma doit être vu comme une sorte de répertoire qui contient toutes les tables traitant de la même thématique. Les schémas ne s'imbriquent pas mais peuvent être liés entre eux par l'intermédiaire des tables qui y sont contenues. La manière dont sont organisés les schémas permet d'améliorer la consistance thématique à la base de données.

La base de données repose sur les schémas suivants :

- **Ancillaire** (*chgeo_ancillaire*) : Ce schéma reprend les données de référence utiles et exploitées dans la production de la carte hydrogéologique. Les données stockées sont majoritairement des couches de données spatiales au format vectoriel issues de la BD-SEVR et mises à disposition par un producteur de données. Le schéma ne contient pas de données maillée (images) qui restent disponibles en dehors de la base de données (dossier "entrepôt de données").
- **Espaces de compétence et centres opérationnels** (*chgeo_esp_comp*) : Schéma thématique contenant des couches cartographiques liés à différents espaces de compétences et à la localisation de sièges opérationnels. On retrouve les zones de compétence des Agences de l'Eau et de l'ONEA ainsi que les centres ONEA. En outre, ce schéma reprend la chronique de mesures de volumes prélevés associés aux centres de l'ONEA.
- **Hydrologie** (*chgeo_hydrologie*) : Schéma thématique contenant les données relatives au réseau hydrographique, aux sources et aux bassins versants (jeux de données enrichis). Ce schéma reprend également la chronique de mesures de débit liée aux sources.

- **Hydro-Climatologie** (*chgeo_hydro_climato*) : Schéma thématique contenant les données hydro-climatologiques telles que le réseau de stations météorologiques et les isohyètes (périodes passées et produit de la modélisation).
- **Géologie** (*chgeo_geologie*) : Schéma reprenant les informations en lien avec le contexte géologique et hydrogéologique. La majorité des données proviennent du BUMIGEB: couches géologiques au 1/1.000.000 et au 1/200.000, et éléments géologiques remarquables.
- **Pédologie** (*chgeo_pedologie*) : Schéma reprenant les informations en lien avec le contexte pédologique. Les couches de données proviennent de fournisseurs de référence : BUNASOLS et la FAO.
- **Ouvrages** (*chgeo_ouvrage*) : Schéma reprenant la table relative aux ouvrages de mobilisation des eaux souterraines ainsi que les grands ouvrages hydrauliques, les zones de protection de captage et les chroniques de mesures associées aux ouvrages.
- **Réseau** (*chgeo_reseau*): Schéma reprenant les réseaux de suivi (piézométrie, qualité de l'eau, hydrométrie) et les chroniques associées aux réseaux de suivi.
- **Produits thématiques** (*chgeo_produit*): Schéma reprenant différents produits thématiques générés dans le cadre et pour l'élaboration de la carte hydrogéologique. Ces produits thématiques sont issus d'une modélisation réalisée par le groupement SHER/ARTELIA dans le cadre de l'étude SEVERE (PAEA, 2021-2024).
- **Catalogage et documentation** (*chgeo_catalogue*) : Schéma reprenant des informations documentaires permettant de garantir une traçabilité des données contenues dans la base de données. On y retrouve les métadonnées tant des données ancillaires que des données produites.
- **Temporaire** (*chgeo_temp*) : Schéma contenant des tables temporaires résultant d'un traitement, d'une étape de pré-chargement de données en base ou de toutes autres opérations impliquant la création d'une table de manière temporaire. Ce schéma ne contient pas de tables appartenant au modèle de données de la BD-CHGEO. Les tables qui y sont créées peuvent être supprimées à tout moment par l'administrateur de la base de données.

La BD-CHGEO sera déployée dans un environnement de production. Elle contiendra la dernière version des jeux de données et sera exploitée par le gestionnaire thématique (DEIE). Elle sera connectée à l'application web de visualisation (WebGis) et aux interfaces connexes (QGIS, MS.Excel, etc.).

C.3. Modèle de données

C.3.1. Formalisme

Pour faciliter son exploitation et sa relation avec les référentiels, la BD_CHGEO adopte un formalisme strict où chaque élément est documenté. Les conventions de nommage sont identiques à ceux retrouvés dans la BD-SEVR et la BD-OMES, à savoir :

- Il n'est fait usage que des 26 lettres de l'alphabet, des dix chiffres et du caractère blanc-souligné (underscore) ;
- L'espace ou de caractères spéciaux ne sont jamais utilisés. Le caractère underscore est utilisé comme espace ;
- Tous les noms sont en minuscule et au singulier.

Les tables et les attributs sont tous préfixés/suffixés, en utilisant les conventions reprises dans le Tableau 8.

Tableau 8 – Formalisme de la BD-CHGEO

Préfixe	Exemple	Niveau	Explication
_factory	Chgeo_factory	Base de données	Factory designe une « fabrique » ou un bloc cohérent de données comme peut l'être une base de données

d_	d_ouvrage	Table	Ce préfixe est utilisé pour désigner une table (entité) de données. Ces tables contiennent les données de base et sont actualisées par les référentiels
v_	v_ouvrage	Table	Ce préfixe est utilisé pour désigner une vue de tables
vm_	vm_source	Table	Ce préfixe est utilisé pour désigner une vue matérialisée de tables
_id	omes_id	Attribut	Ce suffixe est utilisé pour désigner un identifiant, généralement défini comme une clé primaire
_pk	omes_pk	Attribut	Ce suffixe est utilisé pour désigner une contrainte de clé primaire
_fk	prov_reg_fk	Attribut	Ce suffixe est utilisé pour désigner une contrainte de clés étrangères
geom	geom	Attribut	Pour les tables spatiales, il s'agit de l'attribut contenant la géométrie

Chaque attribut thématique est préfixé par l'acronyme de la table auquel il se réfère. Dans la majorité des cas, l'acronyme est un trigramme. Toutefois ce n'est pas une règle stricte car l'essentiel est que le nom de l'attribut reste parlant.

Lorsqu'un attribut intervient dans une clé étrangère, son nom est composé de l'acronyme de la table à laquelle il appartient, de l'acronyme de la table référencée et du suffixe **_id**. Le Tableau 9 présente un exemple de ce formalisme.

Tableau 9 – Exemple de formalise de la BD-CHGEO

src_id	Identifiant et clé primaire de la table des sources
msrc_src_id	Clé étrangère liant la table des sources à la table des chroniques de débits mesurés pour différentes sources (les valeurs de msrc_src_id sont référencées dans l'attribut src_id de la table des sources)
msrc_debit	Mesure de débit mesuré à une date précis pour une source donnée

L'utilisation de ces règles permet de s'assurer que les noms de table, d'attributs et de contraintes sont uniques dans la base. Cela facilite les recherches et l'écriture de requêtes SQL. Les acronymes des tables pourront être utilisés comme abréviation dans les requêtes SQL. De plus, cela garantit l'interopérabilité avec les bases de données de référence.

C.3.2. Modèle et dictionnaire

L'ensemble des tables et des interactions physiques sont reprises dans le modèle physique de données présenté ci-dessous. Ce modèle fournit à l'administrateur de base de données une vue globale des données composant la base. Au niveau de la BD-CHGEO, seuls les gestionnaires thématiques du niveau central (DEIE-SHGEO / DEIE-SIEPRE) vont interagir directement avec la base de données, en s'y connectant au moyen de différents outils ou interfaces.

Pour les guider dans la compréhension du modèle, un **dictionnaire de données** est fourni et accompagne le diagramme de données. Le modèle de données et le dictionnaire complet sont présentés dans des documents annexés au présent rapport (cf. annexes 1 et 2).

Le code-source permettant la restauration de la base de données dans son état d'origine, c'est-à-dire sans les données, est fourni dans un document annexé au présent rapport (cf. annexe 3)

La Figure 29 donne une vue synoptique du modèle de données de la BD-CHGEO.

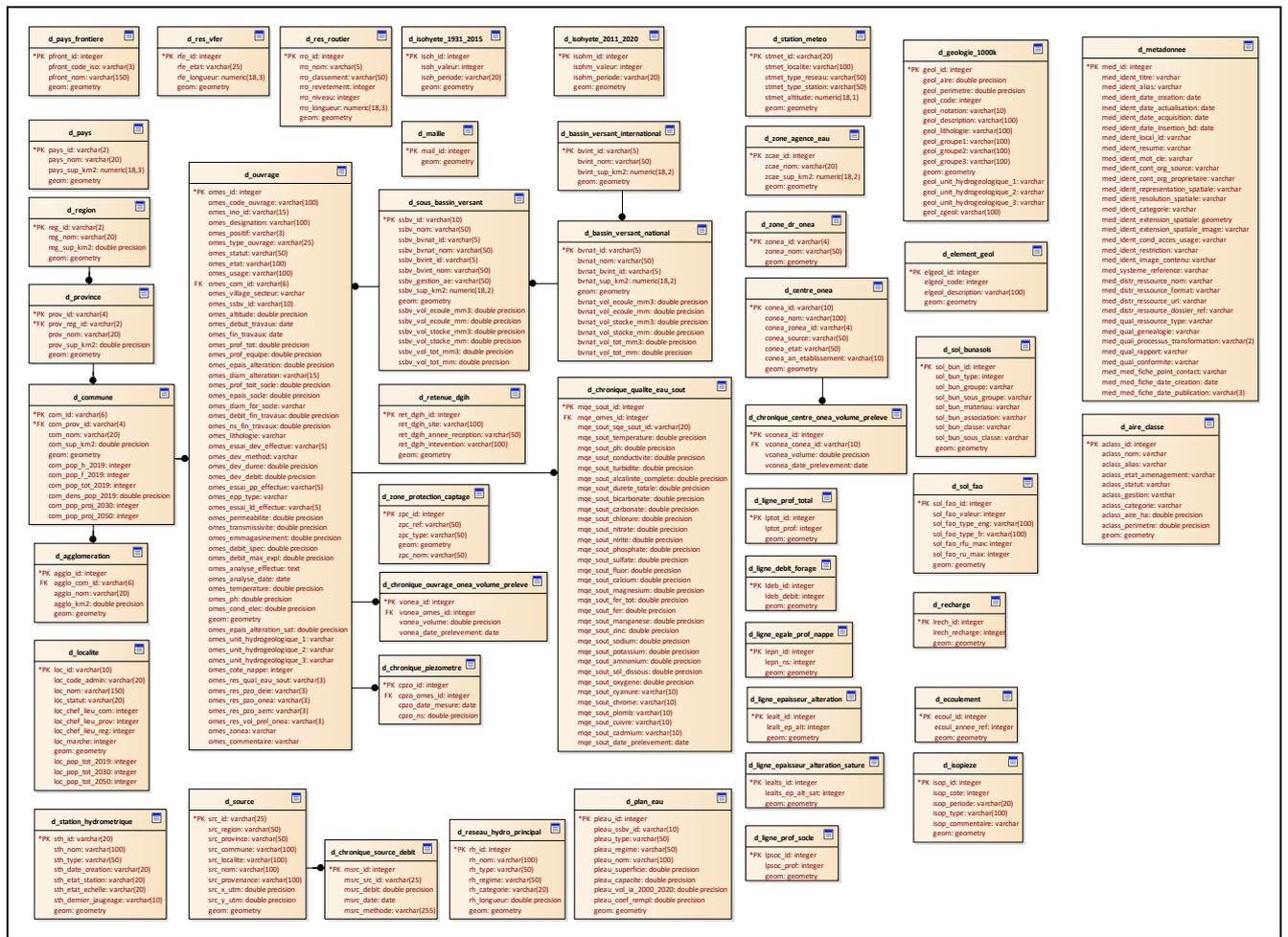


Figure 29 : BD-CHGEO – Vue synoptique du modèle physique

La Figure ci-dessous fournit une vue du dictionnaire de données documentant chaque entité de la BD-CHGEO.



Figure 30 : Illustration du dictionnaire de données

C.4. Environnement logiciel

La BD-CHGEO est implémentée au sein du système de Gestion de Base de Données (SGBD) PostgreSQL, étendu par l'extension spatiale PostGIS. Les raisons qui ont dictés ce choix sont les mêmes que celles rapportées pour la BD-SEVR et la BD-OMES : solution libre, fiable et stable, utilisée dans d'autres projets du DR3 et par la Direction des Services Informatiques du MEA (MEA-DSI) ce qui accentue l'interopérabilité et des facilités au niveau du transfert de données, gérant parfaitement la composante spatiale via PostGIS, etc.

Les versions suivantes peuvent être considérées :

- PostgreSQL : la version 10.14 ou suivant (11.69 ou 12.4) ;
- PostGIS : la version 2.4 ou suivant.

La Figure 31 illustre une vue du modèle de données CHGEO implémenté sous PostgreSQL depuis l'outil de gestion PgAdmin.

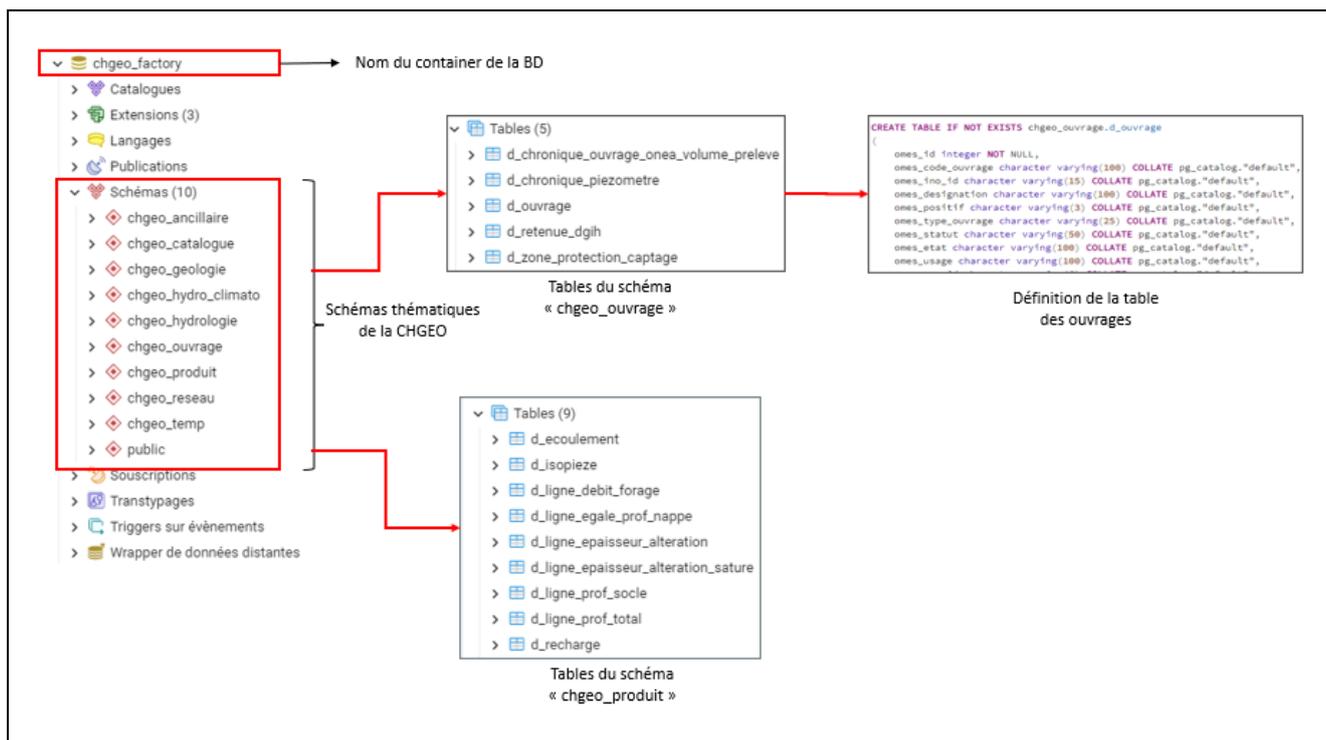


Figure 31 : Vue de la BD-CHGEO implémentée

Afin d'implémenter la BD-CHGEO au sein du SGBD PostgreSQL, il est nécessaire de procéder comme suit :

- Créer une nouvelle base de données

```
CREATE DATABASE chgeo_factory;
```

- Se connecter à cette nouvelle base de données et charger les extensions suivantes

```
--Extension PostGIS
CREATE EXTENSION postgis;
--Fonction de tables
CREATE EXTENSION tablefunc;
```

- Exécuter le code-source fourni en Annexe 4,

C.5. Alimentation de la BD-CHGEO

La méthodologie d'alimentation de la BD-CHGEO s'est basée sur le développement d'une passerelle de données entre les référentiels et la BD-CHGEO. Cette passerelle exploite l'outil ETL « Pentaho Data Integration⁴ » (PDI - aussi connu sous le nom de Kettle Spoon qui est en fait un des outils de la suite Pentaho). PDI est un ETL et permet donc i) l'extraction de données depuis divers sources (ici les référentiels BD-SEVR et BD-OMES ou les shapefiles issus des travaux d'interpolation), ii) la transformation des données (changement de modèle et opérations diverses) et iii) le chargement des données dans un entrepôt (ex. base de données destination – ici la BD-CHGEO). Le flux de données entre les BD-SEVR / BD-OMES et la BD-CHGEO est relativement simple étant donné que, dans la mesure du possible, les modèles de données sont restés similaires. La communication se réalise donc de base à base comme illustré à la Figure 32.

Le Tableau 10 reprend de manière synthétique les tables modélisées dans la BD-CHGEO.

⁴ Voir <https://www.hitachivantara.com/en-us/solutions/modernize-digital-core/data-modernization/data-integration.html>

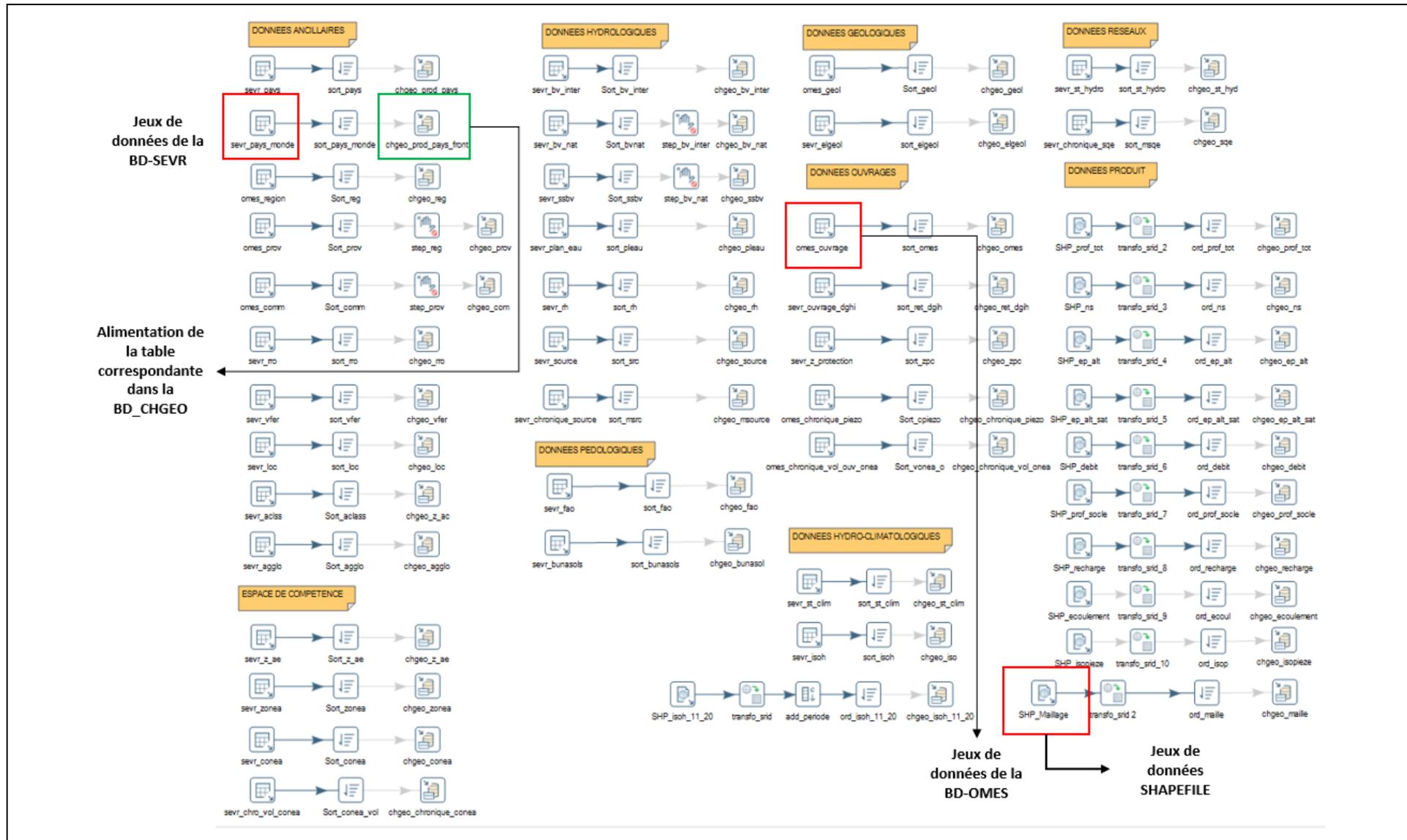


Figure 32 : Alimentation de la BD-CHGEO

Tableau 10 – Tables de la BD-CHGEO Vs Référentiels

Schéma BD-CHGEO	Table de la BD-CHGEO	Référentiel	Table du référentiel / Couche de données
Données ancillaires [chgeo_ancillaire]	d_pays	BD-SEVR	d_pays
	d_region		d_region
	d_province		d_province
	d_commune		d_commune + d_rgph
	d_pays_frontiere		d_pays_monde
	d_aire_classe		d_aire_classe
	d_res_routier		d_res_routier
	d_res_vfer		d_res_vfer
	d_agglomeration		d_agglomeration
	d_localite		d_localite + d_rgph
	d_maille	R.3.3	Grille de decoupage.shp
Données d'espaces de compétence [chgeo_esp_comp]	d_zone_agence_eau	BD-SEVR	d_zone_agence_eau
	d_zone_dr_onea		d_zone_dr_onea
	d_centre_onea		d_centre_onea
	d_chronique_centre_onea_volume_preleve		d_chronique_centre_onea_volume_preleve
Données Hydrologiques [chgeo_hydrologie]	d_bassin_versant_international	BD-SEVR	d_bassin_versant_international
	d_bassin_versant_national		d_bassin_versant_national
	d_sous_bassin_versant		d_sous_bassin_versant
	d_plan_eau		d_plan_eau
	d_reseau_hydro_principal		d_reseau_hydro_principal
	d_source		d_source
	d_chronique_source_debit	d_source_mesure	
Données Hydro-Climatologiques [chgeo_hydro_climato]	d_station_meteo	BD-SEVR	d_station_meteo_anam
	d_isohyete_1931_2015		d_isohyete
	d_isohyete_2011_2020	R.3.3	isohyetes_2011-2020.shp
Données géologiques [chgeo_geologie]	d_geologie_1000k	BD-SEVR	d_geologie_1000k
	d_element_geol		d_element_geol
Données pédologiques [chgeo_pedologie]	d_sol_fao	BD-SEVR	d_sol_fao
	d_sol_bunasols		d_sol_bunasols
Ouvrages [chgeo_ouvrage]	d_ouvrage	BD-OMES	v_ouvrage
	d_retenue_dgih	BD-SEVR	d_retenue_dgih
	d_zone_protection_captage	BD-SEVR	d_zone_protection_captage
	d_chronique_piezometre	BD-OMES	d_chronique_mesure_piezo
	d_chronique_ouvrage_onea_volume_preleve	BD-OMES	d_chronique_ouvrage_onea_volume_preleve
Réseaux [chgeo_reseau]	d_station_hydrometrique	BD-SEVR	d_station_hydrometrique
	d_chronique_qualite_eau_sout		d_mesure_qualite_eau_sout
Produits hydrogéologiques [chgeo_produit]	d_ligne_debit_forage	R.3.3	20220930_bkf_QfinFor_krig_filt.shp
	d_ligne_egale_prof_nappe		20221003_bkf_NS_krig_filt.shp
	d_ligne_epaisseur_alteration		20220930_bkf_EpAlt_krig_filt.shp
	d_ligne_epaisseur_alteration_sature		20221003_bkf_EpAltSat_krig_filt.shp
	d_ligne_prof_socle		20221003_Profondeur_Socle_SedimO_krig.shp
	d_ligne_prof_total		20220930_bkf_ProfTot_krig_filt.shp
	d_recharge		Rech_Thtwt_krig_bkf_1991-2020.shp
	d_ecoulement		20221112_bkf_SensEcou.shp
	d_isopieze		20221112_bkf_Isopieze.shp

C.6. Règles de gestion de la BD-CHGEO

D'une manière synthétique, les règles de gestion sont les éléments de description globale des traitements exécutés lors des opérations réalisées par la base de données. Au niveau de l'implémentation, c'est une contrainte qui s'applique aux données et qui garantit la cohérence de l'ensemble de la base. Les règles de gestion peuvent être portées par la base de données mais également par l'applicatif de gestion.

La BD-CHGEO implémente quelques contraintes sous forme de clé étrangère. Chacune de ces contraintes est donc une règle de gestion.

D'autres règles de gestion permettent de garantir la consistance des données. Les couches de données issues au sein de leur référentiel, les jeux de données de la BD-SEVR et BD-OMES sont déjà soumises à des contrôles qualité personnalisés et à des règles de gestion strictes (ex. respect des seuils de tolérance pour toutes les informations techniques quantitatives des ouvrages). La BD-CHGEO bénéficie donc de ces règles, qui ne seront pas documentées ici. Il est utile de se référer au dictionnaire de données de la BD-OMES afin d'avoir un aperçu des règles définies à ce niveau (SHER-ARTELIA, 2022.b).

Les règles de gestion propres à la BD-CHGEO sont définies dans le dictionnaire de données (cf. Annexe 2).

C.7. Contrôle qualité

Le contrôle de qualité de la BD-CHGEO est fortement réduit. En effet, les jeux de données passent par cette étape au sein de leur référentiel. Seules les valeurs présentes en attribut des produits hydrogéologiques ont été vérifiées afin de constater qu'elles étaient bien comprises dans leur seuil de tolérance.

Les profondeurs de socle négatives observées au sein de la couche [chgeo_produit.d_ligne_prof_socle] sont des artefacts d'interpolation. Ces valeurs sont conservées mais un filtre est appliqué dans les cartographies.

C.8. Mise à jour de la BD-CHGEO

Comme constaté ci-avant, la majorité des tables de la BD-CHGEO sont alimentées par les BD-SEVR et BD-OMES. La mise à jour de ces jeux de données dépend donc directement des événements se produisant au niveau de ces bases de données sources.

- Au niveau de la BD-OMES : à l'heure actuelle, il n'y a pas réellement de période de mise à jour fixée dans le temps, comme cela peut être le cas pour la BD-INO notamment. Comme indiqué au chapitre B.3.11, deux cycles de mises à jour ont eu lieu depuis la finalisation du R.3.1. Ces mises à jour visaient essentiellement à enrichir la BD-OMES de nouveaux ouvrages. Cet enrichissement se poursuivra en année 3 de l'Etude SEVERE (soit 2023). L'importance de la mise à jour dépendra du volume de nouveaux ouvrages à intégrer. De plus, un contrôle qualité périodique est à réaliser sur la BD-OMES, a priori 2 fois par an ou davantage si l'enrichissement est continu. Ce contrôle permet d'initier un flux de correction (cf. SHER-ARTELIA, 2022.b) dont bénéficiera la BD-CHGEO. En conclusion, la BD-CHGEO sera actualisée des données OMES à chaque fin de cycle de mise à jour de cette dernière. La mise à jour se réalisera par simple exécution du flux d'alimentation présenté en Figure 32.
- Au niveau de la BD-SEVR. Cette base de données est maintenue par le Groupement. Elle a été enrichie et actualisée lors des travaux du R.3.3. La vision à court terme, soit en année 3 de l'Etude SEVERE, vise à conserver un référentiel stable. Toutes données de référence identifiées par le Groupement et dont peuvent bénéficier d'autres Résultats de la SEVERE seront intégrées dans la BD-SEVR. De même, d'éventuelles reprises de données se réaliseront à ce niveau, comme cela a été le cas pour le travail réalisé au niveau des plans d'eau (cf. B.3.8). Ces mises à jour se réaliseront au cas par cas, sans période définie. Le processus de mise à jour des tables de la BD-CHGEO liée à la BD-SEVR est identique à celui suivi pour les tables liées à la BD-OMES, c'est-à-dire via l'exécution du flux de mise à jour déployé via Kettle.

La majorité des produits hydrogéologiques générés par le R.3.3 dépendent de données de la BD. Une mise à jour annuelle est suffisante. L'actualisation se réaliserait en fin de second semestre (début novembre), pour autant que la BD-OMES ai été mise à jour. Dans ce cas, il s'agira de reproduire les méthodes d'interpolation décrites au chapitre B.3.17, et ce afin de générer les couches spatiales sous format raster et vecteur. Les couches au format vecteur serviront de jeux de données de base pour actualiser la BD-CHGEO. Cette actualisation se réalisera via le flux de mise à jour Kettle.

Les produits dérivés ne dépendant pas de la BD-OMES (ex. la recharge des aquifères) seront actualisés à un pas de temps plus important (ex. tous les 5 ans), en fonction de la disponibilité des données et de leur poids dans la méthode d'interpolation.

Le maillage des cartes hydrogéologiques est une couche fixe. Une fois validé, il n'est pas supposé évoluer.

Les mises à jour s'exécuteront sous responsabilité du gestionnaire de bases de données au niveau de la DEIE (DEIE-SIEPRE). Ce gestionnaire sera en charge tant de la BD-OMES que de la BD-CHGEO. Bien que les flux ne soient pas définis, le gestionnaire de la DEIE gèrera probablement la BD-SNIEAU, qui est appelée à englober la BD-SEVR. Dès lors, il sera donc à même de déclencher le flux de mise à jour au moment opportun. Pour les produits hydrogéologiques dérivés, il devra attendre le signal des agents du Service d'Hydrogéologie (DEIE-SHGEO) qui lui fournira les jeux de données actualisés au pas de temps convenu. Ces mêmes agents devront disposer de la dernière version de la BD-OMES.

Globalement, le protocole de mise à jour pour l'ensemble de la BD-CHGEO peut être schématiser comme suit.

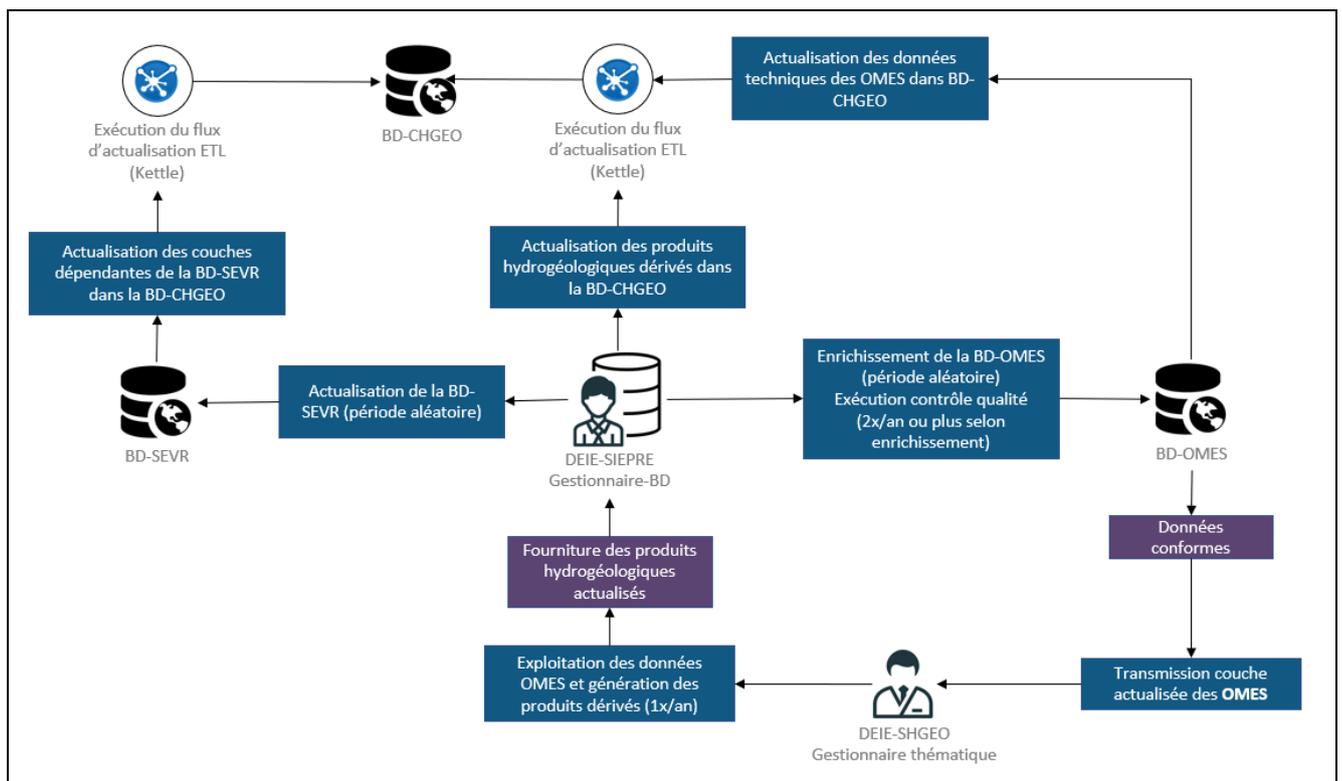


Figure 33 : Protocole de mise à jour de la BD-CHGEO

C.9. Perspectives et évolutions du modèle de la BD-CHGEO

La BD-CHGEO reprend les différentes informations attendues par le produit « carte hydrogéologique ». Elle constitue un socle solide pour générer des produits cartographiques à haute valeur ajoutée basés sur des données actualisées.

Le modèle de la BD-CHGEO est souple. Sa structure peu relationnelle tolérera sans problème l'ajout de nouvelles entités. Le contenu de la BD-CHGEO pourra donc être amplifié en fonction de besoins thématiques futurs. A priori, le modèle des entités déjà présentes dans la BD-CHGEO ne devra pas être adapté. A ce niveau, les actualisations prévues en Phase 2 constitueront à exécuter la passerelle de chargement de données illustrée par la Figure 32 .

PARTIE 3 – PRODUITS DE LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE

D. ACTUALISATION DE LA CARTE HYDROGÉOLOGIQUE PAPIER

A ce stade, les travaux menés ont permis de dégager :

- les structures des différentes cartes hydrogéologiques de référence ;
- les données à prendre en compte dans la production de la carte hydrogéologique actualisée ;
- une base de données relationnelle BD-CHGEO implémentée et alimentée en données de référence ou en produits d'interpolation.

Le Groupement possède donc tous les éléments lui permettant de produire la carte hydrogéologique du Burkina Faso. En plus de contenir des données actualisées, la carte proposera une nouvelle structure et reprendra davantage d'informations. Elle peut donc être assimilée à un nouveau produit.

D.1. Structure de la carte

Le nouveau jeu de cartes hydrogéologiques s'inspire des structures des 3 jeux de cartes analysés à la section [B.1- Analyse des cartes hydrogéologiques de référence – Cf. Page 14].

La structure proposée est reprise en Figure 34.

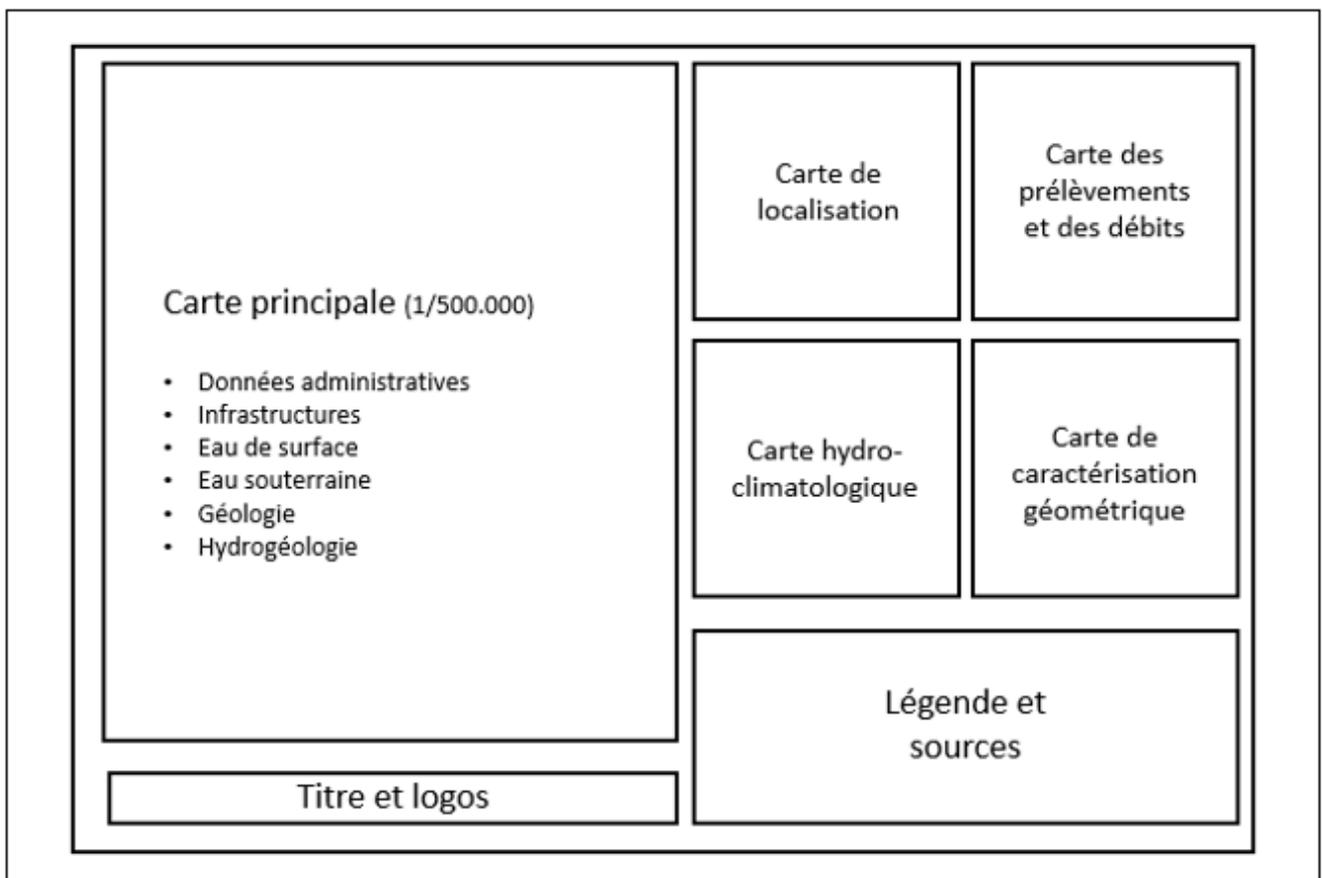


Figure 34 : Structure de la carte hydrogéologique actualisée

Cette carte se compose des espaces suivants :

- Une **carte principale** au 1/500.000 reprenant les informations sur i) les données administratives, ii) le réseau routier, iii) les infrastructures, iv) les eaux de surface et souterraines et v) la géologie et l'hydrogéologie.
- Une carte secondaire [**Carte de localisation**] au 1/1.250.000 localisant l'emprise de la maille de la carte principale au sein du territoire national ;
- Une carte secondaire [**Carte des prélèvements et débits**] au 1/1.250.000 reprenant les volumes d'eau prélevés (m³/an) au sein des Centres de production et des Forages de l'ONEA. Les sources catégorisées par débits sont également représentées. La couche raster en fond de plan est celle des débits en fin de foration (m³/h) produite par interpolation des données OMES ;
- Une carte secondaire [**Carte hydro-climatologique**] au 1/1.250.000 reprenant, en fond de plan, la couche raster de recharge produite par interpolation (cf. B.3.17- Les produits hydrogéologiques dérivés- p.48) et en superposition les isohyètes générées à partir des données FLDAS (2011-2020), les stations climatiques de l'ANAM et la délimitation des bassins versants.
- Une carte secondaire [**Carte de caractérisation géométrique**] au 1/1.250.000 reprenant en fond le raster des épaisseurs d'altération produit par interpolation des données OMES et, en superposition, le linéaire vectoriel des épaisseurs d'altération saturées (cf. B.3.17- Les produits hydrogéologiques dérivés- p.48) ainsi que les ouvrages de mobilisation des eaux souterraines catégorisés selon les profondeurs de forage.

D.2. Format et maillage

La carte hydrogéologique est établie au 1/500.000. Afin de couvrir l'ensemble du territoire national dans un format A0, cinq (05) mailles au format paysage sont nécessaires. La carte hydrogéologique se composera donc de cinq planches, numérotées de 1 à 5 et nommées sur base de la principale localité présente sur la planche concernée (Dédougou, Dori, Ouagadougou, Fada-Ngourma, Bobo-Dioulasso). Elle sera fournie sous format papier (5 cartes A0), et sous format *.PDF (5 fichiers A0 haute résolution).

Concernant l'emprise des planches, le Groupement a réalisé une première version du maillage en découpant le territoire de manière uniforme et avec chevauchement minimal, ce qui constitue une vision théorique de l'espace. Cette proposition présentait une large proportion d'espaces en dehors du Burkina Faso et donc non couverts par de l'information. Une deuxième version, constituée d'un minimum de chevauchements entre planches, a permis de réduire ces espaces et constitue la proposition retenue.

Le maillage théorique est illustré en Figure 35 et le maillage optimisé en Figure 36.

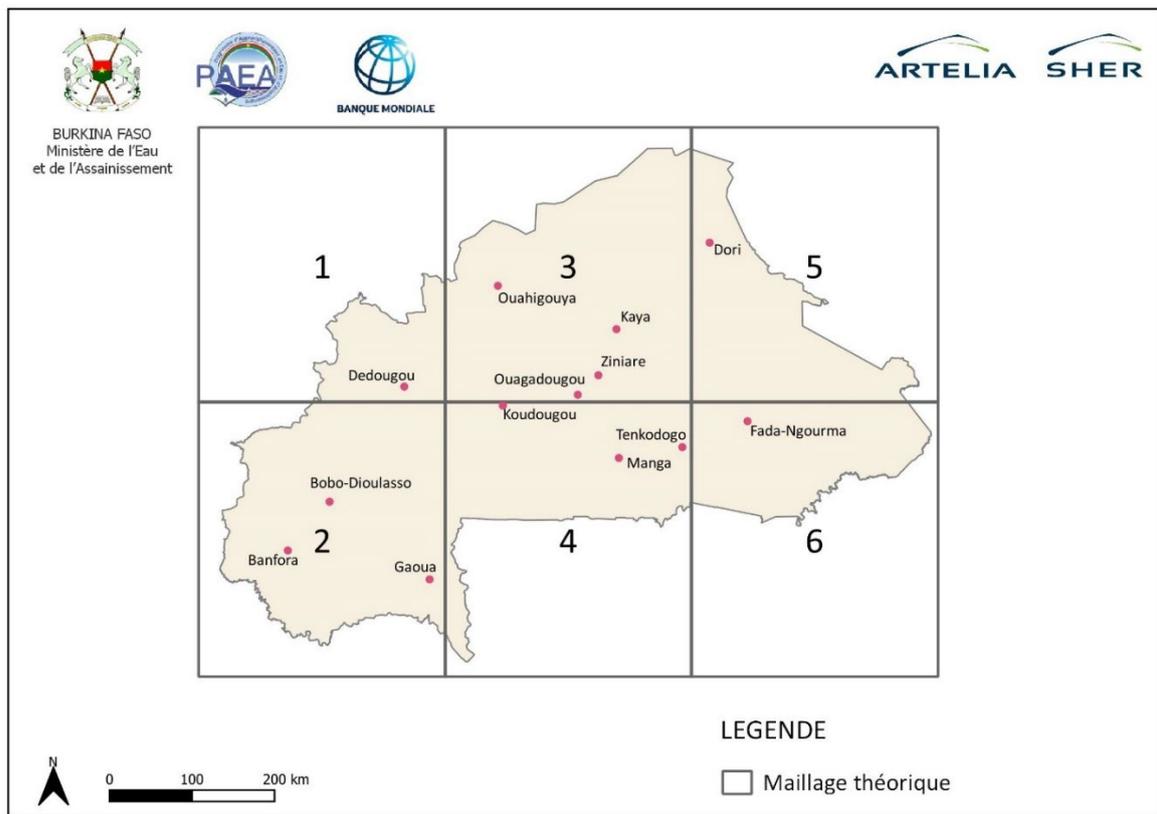


Figure 35 : Maillage théorique de la carte hydrogéologique

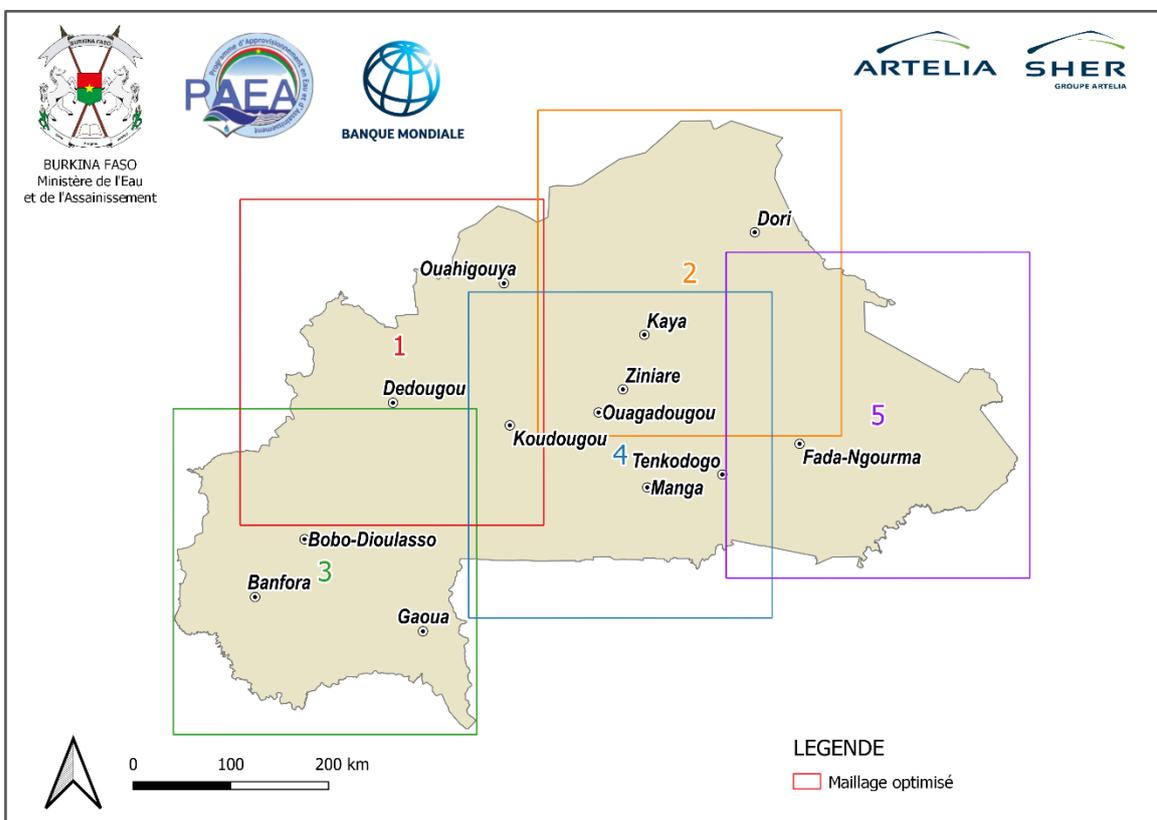


Figure 36 : Maillage optimisé de la carte hydrogéologique

D.3. Contenu de la carte

Les informations contenues dans chacun des espaces ont été déterminées sur base du comparatif des cartes hydrogéologiques de référence et de la disponibilité des données dans la BD-CHGEO.

Le *Tableau 11* liste les jeux de données retenus et leur lien avec la BD-CHGEO. Une image satellite générique, en l'occurrence BingMap, est utilisé comme fond de plan de la carte principale pour les zones en dehors du Burkina Faso.

Tableau 11 – Couches de la BD-CHGEO exploitée sur la carte

Carte	Catégorie	Information	Couche CHGEO
Principale	Administratif	Chefs-lieux de région	Filtre sur chgeo_ancillaire.d_localite
		Chefs-lieux de province	Filtre sur chgeo_ancillaire.d_localite
		Localités	chgeo_ancillaire.d_localite
		Frontière nationale	chgeo_ancillaire.d_pays
		Limites régionales	chgeo_ancillaire.d_region
		Limites provinciales	chgeo_ancillaire.d_province
		Limites communales	chgeo_ancillaire.d_commune
	Infrastructure	Réseau routier	chgeo_ancillaire.d_res_routier
	Eau de surface	Cours d'eau principaux et secondaires	chgeo_hydrologie.d_reseau_hydro_principal
		Principaux lacs et barrages	Filtre sur chgeo_hydrologie.d_plan_eau
		Barrages secondaires	Filtre sur chgeo_hydrologie.d_plan_eau
		Stations hydrométriques	chgeo_reseau.d_station_hydrometrique
	Eau souterraine	Lignes d'égale profondeur de la nappe	chgeo_produit.d_ligne_egale_prof_nappe
		Forages classés selon l'usage	chgeo_ouvrage.d_ouvrage
		Champs de captages (ONEA)	chgeo_ancillaire.vm_centre_onea
		Piézomètres classés selon l'exploitant	chgeo_ouvrage.vm_piezometre
		Sources	chgeo_hydrologie.vm_source
		Zone de protection	chgeo_ouvrage.d_zone_protection_captage
	Géologie – Hydrogéologie	Limites géologiques	chgeo_geologie.d_geologie_1000k
		Unités hydrogéologiques	Groupements à partir de chgeo_geologie.d_geologie_1000k
		Éléments géologique remarquables	chgeo_geologie.d_element_geol

Carte secondaire #1 [Carte de localisation]	Administratif	Pays frontalier	chgeo_ancillaire.d_pays_frontiere
	Administratif	Limites régionales	chgeo_ancillaire.d_region
	Administratif	Chefs-lieux de région	Filtre sur chgeo_ancillaire.d_localite
	Infrastructure	Réseau routier national	chgeo_ancillaire.d_res_routier
Carte secondaire #2 [Carte des prélèvements et débits]	Eau souterraine	Prélèvements des centre ONEA	chgeo_ancillaire.vm_centre_onea
		Prélèvements des ouvrages ONEA	chgeo_ouvrage.vm_ouvrage_onea_volume
		Débit des sources	chgeo_hydrologie.vm_source
		Débit en fin de forage	Raster se trouvant dans l'entrepôt de données
Carte secondaire #3 [Carte hydro-climatologique]	Hydro-Climatologie	Stations climatiques de l'ANAM classées selon le type de station	chgeo_hydro_climato.d_station_meteo
		Isohyètes 2011-2020	chgeo_hydro_climato.d_isohyete_2011_2020
		Bassins versants nationaux	chgeo_hydrologie.d_bassin_versant_national
		Sous-bassins versants	chgeo_hydrologie.d_sous_bassin_versant
	Eau souterraine	Recharge	Raster se trouvant dans l'entrepôt de données
Carte secondaire #4 [Carte de caractérisation géométrique]	Eau souterraine	Epaisseur d'altération	Raster se trouvant dans l'entrepôt de données
		Epaisseur d'altération saturée	chgeo_produit.d_ligne_epaisseur_alteration_sature
		Profondeur des forages	chgeo_ouvrage.d_ouvrage

D.4. Prototype de la carte

La carte hydrogéologique a été réalisée via le logiciel-SIG QGIS. Les fonctionnalités d'Atlas ont été utilisées afin de générer les planches automatiquement suivant le maillage établi. De ce fait, les planches sont harmonisées tant au niveau de la représentation des couches que de la légende.

Les figures ci-après illustrent quelques éléments du prototype. Le jeu de planches complet est annexé au présent rapport (cf. Annexe 4), et est également fourni sous format *.PDF haute résolution.

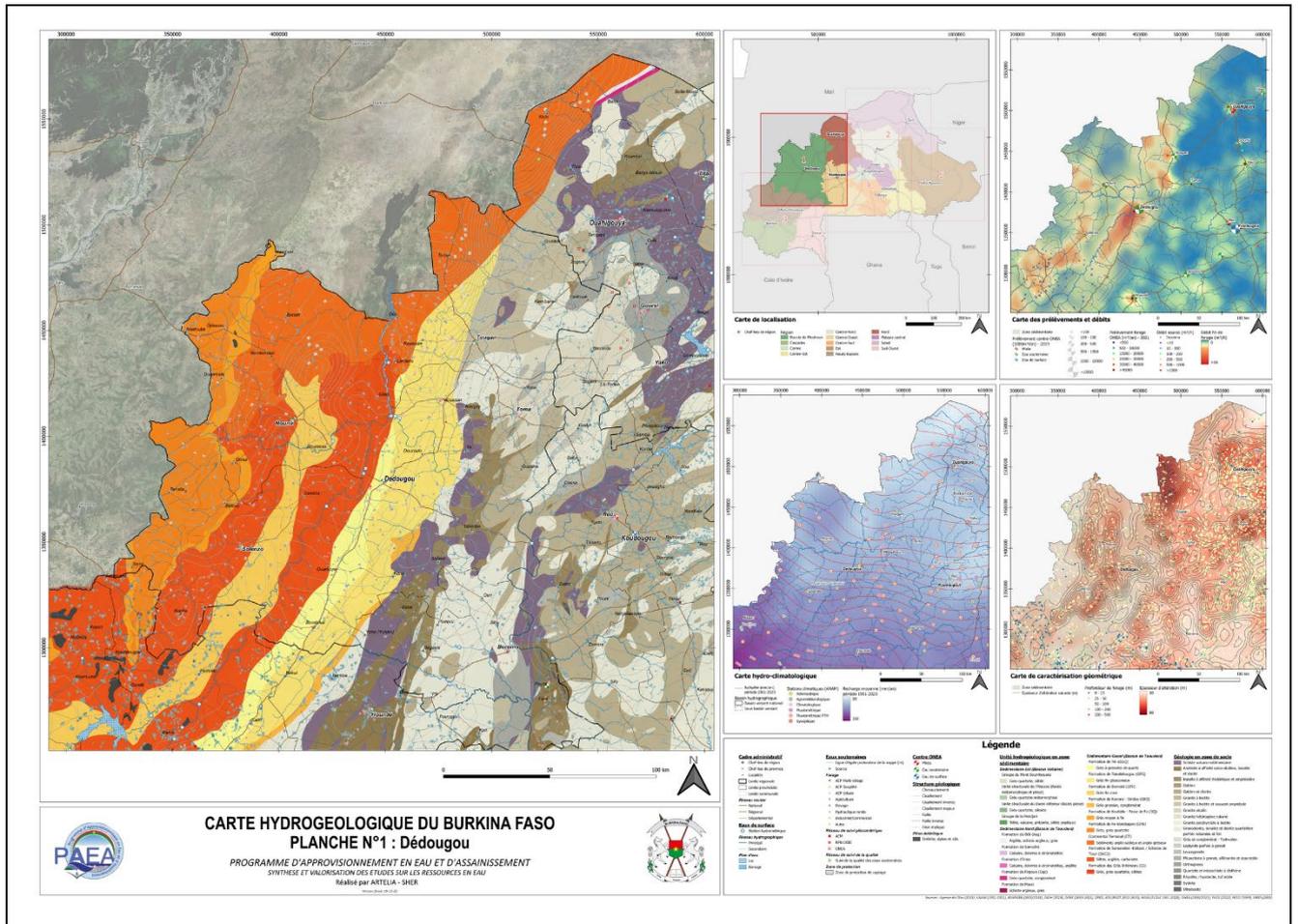


Figure 37 : Vue synoptique de la planche #1 de la carte hydrogéologique

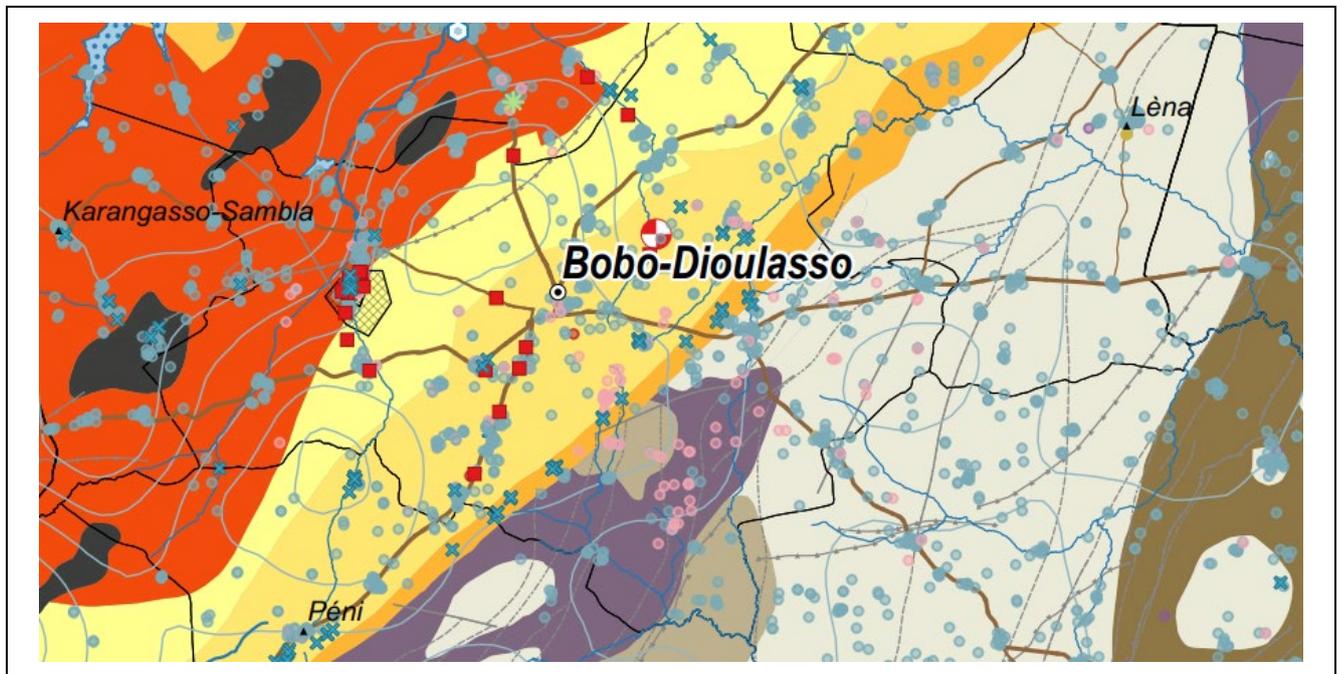


Figure 38 : Vue à l'échelle du contexte hydrogéologique de la région de Bobo-Dioulasso

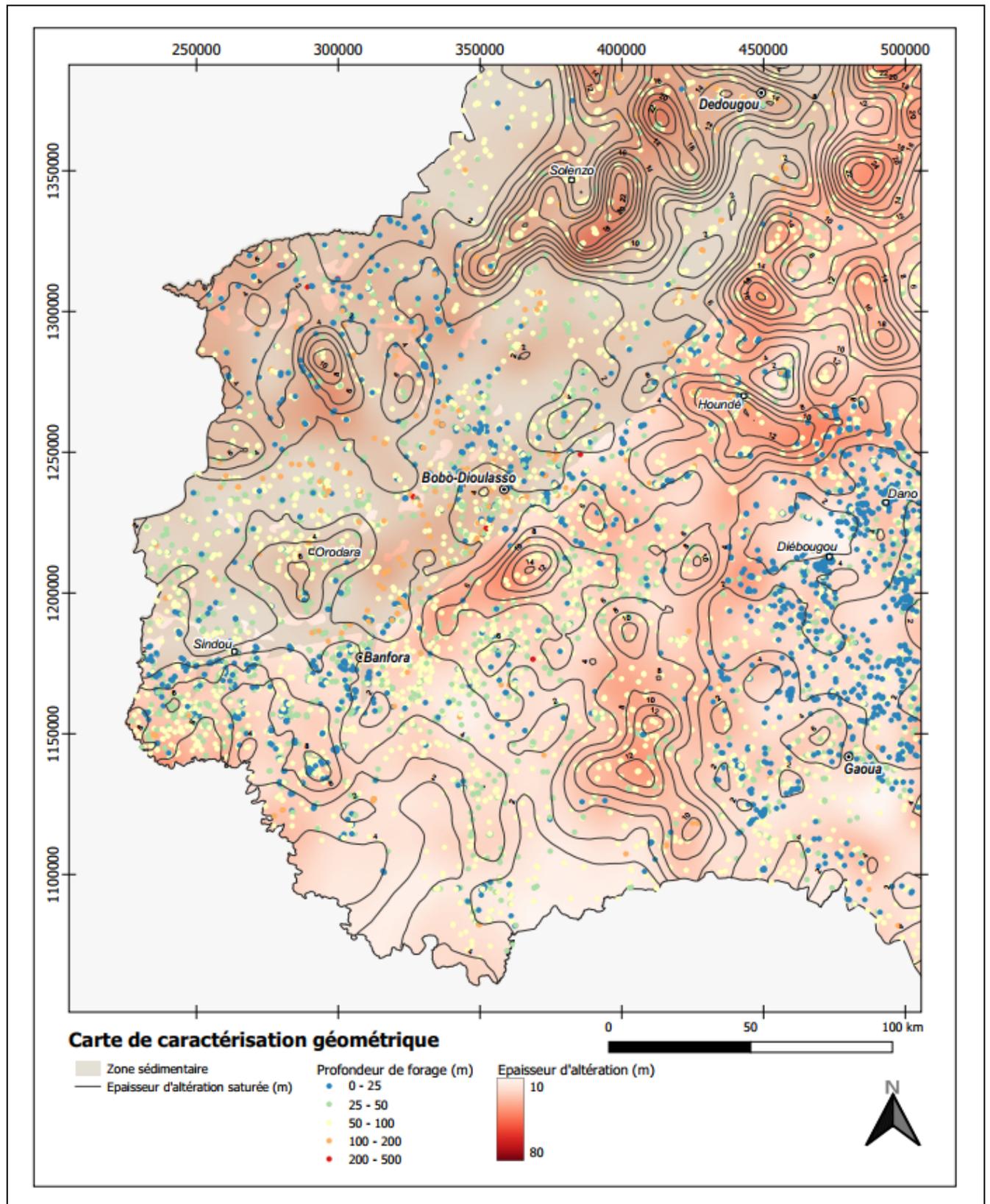


Figure 39 : Carte secondaire de caractérisation géométrique



Figure 40 : Légende associée à la carte hydrogéologique principale

D.5. Prototype de notice explicative

Chaque planche fera l'objet d'une notice explicative au format papier et numérique. A ce stade, un canevas est proposé en guise de prototype. Il comporte la table des matières et se veut attractif au niveau de la mise en page.

Les principales sections de la notice explicative sont les suivantes :

- Introduction
- Objectif de la carte hydrogéologique

- c. *Approche méthodologique*
- d. *Délimitation de la zone couverte par la planche*
- e. *Cadre administratif et de gestion*
- f. *Climat et paramètres hydro-climatiques*
- g. *Topographie et géomorphologie*
- h. *Hydrographie et bassins versants*
- i. *Types de sols*
- j. *Occupation du sol*
- k. *Contexte géologique*
- l. *Contexte et caractérisation hydrogéologique*
- m. *Inventaire et caractérisation des sources*
- n. *Suivi quantitatif des eaux souterraines*
- o. *Hydrochimie et qualité des eaux souterraines*
- p. *Evaluation de la recharge des aquifères*
- q. *Exploitation des eaux souterraines*
- r. *Conclusions*
- s. *Description du webgis et des services web associés à la carte hydrogéologique*

Le prototype de notice explicative est annexé au présent rapport (cf. Annexe 5).

La Figure 41 illustre la page de couverture de la notice explicative.

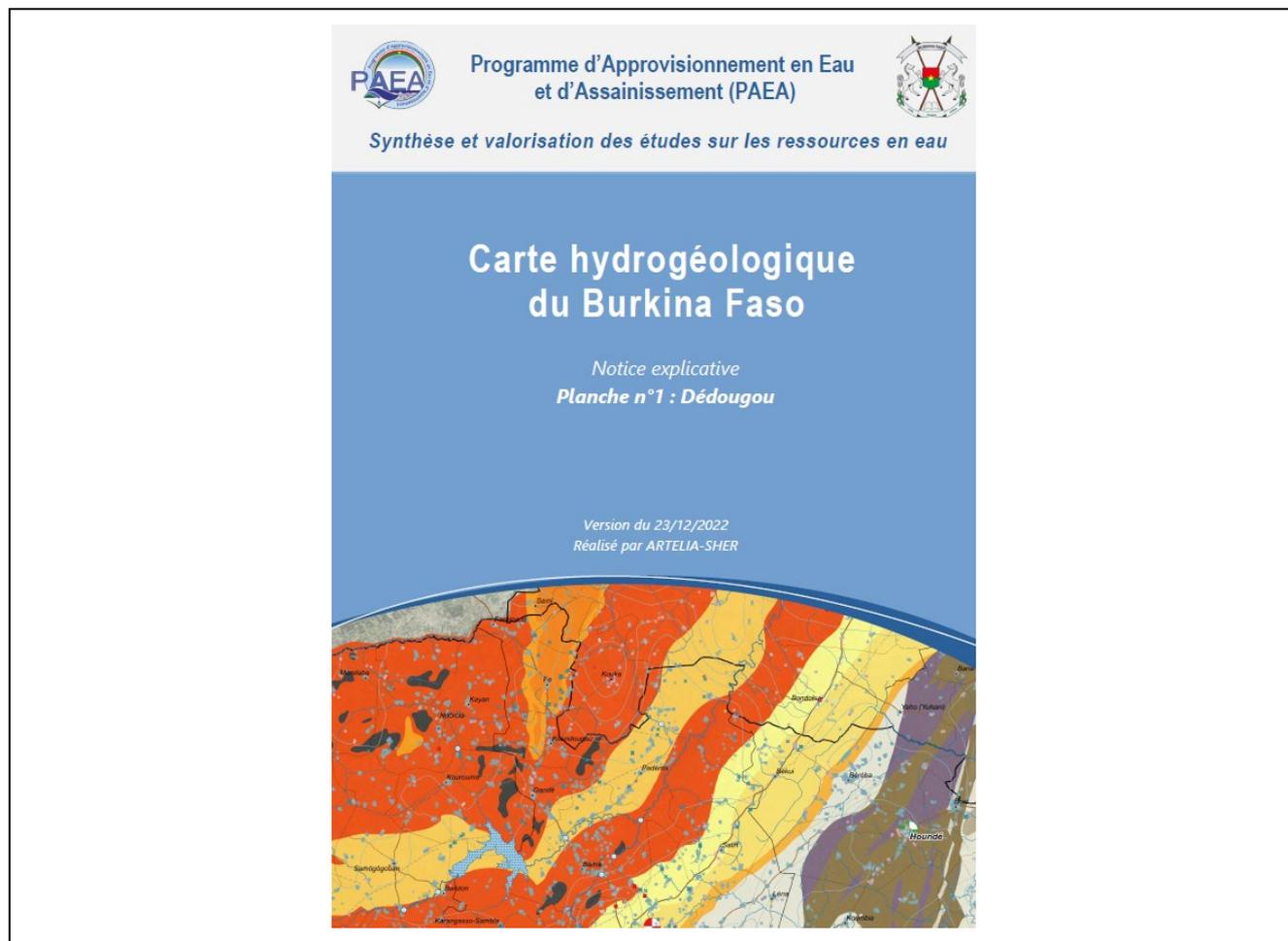


Figure 41 : Page de couverture de la notice explicative

E. PROPOSITION D'UN APPLICATIF INTERACTIF

Les travaux d'actualisation de la carte hydrogéologique constituent l'occasion d'élargir son spectre de diffusion. Dès lors, en marge de la production de la version papier, le Groupement a mené des développements permettant de visualiser les données d'intérêt au travers d'une application interactive de type WebGIS. Ce type de solution est encore relativement peu répandu dans un domaine dédié principalement aux spécialistes de la matière. L'approche peut même être qualifiée de particulièrement novatrice, en ce sens qu'aucun pays du continent africain ne dispose, à ce jour, d'un applicatif de consultation de carte hydrogéologique à l'échelle nationale. La vulgarisation de l'information combinée à un accès plus immédiat via des solutions modernes contribueront vraisemblablement à accroître le nombre d'utilisateurs potentiels et partant, institueront la carte hydrogéologique comme un véritable outil d'aide à la décision et de communication sur le sujet.

Le Groupement a réalisé le prototype en gardant à l'esprit que ce type d'infrastructure trouve sa place dans les développements du SNIEAU. De même que la BD-SEVR pourra, à terme, être englobée par la BD-SNIEAU, des applications thématiques isolées comme celle proposée ici devra trouver sa place dans le catalogue qui sera mis en place par le SNIEAU.

Le Groupement a réalisé les développements par phases successives comprenant :

- (1) une analyse comparative de différentes solutions WebGIS disponibles sur le marché ;
- (2) le choix de la solution à implémenter ;
- (3) le développement de l'application : paramétrage de la solution et enrichissement par les couches thématiques.

Enfin, il faut rappeler que ce produit ne fait pas partie des TDR du marché de l'étude SEVERE.

E.1. Le cloud comme option privilégiée

Le développement d'une application web personnalisée est un long processus qui requiert l'implication des acteurs thématiques et des professionnels IT. Il intègre une étude et une validation des besoins, une planification et un délai de développement, une stratégie de mise en production échelonnée en différentes étapes (test, production, diffusion), etc. Cette mise en place est apparue trop conséquente pour les besoins de l'applicatif de la carte hydrogéologique.

Par conséquent, le Groupement s'est rapidement tourné vers de solutions de type « cloud SIG », c'est-à-dire des infrastructures spatiales entièrement en ligne. Cette option est réaliste étant donné que le volume de données de la BD-CHGEO n'est pas des plus volumineux et qu'il n'y aurait qu'une carte à servir.

D'une manière générale, les services Cloud se décomposent en trois catégories : i) les Infrastructures comme Service (IaaS) qui offrent des environnements virtualisés (ex. OVH), ii) les plateformes comme Service (PaaS) qui fournissent les outils nécessaires pour développer et créer des applications sur Internet (ex. ArcGIS Server) et iii) les Software comme Service (SaaS) qui fournissent des applications complètes et personnalisables à travers Internet. Dans ce cas, c'est le fournisseur de serveur qui se charge d'installer, configurer et maintenir l'interface. Dans le cas de la carte hydrogéologique, le Groupement a investigué des solutions SaaS gérant la composante spatiale, ce qui les fait évoluer vers des solutions « GIS comme Service » (GaaS).

La solution cloud peut s'avérer être une alternative intéressante par rapport à une infrastructure complète client-serveur, et ce pour les raisons suivantes :

- Elle nécessite moins de ressources matérielles : plus besoin de serveur ou d'hébergeur dédié ;
- Elle nécessite moins de compétences techniques : l'administrateur utilise une plateforme clé-en-main. Il est guidé pour l'administration, la publication et le partage de ses données ;
- Elle est beaucoup plus rapide à mettre en place ;

- Elle nécessite moins de développement informatique : la plateforme propose d'ordinaire une série d'outils pour construire des applications cartographiques permettant la plupart des fonctionnalités attendues d'une solution cartographique sur Internet, Néanmoins, les développeurs peuvent dans certains cas aller plus loin et introduire plus de personnalisation à l'outil ;
- Le coût global est moindre qu'un développement conduisant à une plateforme personnalisée devant être maintenue.

En contrepartie, le client doit accepter la décentralisation de ses données, qui seront stockées dans une base de données mise en place par le fournisseur. Dans certains cas, le gestionnaire n'a pas la main sur la base de données, ce qui ne lui permet plus d'assurer des tâches d'administration sur ces données ou de s'y connecter via un logiciel-SIG. De plus, ces solutions sont payantes d'entrée. Le prix varie en fonction du nombre du nombre d'utilisateurs, du caractère privé ou public des données, du volume de données stocké, etc. Les applications sont moins personnalisables.

E.2. Analyse comparative des solutions WebGIS

Les besoins en fonctionnalités sont très communs. Il s'agit d'afficher les données de la BD-CHGEO en y affectant une symbologie personnalisée. Les couches doivent être interrogeables via un outil de recherche et il doit être possible d'obtenir des informations complémentaires sur chaque entité. L'interface doit être ergonomique et simple d'utilisation, même si ce critère n'est pas prioritaire. Enfin, il faut pouvoir afficher et éteindre des couches et savoir en permanence quels sont les jeux de données affichés à l'écran.

Le Groupement a entrepris une analyse comparative de solutions présentes sur le marché. En plus des fonctionnalités à couvrir, d'autres critères entrent en ligne, à savoir :

- L'interopérabilité avec QGIS ;
- La possibilité d'avoir accès à la BD-CHGEO et de s'y connecter via des clients (QGIS, pgAdmin, etc.).
- Le coût de la solution ;
- La facilité de prise d'abonnement ;
- La facilité d'actualisation des couches de données ;
- La qualité du support.

Les solutions suivantes ont été comparées

- **ArcGIS Online**⁵ : AGOL est le système de gestion de contenus collaboratif d'ESRI basé sur le cloud, pour des cartes, applications, données et autres informations géographiques. Il s'agit évidemment d'une solution propriétaire axée sur les produits ArcGIS. Il est nécessaire de disposer d'un compte chez ESRI. L'application fonctionne suivant des crédits de service, ce qui rend la facturation relativement opaque. Chaque opération consomme du crédit. Il s'agit d'une plateforme proposant un grand nombre de fonctionnalités. Elle est liée au SIG bureautique ESRI. Cette solution n'est pas retenue par le Groupement qui souhaite une plateforme plus interopérable avec QGIS et l'environnement PostgreSQL/PostGIS. De plus, le plan de tarification doit être clair
- **Carto**⁶ : Il s'agit d'une plateforme libre, puissante et intuitive. La solution payante à deux systèmes d'abonnement (individuel et entreprise). Le compte individuel est disponible à +/- 200 EUR/mois et permet à un utilisateur de réaliser des cartes privées en d'en publier 10 de manière publique. L'utilisateur a droit à 2 Gb de stockage, ce qui est confortable. Il est possible de réaliser des analyses géospatiales sans réellement

⁵ <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-online/overview>

⁶ <https://carto.com/>

être expert du domaine. La solution se compose d'un constructeur de couche [Carto Builder] permettant de créer des cartes interactives afin un certain degré de personnalisation. Il faut enfin noter que la gestion des bases de données de Carto repose sur PostgreSQL/PostGIS. L'administrateur contrôle ses données via l'interface d'administration de Carto, ce qui est limitatif.

- **GIS Cloud**⁷ : il s'agit d'une application qui permet de stocker, gérer et accéder à des données spatiales pour ensuite créer et partager des cartes. La mise en page des cartes se réalise via l'outil [Map Editor]. Ce dernier permet à n'importe quel utilisateur d'analyser, éditer et visualiser ses données de manière ergonomique. Comme Carto, la solution travaille avec des bases de données PostgreSQL/PostGIS. Parmi les fonctions prises en compte, il faut souligner l'ajout d'informations propres ou tierces, la gestion des styles, la possibilité de réaliser des requêtes spatiales et le partage de cartes. Enfin, GIS Cloud a créé un utilitaire pour QGIS dénommé « GIS Cloud Publisher For QGIS⁸ », qui permet de publier des cartes réalisées dans QGIS directement sur le web. GIS Cloud propose 3 types d'abonnement mais seul celui intitulé « Map Editor » convient au projet. Il est accessible à partir de +/-80 EUR/mois et par utilisateur. Il offre un stockage de 200.000 enregistrements spatiaux et 1 Gb alloués à d'autres éléments (supposés être des rasters). Un essai gratuit est proposé.
- **QGIS Cloud**⁹ : il s'agit d'une solution totalement synchronisée avec QGIS. Ce n'est pas réellement un service GaaS comme peuvent l'être les solutions citées précédemment. En effet, il s'agit d'abord d'un utilitaire qui s'installe au niveau de QGIS et qui offre la possibilité de publier une carte réalisée dans QGIS directement sur le web. De ce fait, le gestionnaire thématique ne quitte pas vraiment son environnement bureautique pour migrer sur une autre plateforme. Il prépare son projet QGIS et habille les couches de données comme s'il y réalisait une cartographie courante et active ensuite le plugin. Ce plugin offre toute l'interaction avec le serveur. L'utilisateur doit bénéficier d'un compte sur la plateforme QGIS Cloud mais l'enregistrement est gratuit et implique un usage non commercial. Une fois connecté, il est possible de publier la carte. Les jeux de données qui constituent la carte sont transférés dans une base de données PostgreSQL/PostGIS déployée du côté du fournisseur de service. Ce dernier donne l'accès en SSL à cette base de données, ce qui signifie que l'administrateur de la BD-CHGEO peut s'y connecter via des clients distants (QGIS mais également pgAdmin pour les tâches d'administration). Les cartes publiées se gèrent via la plateforme web de QGIS Cloud. Chaque carte est associée à un [Viewer] global qui peut être légèrement personnalisé (logo, console CSS). La carte elle-même peut être adaptée et il est possible de réaliser des requêtes SQL prédéterminées. QGIS Cloud est un véritable Freemium. C'est-à-dire que la version d'entrée est gratuite. Le deuxième plan « QGIS Cloud Pro » est payant pour 65 EUR/mois. Les prix n'ont pas varié depuis 5 ans. Il offre 10 BD PostgreSQL/PostGIS, avec un stockage associé de 500 Mb, des sauvegardes journalières, la connexion SSL et les options de personnalisation. L'interface est moins conviviale que dans les solutions Carto ou AGOL mais remplit bien ses fonctions. Les temps de réaction sont très bons. La solution QGIS Cloud permet également de générer des Web Map Services (WMS) et Web File Services (WFS).

Le Tableau 12 reprend une vue globale de l'analyse comparative, en écartant AGOL des solutions retenues.

⁷ <https://www.giscloud.com/>

⁸ <https://www.giscloud.com/apps/gis-cloud-publisher-for-qgis/>

⁹ <https://qgiscloud.com/>

Tableau 12 – Analyse de solutions WebGIS Cloud

	Carto	GIS Cloud	QGIS Cloud Pro
Prix	200 EUR/mois	80 EUR/mois	65 EUR/mois
SGBD	PostgreSQL/PostGIS	PostgreSQL/PostGIS	PostgreSQL/PostGIS
Accès BD distant (support SSL)	Non	Non	Oui
Espace de stockage	2 Go	200.000 éléments + 1 Gb (médias, documents, etc.)	500 Mb et 10 bases de données
Espace de création de carte et d'édition de données	Privé	Privé	Privé
Convivialité des interfaces	+++	++	+
Nombre de cartes publiques	10	?	Illimité
Personnalisation des interfaces	+++	?	+
Interopérabilité avec QGIS	Non	Oui	Oui
Possibilité d'un compte gratuit	Non	Non	Oui

Après analyse, le Groupement s'est orienté vers la solution QGIS Cloud Pro pour le développement de la carte hydrogéologique interactive. Il a souscrit à l'abonnement de 65 EUR/mois afin de pouvoir déployer le prototype sans les quelques restrictions appliquées au compte gratuit et bénéficier des fonctionnalités de personnalisation. QGIS Cloud Pro est développé par la société suisse SOURCEPOLE¹⁰ qui est, par expérience du Groupement, réactive au niveau de son support.

La figure suivante présente un schéma de l'architecture de QGIS Cloud.

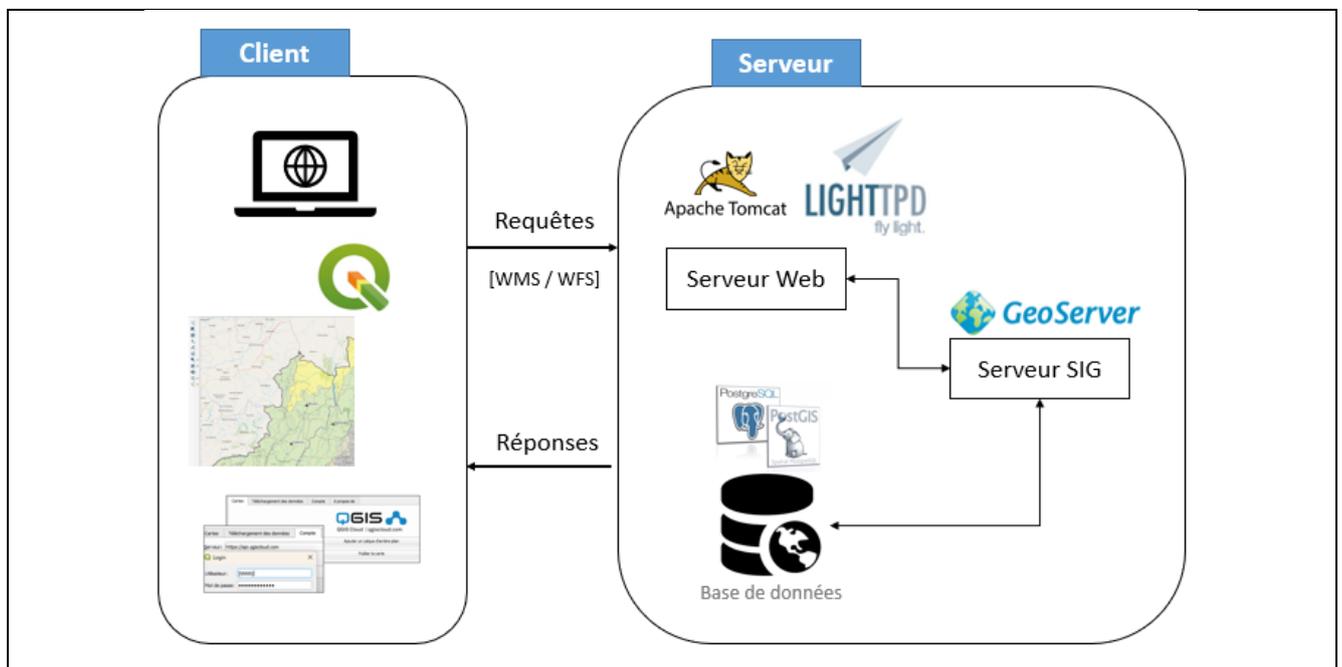


Figure 42 : Architecture de QGIS Cloud

¹⁰ Voir <https://sourcepole.ch/en/home/>

E.3. Mise en place de l'application

Le Groupement a réalisé un projet QGIS et, via l'utilitaire, l'a publié au travers d'une carte. Des développements ont été réalisés au niveau de l'interface cartographique et de la carte en elle-même.

Lorsqu'une carte est publiée via QGIS Cloud, les données sont automatiquement transférées dans le schéma « public » une base de données PostgreSQL/PostGIS stockée par le fournisseur de service. De plus, tous les liens du projet QGIS de réalisation de la carte sont adaptés pour faire appel aux couches de cette base de données. Des connexions directes vers la base de données sont ajoutées au projet. Le gestionnaire peut s'y connecter et administrer les tables y compris celles non contenues dans le projet de départ. Le flux de travail du gestionnaire de la BD-CHGEO (qui sera soit un hydrogéologue spécialiste de la matière, soit un expert SIG) est présenté à la Figure 43.

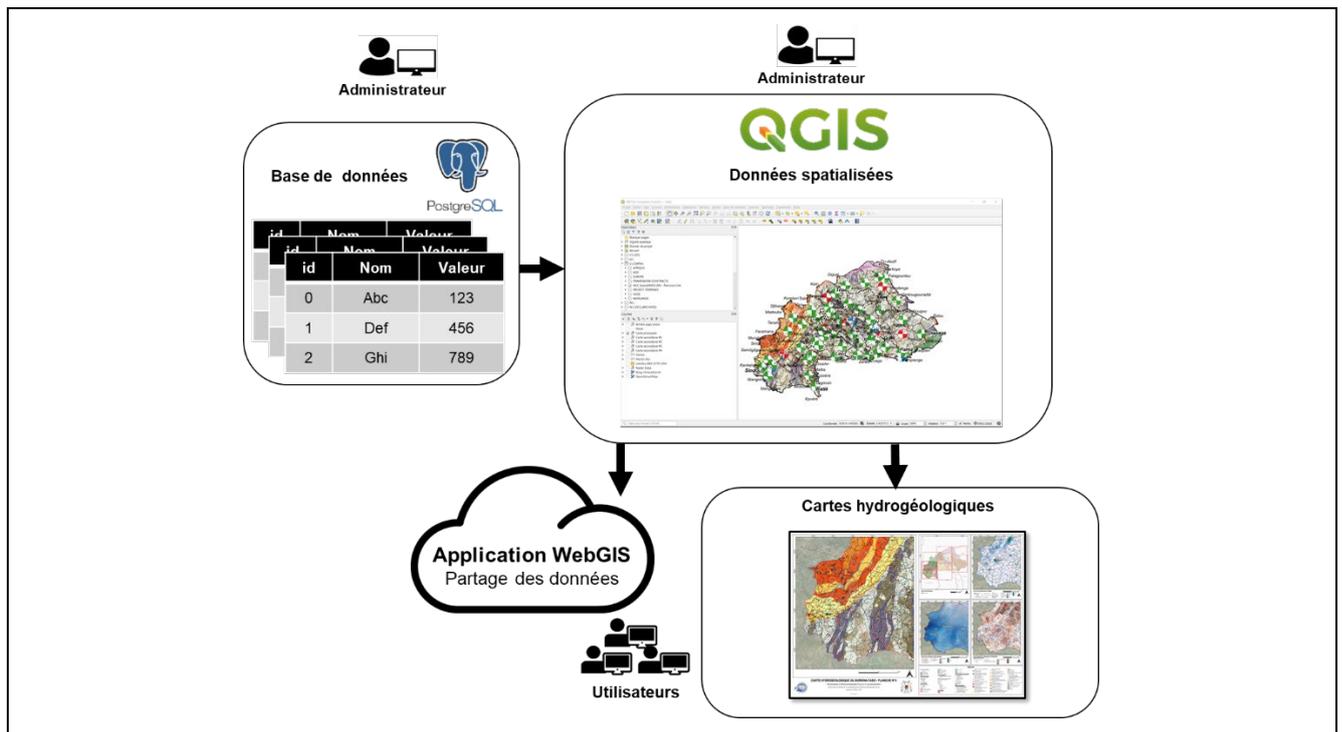


Figure 43 : Flux de travail du gestionnaire de la BD-CHGEO

La connexion à la BD-CHGEO stockée au niveau du serveur QGIS Cloud est illustrée par la figure ci-dessous.

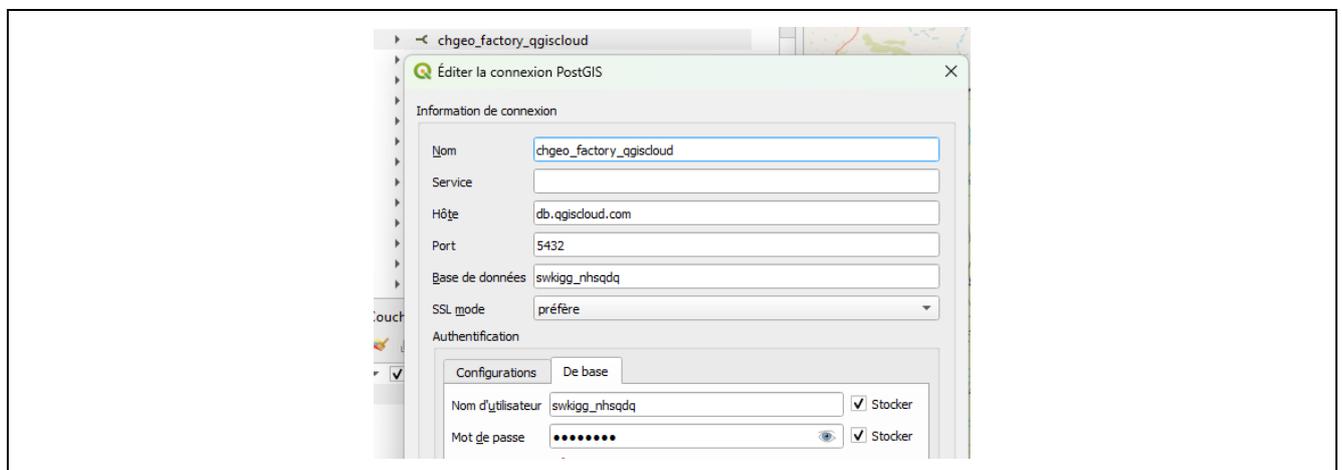


Figure 44 : Connexion BD-CHGEO automatiquement ajoutée par QGIS Cloud

La plateforme de gestion des cartes propose la liste des cartes publiées. L'administrateur accède à la carte directement hébergée dans l'infrastructure QGIS Cloud. Dans le cas de la carte hydrogéologique, l'URL octroyée par QGIS Cloud est la suivante.

https://qgiscloud.com/tredys/WebGIS_chgeo

La Figure 45 présente une vue synoptique de l'application WebGIS

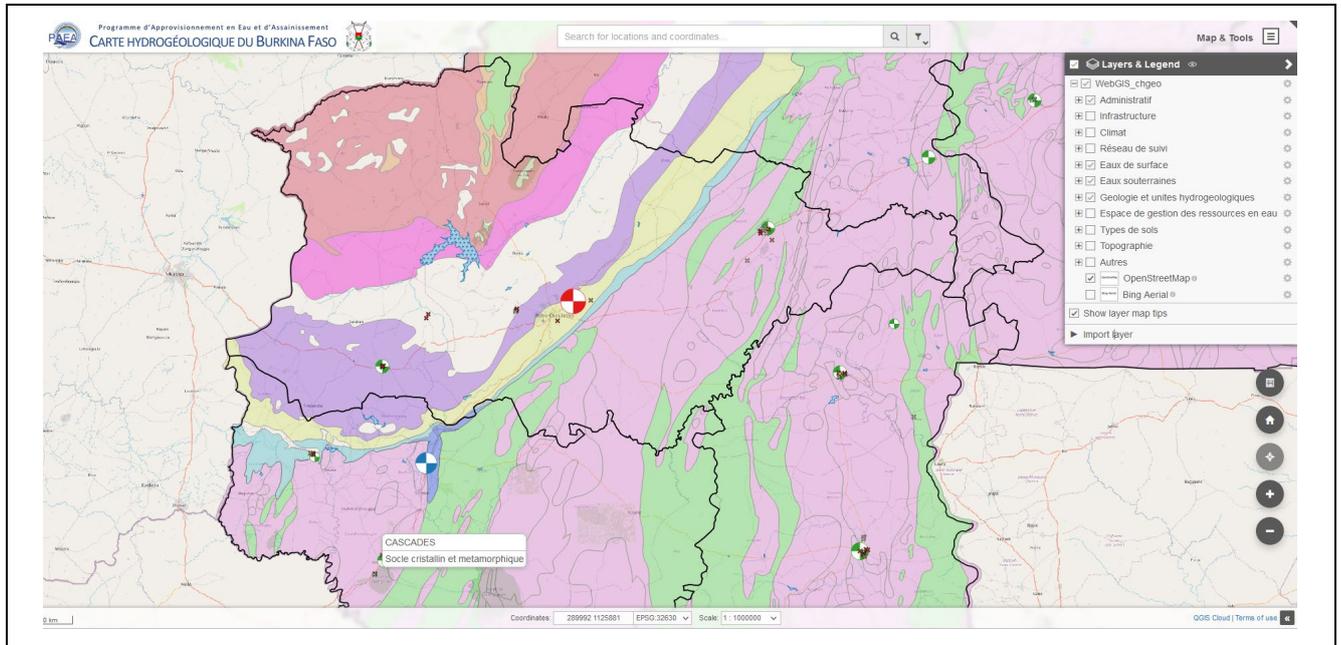
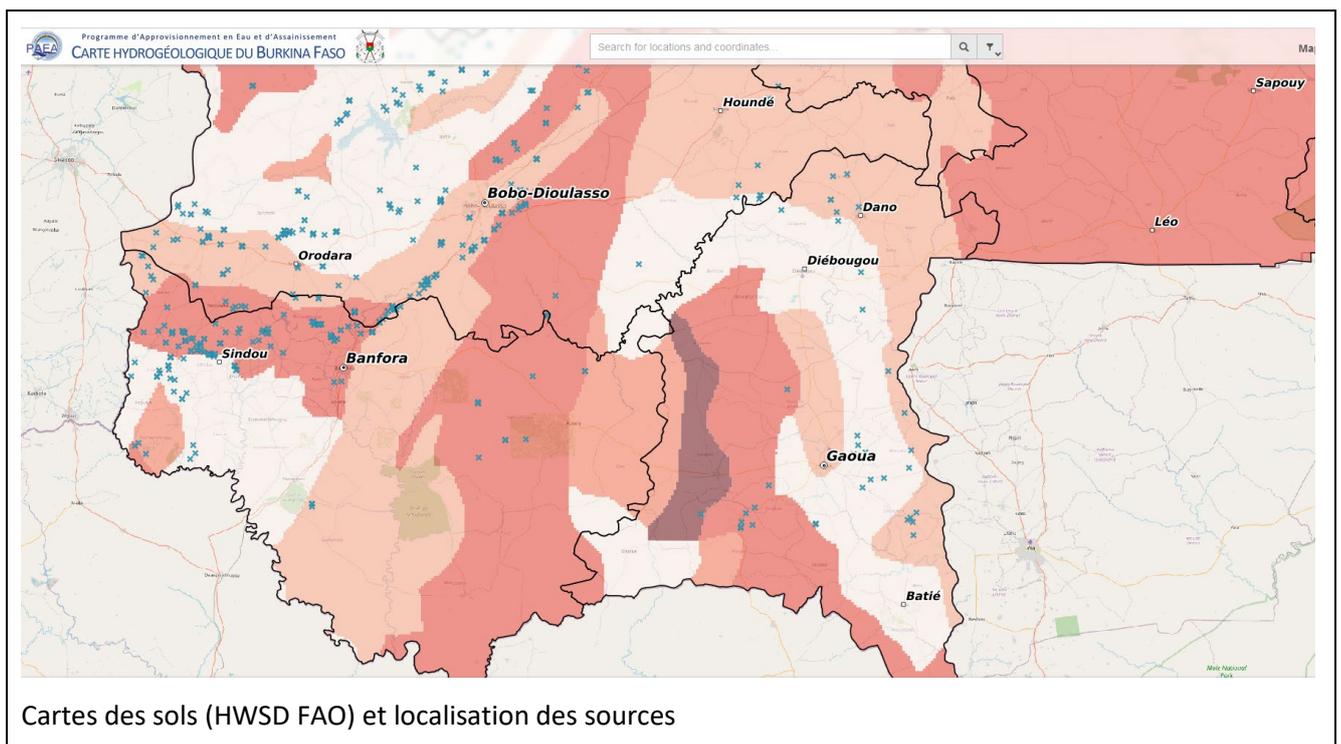
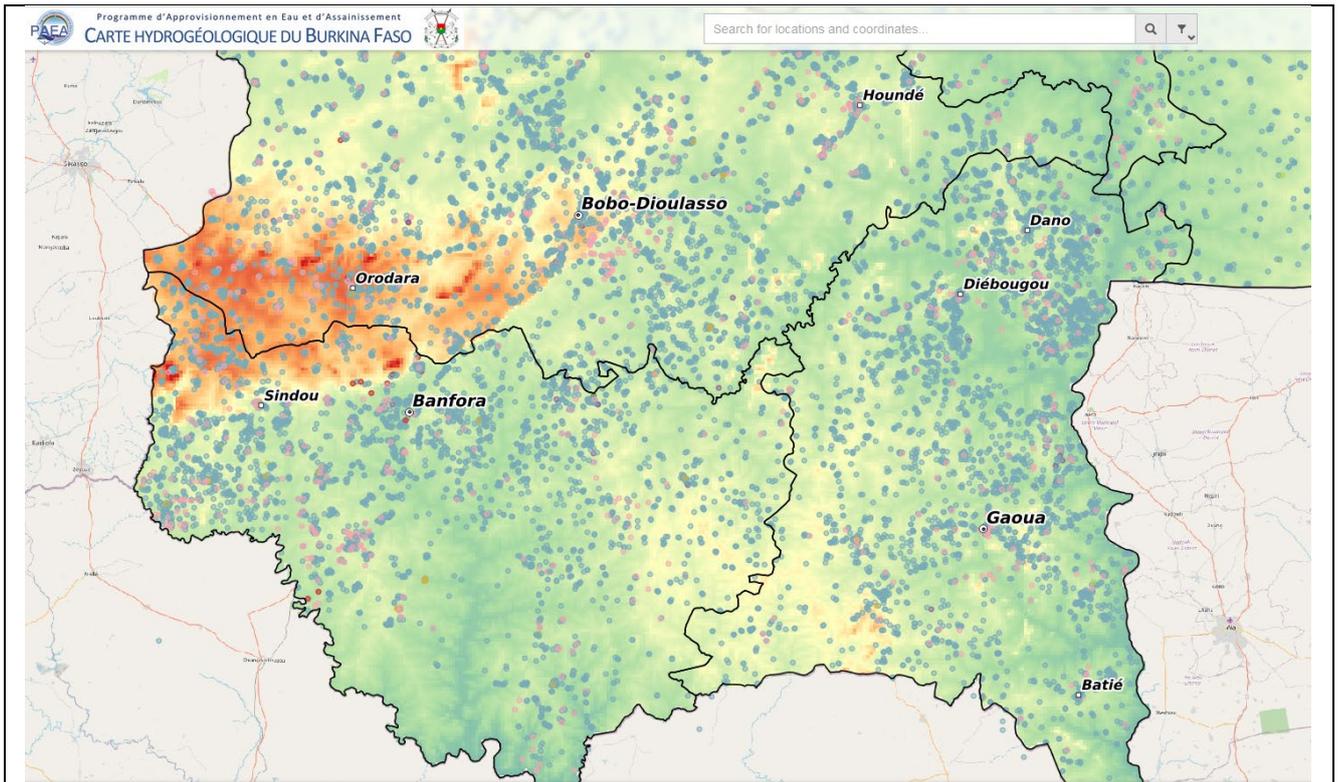


Figure 45 : Vue d'ensemble de l'application WebGIS

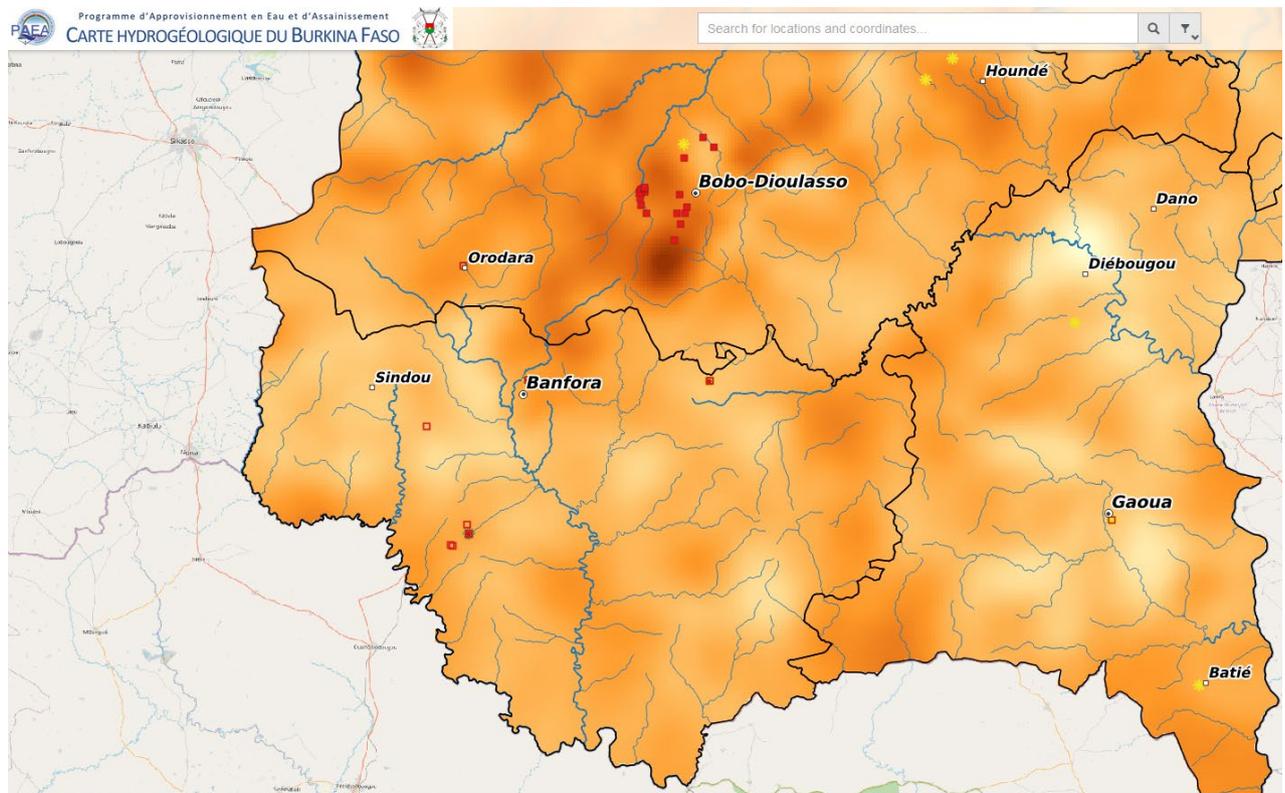
Les figures ci-après donne un aperçu de quelques fonctionnalités du WebGIS, avec notamment la possibilité de créer des cartes thématiques personnalisées.



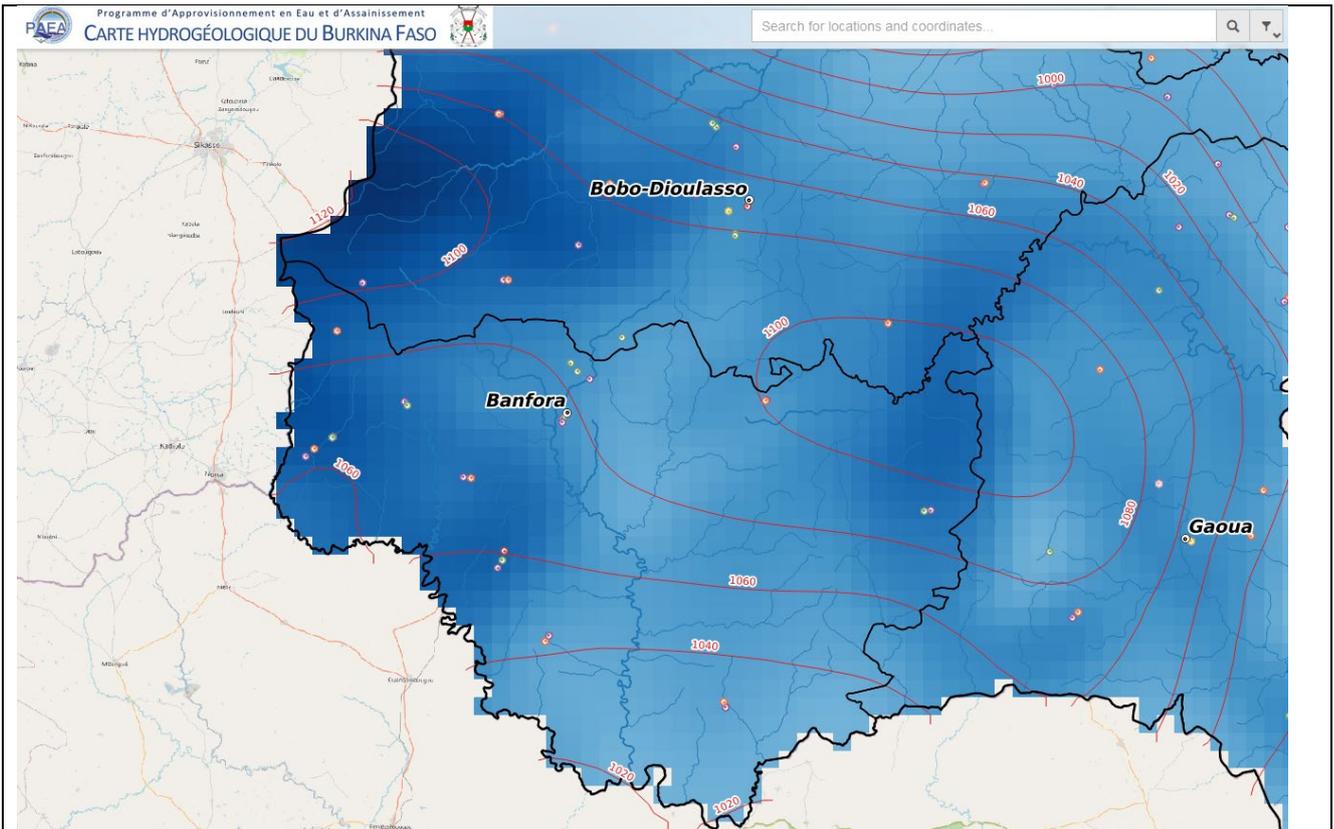
Cartes des sols (HWSD FAO) et localisation des sources



Carte des forages en superposition du MNT (SRTM 900m)



Carte des profondeurs forées, des réseaux piézométriques et de qualité des eaux souterraines



Reproduction, via l'application interactive, la carte secondaire hydro-climatique de la version papier

The screenshot shows a 'Feature Info' window for a specific piezometer. The window is divided into sections: 'Piezometre', 'Suivi de la qualité des eaux souterraines (DEIE)', and 'Bassin versant national'. The selected feature is 'Piezometre: COM_SID_F2'. The following table provides detailed information about this feature:

Piezometre: COM_SID_F2	
qc_id	139
Réseau	DEIE
Désignation	COM_SID_F2
Altitude (m)	318.9
Profondeur (m)	38
Date de la mesure minimum	01-12-85
Date de la mesure maximum	30-11-20
Mesure de niveau statique ...	3.56
Mesure de niveau statique ...	3.82
Mesure de niveau statique ...	0.25999999999999998
Nombre totale de mesure	1040

Description de chaque entité (possibilité de paramétrisation des étiquettes et fonctionnalités d'export)

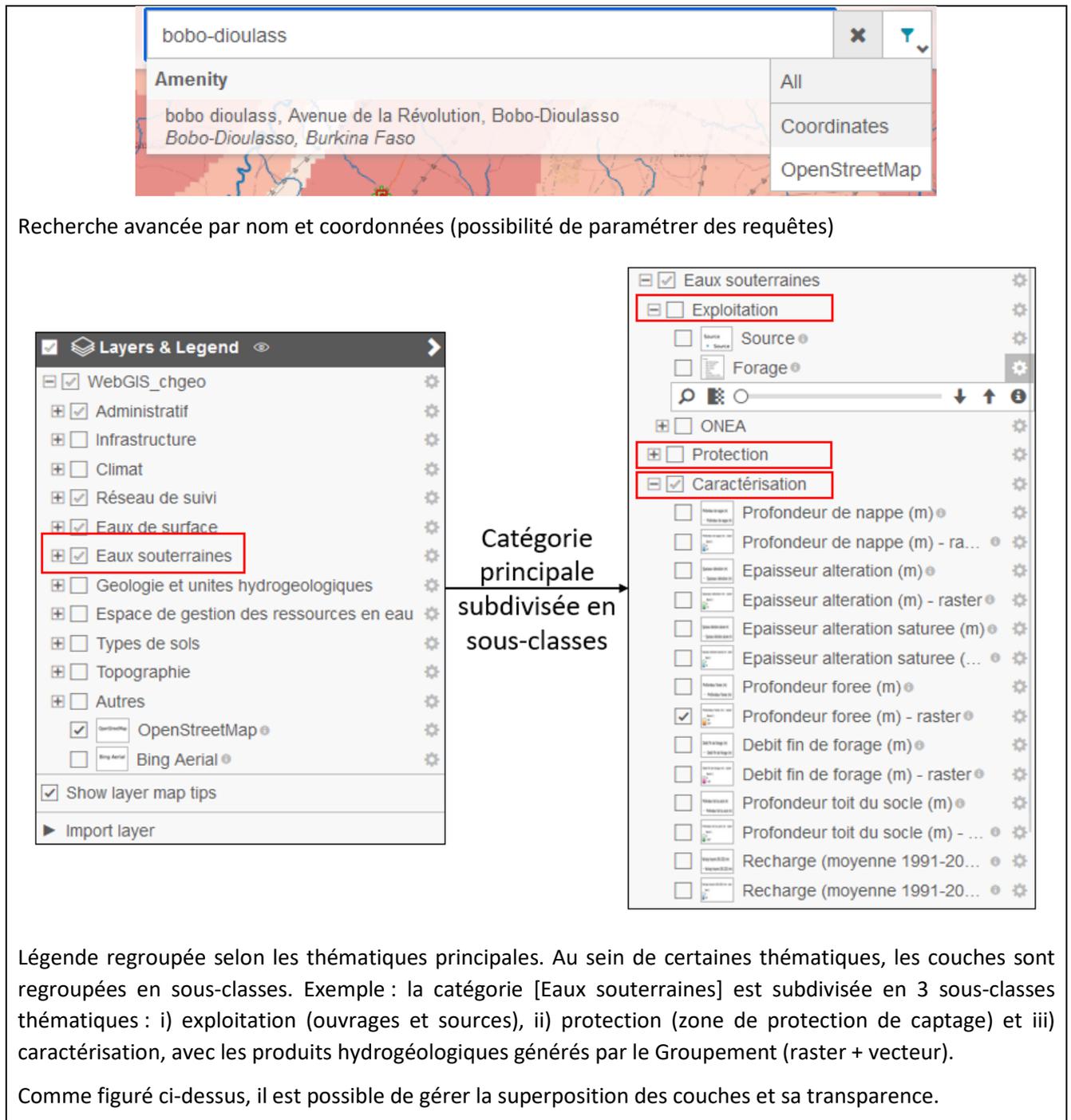


Figure 46 : Fonctionnalités de l'application WebGIS

Via quelques développements et personnalisation, le Groupement propose donc un prototype abouti et fonctionnel. Il est accessible en ligne et peut donc être testé en conditions réelles. L'accès est sécurisé.

L'application est intuitive et fluide. Tous les jeux de données hydrogéologiques capitalisés ou générés par l'étude sont disponibles, y compris en format raster. Cette application offre en outre une grande flexibilité au gestionnaire thématique qui en prend le contrôle essentiellement via l'outil QGIS. Cette interopérabilité est une des grandes forces de l'infrastructure mis en place. De même, les questions d'hébergement ne se posent pas. Enfin, bien que payante, cette solution n'engendre pas de frais conséquents au regard d'un développement applicatif totalement personnalisé. A ce titre, c'est la solution la moins couteuse parmi les produits analysés.

Dans le cas où cette solution souhaite être pérennisée, une migration de la BD-CHGEO devra être réalisée pour la faire passer du serveur actuel (OVH) vers le serveur de QGIS Cloud.

E.4. Mise à disposition de services Web

E.4.1. Service de visualisation (WMS)

Au même titre qu'il propose une infrastructure de diffusion, QGIS Cloud met également à disposition les données au travers d'un service de visualisation WMS.

Ce service web a été préparé par le Groupement. Il est accessible via l'URL suivante et peut être consommé dans tous les logiciels-SIG, dont notamment QGIS et ArcGIS. Une authentification est requise pour visualiser les couches.

https://qgiscloud.com/tredys/WebGIS_chgeo/wms?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities

La Figure 47 illustre la consommation du service web de la carte hydrogéologique du Burkina Faso dans QGIS.

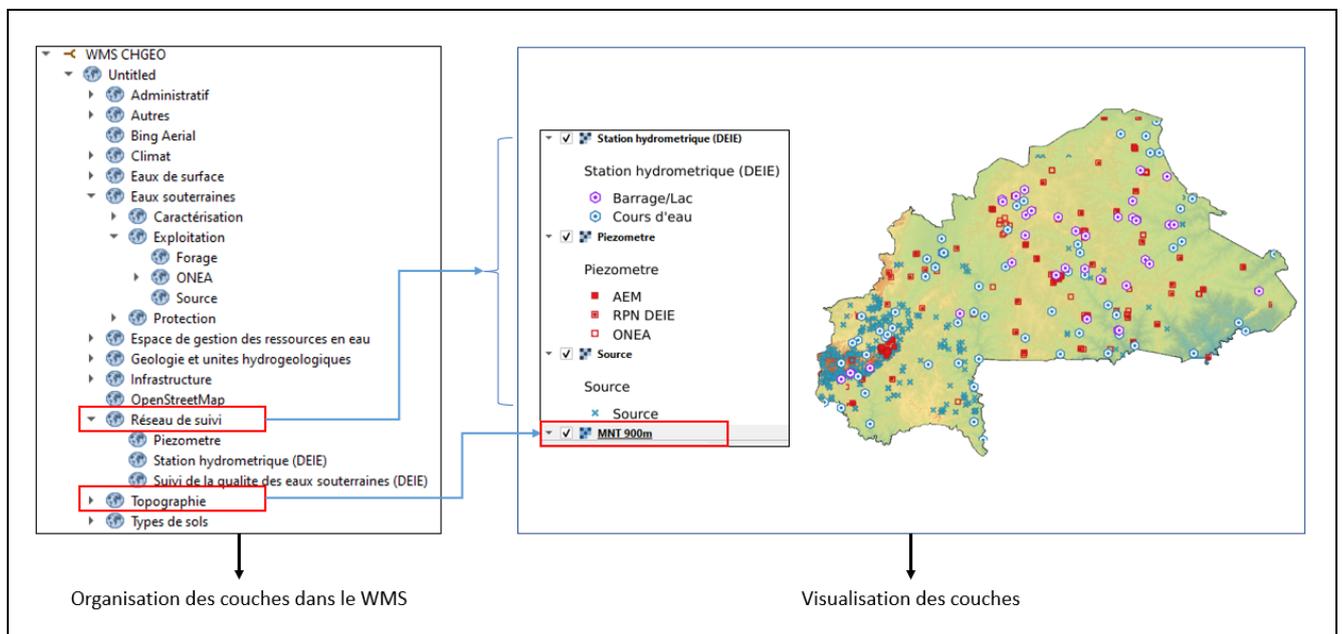


Figure 47 : Disponibilité d'un service web de visualisation

E.4.2. Service d'accès aux données (WFS et WFS-T)

Une fonctionnalité additionnelle de QGIS Cloud est la possibilité de partager les données via des services web de type WFS. Ce protocole désigne l'accès par Internet à des données géospatiales via une solution SIG, qu'elle soit bureautique ou interactive. Le WFS est limité aux données vectorielles, telles qu'elles sont stockées dans la BD-CHGEO.

Le WFS-T donne également un accès complet aux données vectorielles de la BD-CHGEO mais en ajoutant des fonctionnalités d'éditer via le web dans un interface client tel que QGIS. Le « -T » signifie Transactionnel. Étant donné que QGIS Cloud prend en charge le WFS-T, il est possible de gérer et de modifier les données fournies par QGIS Cloud (en l'occurrence les données du WebGIS de la carte hydrogéologique) à partir de n'importe quel client SIG gérant ce type de protocole (ex. QGIS).

F. CONCLUSION

Les activités A.3.3.1 à A.3.3.4 du Résultat 3.3 de la SEVERE visaient à l'actualisation de la carte hydrogéologique du Burkina Faso. Il s'agit de la première initiative à l'échelle nationale depuis trente ans, hormis les travaux entrepris par le BUMIGEB depuis 2018 mais qui n'ont pas encore sorti leur produit. La première phase de ces activités, destinée à aboutir à la production d'un prototype de carte hydrogéologique et d'un applicatif web, s'est déroulée selon le calendrier prévu. Elle se clôture par la production du présent rapport ainsi que par la livraison des produits associés, à savoir la base de données hydrogéologiques, la carte hydrogéologique prototype au format papier et *.PDF, un applicatif de type WebGIS et les services web associés.

L'élaboration d'une base de données hydrogéologiques soutenant la production de produit cartographique constitue la suite logique de la valorisation des référentiels mis en place dans la cadre de l'Etude SEVERE via le R.1.1 (BD-SEVR) et le R.3.1 (BD-OMES). Ces deux bases de données sont des référentiels forts, sur lesquels le Groupement a pu s'appuyer pour construire et alimenter la BD-CHGEO. Cette dernière est vue comme une base de données « produit », en ce sens qu'elle tire parti des données stockées dans la BD-SEVR et la BD-OMES sans les altérer. Le signe que toutes les données de la BD-CHGEO soient issues d'un des deux référentiels témoigne de la capitalisation efficace qui a été menée dans les phases précédant le R.3.3.

A l'exploitation des référentiels est venu s'ajouter l'expertise thématique du Groupement en termes de traitement de l'information. Des jeux de données à haute valeur ajoutée ont été produits et utilisés directement dans la réalisation des cartes hydrogéologiques.

La création d'une carte hydrogéologique n'est pas un processus qui va de soi. Il a demandé de prendre en compte l'existant en la matière, illustré dans la carte hydrogéologique du Burkina Faso (1993) ou dans des réalisations plus locales. Les cartes ont été comparées entre elles pour en conserver les points marquants. Cette analyse a permis de dégager non seulement les données nécessaires mais également le canevas le plus adéquat pour générer les différentes planches de la carte.

Au niveau des produits cartographiques, le Groupement a travaillé à deux niveaux. Le premier a consisté en un travail de représentation cartographique afin de proposer une version actualisée de la carte hydrogéologique qui soit attrayante et porteuse d'information utile pour le secteur. Le résultat répond aux exigences de qualité attendue par ce dernier, tant au niveau du contenu que dans la manière de représenter les différents phénomènes.

Le deuxième axe de développement, non prévu dans les termes de références du marché de l'étude SEVERE et proposé à l'initiative du Groupement, a été de mettre en place une application de visualisation des données hydrogéologiques sur le web. Le Groupement a adopté une approche pragmatique en analysant les solutions de type « Cloud SIG ». Suite à la réalisation d'un benchmark, la solution QGIS Cloud Pro a été retenue. Elle permet de répondre aux attentes tout en maintenant le gestionnaire thématique dans un environnement bureautique maîtrisé. Les développements ont été menés à terme. Un prototype WebGis fonctionnel et alimenté de données stockées dans la BD-CHGEO est déjà disponible. Le développement de ce type d'outil pour la mise en ligne d'une carte hydrogéologique interactive à l'échelle nationale constitue une première sur le continent africain. La pérennité de la solution interactive nécessitera la prise d'un abonnement ainsi qu'un cycle de formation à destination des gestionnaires de la BD-CHGEO.

Ces solutions contribuent à désenclaver la carte hydrogéologique et à l'amener progressivement vers un outil orienté tant sur l'aide à la décision que sur la communication vers un public élargi. Elles offrent également aux experts thématiques une source d'informations fiable et actualisée sur les ressources en eau souterraine du Burkina Faso.

BIBLIOGRAPHIE

- BANDRE. S, 2022 – « Apport du SIG et de l'analyse multicritère à l'estimation des zones de recharge préférentielle en zone de socle ». Janvier 2022, 75p
- BKF, 2005 – « Décret 2005-515 PRES/PM/MAHRH portant procédures d'autorisation et de déclaration des installations, ouvrages, travaux et activités (IOTA) », Octobre 2003, 13p
- BM-WPP, 2017 – « Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux au Burkina Faso. Rapport de synthèse », Septembre, 2017, 90p
- BM, 2021 – « Population growth » - <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW?end=2021>
- DESO, 2022 – « Méthodologie et concepts de la carte hydrogéologique de Wallonie » - <http://environnement.wallonie.be/cartosig/cartehydrogeo/application.htm>
- DIRH, 1993 – « Notices explicatives de la carte hydrogéologique du Burkina Faso. Feuilles de Dori, Ouagadougou, Fada, Bobo-Dioulasso, Gaoua et Tenkodogo », septembre 1993
- DJAHA. K, 2022 – « Evaluation de la recharge des aquifères du Burkina Faso par approche bilantaire et spatialisée », juin 2022. 69p
- ESRI, 2022 – « Comprendre le fonctionnement du Krigeage ». <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-kriging-works.htm>
- GARDIN N., RUTHY I., DEROUANE J., BROUYERE S., 2010 – « Projet d'Appui à la gestion et à la protection des ressources en eau souterraine exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso. Notice explicative de la carte hydrogéologique du bassin du Kou », 2010, 46p
- McNALLY, A., ARSENAULT, K., KUMAR, S., SHUKLA, S., PETERSON, P., WANG, S., VERDIN, J. P., 2017 – « A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. Scientific data »
- MEA, 2016a – « Programme National d'Approvisionnement en Eau Potable 2016-2030 », mai 2019, p. 42
- MEA, 2016b – « Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau 2016-2030 (PNGIRE). Version définitive », mai 2019, 71p
- NASA, 2022 – « Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System. Project Goals » - <https://ldas.gsfc.nasa.gov/ldas>
- OUEDRAOGO, C., 2006 – « Programme de valorisation des ressources en eau de l'Ouest (VREO). Synthèse géologique de la Région Ouest du Burkina Faso ». Octobre 2006, 46p
- SHER-ARTELIA, 2021.a – « Synthèse et valorisation des études sur les ressources en eau dans le cadre du PAEA. Rapport de démarrage », mars 2021, 121p
- SHER-ARTELIA, 2021.b – « RT.1.1 - Rapport de collecte et capitalisation des données sur les ressources en eau », août 2021, 107p
- SHER-ARTELIA, 2022.a – « RT.3.1-1 – base de données OMES. Partie 1: Diagnostic technique et organisationnel et rapport de collecte, analyse et capitalisation des données. Version finale », avril 2022, 153p
- SHER-ARTELIA, 2022.b – « RT.3.1-2 – base de données OMES. Partie 2 : Base de données et applicatif de gestion des ouvrages de mobilisation des eaux souterraines », avril 2022, 141p
- SHER-ARTELIA, 2022.c – « RT.1.1.3 - Actualisation de l'état des lieux des ressources en eau de surface. Phase 1 : capitalisation des données disponibles sur la période 2000-2020 », août 2022, 69p

- SOME, 2022 – « PAEA. Etude de contribution de la géophysique aéroportée à la recherche d'aquifères profonds dans le bassin sédimentaire occidental du Burkina à partir de l'interprétation des données aéromagnétiques existantes ». Juillet 2022
- TALBAOUI M, 2009. « Programme de Valorisation des Ressources en Eau de l'Ouest du Burkina Faso - Etude des périmètres de protection des sources de Nasso et des forages de l'ONEA – Rapport final », 2009, 77p
- TECSULT, 2005 – « Projet d'hydraulique villageoise 310 Forages dans les provinces du Mouhoun, des Balé, des Banwa et de la Kossi. Etude d'implantation, suivi et contrôle des travaux pour la réalisation de 310 forages productifs », juin 2005. 14p
- TIDIANI K. 2022 – « Elaboration d'un SIG consolidé des ressources en eau et contribution à l'actualisation des cartes hydrogéologiques du Burkina Faso », janvier 2022. 78p

ANNEXES

ANNEXE 1 – DIAGRAMME DE LA BD-CHGEO

Modèle Physique de données [PAEA_SEVERE_R33_A1_DIAGRAMME_BD_CHGEO.pdf] attaché.

ANNEXE 2 – DICTIONNAIRE DE LA BD-CHGEO

Dictionnaire de données [PAEA_SEVERE_R33_A2_DICTIONNAIRE_BD_CHGEO.pdf] attaché.

ANNEXE 3 – CODE-SOURCE DE LA BD-CHGEO

Code-source de la BD-CHGEO [PAEA_SEVERE_R33_A3_CODE_SOURCE_BD_CHGEO.sql] attaché. Il s'agit du squelette de la base de données (sans les données).

ANNEXE 4 – PROTOTYPE DE CARTE HYDROGÉOLOGIQUE ACTUALISÉE

Prototype de la carte hydrogéologique actualisée en 6 planches.

[PAEA_SEVERE_R33_A4_CARTE_HYDROGEOLOGIQUE]

ANNEXE 5 – PROTOTYPE DE NOTICE EXPLICATIVE

Prototype de notice explicative [PAEA_SEVERE_R33_A5_NOTICE_EXPLICATIVE] attachée