Desjardins
Développement international

Baastel

ELLESadAPt

Projet d'adaptation aux changements climatiques des femmes dans les aires protégées au Congo et au Tchad (ELLESadAPt)

Étude de vulnérabilité climatique des ressources en eau (eau de surface et eau souterraine) du CAPBL - Analyse préliminaire de l'étude vulnérabilité climatique

N° de commande AMC : 7454448 | N° de projet AMC : P011753

15 juillet 2024



En collaboration avec

NOÉ
Congo et Tchad

En partenariat avec
Canada

TABLE DES MATIÈRES

Page

1. INTRODUCTION 2
2. RAPPEL DU CADRE GLOBAL, DES OBJECTIFS ET RÉSULTATS 3
   - 2.1. Objectif général de la mission 3
   - 2.2. Objectifs spécifiques de la mission 3
   - 2.3. Résultats attendus et principales activités 3
3. PRÉSENTATION DU CONTEXTE HYDROLOGIQUE DU CAPBL 3
   - 3.1. Caractérisation physiographique des bassins versants alimentant le CAPBL 4
   - 3.2 Analyse du cadre climatique des bassins versants du CAPBL 5
   - 3.3 Analyse des ressources en eau de surface de la zone du CAPBL 8
   - 3.4 Analyse des débits annuels et mensuels du bassin de Mbourao 10
4. ANALYSE DE LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU DU CAPBL AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES 11
   - 4.1 Présentation du modèle hydrologique GR4J 11
   - 4.2 Calcul de la pluie moyenne et de l'ETP moyenne des bassins versants 12
   - 4.3 Calage/validation croisée des modèles GR2M et GR4J 14
   - 4.4 Évaluation de la performance des modèles 14
   - 4.5 Projection des écoulements futurs et analyse de la vulnérabilité des ressources en eau du CAPBL au changement climatique 16
     - 4.5.1 Évolution des forçages climatiques dans le bassin de Mbourao aux horizons 2035 et 2060 17
     - 4.5.2 Évolution des écoulements dans le bassin de Mbourao aux horizons 2035 et 2060 18
     - 4.5.3 Impact potentiel de l'évolution des ressources en eau sur les secteurs d'activités 20
5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 21
6. ANNEXES 25
   - 6.1. Références bibliographiques 25
   - 6.2. Données de débits mensuels de la station de Mbourao sur la période 1964-2023 collectées lors de la mission de terrain 29
   - 6.3. Bilan hydrologique de la station de Mbourao sur la période 1981-2023 32
   - 6.4. Projection de pluie, d'ETP et de débit de la station de Mbourao aux horizons 2035 et 2060 pour les scénarios SSP3.7-0 et SSP5.8-5 35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres physiographiques des bassins versants (Kc : indice de compacité de Gravélius ; L (km) : longueur du rectangle équivalent ; l (km) : largeur du rectangle équivalent ; IG (m/km) : indice de pente globale ; D (m) : dénivelée ; D (m) : dénivelée spécifique).....5

Tableau 2 : Caractéristiques statistiques des débits mensuels (m^3/s) de la station de Mbourao.....11

Tableau 3 : Disponibilité saisonière en eau du Mayo-Kebbi à Mbourao.....11

Tableau 4 : Critères d'évaluation statistique, formules, étendues et valeurs optimales. 15

Tableau 5 : Performance du modèle GR2M et GR4J en calage 15

Tableau 6 : Liste des modèles climatiques utilisés dans l'étude.....16

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone du projet.....4

Figure 2 : Évolution de l'indice national de cumuls pluviométriques annuels sur 1950-2016. Source : Direction de la Météorologie Nationale du Tchad, 2017 ; in Country Programme, Republic of Chad, FVC ; 2019. 6

Figure 3 : Cumul moyen annuel de précipitations sur 1981-2023 dans les données CHIRPS.....6

Figure 4 : Orographie de la région et températures moyennes sur 1979-2016 7

Figure 5 : Évolution pluie débit dans le bassin versant de Mbourao 7

Figure 6 : Répartition spatiale des différents sous bassins versants alimentant le CAPBL.....8

Figure 7 : Courbe de tarage de la station hydrométrique de Mbourao 9

Figure 8 : Cycles saisonnier des débits de la station de Mbourao 10

Figure 9 : Schéma conceptuel des modèles GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003) 12

Figure 10 : Grilles utilisées pour l'extraction des données de pluies journalières CHIRPS.....13

Figure 11 : Stations fictives utilisées pour l'extraction des données de température minimale et maximale NCEP 14

Figure 12 : Hydrogramme des débits observés et calculés par le modèle GR4J à la station de Mbourao sur la période 1981-2023 15

Figure 13 : Hydrogramme des débits observés et calculés par le modèle GR2M à la station de Mbourao sur la période 1981-2023 16

Figure 14 : Évolution de la pluie moyenne du bassin de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023.....17

Figure 15 : Évolution de l'ETP moyenne du bassin de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023.....18

Figure 16 : Évolution des débits mensuels de la station de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023.....19

Figure 17 : Évolution des débits journaliers de la station de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023.....19

Figure 18 : Cycle saisonnier des débits des principaux affluents du fleuve Sénégal selon les différentes périodes climatiques 20

1. INTRODUCTION

La Réserve du complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré (CAPBL) est située à l'extrême sud-ouest du Tchad, entre 9°30 et 9°50 de latitude Nord et 14°10 et 14°40 de longitude Est (Vaiougou, 2020). Cette réserve est localisée sur les territoires de 4 cantons de la province du Mayo-Kebbi Ouest (Vaiougou, 2020) : Canton Binder (Département de Mayo Binder), Canton Léré et Guelo (Département de Lac Léré) et Canton Lagon (département de El Ouaya).

Le climat du CAPBL est de type sahélo-soudanien avec une saison sèche (octobre à juin) et une saison des pluies (mai à septembre). La pluviométrie moyenne annuelle à la fin des années 1960 y excédait les 1 000 mm (ENGREF, 1998). Cependant la sécheresse qu'a connu l'Afrique de l'Ouest a entrainé une péjoration climatique qui a affecté les populations et leur environnement mais aussi les ressources en eau. Par ailleurs, Hautcoeur (2001) souligne que depuis 1994, on assite à une reprise pluviométrique. Du point de vue hydrologique, le CAPBL est parcourue d'Est en Ouest par un cours d'eau principal, qui est en eau toute l'année, le Mayo-Kebbi (Vaiougou, 2020). Ce dernier constitue un élément structurant de la Réserve dont découlent la plupart de ses atouts naturels. Les principaux affluents du Mayo-Kebbi se manifestent par leurs galeries forestières dont les plus importantes sont : le Mayo Dala, le Mayo Laddé et le Mayo Tam. En aval de son cours, le Mayo-Kebbi donne naissance à deux Lacs, celui de Tréné et celui de Léré. Le Lac de Léré, le plus grand des deux, a une largeur qui peut par endroit atteindre les 5 km et s'étend sur une distance de 15 km entre Léré à l'Est et Guegou à l'Ouest. Ces cours d'eau à cause de leur mode d'alimentation essentiellement pluvial sont vulnérables à la variabilité et au changement climatique.

Les impacts du changement climatique sont, par ailleurs, exacerbés par des pratiques, une utilisation des terres et des ressources naturelles non durables (coupe de bois, avancée du front agricole, chasse, entre autres), aggravant encore davantage la vulnérabilité des écosystèmes et des populations et menaçant la biodiversité unique et riche caractérisant ces territoires. Afin de répondre à ces enjeux, le projet ELLESadAPt financé par Affaires Mondiales Canada est mis en exécution par un consortium formé de Baastel et Développement International Desjardins (DID) en collaboration avec l'association Noé. De manière globale, ce projet vise essentiellement le renforcement de l'adaptation aux changements climatiques des femmes et des écosystèmes du Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré (CAPBL) au Tchad, tout en générant des bénéfices de conservation de la biodiversité.

Dans le cadre de la mise en œuvre des activités du projet ELLESadAPt, des études de vulnérabilité au changement climatique pour le CAPBL sont réalisées pour différents secteurs. Ainsi, l'étude de vulnérabilité des ressources en eau du CAPBL est une composante des analyses de vulnérabilité menées afin de proposer des mesures d'adaptation des populations du CAPBL aux changements climatiques. Ainsi, l'objectif de la mission de l'expert hydrologue international est de fournir, en binôme avec un expert national en hydrologie (Tchad), une analyse de la vulnérabilité climatique des ressources en eau (eau de surface et eau souterraine) du CAPBL.

2. RAPPEL DU CADRE GLOBAL, DES OBJECTIFS ET RÉSULTATS

2.1. Objectif général de la mission

L'objectif général de la mission est de fournir une analyse de la vulnérabilité climatique des ressources en eau (eau de surface et eau souterraine) du CAPBL.

2.2. Objectifs spécifiques de la mission

De manière plus spécifique, les objectifs visés pour la mission du Consultant sont :

- Vulnérabilité actuelle : identifier les effets des principaux aléas passés et évolution climatiques des dernières décennies sur les ressources en eau (qualité, quantité, accès, etc.)
- Vulnérabilité future: évaluer comment le changement climatique (augmentation des températures et évolution des précipitations attendues) va venir impacter (positivement ou négativement) les ressources en eau de la zone en tenant compte de l'évolution de la demande en eau (croissance démographique, évolution des usages, consommation, etc.).

2.3. Résultats attendus et principales activités

Les résultats attendus de la mission sont :

- Revue bibliographique sur l'impact potentiel du changement climatique sur les ressources en eau (eau de surface et eau souterraine) sur le territoire du CAPBL
- État des lieux des données existantes au niveau du CAPBL
- Identification des informations manquantes
- Proposition d'une méthodologie pour évaluer la vulnérabilité climatique des ressources en eau de surface et souterraine (modélisation hydrologique, régionalisation, etc.) à partir de ce qui est disponible et réaliste pour la zone d'étude
- Mission terrain dans la zone du CAPBL pour effectuer la collecte des données
- Réalisation de l'analyse de vulnérabilité
- Rédaction des différents rapports.

3. PRÉSENTATION DU CONTEXTE HYDROLOGIQUE DU CAPBL

La Réserve du complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré (CAPBL) est située à l'extrême sud-ouest du Tchad (Figure 1). Cette réserve est localisée dans la province du Mayo-Kebbi Ouest (Vaiougou, 2020). Du point de vue hydrologique, la Réserve est parcourue d'Est en Ouest par un cours d'eau principal, qui est en eau toute l'année, le Mayo-Kebbi (Vaiougou, 2020). Les principaux affluents du Mayo-Kebbi se manifestent par leurs galeries forestières dont les plus importantes sont : le Mayo Dala, le Mayo Laddé et le Mayo Tam. En aval de son cours, le Mayo-Kebbi donne naissance à deux Lacs, celui de Tréné et celui de Léré. Les différents affluents qui alimentent le Mayo-Kebbi ont un écoulement intermittent qui n'est visible que durant la saison pluvieuse. Ces cours d'eau drainent de petits bassins versants, sans réseau hydrométrique, donc non jaugés.

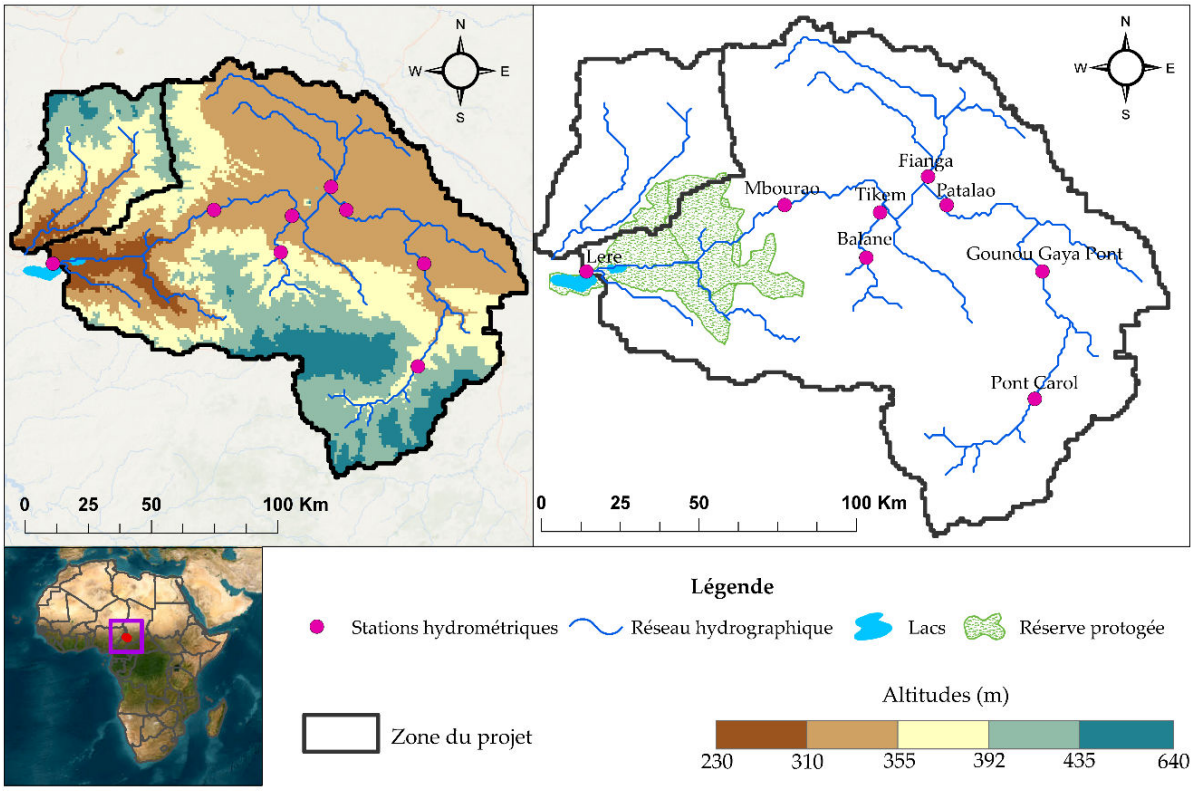


Figure 1 : Localisation de la zone du projet

3.1. Caractérisation physiographique des bassins versants alimentant le CAPBL

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude des terrains au ruissellement, à l'infiltration et à l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin versant. Le modèle de relief d'un bassin versant, s'obtient par interpolation des données numériques (courbes de niveau, points cotés) numérisées sur les cartes topographiques à l'aide de logiciels S.I.G (Système d'Information Géographique). En effet, à partir de ces données altimétriques, réparties de manière non homogène, il est possible de représenter le relief en tant que surface continue à l'aide d'une interpolation. Cependant, ces documents cartographiques ne sont pas toujours disponibles (Bodian, 2011). Et même s'ils existent, les besoins d'homogénéisation de l'information se posent pour les études qui concernent les espaces qui s'étendent à cheval sur plusieurs pays tel que les différents bassins qui alimentent la zone du CAPBL. En effet, une partie des bassins versants se situe au Cameroun. Pour les raisons de disponibilité et d'homogénéité énoncées ci-dessus, nous avons porté notre choix sur les données SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) résolution 90 m de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pour la caractérisation des paramètres morphométriques des bassins versants. Cette mission fournit, en effet, des Modèles Numériques de Terrain (MNT) accessibles depuis Internet et directement chargeable dans un SIG.

A partir des coordonnées des différentes stations hydrométriques (Figures 1), la délimitation des bassins versants est faite avec le programme Arc-SWAT implémenté sous ArcGis. Ensuite, la surface et le périmètre des bassins versants sont obtenus directement avec ArcGis. Ces deux paramètres ont permis de connaître la forme et le relief des bassins versants à savoir : l'indice de compacité de Gravélius (Kc), la longueur du rectangle équivalent L (km), la largeur du rectangle équivalent l (km), l'indice de pente globale IG (m/km). Les caractéristiques physiographiques des bassins versants ainsi calculées et consignée dans le tableau 1, déterminent la réponse hydrologique de ces derniers face aux impulsions pluviométriques.

Tableau 1 : Paramètres physiographiques des bassins versants (Kc : indice de compacité de Gravélius ; L (km) : longueur du rectangle équivalent ; l (km) : largeur du rectangle équivalent ; IG (m/km) : indice de pente globale ; D (m) : dénivelée ; D (m) : dénivelée spécifique)

	Surface	Périmètre	Kc	L	l	Dénivelée (m)	Ig (m/km	Ds
BV Zalbi	2734.8	295.7	1.6	126.2	21.7	436	3.45	180.7
BV Tikem	1308.6	213.9	1.7	92.9	14.1	196	2.11	76.4
BV Rive gauche 2	742.1	178.6	1.8	80.0	9.3	202	2.52	68.8
BV Rive droite 1	1138.2	208.3	1.7	91.8	12.4	288	3.14	105.9
BV Pont Carol	2030.8	243.7	1.5	101.9	19.9	167	1.64	73.9
BV Patalao	5646.1	554.3	2.1	255.0	22.1	202	0.79	59.5
BV Mbourao	13030.6	729.1	1.8	324.4	40.2	279	0.86	98.2
BV Lere	16544.7	837.0	1.8	374.3	44.2	365	0.98	125.4
BV Gounou Gaya Pont	3515.8	383.2	1.8	171.0	20.6	191	1.12	66.2
BV Fianga	3527.9	401.8	1.9	181.4	19.4	104	0.57	34.0
BV Balane	1167.6	182.3	1.5	75.7	15.4	174	2.30	78.5

3.2 Analyse du cadre climatique des bassins versants du CAPBL

L'étude climatique est principalement axée sur l'analyse de la pluviométrie et de l'Évapotranspiration (ETP) calculé à partir de paramètres climatiques. En effet, la pluie et l'ETP constituent les deux paramètres clés du bilan hydrologique en domaine tropical. Par ailleurs ces deux paramètres déterminent l'abondance fluvial des cours d'eau. Cette analyse climatique est tirée du rapport de l'experte climat du projet. Comme tenu des difficultés d'accès aux données au sol, l'analyse climatiques est faite à partir des données de *Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS). En effet, ces dernières années, on assiste à une multiplicité de produits de précipitation obtenus à partir des satellites, des réanalyses et des données *in situ* (Jiang *et al.*, 2017 ; Centella-Artola *et al.*, 2020), qui offrent de nombreuses perspectives pour les applications hydrologiques, les études liées au changement climatique, mais également pour la gestion durable des ressources en eau (Ashouri *et al.*, 2015). Les données de précipitations maillées (parmi lesquelles les produits satellites) constituent donc une alternative précieuse pour pallier les problèmes de disponibilité et d'accessibilité aux données observées (Thiemig *et al.*, 2013). Les données climatiques CHIRPS utilisées dans le cadre du projet Elles'Adapt, proviennent du projet *Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS) développé afin de fournir des données complètes, fiables et à jour pour des applications telles que l'analyse des tendances hydro-climatiques, la surveillance de la sécheresse, etc. Le produit CHIRP v2.0 est uniquement basé sur les données satellitaires tandis que CHIRPS v2.0 est issu de la combinaison des données satellites et des observations au sol (Beck *et al.*, 2019). CHIRPS v2.0 et CHIRP v2.0 fournissent des estimations de précipitations quotidiennes couvrant la plupart des régions terrestres du monde (50°S-50°N) avec une résolution spatiale 0,05° sur la période 1981 à présent (Funk *et al.*, 2015).

Les résultats obtenus par la modélisation climatique réalisée dans le cadre du projet (Baastel., 2024) montrent que la pluviométrie annuelle sur la région du CAPBL est comprise entre 750 et 950 mm/an sur la région. Elle est minimale autour du lac Léré et augmente sur les reliefs. La figure 2 donne la variabilité inter annuelle de la pluie sur la période 1950-2016. Ce graphique montre deux phases dans l'évolution des pluies annuelles : une phase humide avec des indices positifs sur la période 1950-1980 et une phase marquée par une forte variabilité des pluies annuelle sur la période 1981-2016. Pour les températures, on remarque qu'en moyenne annuelle, la température minimale journalière est d'environ 22°C et la température maximale journalière de 34 à 35°C. Elles varient avec l'altitude, et sont légèrement plus fortes dans les vallées que sur les collines.

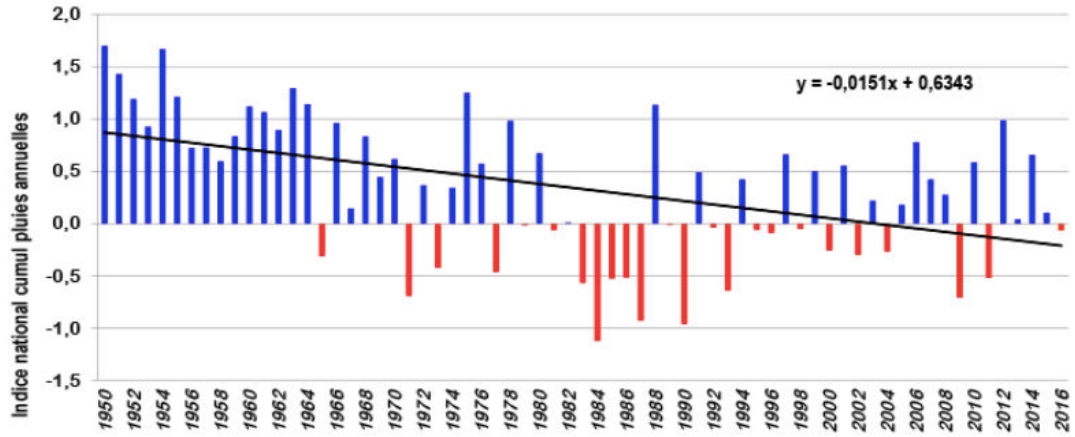


Figure 2 : Évolution de l'indice national de cumuls pluviométriques annuels sur 1950-2016. Source : Direction de la Météorologie Nationale du Tchad, 2017 ; in Country Programme, Republic of Chad, FVC ; 2019.

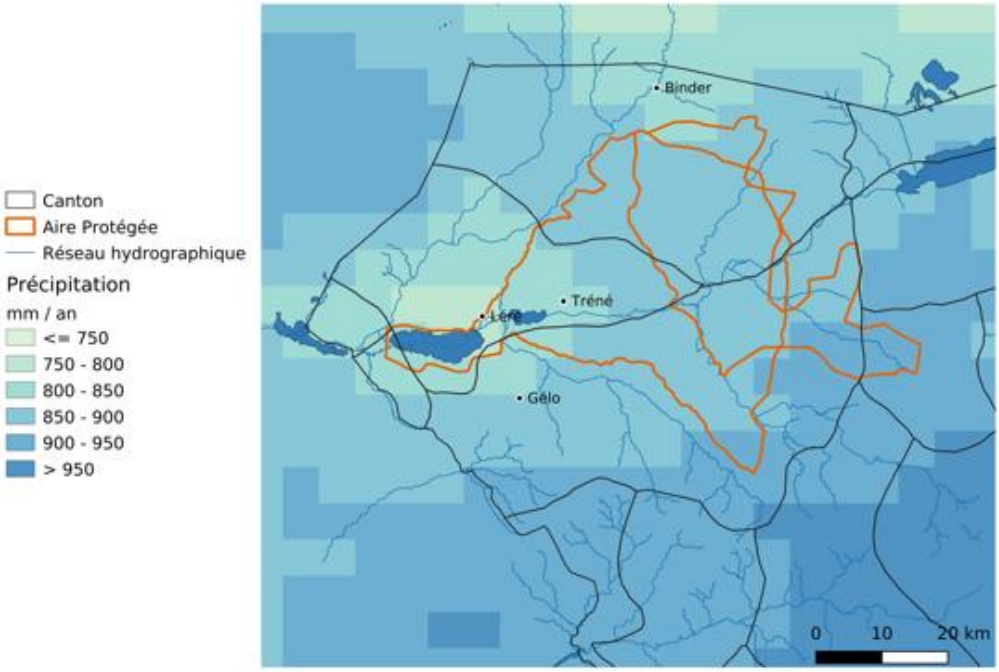


Figure 3 : Cumul moyen annuel de précipitations sur 1981-2023 à partir des données CHIRPS

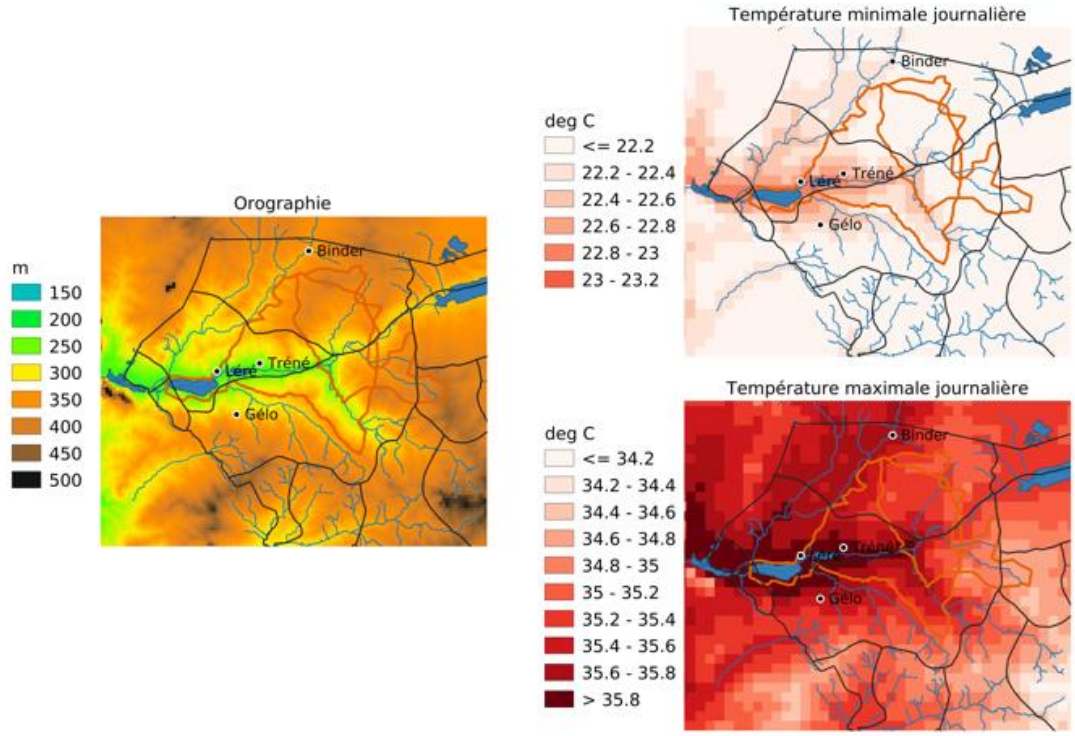


Figure 4 : Orographie de la région et températures moyennes sur 1979-2016

L'objectif de l'analyse climatique est d'évaluer les ressources pluviales qui constituent une des entrées du système bassin versant. L'évolution de la pluviométrie dans la zone du CAPBL se traduit par un fait propre à la zone intertropicale en l'occurrence la variabilité des précipitations. Cette variabilité, lorsqu'elle est temporelle s'apparente soit à la différence des totaux interannuels soit à la position du maximum pluviométrique mensuel. Dans l'espace, la variabilité des précipitations se traduit par une baisse des totaux du sud au nord et cela est illustré par la répartition spatiale des pluies annuelles. Ces différentes variations affectent aussi les pluies moyennes reçues par les différents sous bassins qui déterminent la nature de l'écoulement des cours d'eau (Figure 5).

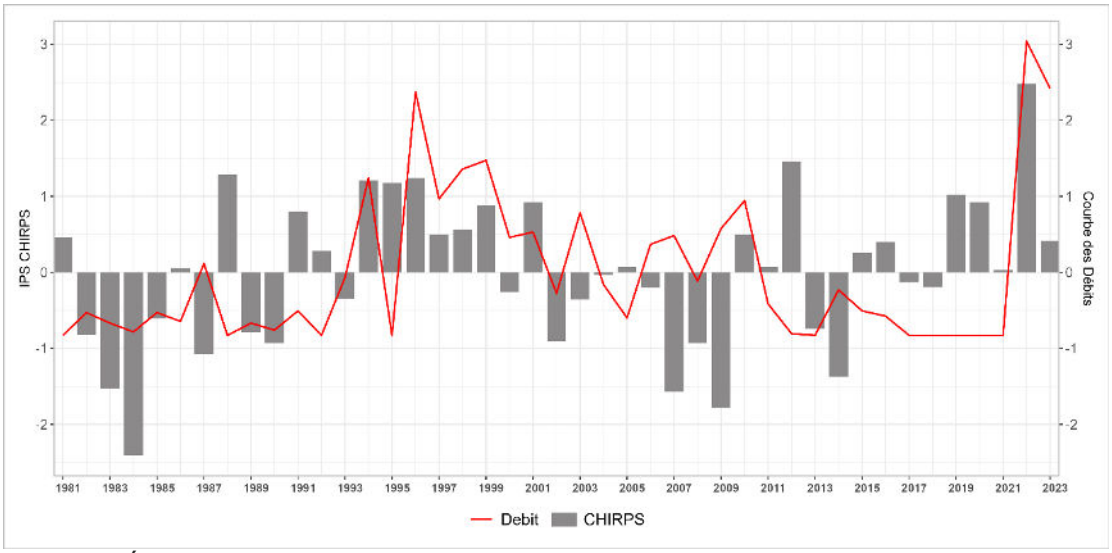


Figure 5 : Évolution pluie-débit dans le bassin versant de Mbourao

3.3 Analyse des ressources en eau de surface de la zone du CAPBL

Parmi les différents cours d'eau alimentant les différents lacs du CAPBL, seul le bassin de Mbourao (Figure 6) dispose des données hydrologiques (hauteurs et débits) sur la période 1964-2023 avec des lacunes importantes pour certaines années (Annexe 1). L'évaluation des disponibilités en eau de surface de la zone du CAPBL est faite à partir des données de cette station qui contrôle les apports en eau douce du Mayo-Kebbi au deux lacs (Léré et Tréné). Cette analyse hydrologique consiste à évaluer les écoulements du Mayo-Kebbi sur la base des données hydrologiques disponibles collectées au niveau de la Direction des Ressources en Eau (DRE). L'analyse des courbes de tarage ou courbe d'étalonnage (Figure 7) établissant la relation hauteurs-débits a permis de convertir les hauteurs d'eau en débits. A partir des données de débit, les apports en eau de surface du Mayo-Kebbi à la station de Mbourao sont déterminés. La détermination de ces apports permet de connaître les disponibilités en eau de surface et leur variabilité temporelle.

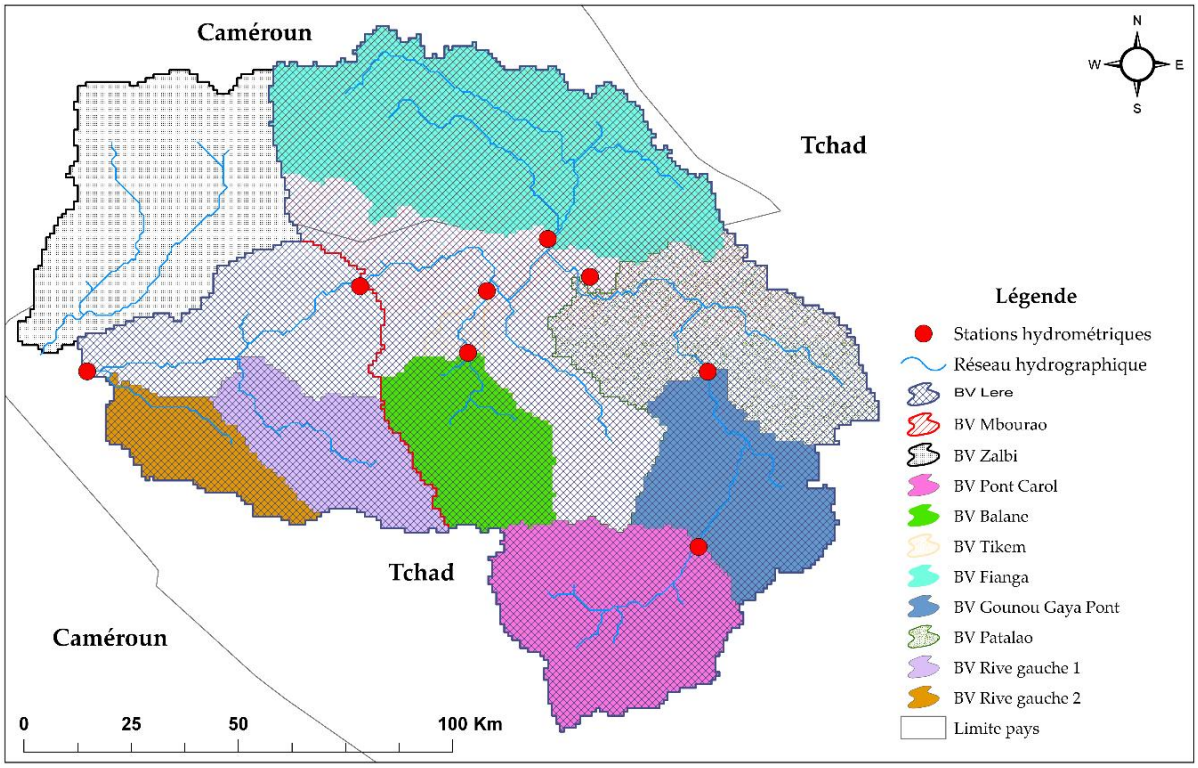


Figure 6 : Répartition spatiale des différents sous bassins versants alimentant le CAPBL

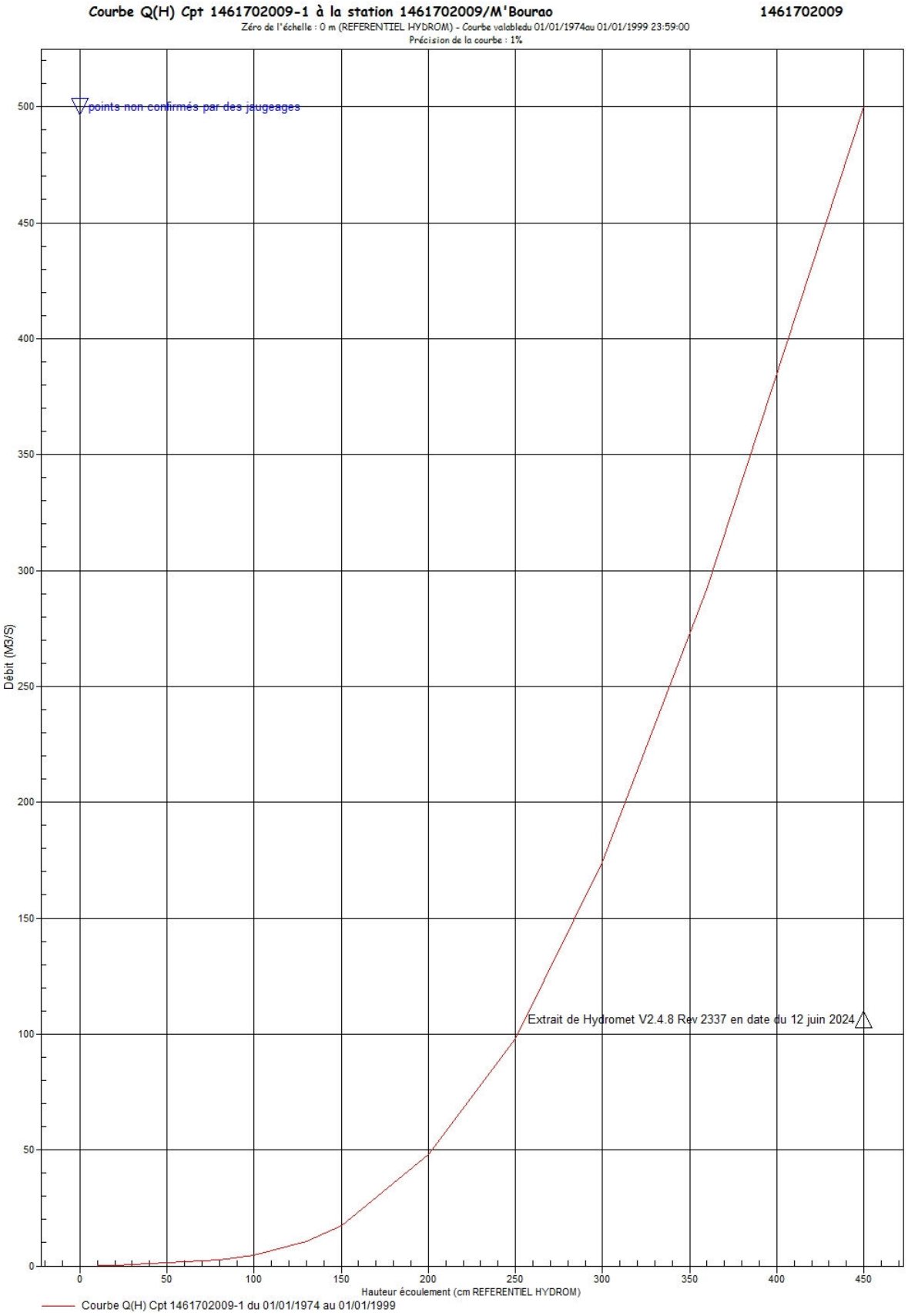


Figure 7 : Courbe de tarage de la station hydrométrique de Mbourao (Source : Direction des Ressources en Eau)

3.4 Analyse des débits annuels et mensuels du bassin de Mbourao

La variation annuelle des modules est illustrée par la figure 5. Cette figure, montre une légère augmentation des modules ces dernières années. Cette augmentation des modules est consécutive à l'amélioration de la pluviométrie qui reste cependant très fluctuante d'une année à une autre. Le tableau 2 donne les statistiques des modules et des débits moyens mensuels. Sur la période des données disponibles, le maximum hydrologique est situé en septembre avec des débits moyens mensuels de 69 m^3/s. Le coefficient de variation montre que la variation des débits est importante. L'analyse des débits moyens mensuels permet de mettre en évidence le régime du cours d'eau et sa variation inter saisonnière (Figue 8). Cette irrégularité est plus forte en période de basses eaux et surtout en début de la saison des pluies. L'examen des débits mensuels montre aussi une variation saisonnière caractéristique du régime uni-modal avec une saison sèche et une saison humide. Le débit mensuel le plus bas se situe entre le mois d'avril et mai et le débit maximum entre les mois de septembre et d'août. Les caractéristiques statistiques sont complétées par le coefficient mensuel de débit (CMD) permettant de déterminer les périodes de hautes eaux et de basses eaux. Les CMD inférieurs à l'unité correspondent aux mois de basses eaux et les CMD supérieures à l'unité représentent les mois de hautes eaux (Tableau 2). Pour le bassin de Mbourao, les hautes eaux durent 3 mois de septembre à novembre. Le tableaux 3 donne les disponibilités en eau du Mayo-Kebbi. L'apport moyen annuel du Mayo-Kebbi à la station Mako de Mbourao par exemple au mois de septembre est de 179 millions m^3 d'eau.

L'analyse des débits annuels et mensuels est complétée par l'analyse des termes du bilan hydrologique. Le bilan hydrologique de par sa formulation traduit la relation existante entre les volumes d'eau précipités sur le bassin et ceux écoulés à son exutoire (Gomis, 2000). Autrement dit, il se fonde essentiellement sur les entrées constituées en domaine tropical par les pluies, les sorties et les stocks. Il permet d'évaluer les ressources en eau de surface disponible dans un bassin versant donné. L'Annexe 2 donne les volumes écoulés par année à la station de Mbourao (seules les années hydrologiques complètes ont été prises en compte). On remarque que sur la période 1981-2023, le Mayo-Kebbi a un débit moyen annuel de 41 m^3/s ce qui correspond à un volume de 1112 million de m^3. La faiblesse des débits pour certaines années s'explique par la faible capacitée d'écoulement du bassin avec un coefficient d'écoulement moyen de 9.4 %. Ainsi, c'est moins de 10 % de la pluie moyenne reçue qui peut être écoulée.

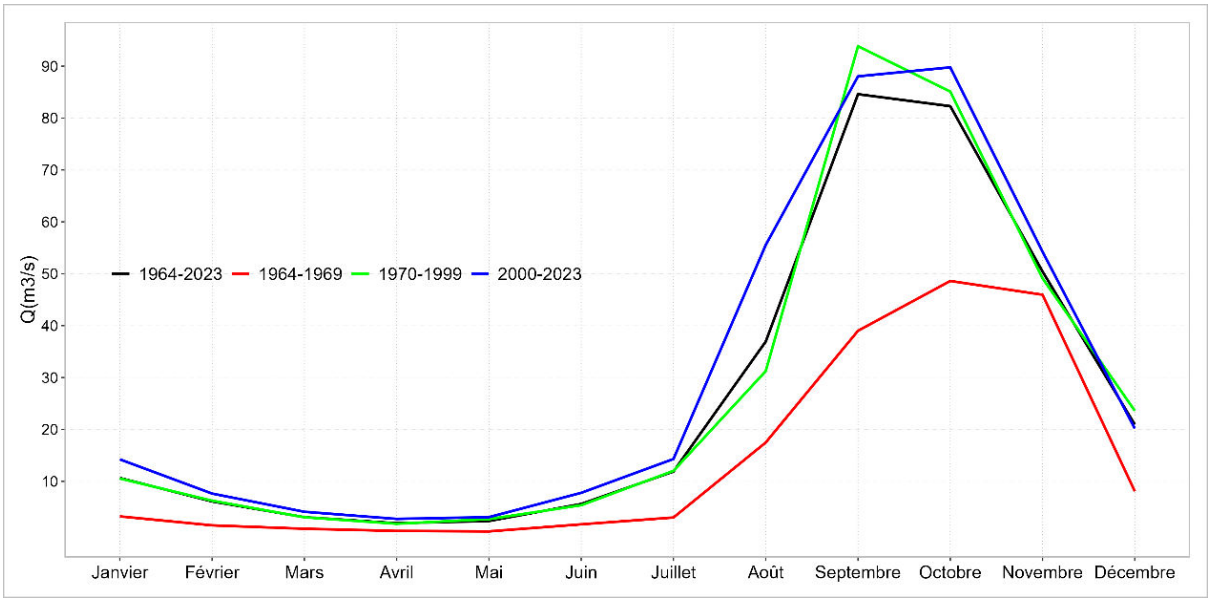


Figure 8 : Cycles saisonnier des débits de la station de Mbourao selon les différentes phases climatiques identifiées en Afrique de l'Ouest

Tableau 2 : Caractéristiques statistiques des débits mensuels (m^3/s) de la station de Mbourao

	janv	fevr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	Annuel
Moyenne	6.0	4.5	2.6	1.6	1.9	4.7	9.3	26.6	69.1	61.0	38.8	13.4	35.3
Médiane	3.4	1.3	1.1	0.5	0.7	2.4	5.4	21.7	60.5	33.0	33.2	8.1	26.5
Maximum	47.4	34.1	14.8	10.5	10.1	30.8	31.1	92.9	236.4	194.0	107.8	47.5	162.1
Minimum	0.2	-	0.1	-	-	0.1	1.1	3.7	6.3	8.0	2.2	1.6	0.9
Ecart Type	10.3	8.0	3.8	2.5	3.1	6.3	9.6	24.8	61.4	60.3	36.3	14.6	33.3
Coefficient de Variation	1.7	1.8	1.4	1.6	1.6	1.3	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	1.1	0.9
CMD (débit mois/année)	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.3	0.8	2.0	1.7	1.1	0.4	

Tableau 3 : Disponibilité saisonnière en eau du Mayo-Kebbi à Mbourao

	Débits mensuels (m^3/s)			Volumes mensuels (m^3)		
	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum
janv	6.0	0.2	47.4	16 153 303	589 248	126 956 160
fevr	4.5	0.0	34.1	10 968 442	-	82 518 912
mars	2.6	0.1	14.8	6 953 359	241 056	39 559 968
avr	1.6	0.0	10.5	4 068 206	-	27 293 760
mai	1.9	0.0	10.1	5 162 616	-	27 132 192
juin	4.7	0.1	30.8	12 286 974	285 120	79 704 000
juil	9.3	1.1	31.1	24 996 912	2 946 240	83 217 888
août	26.6	3.7	92.9	71 122 234	9 802 944	248 796 576
sept	69.1	6.3	236.4	178 994 372	16 407 360	612 645 120
oct	61.0	8.0	194.0	163 514 981	21 427 200	519 529 248
nov	38.8	2.2	107.8	100 459 440	5 780 160	279 365 760
déc	13.4	1.6	47.5	35 845 233	4 339 008	127 116 864

4. ANALYSE DE LA VULNERABILITE DES RESSOURCES EN EAU DU CAPBL AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Comme évoqué ci-haut, seul le bassin versant de Mbourao dispose des données hydrologiques. Par conséquent la vulnérabilité du CAPBL au changement climatique est analysée à partir de cette station hydrométrique qui a la particularité de contrôler les apports en eau douce du Mayo-Kébbi aux lacs Léré et Tréné. La méthodologie adoptée pour l'analyse de vulnérabilité des ressources en eau du CAPBL est basée sur l'assimilation des sorties des modèles climatiques fournies par l'experte climat dans le modèle hydrologique GR2M et GR4J calés avec les données historiques sur une période de référence.

4.1 Présentation du modèle hydrologique GR4J

Dans la littérature, plusieurs modèles hydrologiques (physiques, distribués ou semi-distribués, conceptuels) sont disponibles. Le choix d'un modèle est assujetti au contexte d'étude, aux variables d'entrée, à la disponibilité des données et à la performance du modèle. Les modèles physiques nécessitent plusieurs variables en entrée souvent indisponibles en contexte africain ce qui compromet leur utilisation. Les modèles conceptuels globaux sont moins consommateurs en données. Ainsi, les modèles hydrologiques globaux conceptuels GR2M et GR4J sont retenus pour la modélisation du cycle de l'eau. Le modèle hydrologique GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003) font partie des modèles du Génie Rural (GR) développé par l'Institut National de Recherche Agronomique et l'Environnement (INRAE). Parmi les nombreux modèles pluie-débit existants dans la littérature, la famille des modèles « GR » (Génie Rural) de INREA (GR1A, GR2M, GR4J, GR5J, GR6J) fait référence dans ce domaine en termes de simplicité de mise en œuvre, d'adaptabilité et de robustesse (Bodian et al., 2012, 2015, 2018). En outre la robustesse de ces modèles à simuler les écoulements en contexte

africain a été montrée dans plusieurs études (Paturel *et al.*, 1995 ; Ouédraogo *et al.*, 1998 ; Mahé *et al.*, 2005 ; Ardoin-Bardin *et al.*, 2009 ; Bodian *et al.,* 2012, 2015 et 2018) et ils sont peu consommateurs en données autres que les données climatiques mesurées par les services météorologiques.

Dans le cadre de cette mission deux modèles GR sont retenus : GR2M au pas de temps mensuel et GR4J au pas de temps journalier. La figue 9 donne le schéma conceptuel du modèle GR2M et GR4J. Le modèle de bilan d'eau GR2M contient deux paramètres à caler : X1 et X2. Le premier paramètre (X1) représente la capacité maximale du réservoir « sol ». Le deuxième paramètre (X2) représente la constante de vidange du réservoir « eau gravitaire ». GR4J est un modèle journalier avec 4 paramètres à optimiser : X1, capacité du réservoir de production (mm) ; X2, coefficient d'échanges souterrains (mm) ; X3, capacité à un jour du réservoir de routage (mm) et X4, temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (j). La version de GR2M et GR4J implémenté dans le package AirGR sous R (Delaigue *et al.*, 2019) est utilisée. Pour tourner ces deux modèles on a besoin au pas de temps mensuel et journalier de la pluie, de l'Évapotranspiration (ETP) et du débit. Le modèle GR2M permet d'évaluer la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques tandis que GR4J permet de mettre en exergue l'impact des changements climatiques sur les extrêmes hydrologiques que sont les crues et les étiages.

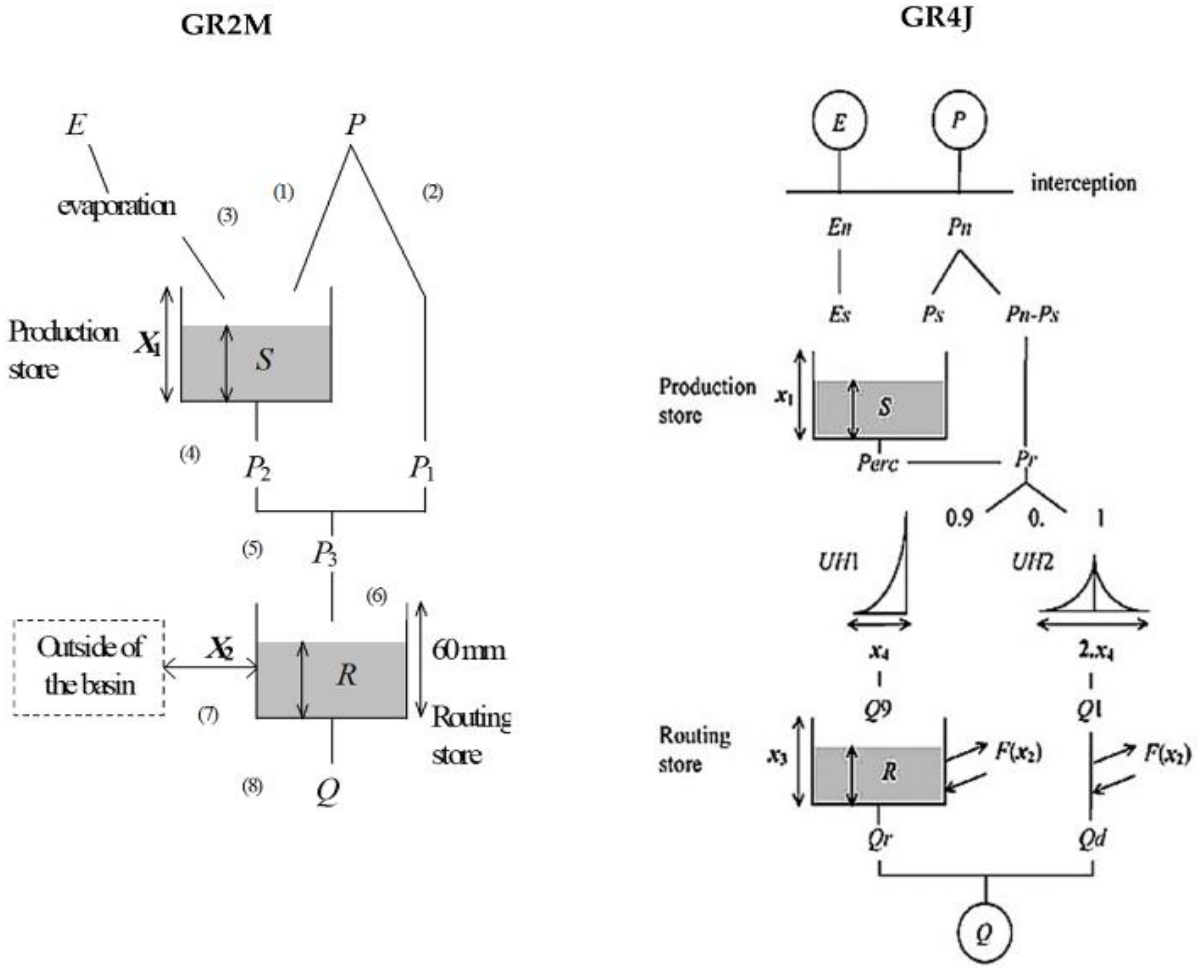


Figure 9 : Schéma conceptuel des modèles GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006) et GR4J (Perrin *et al.*, 2003)

4.2 Calcul de la pluie moyenne et de l'ETP moyenne des bassins versants

En hydrologie comme dans beaucoup de sciences de la terre et de l'environnement, le lien entre les constructions intellectuelles que sont les modèles et le monde réelle repose sur les données qui caractérisent ce dernier (Perrin, 2000). Les données sont aussi des éléments de référence indispensables pour évaluer la qualité des modèles. Les observations représentent donc un élément fondamental des démarches de modélisation en hydrologie. Les données d'entrées du modèle GR2M et GR4J sont la pluie et l'évapotranspiration potentielle au pas de temps mensuel et journalier comme rappelé plus haut. Les données CHIRPS utilisées pour l'analyse du cadre climatique du CAPBL sont

utilisées pour le calcul de la pluie moyenne du bassin versant de Mbourao. Pour ce faire, les limites du bassin versant de Mbourao sont superposées avec la grille des données CHIRPS afin d'extraire les données de pluie journalières CHRIPS au niveau des centroïdes des grilles qui intéressent le bassin versant en question (Figure 10). Ensuite, les données extraites sur chaque centroïdes de la maille de la grilles CHIRPS (grilles qui sont considérées comme des stations fictives) sont utilisées pour le calcul de la pluie moyenne du bassin versant par la méthode de l'inverse distance au carrée (Bodian et al., 2012; 2015a).

Pour ce qui est de l'évapotranspiration potentielle, est calculée en utilisant les données de températures maximale et minimale de la réanalyse NCEP de la NOAA. Les données journalières de la réanalyse NCEP s'étendent de 1948 à nos jours. Les températures sont choisies car elles sont généralement plus corrélées avec les observations contrairement aux autres variables produites par les réanalyses (Ndiaye *et al.*, 2021). Les stations virtuelles présentées à la Figure 11 sont utilisées pour l'extraction des températures (maximale et minimale).

A partir des valeurs maximale et minimale de température extraite, la méthode à base de température de Droogers et Allen (2002) est utilisée pour calculer l'évapotranspiration. Cette méthode est choisie en raison de sa simplicité et de sa performance dans l'estimation de l'évapotranspiration (Ndiaye *et al.*, 2020; 2024). En outre, les modèles GR choisis sont moins sensibles aux erreurs d'ETP (Andréassian *et al.*, 2004 ; Oudin, 2004; Ndiaye et al., 2024). A cet effet, une méthode simple à base de température ou de radiation solaire peut avoir les mêmes résultats de simulations qu'une méthode complexe nécessitant plusieurs variables climatiques (Oudin *et al.*, 2005 ; Ndiaye *et al.*, 2024). La formulation mathématique de la méthode de Droogers et Allen (2002) est la suivante :

$$ETP = 0{,}0025\times(T+16{,}8)\times(Tmax-Tmin)^{0{,}5}\times Ra$$

Où T est la température moyenne, Tmax température maximale, Tmin température minimale et Ra est la radiation extraterrestre qui est exprimée par les paramètres de position de la station.

Dans l'approche d'une modélisation globale, l'ETP calculée au niveau des stations fictives de la figure 10 sont utilisée pour le calcul de l'ETP moyenne du bassin versant par la méthode de l'inverse distance au carré (Bodian et al., 2012; 2015a) comme pour les pluies moyennes. Ensuite les pluies moyennes et l'ETP moyenne journalières sont utilisées pour calculer les pluies moyennes et l'ETP moyenne mensuelles. Les données de pluie et d'ETP moyenne journalières et mensuelles sont utilisé pour le calage des modèles hydrologiques avec les débits sur la période 1981-2023 qui a en commun les données de pluie, d'ETP et de débit.

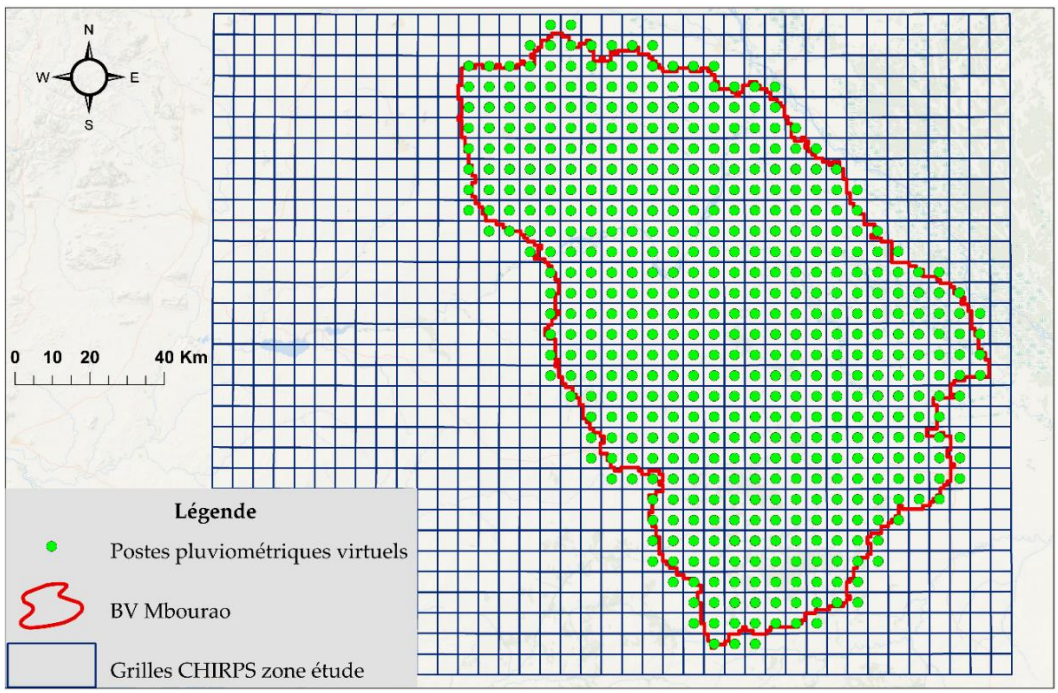


Figure 10 : Grilles utilisées pour l'extraction des données de pluies journalières CHIRPS

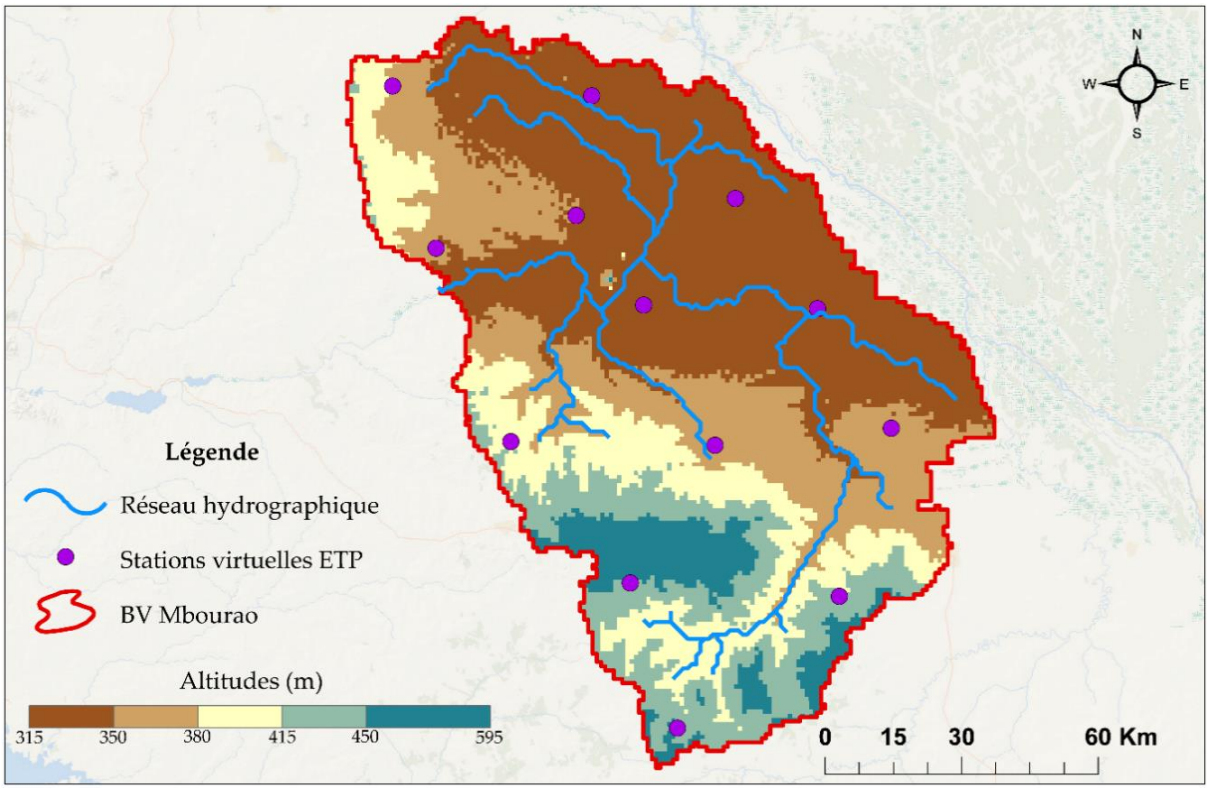


Figure 11 : Stations fictives utilisées pour l'extraction des données de température minimale et maximale NCEP

4.3 Calage/validation croisée des modèles GR2M et GR4J

Une fois la structure de modélisation choisie et ses variables d'entrée déterminées, il est nécessaire d'en estimer certains de ses paramètres. On se réfère généralement à cette étape en parlant de calage (ou calibration) du modèle. Ainsi, caler un modèle consiste à rapprocher le plus possible le comportement du modèle de celui du bassin modélisé, c'est-à-dire, reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin (Serna C.R, 2005). En général, la méthode de rapprochement de ces comportements consiste en l'optimisation des paramètres du modèle. Dans la pratique, il existe deux types de techniques pour caler un modèle : les techniques manuelles et les techniques automatiques (Serna C.R, 2005). Dans le cadre de cette étude un calage automatique via une itération est choisi.

Le choix des périodes de calage/validation est guidé par la profondeur temporelle des données hydrologiques et climatiques qui seront collectées. Compte tenu de la nature courte des données disponibles (période 1981-2023) et de l'importance des lacunes dans les séries de débits, un calage global sur la période des données disponible a été mis en œuvre aussi bien à l'échelle mensuelle que journalière. Les périodes de calages ont été précédée par une période d'initialisation des modèles de deux ans.

4.4 Évaluation de la performance des modèles

L'optimisation (ou calage) des paramètres du modèle nécessite la définition d'une fonction objective quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la différence entre les débits observes et les débits simulés. On peut distinguer deux types de critères d'évaluation des performances des modèles (Perrin C, 2000) : les critères quantitatifs qui font appel à des évaluations numériques. Les critères qualitatifs, eux, s'appuient généralement sur des observations graphiques (hydrogrammes comparant les débits observés et simulés). Ils permettent de confronter, par des illustrations, les simulations à la réalité observée et de détecter certaines anomalies mal décelables par les critères numériques classiques (Perrin C, 2000).

Dans cette étude, le Kling-Gupta Efficiency (KGE ; Gupta et al., 2009) et le pourcentage des biais (PBIAS) (Tableau 4) couramment utilisés sont utilisés pour évaluer la performance des modèles choisis. Le KGE est une amélioration du critère de Nash (NSE ; Nash and Sutcliffe, 1970) qui évalue à la fois la corrélation (r), le biais (β) et la variabilité (α) (Gupta et al., 2009). Les valeurs du KGE varient entre -∞ et 1, où l'unité implique un ajustement parfait par rapport aux données in situ. Quant au PBIAS, il traduit en pourcentage l'écart moyen qui existe entre deux variables. Le PBIAS varie de -∞ à +∞ et une valeur de PBIAS positive ou négative représente une surestimation ou une sous-estimation de la variable estimée, tandis que les valeurs de PBIAS proches de 0 indiquent une bonne performance de la variable évaluée. Pour ce travail, les fonctions de ces critères développées dans le packages hydroGOF sous R sont utilisées.

Tableau 4 : Critères d'évaluation statistique, formules, étendues et valeurs optimales

Critères	Formules	Étendues	Valeurs optimales
KGE	$1-\sqrt{(r-1)^2+(\beta-1)^2+(\alpha-1)^2}$	-∞, 1	1
PBIAS (%)	$\left[\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_{Est}-P_{Obs})}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_{Obs})}\right]*100$	-∞, +∞	0

Où KGE coefficient d'efficience de Kling-Gupta composé de trois variables : r le coefficient de corrélation, β les biais et α la variabilité entre les deux variables évaluées ; PBIAS pourcentage des biais entre les variables observée et calculée.

Le tableau 5 et les figures 12 et 13 donnent la performance des modèles. Globalement, le modèle GR2M et GR4J sont robustes pour la simulation des débits observés. Les valeurs de KGE sont supérieures à 0.60 et celles des PBIAS très faibles. Cependant, il faut noter que parfois le modèle a du mal à bien simuler les pics de crue et les débits d'étiage.

Tableau 5 : Performance du modèle GR2M et GR4J en calage

	Paramètres des modèles				Critères d'évaluation	
	X1	X2	X3	X4	KGE	PBIAS
GR4J	417.6	-7.131	704.3	10.4	0.73	0.6
GR2M	2156.7	0.94	-	-	0.75	2.3

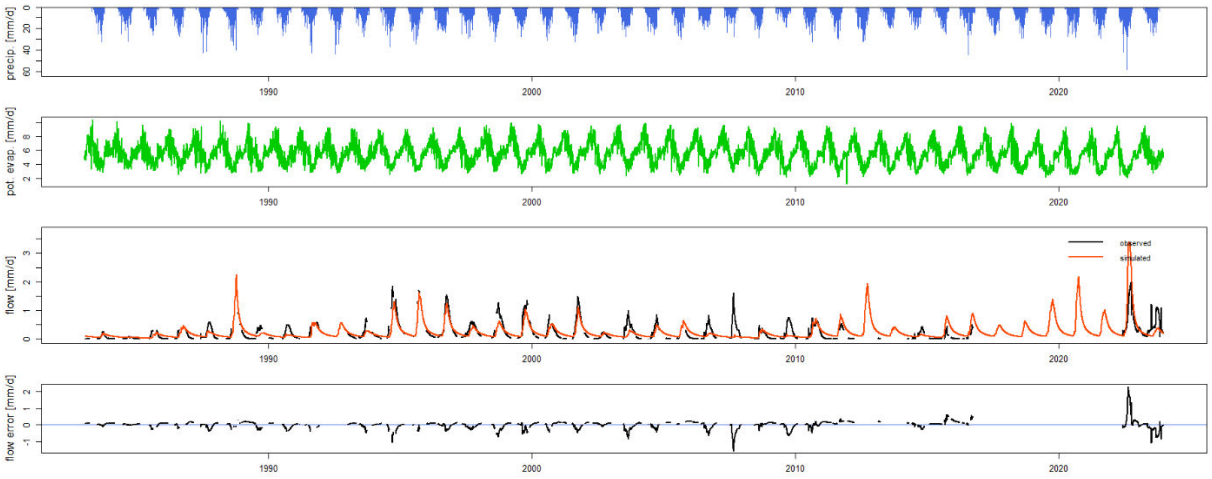


Figure 12 : Hydrogramme des débits observés et calculés par le modèle GR4J à la station de Mbourao sur la période 1981-2023

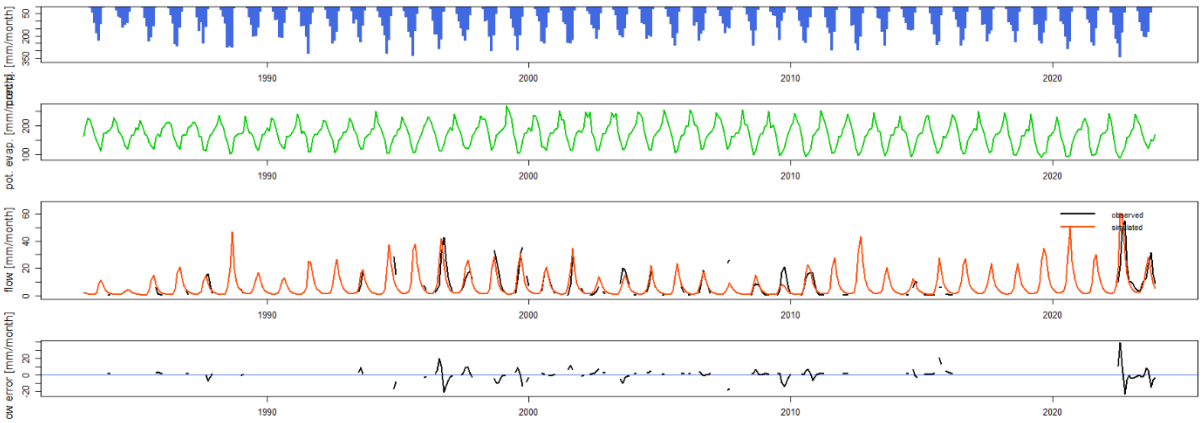


Figure 13 : Hydrogramme des débits observés et calculés par le modèle GR2M à la station de Mbourao sur la période 1981-2023.

4.5 Projection des écoulements futurs et analyse de la vulnérabilité des ressources en eau du CAPBL au changement climatique

Une fois les paramètres qui traduisent au mieux la relation pluie-débit choisie (Tableau 5), ces derniers sont utilisés avec les scénarios climatiques fournis par l'experte climat pour la simulation des écoulements futurs. Les scénarios SSP3-7.0 et SSP5-8.5 d'ETP (calculés à partir des scénarios de température) et de pluie aux horizons 2035 et 2060 de 15 modèles climatiques de l'exercice CMIP6 du dernier rapport du GIEC (Tableau 6) sont utilisés en entrée des modèles hydrologiques calés avec les données observées pour faire des projections de débits afin d'analyser la vulnérabilité des ressources en eau futures conditions climatiques. On suppose que la relation pluie-débit reste identique à celle formulée dans les modèles hydrologiques, calé avec les séries chronologiques observées. Ensuite, les débits moyens mensuels aux différents horizons (2035 et 2060) seront calculés pour les comparer aux débits mensuels observés sur la période 1981-2023 afin d'appréhender les impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques des bassins versants mais aussi sur les disponibilités en eau de surface.

Tableau 6 : Liste des modèles climatiques utilisés dans l'étude

N°	Pays	Institut	Modèle climatique
1	Angleterre	NERC / Met Office	UKESM1-0-LL
2	Thaïlande	Research *Center* for Environmental Changes	TaiESM1
3	Norvège	NorESM Climate modeling Consortium (NCC)	NorESM2-MM
4			NorESM2-LM
5	Japon	Meteorological Research *Institute*	MRI-ESM2-0
6	Allemagne	MPI	MPI-ESM1-2-LR
7			MPI-ESM1-2-HR
8	Japon	Research Center for Advanced Science and Technology (Tokyo)	MIROC6
9			MIROC-ES2L
10	Chine	Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG)	FGOALS-g3
11	Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Victoria	CanESM5
12	Europe Méditerranée	Euro-Mediterranean Center on Climate Change	CMCC-ESM2
13	Chine	Beijing Climate *Center* (BCC)	BCC-CSM2-MR
14	Australie	Centre for Australian Weather and Climate Research	ACCESS-ESM1-5
15			ACCESS-CM2

4.5.1 Évolution des forçages climatiques dans le bassin de Mbourao aux horizons 2035 et 2060

L'évolution des forçages climatiques à l'horizon 2035 et 2060 selon les deux scénarios SSP3.7-0 et SSP5.8-5 par rapport à la période de référence 1981-2023 est présenté à la figure 14 et 15. Elle varie en fonction des modèles climatiques et des différents scénarios. Ainsi, pour les deux scénarios aux horizon 2035 et 2060, l'ensemble des modèles prévoient une augmentation des pluies moyenne du bassin comprise entre 20 à 54 mm. L'ETP moyenne varie en deux phase avec une baisse durant la saison sèche et une augmentation durant la saison pluvieuse pour les deux scénarios et les deux horizons. Globalement, même s'il n'y a pas de consensus entre les modèles climatiques surtout pour l'amplitude de l'évolution des forçages climatique, la moyenne de ces modèles annoncent un changement de précipitation à l'horizon 2035 et 2060 pour les deux scénarios assez marqués. La concordance des modèles est plus grande dans le cas des températures et ils prévoient toujours une augmentation des températures (Paturel 2014, Amadou *et al.* 2014, Bop *et al.* 2014, Bodian et al. 2015b). Pour le bassin versant de Mbourao, le réchauffement s'accompagne d'une augmentation de l'ETP durant la saison des pluies. Par contre, durant la saison sèche on assiste à une baisse de l'ETP (Annexe 3). En effet, plusieurs travaux (Donohue *et al.*, 2010 ; Ndiaye et al., 2020a ; Ndiaye et al., 2020a et Ndiaye et al., 2021) soulignent que l'augmentation de la température n'implique pas nécessairement une augmentation de l'ETP car beaucoup d'autres variables entrent en ligne de compte comme le vent, l'humidité relative et l'albédo. Ainsi, sur le bassin du Bani (affluent du fleuve Niger), Paturel (2014) remarque que, depuis 1970, alors que la température moyenne journalière a augmenté, l'ETP calculée à partir des données CRU a diminué de 1 %.

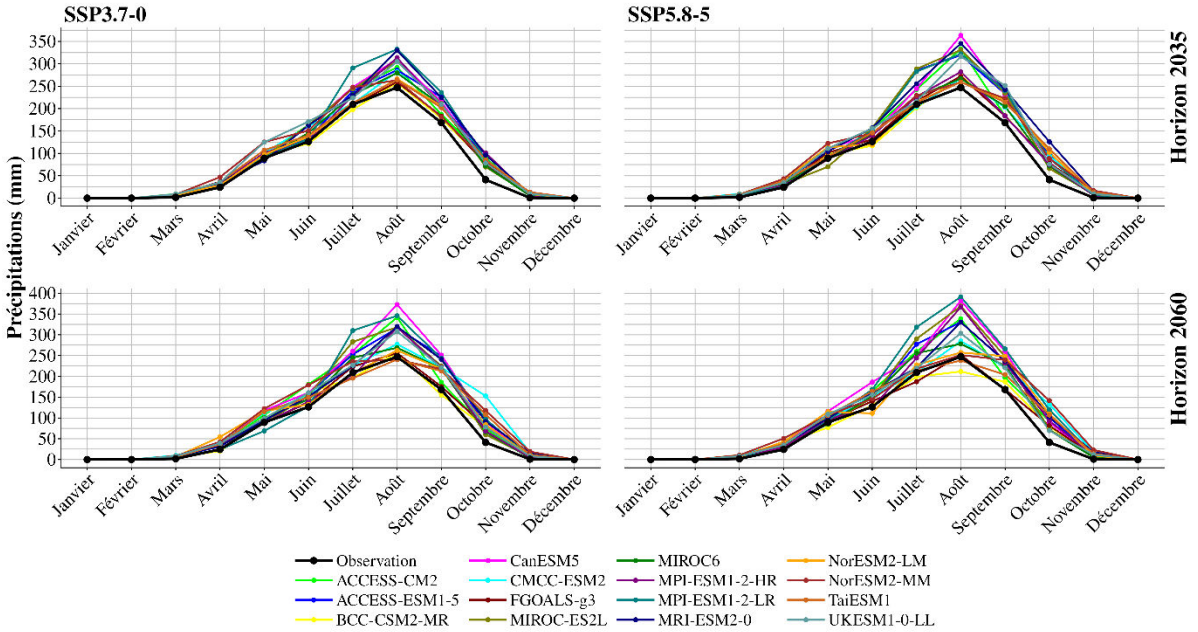


Figure 14 : Évolution de la pluie moyenne du bassin de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023

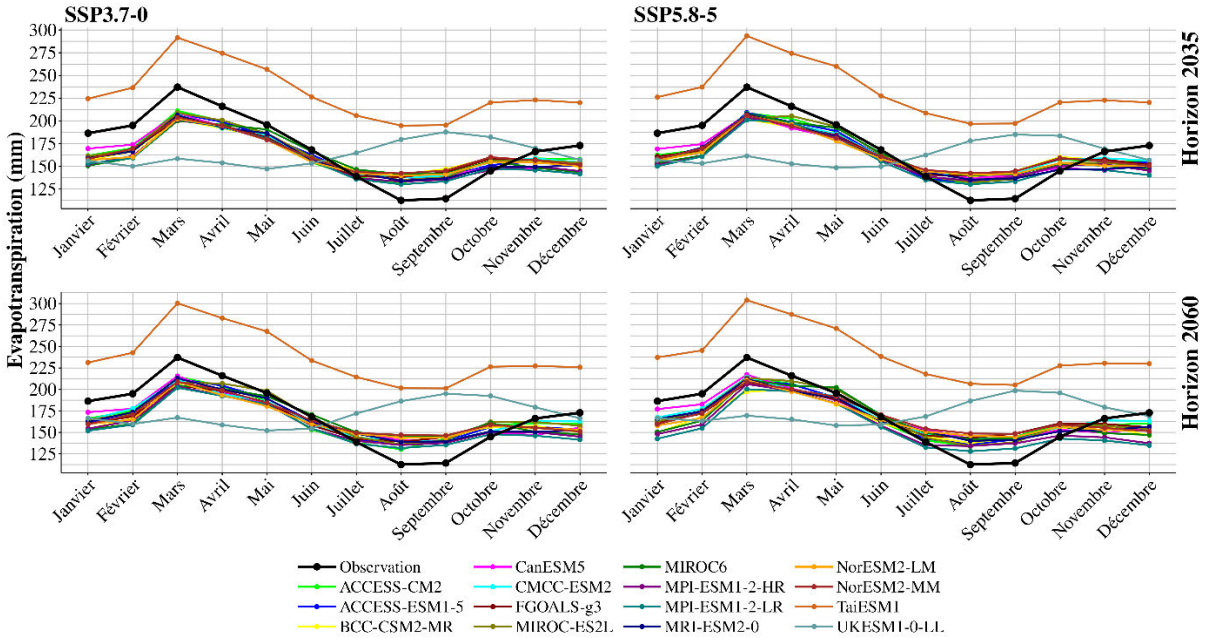


Figure 15 : Évolution de l'ETP moyenne du bassin de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023

4.5.2 Évolution des écoulements dans le bassin de Mbourao aux horizons 2035 et 2060

Les sorties de modèles climatiques ont été utilisés pour forcer le modèle hydrologique GR2M au pas de temps mensuel et le modèle GR4J au pas de temps journalier afin de faire des projections sur les apports en eau du Mayo-Kebbi à Mbourao à l'horizon 2035 et 2060. La figure 16 présente l'évolution des débits mensuels par rapport à la période de référence (se conférer à l'Annexe 3 pour plus de détails). La figure 17 présente une série de boîtes à moustaches qui montrent les statistiques des débits journaliers projetés aux deux horizons par rapport à ceux de la période de référence. La moyenne calculée à partir des simulations des quinze modèles climatiques (multi modèles ensemble) donne une augmentation des écoulements à l'horizon 2035 de 29 m^3/s pour le scénario SSP3.7-0 et de 34 m^3/s pour le scénario SSP5.8-5. A l'horizon 2060, le multi modèles ensemble prévoit une augmentation des écoulements assez proche des valeurs obtenus pour l'horizon 2035. L'augmentation des écoulements de manière global risque de s'accompagner par une intensification du cycle hydrologique (Wilcox et al., 2018) avec une augmentation de l'amplitude des crues (Figure 17)

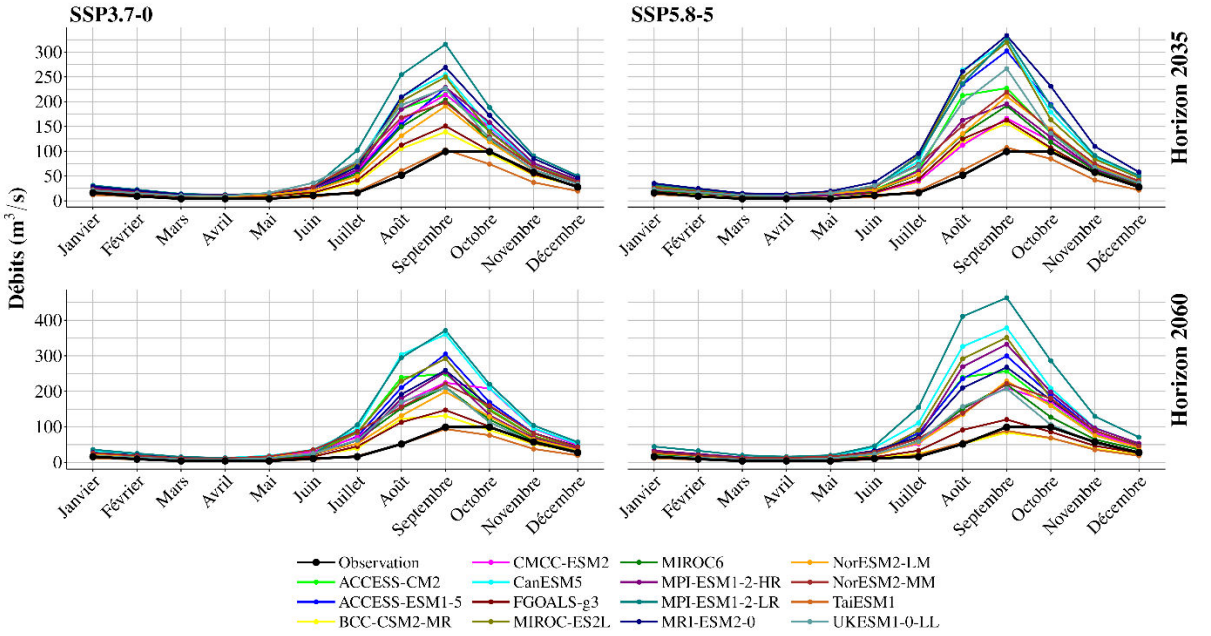


Figure 16 : Évolution des débits mensuels de la station de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023

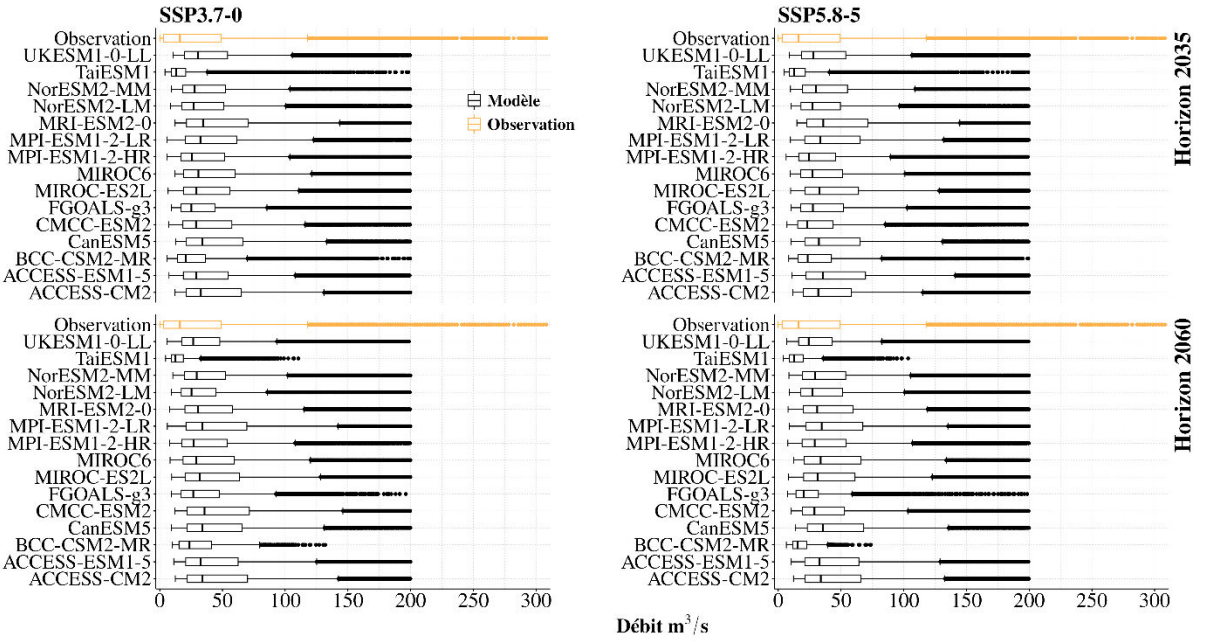


Figure 17 : Évolution des débits journaliers de la station de Mbourao à l'horizon 2035 et 2060 par rapport à la période de référence 1981-2023

Globalement, les résultats obtenus de l'assimilation des sorties des modèles climatiques dans les modèles hydrologiques GR2M et GR4J pour l'analyse des débits futurs montrent que dans le bassin Mayo-Kebbi, les projections climatiques indiquent une augmentation des écoulements qui risque de s'accompagner d'une intensification du cycle hydrologique. L'augmentation des disponibilités en eau par rapport à la période de référence 1981-2023 nous semble réaliste au regard de l'évolution de la pluviométrie et des écoulements ces dernières années ces dernières années. En effet, les récentes travaux de Bodian et al. (2020) à partir des données du fleuve Sénégal, qui a la particularité d'avoir des données sur de longue période permettant de mettre en phase les différents cycles hydro-climatiques, montrent une reprise pluviométrique dans le bassin du fleuve Sénégal (Figure 18) ces dernières décennies. Cette reprise pluviométrique a entrainé une hausse des débits des différents affluent du fleuve Sénégal. En effet, la figure 19 qui donne l'évolution des débits mensuels des principaux affluents du fleuve Sénégal selon les différentes phases climatiques illustrent bien l'augmentation des débits ces

dernières années par rapport à la période sèche. Donc, l'hypothèse d'une légère augmentation des écoulements à l'horizon 2035 et 2060 dans le CAPBL nous semble réaliste surtout que la période de référence qui sert de base de comparaison comporte une longue phase sèche bien documentée en Afrique sub-saharienne.

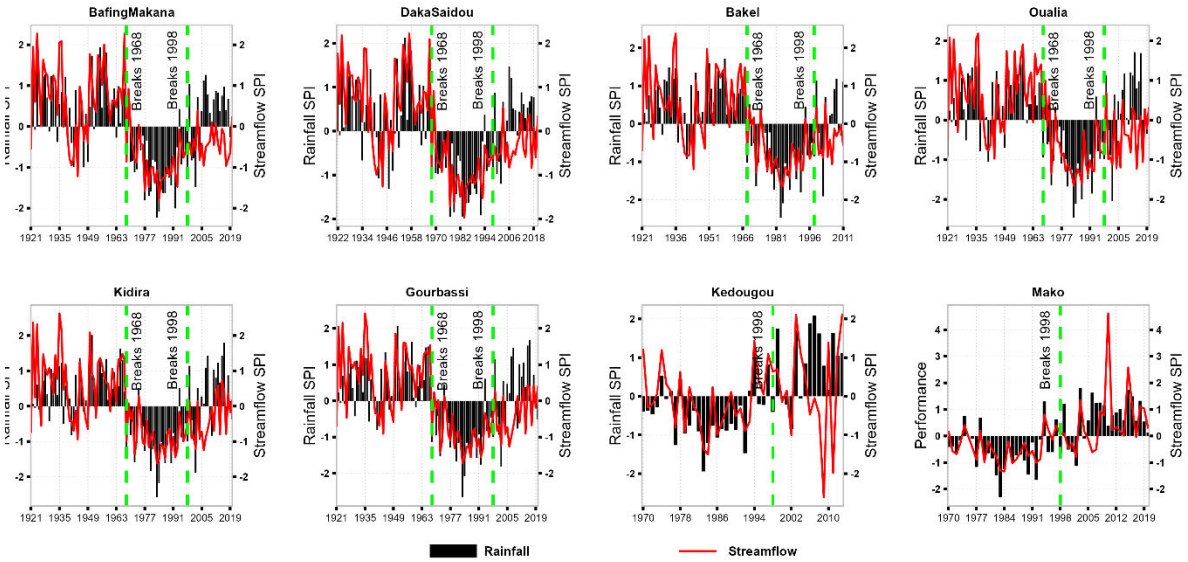


Figure 18 : Évolution pluie débit dans les principaux cours d'eau du Sénégal (les traits verts sur les graphiques montrent les années de rupture dans les séries de pluie et de débit selon le test de petitt)

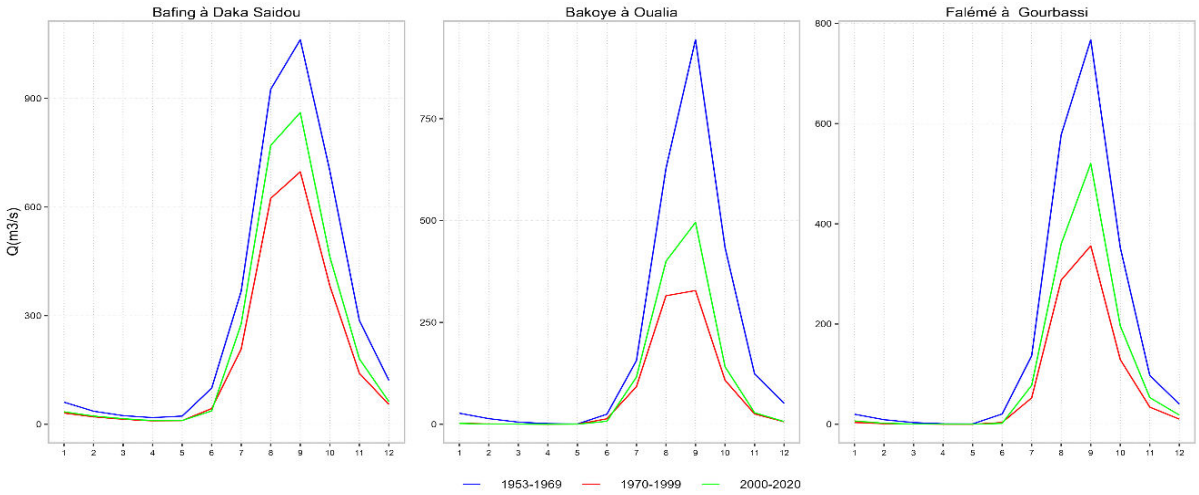


Figure 19 : Cycle saisonnier des débits des principaux affluents du fleuve Sénégal selon les différentes périodes climatiques

4.5.3 Impact potentiel de l'évolution des ressources en eau sur les secteurs d'activités

L'objectif principal de ce rapport est d'évaluer la vulnérabilité climatique des ressources en eau (eau de surface et eau souterraine) du CAPBL afin de définir des actions d'adaptation à mettre en œuvre dans les deux zones d'intervention du projet. Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des modèles prévoient une augmentation des pluies. L'ETP moyenne varie en deux phase avec une baisse durant la saison sèche et une augmentation durant la saison pluvieuse. La connaissance de l'évolution de l'ETP est importante pour plusieurs raisons. En effet, à l'échelle du bassin versant du CAPBL, 60% à plus de 80% des apports pluviométriques peuvent être perdus par évaporation et transpiration dans les régions arides et semi-arides (Mjejra, 2015). L'estimation de l'évapotranspiration est donc importante pour la gestion et la planification des ressources en eau en perspective des usages agropastoraux et domestiques. Dans le domaine agricole, l'évapotranspiration joue un rôle crucial dans la détermination des besoins en eau des cultures ainsi que la planification et la programmation de l'irrigation (Patle *et*

al., 2019). Ainsi, adopter une technique d'irrigation plus économe en eau revient à connaitre les besoins en eau de chaque plante en fonction des conditions climatiques du milieu. Une estimation précise de l'évapotranspiration pourrait permettre d'adopter une technique d'irrigation adéquate et de réduire les coûts de pompage de l'eau. La connaissance de l'évapotranspiration permet également de mieux veiller à la gestion des réservoirs. L'évolution du climat dans le futur telle que prévue par les forçages climatiques entrainera une augmentation des disponibilités en eau. Les résultats issus des simulations des débits futurs montrent que la moyenne calculée à partir des projections d'écoulement des quinze modèles climatiques (multi modèles ensemble) donne une augmentation des écoulements dans le futur. L'évolution du climat, des écoulements, de la population et la mise en œuvre des politiques de développement va entrainer une augmentation des besoins en eau des différents secteurs d'activités. Cette évolution peut entrainer des tensions autour des eaux de surface entre différents usagers surtout durant la saison sèche à cause de l'irrégularité du Mayo-Kebbi et de ses affluents.

5. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette étude vise essentiellement à évaluer la vulnérabilité aux changements climatiques du complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré (CAPBL). Cette étude de vulnérabilité des ressources en eau du CAPBL est une composante des analyses de vulnérabilité menées dans le cadre du projet ELLESadAPt afin de proposer des mesures d'adaptation des populations du CAPBL aux changements climatiques. Ainsi, l'objectif de la mission est de fournir une analyse de la vulnérabilité climatique des ressources en eau. Du point de vue hydrologique, la Réserve est parcourue d'Est en Ouest par le cours d'eau principal du Mayo-Kebbi. En aval de son cours, le Mayo-Kebbi donne naissance à deux Lacs, celui de Tréné et celui de Léré. Les apports en eau aux deux lacs dépend étroitement des écoulements du Mayo-Kebbi. Ce cours d'eau dispose de peu d'information hydrométriques. La seule station qui dispose de données de débit est celle de Mbourao. Donc, l'analyse de vulnérabilité de la CAPBL aux changements climatiques est faite à partir des données de la station de Mbourao qui contrôle les apports en eau douce à la réserve.

La méthodologie utilisée pour l'analyse de vulnérabilité est basée sur l'assimilation des sorties de modèles climatiques de l'exercice CMIP6 dans deux modèles hydrologiques au pas de temps mensuel (GR2M) et journalier (GR4J) calés avec des données observées sur la période 1981-2023. Au préalable, les disponibilités en eau du Mayo-Kebbi et leur variabilité ont été analysées sur la période de référence. Les résultats obtenus, montre que sur la période 1981-2023, le Mayo-Kebbi a un débit moyen annuel de 41 m^3/s ce qui correspond à un volume de 1112 million de m^3. La faiblesse des débits pour certaines années s'explique par la faible capacitée d'écoulement du bassin avec un coefficient d'écoulement moyen de 9.4 %. Ainsi, c'est moins de 10 % de la pluie moyenne reçue qui peut être écoulé. Le maximum hydrologique est situé en septembre avec des débits moyens mensuels de 69 m^3/s.

L'évolution des forçages climatiques à l'horizon 2035 et 2060 selon les deux scénarios SSP3.7-0 et SSP5.8-5 par rapport à la période de référence 1981-2023 montre que l'ensemble des modèles prévoient une augmentation des pluies moyenne du bassin comprise entre 20 à 54 mm. L'ETP moyenne varie en deux phase avec une baisse durant la saison sèche et une augmentation durant la saison pluvieuse pour les deux scénarios et les deux horizons. Même s'il n'y a pas de consensus entre les modèles climatiques surtout pour l'amplitude de l'évolution des forçages climatique, la moyenne des modèles (multi modèles ensemble) annonce un changement de précipitation à l'horizon 2035 et 2060 pour les deux scénarios assez marqués.

Les sorties de modèles climatiques ont été utilisés pour forcer le modèle hydrologique GR2M au pas de temps mensuel et le modèle GR4J au pas de temps journalier afin de faire des projections sur les apports en eau du Mayo-Kebbi à Mbourao à l'horizon 2035 et 2060. Les résultats obtenus montrent que la moyenne calculée à partir des simulations des quinze modèles climatiques (multi modèles ensemble) donne une augmentation des écoulements à l'horizon 2035 de 29 m^3/s pour le scénario SSP3.7-0 et de 34 m^3/s pour le scénario SSP5.8-5. A l'horizon 2060, le multi modèles ensemble prévoit une augmentation des écoulements assez proche des valeurs obtenus pour l'horizon 2035. L'augmentation des écoulements de manière global risque de s'accompagner par une intensification du cycle hydrologique avec une augmentation de l'amplitude des crues. Cette augmentation des écoulements par conséquent des disponibilités en eau du Mayo-Kebbi est en accord avec la tendance actuelle observée des pluies en Afrique de l'ouest (Bodian et al., 2020) caractérisée par un retour à des

conditions humides même si les volumes précipitées sont encore inférieurs aux quantités d'avant la grande sécheresse des années 1970. L'intensification du régime hydrologique est en accord avec les travaux de Wilcox et al (2018).

Cependant, ces résultats obtenus doivent être maniés avec beaucoup de précaution en raison de quelques difficultés inhérentes aussi bien à la modélisation hydrologique qu'aux incertitudes issues des modèles climatiques. En effet, en dépit de nombreux progrès des modèles climatiques remarqués ces dernières années, on constate également que leurs sorties brutes sont affectées de biais plus ou moins importants (Ardoin-Bardin *et al.* 2009) qui excluent leur utilisation sans appliquer des méthodes de correction (Paturel, 2014). Cependant, ces méthodes ont généralement l'inconvénient de remettre en cause les différentes lois physiques sur lesquelles sont basés ces modèles (Ehret *et al.* 2012). Il faut aussi tenir compte des difficultés associées au transfert des paramètres du modèle hydrologique calés sur des périodes autres que celles qui ont servi au calage. Car, les valeurs des paramètres correspondent à la conjoncture d'une situation climatique et d'une situation environnementale rencontrées à un moment ou pendant une période donnée sur un bassin versant, ces situations climatiques et environnementales pouvant conduire à la mise en jeu de processus dominants de génération des écoulements très différents selon les périodes (Coron *et al.* 2012). Cependant, l'existence de périodes climatiques contrastées comportant des ruptures statistiques dans l'échantillon de calage/validation permet de minimiser au maximum ces erreurs.

Compte tenu de toutes ces contraintes, les résultats obtenus ne peuvent pas être présentés en termes de prévision. Il est important alors de les considérer comme une approche sur l'évolution de la ressource en eau en termes de risque sous des hypothèses particulières de changements de climat.
Au regard, des différents résultats obtenus par l'analyse de vulnérabilité des ressources en eau, il ressort les recommandations suivantes en matière de mesures d'adaptation à mettre en œuvre au niveau du CAPBL :

- Renforcer le suivi quantitatif et qualitatif des ressources en eau (eau de surface et eau souterraine) afin de détecter les différents changements ;
- Renforcer le suivi des différents usages de l'eau (cartographie détaillée des acteurs, des installations de captage, des prélèvements et des pratiques agricole et d'irrigation, inventaire des acteurs et sites de consommation : positionnement et évolution des superficie, des ouvrages de prélèvement, des volumes pompés, des calendriers culturaux, des modes d'irrigation, etc.) ;
- Amélioration de l'accès aux services climatique et d'assurance pour une meilleure adaptation aux changements climatiques afin de limiter les chocs climatiques pour l'agriculture pluviale ;
- Améliorer la mobilisation des ressources en eau pour améliorer l'accès à l'eau aux populations de la zone d'intervention du projet ;
- Mise en place de système de prévision des risques associés à l'eau (crue et étiage) pour améliorer la résilience des populations dans un contexte de variabilité et de changement climatique (élaboration des outils de gestion des lacs comme les courbes auteur-volume-surface, systèmes d'alerte précoce pour l'appui-conseils, l'atténuation de leurs effets des aléas naturels sur l'environnement humain et socioéconomique) ;
- Améliorer l'accès à l'eau aux différents secteurs d'activité en tenant compte des ODD ;
- Renforcement des capacités des acteurs pour une meilleure optimisation de l'utilisation des ressources en eau (promotion de l'utilisation efficace et efficiente des ressources en eau) ;
- Mettre en place un dispositif organisationnel et programmatique de capacitation et d'appui-conseil des irrigants dans le domaine des bonnes pratiques d'utilisation des engrais chimiques et autres produits de traitements respectueux de l'environnement et de l'intégrité des ressources en eau ;
- Mettre en place des dispositifs réglementaires pour protéger les sources d'eau (vulgarisation des textes, application des textes).

Annexes

Annexe A

Références bibliographiques

6. ANNEXES

6.1. Références bibliographiques

- Amadou A., Gado D. A., Seidou O., Seidou S. I. & Ketvara S (2014): Changes to flow regime on the Niger River at Koulikoro under a changing climate. Hydrological Sciences Journal, DOI :10.1080/02626667.2014.916407
- Ardoin-Bardin, S.; Dezetter, A.; Servat, E.; Paturel, J.E.; Mahé, G.; Niel, H.; Dieulin, C (2009) : Using General Circulation Model Outputs to Assess Impacts of Climate Change on Runoff for Large Hydrological Catchments in West Africa. Hydrol. Sci. J., 54, 77–89.
- Ashouri, H., Hsu, K. L., Sorooshian, S., Braithwaite, D. K., Knapp, K. R., Cecil, L. D., ... & Prat, O. P. (2015). PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 96(1), 69-83
- Baastel (2024) : Projection et modélisation climatique à échelle réduite sur le Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré, Rapport du projet ELLESadAPt, 40 pages.
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & Roo, A. D. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. Hydrology and Earth System Sciences, 21(1), 589-615.
- Bodian, A. (2011). Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau: application dans le haut bassin du Fleuve Sénégal. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 211 pages.
- Bodian A., Dezetter A. et Dacosta H. (2012): Apport de la modélisation hydrologique pour la connaissance de la ressource en eau: Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Climatologie, 9, 109-125 p.
- Bodian, A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Géographie Physique et Environnement (Physio-Géo). 8. 10.4000/physio-geo.4243.
- Bodian A., Dezetter A., Dacosta H. (2015a): Rainfall-Runoff Modelling of Water Resources in the Upper Senegal River Basin. International Journal of Water Resources Development, http://dx.doi.org/10.1080/07900627.2015.1026435
- Bodian A, Dezetter A et Diop L (2015b): Evolution des apports en eau au barrage de Manantali à l'horizon 2050. Conférence Internationale FRIEND/UNESCO sur l'hydrologie des grands bassins africains, Hammamet, Tunisie, 26-30 octobre 2015.
- Bodian, A., Bacci, M. et Diop, M. (2015c). Impact potentiel du changement climatique sur les ressources en eau de surface du bassin de la Casamance à partir des scénarios du CMIP5. In: Programme d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal (PAPSEN). Rapport n° 16, pp. 13–16, 49.
- Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018): Future climate change impacts on streamflows of two main West Africa River Basins: Senegal and Gambia. Hydrology, 5(1), 21.
- Bodian A., Diop L., Panthou G., Dacosta H., Deme A., Dezetter A., Ndiaye P.M., Diouf I., Vichel Th., (2020): Recent Trend in Hydroclimatic Conditions in the Senegal River Basin, Water, 12, 436, doi:10.3390/w12020436
- Bodian A., Ndiaye P.M., Diop SB., Diop L., Dezetter A., Ogilvie., Djaman K. (2024): Evaluation and calibration of alternative methods for estimating reference evapotranspiration in the main hydrosystems of Senegal: Senegal, Gambia and Casamance River Basins, Proc. IAHS, 385, 415–421, 2024, https://doi.org/10.5194/piahs-385-415-2024
- Bop, M., Amadou, A., Seidou, O., Kébé, C.M.F., Ndione, J.A., Sambou, S. and Sanda, I.S. (2014) Modeling the Hydrological Dynamic of the Breeding Water Bodies in Barkedji's Zone. Journal of Water Resource and Protection, 6, 741-755. http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.68071
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & Roo, A. D. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25 global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. Hydrology and Earth System Sciences, 21(1), 589-615.

- Centella-Artola, A., Bezanilla-Morlot, A., Taylor, M. A., Herrera, D. A., Martinez-Castro, D., Gouirand, I., ... & Alpizar, M. (2020). Evaluation of Sixteen Gridded Precipitation Datasets over the Caribbean Region Using Gauge Observations. Atmosphere, 11(12), 1334.
- Delaigue, O., Thirel, G., Coron, L., Brigode, P., & Andréassian, V. (2019). Les modèles pluie-débit GR en open-source pour l'enseignement et la recherche. In 3es Journées de modélisation des surfaces continentales (p. 1).
- Donohue, R.J., Mc Vicar, T.R., et Roderick, M.L., (2010) Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. Journal of Hydrology, 386, 186–197
- Droogers, P., & Allen, R. G. (2002): Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. Irrigation and drainage systems, 16, 33-45.
- Coron, L.; Andréassian, V.; Perrin, C.; Lerat, J.; Vaze, J.; Bourqui, M.; Hendrickx, F (2012) : Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. Water Resour. Res., 48.
- Ehret, U.; Zehe, E.; Wulfmeyer, V.; Warrach-Sagi, K.; Liebert, J (2012) : Should we apply bias correction to global and regional climate model data? Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 9, 5355–5387.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., ... & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. Scientific data, 2(1), 1-21.
- Gomis D (2000): Synthèse hydrologique du fleuve Gambie en amont de Gouloumbou. Mémoire de Maîtrise, département de géographie, FLSH, UCAD, 128pages.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of hydrology, 377(1-2), 80-91.
- Jiang, S., Zhang, Z., Huang, Y., Chen, X., & Chen, S. (2017). Evaluating the TRMM Multisatellite Precipitation Analysis for extreme precipitation and streamflow in Ganjiang River basin, China. Advances in Meteorology, 2017.
- Le Moine, N. (2008): Le bassin versant de surface vue par le souterrain: une voie d'amélioration des performances et du réalisme des modèles pluie-débit? (Doctoral dissertation, Doctorat Géosciences et Ressources Naturelles, Université Pierre et Marie Curie Paris VI.
- Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D., Dezetter A., (2005): Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling of the Nakambe River in Burkina-Faso. Journal of Hydrology, 300, 1-4, 33-43.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., & Andréassian, V. (2006): Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. Journal of Hydrology, 318(1-4), 200-214.
- Nash J. E. et Sutcliffe J. V. (1970): River flow forecasting through conceptual models. Part I-A discussion of principles. Journal of Hydrology. vol 10, pp 282-290.
- Ndiaye M. P. (2021): Évaluation, calibration et analyse des tendances actuelles et futures de l'évapotranspiration de référence dans le bassin du fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat de Géographie, Université Gaston Berger de Saint-Louis. 169p.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., Dezetter, A., Guilpart, E., Deme, A., & Ogilvie, A. (2021): Future trend and sensitivity analysis of evapotranspiration in the Senegal River Basin. Journal of Hydrology: Regional Studies, 35, 100820.
- Ndiaye P.M., Bodian A., Dezetter A., Ogilvie A., Goudiaby O. (2024): Sensitivity of global hydrological models to potential evapotranspiration estimation methods in the Senegal River Basin (West Africa), Journal of Hydrology: Regional Studies 53 (2024) 101823
- Mjejra M. (2015). Etude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de la Majerda (Tunisie) : Apport de la télédétection satellitaire et des systèmes d'information géographiques, Thèse de doctorat en Géographie, Université de Rennes 2, Rennes. Disponible en ligne : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01281636/document.
- Oudin, L. (2004): Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global (Doctoral dissertation, ENGREF (AgroParisTech).
- Ouédraogo M., Servat E., Paturel J.-E., Lubès-Niel H., Masson J.M., (1998) : Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'ouest et

centrale non-sahélienne. Proc. of the Abidjan Conf., Ivory Coast, Water Resources Variability in Africa during the XXth Century, 315-321.

- Paturel J.-E., Servat E., Vassiliadis A., (1995): Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. Journal of Hydrology, 168, 11-125.
- Paturel J.-E., (2014) Exercice de scénarisation hydrologique en Afrique de l'Ouest - Bassin du Bani, Hydrological Sciences Journal, 59:6, 1135-1153, DOI: 10.1080/02626667.2013.834340
- Patle G. T., Sengdo D., and Tapak M., (2019). "Trends in major climatic parameters and sensitivity of evapotranspiration to climatic parameters in the eastern Himalayan region of Sikkim, India", Journal of Water and Climate Change, in press, https://iwaponline.com/jwcc/articlepdf/doi/10.2166/wcc.2019.121/519865/jwc2019121.pdf.
- Perrin, C. (2000): Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. PhD Thesis, INPG (Grenoble)/Cemagref (Antony), France, 530 pp.
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 279(1), 275-289.
- Plan de Développement Local du canton de Gouin Période 2019-2022, Révisé par la population du Canton de Gouin avec l'appui du Projet de Renforcement de la Résilience et de la Cohabitation Pacifique au Tchad - PRCPT
- Plan de Développement Local du Canton Léré rural. Période 2019-2022. Révisé par la population du Canton Léré rural avec l'appui du Projet de Renforcement de la Résilience et de la Cohabitation Pacifique au Tchad – PRCPT.
- Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N., Mathevet, T., & Andréassian, V. (2011): A downward structural sensitivity analysis of hydrological models to improve low-flow simulation. Journal of hydrology, 411(1-2), 66-76.
- Serna C.R. (2005): Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit? Thèse de Doctorat, ENGREF / Cemagref (Antony), 320 pages.
- Thiemig, V., Rojas, R., Zambrano-Bigiarini, M., & De Roo, A. (2013). Hydrological evaluation of satellite-based rainfall estimates over the Volta and Baro-Akobo Basin. Journal of Hydrology, 499, 324-338.
- Vaiougou, P (2020): Étude socio-économique relative à la création du Parc National du Mayo – Kebbi en vue d'une délégation de gestion à Noé, Rapport Final, 71 pages.
- Wilcox, C., Vischel, T., Panthou, G., Bodian, A., Blanchet, J., Descroix, L., Quantin, G., Cassé, C., Tanimoun, B., & Kone, S. (2018). Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers. Journal of Hydrology, 566, 531–545. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.063.

Annexe B

Données de débits mensuels de la station de Mbourao sur la période 1964-2023 collectées lors de la mission de terrain

6.2. Données de débits mensuels de la station de Mbourao sur la période 1964-2023 collectées lors de la mission de terrain

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Annuel
1964								6.18	29.39	31.16	42.7	11.8	26.71
1965	2.92	0.73	0.42	0.29	0.23	0.76	1.43	51.75	60.2	9.54	2.93		15.94
1966	1.02	0.55	0.39	0.23	0.14	0.49	1.1	3.8	55.2	153.7	95.19		47.09
1967	4.92	2.67	1.22		0.5	4.37	4.63	3.66	18.99	27.9	34.33	10.2	18.44
1968	3.96	1.84	1.14	0.78	0.56	1.99	2.75	5.51	8.1	20.78	17.09	6.77	8.13
1969	3.43	1.83	1.17	0.5	0.38	0.99	5.25	34.02	62.18		83.5	3.64	24
1970	6.8	1.95	0.78	0.4	0.35	0.27	2.76	44.53	260.9	367.5	137.1	27.5	82.71
1971	3.89	0.95	0.37	0.16	1.55	1.19	1.44	10.27	61.67	38.87	12.75	5.13	13.11
1972	1.69	0.62	0.49	0.3	0.14	1.09	2.29	3.22	6.42	8	5.04	2.74	2.99
1973	1.51	1.13	0.96	0.63	5.75	2.15	3.99	45.64	35.56	9.42	4.84	1.92	12.44
1974	0.62	0.31	0.16	0.03	1.09	0.11	4.41	12.9	29.55	11.32	3.81	1.62	8.17
1975	0.84	0.48	0.12			1.8	2.26	10.74	76.17	96.01	88.17	49.2	38.5
1976	15.4	4.51	1.44	0.44	0.33	1.01	1.48	6.59	6.33	34.93	45.52	13	11.48
1977	4.3	1.63	0.78	0.24	0	0.67	6.23	15.77	14.63	4.1	2.23	1.22	5.09
1978	0.22	0		0	2.07	2.31	12.7	23.01	117.6	129.8	89.27	23.6	56.27
1979	6.32	2.41	1.31	1.4	0.76	17.3					3.18		5.24
1980													
1981	1.73	0.67	0.15										0.93
1982	1.85					1.27	2.99	23.2	35.7	19.69	5.01	2.02	14.59
1983	1.34	0.62	0.09			2.08	2.78	12.35	33.81	17.72	4.7	2.25	9.47
1984	1.33	0.16				1.28	1.57	6.06	10.75	8.79	3.48	2.07	4.35
1985	0.53					5.36	27	44.54	48	28.36	6.99	2.65	28.78
1986	1.17	0.44				3.05	22.4	46			41.2	15.3	22.94
1987	4.19	1.31				13.2	9.62	21.72	73.59	79.03	39.53	9.58	29.4
1988	1.96				2.58	2.76	16.7	92.89	186.8	194	107.8	47.5	162.1
1989	24.2	9.29	3.75	2.02	0.78	2.41	26.8	51.79	60.45				21.45
1990	4.59	3.02	2.27				6.49	33.08	70.73	62.45	32.05	14.6	33.16
1991	7.64		3.23		9.93	7.58	26.4				73		38.81
1992													
1993	25.1	14.6	9.79	4.74		8.21	13.7	35.92	89.65			29.4	27.52
1994	19.1	12.6	8.16	2.85			31.1		232.4		143.9	76.3	79.9
1995	47.4	34.1				16			236.4				109.8
1996	36.7	23.1	14.8	10.5		12.4	20	36.34	157.2	209.1	125.6	66.5	66.45
1997	35	18.7			10.1	18.1	29.7	57.83	86.57	82.03	59.16	33.4	45.74
1998	18.3					8.06	16.6		166.3	128.9	95.37	45.8	75.6
1999	22	11.8	6.75			5.42	9.07	52.92	154.9	172		69.8	63.3
2000	36.1	16.8	8.94	5.37		5.59	15.9	79.41		67.23	43.13	22.2	36.36
2001	8.76	3.9	2.03	1.32			2.2	39.31	142.8	188	102.6		59.84
2002	25.1	11.8			2	1.8	5.86	17.26	33.13	28.04	14.31	6.65	14.65
2003						3.47	43	98.71	94.71	65.74	41.85	18.5	59.27

2004	3.83	1.57			0.75		13.5	38.77	88.03	79.52	51.57		43.39
2005		2.64	1.1	0.32			3.72				31.72	11.9	10.08
2006	5.4	2.81	1.46	0.65		1.46	9.8	47.56	93.82	61.23	32.54	9.08	26.31
2007							7.99	116.5	130.9	62.77	35.77	9.98	72.64
2008						3.91	0.91	33.18	42.22	38.22	27.43	11.3	24.36
2009	3.48	1.46	0.56	0.2		1.74	1.24	19.42	86.23	102.4	64.67	25.2	30.95
2010	6.28				1.06	1.77	23.5	60.78	81.43	83.84	82.27	41.1	45.97
2011	13.1	3.49	1.41	0.62	0.25	0.58	2.52	3.99	64.9	68.1	50	8.08	29.08
2012	3.13	1.71	0.86										1.9
2013		3.66	1.17										3.3
2014				0.01		0.93	4.25		28.26	51.72	46.52		22.01
2015		3.05	1.34	0.43	0.1	0.41	0.55		32.1	27.55		4.46	7.79
2016	2.81	1.27	0.73		0.4		5.54		44.91				9.17
2017													
2018													
2019													
2020													
2021													
2022						30.8	47.1	105.1	246.3	268.7	110.8	50	126.7
2023	48.7	45.2	25.9	15.9	17.2	41	55.7	62.03	110.7	153.4	78.45	44	58.25

Annexe C

Bilan hydrologique de la station de Mbourao sur la période 1981-2023

6.3. Bilan hydrologique de la station de Mbourao sur la période 1981-2023

	Pluie Moyenne (mm)	Module (m^3/s)	Volume (m^3)	Lame (mm)	CR (%)
1981	964.8	0.93	29 328 480	2.25	0.2
1982	807.2	14.59	460 110 240	35.31	4.4
1983	721.6	9.47	298 645 920	22.92	3.2
1984	612.2	4.35	137 181 600	10.53	1.7
1985	834.1	28.78	907 606 080	69.65	8.4
1986	915.2	22.94	723 435 840	55.52	6.1
1987	776.5	29.4	927 158 400	71.15	9.2
1988	1 066.6	162.13	5 112 931 680	392.38	36.8
1989	811.0	21.45	676 447 200	51.91	6.4
1990	794.1	33.16	1 045 733 760	80.25	10.1
1991	1 006.1	38.81	1 223 912 160	93.93	9.3
1992	943.8		-	-	-
1993	865.3	27.52	867 870 720	66.60	7.7
1994	1 057.4	79.9	2 519 726 400	193.37	18.3
1995	1 053.1	109.83	3 463 598 880	265.81	25.2
1996	1 060.1	66.45	2 095 567 200	160.82	15.2
1997	969.0	45.74	1 442 456 640	110.70	11.4
1998	977.3	75.6	2 384 121 600	182.96	18.7
1999	1 016.6	63.3	1 996 228 800	153.20	15.1
2000	876.8	36.36	1 146 648 960	88.00	10.0
2001	1 021.1	59.84	1 887 114 240	144.82	14.2
2002	796.1	14.65	462 002 400	35.46	4.5
2003	864.4	59.27	1 869 138 720	143.44	16.6
2004	904.3	43.39	1 368 347 040	105.01	11.6
2005	917.7	10.08	317 882 880	24.40	2.7
2006	883.9	26.31	829 712 160	63.67	7.2

2007	715.7	72.64	2 290 775 040	175.80	24.6
2008	794.7	24.36	768 216 960	58.95	7.4
2009	690.6	30.95	976 039 200	74.90	10.8
2010	969.1	45.97	1 449 709 920	111.25	11.5
2011	917.2	29.08	917 066 880	70.38	7.7
2012	1 087.9	1.9	59 918 400	4.60	0.4
2013	817.8	3.3	104 068 800	7.99	1.0
2014	740.7	22.01	694 107 360	53.27	7.2
2015	940.4	7.79	245 665 440	18.85	2.0
2016	957.0	9.17	289 185 120	22.19	2.3
2017	892.4		-	-	-
2018	884.8		-	-	-
2019	1 033.5		-	-	-
2020	1 021.0		-	-	-
2021	912.1		-	-	-
2022	1 212.6	126.73	3 996 557 280	306.71	25.3
2023	959.8	58.25	1 836 972 000	140.97	14.7
Moyenne	**908.5**	**41.0**	**1 112 120 707**	**85.3**	**9.4**

Annexe D

PROJECTION DE PLUIE, D'ETP ET DE DEBIT DE LA STATION DE MBOURAO AUX HORIZONS 2035 ET 2060 POUR LES SCENARIOS SSP3.7-0 ET SSP5.8.5

6.4. Projection de pluie, d'ETP et de débit de la station de Mbourao aux horizons 2035 et 2060 pour les scénarios SSP3.7-0 et SSP5.8-5

Annexe 3a : Projection de pluie selon le scénario SSP3.7-0 à l'horizon 2035

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	0.0	0.1	1.8	24.3	89.3	126.5	209.1	247.1	168.3	41.1	0.8	0.0
ACCESS-CM2	0.1	0.1	9.3	35.3	96.8	163.6	244.9	292.0	187.1	89.5	5.6	0.1
ACCESS-ESM1-5	0.1	0.1	6.6	32.2	99.6	132.9	239.4	286.1	225.5	83.2	6.8	0.1
BCC-CSM2-MR	0.1	0.1	8.0	34.3	97.0	121.7	197.9	257.5	178.2	79.3	10.9	0.1
CanESM5	0.1	0.1	7.2	32.1	99.7	160.2	248.0	310.1	215.2	78.8	5.3	0.1
CMCC-ESM2	0.1	0.1	9.1	33.1	101.3	160.7	211.1	282.3	203.6	97.9	7.8	0.1
FGOALS-g3	0.1	0.1	6.8	28.8	101.5	128.0	207.1	259.4	183.3	76.0	8.6	0.1
MIROC-ES2L	0.1	0.1	5.4	35.9	90.7	163.0	244.2	305.7	211.2	69.8	7.4	0.1
MIROC6	0.1	0.1	7.6	31.3	89.3	145.8	231.0	279.6	207.3	71.9	5.2	0.1
MPI-ESM1-2-HR	0.1	0.1	6.7	33.4	100.7	127.4	229.3	313.6	203.5	100.8	6.3	0.1
MPI-ESM1-2-LR	0.1	0.1	6.5	29.6	91.0	132.3	290.7	332.4	236.0	86.6	7.8	0.1
MRI-ESM2-0	0.1	0.1	6.1	36.7	83.4	162.6	229.8	329.9	224.6	96.1	10.0	0.1
NorESM2-LM	0.1	0.1	6.5	28.9	97.4	137.0	209.8	266.1	205.6	81.4	9.0	0.1
NorESM2-MM	0.1	0.1	8.2	47.0	125.3	150.8	247.4	263.6	181.1	82.6	13.4	0.1
TaiESM1	0.1	0.1	8.8	35.7	107.2	140.4	212.7	264.0	202.2	85.5	12.9	0.1
UKESM1-0-LL	0.1	0.1	8.7	34.9	124.8	171.1	224.0	304.9	209.8	78.4	9.7	0.1
Multi Modèles Ensemble	0.1	0.1	7.1	33.3	99.7	145.2	229.8	287.2	202.7	81.2	8.0	0.1

Annexe 3b : Projection de pluie selon le scénario SSP5.8-5 à l'horizon 2035

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	0.0	0.1	1.8	24.3	89.3	126.5	209.1	247.1	168.3	41.1	0.8	0.0
ACCESS-CM2	0.1	0.1	6.9	31.4	89.3	152.8	242.4	333.3	183.3	77.9	7.8	0.1
ACCESS-ESM1-5	0.1	0.1	6.9	33.6	92.5	150.1	285.2	319.4	233.0	96.0	7.1	0.1
BCC-CSM2-MR	0.1	0.1	7.7	33.7	98.1	117.1	201.7	273.7	184.2	78.0	9.5	0.1
CanESM5	0.1	0.1	7.6	37.3	111.1	140.7	244.3	363.3	230.5	79.2	6.0	0.1
CMCC-ESM2	0.1	0.1	9.5	34.0	93.0	125.9	204.2	267.0	202.9	94.4	13.2	0.1
FGOALS-g3	0.1	0.1	6.3	29.0	101.5	131.3	217.0	272.3	183.5	78.1	11.8	0.1
MIROC-ES2L	0.1	0.1	6.9	30.9	70.2	156.9	288.6	331.0	234.1	66.1	9.0	0.1
MIROC6	0.1	0.1	8.3	33.3	87.5	143.5	226.1	266.9	205.0	71.9	6.8	0.1
MPI-ESM1-2-HR	0.1	0.1	6.2	28.9	86.5	139.8	226.5	282.0	183.9	75.0	6.5	0.1
MPI-ESM1-2-LR	0.1	0.1	6.3	25.7	92.7	150.3	282.6	322.1	239.7	88.8	6.9	0.1
MRI-ESM2-0	0.1	0.1	6.5	37.5	104.4	156.7	255.5	345.3	242.6	126.0	15.6	0.1
NorESM2-LM	0.1	0.1	6.0	41.0	113.8	119.7	215.2	259.3	219.5	102.4	9.4	0.1
NorESM2-MM	0.1	0.1	8.3	43.2	122.4	144.4	229.2	258.7	222.6	88.5	16.9	0.1
TaiESM1	0.1	0.1	8.2	37.7	92.6	146.2	213.6	259.4	214.3	109.7	13.5	0.1
UKESM1-0-LL	0.1	0.1	6.9	34.7	110.9	155.9	215.9	316.5	251.2	76.0	9.7	0.1
Multi Modèles Ensemble	0.1	0.1	6.9	33.5	97.2	141.1	234.8	294.8	212.4	84.3	9.4	0.1

Annexe 3c : Projection de pluie selon le scénario SSP3.7-0 à l'horizon 2060

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	0.0	0.1	1.8	24.3	89.3	126.5	209.1	247.1	168.3	41.1	0.8	0.0
ACCESS-CM2	0.1	0.1	6.6	34.1	107.1	180.7	252.6	341.9	185.6	74.0	6.1	0.1
ACCESS-ESM1-5	0.1	0.1	6.8	31.3	95.6	158.3	252.8	315.5	248.6	79.5	6.9	0.1
BCC-CSM2-MR	0.1	0.1	5.6	20.2	94.4	160.2	196.8	256.6	155.5	78.2	13.0	0.1
CanESM5	0.1	0.1	6.7	39.7	117.8	160.7	260.4	372.5	250.9	90.9	7.0	0.1
CMCC-ESM2	0.1	0.1	9.7	39.1	112.3	153.9	226.3	277.3	221.4	152.8	16.9	0.1
FGOALS-g3	0.1	0.1	6.4	32.5	89.9	136.8	223.7	255.9	175.3	78.7	9.3	0.1
MIROC-ES2L	0.1	0.1	6.6	33.9	86.7	154.3	283.2	318.1	224.4	60.1	6.7	0.1
MIROC6	0.1	0.1	8.2	36.2	99.7	144.7	244.9	268.8	218.6	66.1	4.0	0.1
MPI-ESM1-2-HR	0.1	0.1	6.0	36.8	88.5	139.2	199.5	318.0	221.6	68.3	5.3	0.1
MPI-ESM1-2-LR	0.1	0.1	5.8	24.2	68.7	128.2	310.2	345.6	243.4	96.9	8.5	0.1
MRI-ESM2-0	0.1	0.1	6.6	32.2	93.8	151.3	225.1	319.8	240.7	91.2	16.2	0.1
NorESM2-LM	0.1	0.1	6.7	54.3	116.8	132.6	207.5	262.4	218.2	83.7	9.0	0.1
NorESM2-MM	0.1	0.1	8.6	42.4	122.3	179.3	235.7	240.1	217.3	117.5	19.1	0.1
TaiESM1	0.1	0.1	6.1	36.4	115.2	149.5	195.6	240.6	212.8	108.3	10.9	0.1
UKESM1-0-LL	0.1	0.1	8.1	39.1	98.8	160.7	226.8	308.2	221.0	78.1	7.9	0.1
Multi Modèles Ensemble	0.1	0.1	6.6	34.8	99.8	151.1	234.4	293.0	214.0	85.3	9.2	0.1

Annexe 3d : Projection de pluie selon le scénario SSP5.8-5 à l'horizon 2060

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	0.0	0.1	1.8	24.3	89.3	126.5	209.1	247.1	168.3	41.1	0.8	0.0
ACCESS-CM2	0.1	0.1	7.4	35.9	99.9	165.1	259.6	338.6	196.9	92.8	7.6	0.1
ACCESS-ESM1-5	0.1	0.1	6.5	34.4	96.0	148.7	277.3	330.4	235.8	101.5	8.8	0.1
BCC-CSM2-MR	0.1	0.1	10.7	39.0	77.0	130.6	198.8	211.6	186.9	79.3	10.6	0.1
CanESM5	0.1	0.1	8.2	36.3	115.8	186.2	249.5	381.9	260.4	90.0	6.0	0.1
CMCC-ESM2	0.1	0.1	9.7	40.2	96.2	151.9	208.4	285.0	221.5	132.7	17.3	0.1
FGOALS-g3	0.1	0.1	6.6	31.9	92.9	140.2	187.1	251.7	168.7	81.5	9.6	0.1
MIROC-ES2L	0.1	0.1	5.7	34.9	86.5	148.1	290.2	368.7	247.6	71.9	9.9	0.1
MIROC6	0.1	0.1	8.3	35.0	85.2	152.4	255.6	278.1	225.4	70.4	5.3	0.1
MPI-ESM1-2-HR	0.1	0.1	6.4	29.4	96.6	124.5	244.1	366.6	232.1	93.1	10.5	0.1
MPI-ESM1-2-LR	0.1	0.1	6.8	21.8	94.2	168.3	318.2	391.1	266.0	119.4	10.8	0.1
MRI-ESM2-0	0.1	0.1	6.8	37.3	99.4	161.7	220.5	330.1	236.6	103.0	17.9	0.1
NorESM2-LM	0.1	0.1	6.0	42.9	115.2	111.1	227.6	257.3	248.5	109.7	9.4	0.1
NorESM2-MM	0.1	0.1	10.5	50.8	107.0	145.8	218.1	251.3	239.3	141.8	23.0	0.1
TaiESM1	0.1	0.1	8.1	37.7	105.8	163.8	213.2	238.0	203.9	107.0	13.9	0.1
UKESM1-0-LL	0.1	0.1	8.0	34.5	108.9	155.3	219.6	303.5	220.9	69.5	11.6	0.1
Multi Modèles Ensemble	0.1	0.1	7.4	35.4	97.9	148.8	237.3	301.9	222.4	94.0	10.8	0.1

Annexe 3e : Projection d'ETP selon le scénario SSP3.7-0 à l'horizon 2035

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	186.4	195.0	237.1	216.0	195.7	168.1	138.8	112.5	114.3	144.9	166.2	172.9
ACCESS-CM2	161.7	170.1	211.0	199.7	184.9	154.3	138.0	131.5	141.9	154.4	158.7	157.7
ACCESS-ESM1-5	158.6	168.2	208.3	198.8	183.4	162.7	141.5	134.9	138.6	151.3	155.5	152.3
BCC-CSM2-MR	156.9	166.4	201.4	191.7	181.7	159.5	145.5	141.2	146.9	159.2	156.0	149.3
CanESM5	169.5	173.9	207.9	193.9	182.9	156.9	143.3	138.7	139.7	148.9	147.1	154.5
CMCC-ESM2	158.7	169.3	206.8	192.0	184.1	156.2	141.8	137.6	139.4	155.4	158.6	154.4
FGOALS-g3	159.1	168.1	202.1	194.8	182.0	155.9	139.0	138.0	143.8	158.2	157.2	151.7
MIROC-ES2L	161.3	168.2	208.7	200.6	186.2	160.2	142.7	134.8	137.9	156.4	156.9	154.0
MIROC6	150.7	159.3	200.0	195.7	190.5	166.4	146.4	141.4	142.0	155.8	148.4	143.6
MPI-ESM1-2-HR	152.0	161.4	201.0	193.8	179.0	155.5	137.0	133.1	135.3	145.8	150.0	144.7
MPI-ESM1-2-LR	153.0	159.1	201.7	193.7	180.4	155.9	135.8	130.1	133.4	147.5	145.8	141.7
MRI-ESM2-0	158.8	166.5	206.1	192.8	186.2	156.9	143.3	134.1	136.9	149.1	149.3	151.1
NorESM2-LM	156.8	160.3	202.1	194.4	179.1	154.7	142.2	139.8	141.2	154.8	154.1	150.4
NorESM2-MM	157.9	169.5	203.7	194.7	179.2	158.7	143.7	142.3	145.3	160.1	156.5	151.5
TaiESM1	224.4	236.5	291.6	274.5	256.7	226.3	205.8	194.8	195.4	220.1	223.0	220.1
UKESM1-0-LL	156.0	150.1	158.5	153.7	147.1	153.2	164.7	179.5	187.8	182.2	169.9	157.1
Multi Modèles Ensemble	163.9	171.4	209.3	198.8	186.2	162.6	146.8	141.5	145.0	159.0	159.6	156.7

Annexe 3f : Projection d'ETP selon le scénario SSP5.8-5 à l'horizon 2035

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	186.4	195.0	237.1	216.0	195.7	168.1	138.8	112.5	114.3	144.9	166.2	172.9
ACCESS-CM2	162.3	168.3	208.8	202.4	188.0	157.8	137.9	130.0	142.3	157.3	155.6	155.4
ACCESS-ESM1-5	157.2	165.3	209.1	198.6	188.8	160.7	135.7	133.3	137.7	150.3	154.7	154.4
BCC-CSM2-MR	155.4	167.6	201.9	193.0	181.7	158.3	141.7	137.3	144.7	160.4	156.7	149.1
CanESM5	169.1	174.4	207.0	192.1	180.8	160.9	144.5	137.0	140.0	148.4	145.4	153.4
CMCC-ESM2	158.5	167.1	208.2	196.3	185.5	160.8	143.7	140.5	142.3	157.4	158.9	156.3
FGOALS-g3	160.9	167.1	205.0	194.3	184.3	160.1	140.5	139.8	144.7	158.0	157.3	151.9
MIROC-ES2L	158.2	166.0	203.0	205.4	193.8	162.7	139.1	132.2	135.8	153.8	153.8	150.1
MIROC6	153.8	161.8	208.0	198.2	192.4	164.3	144.9	140.0	141.2	152.7	150.7	146.9
MPI-ESM1-2-HR	151.9	160.8	203.5	195.7	183.2	157.5	138.6	134.3	138.6	150.7	152.2	145.1
MPI-ESM1-2-LR	150.1	160.7	201.0	197.6	182.1	155.5	134.9	130.2	133.2	147.1	145.9	140.3
MRI-ESM2-0	157.6	170.7	207.3	194.7	182.2	159.1	143.5	135.4	136.7	146.3	146.9	149.5
NorESM2-LM	156.7	165.5	206.0	195.9	178.0	158.3	144.3	140.8	141.7	153.5	150.6	150.6
NorESM2-MM	158.2	169.6	206.2	194.3	181.0	160.9	145.9	142.4	144.4	159.2	155.5	150.6
TaiESM1	226.1	237.2	293.5	274.3	260.0	227.6	208.6	196.8	197.0	220.3	222.7	220.2
UKESM1-0-LL	157.0	153.1	161.3	152.7	148.4	149.8	162.4	178.1	185.0	183.5	169.3	156.8
Multi Modèles Ensemble	163.7	171.9	210.4	200.1	187.9	163.9	146.6	141.3	145.0	159.0	158.9	156.5

Annexe 3g : Projection d'ETP selon le scénario SSP3.7-0 à l'horizon 2060

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	186.4	195.0	237.1	216.0	195.7	168.1	138.8	112.5	114.3	144.9	166.2	172.9
ACCESS-CM2	166.4	174.9	214.9	203.9	186.7	153.3	137.8	130.3	142.8	158.6	160.8	160.1
ACCESS-ESM1-5	160.6	170.7	212.3	204.5	189.3	163.1	141.9	135.8	140.1	156.1	156.6	153.2
BCC-CSM2-MR	153.9	166.6	207.6	199.4	182.5	159.6	149.6	142.9	146.7	156.3	157.4	150.2
CanESM5	173.5	177.7	215.6	196.7	183.1	163.2	149.6	140.9	140.1	149.8	146.9	155.6
CMCC-ESM2	164.6	177.7	211.1	194.5	186.3	159.3	144.4	139.4	140.0	151.3	163.5	162.7
FGOALS-g3	160.2	168.5	204.4	198.4	185.0	158.1	142.4	139.2	144.4	158.9	155.6	153.0
MIROC-ES2L	165.0	171.8	208.1	206.9	198.4	167.3	144.8	136.0	141.0	162.1	162.1	157.7
MIROC6	153.1	159.9	204.5	200.9	192.2	170.8	150.1	145.4	144.4	160.9	150.8	147.8
MPI-ESM1-2-HR	154.4	163.7	203.4	192.8	182.7	154.3	140.1	135.2	137.8	150.3	150.3	145.0
MPI-ESM1-2-LR	151.9	158.9	202.1	192.5	182.7	154.6	136.8	131.8	135.4	147.8	146.1	141.5
MRI-ESM2-0	162.3	173.6	212.9	200.1	189.6	161.6	148.6	138.9	139.6	151.2	150.6	152.5
NorESM2-LM	159.7	164.9	208.7	193.3	180.5	159.7	148.3	144.2	143.9	157.7	154.9	153.2
NorESM2-MM	159.5	170.7	209.0	198.9	184.4	164.0	149.4	147.1	146.4	158.9	155.3	151.0
TaiESM1	231.3	242.7	300.4	283.0	267.6	233.7	214.4	201.5	201.3	226.4	227.4	225.9
UKESM1-0-LL	166.5	159.8	167.2	158.8	152.2	154.5	172.0	186.3	195.0	192.5	179.3	166.5
Multi Modèles Ensemble	166.8	174.8	213.7	202.5	189.9	165.3	150.6	144.2	147.1	161.5	161.5	159.3

Annexe 3h : Projection d'ETP selon le scénario SSP5.8-5 à l'horizon 2060

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	186.4	195.0	237.1	216.0	195.7	168.1	138.8	112.5	114.3	144.9	166.2	172.9
ACCESS-CM2	165.6	174.1	213.5	206.7	189.8	161.8	140.7	133.7	145.1	159.3	159.0	160.3
ACCESS-ESM1-5	161.0	172.9	211.0	205.9	190.5	164.6	142.7	136.3	141.6	155.8	156.7	152.8
BCC-CSM2-MR	149.9	168.3	197.6	199.6	182.7	161.3	145.5	137.6	143.7	154.9	157.2	146.4
CanESM5	177.2	182.7	217.2	201.1	187.2	164.4	153.6	142.7	141.9	153.2	149.4	155.8
CMCC-ESM2	167.3	177.4	214.3	199.5	192.3	164.3	148.5	142.7	143.2	156.0	163.9	163.3
FGOALS-g3	161.2	172.0	207.7	199.0	188.1	163.8	146.1	143.7	148.6	160.5	159.8	155.9
MIROC-ES2L	162.8	175.1	213.4	209.8	200.3	170.4	143.7	134.2	138.6	158.0	157.5	154.0
MIROC6	150.5	163.7	211.3	204.3	202.3	170.2	149.4	142.1	143.3	157.0	149.1	147.0
MPI-ESM1-2-HR	148.0	159.2	206.2	198.5	183.8	157.9	135.0	134.1	137.3	146.3	144.2	137.4
MPI-ESM1-2-LR	142.7	154.8	200.3	197.8	183.6	156.2	132.5	128.0	131.4	142.7	140.6	134.9
MRI-ESM2-0	165.7	174.6	212.1	197.9	190.4	162.6	151.6	140.1	141.2	151.3	152.5	156.7
NorESM2-LM	157.9	166.7	210.8	197.6	183.5	164.5	150.9	146.3	144.6	156.7	152.9	151.7
NorESM2-MM	159.6	172.7	208.9	200.1	191.5	170.4	154.1	148.7	148.2	159.1	155.3	151.4
TaiESM1	237.3	245.5	303.9	287.4	271.0	238.4	218.0	206.6	205.2	227.7	230.5	229.9
UKESM1-0-LL	166.5	163.3	169.5	165.2	158.0	159.1	168.6	186.5	198.6	196.0	179.3	168.8
Multi Modèles Ensemble	166.2	176.1	214.7	205.4	193.2	168.6	151.2	144.7	147.9	161.2	160.9	158.7

Annexe 3g : Projection d'écoulement selon le scénario SSP3.7-0 à l'horizon 2035

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	16.0	9.3	4.1	4.2	4.1	10.9	16.3	51.7	99.4	99.3	57.5	27.8
ACCESS-CM2	23.3	16.8	10.8	9.4	12.1	26.3	69.4	185.3	215.4	139.8	68.6	37.8
ACCESS-ESM1-5	24.1	17.7	11.1	9.5	13.5	20.6	59.9	154.4	227.3	141.0	69.7	38.5
BCC-CSM2-MR	18.2	13.3	8.6	7.6	9.6	15.4	36.8	105.4	138.8	94.8	51.7	29.0
CMCC-ESM2	24.1	17.2	11.0	9.6	12.6	25.9	60.9	163.2	213.8	148.4	71.9	39.2
CanESM5	25.9	18.6	11.6	10.0	12.9	26.5	74.9	209.9	254.6	149.8	74.8	41.7
FGOALS-g3	19.0	13.9	8.8	7.5	9.6	16.6	41.5	112.3	150.9	100.8	53.5	30.0
MIROC-ES2L	24.0	17.3	10.8	10.0	12.3	27.8	74.4	201.0	249.6	139.2	70.3	39.2
MIROC6	22.7	16.5	10.6	9.3	11.2	20.5	55.0	149.4	203.4	121.4	62.3	35.4
MPI-ESM1-2-HR	25.8	19.1	12.0	10.6	15.4	25.3	63.1	184.7	228.9	158.1	75.8	42.2
MPI-ESM1-2-LR	31.0	22.6	14.1	12.1	15.2	27.6	101.9	254.5	315.8	188.4	90.7	50.4
MRI-ESM2-0	28.9	20.9	12.9	11.6	13.2	27.0	68.4	209.3	269.3	172.6	85.3	46.4
NorESM2-LM	21.9	15.9	10.1	8.6	11.9	20.8	49.9	131.3	190.9	119.2	61.9	34.5
NorESM2-MM	22.9	16.3	10.4	10.3	15.1	28.2	78.9	167.7	198.1	129.0	68.0	37.2
TaiESM1	11.9	8.5	5.3	4.3	4.7	7.3	18.9	60.9	103.1	74.0	37.2	19.6
UKESM1-0-LL	21.1	15.3	10.2	9.5	16.1	36.2	79.6	193.1	226.9	125.3	62.5	33.7
Multi Modèles Ensemble	22.6	16.2	10.1	9.0	11.8	22.7	59.4	158.4	205.4	131.3	66.4	36.4

Annexe 3h : Projection d'écoulement selon le scénario SSP5.8-5 à l'horizon 2035

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	16.0	9.3	4.1	4.2	4.1	10.9	16.3	51.7	99.4	99.3	57.5	27.8
ACCESS-CM2	24.0	17.4	10.9	9.4	11.0	22.0	61.9	212.6	227.3	136.9	70.0	38.7
ACCESS-ESM1-5	30.6	21.8	13.6	11.7	14.5	26.2	91.4	234.7	302.3	194.0	90.2	48.9
BCC-CSM2-MR	19.5	14.1	9.1	8.0	9.9	15.2	38.1	118.6	156.3	104.0	55.1	30.9
CMCC-ESM2	20.7	14.9	9.6	8.4	10.1	16.3	39.7	112.4	166.3	120.4	62.4	33.8
CanESM5	29.7	20.7	12.9	11.7	16.7	29.4	79.3	263.8	319.9	178.9	87.4	48.4
FGOALS-g3	20.2	14.6	9.2	7.8	10.3	16.9	43.8	124.9	162.7	107.0	57.5	31.9
MIROC-ES2L	29.2	20.6	12.9	11.1	11.7	25.2	91.6	249.2	319.3	163.6	84.0	46.5
MIROC6	21.7	15.7	10.1	8.9	10.4	19.6	52.9	133.8	191.7	118.2	61.3	34.5
MPI-ESM1-2-HR	23.2	16.8	10.6	9.2	11.4	20.5	60.1	162.5	195.5	128.3	63.6	36.0
MPI-ESM1-2-LR	32.4	23.5	14.6	12.1	15.1	28.1	88.4	236.5	328.1	191.8	91.1	50.9
MRI-ESM2-0	35.2	24.7	15.2	13.7	19.4	37.6	95.5	260.9	333.4	231.2	109.7	57.9
NorESM2-LM	24.2	17.4	10.9	10.4	14.6	21.7	53.5	135.3	210.6	144.6	71.2	39.1
NorESM2-MM	25.1	18.1	11.5	11.0	16.5	28.7	73.2	151.1	219.2	140.8	74.4	40.1
TaiESM1	12.7	8.9	5.6	4.6	4.6	7.5	20.3	61.8	107.4	84.7	41.8	21.6
UKESM1-0-LL	22.9	16.9	10.8	10.1	15.5	30.7	70.7	198.4	266.6	136.4	67.0	36.3
Multi Modèles Ensemble	24.2	17.2	10.7	9.5	12.2	22.3	61.0	169.3	225.4	142.5	71.5	39.0

Annexe 3i : Projection d'écoulement selon le scénario SSP3.7-0 à l'horizon 2060

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	16.0	9.3	4.1	4.2	4.1	10.9	16.3	51.7	99.4	99.3	57.5	27.8
ACCESS-CM2	24.4	17.4	10.9	9.4	12.8	29.2	83.6	239.1	249.2	149.7	74.0	40.6
ACCESS-ESM1-5	27.6	19.4	12.1	10.4	13.0	25.9	72.9	210.8	304.7	169.0	82.0	45.0
BCC-CSM2-MR	17.5	13.0	8.2	6.6	8.6	18.8	39.1	123.1	130.9	90.7	51.6	28.9
CMCC-ESM2	29.4	20.8	13.1	11.8	15.8	30.0	70.7	166.6	224.3	207.7	95.3	48.8
CanESM5	32.4	23.2	14.1	12.8	18.7	35.9	93.5	303.1	360.3	209.0	96.5	52.6
FGOALS-g3	19.0	13.8	8.8	7.7	9.2	16.3	45.2	113.0	147.2	101.0	54.0	30.1
MIROC-ES2L	25.2	17.8	11.1	9.8	12.6	23.4	84.1	228.6	292.0	146.2	73.2	40.7
MIROC6	21.8	15.8	10.2	9.3	11.8	21.4	62.3	152.5	211.8	120.7	60.9	34.6
MPI-ESM1-2-HR	24.6	17.7	11.1	10.9	12.9	23.7	52.0	179.5	254.2	132.7	68.1	38.8
MPI-ESM1-2-LR	36.2	25.3	15.6	12.9	13.6	22.0	105.7	294.7	371.3	220.0	104.0	57.4
MRI-ESM2-0	27.4	20.0	12.3	10.4	14.0	24.7	61.8	191.5	259.3	157.9	82.6	44.6
NorESM2-LM	21.8	15.9	10.0	10.3	15.3	25.1	52.8	131.3	198.9	128.7	64.7	35.6
NorESM2-MM	26.5	19.0	12.0	11.1	17.2	35.4	87.3	155.7	220.6	159.7	81.6	43.2
TaiESM1	12.1	8.4	5.2	4.2	4.7	8.0	18.5	51.2	94.0	76.4	38.0	19.9
UKESM1-0-LL	18.6	13.6	8.9	8.4	11.9	25.2	62.5	169.6	210.9	113.3	55.6	30.0
Multi Modèles Ensemble	23.8	16.9	10.5	9.4	12.3	23.5	63.0	172.6	226.8	142.6	71.2	38.7

Annexe 3f : Projection d'écoulement selon le scénario SSP5.8-5 à l'horizon 2060

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc
Observation	16.0	9.3	4.1	4.2	4.1	10.9	16.3	51.7	99.4	99.3	57.5	27.8
ACCESS-CM2	25.9	18.6	11.6	10.2	13.2	28.5	80.7	239.2	256.7	161.6	77.9	42.3
ACCESS-ESM1-5	29.8	21.3	13.2	11.6	14.2	26.0	82.8	235.8	299.5	189.3	89.0	48.0
BCC-CSM2-MR	14.7	13.1	8.7	7.3	7.8	12.3	25.1	52.0	83.9	68.0	38.5	22.1
CMCC-ESM2	26.2	18.5	11.7	10.4	12.8	23.3	52.5	151.2	209.6	170.1	83.0	43.2
CanESM5	33.2	23.2	14.4	12.7	17.9	42.1	110.7	326.2	378.7	208.8	97.3	53.3
FGOALS-g3	16.7	12.4	7.9	6.8	8.3	14.9	33.3	91.4	120.6	85.9	46.7	26.2
MIROC-ES2L	30.2	21.6	13.1	11.6	14.1	24.8	90.4	291.6	351.4	180.5	89.0	48.7
MIROC6	23.2	17.1	10.9	9.7	11.2	20.3	60.3	150.9	219.3	127.5	64.6	36.4
MPI-ESM1-2-HR	33.2	23.7	14.6	12.3	15.8	25.7	73.3	269.2	332.5	198.5	96.3	53.5
MPI-ESM1-2-LR	44.6	32.8	20.1	16.2	20.0	46.4	155.4	410.8	463.2	286.1	129.7	71.0
MRI-ESM2-0	29.1	20.7	12.8	11.4	15.1	32.8	71.6	209.5	267.7	175.7	89.1	47.3
NorESM2-LM	25.7	18.4	11.5	10.9	15.5	20.6	55.3	134.3	229.0	159.5	76.0	41.2
NorESM2-MM	28.3	20.0	12.7	12.6	16.4	29.1	66.8	138.7	222.2	179.6	89.4	46.3
TaiESM1	11.4	8.2	5.1	4.2	4.4	8.3	21.4	56.7	89.3	69.0	35.8	18.8
UKESM1-0-LL	17.9	13.2	8.5	7.7	11.6	23.9	58.8	157.3	207.5	106.0	53.8	29.0
Multi Modèles Ensemble	25.4	18.3	11.3	10.0	12.7	24.4	65.9	185.4	239.4	154.1	75.8	40.9

Desjardins
Développement international

Baastel