

DANS LE CADRE DU PROJET SÉCURITÉ ALIMENTAIRE : UNE AGRICULTURE ADAPTÉE
(SAGA)

GIREC

GESTION INTÉGRÉE DE LA RESSOURCE EN EAU EN
CONDITIONS DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

1^{er} Rapport : Projections et scénarios climatiques dans le bassin du fleuve Sénégal.

2^{ème} Rapport : Projections hydrologiques dans le bassin du fleuve Sénégal.

3^{ème} Rapport : Gestion du fleuve Sénégal sous changements climatiques Vulnérabilités des usagers et politiques d'allocation des ressources hydriques en climats futurs

Etienne Guilpart - Marc-André Bourgault

Amaury Tilmant - René Roy

21 décembre 2020



Table des matières

I	1^{er} Rapport	14
1	Projections et scénarios climatiques dans le bassin du fleuve Sénégal	17
1.1	Préambule	17
1.2	Liste des données nécessaires et leurs disponibilités	18
1.3	Base de données des données SIG	18
1.4	Base de données des observations météorologiques	20
1.4.1	Les précipitations	20
1.4.2	Evapotranspiration potentielle	21
1.5	Base de données des observations hydrologiques	23
1.6	Base de données des simulations climatiques	25
1.6.1	Préambule et notion de base sur la scénarisation climatique	25
1.6.2	Présentation de la base de données des simulations climatiques	28
1.7	Base de données des scénarios climatiques	30
1.7.1	Fabrication des scénarios climatiques	30
1.7.2	Post-traitement	30
II	2^{ème} Rapport	33
2	Projections hydrologiques dans le bassin du fleuve Sénégal	36
2.1	Choix et philosophie de la modélisation hydrologique	36
2.2	Choix du modèle hydrologique	37
2.2.1	Description et fonctionnement du modèle GR2M	38
2.3	Sélection des stations hydrologiques clés pour modéliser le fleuve Sénégal et ses trois affluents majeurs	38
2.4	Bases de données pour la calibration et la validation du modèle	40
2.5	Calibration et validation du modèle GR2M	42
2.5.1	Protocole	42
2.5.2	Résultats et sélections des calibrations pour les six sous-bassins hydrologiques	45
2.6	Production des projections hydrologiques aux stations sélectionnées	52
2.7	Clustering et sélection des projections hydrologiques archétypiques	52
2.7.1	Attributs hydrologiques utilisés pour la mise en grappe	54
2.7.2	Méthode de regroupement : K-means clustering	55
2.7.3	Résultats : projections hydrologiques sélectionnées	56
2.7.4	Projections hydrologiques : Commentaires	59
2.8	Distribution des débits au niveau des noeuds du modèle hydro-économique	63
2.8.1	Présentation de la méthode de distribution des débits	63

2.8.2	Distribution des débits : Applications	65
III	3^{ème} Rapport	67
3	Gestion du fleuve Sénégal sous changements climatiques	70
3.1	Introduction	70
3.1.1	La modélisation hydro-économique : Notions fondamentales	71
3.1.2	Le modèle hydro-économique du bassin du fleuve Sénégal	72
3.2	Scénarios hydro-économiques explorés	74
3.3	Schéma de développement intermédiaire : Résultats de la modélisation hydro-économique et analyse	77
3.3.1	Présentation des résultats	78
3.3.2	Analyse de l'effet des changements climatiques sur l'allocation des ressources en eau	90
3.3.3	Schéma de développement intermédiaire : Bénéfices nets et changements climatiques.	99
3.4	Schéma de développement complet : Résultats de la modélisation hydro-économique et analyse	102
3.4.1	Présentation des résultats	102
3.4.2	Schéma de développement complet : Bénéfices nets	106
3.4.3	Développement du bassin : un atout pour l'adaptation aux changements climatiques ?	108
3.5	Conclusions	110
IV	Annexes	113
A	Travail en SIG : Délimitations du bassin et des sous-bassins	114
A.1	Motivation pour la réalisation du travail de SIG	114
A.2	Délimitation du BFS	115
A.2.1	Méthodologie	115
A.2.2	Résultats des délimitations	116
A.2.3	La superficie du bassin	118
A.2.4	Synthèse et commentaires	118
A.3	Délimitation des sous-bassins hydrologiques	118
A.4	Délimitation des sous-bassins hydro-économiques	120
B	Modélisation hydrologique : Débits totaux ou incrémentaux ?	122
C	Méthodes de distribution des débits : Comparaisons	124
C.1	Trois méthodes de distribution des débits avec le ratio DAR	124
C.1.1	Méthode 1 : Distribution les débits totaux	124
C.1.2	Méthode 2 : Distribution les débits incrémentaux	126
C.1.3	Méthode 3 : Distribution les débits « hybride »	126
C.1.4	Suppression des valeurs négatives	126
C.2	Comparaisons de ces trois méthodes	126

D	Données hydro-économiques et bénéfices nets des usages de l'eau dans le BFS	130
D.1	Le schéma de Développement Intermédiaire	130
D.1.1	L'hydro-électricité	130
D.1.2	La navigation du fleuve Sénégal	130
D.1.3	L'agriculture de décrue	131
D.1.4	La pêche	131
D.1.5	L'agriculture irriguée	132
D.2	Le schéma de Développement Complet	137
E	Revue bibliographique	139
E.1	Introduction : Organisation de la revue bibliographique	139
E.2	Les avancées de la recherche : résumé des connaissances scientifiques en climatologie et en hydrologie	140
E.2.1	Éléments climatologiques structurant au Sahel	140
E.2.2	Éléments Hydrologiques clés du BFS	145
E.3	Changements climatiques : tendances climatiques et hydrologiques, vulnérabilités	147
E.3.1	Les tendances hydro-climatiques dans le BFS	147
E.3.2	Les études de vulnérabilités réalisées sur le BFS	153
E.3.3	Les études de vulnérabilités « qualitatives »	154
E.3.4	Conclusions	159

Table des figures

1	Vue d'ensemble méthodologique du projet	13
1.1	Divergence des limites du BFS	19
1.2	Limite du BFS	19
1.3	Limite du BFS et grille du SIEREM	21
1.4	Base de données du SIEREM	22
1.5	Limite du BFS et grille du CRU	23
1.6	Base de données du CRU	24
1.7	Base de données du SDAGE	24
1.8	Projections climatiques et GES	26
1.9	Analyse de biais : Précipitations	27
1.10	Analyse de biais : ETP	28
1.11	Changements climatiques : Précipitations et ETP	29
1.12	Correction de biais : cycles annuels	31
1.13	Correction de biais : moyennes annuels	31
1.14	Correction de biais : cycles annuels des maximums	32
2.1	Schéma du GR2M	39
2.2	Emplacements des stations hydrologiques sélectionnées	40
2.3	Précipitations, ETP et débits par sous-bassins hydrologiques (période de référence)	41
2.4	Exemple des périodes de calibration/validation	43
2.5	Période de calibration/validation (Daka Saidou)	46
2.6	Périodes de calibration/validation (Bafing Makana)	47
2.7	Périodes de calibration/validation (Gourbassi)	48
2.8	Périodes de calibration/validation (Oualia)	49
2.9	Périodes de calibration/validation (Kayes)	50
2.10	Périodes de calibration/validation (Bakel)	51
2.11	Projections hydrologiques aux stations	53
2.12	Projections hydrologiques : tendances décennales	54
2.13	Clustering des projections hydrologiques (Horizon 1)	57
2.14	Clustering des projections hydrologiques (Horizon 2)	58
2.15	Hydrogramme des projections sélectionnées (Horizon 1)	60
2.16	Hydrogramme des projections sélectionnées (Horizon 2)	61
2.17	Cycles annuels moyens des projections hydrologiques sélectionnées	62
2.18	Carte des sous-bassins hydrologiques incrémentaux	66
3.1	Schéma de la structure du modèle hydro-économique du Bassin du Fleuve Sénégal.	75
3.2	Schéma des décisions séquentielles du modèle hydro-économique	76

3.3	Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement intermédiaire, résultats sur les périodes historiques.	79
3.4	Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité sur les périodes historiques (développement intermédiaire).	80
3.5	Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement intermédiaire, résultats pour l'horizon 1	83
3.6	Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour l'horizon 1 (développement intermédiaire)	84
3.7	Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement intermédiaire, résultats pour l'horizon 2	87
3.8	Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour l'horizon 2 (développement intermédiaire)	88
3.9	Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur hydroélectrique aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion.	91
3.10	Schéma de développement intermédiaire : Réservoirs influencés par l'implémentation de la crue	92
3.11	Schéma de développement intermédiaire : Contribution des centrales hydroélectriques à la production totale	93
3.12	Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de l'agriculture irriguée aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion.	95
3.13	Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de l'agriculture de décrue aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion.	96
3.14	Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de la pêche aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion.	97
3.15	Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de la navigation aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion.	98
3.16	Schéma de développement intermédiaire, bénéfices nets et changements climatiques	100
3.17	Schéma de développement intermédiaire, bénéfices nets et changements climatiques	101
3.18	Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement complet, résultats pour l'horizon 2	103
3.19	Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour l'horizon 2 (développement complet).	104
3.20	Bénéfices nets : Comparaison entre un schéma de développement intermédiaire et un schéma de développement complet.	106
3.21	Bénéfices nets : Comparaison entre un schéma de développement intermédiaire et un schéma de développement complet par secteur.	107
3.22	Vulnérabilité climatique, schéma de développement intermédiaire et schéma de développement complet	108
A.1	Illustration de la divergence des limites	114
A.2	Limite du BFS : comparaison 2	117
A.3	Limite du BFS : comparaison 3	117
A.4	Limite du BFS	118
A.5	Morphologies des six sous-bassins hydrologiques.	120
A.6	Morphologies des six sous-bassins hydro-économiques.	121

B.1	La crue à Bakel : débits totaux incrémentaux ?	122
B.2	Comparaison des sous-bassins du N18	123
C.1	Comparaisons aux points de contrôle des méthodes de distribution des débits	129
D.1	Limnigrammes types pour l'agriculture de décrue	131
D.2	Relation prise piscicole et volume de la crue annuelle	132
D.3	Linéarité des IWR en fonction de P_e et ETP_0	135
D.4	Extraction des paramètres climatiques le long du Sénégal pour l'ajustement des IWR	136
D.5	Valeurs mensuelles de ΔIWR	137
E.1	Composantes climatiques principales de la mousson au Sahel	141
E.2	Précipitations moyenne en Afrique de l'Ouest	143
E.3	Variabilité des indices de précipitations	143
E.4	Précipitations annuelles moyennes pour les principaux domaines du BFS .	146
E.5	Débits moyens sur les affluents principaux	146
E.6	Projections des précipitations pour le RCP 2.6 et le RCP 8.5 dans le monde	150
E.7	Moyenne des projections des précipitations des RCMs de CORDEX-Africa	150

Liste des tableaux

1.1	Liste des données nécessaires	18
1.2	Approximation sur les superficies des sous-bassins (Kayes et Bakel)	20
1.3	Simulations dispoition dans CORDEX-Afrique	29
2.1	Approximations des superficies sur les précipitations	42
2.2	Résultats des calibration/validation (Daka Saidou)	45
2.3	Résultats des calibration/validation (Bafing Makana)	47
2.4	Résultats des calibration/validation (Gourbassi)	48
2.5	Résultats des calibration/validation (Oualia)	49
2.6	Résultats de calibration/validation (Kayes)	51
2.7	Résultats de calibration/validation (Bakel)	52
2.8	Corrélations entre les attributs hydro.(Horizon 1)	56
2.9	Corrélations entre les attributs hydro.(Horizon 2)	56
2.10	Superficies des sous-bassins hydrologiques incrémentaux	65
3.1	Table des correspondances des sous-bassins du SDAGE et des Nœuds hydro-économiques	73
3.2	Composition des scénarios hydro-économiques explorés.	77
3.3	Productivité hydroélectrique pour l'horizon 2	89
3.4	Synthèse des productivités garanties et médianes des secteurs d'activités en fonction des conditions hydro-climatiques et des politiques d'allocation (schéma de développement intermédiaire et complet)	112
A.1	Coordonnées de l'exutoire du BFS	115
A.2	Délimitation du BFS : comparaisons	116
A.3	Superficie du BFS	119
A.4	Coordonnées et superficies des sous-bassins hydrologiques	120
A.5	Coordonnées et superficies des sous-bassins hydro-économiques.	121
C.1	Distribution des débits : 1 ^{ère} méthode (exemple)	125
C.2	Distribution des débits : 2 ^{ème} méthode (exemple)	127
C.3	Distribution des débits : 3 ^{ème} méthode (exemple)	128
D.1	Surfaces des périmètres irrigués par noeud du modèle hydro-économique pour le schéma de Développement Intermédiaire.	133
D.2	Besoins en eau des cultures du BFD sous climat futur	134
D.3	Table des coefficients de correction Climwat/scénarios climatiques pour le calculs des IWR	136
D.4	Surfaces des périmètres irrigués par noeud du modèle hydro-économique pour le schéma de Développement Complet.	138

E.1	Caractéristiques climatiques pour les principaux domaines du BFS	145
E.2	Liste des modèles hydrologiques et hydro-économiques	148
E.3	Liste des études menées sur l'évolution des précipitations pour le Sahel. . .	151
E.4	Evolution des débits dans le BFS	152
E.5	Méthodologie d'Artélia	157
E.6	Méthodologie d'Artélia (suite 1)	158
E.7	Méthodologie d'Artélia (suite 2)	159

Acronymes

BFS	Bassin du Fleuve Sénégal.
ClimWat	Base de donnée d'ETP de la FAO.
CRU	Climate Research Unit.
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment. Expérience coordonnée de mise à l'échelle régionale des modèles climatiques.
ETP	Evapotranspiration potentielle.
FAO	The Food and Agriculture Organization.
GES	Gaz à effet de serre.
GCMs	Global Circulation Models : Modèles de circulation atmosphérique globale.
GIRECCC	Gestion Intégrée de la Ressource en Eau en Conditions de Changements Climatiques. Nom de la présente initiative.
GR2M	Génie Rural 2 Mois : Modèle hydrologique conceptuel à deux paramètres, au pas de temps mensuel.
HSM	HydroSciences Montpellier
IRD	L'Institut de Recherche pour le Développement.
OMVS	Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal.
ORSTOM	Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, organisme aujourd'hui remplacé par l'IRD
RCMs	Regional Circulation Models : Modèles de circulation atmosphérique régionale.
RCP	Representative Concentration Pathway, scénarios représentatifs d'évolution de concentration des GES.
SAGA	Sécurité alimentaire : une agriculture adaptée. Nom du projet de la FAO, incluant l'initiative GIRECCC.
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux.
SDDP	Stochastic Dual Dynamic Programming. Algorithme d'optimisation, sur lequel est basé le modèle hydro-économique. Dans le cadre de l'initiative GIRECCC, l'acronyme SDDP se réfère au modèle hydro-économique utilisé, et développé par Tilmant and Pina (2018).
SIEREM	Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation.
SIG	Système d'Informations Géoréférencées.

SRTM Shuttle Radar Topography Mission.

Le Projet GIRECCC - Contexte, vue d'ensemble et méthodologie

Contexte

Le potentiel agricole dans la vallée du fleuve Sénégal présente une superficie totale aménageable estimée à 402 000 ha (contre actuellement 75 000 ha de superficie en maîtrise totale et 55 000 ha en agriculture de décrue) (OMVS, 2011, 2017). Le développement de cet important potentiel constitue une priorité pour les autorités sénégalaises souhaitant accroître et sécuriser la production agricole afin de contrer l'insécurité alimentaire et la pauvreté (Secrétariat Exécutif du Conseil National de Sécurité Alimentaire, 2015).

Dans ce contexte, l'exploitation des barrages de Diama et de Manantali s'avère bénéfique pour l'agriculture irriguée mais les effets du contrôle des crues induit des impacts plutôt négatifs sur la pêche et l'agriculture de décrue.

Malgré le fort potentiel agricole de la vallée du fleuve Sénégal, il apparaît que les conflits d'usage de l'eau ainsi que les impacts potentiels des changements climatiques pourraient contraindre significativement la production agricole sénégalaise. Au niveau des conflits d'usage de l'eau, une équipe de chercheurs de l'université Laval sous la direction du professeur Tilmant, a déjà élaboré et mis en œuvre un modèle hydro-économique complet du bassin du fleuve Sénégal, pour le compte de la FAO et de l'OMVS (Tilmant and Pina, 2018; Tilmant et al., 2020). Ce projet avait pour objectif de contribuer au développement agricole et à la sécurité alimentaire par le biais d'une gestion plus efficace des ressources en eau du bassin. L'une des principales conclusions de ce projet est la grande vulnérabilité du secteur de la production alimentaire, en particulier l'agriculture traditionnelle de décrue et les pêcheries, aux aléas hydrologiques et aux développements hydroélectriques en amont (Mali et Guinée).

L'initiative présentée ici nous permettra de construire sur les résultats du projet évoqué plus haut en ajoutant l'importante dimension des changements climatiques à cette problématique d'envergure. Il est reconnu que le climat et son évolution auront des impacts majeurs notamment sur les régimes thermiques (eau et air), les cycles annuels et multi-annuels des écoulements et les taux d'évapotranspiration, toutes ces variables étant déterminantes pour conditionner la productivité de plusieurs filières agricoles et des pêcheries. À terme, nous i) formulerons des recommandations quant à l'usage optimal de l'eau à des fins de production alimentaire en intégrant les impacts anticipés des conditions hydro-climatiques et ii) suite à des consultations visant à identifier les solutions d'adaptation envisageables, nous allons prioriser ces mesures à la lumière d'analyses coût-avantages

afin d'accroître la résilience du secteur de la production alimentaire au Sénégal.

Cette initiative contribue au projet Sécurité alimentaire : une agriculture adaptée (SAGA), mis en oeuvre par la FAO au Sénégal et en Haïti, et rendu possible par l'appui technique et financier du gouvernement du Québec, ainsi qu'une approche de partenariat avec différentes organisations gouvernementales, de la société civile et de la recherche. L'initiative GIRECC contribue à l'objectif du projet de renforcement des capacités de planification de l'adaptation pour la sécurité alimentaire et la nutrition. Plus spécifiquement, l'objectif principal du projet GIRECCC (Gestion intégrée de la ressource en eau en contexte de changements climatiques) consiste à contribuer à améliorer la résilience du secteur agricole¹ au Sénégal par le biais d'une meilleure connaissance de la disponibilité des ressources hydriques et des risques hydrologiques dans un contexte de changements climatiques.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Modifier le modèle hydro-économique déjà implanté en prenant en compte les conditions climatiques en évolution ;
- Identifier les solutions optimales pour le partage des ressources hydriques limitant les conflits potentiels entre les pays et les secteurs économiques dont l'agriculture et les pêcheries ;
- Déterminer et promouvoir les solutions d'adaptation les plus pertinentes auprès des organismes de planification des secteurs concernés (agriculture et pêche).

Vue d'ensemble et méthodologie

La méthodologie de l'initiative GIRECCC se divise en trois volets : (i) la scénarisation climatique, (ii) la modélisation hydrologique et (iii) la modélisation hydro-économique. Ces trois volets s'imbriquent dans une chaîne de modélisation tel que montré à la figure 1.

Le rapport final de l'initiative GIRECCC se divisera en trois chapitres, répondant aux livrables tel que convenu dans l'entente avec la FAO :

- Le chapitre 1, faisant l'objet de ce premier rapport, présente les produits 1 à 5, à savoir :
 - L'identification des données hydro-météorologiques requises pour la réalisation de ce projet, ainsi qu'un diagnostic sur les accessibilités (produits 1-2-3).
 - Une présentation des bases de données des observations météorologiques, des simulations et des scénarios climatiques (produits 4-5).
- Le chapitre 2 présentera les produits 6 et 7, à savoir :
 - La calibration du modèle hydrologique sélectionné.
 - La simulation des apports hydrologiques en climats futurs.
- Le chapitre 3 présentera les produits 8 à 10, (Gestion adaptée des ouvrages en climats futurs).

1. Pour la FAO, le secteur agricole inclue l'agriculture, l'élevage, la foresterie, la pêche et l'aquaculture.

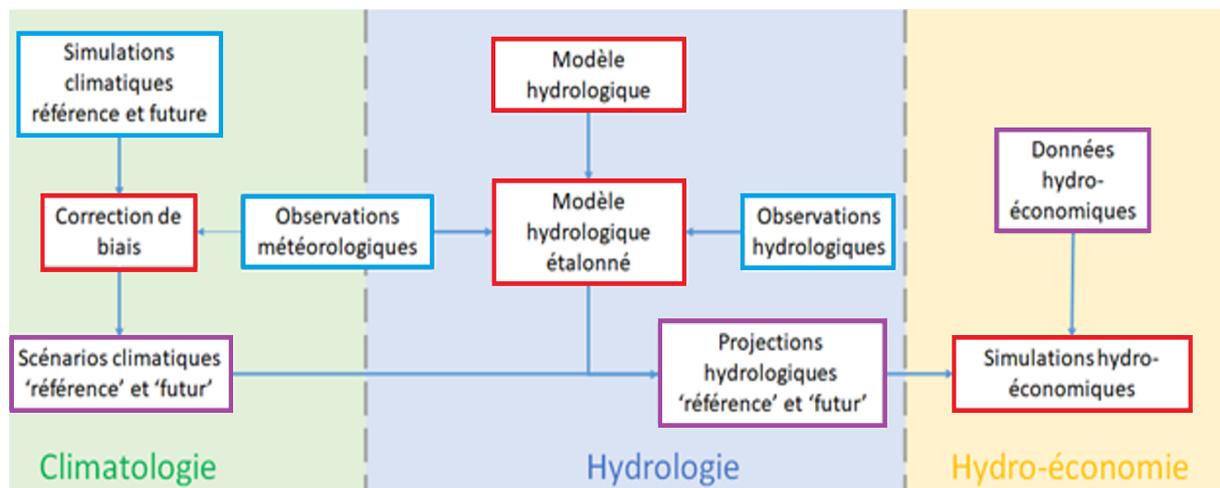


FIGURE 1 – Schéma de la méthodologie du projet GIRECCC incluant les trois volets du projet soit 1) la scénarisation climatique, 2) la modélisation hydrologique et 3) la modélisation hydro-économique. Les encadrés bleus, rouges et violets correspondent respectivement aux données nécessaires, aux modèles utilisés et aux résultats attendus.

Première partie

1^{er} Rapport

GIREC

1^{er} Rapport

**Projections et scénarios climatiques
dans le bassin du fleuve Sénégal**

Comment citer ce rapport :

M-A Bourgault, Guilpart E., A. Tilmant, R. Roy. 2020. Projections et scénarios climatiques dans le bassin du fleuve Sénégal. Report 1, Département de géographie, Université Laval, Qc, Canada

Chapitre 1

Projections et scénarios climatiques dans le bassin du fleuve Sénégal

Contents

1.1	Préambule	7
1.2	Liste des données nécessaires et leurs disponibilités	7
1.3	Base de données des données SIG	8
1.4	Base de données des observations météorologiques	8
1.5	Base de données des observations hydrologiques	13
1.6	Base de données des simulations climatiques	13
1.7	Base de données des scénarios climatiques	19

1.1 Préambule

Le choix des modèles (climatiques, hydrologique et hydro-économique) conditionne les données requises pour mener à bien ce projet. En effet, un modèle hydrologique distribué à base physique requiert davantage de données qu'un modèle conceptuel global (à la fois pour sa calibration [période de référence] que pour les projections hydrologiques [horizons futurs]). De même, le pas de temps influe sur le choix des données. La sélection des modèles s'est appuyée à la fois sur une revue de la littérature scientifique, ainsi que sur l'expertise des membres du projet GIRECCC.

Le modèle hydro-économique que nous avons sélectionné est le modèle SDDP développé par l'équipe du Pr. Amaury Tilmant, et utilisé dans le cadre du projet TCP/INT/3602 (Tilmant and Pina, 2018; Tilmant et al., 2020). Fonctionnant au pas de temps mensuel, les projections hydrologiques doivent avoir le même pas de temps. Puisque les données sont trop éparses et lacunaires dans le Bassin du Fleuve Sénégal (BFS) pour utiliser un modèle hydrologique distribué à base physique, nous avons adopté le modèle hydrologique conceptuel GR2M. Au niveau climatique, le BFS présente un fort gradient de précipitation Nord-Sud. Les modèles climatiques de circulation générale (GCMs) possédant une maille d'environ 2 degré ($\sim 200\text{km}$), la propagation du front de mousson vers le nord n'y est représentée qu'à l'échelle régionale. Ayant besoin d'une information plus locale, nous avons sélectionné les projections climatiques à plus haute résolution spatiale des modèles

de l'ensemble CORDEX-AFRICA (0.5 degré, soit environ 50 km de résolution).

1.2 Liste des données nécessaires et leurs disponibilités

L'ensemble de ces modèles nous a amené à concevoir une liste synthétique des données nécessaires pour réaliser ce projet. Elle est présentée en tableau 1.1.

<u>Type de données</u>	<u>Description</u>	<u>Variable</u>	<u>Résolution temporelle</u>	<u>Résolution spatiale</u>	<u>Source</u>
Observations météo	Données sur grille	Précipitations	Mensuelle (1940-1998)	0,5 deg	SIEREM
	Données sur grille	ETP	Mensuelle (1903-2016)	0,5 deg	CRU
Simulations climatiques	CORDEX-AFRICA	Précipitations	Mensuelle (1950-2095)	0,5 deg	Giorgi et al. (2009)
		ETP	Mensuelle (1950-2095)	0,5 deg	Giorgi et al. (2009)
Observations hydro.	Séries temporelles	Débits	Mensuelle (1960-2016)	-	SDAGE (2011)
Modèle numérique de terrain	Données sur grille	Élévation	-	30m	SRTM
Spatiale	Coordonnées stations hydro	Lon/Lat	-	-	OMVS
Hydro-économie	Valeur de l'eau	-	-	-	SDAGE (2011)

TABLE 1.1 – Liste des données nécessaires à la réalisation du Projet GIRECCC.

En ce qui concerne les données nécessaires à la réalisation du projet GIRECCC :

- Les données SIG nécessaires ont été compilées et placées dans le dossier "Base de données - SIG".
- Les observations météorologiques nécessaires ont été compilées et placées dans le dossier "Base de données - Climatologie" sous le dossier "Base de données - Observations météorologiques".
- Les données hydrologiques nécessaires ont été compilées et placées dans le dossier "Base de données - Hydrologie" sous le dossier "Base de données - Observations hydrologiques".

Les sections 1.3,1.4 et 1.5 sont dédiées à la présentation des bases de données susmentionnées.

1.3 Base de données des données SIG

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - SIG", et disponible sur le portail web de la FAO.

Dans la littérature scientifique, comme dans des documents de références, les limites du bassin versant du Fleuve Sénégal fluctuent (Annexe A)et deux délimitations sont couramment utilisées (Figure 1.1).

1.4 Base de données des observations météorologiques

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - Climatologie", et le sous-dossier "Base de données - Observations météorologiques" ; et disponible sur le portail web de la FAO.

Les observations météorologiques auxquelles nous avons eu recours sont de deux natures :

- Les observations de précipitations.
- Les observations d'évapotranspiration potentielle.

1.4.1 Les précipitations

L'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, établissement public de recherche français) présente le produit du Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM) comme un produit fiable, au plus proche des observations pour des applications en hydrologie spécifiquement. Il a été conçu à partir des données des stations du SIEREM (89%), du Climate Research Unit (CRU)(8,5%) et d'autres sources (2,5%). De plus, (i) un travail important sur la fiabilité des données a été réalisé par l'IRD-HSM (HydroSciences Montpellier) ; (ii) le produit possède la plus longue série temporelle (1940-1998) ; et (iii) les mesures in-situ présentent moins d'incertitudes que la télédétection (Lennard et al., 2015; Rauniyar et al., 2017). Le produit du SIEREM est donc plus adapté que les réanalyses (qui ont une série temporelle plus courte, environ 1979-actuel, et qui présentent de plus fortes incertitudes).

Toutefois, nous tenons à préciser que le produit du SIEREM ne couvre pas l'intégralité du bassin dans sa partie la plus septentrionale (Figure 1.3). Il en sera donc de même pour les scénarios climatiques. Par conséquent, les précipitations moyennes attribuées aux sous-bassins de Bakel et de Kayes¹ ont été calculées comme étant la moyenne des précipitations sur les superficies tronquées (soit 93% et 94% respectivement, Tableau 1.2).

Sous-bassins	Superficie réelle	Superficie tronquée
Bakel	393 754 km ²	366 047 km ² (soit 93%)
Kayes	291 254 km ²	308 548 km ² (soit 94%)

TABLE 1.2 – Tableau relatant des approximations des superficies pour les sous-bassins hydrologiques de Kayes et de Bakel pour les précipitations.

La figure 1.4 (haut, gauche) illustre les précipitations moyennes sur les années 1940 à 1998 sous la forme de carte. Le volume des précipitations ainsi que le gradient méridional sont tout à fait cohérents avec la littérature scientifique (Orstom, 1974; Bader et al., 2014). Le trait rouge représente les limites du BFS.

La figure 1.4 (haut, droite) représente les précipitations annuelles latitudinales (pour des longitudes comprises entre 17,75°W et 5,25°W). On y retrouve la même variabilité

1. Ces sous bassins sont des sous-bassins hydrologiques, associés aux stations de Bakel et de Kayes. Pour leurs délimitations, veuillez vous référer à l'annexe A. Davantage de précisions sur ces sous-bassins hydrologiques seront apportés dans le chapitre 2.

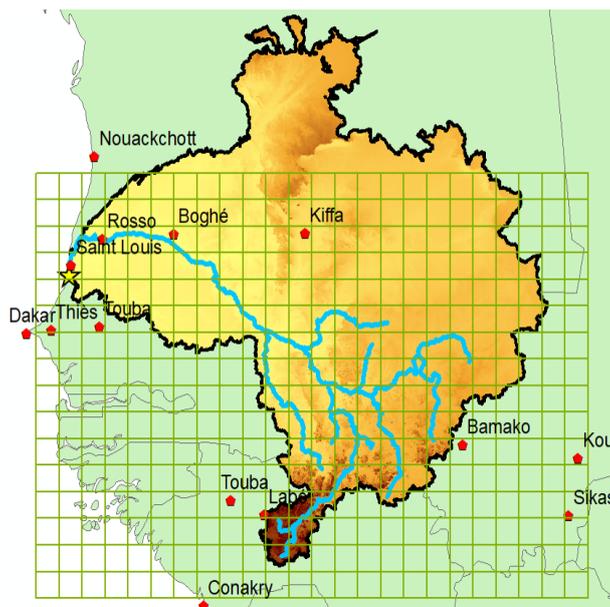


FIGURE 1.3 – Limite du bassin versant du Fleuve Sénégal et de la grille des données SIEREM qui ne couvre pas entièrement le BFS.

inter-annuelle que celle suggérée dans la littérature : la période 1950-1970 correspond à une période humide, alors que la période 1970-1995 est une période sèche. Cette variabilité interannuelle est visible sur l'ensemble des latitudes, et sur leur moyenne (en noir).

La figure 1.4 (bas, gauche) représente les précipitations mensuelles latitudinales (pour des longitudes comprises entre $17,75^{\circ}\text{W}$ et $5,25^{\circ}\text{W}$). Une alternance est clairement exprimée entre la saison sèche et la mousson. Il est à noter que la mousson s'amorce (saut) plus tôt dans la partie méridionale du bassin, et se retire plus tardivement.

1.4.2 Evapotranspiration potentielle

Bien qu'il soit un phénomène physique tenant une place de premier ordre dans les bilans hydriques, l'évapotranspiration potentielle (ETP) est très difficilement mesurable. C'est pourquoi les jeux de données spatialisées d'ETP sont presque exclusivement calculés à partir de différentes équations. Pour cela, plusieurs techniques existent. La thèse de Oudin (2004) en présente un état des lieux, en distinguant les techniques « thermiques », « dynamiques », et « combinatoires ».

Un travail bibliographique nous a permis (i) de compiler les rares mesures in-situ d'ETP qui ont été réalisées dans le BFS (monographie de l'ORSTOM et de l'IRD) avec les données d'ETP du SIEREM (calculées via la formule de Penman et des observations météorologiques in-situ); (ii) de lister les jeux de données spatialisés les plus couramment utilisés dans la littérature scientifique (CRU, ClimWat, ou calculé par la formule de Thornthwaite). Nous avons donc réalisé une comparaison entre les données ainsi compilées (i) et les divers jeux de données spatialisées (ii).

Ainsi, nous avons sélectionné la base d'ETP du CRU, puisqu'elle présente le moins

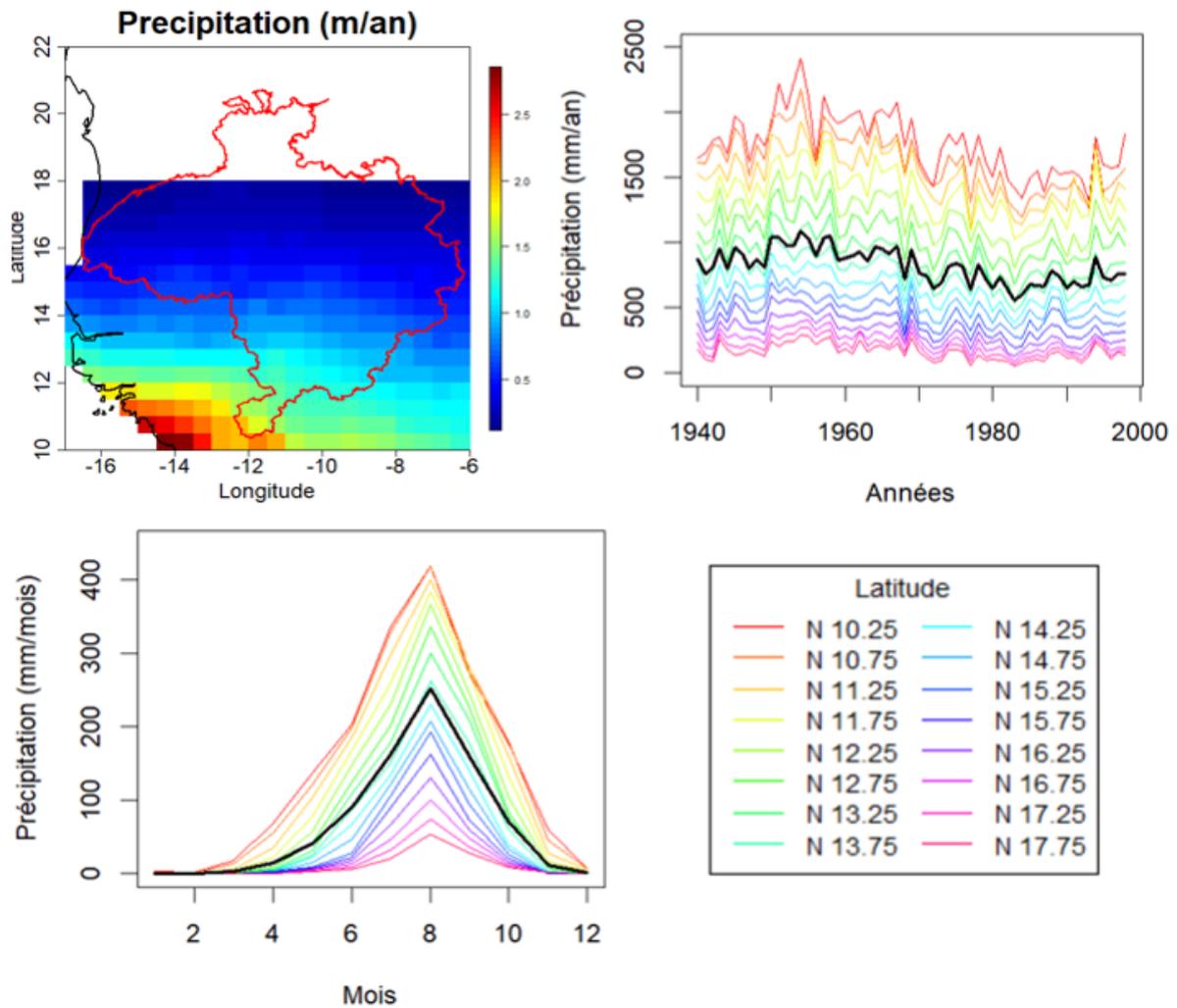


FIGURE 1.4 – Caractéristiques principales de la base de données des précipitations (SIEREM).

de différences avec les mesures in-situ d'ETP et les données du SIEREM. Elle possède une résolution de 0,5 degré, couvre l'ensemble du BFS, un pas de temps mensuel, et une extension de 1940 à 1998 inclus (Figure 1.5).

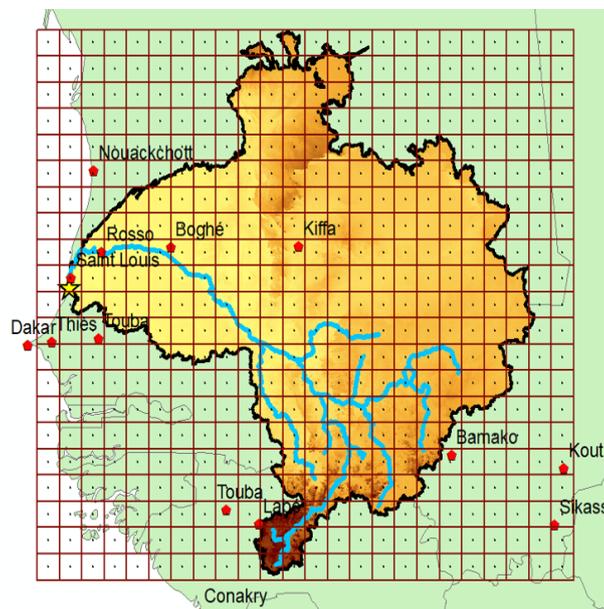


FIGURE 1.5 – Limite du bassin versant du Fleuve Sénégal et de la grille des données CRU ; Le BFS est entièrement couvert.

La carte d'ETP moyen est présentée en figure 1.6 haut à gauche. Elle a été calculée sur les années 1940 à 1998. L'ETP présente un gradient méridional opposé à celui des précipitations, et proche de celui de la température de surface. Le trait gras noir représente les limites du BFS.

L'ETP annuelle latitudinale (en haut à droite) ne présente pas de tendance interannuelle significative. La moyenne des latitudes est représentée en noir. L'ETP mensuelle latitudinale (en bas à gauche) possède un signal pseudo-sinusoïdal, avec une augmentation durant la saison sèche et une diminution lors de la mousson (dont le minimum coïncide avec le maximum des précipitations).

1.5 Base de données des observations hydrologiques

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - Hydrologie", et le sous-dossier "Base de données - Observations hydrologiques"; et disponible sur le portail web de la FAO.

Les phases de calibration/validation du modèle hydrologique nécessitent des séries temporelles de débits. La base de données des débits utilisée est la même que celle présentée dans le SDAGE (OMVS, 2011). La figure 1.7 présente les caractéristiques de la base de données de débits pour les stations hydrologiques les plus importantes du bassin.

On retrouve les mêmes tendances interannuelles que celles observées pour les précipitations. Sans surprise, le régime hydrologique saisonnier du fleuve Sénégal est conditionné

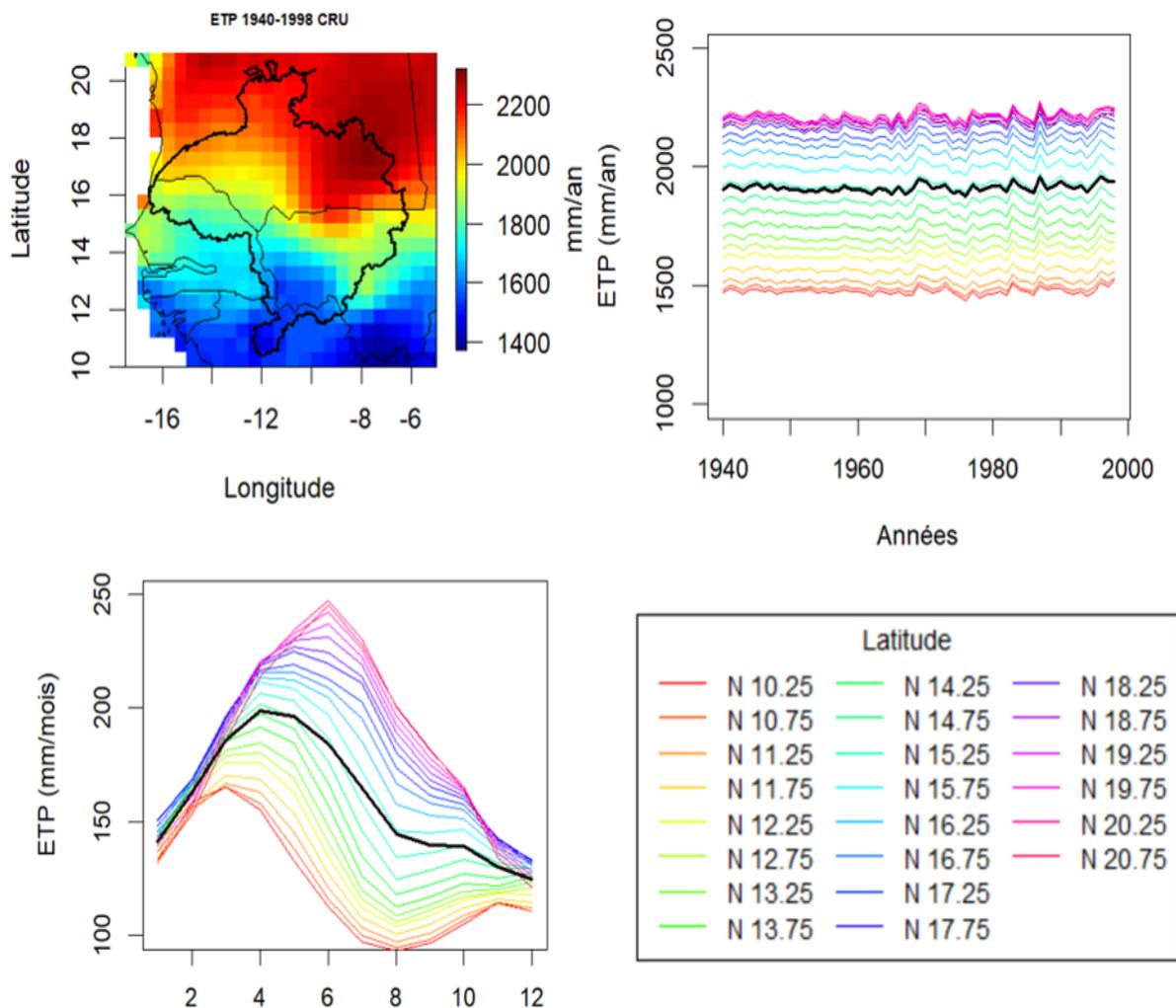


FIGURE 1.6 – Caractéristiques principales de la base de données d’ETP du CRU.

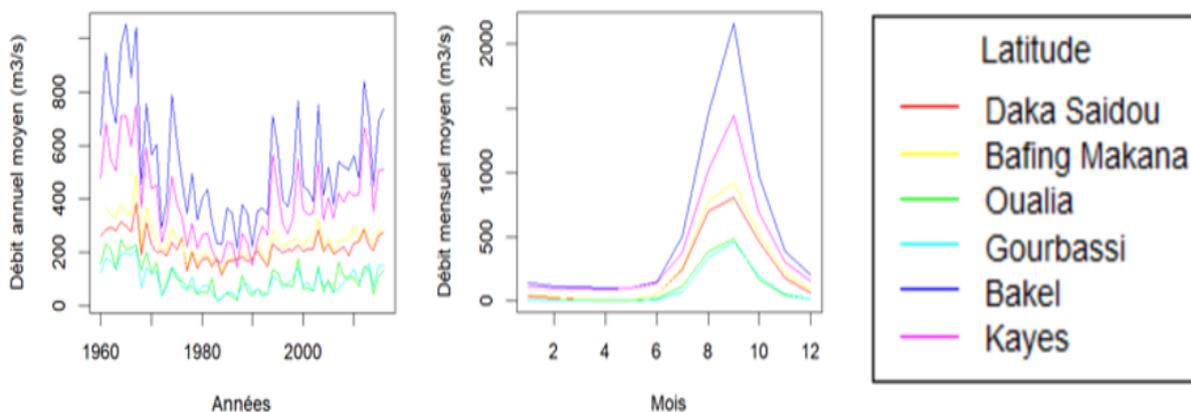


FIGURE 1.7 – Caractéristiques principales de la base de données des débits, illustration pour les stations de Daka Saidou, Bafing Makana, Oualia, Gourbassi, Kayes et Bakel. Les données présentées concernent la période entre 1960 et 2016 (sauf pour Bafing Makana : 1961-2016)

par les précipitations, et principalement par la mousson. Un décalage associé au laminage de l'écoulement d'un mois est à observer entre le maximum des précipitations et le maximum de débit.

1.6 Base de données des simulations climatiques

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - Climatologie", et le sous-dossier "Base de données - Simulations climatiques" ; et disponible sur le portail web de la FAO.

1.6.1 Préambule et notion de base sur la scénarisation climatique

Les simulations climatiques sont à ce jour produites par deux grands types de modèles : les modèles climatiques globaux (GCMs) et les modèles climatiques régionaux (RCMs). Les GCMs couvrent l'ensemble de la planète et ont une résolution horizontale d'environ 200 km. Les RCMs ne couvrent qu'une partie de la planète à une résolution généralement autour de 50 km. Cependant, leur plus fine résolution leur permet de représenter des processus physiques avec une meilleure résolution temporelle et spatiale.

Pour l'Afrique, un ensemble de simulations climatiques régional, CORDEX-AFRIQUE ((Giorgi et al., 2009), CORDEX; <https://cordex.org/domains/region-5-africa/>), a été spécialement conçu pour répondre aux besoins d'information climatologique. Tel que le montre la littérature, CORDEX-AFRIQUE présente généralement de meilleurs résultats que les GCMs (Camara et al., 2013; Gbobonyi et al., 2014; Mariotti et al., 2014; Hernández-Díaz et al., 2013; Nikulin et al., 2012; Paxian, 2016; Kim et al., 2014; Mounkaila et al., 2014). C'est pour cette raison que l'ensemble CORDEX-AFRIQUE a été sélectionné pour la fabrication de scénarios climatiques qui ont été réalisés dans le cadre de cette étude.

Cependant, tout comme pour les modèles globaux, les modèles régionaux comportent aussi des biais lorsqu'ils sont comparés à des observations. Les biais sont le résultat d'un ensemble d'incertitudes qui doit être pris en compte avant d'être utilisé dans des modèles d'impact (e.x. modèle hydrologique). Parmi ces incertitudes on note l'évolution dans le temps des émissions de gaz à effet de serre (GES), la nature chaotique des phénomènes atmosphériques et les erreurs structurales des modèles eux-mêmes, dues à des limitations d'échelle et/ou à des imperfections dans les algorithmes.

Puisque des incertitudes existent quant aux concentrations atmosphériques futurs en gaz à effet de serre, il est recommandé d'utiliser plusieurs scénarios tenant comptant des trajectoires d'émissions anthropiques. Les facteurs déterminants des émissions anthropiques de GES sont principalement la taille de la population, l'activité économique, le mode de vie, la consommation d'énergie, le mode d'utilisation des terres, la technologie et la politique climatique. Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP), utilisés pour établir des projections fondées sur ces facteurs, décrivent quatre voies de développement différentes pour le XXI^e siècle concernant les émissions et les concentrations atmosphériques de GES, les émissions de polluants atmosphériques et l'affectation des

terres (IPCC, 2007a). Les RCP comprennent un scénario strict d'atténuation (RCP2,6), deux scénarios intermédiaires (RCP4,5 et RCP6,0) et un scénario d'émissions très élevées de GES (RCP8,5). Les plus communément utilisés sont les RCP 2.6, 4.5 et 8.5, qui correspondent respectivement à une baisse substantielle des émissions mondiales de GES entre 2010 et 2020 (scénario « optimiste »), à une baisse des émissions mondiales de GES à partir de 2040 (scénario « modéré ») et à une progression constante des émissions tout au long du siècle (scénario « maintien du statu quo »).

Les autres types d'incertitude, soient la variabilité naturelle du climat et les erreurs structurelles des modèles, sont traités de plusieurs manières. Par exemple, il est recommandé de toujours utiliser plus qu'un seul modèle climatique. Cela permet non seulement de compenser les erreurs et imperfections des modèles en créant un ensemble plus robuste, mais cela prend également mieux en compte la variabilité naturelle du climat qui existe dans chaque simulation. Le réchauffement illustré à la Figure 1.8, par exemple, est le résultat d'une trentaine de simulations (zones ombragées) issues des quatre scénarios RCP. De plus, il est recommandé de calculer les statistiques et les probabilités sur des périodes assez longues, soit minimalement 20 à 30 ans ce qui limite l'influence de la variabilité naturelle du climat sur les résultats. Malgré tout, lorsque l'on compare les simulations de CORDEX-AFRIQUE avec des observations, des biais persistent ce qui nous oblige à post-traiter les données provenant des simulations climatiques avant d'être intégrées dans un modèle hydrologique.

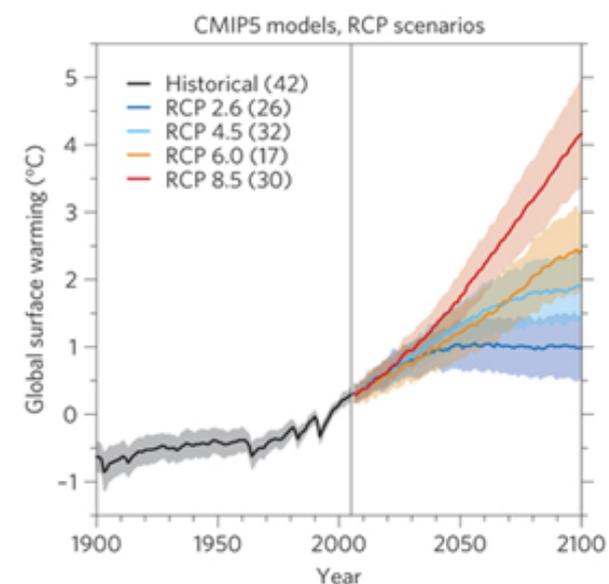


FIGURE 1.8 – Réchauffement des températures mondiales selon les différents scénarios d'émissions de GES, par rapport à la fin du 20e siècle (1986-2005). Le nombre entre parenthèses indique le nombre de simulations climatiques utilisées (Knutti and Sedláček, 2012).

Dans le cadre de cette étude, les simulations du climat de l'ensemble CORDEX-AFRIQUE ont été comparées aux données de précipitations sur grille du SIEREM provenant de l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD) (=www.hydrosciences.fr/sierem/produits/Grilles/GrillesIRD.asp) et aux données d'évapotranspiration provenant

de Climate Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk>).

Pour l'ensemble des modèles, le biais sur les données de précipitation varie entre -47 mm et +43 mm avec une légère tendance des simulations à sous estimer les précipitations de la portion ouest du bassin et à surestimer les précipitations de la portion est du bassin versant. De plus, comme le montre la Figure 1.9, on retrouve une forte variabilité dans la capacité des simulations à reproduire les observations pour la portion sud du bassin versant, là où les précipitations annuelles sont maximales.

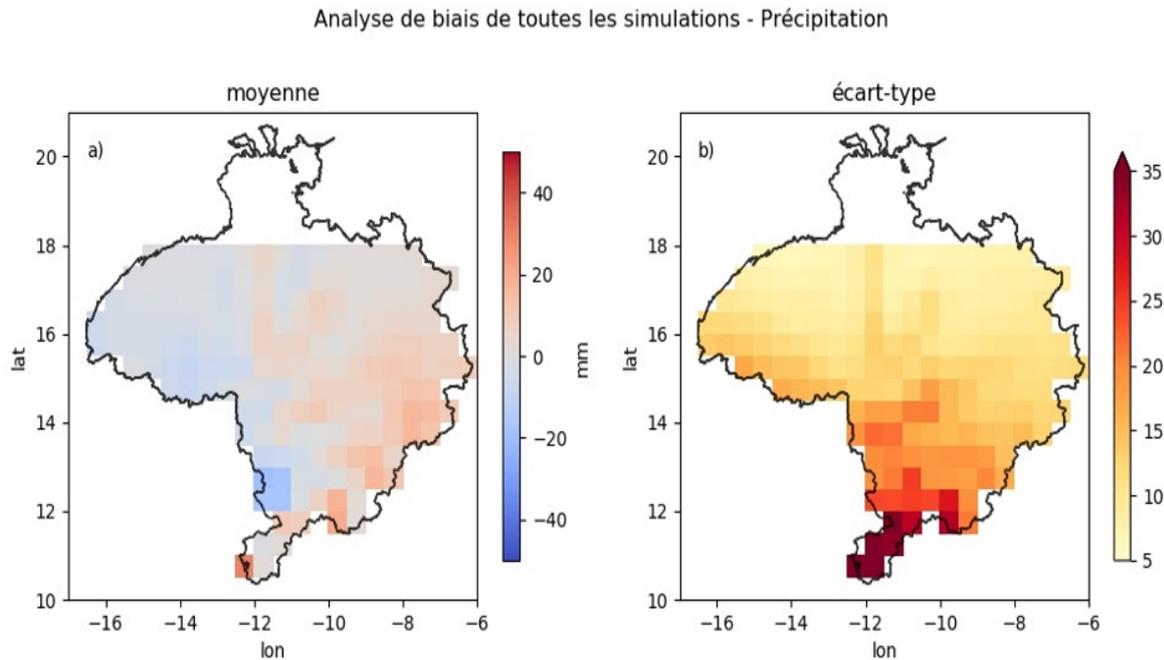


FIGURE 1.9 – Biais annuels moyens des précipitations de 1951 à 1998 des 56 simulations de l'ensemble CORDEX-Afrique. Les deux cartes montrent a) les valeurs moyennes et b) l'écart type de tous les biais calculés.

Pour l'évapotranspiration, les biais moyens varient entre -21 mm et 64 mm avec une tendance des simulations à surestimer l'évapotranspiration de la portion sud-est du bassin et à sous-estimer l'évapotranspiration de la portion nord-ouest du bassin. Comme le montre la Figure 1.10, on observe une faible variabilité entre les modèles.

Ainsi, avant d'être utilisées comme une entrée des modèle d'impact, les données de sortie des simulations climatiques doivent être post-traitées. Pour plus d'information concernant la fabrication de scénarios climatiques, il est conseillé de se référer au document de vulgarisation sur la science du climat et sur la production de scénarios climatiques(Charron, 2016).

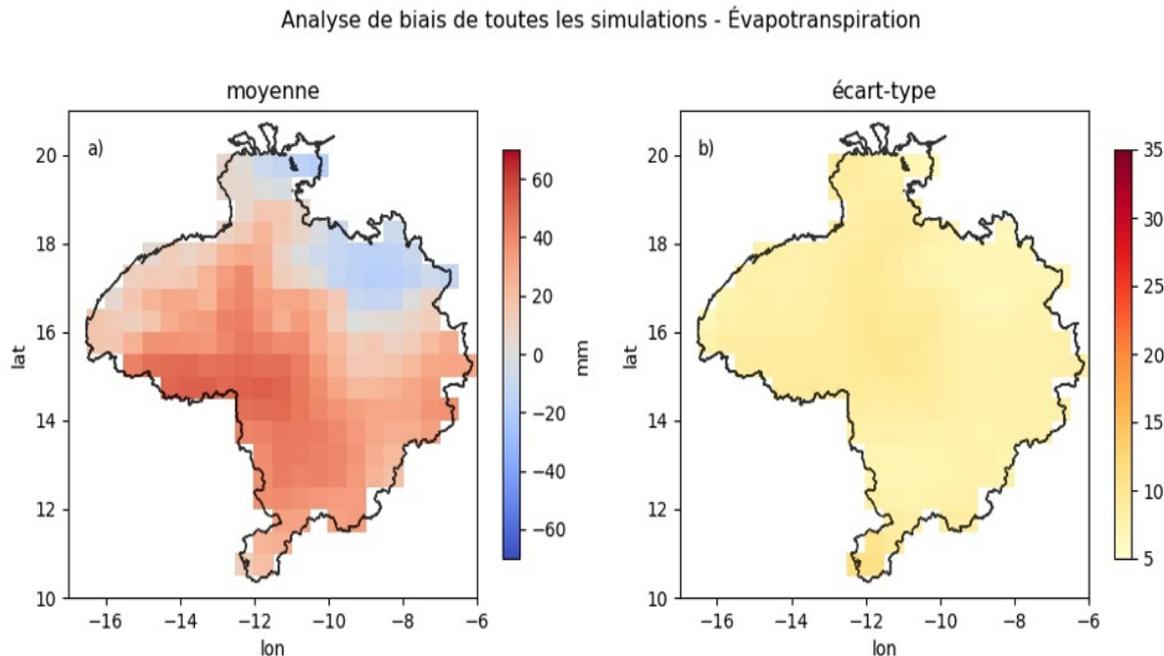


FIGURE 1.10 – Analyse de biais de l'évapotranspiration provenant de 56 simulations de l'ensemble CORDEX-Afrique entre 1951 et 1998. Les deux cartes montrent a) les valeurs moyennes et b) l'écart type de tous les biais.

1.6.2 Présentation de la base de données des simulations climatiques

Les données de précipitation (pr) provenant de 56 simulations incluant 13 RCP 2.6, 21 RCP 4.5 et 22 RCP 8.5, ainsi que les données d'évapotranspiration potentielle (evspsblpot) provenant de 22 simulations incluant 4 RCP 2.6, 9 RCP 4.5 et 9 RCP 8.5 ont été recensées et archivées dans une base de données. Le tableau 1.3 présente la liste des GCMs et des RCMs ainsi que l'ensemble des RCPs qui ont été recensés dans la base de données. La couleur rouge est utilisée pour indiquer les simulations climatiques qui sont disponibles pour les deux variables alors que la couleur noire est utilisée pour indiquer les simulations climatiques qui sont disponibles seulement pour les précipitations.

Des analyses d'évolution dans le temps de pr et evspsblpot ont été réalisées (analyses de delta). Les analyses de delta permettent de quantifier les changements annuels moyens entre une période future et une période de référence. Les résultats sont présentés en pourcentages de variations. Une valeur positive indique une augmentation alors qu'une valeur négative indique une diminution.

Dans le cadre de ce projet, la période de référence qui a été choisie est de 1951 à 1998. L'horizon 2030 correspond à une moyenne de toutes les données entre 2020 à 2049 et l'horizon 2050 à une moyenne de toutes les données entre les années 2040 et 2069. Les pourcentages de variations des précipitations aux horizons 2030 et 2050 varient entre 15% d'augmentation et 8% de diminution alors que les pourcentages de variations de l'évapotranspiration potentiel varient entre 2% et 10% d'augmentation (Figure 1.11).

Institutions	CLMcom	SADC	DMI	KNMI	SHMI	MPI	UQAM
Modèles	CCLM4-8-17	CSC	HIRHAM5	RACMO22T	RCA4	REMO2009	CRCM5
CCCma-CanESM2					rcp4.5 rcp8.5		rcp4.5
CNRM-CERFACS-CNRM-CMS5	rcp4.5 rcp8.5				rcp4.5 rcp8.5		
CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0					rcp4.5 rcp8.5		
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2G					rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6	
MOHC-HadGEM2-ES	rcp4.5 rcp8.5			rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp8.5	
ICHEC-EC-EARTH	rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5	rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5		
IPSL-IPSL-CMSA-LR					rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp8.5	
MPI-M-MPI-ESM-LR	rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5			rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5		rcp4.5
MIROC-MIROC5					rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5	rcp2.6 rcp8.5	
NCC-NorESM1-M					rcp2.6 rcp4.5 rcp8.5		

TABLE 1.3 – Tableau présentant les simulations disponibles dans l’ensemble CORDEX-Afrique incluant les institutions responsables, ainsi que la combinaison des modèles globaux et régionaux utilisée pour réaliser les simulations climatiques. .

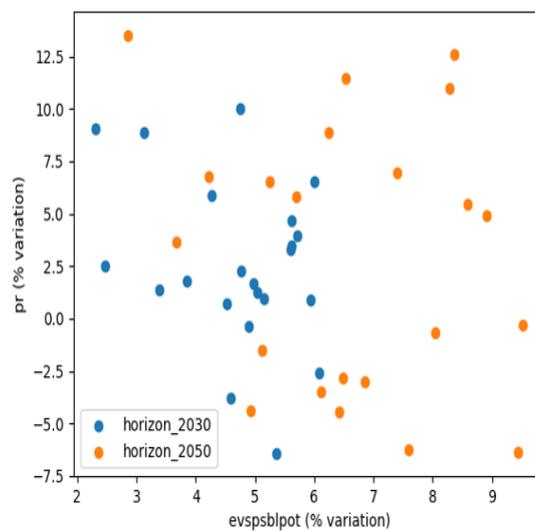


FIGURE 1.11 – Changement annuels moyen de l’évapotranspiration et des précipitation pour les horizons 2030 et 2050.

1.7 Base de données des scénarios climatiques

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - Climatologie", et le sous-dossier "Base de données - Scénarios climatiques" ; et disponible sur le portail web de la FAO.

1.7.1 Fabrication des scénarios climatiques

Les scénarios climatiques ont été réalisés en utilisant les données de précipitation et d'évapotranspiration potentielle issues de modèles climatiques provenant de l'ensemble CORDEX-AFRIQUE. Des données d'observation sur grille pour les mêmes variables ont été utilisées pour post-traiter les simulations climatiques, ce qui a permis de fabriquer les scénarios climatiques.

1.7.2 Post-traitement

La méthode de post-traitement utilisée est une correction par quantiles (*Quantile Mapping*, en anglais). Cette technique cherche à corriger les différences entre la simulation et les observations pendant une période dite de « référence ». Pour les fins du projet, la période 1951-1998 a été définie comme référence.

La méthodologie employée pour la correction par quantiles est décrite dans Gennaretti et al. (2015) et Mpelasoka and Chiew (2009). Toutefois, dans le cadre de ce projet, certaines spécificités s'appliquent pour la production de scénarios climatiques ainsi qu'à leur validation.

La correction des biais a été réalisée sur des données mensuelles, c'est-à-dire que chaque mois de l'année est post-traité. Les données des modèles climatiques ont été interpolées en utilisant une grille identique aux observations. Une interpolation linéaire a été utilisée pour uniformiser les simulations. Une interpolation de plus proche voisin a été utilisée pour uniformiser les calendriers des simulations. Tous les calendriers des simulations climatiques ont été interpolés sur 365 jours.

Pour valider les scénarios climatique, plusieurs tests ont été effectués. La distribution des percentiles 99, 95, 75, 50, 25, 5 et 1 ainsi que les maximums et les minimums pour les cycles annuels des données de simulations, des données d'observation et des données de simulations post traitées pour les périodes de référence ont été comparées (Figure 1.12 ; exemple spécifique d'une comparaison).

Les moyennes annuelles des données de simulations, des données d'observation et des données de simulations post traitées pour les périodes de référence ont aussi été comparées (Figure 1.13 ; exemple spécifique d'une comparaison pour les précipitations).

De plus, les augmentations entre les périodes de référence et les périodes futures des simulations ont été analysées (Figure 1.14 ; exemple spécifique d'une comparaison). Ces analyses permettent d'évaluer si les augmentations observées entre les périodes de références et les périodes futures pour les simulations post-traitées sont semblable aux augmentations

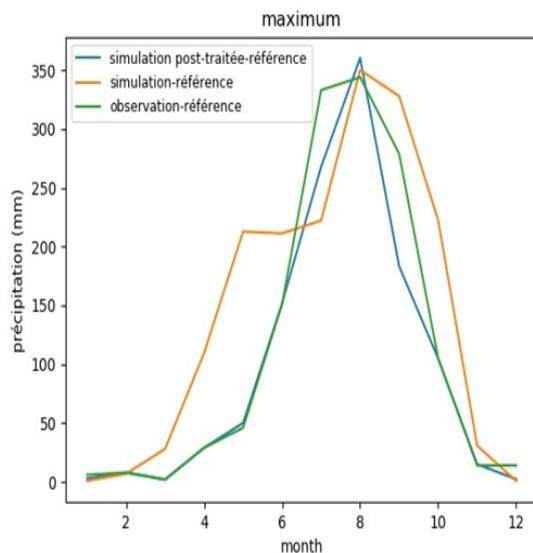


FIGURE 1.12 – Cycles annuels des données de simulation (courbe orange), d’observation (courbe verte) et de simulation post-traitées (courbe bleue) pour les valeurs maximales des précipitations d’un point de grille pour la période de référence (1951-1998).

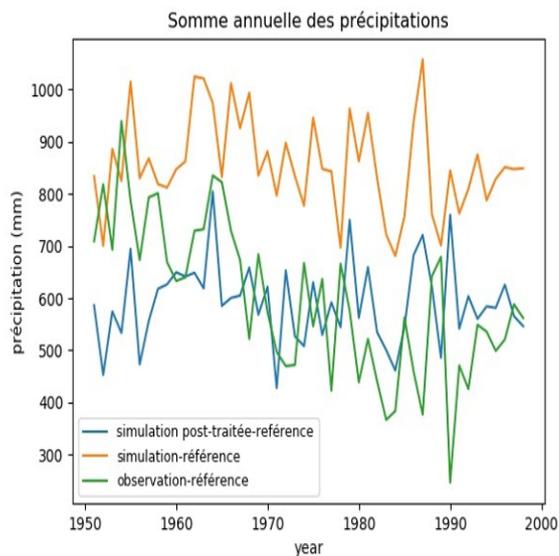


FIGURE 1.13 – Moyennes annuelles des données de simulation (courbe orange), d’observation (courbe verte) et de simulation post-traitées (courbe bleue) pour les valeurs de précipitations d’un point de grille pour la période de référence (1951-1998).

observées entre les périodes de référence et les périodes futures pour les simulations brutes.

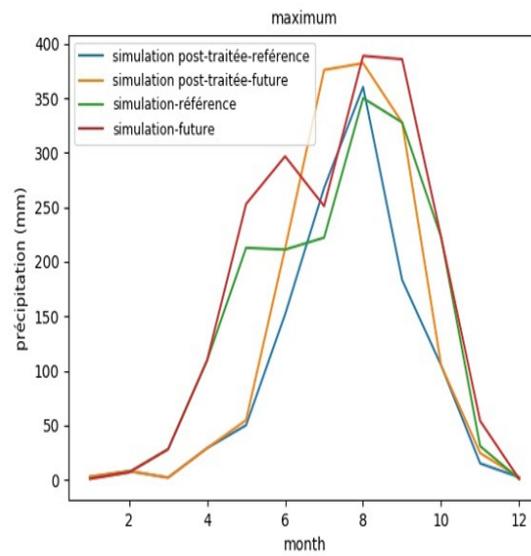


FIGURE 1.14 – Cycle annuel des valeurs maximales de précipitation pour les simulation brutes et post traitées d'un point de grille pour la période de référence (1951 à 1998) et la période future (1998-2100).

Après l'ensemble de ces vérifications, aucun problème majeur n'a été détecté.

Deuxième partie
2^{ème} Rapport

GIREC

2^{ème} Rapport

**Projections hydrologiques dans le
bassin du fleuve Sénégal**

Comment citer ce rapport :

Guilpart E., A. Tilmant, M-A Bourgault, R. Roy. 2020. Projections hydrologiques dans le bassin du fleuve Sénégal. Report 2, Département du génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Qc, Canada

Chapitre 2

Projections hydrologiques dans le bassin du fleuve Sénégal

Contents

2.1	Choix et philosophie de la modélisation hydrologique	25
2.2	Choix du modèle hydrologique	26
2.3	Sélection des stations hydrologiques clés pour modéliser le fleuve Sénégal et ses trois affluents majeurs	27
2.4	Bases de données pour la calibration et la validation du modèle	28
2.5	Calibration et validation du modèle GR2M	29
2.6	Production des projections hydrologiques aux stations sélectionnées	40
2.7	Clustering et sélection des projections hydrologiques archétypiques	42
2.8	Distribution des débits au niveau des noeuds du modèle hydro-économique	51

2.1 Choix et philosophie de la modélisation hydrologique

Plusieurs possibilités existent pour modéliser les débits du fleuve Sénégal et de ses affluents. Les choix réalisés ont été fonction des objectifs du projet.

Du point de vue de la gestion de l'eau, certaines décisions clés d'allocation sont dépendantes d'indicateurs hydrologiques déterminés à la station de Bakel. Or, la crue annuelle tient une place prépondérante dans l'hydraulicité du fleuve. Il est donc essentiel que les projections hydrologiques issues de notre modélisation puissent représenter la crue annuelle à cette même station. Par conséquent, nous sommes dans l'obligation d'exclure tous les types de modélisation directement basés sur des débits incrémentaux, pour lesquels la crue ne serait représentée (cf Annexe B). Nous faisons donc le choix d'opter pour une méthodologie de modélisation qui repose dans un premier temps sur les débits totaux. Cela nous permettra de produire les projections hydrologiques, entre autres à la station de Bakel, et d'en sélectionner les plus spécifiques.

Voici un bref descriptif de la méthodologie utilisée dans ce chapitre :

- (i) **Choix du modèle hydrologique** : Les stations présentes sur le fleuve Sénégal et ses affluents sont éparses et peu nombreuses. De plus, la faible disponibilité et les lacunes en données rendent caduques la calibration, la validation et l'utilisation d'un modèle hydrologique distribué à base physique. Nous opterons donc pour un modèle hydrologique conceptuel (section 2.2).
- (ii) **Sélection des stations clés** : Le Bafing, le Bakoye, et la Falémé sont les trois affluents majeurs du fleuve Sénégal. Il est primordial que leurs débits soient correctement modélisés. Pour cela, nous devons identifier les stations clés possédant des observations de débits fiables, les plus complètes, et les plus longues possibles (section 2.3).
- (iii) **Bases de données pour la calibration/validation** : Une fois le modèle hydrologique adéquat identifié et les stations hydrologiques sélectionnées, une base de données d'observations météorologiques et hydrologiques (section 2.4) sera requise afin de calibrer et de valider le modèle en différents points du bassin (section 2.5).
- (iv) **Production des projections hydrologiques** : Avec notre modèle hydrologique calibré et validé, nous serons en mesure d'utiliser les scénarios climatiques afin de produire des projections hydrologiques aux stations sélectionnées (section 2.6).
- (v) **Sélection des projections hydrologiques typiques** : Puisque nous disposons d'une combinaison de 1210 scénarios climatiques, nous en aurons tout autant de projections hydrologiques. Afin de réduire ce nombre, nous sélectionnerons les cinq projections hydrologiques les plus spécifiques pour l'horizon 2040 (soit la période comprise entre le 1^{er} janvier 2031 au 31 décembre 2060 inclus) et l'horizon 2075 (du 1^{er} janvier 2066 au 31 décembre 2095 inclus), en nous basant sur huit attributs hydrologiques, définis à la station de Bakel (section 2.7).
- (vi) **Distribution des débits dans le BFS** : La dernière étape de la modélisation hydrologique consistera à distribuer les débits en certains endroits du bassin (section 2.8) : il s'agit de points clés, correspondant à des exutoires de sous bassins hydro-économiques (tel que présentés dans le SDAGE). Cette étape est nécessaire pour les besoins du modèle hydro-économique.

2.2 Choix du modèle hydrologique

Notre choix s'oriente vers un modèle hydrologique conceptuel. Puisque l'objet de ce projet n'est pas de réaliser une comparaison des performances des modèles hydrologiques dans le BFS, nous préférons avoir recours à un modèle ayant « déjà fait ses preuves ». Parmi les modèles hydrologiques utilisés dans le BFS, ceux de type GR ont largement été employés, calibrés et validés par plusieurs auteurs, prouvant ainsi leurs robustesses et leurs fiabilités. Aussi, puisque le pas de temps correspondant à notre étude est le pas de temps mensuel (du fait du modèle hydro-économique utilisé), le GR2M (Mouelhi, 2003; Mouelhi et al., 2006) est le modèle le plus adapté aux besoins de notre étude.

Une fois calibré et validé sur le bassin considéré, le modèle GR2M permet de déterminer les débits à partir de séries temporelles de précipitations et d'évapotranspiration potentielle.

2.2.1 Description et fonctionnement du modèle GR2M

Le modèle GR2M a été développé par l'équipe de l'INRAE (anciennement CEMA-GREF, puis IRSTEA) d'Antony. Il a été utilisé de par le monde, et référencé dans plus de deux cents articles scientifiques.

Le GR2M est un modèle hydrologique conceptuel, à deux paramètres, dont les données d'entrées requises sont :

- Une série temporelle représentant les précipitations moyennes du bassin modélisé.
- Une série temporelle représentant l'évapotranspiration potentielle moyenne du bassin modélisé.
- La superficie du bassin.
- Il est à noter qu'une série temporelle représentant les débits observés à l'exutoire est nécessaire pour le calage du modèle.

Le schéma de fonctionnement du GR2M est présenté en figure 2.1. Il est constitué d'une fonction de production, et d'une fonction de transfert.

La fonction de production (Figure 2.1, cerne rouge) est régie par le premier paramètre $X1$, et est constituée d'un réservoir « sol » (S) ainsi que d'une fonction d'interception. Les précipitations sont réparties en deux, une fraction directe et une fraction interceptée. Le réservoir sol capte la fraction interceptée, et, en fonction de l'évapotranspiration et du niveau du réservoir, il produit une quantité d'eau qui s'additionnera à la fraction directe des précipitations. En outre, $X1$ a pour rôle d'ajuster les données d'entrées (Précipitations et d'évapotranspiration potentielle - ETP).

La fonction de transfert (Figure 2.1, cerne verte) est constituée d'un réservoir de routage. Il est alimenté par la fraction directe de la pluie ainsi que la quantité d'eau produite par le réservoir sol. Le second paramètre, $X2$, est un paramètre d'échange ($0 < X2 < 1$), qui permet de router une partie de l'eau vers « extérieur du bassin » (nappes phréatiques, ...). Ce réservoir se vidange en suivant une loi de la forme $x^2/(x + a)$, ce qui permet de conserver une portion de l'eau disponible dans le réservoir pour les pas de temps suivants.

Aussi, la forme des équations de vidange du réservoir « Sol » (équation 4 de la figure 2.1) et du réservoir de routage (équation 8 de la figure 2.1) implique que le modèle GR2M a une certaine « mémoire » puisque les états de remplissage au temps t auront une incidence au temps $t+1$. Nous supposons ici que cet effet mémoire est au maximum de douze mois¹)

2.3 Sélection des stations hydrologiques clés pour modéliser le fleuve Sénégal et ses trois affluents majeurs

Sur le tracé du Bafing, deux stations hydrologiques ont été retenues : Daka Saidou et Bafing Makana. Elles ont été sélectionnées car leurs observations sont considérées comme

1. En effet, les fortes précipitations associées au saut de mousson tendent à saturer les deux réservoirs, effaçant ainsi l'influence des états antérieurs du modèle.

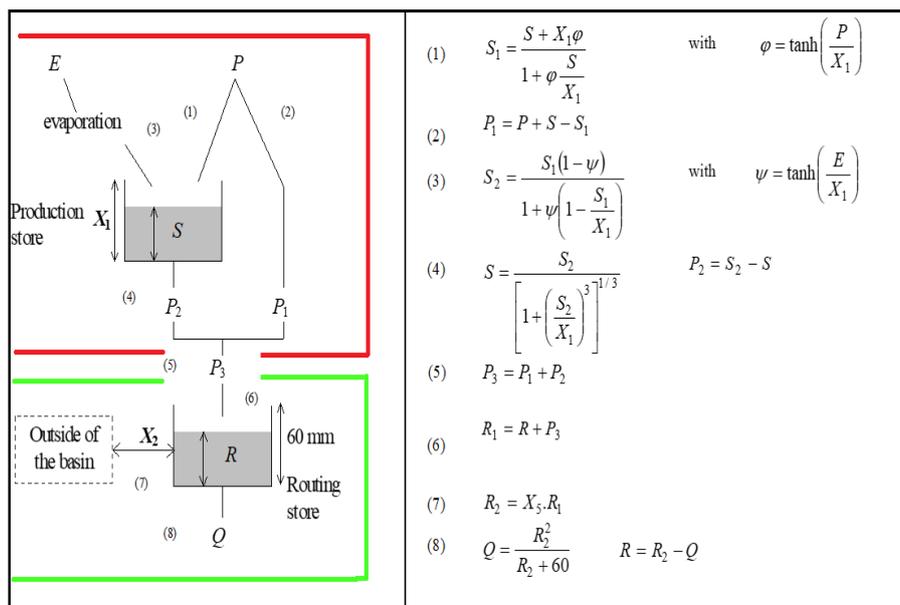


FIGURE 2.1 – Schéma de fonctionnement du GR2M tel que présenté dans Mouelhi (2003) et utilisé dans notre étude. A gauche se trouve la représentation schématique du modèle et à droite les équations associées.

fiables. En effet, les courbes de tarissement ont été réalisées près d'une centaine de fois, pour un large panel de débits (Orstom, 1974; Bader et al., 2014). De plus, les débuts des enregistrements sont antérieurs à 1960, vont jusqu'à la fin de l'année 2016, et sont presque complets (lacunes inférieures à 5% de l'ensemble de la série). Puisque qu'aucun ouvrage de grande ampleur (ex : barrage) n'a été construit en amont, le régime d'écoulement de ces stations est naturel.

Sur la Falémé, la station de Gourbassi présente les mêmes qualités que les deux stations précédentes. Il en est de même pour la station de Oualia, située sur le Bakoye.

La station de Kayes a été retenue car elle se situe en aval de la confluence du Bafing et du Bakoye. Aussi, il nous sera possible de distribuer les débits sur le tronçon du Sénégal allant de la confluence Bakoye/Bafing jusqu'à la confluence Sénégal/Falémé. Similairement, la station de Bakel a été sélectionnée puisque, outre le fait que c'est une station de référence, il nous sera possible de distribuer les débits en aval de la confluence Sénégal/Falémé. Il est important de préciser que, avant mai 1982, ces deux stations ont un régime d'écoulement purement naturel. Après, les écoulements sont considérés comme anthropisés de par la construction et le rôle du barrage de Manantali.

Les emplacements des stations ainsi que les sous-bassins hydrologiques associés sont représentés dans la figure 2.3.

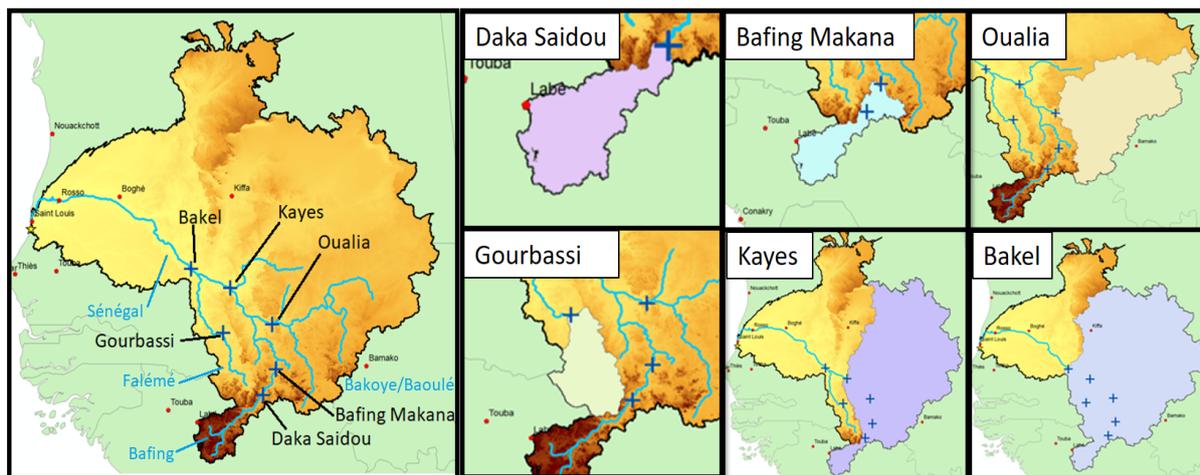


FIGURE 2.2 – Les emplacements des stations sélectionnées sont représentés par des croix bleues, et les sous-bassins hydrologiques associés sont représentés par les zones de couleurs unies.

2.4 Bases de données pour la calibration et la validation du modèle

Les données de précipitations et d'ETP utilisées sont les mêmes que celles requises pour la production des scénarios climatiques. Ceci permet d'assurer l'homogénéité du travail de modélisation. La base de données des débits utilisée est la même que celle utilisée par l'OMVS et présentée dans son Schéma Directeur d'aménagement et de Gestion de l'Eau - SDAGE (OMVS, 2011). Il est à noter que les écoulements des stations de Kayes et de Bakel sont anthropisés après mai 1982. Pour plus de précisions sur les bases de données de précipitations et d'ETP, veuillez vous référer au premier rapport du projet GIRECCC (sections 1.2, 1.4 et 1.5).

La figure 2.3 présente, par sous-bassin hydrologique, les caractéristiques des bases de données d'ETP, de précipitation et de débit nécessaires à la modélisation hydrologique.

On retrouve les mêmes tendances inter-annuelles que celles que comportent les précipitations. Sans surprises, le régime hydrologique saisonnier du fleuve Sénégal est piloté par les précipitations, et principalement la mousson. Un décalage d'un mois est à observer entre le maximum des précipitations et le maximum de débit.

Toutefois, rappelons que le jeu de données de précipitations de la SIEREM ne couvre pas l'ensemble du BFS, et plus particulièrement les parties septentrionales des sous-bassins de Bakel et de Kayes (Tableau 2.1). Par conséquent, les précipitations moyennes attribuées aux sous-bassins de Bakel et de Kayes ont été calculées comme étant la moyenne des précipitations sur les superficies tronquées (soit 93% et 94% respectivement).

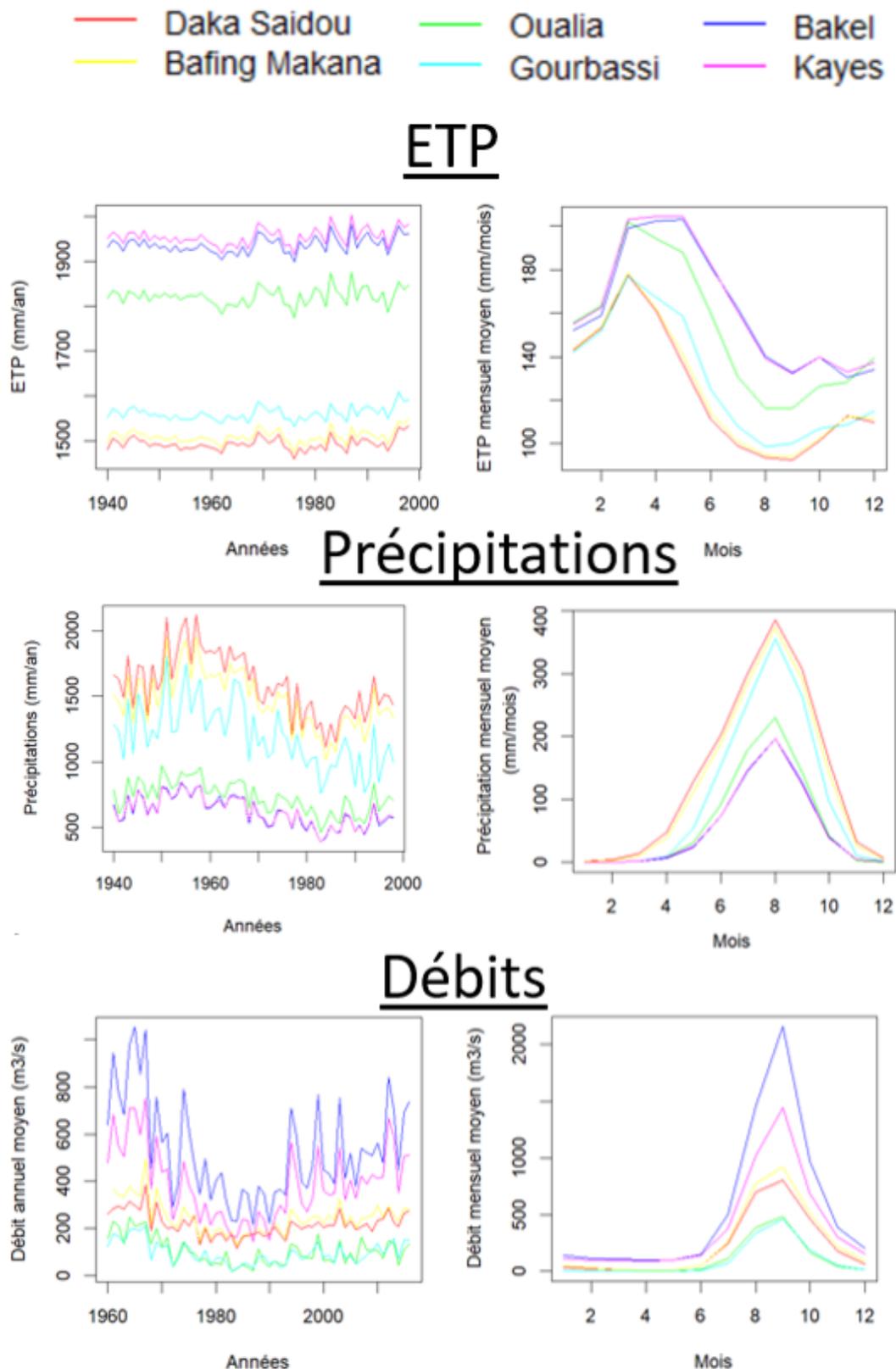


FIGURE 2.3 – A gauche : ETP, précipitations annuelles sur les sous-bassins des 6 stations hydrologiques, et débits annuels aux exutoires des 6 stations. A droite : idem, mais pour les cycles annuels moyens. Les données présentées concernent la période entre 1960 et 2016 (sauf pour Bafing Makana : 1961-2016)

Sous-bassin hydrologique	Superficie réelle	Superficie Tronquée
Kayes	291 254 km^2	308 548 km^2 (soit 94%)
Bakel	393 754 km^2	366 047 km^2 (soit 93%)

TABLE 2.1 – Table relatant des approximations, liées à la superficie, réalisées sur le calcul des précipitations moyennes mensuelles pour les sous-bassins hydrologiques de Kayes et Bakel.

2.5 Calibration et validation du modèle GR2M

2.5.1 Protocole

Il existe de multiples façons de calibrer et de valider un modèle hydrologique conceptuel. Entre autres, certaines questions se posent :

- Quelle(s) période(s) allons nous utiliser pour calibrer le modèle ? Et son corollaire : Sur quelle période allons nous le valider ?
- Quelle fonction objective allons utiliser ?
- A partir de quelles valeurs de la fonction objective le calage du modèle peut être considéré comme correct, bon, très bon, excellent ?
- A partir de quelles valeurs de la fonction objective le modèle est-il validé ?
- Comment choisir un couple de calibration/validation plutôt qu'un autre ?

Aussi, la base de données des débits débute en janvier 1960, et la base de données de précipitation s'arrête à la fin de l'année 1998. Par conséquent, la plus longue période donc nous disposerons pour calibrer et valider le GR2M s'étend entre 1960 et 1998 inclus.

Sur quelle période allons nous calibrer et valider le modèle ?

Nous nous sommes appuyés sur le principe de *Differential split-sample* tel que décrit dans Klemes (1986). L'idée principale est de découper la période en plusieurs segments dont les caractéristiques climatiques ou hydrologiques (et leurs paramètres statistiques) sont différentes (ex : identification de périodes sèches et humides). La calibration s'effectue sur segment (ex : période sèche), et la validation sur la seconde (ex : période humide), ou vis-versa.

Aussi, puisque le BFS a connu une alternance entre une période humide (1955-1970 environ), une période sèche (1970-1995 environ), il nous est possible d'utiliser cette approche.

Deux méthodologies nous ont permis de scinder la période 1960-1998 en plusieurs segments :

- A l'instar de Ardoin-Bardin (2004) et Faye et al. (2015a), nous avons utilisé le test de rupture de tendance non paramétrique de Pettitt (Pettitt, 1979) sur les débits. Ceci nous a permis d'obtenir l'année séparant la période humide de la période sèche.
- Comme démontré par Akintug and Rasmussen (2005), l'application des chaînes de Markov cachées à une série hydrologique permet de classer les années selon un état (exemple : humide, sèche) tout en prenant en compte la persistance du système. En collaboration avec, et dans le cadre de sa thèse de doctorat, V. Espanmanesh (Espanmanesh, 2019) nous a proposé un classement des années selon deux états (humide et sec) ou trois états (humide, normal et sec) pour les six stations sélectionnées.

Récapitulons : la première approche nous conduit à deux combinaisons de calage/validation. La seconde approche nous conduit à cinq combinaisons de calage/validation. Un exemple de l'ensemble de ces sept possibilités est représenté en figure 2.4.

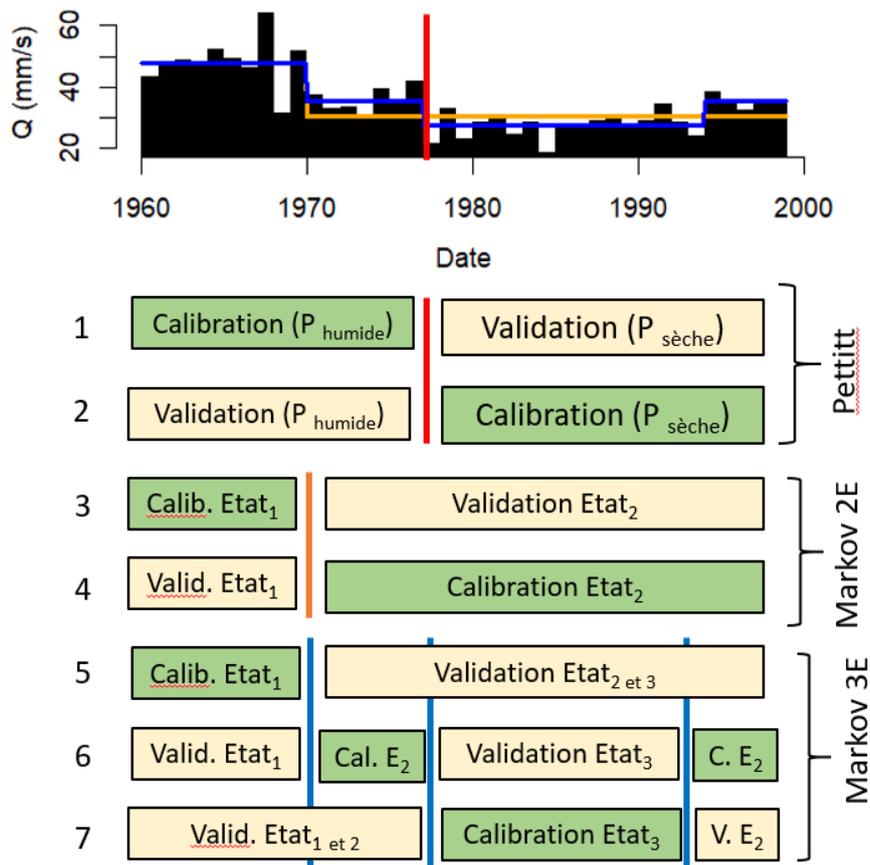


FIGURE 2.4 – Exemple des subdivisions en sous-périodes pour la station de Daka Saidou. En haut : débit annuel moyen(en m^3/s) ; la barre verticale rouge correspond à l'année de rupture obtenue par le test de Pettitt ; la ligne orange représente le classement obtenu via l'application des chaînes de Markov cachées pour deux états ; la ligne bleue représente le classement obtenu via l'application des chaînes de Markov cachées pour trois états. Design inspiré de Ardoin-Bardin (2004).

Puisque notre protocole de calibration/validation suit le principe de ?, nous nous assurons que le GR2M puisse fonctionner sur des climats très contrastés.

Quelles fonctions objectives ?

La fonction objective la plus communément utilisée en hydrologie est le critère de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970), dénommé NSE dans le reste de ce rapport. Il correspond à la normalisation de l'erreur quadratique (moindres au carré) par la variance des débits observés (équation 2.1). Toutefois, il est à noter que réaliser une optimisation sur le NSE revient à minimiser les erreurs, principalement sur les forts débits. Cette caractéristique provient du formalisme mathématique des moindres au carrés.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - Q_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \mu_{obs})^2} \quad (2.1)$$

Avec μ_{obs} , la moyenne des débits observés.

Gupta et al. (2009) ont établi une autre fonction objective, le critère « *Kling-Gupta Efficiency* » (KGE), basée sur une modification du critère NSE. Son utilisation améliore sensiblement la performance des modèles hydrologiques conceptuels. Ils introduisent les termes de variances des débits observés (σ_{obs}) et simulés (σ_{sim}) ainsi que la corrélation entre ces deux séries temporelles (r), afin de définir trois composantes :

$$NSE = -\beta_n - \alpha^2 + 2r\alpha \quad (2.2)$$

Avec $\alpha^2 = \sigma_{sim}^2 / \sigma_{obs}^2$ le rapport des variances des débits simulés et observés ; $\beta_n = \frac{(\mu_{obs} - \mu_{sim})^2}{\sigma_{obs}^2}$ l'erreur du bilan normée ; et μ_{obs} la moyenne des débits observés.

Le KGE est calculé comme étant la distance euclidienne entre ces trois composantes :

$$KGE = 1 - D_{Euclidienne} \quad (2.3)$$

Avec $D_{Euclidienne}$ la distance euclidienne en trois dimensions :

$$D_{Euclidienne} = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (2.4)$$

Et $\beta = \mu_{sim} / \mu_{obs}$ le biais du modèle.

Aussi, nous effectuerons 2 optimisations pour chacun des couples calibration/validation listés ci-dessus : le premier avec le critère NSE, et le second avec le critère KGE.

Quelle est la qualité de la calibration ?

Il n'y a à ce jour aucun protocole pour sélectionner une calibration plutôt qu'une autre. Aussi appartient-il à l'opérateur de garder un point de vu critique sur la qualité du modèle et sa calibration. Cependant, la valeur de la fonction objective nous renseigne sur la qualité du modèle et nous admettons que² :

- La calibration est mauvaise pour des valeurs de critère inférieures 0,6 ;
- La calibration est correcte pour des valeurs de critère comprises entre 0,6 et 0,7 ;
- La calibration est bonne pour des valeurs de critère comprises entre 0,7 et 0,8 ;
- La calibration est très bonne pour des valeurs de critère comprises entre 0,8 et 0,9 ;
- La calibration est excellente pour des valeurs de critère comprises entre 0,9 et 1 ;

2. Cette classification nous est propre, mais elle reprend le vocable utilisé dans la littérature scientifique.

Pour quelles valeurs de la fonction objective mon modèle est-il validé ?

Similairement, il appartient à l'opérateur de réaliser son choix. Il est cependant admis³ que le modèle est validé si la différence entre la valeur du critère de la calibration et de la validation est inférieure ou égale à 0,1.

Comment choisir un couple de calibration/validation plutôt qu'un autre ?

Une fois les calibrations et les validations faites, les couples calibration/validation dont la différence est supérieure à 0,1 sont exclus. Parmi ceux restant, la moyenne entre la valeur du critère de la calibration et de la validation est calculée. Le couple calibration/validation ayant la plus forte moyenne est retenue.

2.5.2 Résultats et sélections des calibrations pour les six sous-bassins hydrologiques

Calibration/validation du sous-bassin hydrologique de Daka Saidou

La superficie de ce sous-bassin hydrologique est de 15 768 km^2 . La période globale de calibration/validation pour le sous-bassin hydrologique de Daka-Saidou s'étend de janvier 1960 à décembre 1998 (soit 38 ans). La figure 2.5 donne une représentation graphique des sous-périodes des calibrations et des validations.

Les résultats des calibrations/validations sont présentés dans le tableau 2.2.

Cas	Calibration		Validation		Moyenne	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
1	0.961	0.980	0.913	0.894	0.937	0.937
2	0.929	0.964	0.945	0.906	0.937	0.935
3	0.937	0.968	0.952	0.945	0.944	0.956
4	0.959	0.978	0.925	0.923	0.942	0.950
5	0.927	0.963	0.943	0.945	0.935	0.954
6	0.948	0.973	0.945	0.965	0.946	0.969
7	0.959	0.978	0.925	0.923	0.942	0.950

TABLE 2.2 – Résultats des calibrations et des validations du GR2M pour le sous-bassin hydrologique de Daka Saidou.

Globalement, tous les calages sont excellents et s'équivalent aux premiers abords. Le couple de calibration/validation sélectionné est le numéro 6, KGE (Chaines de Markov cachées, trois états, calibration sur état 2, validation sur états 1 et 3, critère KGE). Les valeurs des paramètres sont les suivants : $X1 = 1119$ et $X2 = 0.795$

3. Il n'y a pas de consensus scientifique et objectif sur cette valeur. Cette valeur est arbitrairement fixée, peut varier selon les auteurs, mais est globalement fixée à 0,1.

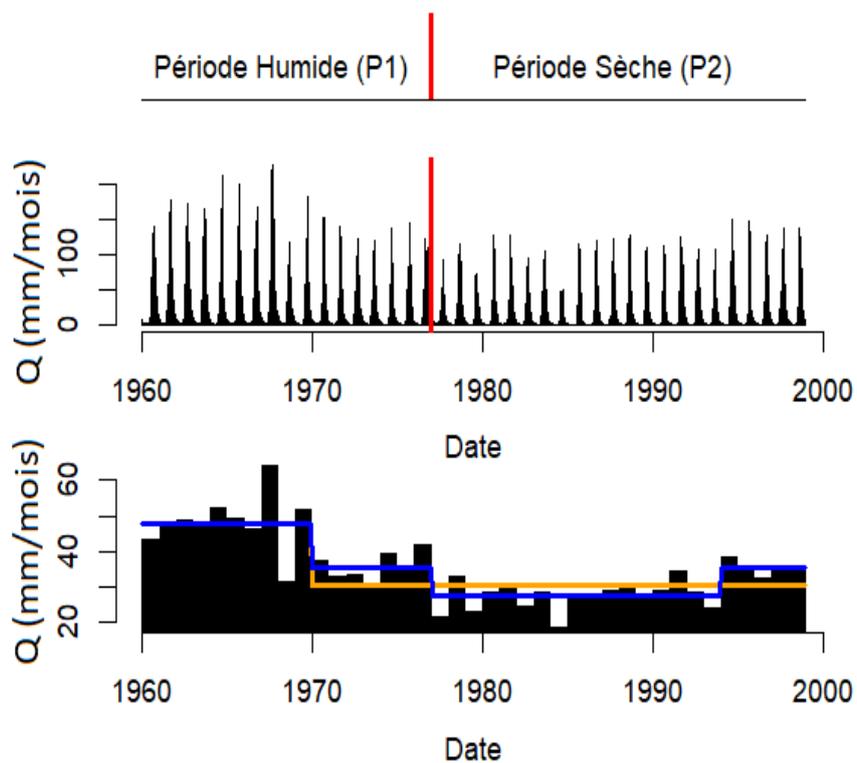


FIGURE 2.5 – En haut : subdivision de la période via le test de Pettitt (barre rouge). Au milieu : débits mensuels (mm/s). En bas : débits annuels (mm/s) et représentation des classifications obtenus avec l'application des chaînes de Markov cachées (en bleu : 3 états (sec, normal, humide), en orange : deux états (sec, humide)).

Calibration/validation du sous-bassin hydrologique de Bafing Makana

La superficie de ce sous-bassin hydrologique est de $22\,187\text{ km}^2$. La période globale de calibration/validation pour le sous-bassin hydrologique de Bafing Makana s'étend de février 1961 à décembre 1998 (soit environ 37 ans). La figure 2.6 donne une représentation graphique des sous-périodes des calibrations et des validations.

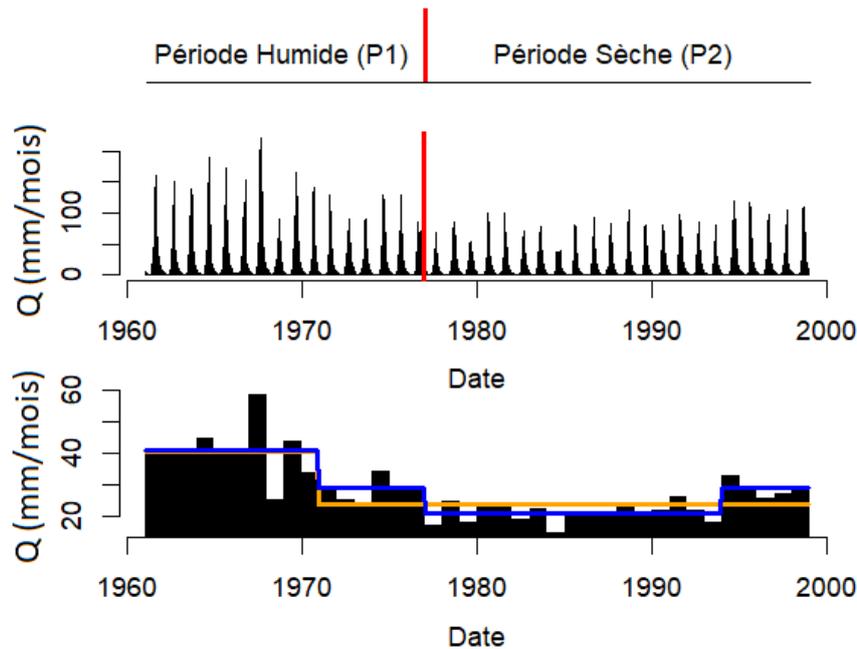


FIGURE 2.6 – Identique à la figure 2.5, pour le sous-bassin hydrologique de Bafing Makana.

Les résultats des calibrations/validations sont présentés dans le tableau 2.3.

Cas	Calibration		Validation		Moyenne	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
1	0.950	0.974	0.931	0.954	0.940	0.964
2	0.937	0.968	0.951	0.964	0.944	0.966
3	0.945	0.972	0.936	0.914	0.940	0.943
4	0.942	0.970	0.936	0.910	0.939	0.940
5	0.929	0.964	0.941	0.960	0.935	0.962
6	0.958	0.979	0.937	0.924	0.948	0.952
7	0.942	0.970	0.936	0.910	0.939	0.940

TABLE 2.3 – Résultats des calibrations et des validations du GR2M pour le sous-bassin hydrologique de Bafing Makana.

Similairement, toutes les calibrations sont excellentes. Le couple de calibration/validation sélectionné est le numéro 2, KGE (test de Pettitt, calibration sur la période sèche, validation sur la période humide, critère KGE). Les valeurs des paramètres sont les suivants :

$X1 = 1248$ et $X2 = 0.78$

Calibration/validation du sous-bassin hydrologique de Gourbassi

La superficie de ce sous-bassin hydrologique est de $15\,897\text{ km}^2$. La période globale de calibration/validation pour le sous-bassin hydrologique de Bafing Makana s'étend de janvier 1960 à décembre 1998 (soit 38 ans). La figure 2.7 donne une représentation graphique des sous-périodes des calibrations et des validations.

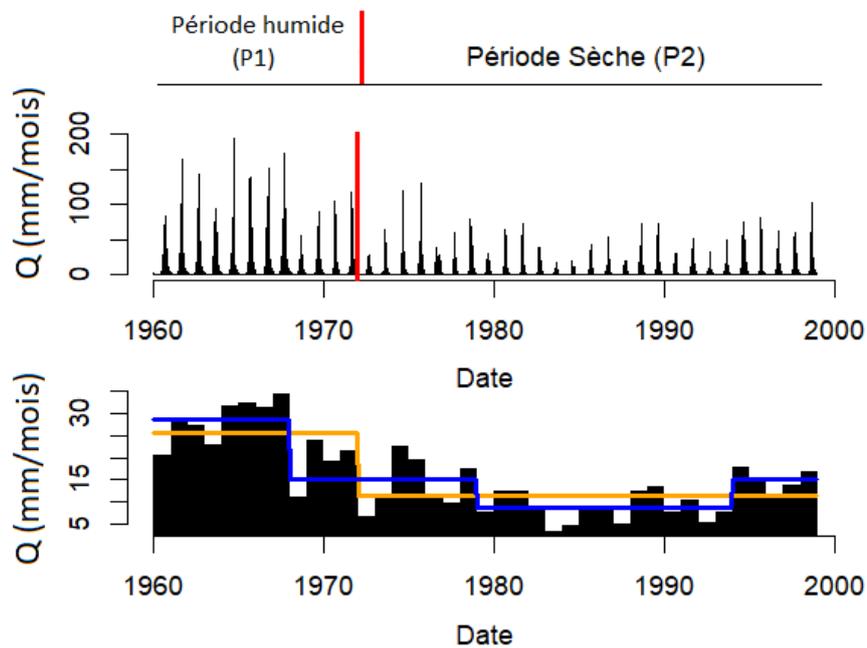


FIGURE 2.7 – Identique à la figure 2.5, pour le sous-bassin hydrologique de Gourbassi.

Les résultats des calibrations/validations sont présentés dans le tableau 2.4.

Cas	Calibration		Validation		Moyenne	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
1	0.907	-	0.862	-	0.885	-
2	0.885	-	0.864	-	0.874	-
3	0.886	-	0.869	-	0.878	-
4	0.907	-	0.849	-	0.878	-
5	0.873	-	0.876	-	0.874	-
6	0.915	0.955	0.869	0.936	0.892	0.946
7	0.896	0.946	0.867	0.861	0.882	0.904

TABLE 2.4 – Résultats des calibrations et des validations du GR2M pour le sous-bassin hydrologique de Gourbassi.

Les calibrations restent très bonnes, bien qu'un certain nombre eut été exclu (différence entre les valeurs de calibration et de validation supérieure à 0.1). Le couple de calibration/validation sélectionné est le numéro 6, KGE (Chaines de Markov cachées, trois états, calibration sur état 2, validation sur états 1 et 3, critère KGE). Les valeurs des paramètres sont les suivants : $X1 = 717$ et $X2 = 0,643$

Calibration/validation du sous-bassin hydrologique de Oualia

La superficie de ce sous-bassin hydrologique est de $102\,611\text{ km}^2$. La période globale de calibration/validation pour le sous-bassin hydrologique de Oualia s'étend de janvier 1960 à décembre 1998 (soit 38 ans). La figure 2.8 donne une représentation graphique des sous-périodes des calibrations et des validations.

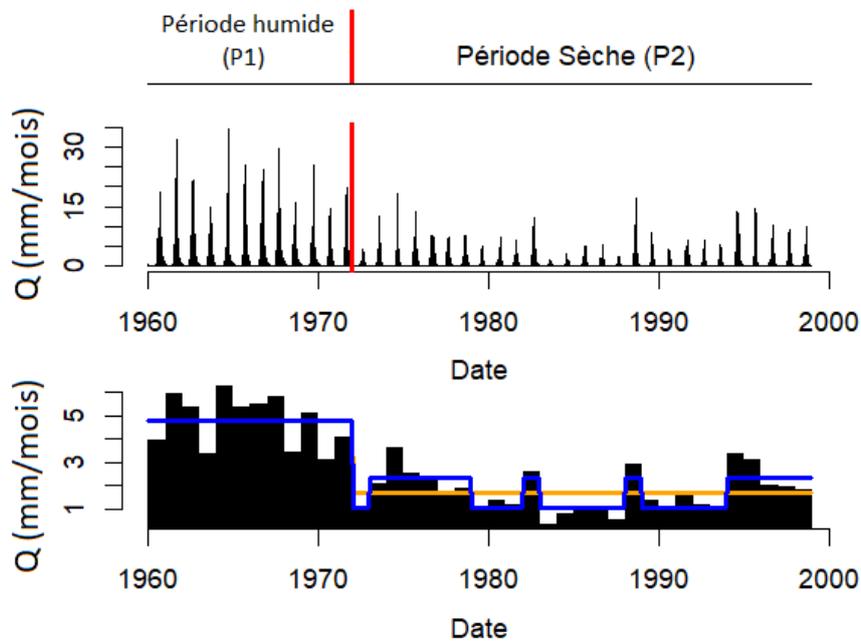


FIGURE 2.8 – Identique à la figure 2.5, pour le sous-bassin hydrologique de Oualia.

Les résultats des calibrations/validations sont présentés dans le tableau 2.5.

Cas	Calibration		Validation		Moyenne	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
2	0.773	-	0.798	-	0.786	-
3	0.774	-	0.785	-	0.780	-
5	0.740	-	0.732	-	0.736	-
6	0.771	-	0.818	-	0.794	-

TABLE 2.5 – Résultats des calibrations et des validations du GR2M pour le sous-bassin hydrologique de Oualia.

Les calibrations restent bonnes, bien qu'un bon nombre d'entre elles ont été exclu (différence supérieure à 0.1) dont l'ensemble des calibrations KGE. Le couple de calibration/validation sélectionné est le numéro 6, Nash (Chaines de Markov cachées, trois états, calibration sur état 2, validation sur états 1 et 3, critère Nash). Les valeurs des paramètres sont les suivants : $X1 = 639$ et $X2 = 0.521$

Calibration/validation du sous-bassin hydrologique de Kayes

La superficie de ce sous-bassin hydrologique est de $308\,548\text{ km}^2$. La période globale de calibration/validation pour le sous-bassin hydrologique de Kayes s'étend de janvier 1960 à mai 1982 (soit 22 ans). La figure 2.9 donne une représentation graphique des sous-périodes des calibrations et des validations.

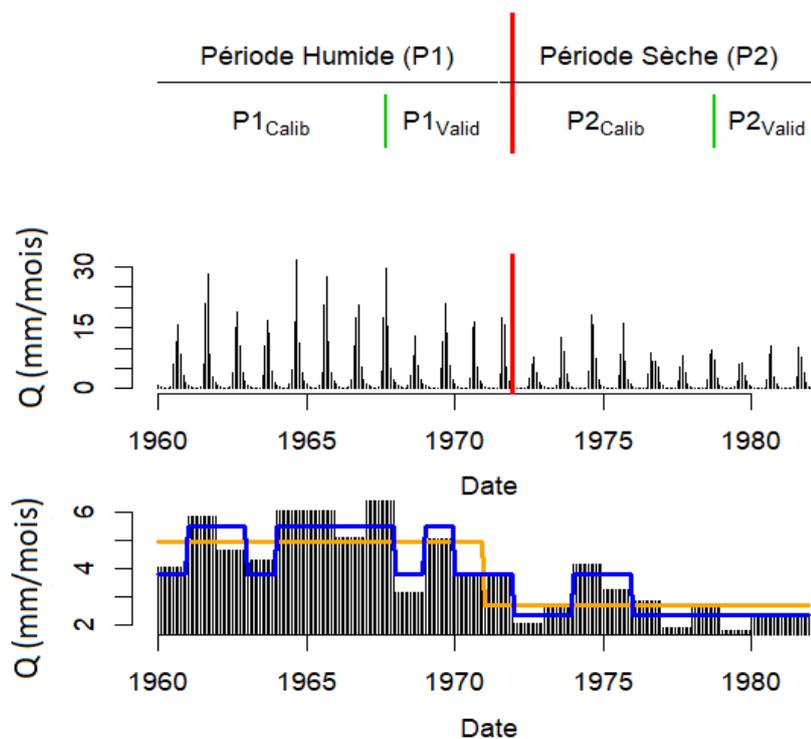


FIGURE 2.9 – Identique à la figure 2.5, pour le sous-bassin hydrologique de Kayes.

Les résultats des calibrations/validations sont présentés dans le tableau 2.6.

Les calibrations sont très bonnes. Le couple de calibration/validation sélectionné est le numéro 3, KGE (Chaines de Markov cachées, deux états, calibration sur état 1, validation sur états 2, critère KGE). Les valeurs des paramètres sont les suivants : $X1 = 565$ et $X2 = 0,861$

Cas	Calibration		Validation		Moyenne	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
2	-	0.890	-	0.902	-	0.896
3	0.825	0.905	0.894	0.888	0.859	0.897
5	0.773	0.856	0.732	0.837	0.752	0.846
6	0.911	-	0.880	-	0.896	-

TABLE 2.6 – Résultats des calibrations et des validations du GR2M pour le sous-bassin hydrologique de Kayes.

Calibration/validation du sous-bassin hydrologique de Bakel

La superficie de ce sous-bassin hydrologique est de $393\,754\text{ km}^2$. La période globale de calibration/validation pour le sous-bassin hydrologique de Bakel s'étend de janvier 1960 à mai 1982 (soit 22 ans). La figure 2.10 donne une représentation graphique des sous-périodes des calibrations et des validations.

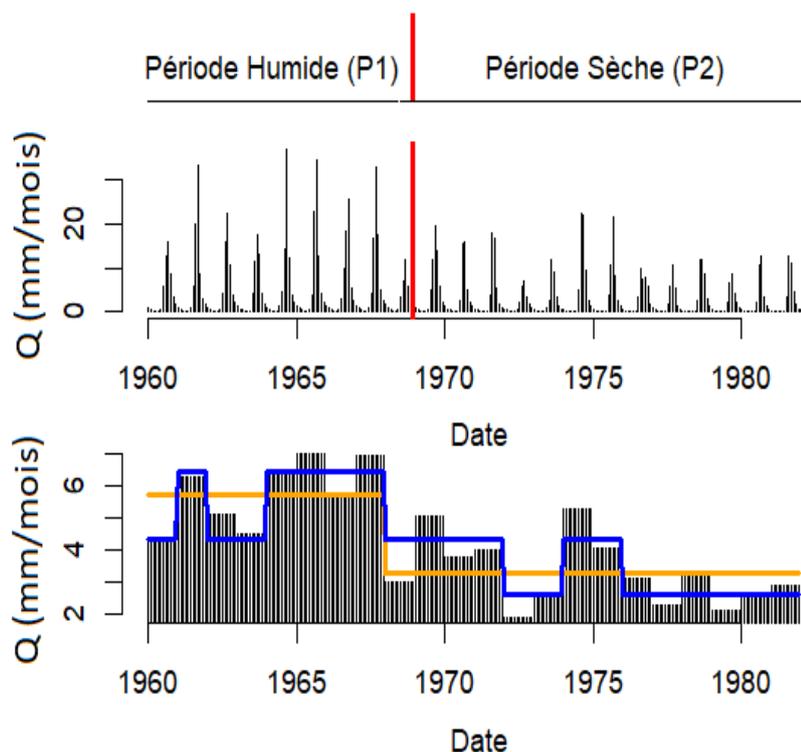


FIGURE 2.10 – Identique à la figure 2.5, pour le sous-bassin hydrologique de Bakel.

Les résultats des calibrations/validations sont présentés dans le tableau 2.7.

Le couple de calibration/validation sélectionné est le numéro 6, KGE (Chaines de Markov cachées, trois états, calibration sur état 2, validation sur états 1 et 3, critère KGE). Les valeurs des paramètres sont les suivants : $X1 = 632$ et $X2 = 0.902$

Cas	Calibration		Validation		Moyenne	
	NSE	KGE	NSE	KGE	NSE	KGE
2	0.889	-	0.804	-	0.846	-
3	0.888	-	0.800	-	0.844	-
6	0.888	0.943	0.888	0.930	0.888	0.936
7	0.927	0.960	0.833	0.877	0.880	0.918

TABLE 2.7 – Résultats des calibrations et des validations du GR2M pour le sous-bassin hydrologique de Bakel.

2.6 Production des projections hydrologiques aux stations sélectionnées

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - Hydrologie", et le sous-dossier "Base de données - Projections hydrologiques aux stations" Disponible sur le portail web de la FAO.

Ayant a notre disposition le modèle GR2M calibré et validé sur les six sous-bassins hydrologiques, nous sommes en capacité d'utiliser les scénarios climatiques afin de produire les projections hydrologiques aux six stations.

Nous avons réalisé une combinaison entre les 55 scénarios de précipitations, et les 22 d'évapotranspiration. Ceci nous donne accès à 1210 combinaisons, et donc tout autant de scénarios climatiques. Nous avons forcé le modèle GR2M avec ces 1210 scénarios climatiques, afin d'obtenir les débits futurs aux exutoires des six bassins hydrologiques. La figure 2.11 présente les résultats obtenus.

La figure 2.12 présente les moyennes des débits annuels des 1210 projections hydrologiques pour les six stations (une moyenne glissante à 10 ans a été appliquée). Il est à noter que la tendance décennale est faible : le minimum (maximum) a Bakel représente 85% (109%) de la moyenne, et est centré sur 2080 (2040). Ce résultat est à mettre en parallèle avec ceux de la figure 2.11. La divergence des modèles climatiques implique une forte variance des projections hydrologiques. Ceci est une bonne justification pour utiliser un large spectre de scénarios climatiques et hydrologiques afin de qualifier les futurs climatiques et hydrologiques possibles.

2.7 Clustering et sélection des projections hydrologiques archétypiques

Traiter les 1210 projections hydrologiques dont nous disposons peut-être redondant, et il peut être difficile d'en présenter les résultats. En revanche, il nous est possible de présenter l'éventail des futurs hydrologiques possibles en sélectionnant les scénarios hydrologiques les plus spécifiques.

En définissant un ensemble de n critères, ou « attributs hydrologiques », nous pou-

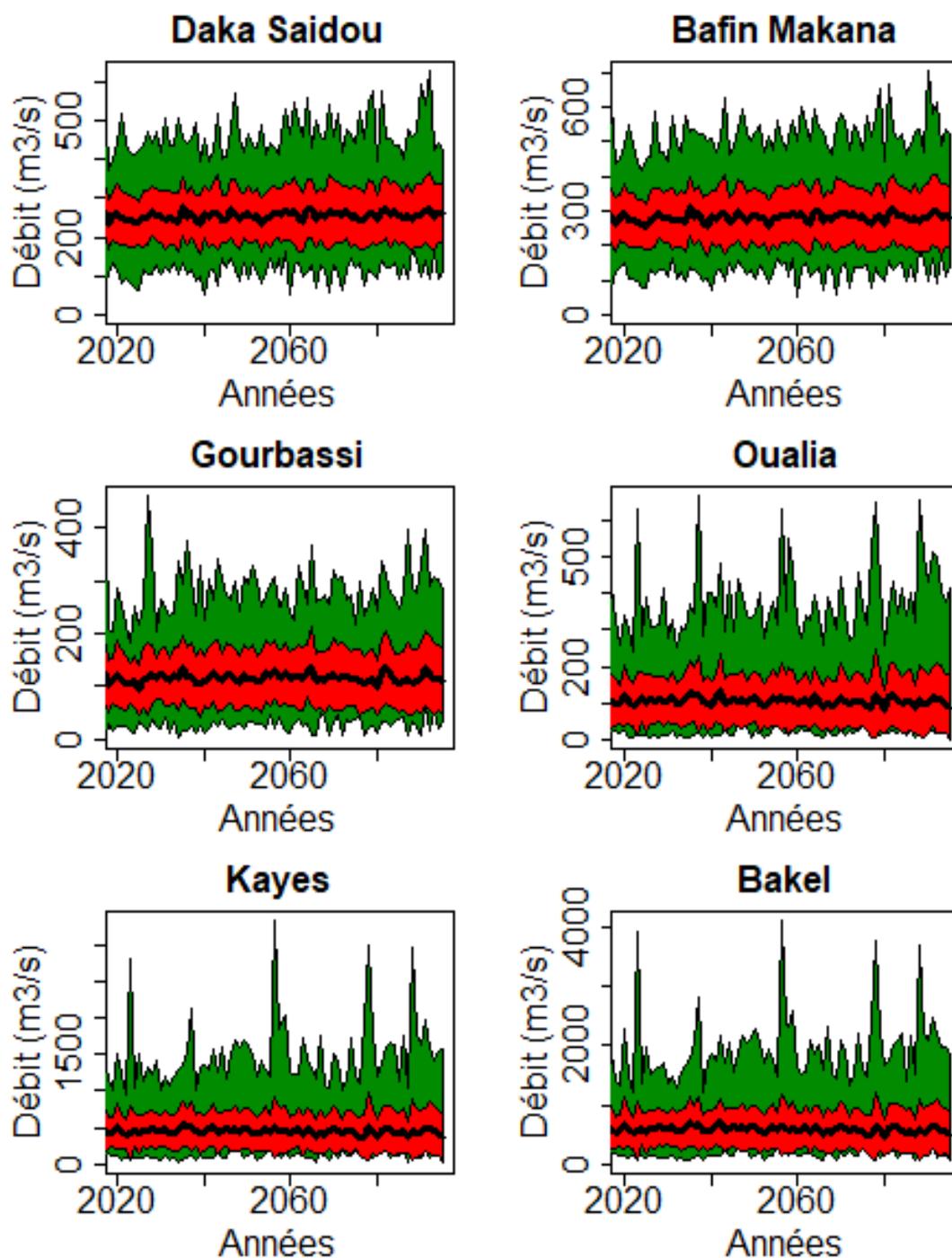


FIGURE 2.11 – Projections hydrologiques (débits annuels en m^3/s) réalisées par le GR2M à partir des 1210 scénarios climatiques pour les six stations. La ligne noire représente la moyenne des scénarios, la cerne rouge correspond à la moyenne plus ou moins l'écart-type, et la cerne verte représente les minimums et maximums.

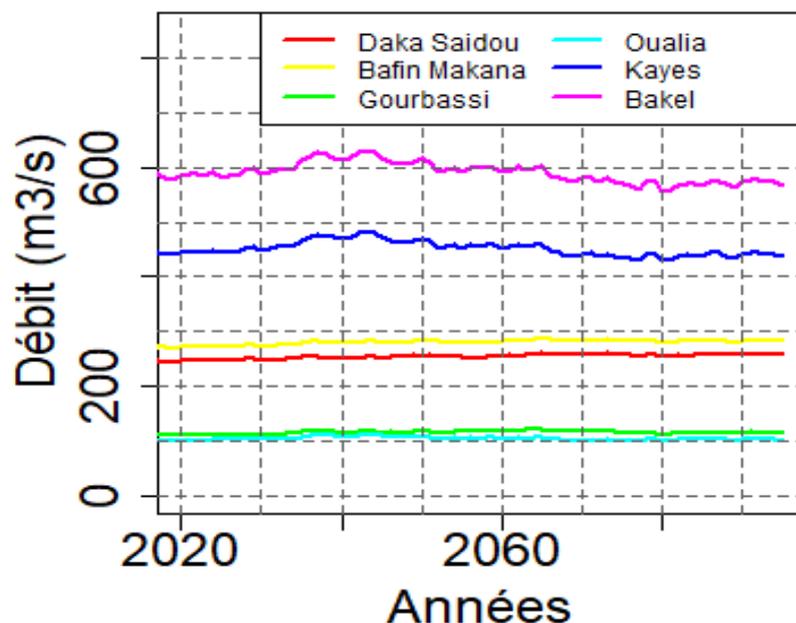


FIGURE 2.12 – Tendances décennales (moyenne glissante à 10 ans) des débits annuels moyen issus des 1210 projections hydrologiques (m^3/s) aux six stations hydrologiques.

vons situer les projections hydrologiques dans un espace à n dimensions. L'emploi d'une méthode de regroupement (*Clustering*, ou *Mise en grappe*) permet de créer un nombre choisi de groupes.

2.7.1 Attributs hydrologiques utilisés pour la mise en grappe

La morphologie d'un bassin, son hydrogramme annuel, ou encore le volume d'eau annuellement écoulé sont des exemples d'attributs hydrologiques servant à qualifier un bassin. Dans la littérature scientifique, les efforts se sont focalisés sur la classification des bassins en vue d'extrapoler ces résultats à des bassins non jaugés ou partiellement jaugés (Haines et al., 1988; Razavi and Coulibaly, 2013). En parallèle de cette thématique de « régionalisation », la qualification du régime hydrologique d'un bassin a tenue une place importante dans l'écologie aquatique (Berhanu et al., 2015; Olden and Poff, 2003; Poff et al., 1997; Henriksen et al., 2006). De manière générale, les attributs retenus pour une étude sont fonction de la thématique.

La publication de Poff et al. (1997) propose cinq types d'attributs :

- La *Magnitude* : le volume écoulé en un lieu par unité de temps.
- La *fréquence* : le temps de retour d'un certain débit.
- La *durée* : la période pour laquelle une condition est remplie.
- La *réurrence* : le fait qu'un évènement hydrologique soit prédictible (exemple : crue printanière).

— Le *taux de variation* : la rapidité avec laquelle les débits évoluent dans le bassin.

Aussi, en nous appuyant plus spécifiquement sur les publications de Ledger (1964), du CEHQ (2015), de Ouarda et al. (2002), de Olden and Poff (2003) ainsi que des échanges avec les autorités du bassin du Fleuve Sénégal (OMVS), nous avons sélectionnés les huit attributs hydrologiques suivants. L’emphase est mise à la fois sur l’évolution de la crue annuelle, ainsi que sur les débits d’étiage. Pour les deux horizons, nous calculons pour chacune des projections hydrologiques :

1. Le Volume annuel moyen.
2. Le Débit de pointe de la crue annuelle (au mois de septembre) .
3. L’écart type sur le débit de pointe de la crue annuelle (mois de septembre).
4. Le Volume de pointe de la crue décennale (volume de la crue qui statistiquement revient en moyenne tous les 10 ans).
5. Débit moyen d’étiage (mois de février à mai inclus).
6. L’écart type des débits d’étiage (mois de février à mai inclus).
7. Nombre de mois de basses eaux ($150 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 1,5 fois le débit nécessaire pour la navigation jusqu’à Bakel (OMVS, 2011)).
8. Nombre de mois de hautes eaux ($300 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 3 fois le débit nécessaire pour la navigation jusqu’à Bakel (OMVS, 2011)).

Pour le quatrième attribut, le volume de la crue décennale a été déterminé par analyse fréquentielle. Pour cela, les débits ont été classés selon leurs rangs. Pour chacun, une valeur fréquentielle a été calculée avec la formule de Hazen. Puis déterminer la variable réduite de Gumbel (u) pour chaque rang. L’estimation des paramètres de la relation linéaire $u = f(\text{Debitsdepointe})$ permet par la suite d’obtenir le volume de la crue décennale (pour plus de détails, référez-vous à l’ouvrage de Naghettini (2017)).

2.7.2 Méthode de regroupement : K-means clustering

Deux types de méthode de regroupement existent : les méthodes hiérarchiques, et les méthodes non-hiérarchiques. Aghabozorgi et al. (2015) ont publié une revue récente concernant les méthodes de regroupement.

Nous avons choisi d’utiliser la méthode du « k-means cluster » (Hartigan and Wong, 1979), et nous avons fixé le nombre de clusters à cinq. Cette méthode permet de minimiser la variance interne des groupes tout en maximisant la variance entre les groupes. De plus, puisque les huit attributs listés ci-dessus n’ont pas les mêmes unités, chacune de ces huit dimensions a été normalisée (de -1 à 1). Cette étape permet d’homogénéiser l’influence des attributs lors du regroupement.

Il est à noter que l’un des inconvénients de cette méthode est que les clusters déterminés peuvent dépendre de l’initialisation de l’algorithme. Aussi, une convergence est décelée pour un rang $r \leq 7$ pour l’horizon 1 et $r \leq 1$ pour l’horizon 2, indépendamment l’algorithme utilisé⁴.

4. Les algorithmes utilisés sont les trois les plus classiquement utilisés (Hartigan-Wong, Lloyd-Forgy, MacQueen)

Une fois les clusters déterminés, nous avons sélectionné les cinq projections hydrologiques les plus proches des clusters, suivant la formule suivante :

$$\min\left(\sqrt{\sum_{i=1}^{Nbre.dimension} d_i[Cluter, Projectionhydro]}\right) \quad (2.5)$$

2.7.3 Résultats : projections hydrologiques sélectionnées

Puisque la représentation des projections hydrologiques dans un espace à huit dimensions est complexe, il est possible de sélectionner les attributs-clés. Aussi, Olden and Poff (2003) proposent une approche afin d'identifier des redondances dans le choix des attributs hydrologiques. Les corrélations entre nos huit attributs sont présentées en tableaux 2.8 (horizon 1) et 2.9 (horizon 2).

Attributs	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0.97	0.85	0.96	0.91	0.82	-0.91	0.91
2		1	0.84	0.91	0.89	0.75	-0.88	0.89
3			1	0.93	0.68	0.7	-0.68	0.68
4				1	0.8	0.8	-0.79	0.8
5					1	0.89	-0.91	0.91
6						1	-0.73	0.73
7							1	-0.98
8								1

TABLE 2.8 – Corrélations entre les attributs hydrologiques pour l'Horizon 1.

Attributs	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0.98	0.81	0.97	0.93	0.84	-0.85	0.9
2		1	0.81	0.94	0.91	0.8	-0.81	0.87
3			1	0.91	0.74	0.76	-0.64	0.69
4				1	0.88	0.85	-0.79	0.85
5					1	0.9	-0.95	0.97
6						1	-0.77	0.8
7							1	-0.98
8								1

TABLE 2.9 – Corrélations entre les attributs hydrologiques pour l'Horizon 2.

Les attributs 1, 2 et 4 présentent une corrélation très importante, et sont, de par leurs définitions, redondants. Les attributs 7 et 8 sont, sans surprises, anti-corrélés.

Ces résultats nous ont conduit à concevoir les figures 2.13 (horizon 1) et 2.14 (horizon 2). Elles présentent chacune trois graphiques, dans lesquelles sont localisés toutes les projections hydrologiques (points noirs), les cinq clusters (cercles de couleurs), et les projections hydrologiques sélectionnées (croix de couleurs), en fonction des différents attributs.

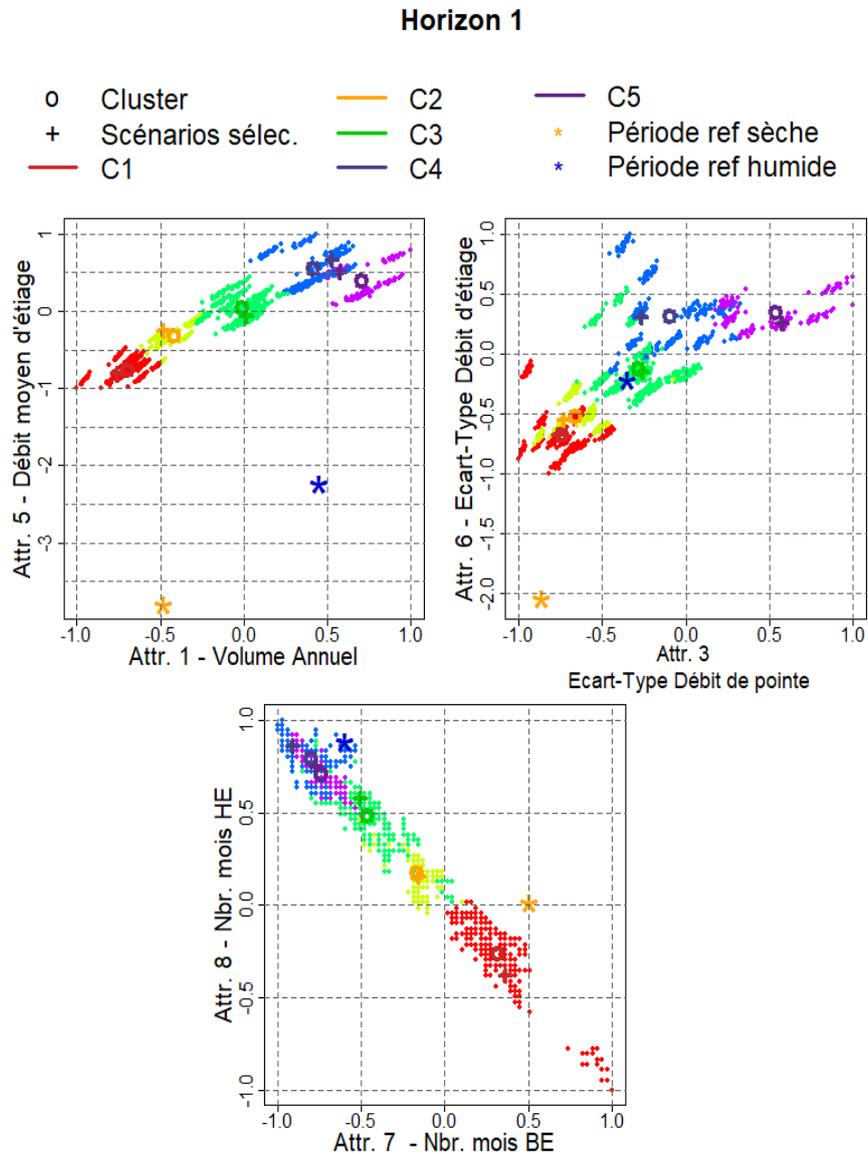


FIGURE 2.13 – Pour l’horizon 1, localisation des projections hydrologiques (points de couleurs), des cinq clusters (cercles de couleurs), et des projections hydrologiques sélectionnées (croix de couleurs), en fonction des différents attributs. A Gauche : en fonction des attributs 1 (Volume annuel moyen) et 5 (le débit moyen d’été) ; Au centre : en fonction des attributs 3 (Ecart-type sur les débits de pointe) et 6 (Ecart-type sur les débits d’été) ; A droite : en fonction des attributs 7 (Nombre de mois en basses eaux) et 8 (Nombre de mois en hautes eaux).

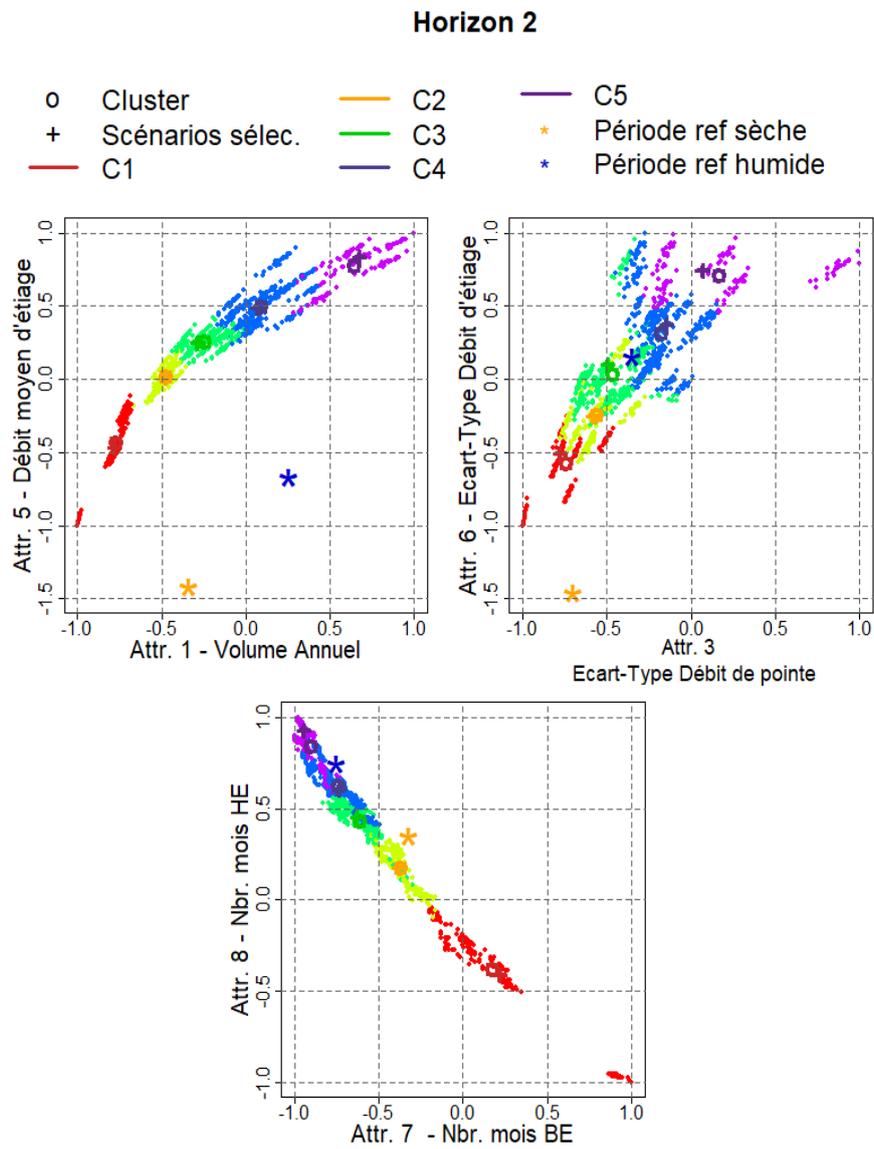


FIGURE 2.14 – Identique à la figure 2.13, pour l’horizon 2.

Pour l'horizon 1, les projections hydrologiques sélectionnées ont les spécificités suivantes :

- La cluster 1 (rouge) est clairement identifiable comme le scénario le plus sec, à la fois sur les débits d'étiage et sur la crue annuelle, avec une variance minimale. 23,1% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 2 (jaune) apparaît comme un scénario intermédiaire, sec. 13,1% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 3 (vert) est un scénario médian. 34,0% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 4 (bleu) apparaît comme un scénario intermédiaire, humide. 19,3% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 5 (violet) apparaît comme un scénario le plus humide, avec un maximum de variance. 10,4% des projections hydrologiques y sont associées.

Les hydrogrammes pour les cinq projections sélectionnées pour l'horizon 1 sont représentés en figure 2.15.

Pour l'horizon 2, la situation est similaire :

- La cluster 1 (rouge) est clairement identifiable comme le scénario le plus sec, à la fois sur les débits d'étiage et sur la crue annuelle, avec une variance minimale. 12,6% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 2 (jaune) apparaît comme un scénario intermédiaire, sec. 17,8% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 3 (vert) est un scénario médian. 24,6% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 4 (bleu) apparaît comme un scénario intermédiaire, humide. 34,6% des projections hydrologiques y sont associées.
- Le cluster 5 (violet) apparaît comme un scénario le plus humide, avec un maximum de variance. 10,4% des projections hydrologiques y sont associées.

Les hydrogrammes pour les cinq projections sélectionnées pour l'horizon 2 sont représentés en figure 2.16.

La figure 2.17 permet de comparer les clusters plus directement. Y sont présentés les cycles annuels moyens des débits des projections sélectionnées, ainsi que les coefficients de variations associés.

2.7.4 Projections hydrologiques : Commentaires

Il est intéressant de comparer les projections hydrologiques sélectionnées aux différentes périodes qu'a connu le BFS. Sur les figures 2.13 et 2.14, les étoiles de couleurs orange et bleu représentent la période humide historique (de 1940-01-01 à 1969-12-31) et la période sèche historique (de 1970-01-01 à 1999-12-31) respectivement⁵. Le traitement

5. Les débits utilisés sont les débits naturalisés, présenté par Bader et al. (2014). Pour plus de précisions sur les périodes climatiques historiques, référez-vous à l'annexe E, section E.2.1. Ces périodes ont été représentés sur les figures 2.13 et 2.14 afin que le lecteur puisse comparer les projections hydrologiques et avec les situations climatiques passées.

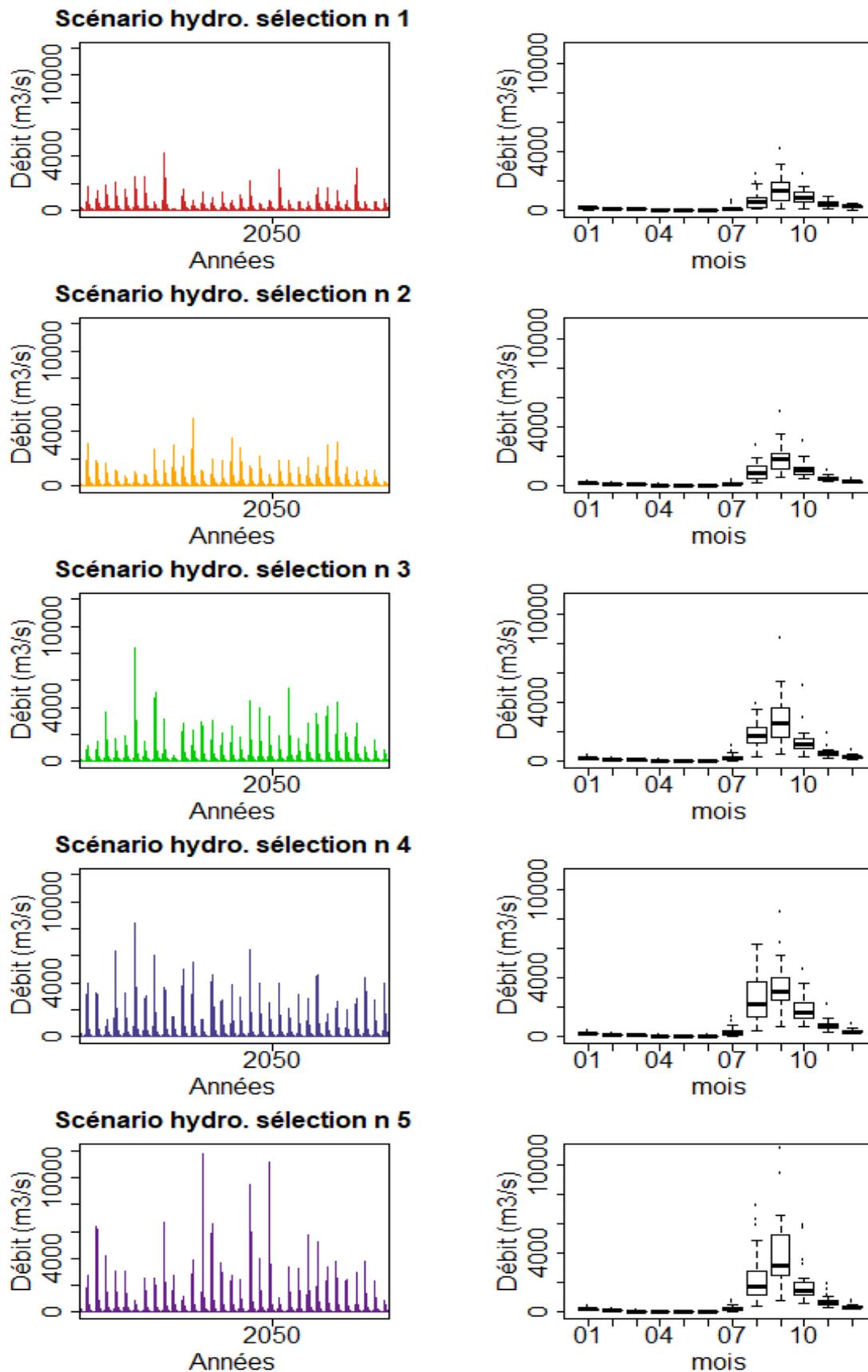


FIGURE 2.15 – A gauche : Hydrogramme des projections hydrologiques sélectionnées pour l’horizon 1. A droite : Cycles annuels moyens correspondants (les boxplots indiquent la variabilité mensuel).

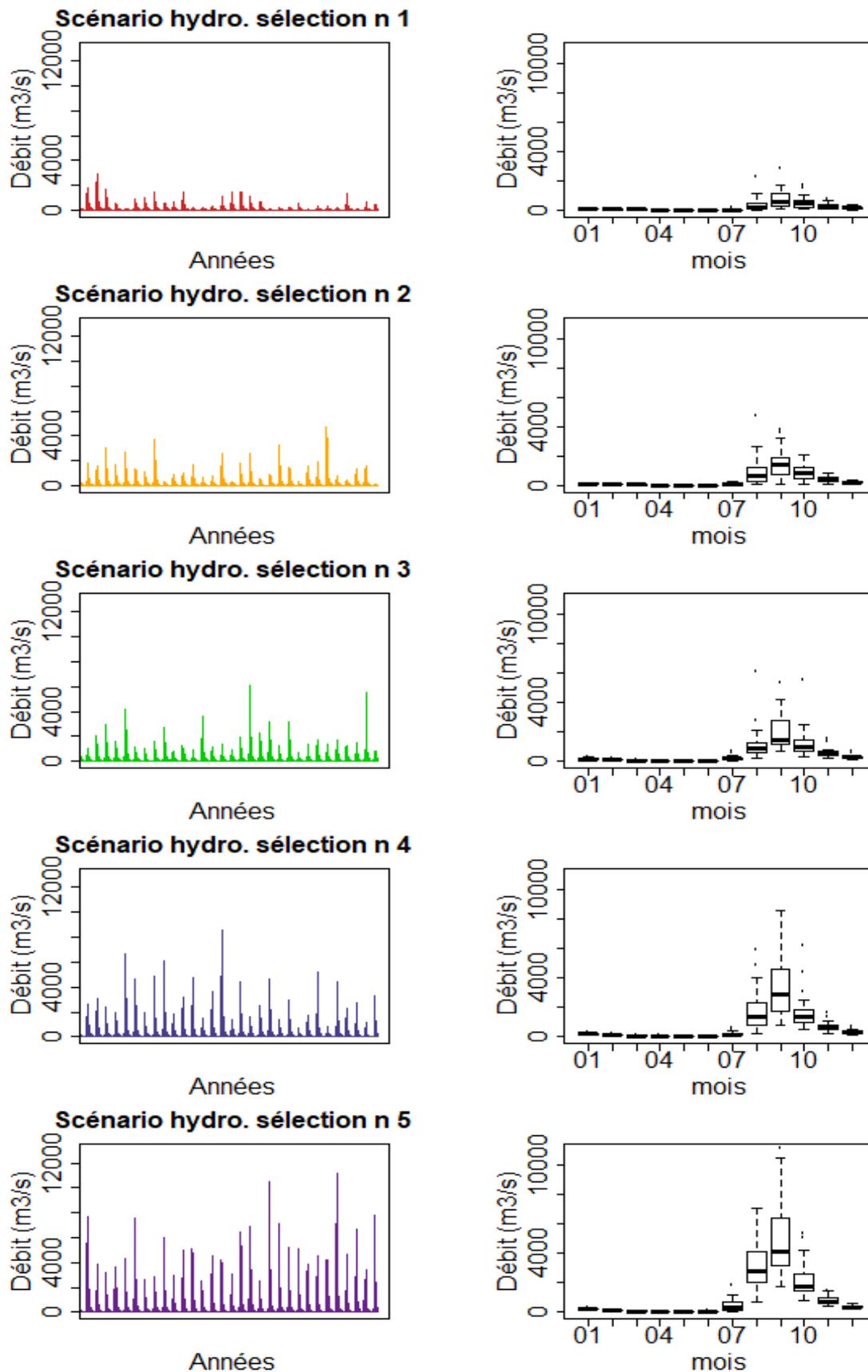


FIGURE 2.16 – A gauche : Hydrogramme des projections hydrologiques sélectionnées pour l’horizon 2. A droite : Cycles annuels moyens correspondants (les boxplots indiquent la variabilité mensuel).

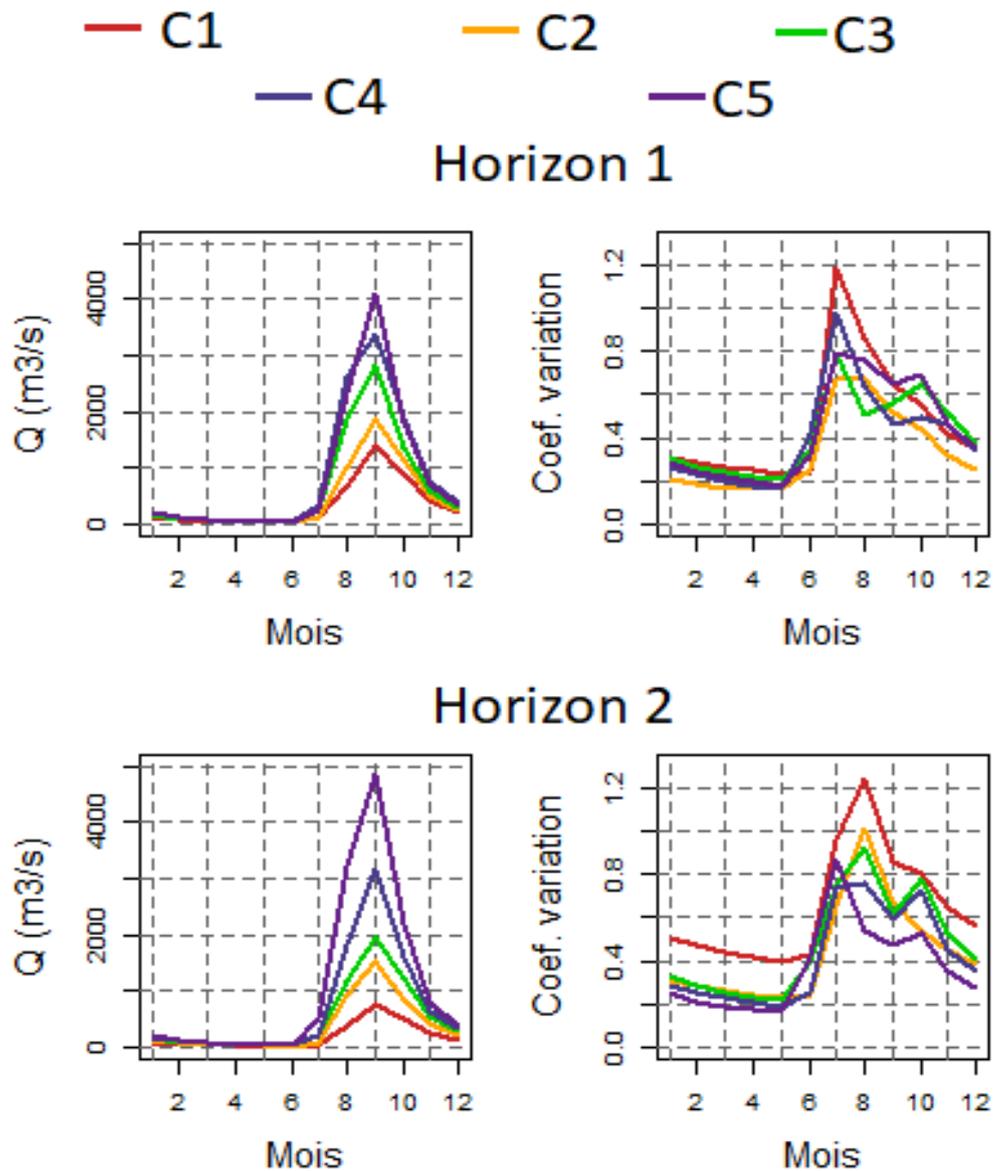


FIGURE 2.17 – Cycles annuels moyens des projections hydrologiques sélectionnées pour l’horizon 1 (en haut) et l’horizon 2 (en bas). A gauche : Cycles annuels moyens des clusters 1 à 5. A droite : Coefficients de variations associées ($Coef. variation = \sigma/\mu$, avec σ l’écart-type, et μ la moyenne).

numérique est le même que celui appliqué aux projections.

Globalement, les débits d'étiage simulés par le GR2M sont sur-estimés. Ceci est lié au fait que les critères de fonction accordent davantage de « poids » aux forts débits que pour les faibles débits.

Pour l'horizon 1 (Figure 2.13), une situation comparable à la période sèche (humide) historique est proche du cluster 2 (cluster 4). Pour l'horizon 2 (Figure 2.14), une situation comparable à la période sèche historique est à mi-chemin entre les clusters 2 et 3, et comparable au cluster 4 pour la période humide historique.

2.8 Distribution des débits au niveau des noeuds du modèle hydro-économique

Base de données archivée dans le dossier "Base de données - Hydrologie", et le sous-dossier "Base de données - Projections hydrologiques aux sous bassins hydro-économiques". Disponible sur le portail web de la FAO.

Tel que conçu, le modèle hydro-économique est constitué d'un ensemble de sous-bassins hydro-économiques, dont les exutoires représentent les noeuds du modèle (Tilmant and Pina, 2018). Pour fonctionner, ce modèle hydro-économique requiert une série temporelle de débits **incrémentaux** en chacun des noeuds.

Nous allons donc, pour chacune des projections hydrologiques sélectionnées, distribuer les débits simulés, afin de produire des séries temporelles de débits incrémentaux en chacun des noeuds hydro-économiques.

2.8.1 Présentation de la méthode de distribution des débits

Distribuer des débits incrémentaux ou des débits totaux ?

Dans ses publications, le Pr. R. Wurbs présente une revue des méthodes de distribution des débits dans un bassin versant (Wurbs and Sisson, 1999; Wurbs, 2006, 2012). Elles peuvent être de deux natures : (i) distribuer des débits totaux, ou (ii) distribuer des débits incrémentaux. De plus, (iii) une troisième, qualifiée de « hybride » existe.

Dans le premier cas (i), la première étape consiste à distribuer les débits totaux aux noeuds du modèles hydro-économique. Lors de la seconde étape, les débits incrémentaux aux noeuds (Q_{incr-N}) sont calculés comme étant une soustraction des débits totaux ($Q_{incr-N} = Q_{tot-N} - Q_{tot-N.en.amonts}$).

Dans le deuxième cas (ii), la première étape consiste à calculer les débits incrémentaux des sous-bassins hydrologiques ($Q_{incr-N} = Q_{tot-N} - Q_{tot-N.en.amonts}$). La seconde étape a pour objet de distribuer les débits incrémentaux aux noeuds du modèles hydro-économique.

Dans le troisième cas (iii), les débits totaux des sous-bassins hydrologiques sont directement distribués sur les sous-bassins incrémentaux (d'où le qualificatif « hybride »).

Parmi ces trois cas possibles, nous avons choisi la méthode de distribution des débits incrémentaux (cas ii). En effet, cette méthode est la plus adaptée (pour plus de précisions, référez-vous à l'annexe C).

Le ratios des airs de drainage (DAR)

Dans ces trois cas listés ci-dessus, une phase de distribution des débits est nécessaire. Ouarda et al. (2002) et Wurbs (2012) présentent différentes équations de distribution et de régionalisation. Parmi elles, nous avons retenu l'équation des ratios des airs de drainage (« Drainage Area Ratio Method », DAR).

La méthode DAR est basée sur le bilan hydrique, et fait en outre l'hypothèse que toutes les parcelles de surface ont la même contribution au débit. Dans sa forme initiale, la méthode DAR donne la relation suivante (Équation 2.6).

$$Q_{NonJauge} = (Q_{Jauge} + F_{CL} * Q_{NonJauge}) * \left(\frac{A_{NonJauge}}{A_{Jauge}} \right) \quad (2.6)$$

Avec Q_{Jauge} , les débits du bassin jaugé ; $Q_{NonJauge}$, les débits du bassin non jaugé ; A_{Jauge} , l'air du bassin jaugé ; $A_{NonJauge}$, l'air du bassin non jaugé ; et F_{CL} les pertes de canal (liées à l'infiltration ou l'évaporation par exemple).

Puisqu'il n'y a aucune données de perte de canal sur le Sénégal⁶, nous faisons l'hypothèse qu'elles sont égales à zéro ($F_{CL} = 0$), ce qui donne l'équation 2.7.

$$Q_{NonJauge} = (Q_{Jauge}) * \left(\frac{A_{NonJauge}}{A_{Jauge}} \right) \quad (2.7)$$

Cette méthode suppose une contribution égale au débit de chaque unité de surface. Toutefois, puisque qu'il y a un fort gradient de précipitation dans le BFS, nous y introduisons les précipitations moyennes du bassin jaugé (P_{Jauge}), et non jaugé ($P_{NonJauge}$), ce qui donne l'équation 2.8.

$$Q_{NonJauge} = Q_{Jauge} * \left(\frac{A_{NonJauge} * P_{NonJauge}}{A_{Jauge} * P_{Jauge}} \right) \quad (2.8)$$

Si le rapport des précipitations était calculé au pas de temps mensuel, certaines aberrations de calculs (divisions par zéro) apparaîtraient, et la relation serait moins stable qu'avec un pas de temps annuel. C'est pourquoi, nous avons opté pour un calcul du rapport des précipitations au pas de temps annuel.

6. Voir hypothèse formulée à la fin de l'annexe C.

Commentaires

Le substrat géologique évolue entre les stations de Daka Saidou et de Bafing Makana. Au sud, on retrouve des faciès géologiques ignées granitiques et métamorphiques précambriennes. Il en résulte que les infiltrations sont supposées très faibles. En revanche, à partir de Bafing Makana (et au nord), les faciès géologiques sont sédimentaires (Cambrien, paléozoïque, ou tertiaire), ce qui suppose des infiltrations et des aquifères de surfaces développés (suppositions corroborées par la thèse de Mohamed (2013)). Aussi, les pertes de canal peuvent être supérieures à zéro à partir du noeud hydro-économique 5.

De plus, l'évapotranspiration au niveau des canaux aura tendance, de manière générale, à augmenter les pertes de canal.

A cause de ces deux facteurs, il est possible que les pertes de canal soient plus importantes que les apports hydriques, et ainsi, obtenir des débits incrémentaux négatifs. **Si tel est le cas, ces valeurs sont ramenées à zéro.**

2.8.2 Distribution des débits : Applications

Ce paragraphe présente le protocole de distribution des débits dans le BFS. Il est constitué de deux étapes :

1. Calculer les débits incrémentaux des sous-bassins hydrologiques ($Q_{incr-N} = Q_{tot-N} - Q_{tot-N.en.amonts}$).
2. Distribuer les débits incrémentaux aux noeuds du modèles hydro-économique via la méthode DAR.

Calcul les débits incrémentaux des sous-bassins hydrologiques

Nous disposons de six sous-bassins hydrologiques. Aussi, les sous-bassins de Daka Saidou, de Oualia et de Gourbassi correspondent à leurs sous-bassins incrémentaux du fait qu'ils se trouvent en tête de bassin. A l'inverse, le sous bassin incrémental de Bafing Makana correspond à son sous-bassin total, moins le bassin total de Daka-Saidou. Similairement, le sous bassin incrémental de Kayes (Bakel) correspond à son sous-bassin total, moins les bassins totaux de Bafing Makana et de Oualia (de Kayes et de Gourbassi). Les morphologies et les caractéristiques des sous-bassins hydrologiques incrémentaux sont respectivement représentées dans la figure 2.18 et données dans le tableau 2.10.

Sous-bassin hydrologique incrémental	Superficie
Daka Saidou	15 768 km^2
Bafing Makana	6 419 km^2
Gourbassi	15 897 km^2
Oualia	102 611 km^2
Kayes	183 743 km^2
Bakel	69 308 km^2

TABLE 2.10 – Tableau des superficies des sous-bassins hydrologiques incrémentaux.

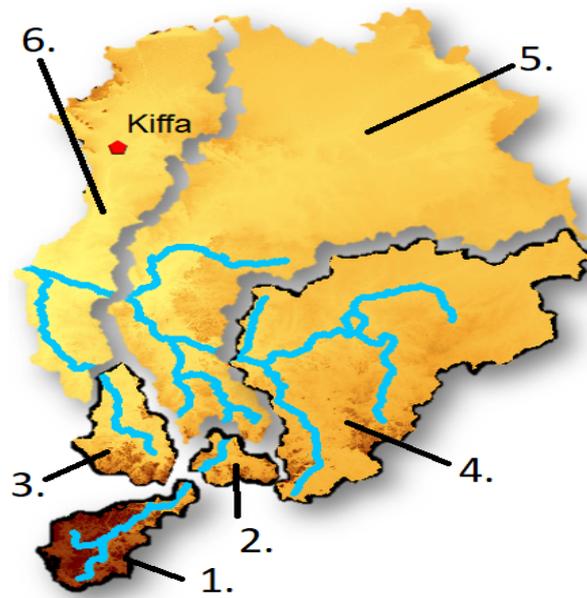


FIGURE 2.18 – Carte des morphologies des sous-bassins hydrologiques incrémentaux de :
1 : Daka Saidou ; 2 : Bafing Makana ; 3 : Gourbassi ; 4 : Oualia ; 5 : Kayes ; 6 : Bakel.

Distribution des débits incrémentaux aux noeuds du modèles hydro-économique

Pour distribuer les débits incrémentaux sur les noeuds hydro-économiques, nous avons utilisé l'équation 2.8 avec un ratio annuel des précipitations. Nous avons associés :

- Les noeuds 1,2,4 et 5 au sous-bassin de Daka Saidou.
- Les noeuds 6 et 7 au sous-bassin de Bafing Makana.
- Les noeuds 15 et 16 au sous-bassin de Gourbassi.
- Les noeuds 8,9,10 et 11 au sous-bassin de Oualia.
- Les noeuds 12,13 et 14 au sous-bassin de Kayes.
- Les noeuds 17, 18 et 19 au sous-bassin de Bakel.

Les autres noeuds hydro-économiques ont des débits incrémentaux égale à 0 (m^3/s).

Troisième partie

3^{ème} Rapport

GIREC

3^{ème} Rapport

Gestion du fleuve Sénégal sous changements climatiques

Vulnérabilités des usagers et politiques d'allocation
des ressources hydriques

Comment citer ce rapport :

Guilpart E., A. Tilmant, M-A Bourgault, R. Roy. 2020. Gestion du fleuve Sénégal sous changements climatiques. Report 3, Département du génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Qc, Canada

Chapitre 3

Gestion du fleuve Sénégal sous changements climatiques

Contents

3.1	Introduction	58
3.2	Scénarios hydro-économiques explorés	63
3.3	Schéma de développement intermédiaire : Résultats de la modélisation hydro-économique et analyse	65
3.4	Schéma de développement complet : Résultats de la modélisation hydro-économique et analyse	87
3.5	Conclusions	94

3.1 Introduction

Les motivations du projet GIRECCC s'appuient grandement sur les résultats obtenus dans le projet TCP/INT/3602 et résumés dans Maher et al. (2018). En explorant divers scénarios d'équipement du bassin à l'aide d'un modèle d'optimisation hydro-économique, il apparaît que :

- Les performances du bassin du fleuve Sénégal peuvent être considérablement améliorées grâce à la gestion coordonnée du système multi-réservoir.
- Une dualité se distingue entre deux groupes d'activités : la production hydroélectrique et la navigation d'une part, et d'autre part l'agriculture de décrue et la pêche. Le premier groupe d'activité tend à instaurer une régularisation des débits du fleuve, tandis que le second nécessite le maintien de certaines caractéristiques du régime hydrologique naturel du fleuve. De cette dualité, nous pouvons envisager deux politiques d'allocation distinctes : la première favorisant la production d'énergie, la seconde favorisant plutôt le secteur alimentaire traditionnel.
- Comme indiqué dans le SDAGE (OMVS, 2011), les performances et les impacts des nouvelles infrastructures doivent être évalués à l'échelle du bassin. L'extension de l'agriculture irriguée, comme mentionnée dans le PARACI2 (OMVS, 2017), peut par exemple exacerber les conflits d'usage entre l'agriculture irriguée et la navigation.

Leurs conclusions soulèvent la question de l'équilibre entre les besoins en eau et la disponibilité en eau, ainsi que le devenir futur de cet équilibre. Si les besoins en eau tendent

à augmenter via l'équipement progressif du bassin, les changements climatiques peuvent amplifier ou atténuer les vulnérabilités des secteurs d'activité.

Ici, nous explorons cette question selon ces deux angles. L'effet des changements climatiques est évalué pour (i) un premier schéma d'équipement du bassin (développement intermédiaire, cf section 3.3) et pour deux politiques d'allocation spécifiques (l'une mettant l'accent sur la production d'énergie, l'autre favorisant la production alimentaire traditionnelle); et pour (ii) un second schéma d'équipement du bassin (développement complet, cf section 3.4) et pour les deux mêmes politiques d'allocation.

Ce troisième chapitre est organisé comme suit :

- La section 3.1 reprend les notions fondamentales de la modélisation hydro-économique, et présente le modèle hydro-économique utilisé ainsi que les différents secteurs d'activité liés à l'eau.
- La section 3.2 détaille l'ensemble des scénarios hydro-économiques explorés.
- La section 3.3 présente les résultats des simulations hydro-économiques pour le schéma de développement intermédiaire.
- La section 3.4 présente les résultats des simulations hydro-économiques pour le schéma de développement complet.
- La section 3.5 reprend les éléments des sections 3.3 et 3.4 pour analyser les vulnérabilités des usages vis-à-vis des changements climatiques.

3.1.1 La modélisation hydro-économique : Notions fondamentales

Un modèle hydro-économique est un outil d'analyse quantitative des problèmes liés à la gestion des ressources en eau. Comme son nom l'indique, cet outil intègre des concepts économiques (micro-économiques) et hydrologiques. Un réseau d'arcs et de noeuds permet de représenter la distribution spatiale et la connectivité des ressources en eau, des différentes demandes et des infrastructures hydrauliques principales du bassin étudié. Un tel modèle permet de tester différentes politiques d'allocation et d'en évaluer les impacts hydrologiques et économiques¹.

Il existe deux catégories de modèles hydro-économiques : ceux basés sur la simulation et ceux qui s'appuient sur l'optimisation. Les premiers sont utilisés pour analyser des scénarii dans lesquels les politiques d'allocation seront spécifiées par l'analyste. Les modèles hydro-économiques basés sur l'optimisation, quant à eux, identifient les politiques de gestion les plus appropriées en cherchant à maximiser (minimiser) une fonction objective soumise à des contraintes physiques, institutionnelles et/ou économiques. La fonction objective des modèles d'optimisation est le plus souvent la somme des bénéfices nets obtenus à chaque pas de temps (jour, semaine, mois) sur un horizon de gestion donné comportant typiquement plusieurs années.

Comme la plupart des problèmes de gestion de ressources en eau implique plusieurs objectifs conflictuels, comme par exemple l'agriculture de décrue et la production hydro-électrique, la solution proposée par un modèle hydro-économique sera optimale au sens

1. Pour de plus amples détails sur les concepts, les applications, et les structures des modèles hydro-économiques, veuillez vous référer à la publication de Harou et al. (2009)

Pareto du terme. L'exploration des solutions Pareto optimales par les différentes parties prenantes permet de guider le processus de prise de décision, de rendre plus transparent le choix de la solution de compromis.

3.1.2 Le modèle hydro-économique du bassin du fleuve Sénégal

Présentation, secteurs d'activités et sous-bassins hydro-économiques

Puisque le projet GIRECCC s'inscrit dans la lignée du projet TCP « Enhanced cross-boundary water resources management in the Senegal River Basin » (Maher et al., 2018), le même modèle hydro-économique sera utilisé.

Ce modèle hydro-économique du bassin du fleuve Sénégal intègre les principaux usages de l'eau² :

- l'agriculture irriguée ;
- la production hydroélectrique ;
- la pêche ;
- l'agriculture de décrue ;
- la navigabilité du fleuve sur la section Saint-Louis/Podor.

Les secteurs sus-mentionnés sont en mesure de générer des bénéfices nets quantifiables, à l'exception de la navigation sur le fleuve (secteur pour lequel une relation entre les bénéfices nets et un ou plusieurs attribut hydrologique n'a pas encore été établie). Une synthèse de ces données hydro-économiques est présentée en annexe D.

Dans le SDAGE (OMVS, 2011), le bassin du fleuve Sénégal a été divisé en 28 sous-bassins. Pour mieux répondre aux exigences de modélisation, cette division a été légèrement modifiée. Le tableau 3.1 présente la correspondance entre les noeuds du modèle hydro-économique et les sous-bassins du SDAGE.

Schémas d'équipement du bassin du fleuve Sénégal : Développement intermédiaire et développement complet

A l'instar de Tilmant and Pina (2018) et Tilmant et al. (2020), nous allons étudier deux versions différentes du schéma d'équipement du bassin du fleuve Sénégal.

Le premier correspond à un niveau de développement intermédiaire caractérisé par la construction des centrales de seconde génération et l'irrigation de 255 kha (SDAGE, OMVS (2011)). Il sera nommé « développement intermédiaire », et a pour caractéristiques d'intégrer 255kha de périmètres irrigués sur l'ensemble du bassin, ainsi que les centrales hydroélectriques de première et de seconde génération (soit un total de six).

2. Si les besoins domestiques sont politiquement importants dans le fleuve Sénégal, ils sont néanmoins négligeables lorsque les flux de retour sont pris en compte. Pour cette raison, ils n'ont pas été incorporés dans ce modèle. Pour plus de détails sur la paramétrisation de leurs besoins en eau, référez vous à Tilmant and Pina (2018).

Affluent	Division nodèle hydro-économique			Division du SDAGE		
	Noeud	Superficie (km^2)	Tronçon correspondant	Sous-bassin(s) correspondant(s)	Superficie (km^2)	Tronçon correspondant
Bafing	N1	3 747	Amont de Balassa	1	1 710	Amont de Balassa
	N2	6 883	Balassa - Koukoutamba	2	8 890	Balassa - Koukoutamba
	N3	-	Fictif (sans superficie)	-	-	Sans correspondance
	N4	3 989	Koukoutamba - Boureya	3	4150	Koukoutamba - Boureya
	N5	6 617	Boureya - Bindougou	4	1 450	Boureya - Bindougou
	N6	6 965	Bindougou - Manantali	5	11 600	Bindougou - Manantali
	N7	10 780	Manantali - Confluence Bakoye	6	10 600	Manantali - Confluence Bakoye
Bakoye	N8	16 417	Amont de Boudofora	12	15 600	Amont de Boudofora
	N9	74 807	Amont de Maréla	10	58 800	Amont de Maréla
	N10	10 800	Aval de Boudofora et aval de Boudofora, jusqu'à Badoumbé	11+13+14	700+700+10 000	De Maréla à la confluence Baoulé/Bakoye + De Boudofora à la confluence Bakoye/Baoulé + De la confluence Bakoye/Baoulé à Badoumbé
	N11	1 942	Badoumbé - Confluence Bakoye/Bafing	15	500	Badoumbé - Confluence Bakoye/Bafing
Falémé	N15	5 710	Amont de Moussala	7	7 400	Amont de Moussala
	N16	12 938	Moussala - Gourbassi	8	9 700	Moussala - Gourbassi
Sénégal	N12	4 157	Confluence Bakoye/Bafing - Gouina	16	2 300	Confluence Bakoye/Bafing - Gouina
	N13	2 865	Gouina - Félou	17	4 000	Gouina - Félou
	N14	157 544	Félou - Kayes	18	26 400	Félou - Kayes
	N17	64 285	Aval de Kayes et aval de Gourbassi, jusqu'à la confluence Falémé/Sénégal	9+19	11 800+30 000	Gourbassi- Confluence Sénégal + Kayes - Confluence Sénégal
	N18	2 237	Confluence Falémé/Sénégal - Bakel	20	1 700	Confluence Falémé/Sénégal - Bakel
	N19	13 621	Bakel - Matam	21	12 000	Bakel - Matam
	N20	-	Matam - Podor	22	36 000	Matam - Podor
	N21	-	Podor - Richard Toll	23+24	2 000+Ne	Podor-Dagana + Dagana-Richard Toll
	N22	-	Richard Toll - Diama	25+26	Ne+Ne	Richard Toll- Confluence Guiers/Sénégal + Confluence Guiers/Sénégal - Diama
	N23	-	Bassin du Ferlo/Guiers	28	Ne	Bassin du Ferlo/Guiers
N24	-	Diama - Saint Louis	27	Ne	Diama - Saint Louis	

TABLE 3.1 – Table des correspondances des sous-bassins du SDAGE et des Nœuds hydro-économiques.

Le deuxième correspond à un développement complet du bassin, et se nomme « développement complet ». Il a pour caractéristiques d'intégrer 405kha de périmètres irrigués sur l'ensemble du bassin, ainsi que les centrales hydroélectriques de première, seconde et de troisième génération (soit un total de douze).

La figure 3.1 présente le réseau du modèle, dont la connectivité des nœuds, l'emplacement des périmètres irrigués et des centrales hydroélectriques.

Fonctionnement

Le modèle hydro-économique cherche à optimiser (maximiser) les bénéfices nets dans le bassin sur un horizon de planification donné. Le problème d'allocation est formulé comme une séquence de décisions (ex : prélèvements, stockage, turbinage, etc.) qui doit satisfaire les demandes en eau tout en répondant à un ensemble de contraintes opérationnelles.

Le problème d'optimisation est résolu en utilisant l'algorithme SDDP (Stochastic Dual Dynamic Programming) (Pereira and Pinto, 1991). Comme les autres méthodes de programmation dynamique, SDDP repose sur le principe d'optimalité de Bellman qui stipule qu'à chaque période, la solution optimale cherche à maximiser la somme des bénéfices immédiats et des bénéfices futurs. Un problème de prise de décision séquentielle comportant T étapes peut ainsi être divisé en une séquence de T problèmes qui sont résolus récursivement (Figure 3.2). Avant de passer d'une étape à la suivante, une fonction de valeur doit être construite, indiquant comment les bénéfices futurs agrégés changent en fonction de l'état du système, c'est-à-dire le taux de remplissage des réservoirs et les conditions hydrologiques à travers tout le bassin.

Ici, l'horizon de planification est de 5 ans et le problème d'allocation est résolu sur un pas de temps mensuel ($T = 60$). Comme expliqué dans (Tilmant et al., 2020), les résultats des deux premières et de deux dernières années ne correspondent pas à des conditions stationnaires puisqu'ils sont influencés par les conditions aux limites imposées à l'algorithme d'optimisation. Par conséquent, seules les politiques optimales de gestion de l'année #3 sont extraites pour être ensuite utilisées afin de ré-optimiser le système hydrique sur l'entière des chroniques hydrologiques disponibles, soit des séries de 30 ans. Les principaux résultats sont les décisions d'allocation mensuelle - chacune un vecteur (30×1) - calculées au cours de la phase de ré-optimisation.

3.2 Scénarios hydro-économiques explorés

Plusieurs scénarios sont analysés à l'aide du modèle hydro-économique. Une exécution du modèle hydro-économique repose sur : (i) un scénario de développement, rendant compte d'un schéma de développement et reflétant les infrastructures présentes dans le bassin et les besoins en eau associés ; (ii) un scénario de politique d'allocation accordant une priorité plus importante à tel ou tel secteur ; (iii) un scénario hydroclimatique issu du regroupement des projections hydrologiques (2, section 2.7).

Nous disposons de :

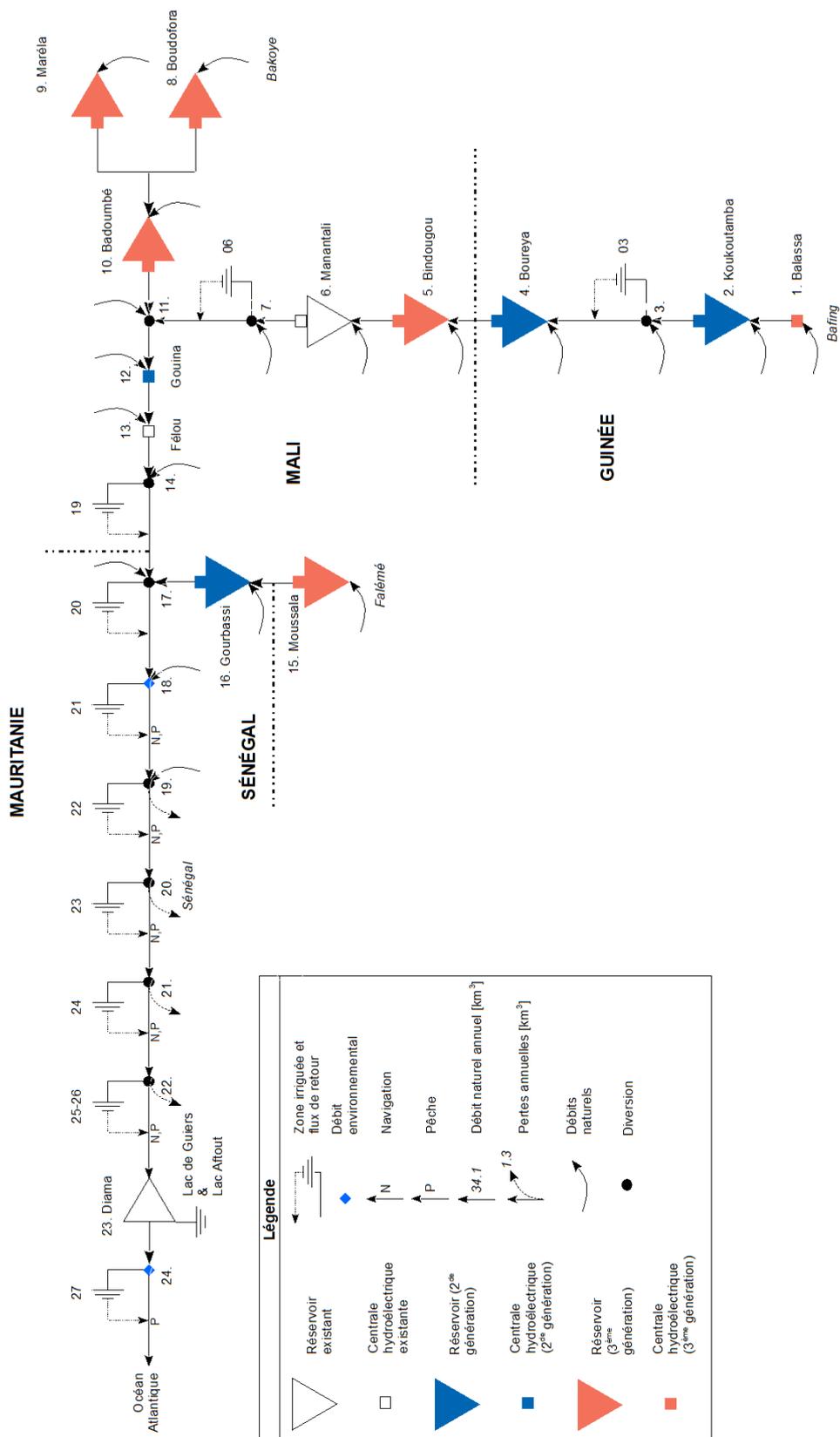


FIGURE 3.1 – Nœuds hydro-économiques, et schéma de la structure du modèle hydro-économique du Bassin du Fleuve Sénégal.

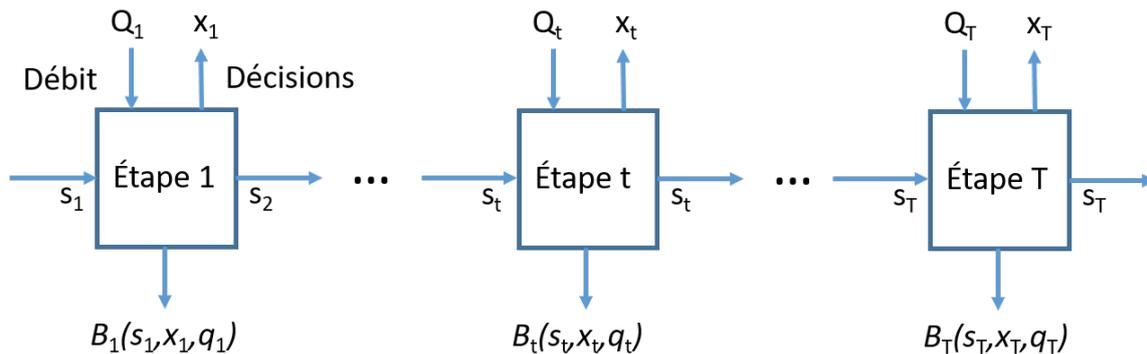


FIGURE 3.2 – Schéma des décisions séquentielles du modèle hydro-économique.

- Deux schémas de développement (développement intermédiaire ; développement complet), dont les détails ont été exposés plus haut (paragraphe 3.1.2).
- Treize scénarios hydro-climatiques ; à savoir
 - Trois pour la période historique : une période humide 1940-1969 ; une période transitoire : 1955-1984 ; et une période sèche : 1969-1998)³ ;
 - Cinq pour l'horizon 1 (2031-2060), nommés H1-C1, H1-C2, H1-C3, H1-C4 et H1-C5 et portant respectivement les qualificatifs de "très sec", "sec", "neutre", "humide" et "humide et variabilité +"⁴ ;
 - Cinq pour l'horizon 2 (2066-2095), nommés H2-C1, H2-C2, H2-C3, H2-C4 et H2-C5 et portant respectivement les qualificatifs de "très sec", "sec", "neutre", "humide" et "très humide"⁵ ;
- Deux scénarios de politique d'allocation ; à savoir :
 - La politique d'allocation « Sécurité-Énergétique » correspondant à une paramétrisation standard du modèle (Tilmant and Pina, 2018; Tilmant et al., 2020), qui de fait, met l'accent sur la production énergétique.
 - La politique d'allocation « Sécurité-Alimentaire » ayant à une paramétrisation similaire, à l'exception de la mise en oeuvre d'une crue artificielle afin d'assurer l'agriculture de décrue sur environ 50 kha, de préserver les écosystèmes aquatiques et donc la pêche dans la basse vallée.

Tilmant and Pina (2018) et Tilmant et al. (2020) ont déjà proposé une étude approfondie de l'allocation en eau dans le bassin sur la période historique. Toutefois, leurs résultats portaient sur un échantillon de 50 années. Aussi, pour assurer une comparaison statistique avec les projections hydrologiques en climats futurs de 30 ans, nous présentons ici les résultats sur la période historique avec un échantillon de même durée.

Le tableau 3.2 présente les combinaisons entre les schémas de développement, les scénarios hydrologiques, et les politiques d'allocation que nous avons explorés. Aussi, la gestion de l'eau dans le BFS a été analysée pour un total de trente-six scénarios hydro-économiques. Chacun d'entre eux comporte 30 années, à l'instar des scénarios climatiques

3. Pour ces trois scénarios historiques, les données de débit de la monographie de Bader et al. (2014) ont été utilisées, et le même protocole de distribution de débit (cf section 2.8) a été appliqué.

4. Ils correspondent aux clusters hydrologiques de l'horizon 1, présentés en chapitre 2, section 2.7.

5. Ils correspondent aux clusters hydrologiques de l'horizon 2, présentés en chapitre 2, section 2.7.

et hydrologiques.

Schéma de développement intermédiaire

Historique :	1940-1969	1955-1984	1969-1998		
"Sécurité-Énergétique"	X	X	X		
"Sécurité-Alimentaire"	X	X	X		
Horizon 1 (2031-2060) :	H1-C1	H1-C2	H1-C3	H1-C4	H1-C5
"Sécurité-Énergétique"	X	X	X	X	X
"Sécurité-Alimentaire"	X	X	X	X	X
Horizon 2 (2066-2095) :	H2-C1	H2-C2	H2-C3	H2-C4	H2-C5
"Sécurité-Énergétique"	X	X	X	X	X
"Sécurité-Alimentaire"	X	X	X	X	X

Schéma de développement complet

Horizon 2 (2066-2095) :	H2-C1	H2-C2	H2-C3	H2-C4	H2-C5
"Sécurité-Énergétique"	X	X	X	X	X
"Sécurité-Alimentaire"	X	X	X	X	X

TABLE 3.2 – Composition des scénarios hydro-économiques explorés, menant à un total de trente-six.

Ainsi, l'influence des changements climatiques sur la gestion de l'eau sera pleinement étudiée, et ce avec le schéma de développement intermédiaire. Pour le schéma de développement complet, seul l'horizon 2 sera traité. En effet, cet horizon couvre la variabilité des changements climatiques ainsi que ses extrêmes. Il nous sera alors possible de déterminer si un schéma de développement complet est une orientation d'équipement pertinente vis-à-vis des changements climatiques. Les résultats des simulations hydro-économiques seront présentés séparément pour le schéma de développement intermédiaire (section 3.3) et pour le schéma de développement complet.

3.3 Schéma de développement intermédiaire : Résultats de la modélisation hydro-économique et analyse

Cette section est dédiée à la présentation des résultats des simulations hydro-économiques, puis à leur analyse, pour le schéma de développement intermédiaire. Nous disposons de vingt-six scénarios hydro-économiques pour ce schéma. Dans un premier temps, les résultats des simulations seront présentés par horizon (période historique, horizon 1 et horizon 2). Dans un second temps, nous analyserons l'effet des changements climatiques sur l'allocation de l'eau dans le bassin, à la fois pour une politique de gestion favorisant la production énergétique (Sécurité-Énergétique) et pour une politique favorisant la production de alimentaire (Sécurité-Alimentaire).

3.3.1 Présentation des résultats

Indicateurs de performance

La performance du système hydrique du fleuve Sénégal est évaluée par cinq indicateurs, un par secteur d'activité :

1. l'agriculture irriguée est mesurée par le nombre d'hectares effectivement irrigués.
2. l'agriculture de décrue est mesurée par le nombre d'hectares inondés par la crue du mois de septembre.
3. la pêche est mesurée par les prises annuelles dans la vallée et dans les réservoirs (kT/an).
4. la production hydroélectrique est donnée en GWh/an.
5. la navigabilité du fleuve est, quant à elle, évaluée par la fiabilité d'assurer un débit minimum de 100 m³/s à Richard Toll, ce qui correspond à un débit minimum de 200 m³/s à Bakel.

Les détails se trouvent dans l'annexe D.

Résultats sur les périodes historiques

Les performances des différents secteurs d'activité sur la période historique sont données à la figure 3.3. La colonne de gauche présente les résultats pour la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique". La colonne du milieu présente les résultats pour la politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire". La colonne de droite présente l'hydrogramme mensuel sur la période considérée. La première/deuxième/troisième ligne correspond à la période de historique 1940-1969/1955-1984/1969-1998. Chaque graphique est constitué de 5 colonnes, représentant les cinq secteurs d'activité, qui sont (de gauche à droite) (i) l'agriculture irriguée, (ii) l'agriculture de décrue, (iii) la pêche, (iv) la production hydroélectrique, et (v) la navigabilité du fleuve. Les zones oranges, vertes et bleues représentent les espaces interquartiles suivants : 0-25%, 25-75%, 75-100% respectivement. Les pointillés représentent la performance médiane. Au plus l'espace couvert par les zones de couleur est grand, au plus la variabilité inter-annuelle des performances est élevée, au plus le secteur est vulnérable aux aléas hydro-climatiques. Idéalement, nous souhaiterions avoir des résultats qui se superposent à l'axe horizontal supérieur où les performances sont maximales. Malheureusement, la présence d'objectifs conflictuels ne permet pas d'atteindre simultanément les performances maximales. La figure met dès lors en avant les coalitions d'objectifs et leur vulnérabilité aux aléas hydro-climatiques ainsi qu'aux politiques d'allocation.

La figure 3.4, quant à elle, montre les distributions statistiques empiriques des performances pour les trois périodes historiques. Ces distributions donnent l'évolution de la probabilité de non-dépassement de la performance sectorielle. Autrement dit, pour un niveau de performance donné, nous avons la probabilité que ce niveau ne sera pas dépassé. Ici, les faibles niveaux de performance sont observés durant les années sèches pour lesquelles les probabilités de non-dépassement sont faibles (probabilités de dépassement élevées). Ces distributions statistiques donnent donc une idée de la variabilité des performances suite à la variabilité naturelle des conditions hydrologiques encapsulée dans les séries chronologiques de 30 ans (360 mois).

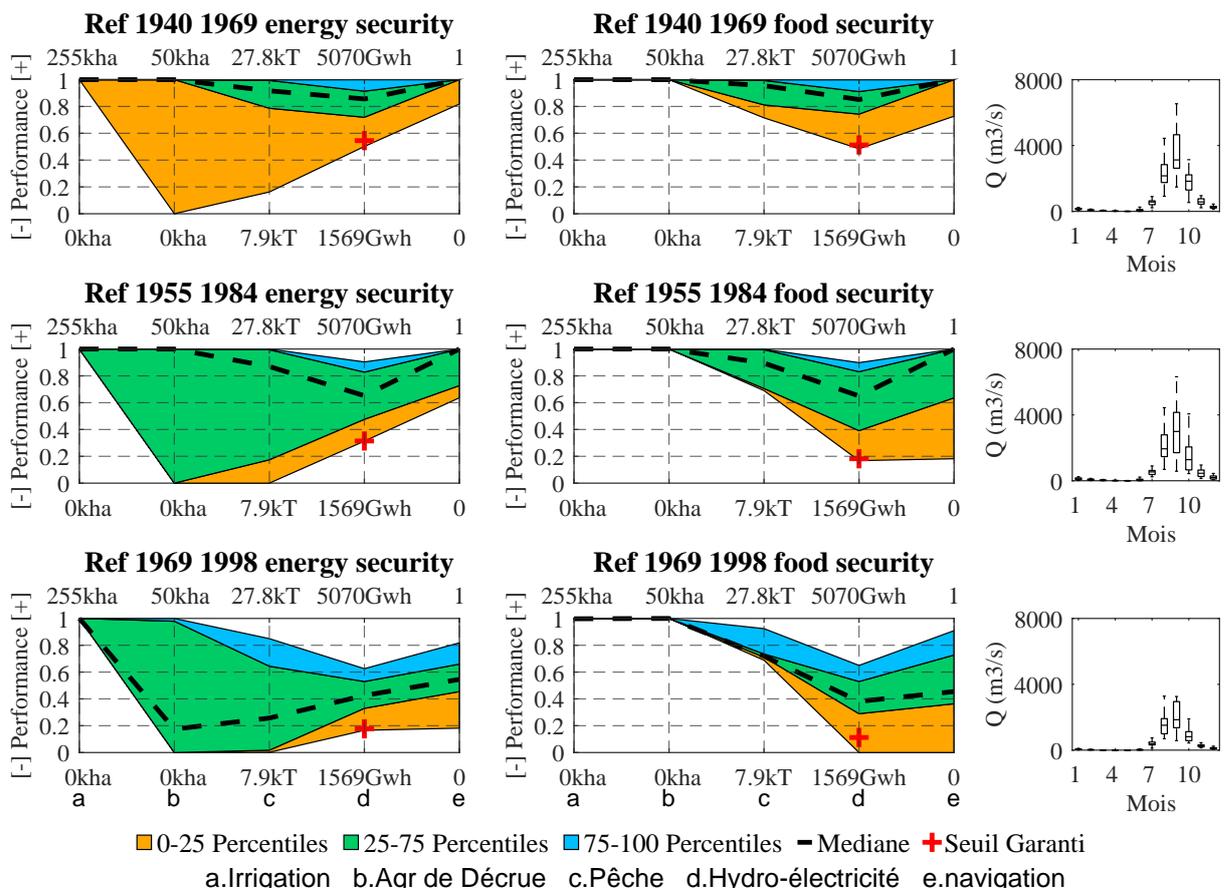


FIGURE 3.3 – Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement intermédiaire, résultats sur les périodes historiques.

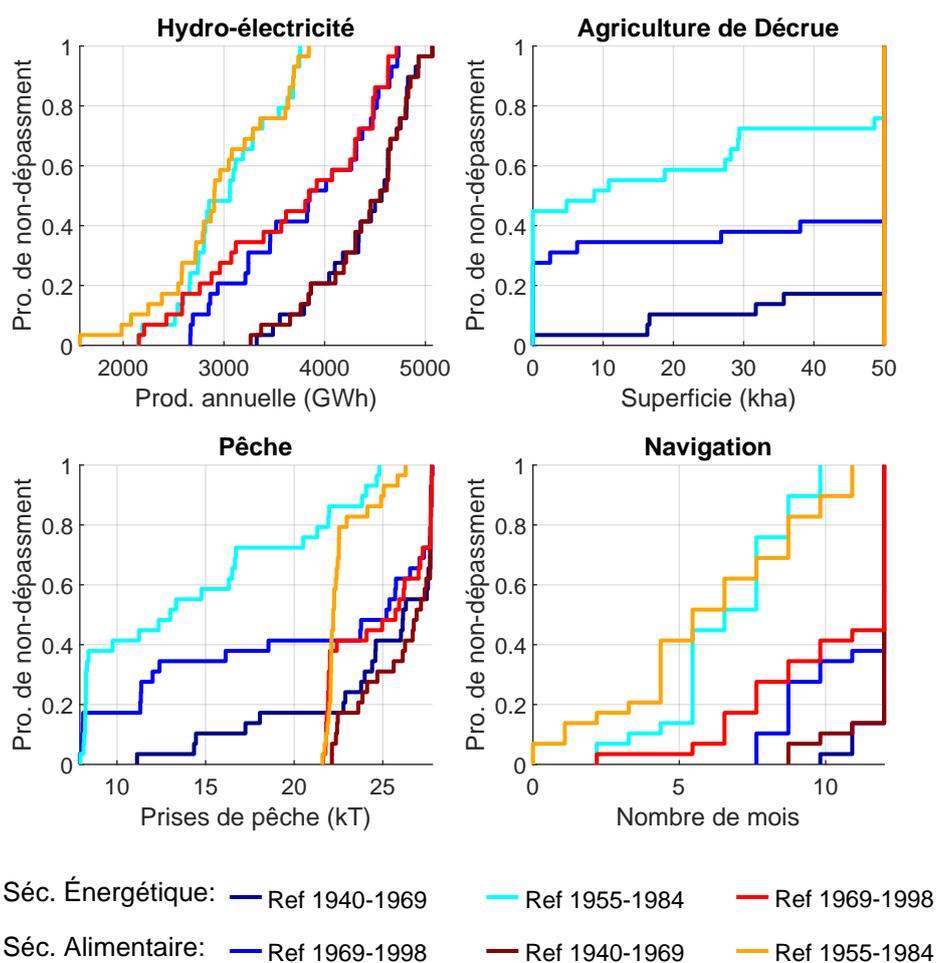


FIGURE 3.4 – Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité sur les périodes historiques (développement intermédiaire). Ayant systématiquement tous ses besoins couverts, l'agriculture irriguée n'est pas représentée.

Bien que l'agriculture irriguée soit intrinsèquement une activité fortement consommatrice en eau, les besoins de l'intégralité des 255 000 ha sont couverts, aussi bien pour la période historique humide (1940-1969) que sèche (1969-1998), et ce quelque soit la politique d'allocation.

Les performances de la production hydroélectrique sont similaires entre la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique" et la politique "Sécurité-Alimentaire". Pour la période humide/transitoire/sèche, la production médiane s'élève à environ 4500/3850/3000 GWh respectivement. Il est à noter que les distributions statistiques (Figure 3.4) vont par paires. Cela illustre bien le fait que la production hydroélectrique est pilotée au premier ordre par la disponibilité en eau. La politique d'allocation n'a, quant à elle, que peu d'influence, même si toutefois un surplus de production d'électricité peut être observé avec la politique "Sécurité-Énergétique" pendant les années sèches (correspondant à une probabilité de non-dépassement inférieure 0.4). Autrement dit, une année sur cinq, la production d'énergie sera plus importante si la priorité d'allocation est donnée à ce secteur. Cette différence entre les deux politiques d'allocation s'explique par les déversements importants nécessaires au soutien de la crue artificielle lorsque les contributions des affluents encore naturels sont insuffisantes.

Pour la navigation, le fleuve est navigable tout au long de l'année si l'hydraulicité annuelle est importante. Dès lors qu'elle diminue, la fiabilité se dégrade. Aussi, pour la période humide, le fleuve est navigable 12 douze mois 85% des années (et au minimum 8 mois les 15% restantes). Pour la période transitoire, le fleuve est navigable 12 douze mois 60% des années. Les 40% restantes, les résultats diffèrent en fonction de la politique d'allocation. Le fleuve est à minima navigable 7 mois sur douze avec une politique d'allocation de Sécurité-Énergétique, alors que le fleuve n'est navigable qu'au minimum 2 mois sur douze avec une politique d'allocation de Sécurité-Alimentaire. Pour la période historique sèche, la navigabilité du fleuve varie fortement entre 2 mois et 10 mois (0 mois et 11 mois) pour la politique d'allocation Sécurité-Énergétique (Sécurité-Alimentaire), et ce en fonction du volume annuel d'écoulement. L'hydraulicité annuelle du fleuve est donc le principal facteur pilotant la navigabilité du fleuve. Toutefois, les distributions statistiques sont bien distinctes entre les deux politiques d'allocation (exceptée pour la période humide). Ceci montre que le choix de la politique d'allocation a un effet non négligeable sur la navigabilité du fleuve.

Indépendamment du volume annuel du fleuve, l'agriculture de décrue est assurée sur 50 000ha avec une fiabilité de 100% dès lors que la crue est imposée (Sécurité-Alimentaire). Si elle ne l'est plus, l'agriculture de décrue peut se pratiquer, sur une superficie de 50 000ha, sept année sur dix, quatre années sur dix ou moins de deux années sur dix, en fonction de la période (humide, transitoire, sèche respectivement).

Les prises de pêche sont favorisées lorsque la crue artificielle est mise en oeuvre. Pour une hydraulicité du fleuve importante (période transitoire et humide), les prises sont maximales et dépassent 25kTon trois années sur quatre. Si l'hydraulicité diminue, deux faits sont à souligner : (i) les prises restent importantes (supérieures à 22kTon) toutes les années, même lors de la période sèche, avec la politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire" ; (ii) lorsque la crue artificielle n'est pas imposée, les prises diminuent fortement, et la variabilité est très importante (entre 7kTon et 27kTon). Comme nous pouvons

le constater, la productivité de la pêche est à la fois dépendante de l'hydraulicité moyenne du fleuve et du scénario de politique d'allocation.

La disponibilité en eau dans le bassin apparaît clairement comme une source majeure de vulnérabilité pour les secteurs de la production hydroélectrique et la navigation. L'agriculture de décrue et la pêche sont davantage sensibles aux politiques d'allocation de l'eau qu'à la disponibilité en eau dans le bassin. De plus, la dualité énergie/navigation vs et agriculture de décrue/pêche est d'autant plus marquée que la quantité d'eau disponible dans le bassin est faible.

Résultats sur l'horizon 1 (2031-2060)

Les performances des différents secteurs d'activité pour l'horizon 1 sont données en figure 3.5. De même, la figure 3.6 présente les probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour les scénarios hydro-climatiques H1-C1, H1-C2, H1-C3, H1-C4 et H1-C5.

L'agriculture irriguée voit ses besoins couverts 100% du temps indépendamment du scénario hydrologique utilisé (H1-C1 à H1-C5) si la politique d'allocation suivie est la "Sécurité Énergétique". La situation est analogue pour la politique "Sécurité Alimentaire", à l'exception du scénario H1-C1 (considéré comme très sec) pour lequel la superficie minimum irriguée garantie 95% du temps est de 230kha.

Pour la production hydroélectrique, trois faits sont à noter :

- Lorsque la disponibilité en eau dans le bassin est considérée comme intermédiaire (scénario hydroclimatique C3), ou importante (C4 et C5), les scénarios de politique d'allocation n'ont que peu d'effet sur la production hydroélectrique (courbes presque superposées en Figure 3.6) dont les valeurs annuelles médianes sont respectivement environ 3750GWh, 4350GWh, et 4000GWh.
- En revanche, lorsque la disponible en eau dans le bassin est considérée comme faible (C1 et C2), le choix d'une politique d'allocation a un impact sur la productivité de ce secteur. En effet, une perte moyenne de $16.2\% \pm 14.0\%$ pour le C1, et de $5.4\% \pm 6.2\%$ pour le C2 est à observer lorsqu'une crue artificielle est imposée.
- Le troisième fait à noter est une production hydroélectrique moins importante dans le C5 (scénario "humide et variabilité +") que dans le C4 (scénario "humide"), et ce bien qu'ils aient des volumes annuels moyens écoulés à Bakel comparables ($26.2 \text{ km}^3/\text{an}$ et $26.8 \text{ km}^3/\text{an}$ pour le C4 et le C5 respectivement). Le C4 présente une forte hétérogénéité dans la spatialisation des précipitations, avec un gradient Nord/Sud important. En revanche, le C5 a des précipitations davantage homogènes. Aussi, le C4 présente des débits plus importants sur le Bafing et la Falémé où se concentre l'essentiel de la production d'énergie hydroélectrique.

La dimension spatiale des précipitations peut avoir un effet non-négligeable sur nos résultats. La compréhension des phénomènes inhérents à la mousson, à sa propagation vers le nord, et à l'influence des changements climatiques sont donc des éléments qui pourraient amener à mieux appréhender les vulnérabilités de certains secteurs.

Lorsque la crue est imposée (Sécurité-Alimentaire), l'agriculture de décrue atteint sys-

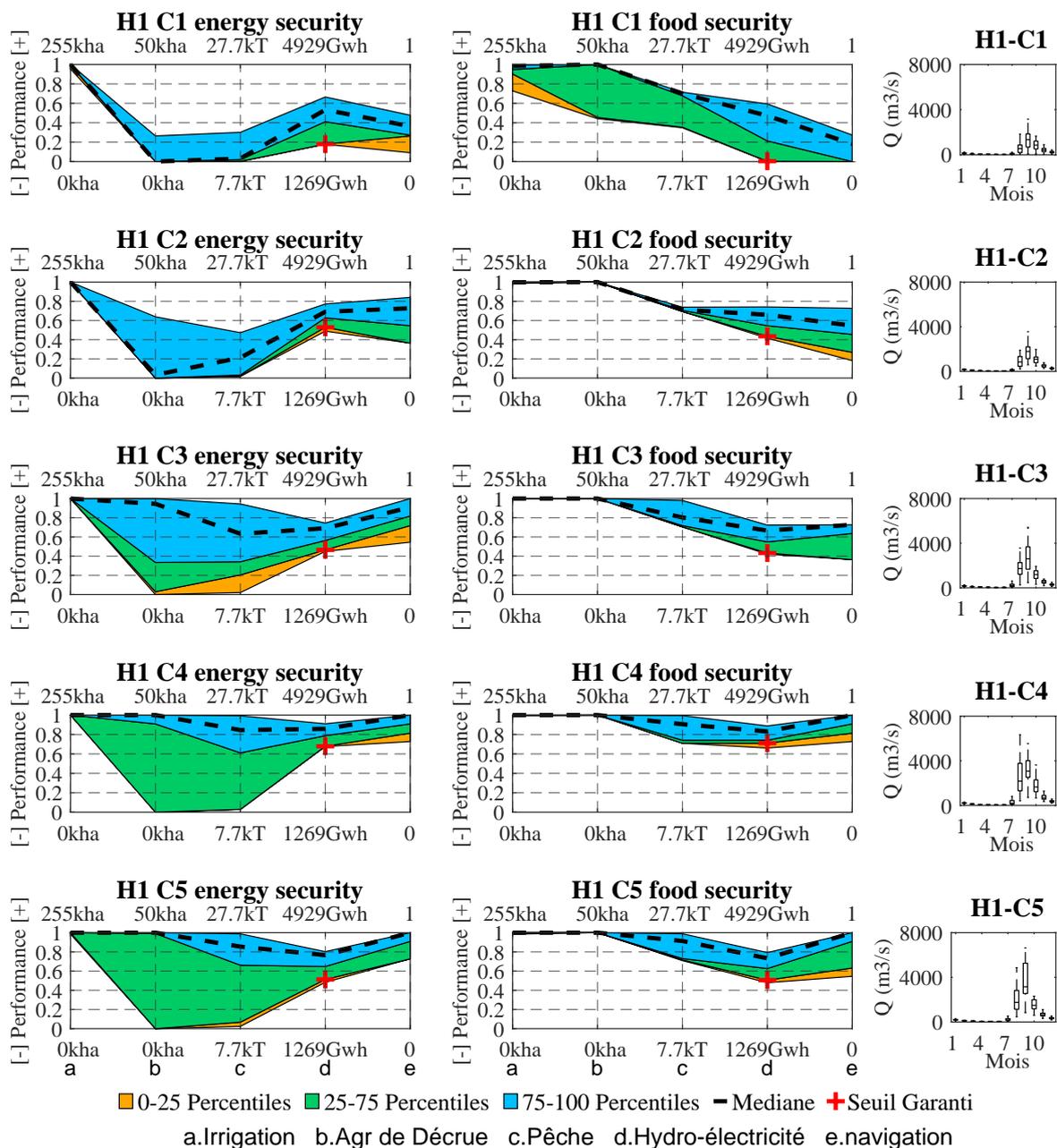


FIGURE 3.5 – Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement inter-médiaire, résultats pour l’horizon 1. Légende similaire à la figure 3.3.

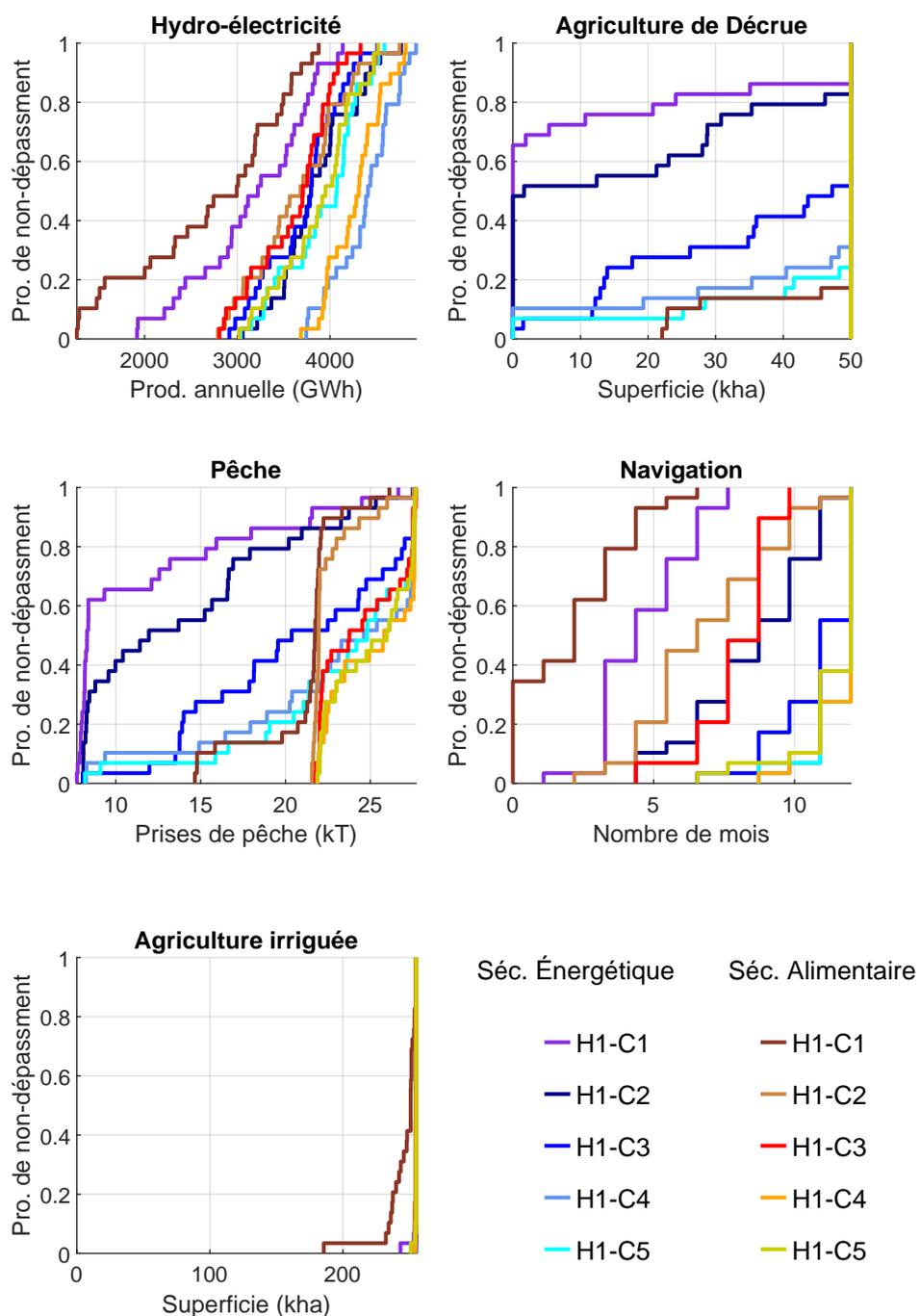


FIGURE 3.6 – Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour l'horizon 1 (développement intermédiaire). Légende similaire à la figure 3.4.

tématiquement son objectif de 50 000ha avec une fiabilité de 100% pour l'ensemble des scénarios hydrologiques, à l'exception du scénario H1-C1 ("très sec") pour lequel cet objectif est atteint avec une fiabilité de 80% (probabilité de dépassement de 0.2). En revanche, lorsqu'elle n'est pas imposée, les performances sont clairement tributaires de l'hydraulicité moyenne du fleuve. Aussi, l'objectif de 50 000ha est atteint 75%, 70%, 50%, 20% et 15% des années pour les scénarios hydroclimatique C5, C4, C3, C2, et C1 respectivement. Avec des tels niveaux de fiabilité, le maintien de l'agriculture de décrue est compromise si les changements climatiques aboutissent à une réduction des apports hydrologiques et que les ressources hydriques sont exploitées en priorité pour la production d'énergie et la navigation.

La productivité du secteur de la pêche est au premier ordre dépendant du scénario de politique d'allocation (la présence de la crue annuelle favorisant la pêche dans la basse vallée). Au second ordre, les prises sont dépendantes de l'hydraulicité moyenne du fleuve. Aussi, pour le scénario le plus sec (C1), la moyenne des prises est égale à 21.0 ± 2.7 kTon (Sécurité-Alimentaire) contre 11.6 ± 5.6 kTon dans le cas où la priorité est donnée à la production d'énergie. Pour le scénario le plus humide (C5), nous obtenons 23.0 ± 5.3 kTon et 25.0 ± 2.3 kTon respectivement. Il est à noter que la variabilité des prises est entre deux et trois fois plus importante lorsque que la crue n'est pas assurée, démontrant ainsi la vulnérabilité de ce secteur vis-à-vis de la variabilité hydrologique et des changements climatiques.

Pour la navigation, l'implémentation systématique de la crue diminue la navigabilité du fleuve dès que l'hydraulicité annuel est faible (H1-C1 et H1-C2) ou intermédiaire (H1-C3). Aussi, avec une politique de "Sécurité Énergétique", la navigation est garantie (probabilité de non dépassement égale à 0.05) 3/4/8 mois pour les scénarios H1-C1/H1-C2/H1-C3 respectivement, contre 0/0/7 mois avec une politique de "Sécurité Alimentaire". Pour le scénario H1-C4, la navigation est garantie près de 11 mois quelle que soit la politique suivie. Pour le scénario H1-C5, nous obtenons 8 et 7 mois pour les politiques de "Sécurité Énergétique" et de "Sécurité Alimentaire" respectivement. L'écart entre le C4 et le C5 est attribuable à la variabilité inter-annuelle des apports hydrologiques plus prononcée dans le C4 (cf section 2.7). La navigation est donc principalement sensible à l'hydraulicité annuelle du fleuve, mais reste sensible au second ordre à la politique d'allocation suivie. L'implémentation de la crue implique une fiabilité plus faible pour la navigation, et ce phénomène est davantage marqué que le scénario hydroclimatique utilisé est sec. Une conjoncture entre un futur hydroclimatique sec et une politique d'allocation de "Sécurité Alimentaire" pourrait rendre la navigation du fleuve complètement impossible.

A l'instar des résultats sur les périodes historiques, la dualité énergie/navigation vs pêche/agriculture de décrue apparaît clairement. Cette dualité est d'autant plus marquée que l'hydraulicité du fleuve est faible.

Résultats sur l'horizon 2 (2066-2095)

La particularité de l'horizon 2 est que les différences hydrologiques entre les cinq scénarios hydroclimatique sont plus marquées. Par exemple, par rapport à l'horizon 1, le scénario hydroclimatique le plus sec (C1) l'est encore davantage, alors que le scénario C5 est encore plus humide. Les performances des différents secteurs d'activité pour l'horizon 2 sont données en figure 3.7, de même que les probabilités de non-dépassement (Figure

3.8) pour les scénarios hydrologiques H2-C1, H2-C2, H2-C3, H2-C4 et H2-C5.

En termes de conditions hydro-climatiques analogues, le scénario hydroclimatique H2-C2 est proche des conditions de la période sèche historique, le scénario hydroclimatique H2-C4 est proche de la période humide historique, et le H2-C3 peut être considéré comme neutre (proche de la période actuelle 2000-2015).

L'agriculture irriguée voit ses besoins généralement couverts, sauf pour les années de très faible hydraulité. Pour les scénarios H2-C3, H2-C4 et H2-C5, la superficie irriguée est maximale avec une valeur médiane de 255 000 ha, et une valeur garantie d'au moins 249 000 ha (quelle que soit la politique d'allocation). Pour le scénario hydroclimatique sec (H2-C2), les besoins de l'irrigation sont aussi couverts (valeur médiane et médiane de 254 000ha et de 252 000ha respectivement) si la politique d'allocation observée est la "Sécurité-Énergétique". Si la politique suivie est la "Sécurité-Alimentaire", les besoins en irrigation lors des années sèches ne sont pas entièrement couverts (valeur garantie égale à 203 000 ha). Avec le scénario "très sec" H2-C1, l'hydraulité du fleuve est trop faible pour couvrir l'ensemble des besoins de l'agriculture et un compromis apparaît entre l'agriculture traditionnelle et l'agriculture irriguée. En effet, la superficie irriguée médiane/garantie est de 218 000 ha / 165 000 ha en suivant une politique d'allocation "Sécurité-Énergétique", alors qu'elle n'est seulement de 131 000 ha / 87 000 ha pour la politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire".

A l'instar de l'horizon 1, les performances de l'agriculture de décrue sont donc principalement déterminées par la politique d'allocation. Si la crue est imposée (politique "Sécurité-Énergétique"), l'agriculture de décrue atteint systématiquement son objectif de 50 000ha, et ce même les années de très faible hydraulité (quartile inférieur du scénario H2-C1, avec un module annuel inférieur à 2.4km³). Lorsqu'elle ne l'est pas, les performances sont tributaires de l'hydraulité moyenne du fleuve. Aussi, l'objectif de 50 000ha est atteint 100%, 43%, 20%, 6% et 0% des années pour les scénarios hydroclimatique C5, C4, C3, C2, et C1 respectivement ⁶

De manière analogue à l'horizon 1, les performances du secteur hydroélectrique sont tributaires au premier ordre de la quantité d'eau dans le bassin. Logiquement, elles s'améliorent progressivement à mesure que le climat devient plus humide (de C1 à C5, exception faite de C4). Pour les scénarios C1, C2 et C3, la production est systématiquement plus élevée avec la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique" (Tableau 3.3) mais cette différence tend à s'amenuiser lorsque les conditions hydro-climatiques sont plus favorables (scénarios C4 et C5). En effet, l'écart entre les deux politiques d'allocation est très important pour le H2-C1 (valeur moyenne de l'écart annuel : 875GWh), important pour le H2-C2 (495GWh), modéré pour le H2-C3 (245GWh) et minimale pour le H2-C4 et H2-C5 (180GWh et 40GWh respectivement). Comme nous l'avons vu précédemment dans le secteur agricole, l'impact de la crue artificielle sur le secteur énergétique se fait donc ressentir quand les conditions hydro-climatiques se dégradent.

Le secteur de la pêche voit ses performances pilotées au premier ordre par la présence ou non de la crue annuelle, et au second ordre par la disponibilité en eau dans le bassin.

6. A titre de comparaison, lors de la période humide, de la période transitoire et de la période sèche historique, l'objectif de 50 000ha était atteint respectivement 75%, 50% et 25% des années.

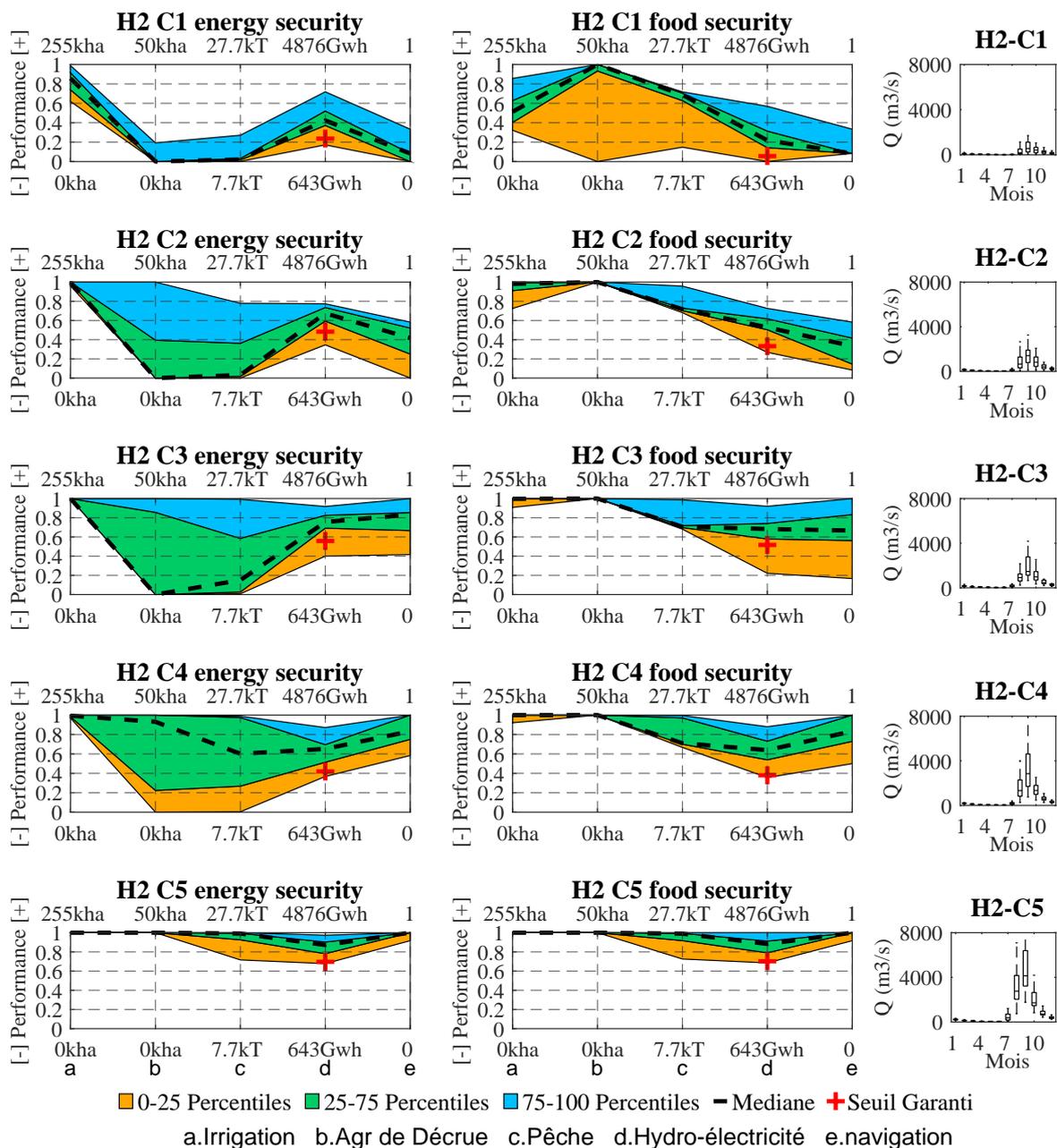


FIGURE 3.7 – Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement inter-médiaire, résultats pour l'horizon 2. Légende similaire à la figure 3.3.

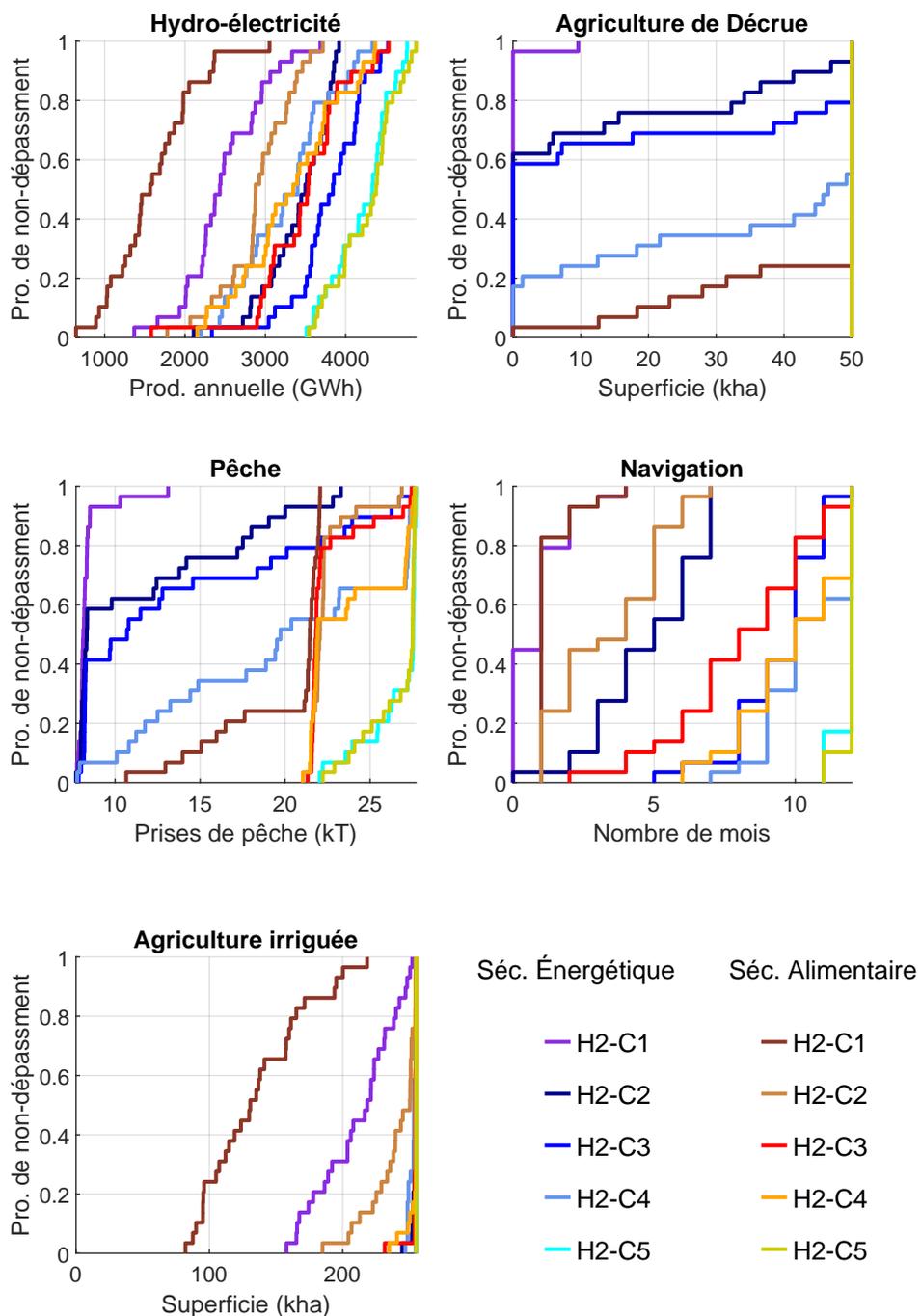


FIGURE 3.8 – Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour l'horizon 2 (développement intermédiaire). Légende similaire à la figure 3.4.

	P5%	P10%	P25%	P50%	P75%	P90%	Vol An. Moyen à Bakel (km3)
H2-C1 Sec. Énergétique	1640	1960	2220	2430	2850	3130	6.2
H2-C1 Sec. Alimentaire	880	970	1250	1570	1970	2040	6.2
H2-C2 Sec. Énergétique	2690	2810	3160	3500	3750	3850	11.9
H2-C2 Sec. Alimentaire	2050	2290	2770	2880	3260	3430	11.9
H2-C3 Sec. Énergétique	3010	3200	3570	3840	4140	4350	15.3
H2-C3 Sec. Alimentaire	2830	2930	3090	3530	3780	4230	15.3
H2-C4 Sec. Énergétique	2420	2470	2820	3400	3590	4080	21.9
H2-C4 Sec. Alimentaire	2250	2380	2930	3350	3740	4210	21.9
H2-C5 Sec. Énergétique	3590	3630	3950	4330	4460	4680	33.2
H2-C5 Sec. Alimentaire	3620	3670	3990	4380	4510	4760	33.2

TABLE 3.3 – Productivité hydroélectrique pour les scénarios hydrologiques de l’horizon 2. Les valeurs de l’énergie garantie (valeur de productivité garantie 95% du temps) sont données dans la colonne du percentile 5%.

Aussi, les prises sont de 8.1/8.3/10.7/19.7/27.5 kTon (valeur médiane) avec la politique "Sécurité-Énergétique", et de 21.5/22/21.8/21.9/27.5 kTon (valeur médiane) avec la politique "Sécurité-Alimentaire".

Ici également, la navigabilité du fleuve est principalement fonction de l'hydraulicité du fleuve. La politique d'allocation n'a que peu d'influence.

De manière analogue à l'horizon 1, la présence de la crue artificielle dynamise la pêche dans la basse vallée et défavorise la navigation. Si les prises sont dépendantes au second ordre de l'hydraulicité moyenne du fleuve, la navigabilité du fleuve est principalement pilotée par celle-ci.

3.3.2 Analyse de l'effet des changements climatiques sur l'allocation des ressources en eau

Dans la section précédente, il a été souligné que les performances des secteurs de l'énergie et de la navigation sont tributaires au premier ordre des conditions hydro-climatiques, et partiellement des politiques d'allocation. Pour l'agriculture de décrue et la pêche, les politiques d'allocations sont les principaux facteurs influençant les performances, alors que les conditions hydro-climatiques n'ont un effet que relativement modéré. Ici, nous analysons les conséquences de ces deux facteurs sur la gestion de l'eau ainsi que sur la fiabilité d'atteindre certains objectifs.

La production hydroélectrique

Pour mettre en avant la sensibilité de la production hydroélectrique aux conditions hydro-climatiques, l'ensemble des simulations hydro-économiques réalisées avec la politique d'allocation « Sécurité Énergétique » ont été colligées. Toutes les années ont été représentées dans un graphique ayant pour abscisse le volume annuel du fleuve à Bakel, et pour ordonnée la production annuelle hydroélectrique (Figure 3.9, triangles rouges). Le même procédé a été répété pour la politique d'allocation « Sécurité-Alimentaire » (Figure 3.9, points bleus).

Dans les deux cas, une courbe de régression logarithmique permet de rendre compte de l'évolution de la production du secteur hydroélectrique en fonction de l'hydraulicité moyenne du fleuve. Nous obtenons l'équation 3.1 pour la politique "Sécurité-Energétique", et l'équation 3.2 pour la politique "Sécurité-Alimentaire".

$$Pro.Hdyro.Electrique = 690.8 * \log(Vol.an.Bakel(km^3)) + 1743; r^2 = 0.415 \quad (3.1)$$

$$Pro.Hdyro.Electrique = 955.8 * \log(Vol.an.Bakel(km^3)) + 803.9; r^2 = 0.490 \quad (3.2)$$

La figure 3.10 présente, par centrale hydroélectrique, la production électrique annuelle moyenne (périodes historiques, horizon 1 et horizon 2, tous scénarios hydroclimatique confondus) pour les politiques d'allocation "Sécurité-Énergétique" et "Sécurité-Alimentaire". Il apparaît clairement que les réservoirs de Koukoutamba et de Boureya

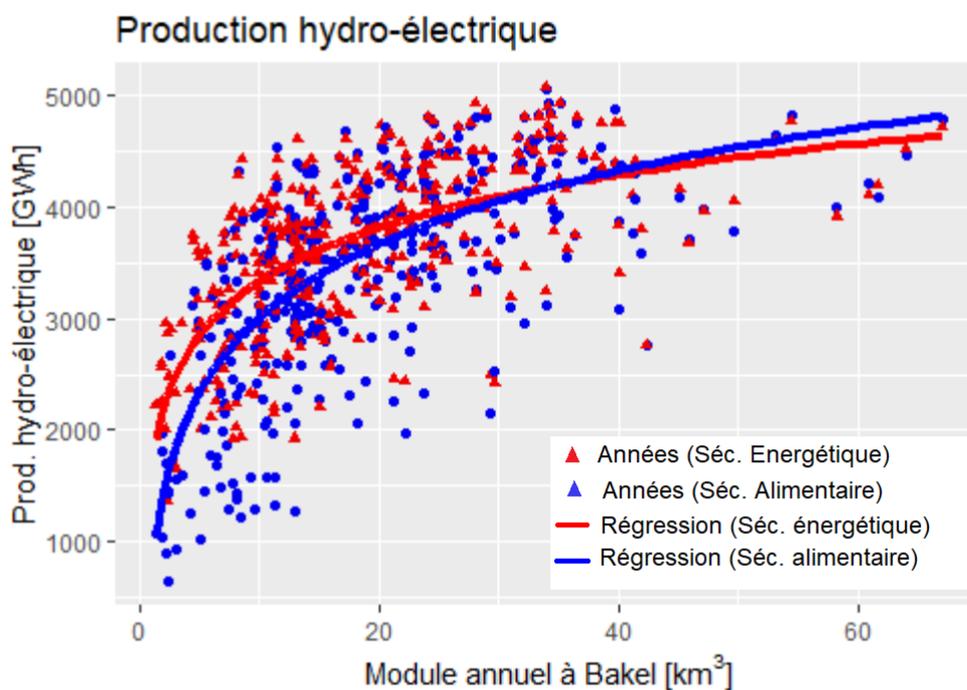


FIGURE 3.9 – Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur hydroélectrique aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion. Chaque point bleu représente une année distincte contenue dans les simulations du modèle hydro-économique (scénarios de hydrologiques historiques, de l'horizon 1 et de l'horizon 2) pour la politique "Sécurité-Alimentaire". Similairement, chaque triangle rouge représente une année distincte pour la politique "Sécurité-Energétique". La ligne rouge et la ligne bleue représentent les régressions logarithmiques réalisées sur les années (respectivement pour les politiques "Sécurité-Energétique" et "Sécurité-Alimentaire"), et dont les équations sont données en 3.1 et 3.2.

sont peu affectés par l'implémentation de la crue (différences de production inférieures à 2%). En revanche, les réservoirs de Manantali et de Gourbassi sont mis à contribution, ce qui entraîne une perte moyenne de production de 9.2% et de 27.3% respectivement. Ceci s'explique par le fait que ces deux barrages se trouvent immédiatement en amont de la plaine inondable et sont donc directement sollicités pour implémenter la crue artificielle. La plus faible régularisation des eaux du fleuve signifie que les centrales au fil de l'eau situées en aval de Manantali subissent une perte moyenne de 6.3% et de 8.3% pour Gouina et Félou respectivement.

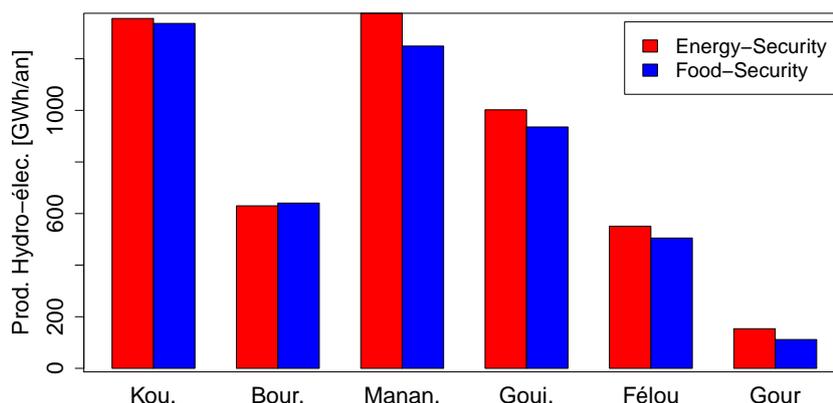


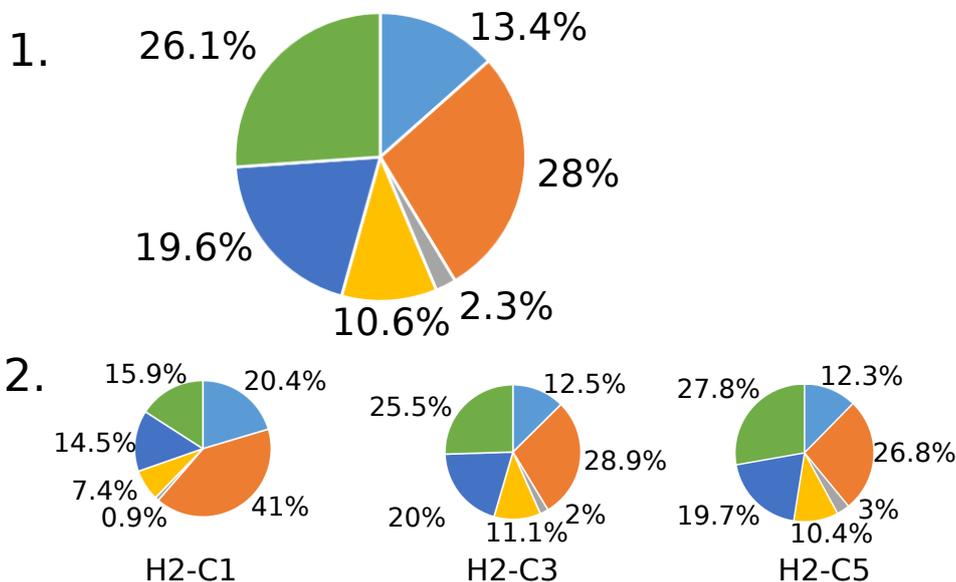
FIGURE 3.10 – Schéma de développement intermédiaire : Réservoirs influencés par l'implémentation de la crue.

Bien que la quantité totale d'énergie produite soit principalement pilotée par la quantité d'eau dans le bassin, les contributions des centrales à la production totale (en pourcentage) ne sont que faiblement influencées par l'hydraulicité du fleuve. Un exemple est donné en Figure 3.11. En haut sont présentées les contributions annuelles moyennes (périodes historiques, horizon 1 et horizon 2, tous scénarios hydro-climatiques confondus). En bas, seules sont présentées les contributions pour les scénarios hydro-climatiques H2-C1 (considéré comme le scénario le plus sec, toutes périodes confondus), H2-C3 (scénario neutre), et le H2-C5 (considéré comme le scénario le plus humide, toutes périodes confondus).

Pour la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique" (Figure 3.11), bas), les modifications dans les contributions des centrales sont au maximum de 3.1%. Pour la politique "Sécurité-Alimentaire" (Figure 3.11), droite), ces modifications atteignent 14.2%.

En comparant la contribution des centrales pour le scénario humide H2-C5 pour la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique" d'une part et "Sécurité-Alimentaire" d'autre part, nous pouvons constater qu'elles sont similaires. En revanche, lorsque les conditions hydrologiques sont arides (scénario hydroclimatique H2-C1), les contributions relatives des barrages diffèrent fortement entre la politique d'allocation "Sécurité-Energétique" et la politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire" : la contribution relative des centrales se trouvant en aval diminue suite au soutien de la crue, augmentant automatiquement la

Sécurité Alimentaire:



Sécurité Énergétique:

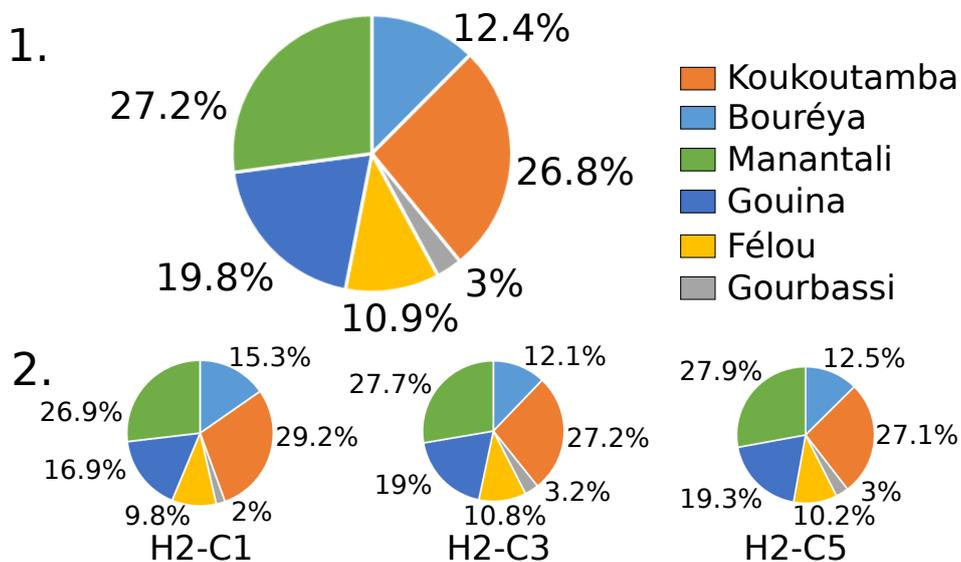


FIGURE 3.11 – Schéma de développement intermédiaire : Contribution des centrales hydro-électriques à la production totale. En haut : politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire". En bas : politique d'allocation "Sécurité-Énergétique". Sont exposées (1) les contributions moyennes des centrales à la production énergétique totale pour l'ensemble des années (périodes historiques, horizon 1 et horizon 2, tous scénarios hydro-climatiques confondus), (2) les contributions des centrales pour les scénarios hydrologiques les « extrêmes » (H2-C1 et H2-C5), et le scénario H2-C3 (neutre).

contribution relative de celles situées en amont.

L'agriculture irriguée

L'examen de la figure 3.12 met en avant un effet de seuil. Les besoins de l'agriculture irriguée sont généralement couverts, ce qui permet une irrigation sur près de 255 000 ha dès lors que le volume annuel écoulé à Bakel est supérieure ou égale à 3.5km^3 pour la politique "Sécurité-Énergétique" (90.5% de l'ensemble des années colligées). Pour la politique "Sécurité-Alimentaire", la valeur de ce seuil est supérieure ou égale à 6km^3 (84.4% de l'ensemble des années colligées). Hormis les années exceptionnelles de très faible hydraulité⁷, principalement rencontrées dans le scénario H2-C1 (considéré comme le scénario le plus sec), le secteur de l'agriculture irriguée n'est pas sensible aux changements climatiques. Cette spécificité est attribuable à l'implantation géographique des périmètres irrigués qui se situent majoritairement dans la basse vallée (Tableau D.2) et bénéficient donc de la régularisation des eaux du fleuve par les réservoirs.

Pour ces conditions hydrologiques extrêmes, nous voyons donc poindre une compétition entre l'agriculture de décrue et l'irrigation. En effet, le soutien de la crue artificielle en septembre-octobre réduit la disponibilité en eau durant le reste de l'année au point de rationner les périmètres irrigués.

Aussi, nous pouvons conclure que, hormis les années d'extrême sécheresse (définies par les seuils sus-mentionnés), l'agriculture irriguée est quasiment insensible (i) à l'aléa hydroclimatique et (ii) aux politiques d'allocation, dans un schéma de développement intermédiaire (avec 255 000 kha de surface irriguée).

L'agriculture de décrue

La figure 3.13 présente la sensibilité de l'agriculture de décrue aux conditions hydro-climatiques et aux politiques d'allocation.

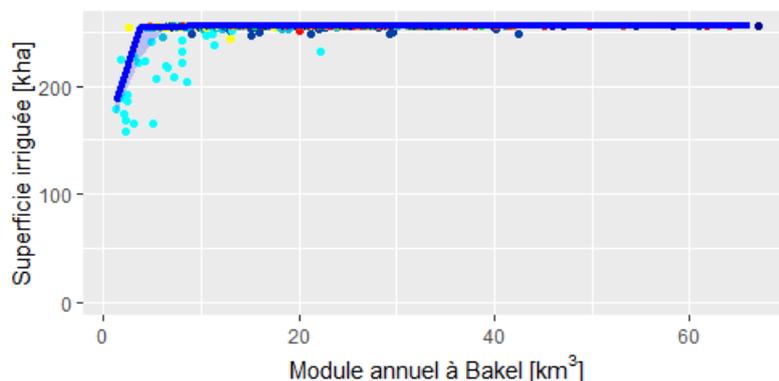
Lorsque la crue est imposée (Sécurité-Alimentaire), l'objectif de 50 000ha de surface inondée est systématiquement atteint sauf pour les années extrêmement sèches (dont le volume annuel écoulé à Bakel est inférieur à 4km^3). En revanche, lorsque la crue n'est pas imposée (Sécurité-Energétique), deux seuils apparaissent. Pour un volume annuel d'environ 17.5km^3 à Bakel, la crue est assurée près de 100% du temps, et permet une agriculture de décrue sur 50 000ha. En dessous de 10km^3 de volume annuel à Bakel, la crue n'est jamais assurée. Entre ces deux seuils, la surface inondée varie entre 0 et 50 000ha.

La pêche

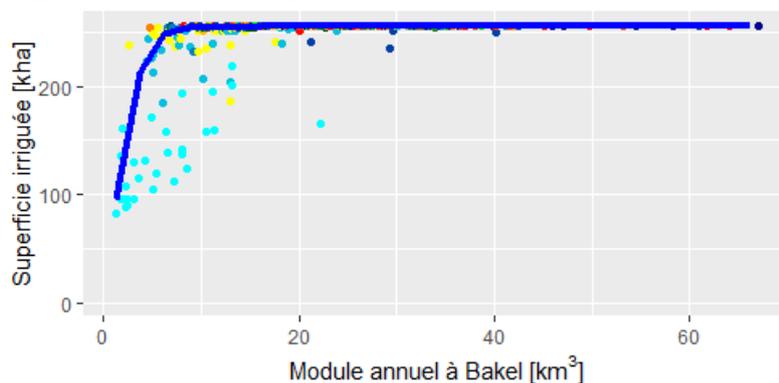
La figure 3.14 présente la sensibilité de la pêche aux conditions hydro-climatiques et aux politiques d'allocation.

7. En se référant à la période historique sèche (1969-1998), le seuil annuel de 6km^3 n'a été jamais été franchi, bien que les années 1983 et 1984 s'en sont rapprochées avec un volume annuel écoulé à Bakel respectivement de 7.0 et 6.9 km^3 .

Agriculture irriguée: Sécurité Énergétique



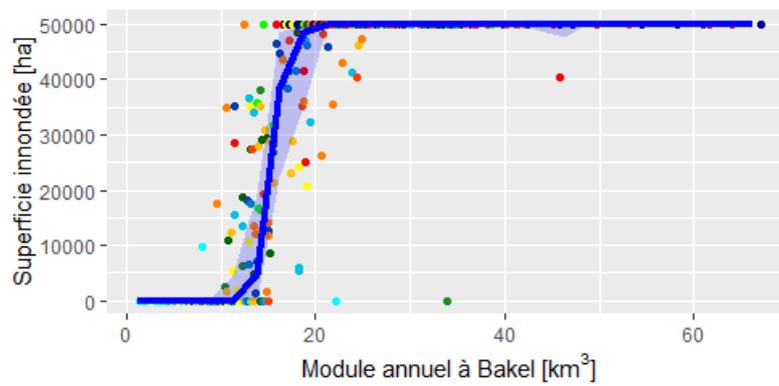
Agriculture irriguée: Sécurité Alimentaire



- | | | |
|-------------|---------|---------|
| ● 1940-1969 | ● H1-C1 | ● H2-C1 |
| ● 1955-1984 | ● H1-C2 | ● H2-C2 |
| ● 1969-1998 | ● H1-C3 | ● H2-C3 |
| | ● H1-C4 | ● H2-C4 |
| | ● H1-C5 | ● H2-C5 |

FIGURE 3.12 – Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de l’agriculture irriguée aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion. En haut : politique d’allocation « Sécurité-Énergétique » ; en bas : politique d’allocation « Sécurité-Alimentaire ». Chaque point représente une année distincte contenue dans les simulations du modèle hydro-économique (les couleurs renvoient aux scénarios hydroclimatique utilisés). La courbe bleue représente la valeur médiane réalisée pour tous incréments de 5km^3 . La cerne bleue couvre les résultats compris entre le premier quartile et le troisième quartile.

Agriculture de décrue: Sécurité Energétique



Agriculture de décrue: Sécurité Alimentaire

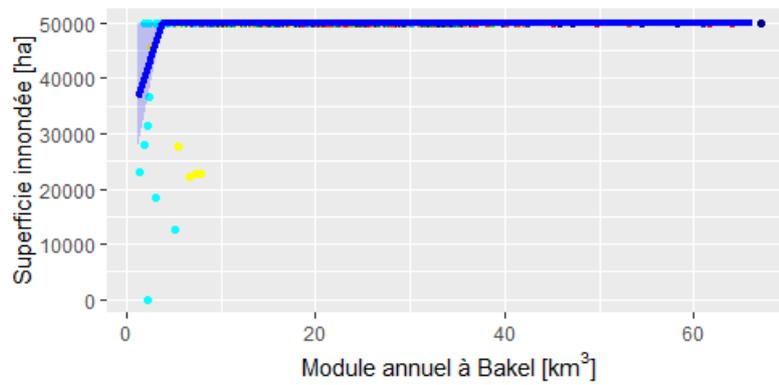
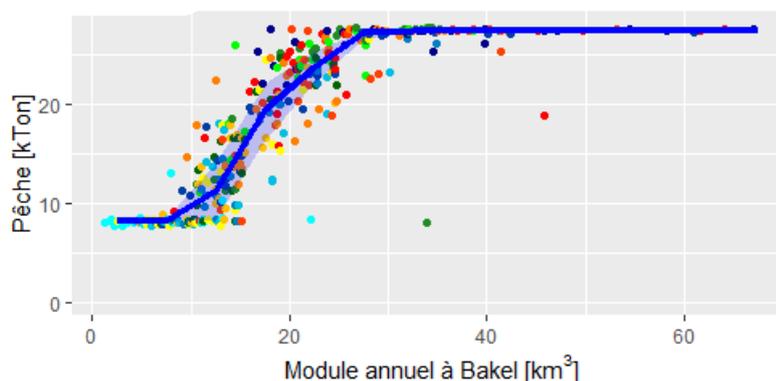


FIGURE 3.13 – Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de l'agriculture de décrue aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion. La légende est similaire a celle de la figure 3.12.

Pour la politique de gestion "Sécurité-Alimentaire", il est possible de distinguer deux plateaux. Le premier se situe vers 22kTon par an et correspond à un volume annuel inférieur à 15km³. Le second plateau se situe vers 27kTon de prises par an, pour un volume annuel supérieur à 25km³.

Pêche: Sécurité Énergétique



Pêche: Sécurité Alimentaire

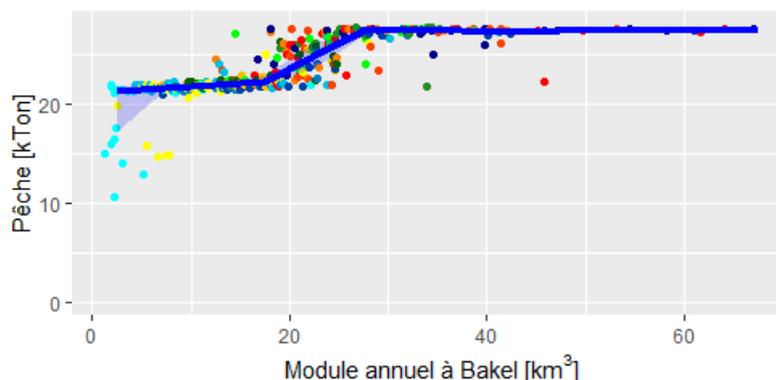


FIGURE 3.14 – Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de la pêche aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion.

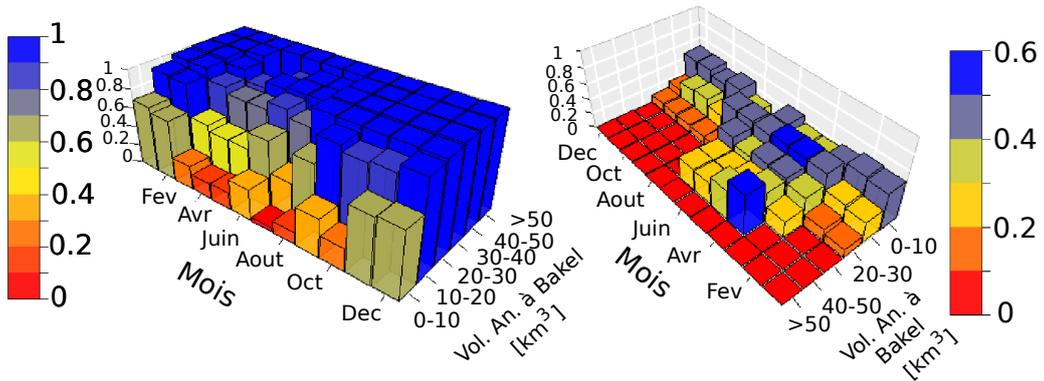
Pour la politique de gestion "Sécurité-Énergétique", nous retrouvons le plateau supérieur (à 27kTon par an, et correspond à un volume annuel supérieur à 25km³).

La navigation

La figure 3.15 présente la sensibilité de la navigation aux conditions hydro-climatiques et aux politiques d'allocation.

Pour la politique "Sécurité-Énergétique", la navigation du fleuve est minimale avec une navigabilité quatre mois sur douze (novembre à février, avec une de fiabilité de 60%) pour des modules annuels écoulés à Bakel inférieurs à 10 km³. La situation s'améliore avec une navigabilité de huit mois sur douze (avec une de fiabilité de 60%) pour des modules compris entre 10 km³ et 20 km³. Pour des années d'hydraulicité soutenues (supérieures à un module annuel de 20 km³ à Bakel), le fleuve est navigable tout le long de l'année avec une fiabilité de 80%.

Navigation: Sécurité Energétique



Navigation: Sécurité Alimentaire

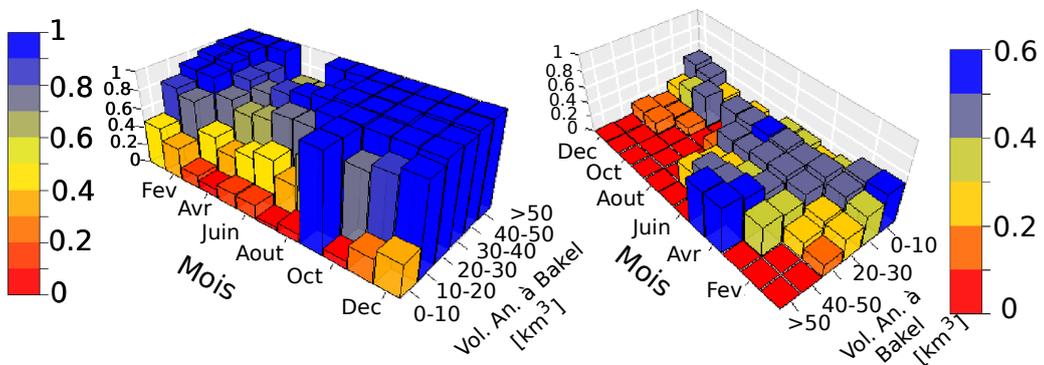


FIGURE 3.15 – Schéma de développement intermédiaire : Sensibilité du secteur de la navigation aux conditions hydro-climatiques et aux politiques de gestion. A droite : navigabilité moyenne du fleuve par mois, en fonction de l'hydraulicité du fleuve ; a gauche : écart-type de la moyenne.

Si la crue est imposée ("Sécurité-Alimentaire"), une dégradation de la navigabilité est observée, notamment lors de la saison sèche. Aussi, la navigation du fleuve est possible deux mois sur douze pour des modules annuels inférieurs à 10 km^3 , avec une fiabilité de 40%. Pour des modules compris entre 10 et 20 km^3 , la navigabilité du fleuve s'étend sur six mois, de septembre à février, avec une fiabilité de 70%. Dès lors que les modules annuels écoulés à Bakel sont supérieurs à 20 km^3 , le fleuve est navigable au mois huit mois sur douze avec une fiabilité supérieure à 90%.

Cette dégradation de la performance pour la politique de "Sécurité-Alimentaire" s'explique par la vidange des réservoirs pour la soutien de la crue artificielle. Cette vidange induit un déficit de volume disponible pour la saison sèche. Si l'hydraulicité annuelle est importante, seuls les mois de la fin de la saison sèche sont concernés (mois de mars, avril et mai) par cette dégradation de performance. En revanche, si l'hydraulicité est faible, cette dégradation touche toute la saison sèche, voir même l'intégralité de l'année si les modules annuels sont inférieurs à 10 km^3 .

3.3.3 Schéma de développement intermédiaire : Bénéfices nets et changements climatiques.

Les bénéfices nets générés par l'ensemble des activités dans le bassin sont présentés en figure 3.16. La figure 3.17 met en relation les bénéfices nets générés vis-à-vis du volume d'eau moyen écoulé à Bakel (et donc vis-à-vis des changements climatiques).

Dans ce schéma de développement intermédiaire du bassin, les bénéfices nets varient entre 375 et 700 M.USD par an. La moyenne des bénéfices annuels liés à l'agriculture irriguée est de 296 ± 20 M.USD, et ne sont ni sujets aux politiques d'allocation, ni aux changements climatiques (en dehors des années extrêmement sèches, avec un module annuel inférieur à 6 km^3 lorsque la crue est imposée). Les bénéfices nets liés à la production hydroélectrique sont compris entre 130 M.USD/an et 350 M.USD/an, et sont principalement tributaires des conditions hydro-climatiques. Ces deux secteurs représentent plus des 90% des bénéfices nets dans le bassin.

Les bénéfices nets liés à l'agriculture de décrue sont à la fois sensibles aux politiques d'allocation ainsi qu'aux conditions hydro-climatiques. Ils varient entre 0,25 M.USD/an et 37,5 M.USD/an. La situation pour la pêche est analogue et les bénéfices varient de 4,6 M.USD/an à 14,6 M.USD/an.

Aussi, les changements climatiques exacerbent les vulnérabilités des secteurs économiques traditionnels (agriculture de décrue, pêche) et du secteur institutionnel de la production hydroélectrique. Comme souligné dans Tilmant et al. (2020), si la priorité d'allocation devait être accordée à la production d'énergie et à la navigation, les impacts sur l'agriculture fluviale et les communautés locales seraient sévères. Ceci sera bien entendu amplifié si les changements climatiques tendent vers une aridification de la région.

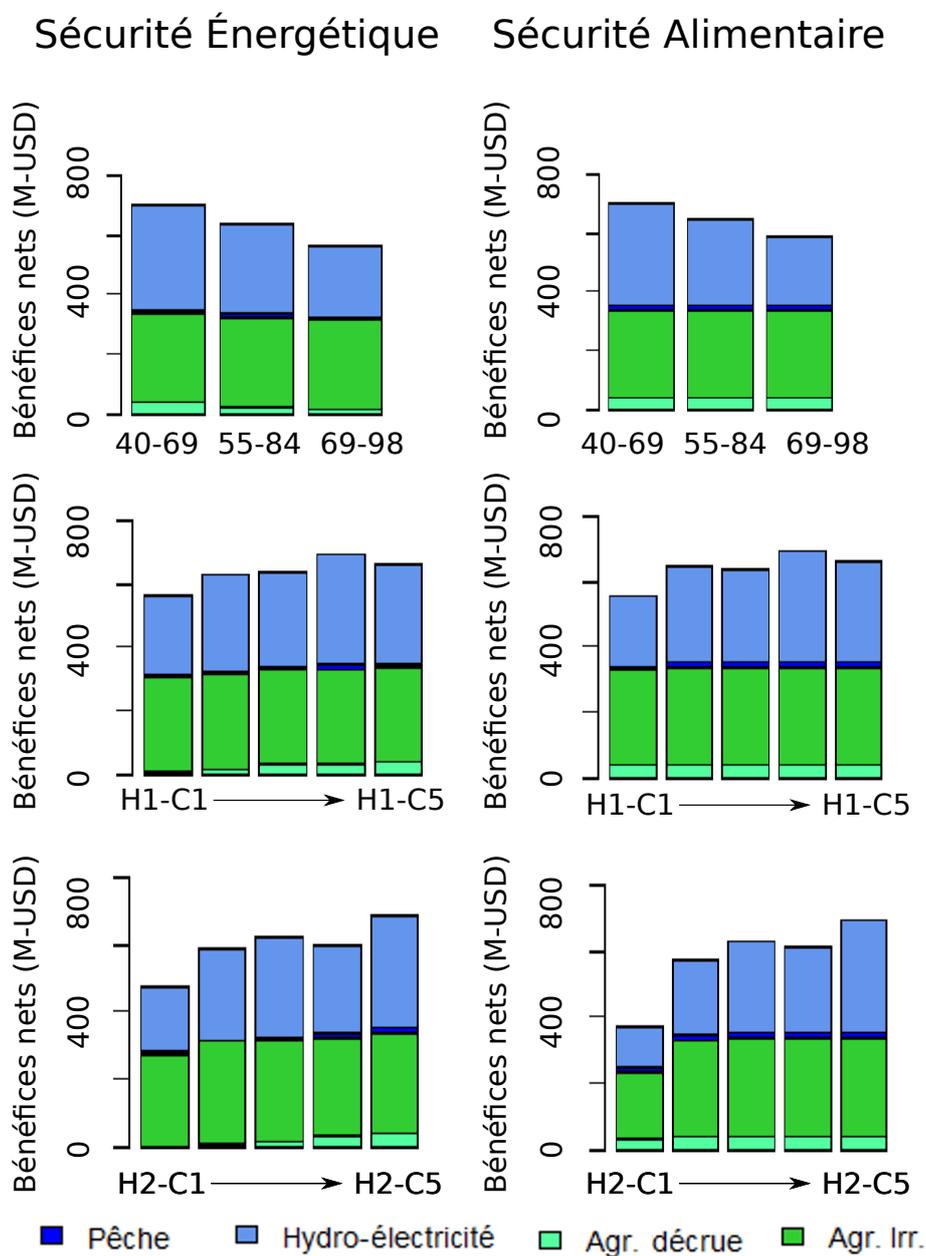


FIGURE 3.16 – Schéma de développement intermédiaire, bénéfices nets et changements climatiques : Bénéfices nets générés par secteur d'activité. Les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennées sur chaque scénario hydro-économique.

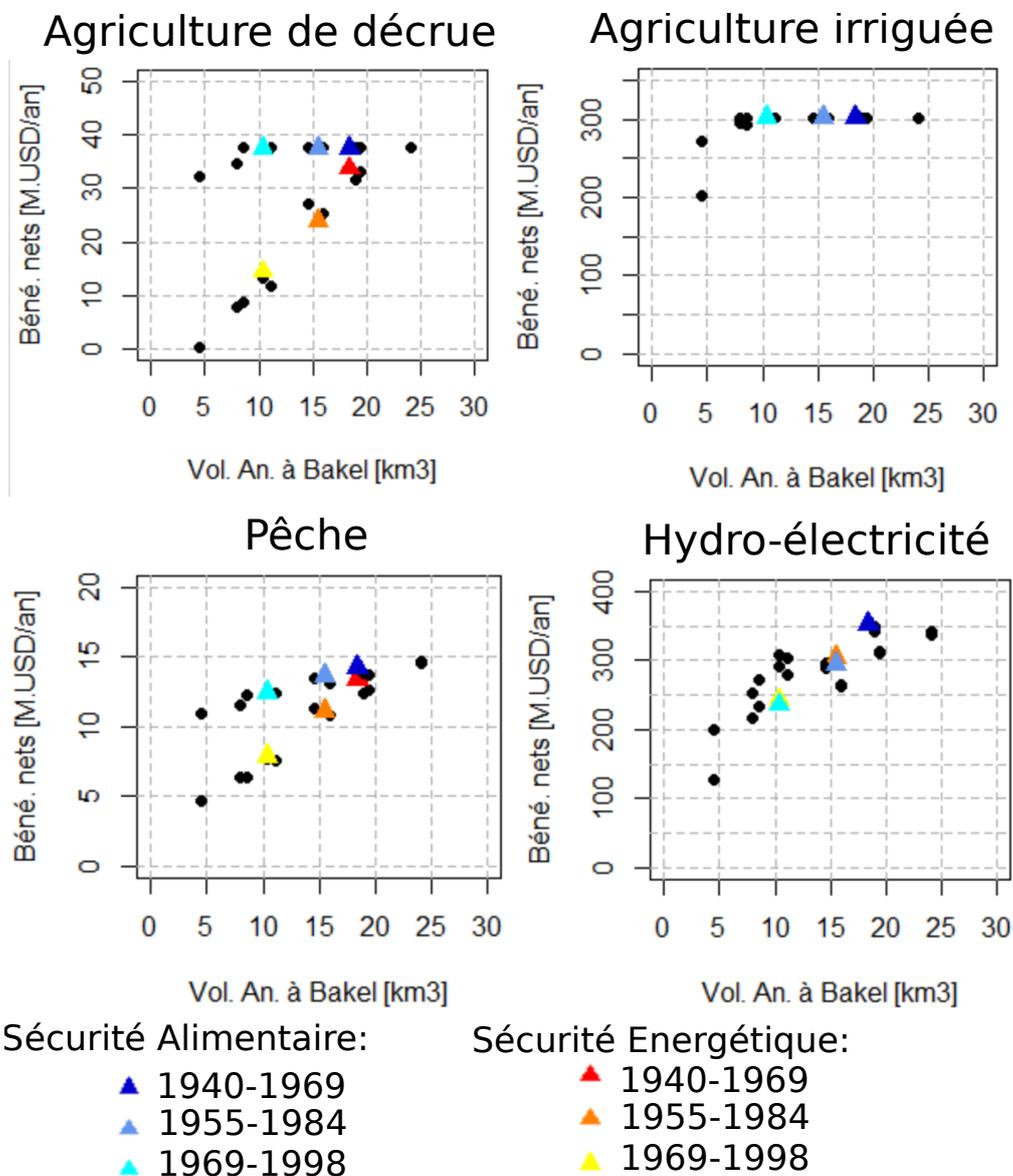


FIGURE 3.17 – Schéma de développement intermédiaire, bénéfices nets et changements climatiques : Bénéfices nets générés par secteur d’activité en fonction du volume annuel moyen écoulé à Bakel. Les valeurs présentées correspondent aux valeurs moyennées sur chaque scénario hydro-économique. Les triangles de couleurs font références aux périodes historiques. Les points noirs font références aux scénarios hydrologiques H1-C1 à H1-C5 et H2-C1 à H2-C5 (avec les deux variantes de politique d’allocation).

3.4 Schéma de développement complet : Résultats de la modélisation hydro-économique et analyse

Cette section est dédiée aux résultats des simulations hydro-économiques pour le schéma de développement complet. Pour celui-ci, nous disposons de dix scénarios hydro-économiques, se focalisant sur l'horizon 2 (scénarios hydro-climatiques H2-C1, H2-C2 ... H2-C5, pour les politiques d'allocations "Sécurité-Énergétique" et "Sécurité-Alimentaire") ce qui permet de couvrir une large gamme des changements climatiques. Dans un premier temps, les résultats des simulations seront présentés de manière analogue à celle de la section précédente. Ensuite, nous analyserons la sensibilité des différents secteurs aux changements climatiques. Enfin, nous comparerons les résultats obtenus avec le schéma de développement intermédiaire (pour l'horizon 2) et les résultats obtenus avec le schéma de développement complet (toujours pour l'horizon 2). Ceci permettra de souligner dans quelle mesure le développement du bassin est pertinent vis-à-vis des changements climatiques et des politiques d'allocation.

3.4.1 Présentation des résultats

Les figures 3.18 et 3.19 présentent respectivement les performances des secteurs d'activité pour l'horizon 2 ainsi que les probabilités de non-dépassement.

Pour les scénarios hydro-climatiques H2-C3, H2-C4 et H2-C5, la disponibilité en eau est suffisante pour couvrir l'intégralité des besoins en eau de l'agriculture irriguée (représentant 9.5km^3 d'eau par an). Lorsque l'hydraulicité du fleuve est plus faible (H2-C2), les besoins sont en partie comblés et permettent l'irrigation de 365 000 ha (avec une fiabilité de 80%) si la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique" est suivie. En revanche, avec la politique "Sécurité-Alimentaire", le potentiel irrigable tombe à 335 000 ha (avec le même niveau de fiabilité). La situation se dégrade dès lors que le volume annuel du fleuve devient très faible (H2-C1). En effet, la superficie irrigable passe à 180 000/125 000 ha avec une fiabilité de 80%/50% pour la politique "Sécurité-Énergétique", et à 240 000/145 000 ha avec une fiabilité de 80%/50% pour la politique "Sécurité-Alimentaire". Comme nous pouvions nous y attendre, le conflit entre l'agriculture de décrue et l'agriculture irriguée, qui bourgeonnait dans le scénario de développement intermédiaire, est maintenant exacerbé par les changements climatiques et l'augmentation des superficies irriguées à plus de 400 000 ha. A nouveau, le conflit porte sur la distribution temporelle de la disponibilité en eau suite à la crue artificielle dont le soutien réduit automatiquement les volumes disponibles pour les autres usages durant le reste de l'année.

La production hydroélectrique varie en fonction de la disponibilité en eau, et dans une moindre mesure en fonction des politiques d'allocation. Les productions médianes (atteintes au moins une année sur deux) passent d'environ 6540GWh, à 5430GWh, 5027GWh, 4430GWh et 3180GWh respectivement pour les scénarios H2-C5, H2-C4 ... H2-C1 (valeurs pour la politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire"). Autrement dit, la production médiane varie du simple au double lorsqu'on passe du scénario hydroclimatique extrême H2-C1 au scénario extrême H2-C5. Cette différence est encore plus prononcée pour l'énergie garantie (fiabilité de 95%). En effet, dans le scénario très sec (H2-C1), la production d'énergie garantie ne représente que 44% de celle que l'on peut attendre pour le scénario

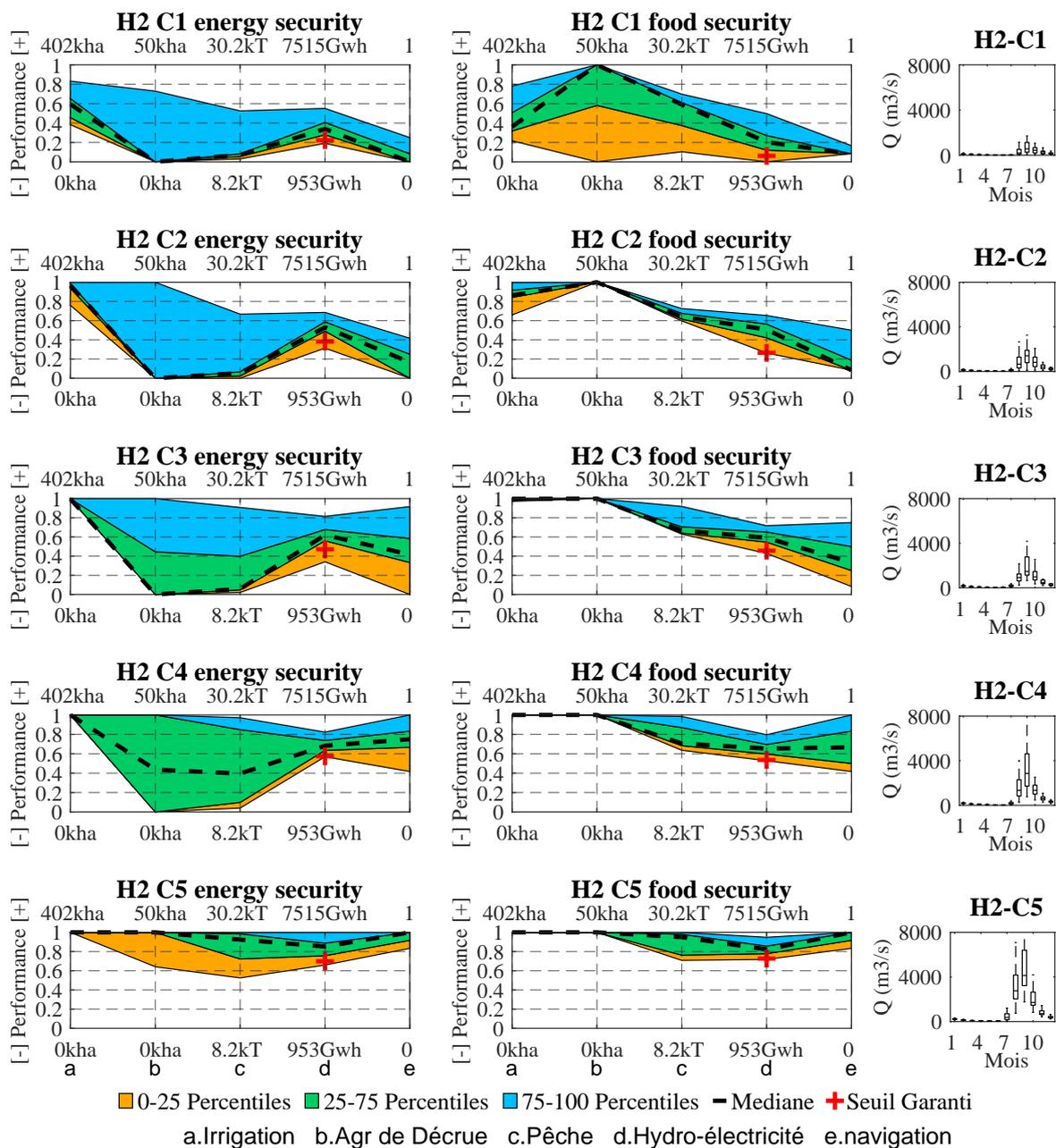


FIGURE 3.18 – Modélisation hydro-économique du BFS : Schéma de développement complet, résultats pour l’horizon 2. Légende similaire à la figure 3.3. Il est à noter que les performances maximales de l’agriculture irriguée, la pêche et l’hydroélectricité sont supérieures à celles des graphiques précédents (grâce à l’incorporation des nouveaux réservoirs, ainsi qu’à l’augmentation des périmètres irrigués).

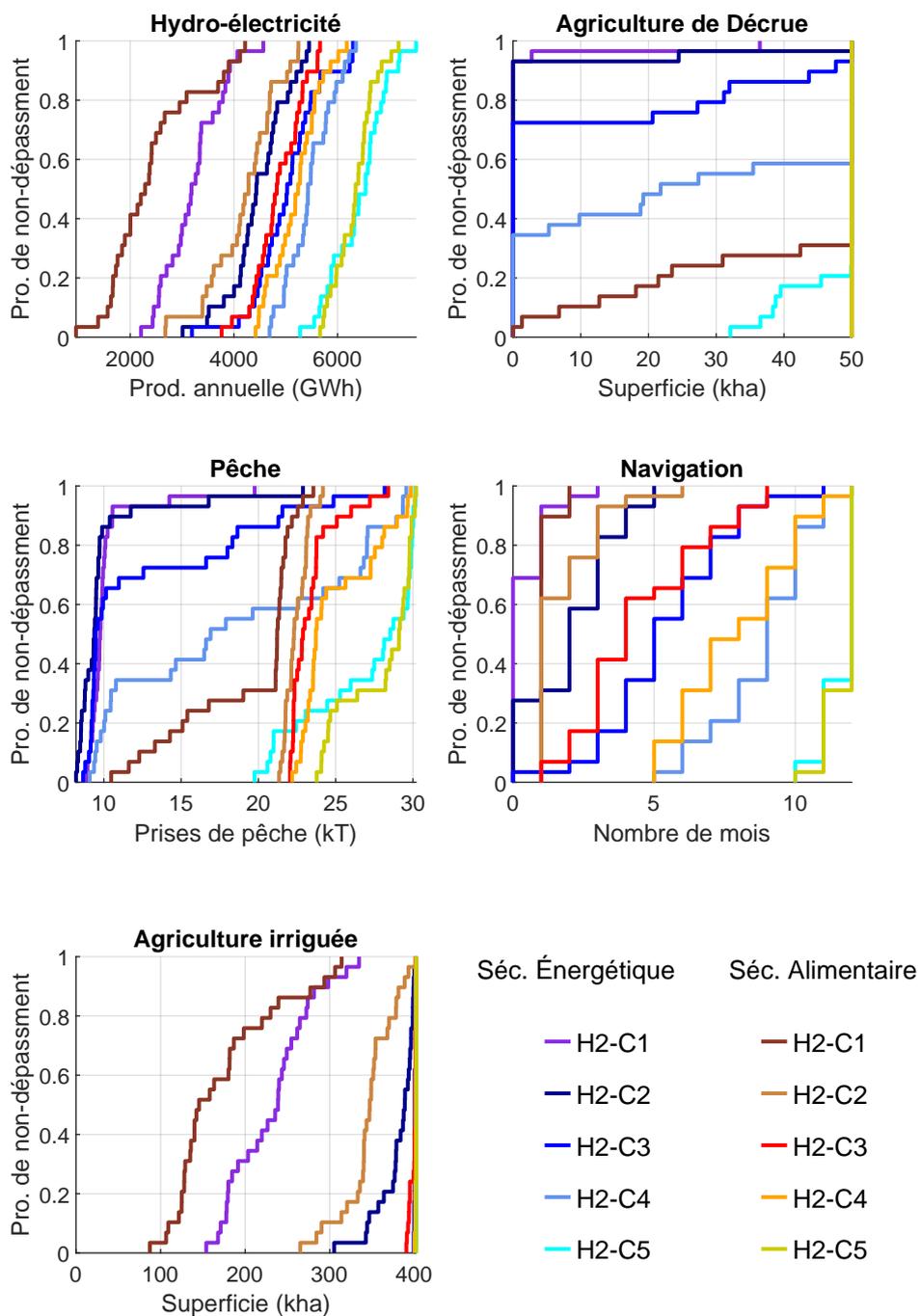


FIGURE 3.19 – Probabilités de non-dépassement par secteur d'activité pour l'horizon 2 (développement complet). L'agriculture irriguée est représentée à l'inverse des figures précédentes puisque ses besoins ne sont pas systématiquement couverts.

le plus humide (H2-C5). Les différences entre les productions médianes associées aux deux stratégies d'allocation restent relativement constantes pour les scénarios H2-C2 à H2-C5 (200GWh), alors que cet écart est bien plus important (900GWh) pour le scénarios H2-C1.

La fiabilité de la navigation est tributaire de l'hydraulicité annuelle du fleuve. Aussi, pour le H2-C5, le fleuve est navigable onze mois sur douze, trois années sur quatre. Si le volume annuel du fleuve diminue, la navigabilité se dégrade. En effet, pour les scénarios H2-C4/H2-C3, le fleuve reste navigable 8/6 mois sur douze ("Sécurité-Énergétique") ou 6/3 mois sur douze ("Sécurité-Alimentaire"), trois années sur quatre. Si le volume annuel du fleuve venait à diminuer encore (H2-C2 et H2-C1), le fleuve deviendrait pratiquement non navigable (1 mois maximum dans l'année avec fiabilité de 50%).

Pour les scénarios de H2-C2 à H2-C5, l'agriculture de décrue est assurée sur 50 000ha avec une fiabilité de proche de 100% dès lors que la crue est imposée ("Sécurité-Alimentaire"). Pour le scénario le plus sec (H2-C1), même si elle est imposée, la crue artificielle ne peut avoir lieu qu'une année sur deux, avec une performance de 50 000ha. Si elle ne l'est plus, les performances de ce secteur se dégradent à mesure que le scénario utilisé est d'autant plus sec : (i) pour le scénario H2-C5, l'objectif de 50 000ha est atteint trois années sur quatre ; (ii) pour H2-C4, l'agriculture de décrue peut se pratiquer sur 50 000ha une année sur quatre ; (iii) pour le scénario H2-C3, l'objectif de 50 000ha n'est que rarement atteint (moins de 10% des années), et seulement 20 000ha sont envisageable une année sur deux ; (iv et v) avec les scénario H2-C2 et H2-C1, la crue est presque entièrement supprimée (au moins 95% des années).

La borne supérieure des prises de pêche a été augmentée de 3kTon/an par rapport au schéma de développement intermédiaire suite à l'ajout de réservoirs qui deviennent de nouveaux sites de pêche. Pour une hydraulicité du fleuve importante (H2-C5), les prises sont maximales et avoisinent 30kTon une année sur deux. Nous retrouvons les deux faits soulignés précédemment : (i) les prises restent supérieures à 18kTon toutes les années avec la politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire" (tous scénarios hydrologiques confondus) ; (ii) les prises diminuent fortement si la crue n'est pas imposée. La valeur médiane des prises est donc minime (8kTon une année sur deux) pour les scénarios ou la crue n'est que rarement présente (H2-C1, H2-C2 et H2-C3). Aussi, la variabilité des prises est très importante en fonction des conditions hydrologiques. Ces observations confirment que la productivité de la pêche reste à la fois dépendante de l'hydraulicité moyenne du fleuve et du scénario de politique d'allocation.

Dans ce schéma de développement complet, la disponibilité en eau dans le bassin apparaît encore comme un facteur exacerbant les vulnérabilités des secteurs. L'ensemble des secteurs est concerné. Aussi, les changements climatiques sont le premier facteur de vulnérabilité de l'agriculture irriguée, la production hydroélectrique et la navigation. D'autre part, nous confirmons que l'agriculture de décrue et la pêche sont davantage sensibles aux politiques d'allocation de l'eau qu'à l'hydraulicité moyenne du fleuve.

3.4.2 Schéma de développement complet : Bénéfices nets

Rappelons que le modèle hydro-économique utilisé repose sur l'optimisation des bénéfices nets et suppose une gestion coordonnée des infrastructures.

Le passage d'un schéma de développement intermédiaire⁸ à un schéma de développement complet⁹ conduit à une augmentation significative des revenus totaux générés (Figure 3.20). Enfin, les bénéfices nets annuels varient de ~ 375 M-USD à ~ 700 M-USD avec un schéma de développement intermédiaire, contre ~ 540 M-USD à ~ 1050 M-USD avec le schéma de développement complet, soit une augmentation moyenne d'environ $30\% \pm 4\%$. Toutefois, la contribution des secteurs à cette augmentation n'est pas homogène.

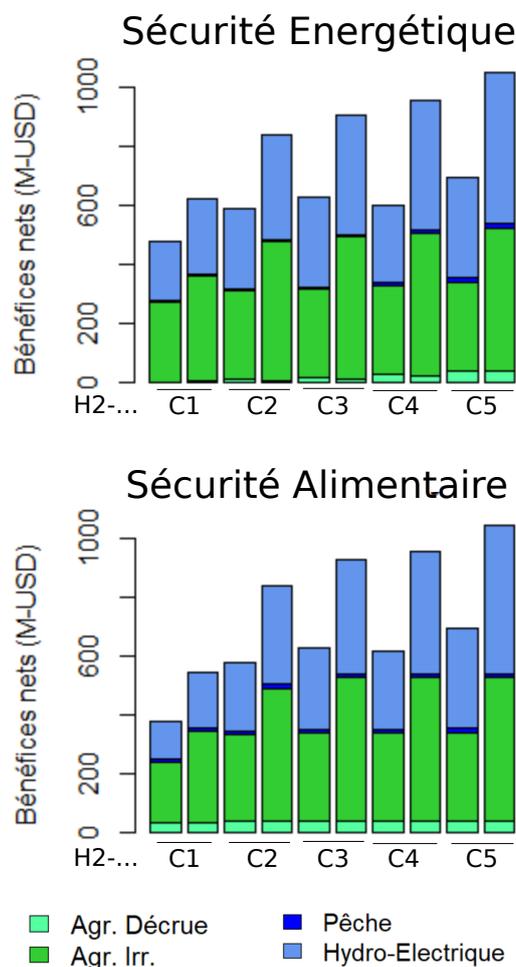


FIGURE 3.20 – Bénéfices nets : Comparaison entre un schéma de développement intermédiaire et un schéma de développement complet.

Sans surprise, les bénéfices nets des secteurs de l'agriculture irriguée et de la production hydro-électrique sont majorés (Figure 3.21) du fait des infrastructures supplémentaires. Aussi, en dehors des années extrêmement sèches, l'agriculture irriguée voit ses bénéfices

8. Rappel : Intégrant une superficie totale 255kha de périmètres irrigués, ainsi que six centrales hydroélectriques.

9. Rappel : Intégrant une superficie totale 405kha de périmètres irrigués, ainsi que douze centrales hydroélectriques.

augmentés de près de 60%, passant de ~ 300 M-USD (pour les scénarios H2-C2 à H2-C5) à ~ 480 M-USD (valeurs calculées pour les scénarios H2-C2 à H2-C5 et les deux politiques d'allocation). Pour le scénario extrêmement sec, cette augmentation est de 40%.

L'hydroélectricité, quant à elle, voit également ses bénéfices augmenter. Cette majoration est relativement homogène quelque soit le scénario hydrologique utilisé, et est d'en moyenne de 45% (passant les bénéfices de ~ 262 M-USD à ~ 380 M-USD, valeurs calculées pour les scénarios H2-C1 à H2-C5 et les deux politiques d'allocation).

La dynamique de la pêche peut être considéré comme indifférent au schéma de développement. Bien que les nouveaux réservoirs constituent des zones de pêche, cette contribution nouvelle peut être considérée comme minimale en comparaison de l'influence du choix de la politique d'allocation.

L'agriculture de décrue n'est pas influencée par le changement de schéma de développement dans le cas de figure où la politique d'allocation suivie est la "Sécurité-Alimentaire". Les bénéfices nets annuels sont alors ~ 36 M-USD. En revanche, si la politique observée est la "Sécurité-Energétique", alors une diminution des bénéfices d'environ 5M-USD est observable.

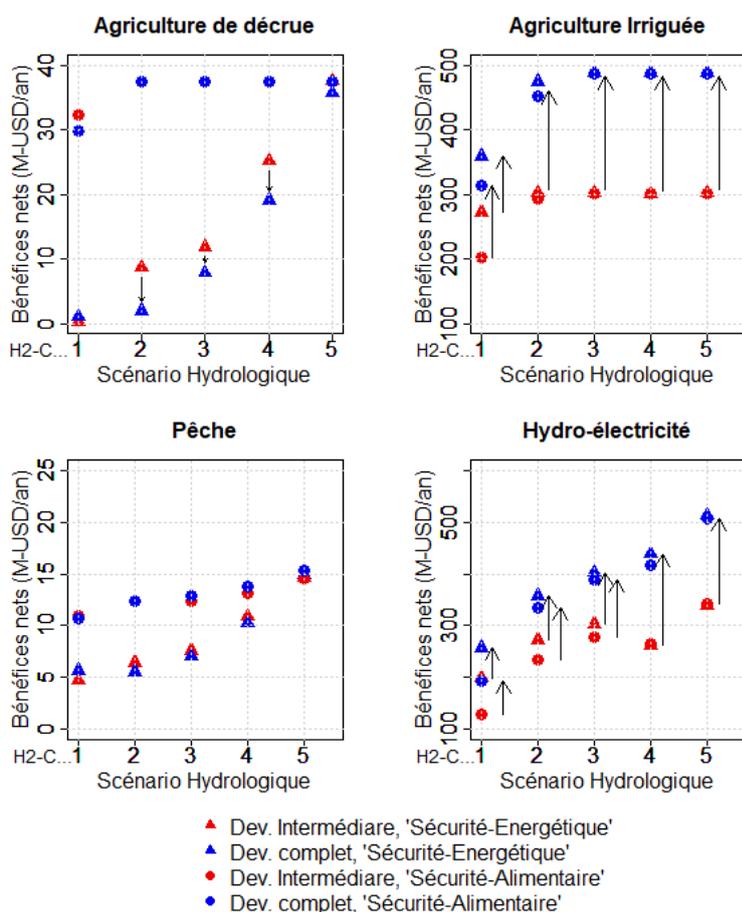


FIGURE 3.21 – Bénéfices nets : Comparaison entre un schéma de développement intermédiaire et un schéma de développement complet par secteur. Les flèches représentent l'influence du passage du schéma de développement intermédiaire au schéma de développement complet.

3.4.3 Développement du bassin : un atout pour l'adaptation aux changements climatiques ?

La figure 3.22 regroupe les résultats des simulations hydro-économiques pour l'horizon 2 (scénarios hydrologiques H2-C1 à H2-C5), pour les politiques d'allocations "Sécurité-Alimentaire" (droite) et "Sécurité-Energétique" (gauche), pour le schéma de développement intermédiaire (haut) et le schéma de développement complet (bas).

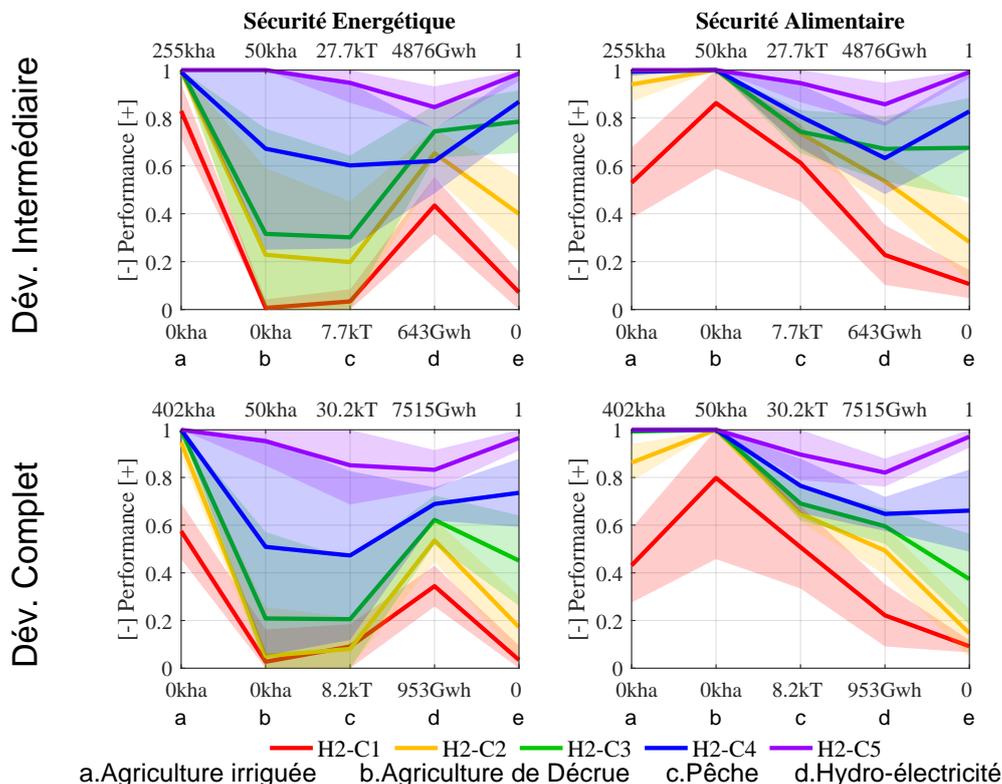


FIGURE 3.22 – Vulnérabilité climatique, schéma de développement intermédiaire et schéma de développement complet. En haut : Performances des secteurs d'activité pour le schéma de développement Intermédiaire (gauche : politique d'allocation "Sécurité-Énergétique", droite : politique d'allocation "Sécurité-Alimentaire"). En bas : Performances des secteurs d'activité pour le schéma de développement complet. Les lignes de couleurs se réfèrent aux scénarios hydro-climatiques utilisés (H2-C1 à H2-C5) et représentent les performances moyennes. Les cernes représentent les coefficients de variation des performances (défini comme la moyenne divisée par l'écart-type).

Si le passage d'un schéma de développement intermédiaire à un schéma de développement complet augmente significativement les revenus générés, la vulnérabilité des secteurs d'activité vis-à-vis des changements climatiques s'en voit modifiée. Aussi :

1. Si la politique d'allocation suivie par les gestionnaires est la "Sécurité-Énergétique", alors :
 - L'agriculture irriguée voit ses bénéfices nets augmenter d'environ 60% avec un développement complet du bassin, sans pour autant être davantage exposée aux aléas climatiques. En effet, pour le scénario très sec (H2-C1), les superficies irriguées sont comparables entre le schéma de développement intermédiaire (~210 000ha) et le schéma de développement complet (~230 000ha). Ainsi,

ceci montre que la quasi-totalité de l'eau disponible pour l'aval est allouée à l'irrigation, et que l'ajout de centrales hydroélectriques en amont ne modifie pas cette situation.

- Le passage à un schéma de développement complet tend à augmenter la vulnérabilité de l'agriculture de décrue vis-à-vis des changements climatiques. En effet, les performances sont toutes diminuées avec un schéma de développement complet (sauf pour le H2-C5). La régularisation complète des eaux du fleuve suite à la construction de barrages sur les principaux affluents porte forcément atteinte aux usages traditionnels qui reposent sur un régime hydrologique naturel.
 - La pêche présente les mêmes caractéristiques que l'agriculture de décrue, à savoir une sur-exposition à l'aléa climatique si le schéma de développement complet est mis en place. Ceci est lié à la présence ou non de la crue annuelle, pilier du dynamisme de la pêche dans la basse vallée.
 - Sans surprise, l'ajout des centrales de troisième génération s'avère être un stimulant pour le secteur hydroélectrique, sans toutefois exacerber la vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques.
 - Le passage à un schéma de développement complet exacerbe la vulnérabilité de la navigation vis-à-vis de l'aléa climatique. Une baisse importante de plusieurs mois (2 ou 3) est à prévoir notamment pour les scénarios humides (H2-C4 et H2-C5). Ceci est entre autres lié à la consommation en eau des périmètres irrigués dans la basse vallée.
2. Si la politique d'allocation suivie par les gestionnaires est la "Sécurité-Alimentaire", alors :
- Bien que l'incorporation des nouveaux périmètres irrigués majore les bénéfices nets attendus pour ce secteur d'environ 60%, le secteur reste peu vulnérable à l'aléa climatique. À nouveau, pour le scénario hydrologique sec (H2-C1), la superficie irrigable n'évolue pas entre les schémas de développement intermédiaire et complet (140 000ha contre 160 000ha). Aussi, le passage d'un schéma de développement à l'autre n'expose pas davantage le secteur de l'agriculture irriguée. En revanche, l'implémentation de la crue engendre un conflit d'usage entre l'agriculture irriguée et la production alimentaire traditionnelle (pêche et agriculture de décrue).
 - Globalement, les infrastructures du bassin permettent de stocker assez d'eau pour assurer une agriculture de décrue sur 50 000ha avec une fiabilité avoisinant les 100%, sauf lors des années particulièrement sèches (H2-C1). Aussi, le premier facteur de vulnérabilité est la décision politique de maintenir ou non la crue annuelle.
 - Le passage à un schéma de développement complet ne favorise ni ne défavorise la pêche. En parallèle, avec la politique "Sécurité-Alimentaire", la vulnérabilité de ce secteur vis-à-vis des changements climatiques est presque trois fois moindre qu'avec la politique d'allocation "Sécurité-Énergétique".
 - De manière similaire, la construction des centrales de troisième génération augmente la production totale d'énergie sans toutefois réduire la vulnérabilité de ce secteur aux changements climatiques : les productions varient toujours du simple ou triple lorsqu'on passe du scénario le plus sec au scénario le plus humide.

- Le passage à un schéma de développement complet augmente la vulnérabilité de la navigation vis-à-vis des changements climatiques, entre autre à cause de la consommation en eau des nouveaux périmètres irrigués.

3.5 Conclusions

La disponibilité en eau dans le bassin apparaît clairement comme une source majeure de vulnérabilité pour les secteurs de la production hydroélectrique et la navigation. L'agriculture de décrue et la pêche sont davantage sensibles aux politiques d'allocation de l'eau qu'à la disponibilité en eau dans le bassin. Cette dualité énergie/navigation vs et agriculture de décrue/pêche est exacerbée par la dégradation des conditions hydrologiques, lesquelles peuvent être amplifiées par les changements climatiques.

L'analyse des simulations hydro-économiques met en évidence des « effets de seuils » pour les secteurs de l'agriculture de décrue, de la pêche et de la navigation, et dans une moindre mesure pour l'agriculture irriguée. Ces seuils correspondent à un volume annuel écoulé (ici défini à Bakel) en dessous desquels ces usages subissent de (très) fortes péjorations :

- Pour l'agriculture de décrue, ce seuil correspond à un volume d'eau de 17.5km^3 (seuil valable pour une politique d'allocation de "Sécurité-Énergétique" seulement. En effet, avec une politique de "Sécurité-Alimentaire", l'agriculture de décrue est systématique).
- Pour la pêche et la navigation, ce seuil correspond à un volume d'eau de compris entre 22 et 25km^3 .
- Pour l'agriculture irriguée, ce seuil correspond à un volume d'eau d'environ 3.5 km^3 (pour la politique "Sécurité-Energétique") ou de 6 km^3 (pour la politique "Sécurité-Alimentaire").

Le secteur hydroélectrique est lui aussi vulnérable aux changements climatiques, que ce soit avec un schéma de développement intermédiaire ou complet. Compte tenu de la concentration de centrales sur le Bafing, la spatialisation des précipitations et son évolution dans le futur est un facteur important de vulnérabilité. Lorsqu'on regarde les productions garanties, des réductions importantes de production sont attendues pour les centrales attachées aux réservoirs qui se trouvent à l'aval dès que la crue artificielle doit être mise en oeuvre et que les conditions hydrologique sont relativement sèches.

Hormis lors des années extrêmement sèches pour lesquelles le module annuel du fleuve ne peut couvrir les besoins en eau de l'irrigation, le secteur de l'agriculture irriguée n'est vulnérable ni aux changements climatiques ni aux politiques d'allocation. Pour ces années extrêmement sèches, l'implémentation de la crue défavorise l'agriculture irriguée car elle réduit la disponibilité en eau dans le fleuve le restant de l'année.

Ces résultats indiquent qu'en 2020 le bassin est à la croisée des chemins : des choix d'investissements peuvent définitivement sceller le sort du bassin en le transformant en un hub énergie-agriculture-transport ou au contraire en favorisant un équilibre entre ces usages modernes et les usages traditionnels sur lesquels reposent les communautés riveraines. En effet, le coût d'opportunité associé au maintien d'une crue artificielle d'environ 4 km^3 va rapidement devenir significatif dès lors que des barrages sont construits sur les

affluents encore naturels et que les conditions hydrologiques se dégradent avec les changements climatiques. Le développement du potentiel hydroélectrique devrait se faire en priorité sur le Bafing en amont de Manantali de manière à minimiser le coût d'opportunité de la crue artificielle pour le secteur énergétique, tout en maintenant les options de développement ultérieur et de gestion ouvertes afin de s'adapter au mieux aux changements hydro-climatiques au fur et à mesure que l'incertitude concernant la direction de ces changements se réduira.

Schéma de développement intermédiaire						
	Hydro- électricité (GWh)	Agri. (kha)	Irriguée	Agri. De Décrue (kha)	Pêche (kTon)	Vol. An. Moyen à Bakel (km ³)
H2-C1 Energie	1640/2430	163/220		0/0	7.8/8.1	6.2
H2-C1 Alimentaire	880/1570	85/130		12/50	12.8/21.4	6.2
H2-C2 Energie	2690/3500	252/255		0/0	7.8/8.3	11.8
H2-C2 Alimentaire	2020/2880	203/250		50/50	21.5/22.0	11.8
H2-C3 Energie	3010/3840	255/255		0/0	8.0/10.7	15.3
H2-C3 Alimentaire	2830/3530	252/254		50/50	21.5/21.8	15.3
H2-C4 Energie	2420/3400	248/253		0/47	7.9/19.8	21.9
H2-C4 Alimentaire	2250/3350	240/255		50/50	21.4/21.9	21.9
H2-C5 Energie	3590/4330	255/255		50/50	22.2/27.5	33.2
H2-C5 Alimentaire	3620/4380	255/255		50/50	22.8/27.5	33.2

Schéma de développement complet						
	Hydro- électricité (GWh)	Agri. (kha)	Irriguée	Agri. De Décrue (kha)	Pêche (kTon)	Vol. An. Moyen à Bakel (km ³)
H2-C1 Energie	2420/3180	167/238		0/0	8.9/9.8	6.2
H2-C1 Alimentaire	1360/2290	106/145		1.3/50	11.6/21.2	6.2
H2-C2 Energie	3460/4030	341/389		0/0	8.3/9.4	11.8
H2-C2 Alimentaire	2690/4280	283/347		50/50	21.4/22.3	11.8
H2-C3 Energie	4050/5030	399/400		0/0	8.8/9.5	15.3
H2-C3 Alimentaire	3950/4830	391/401		50/50	22.1/22.9	15.3
H2-C4 Energie	4720/5430	402/402		0/21.8	9.4/16.9	21.9
H2-C4 Alimentaire	4470/5240	400/402		50/50	22.4/23.7	21.9
H2-C5 Energie	5540/6540	402/402		36.3/50	20.5/28.5	33.2
H2-C5 Alimentaire	5720/6350	402/402		50/50	24.1/29.1	33.2

TABLE 3.4 – Synthèse des productivités garanties et médianes des secteurs d'activités en fonction des conditions hydro-climatiques et des politiques d'allocation (schéma de développement intermédiaire et complet). La première valeur indiquée correspondent à la productivité garantie (95% du temps), et la seconde à la valeur médiane.

Quatrième partie

Annexes

Annexe A

Travail en SIG : Délimitations du bassin et des sous-bassins

A.1 Motivation pour la réalisation du travail de SIG

Dans la littérature scientifique, comme dans des documents de références, les limites du bassin versant du fleuve Sénégal fluctuent. Deux délimitations sont couramment utilisées (figure A.1).

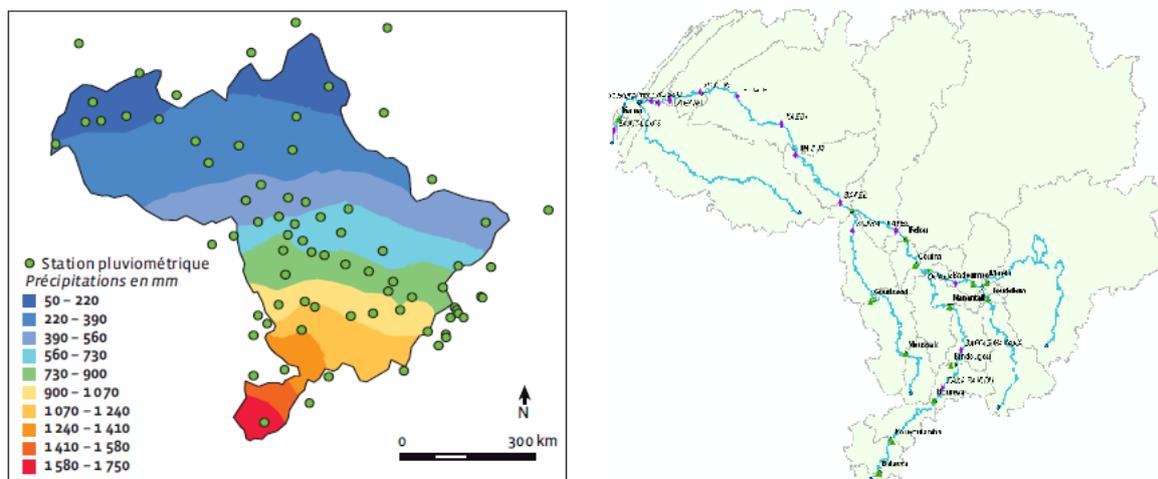


FIGURE A.1 – A gauche : Carte extraite du rapport Tropis (2007) et présentée dans la monographie de l'IRD (Bader et al., 2014). A droite : Carte extraite de SDAGE (OMVS, 2011). Illustration de la discordance des limites du BFS.

Puisque la localisation et la superficie sont des données primordiales en climatologie et en hydrologie, il est nécessaire de lever les ambiguïtés en ce qui concerne les limites du BFS. Aussi, le travail de délimitation a été repris du début, c'est à dire à partir des modèles numériques de terrain.

Gardons à l'esprit qu'il s'agit d'une délimitation géographique, basée sur l'élévation, et non d'une délimitation géomorphologique (qui inclue la géologie et le pendage des

couches).

A.2 Délimitation du BFS

A.2.1 Méthodologie

Plusieurs tests de délimitation ont été entrepris. A ce jour, trois logiciels sont couramment utilisés en hydrologie pour délimiter des bassins versants : « Arc Gis », « QGIS » et « GRASS ». QGIS utilise les mêmes codes de calculs que GRASS. Aussi, il serait redondant d'utiliser à la fois QGIS et GRASS. C'est pourquoi QGIS a été exclu. Par conséquent, nous utiliserons le logiciel « Arc GIS » et ainsi que le code de calcul « GRASS ».

Les données de la « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM) ont été utilisées comme données d'entrées. Deux versions ont été utilisées :

- une résolution de 3 secondes d'arc, ce qui représente environ une maille de 90m de coté.
- une résolution de 1 secondes d'arc, ce qui représente environ une maille de 30m de coté.

Les jeux de données de la SRTM ont été retenus puisqu'ils ont la meilleure résolution spatiale au niveau de l'Afrique de l'ouest¹. Ces données sont en libre service à l'URL suivante : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

L'exutoire du bassin versant du fleuve Sénégal se situe au niveau de la ville de Saint-Louis, au point de coordonnées suivant :

	Longitude	Latitude
Exutoire	-16,5092	15,9229

TABLE A.1 – Coordonnées (en degrés décimaux) de l'exutoire du BFS.

Protocole sous Arc GIs

Arc Gis est utilisé dans sa version 10.4. L'interface utilisée est Arc Map.

1. Les fichiers d'élévation sont fusionnés, via l'outil Windows>Image Analysis.
2. Pour assurer la continuité du réseau de drainage, l'outil Arctoolbox > Spatial Analyst tools > Hydrology > fill est utilisé .
3. Les directions de flux et l'accumulation sont déterminés grâce aux outils Flow direction et Flow Accumulation présents dans Arctoolbox > Spatial Analyst tools > Hydrology .
4. L'exutoire est fixé aux coordonnées données ci-dessus.
5. Le bassin correspondant à l'exutoire est délimité via l'outil Arctoolbox > Spatial Analyst tools > Hydrology > Watershed.

1. Se référer à <https://earthexplorer.usgs.gov> pour plus de détails sur les jeux de données disponibles ainsi que leurs résolutions.

6. L'outil Arctoolbox>Outil de conversion>A partir d'un raster> Raster vers polygone permet de convertir le raster en shapefile, donnant ainsi un fichier de limite du BFS.

Protocole sous GRASS

1. Le fichier qui comporte les données d'élévation fusionnées est utilisé comme données d'entrées.
2. La commande `r.watershed` , avec un seuil de taille minimale de bassin fixé à $10^6 m^2$.
3. L'exutoire est fixé aux coordonnées données ci-dessus.
4. La commande `r.water.outlet` permet d'obtenir le raster du bassin versant correspondant à l'exutoire.
5. La conversion du raster en shapefile se fait via le logiciel Arc GIS.

A.2.2 Résultats des délimitations

Limites du bassin

Le tableau ci-dessous présente les formes des bassins obtenues :

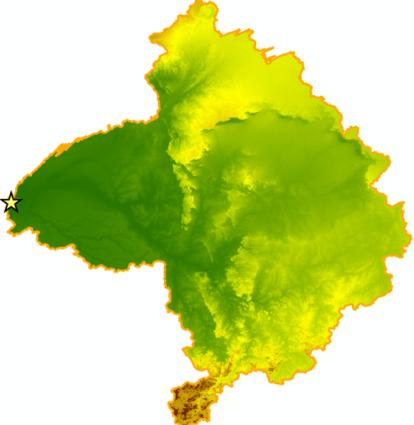
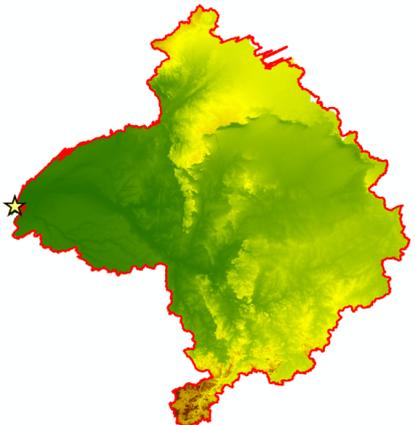
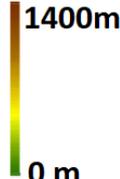
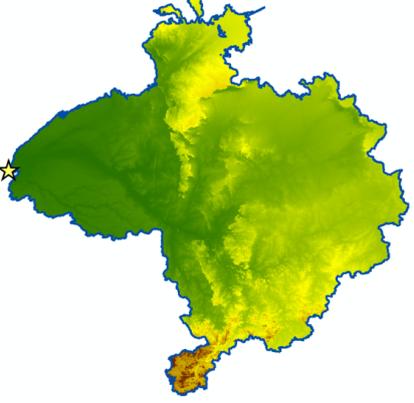
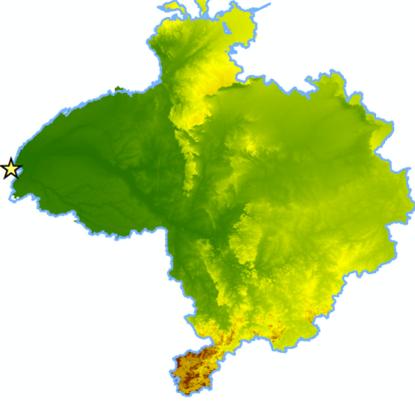
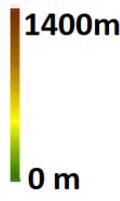
	Logiciel		
	Arc Gis	GRASS	
3 sec d'arc			
1 sec d'arc			

TABLE A.2 – Résultats des délimitations. Les fonds de carte correspondent aux altitudes.

Sensibilité sur le logiciel utilisé : Dans les deux cas, le traitement des données par le logiciel ArcGis ou par le code GRASS donnent des résultats très proches. La figure A.2 l'atteste.

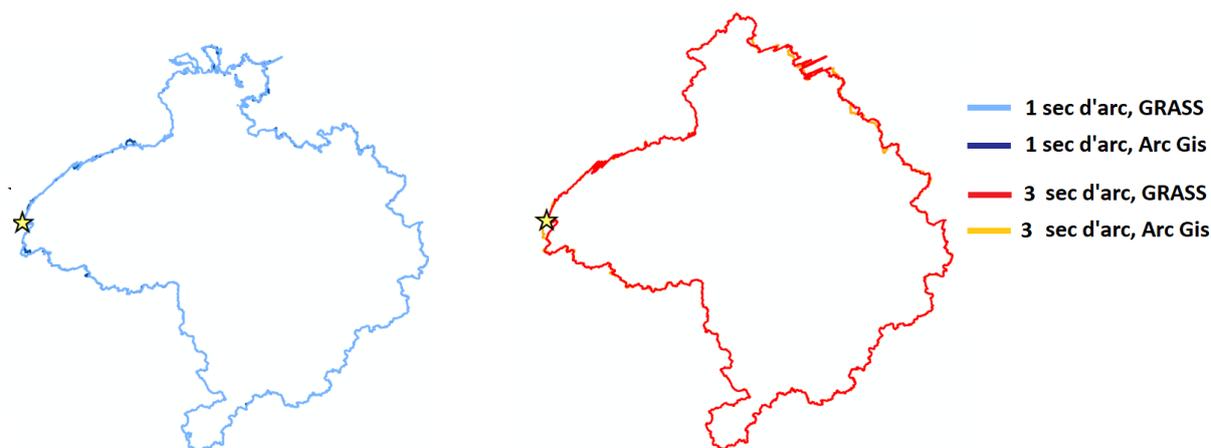


FIGURE A.2 – A gauche : Limites du BFS obtenues avec les données SRTM de 1 sec d'arc (30m). La cerne bleue claire correspond aux limites obtenues avec GRASS, et celle bleue foncée, celles obtenues avec Arc Gis. Elles sont superposées. A Droite : Limites du BFS obtenues avec les données SRTM de 3 sec d'arc (90m). La cerne rouge correspond aux limites obtenues avec GRASS, et celle orange, celles obtenues avec Arc Gis. Elles sont aussi superposées. L'étoile représente l'exutoire.

Sensibilité sur les données : Dans la partie méridionale du bassin, les résultats sont les mêmes si on utilise les données à 1 sec d'arc ou à 3 sec d'arc. L'altitude y est marquée, d'où le fait que les résultats convergent. En revanche, une différence apparaît dans la partie septentrionale du bassin : les données à 3 sec d'arc présentent un surplus de superficie par rapport aux données à 1 sec d'arc (Figure A.3).

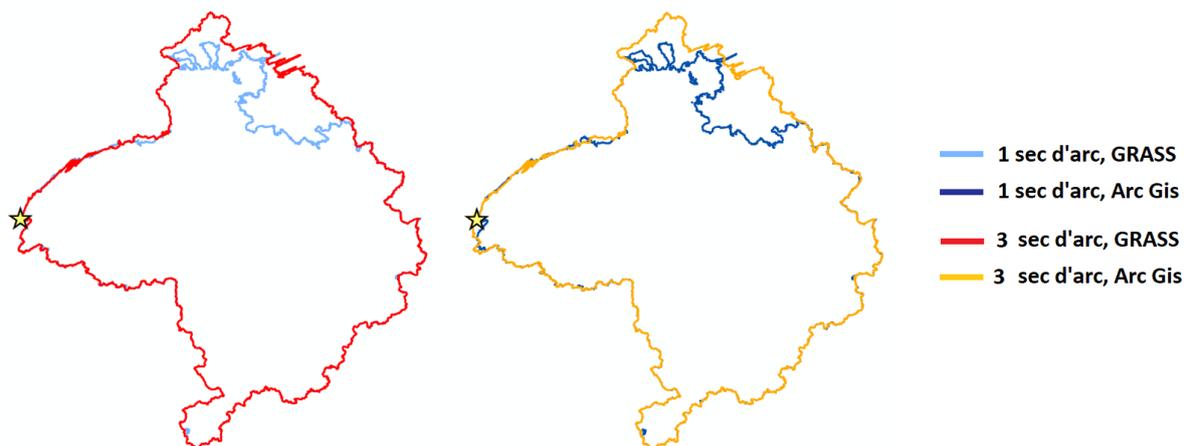


FIGURE A.3 – A gauche : Limites du BFS obtenues avec Arc Gis. A Droite : Limites du BFS obtenues avec GRASS. L'étoile représente l'exutoire.

A.2.3 La superficie du bassin

À l'instar des limites du bassin, les sources sont divergentes quant à la superficie du bassin. Cette section présente les superficies du bassin.

A.2.4 Synthèse et commentaires

Puisque les données à 1 sec d'arc présentent une résolution plus fine que celles à 3 sec d'arc (pour une précision égale), les résultats issus des données à 1 sec d'arc seront préférés.

En terme hydrologique, la partie nord du bassin est très peu pluvieuse. Ceci atténue l'impact de ces approximations quant à la contribution de cette région au débit du Fleuve Sénégal.

Les limites du BFS et le modèle numérique de terrain utilisés dans le cadre du projet GIRECCC seront donc les suivants :

- Les données de la SRTM à 1 seconde d'arc.
- Les limites obtenues par GRASS.

Par conséquent, la superficie du bassin prise en compte sera de 603 806 km².

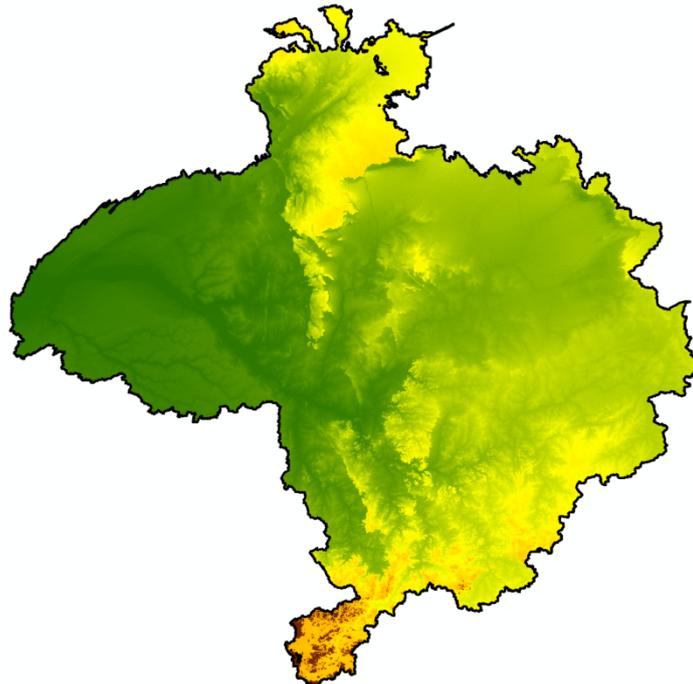


FIGURE A.4 – MNT et limites du bassin sélectionnés.

A.3 Délimitation des sous-bassins hydrologiques

Dans le chapitre 2, nous avons eu recours à six stations hydrologiques, ainsi que leurs sous bassins, afin d'être en mesure de réaliser les projections hydrologiques.

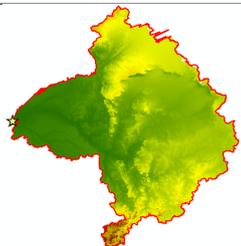
Fichier	Carte	Superficie (km ²)
Tropis (2007)		386 534 km ²
SDAGE 2011		502 127 km ²
ArcGis-1sec d'arc		603 926 km ²
GRASS-1sec d'arc		603 806 km ²
ArcGis-3sec d'arc		657 655 km ²
GRASS-3sec d'arc		656 940 km ²

TABLE A.3 – Superficies du BFS.

Ces six sous-bassins hydrologiques ont été délimités à partir des données de la SRTM à 1 seconde d'arc, avec le logiciel GRASS (version 6.4). Cela assure l'homogénéité du travail SIG.

Les coordonnées des six stations ainsi que les superficies des sous-bassins hydrologiques correspondant sont donnés dans le tableau A.4. La figure A.5 présente la morphologie de ces six sous-bassins hydrologiques.

Station hydrologique	Longitude	Latitude	Affluent	Superficie km ²
Daka Saidou	-10,62	11,95	Bafing	15768
Bafing Makana	-10,26	12,55	Bafing	22187
Gourbassi	-11,63	13,40	Falémé	15897
Oualia	-10,38	13,60	Bakoye	102611
Kayes	-11,45	14,46	Sénégal	308548
Bakel	-12,45	14,90	Sénégal	393754

TABLE A.4 – Tableau présentant les coordonnées et les superficies des six sous-bassins hydrologiques.

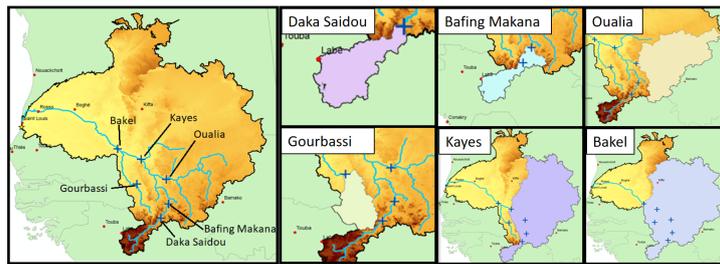


FIGURE A.5 – Morphologies des six sous-bassins hydrologiques.

A.4 Délimitation des sous-bassins hydro-économiques

Similairement, nous avons déterminé les limites des sous-bassins hydro-économiques. Ceci s'est fait avec les données de la SRTM à 1 seconde d'arc, avec le logiciel GRASS (version 6.4).

La nomenclature SBV x se réfère au numéro du sous-bassin hydro-économique tel que présenté dans le SDAGE (OMVS, 2011). En revanche, le modèle hydro-économique possède sa propre nomenclature. En effet, les noeuds, notés Nx , correspondent globalement aux sous-bassins hydro-économiques du SDAGE, sauf que certains ont été fusionnés. Les résultats ainsi que les correspondances entre numéro sous-bassins hydro-économiques (SBV x) et les noeuds (Nx) sont présentés dans le tableau A.5 et la figure A.6.

Noeud hydro-éco	SBV-SDAGE	Affluent	Superficie km ²	Latitude	Longitude
N1	SBV1	Bafing	3747	10,95	-11,61
N2	SBV2	Bafing	6883	10,27	-11,42
N3	-	Bafing	-	-	-
N4	SBV3	Bafing	3989	11,66	-10,79
N5	SBV4	Bafing	6617	12,33	-10,38
N6	SBV5	Bafing	6965	13,20	-10,43
N7	SBV6	Bafing	10780	13,78	-10,83
N8	SBV12	Bakoye	16417	13,40	-9,86
N9	SBV10	Baoulé	74807	13,67	-9,83
N10	SBV11+13+14	Bakoye	10800	13,65	-10,21
N11	SBV15	Bakoye	1942	13,81	-10,82
N12	SBV16	Sénégal	4157	14,01	-11,09
N13	SBV17	Sénégal	2865	14,35	-11,35
N14	SBV18	Sénégal	157544	14,46	-11,45
N15	SBV7	Falémé	5710	12,51	-11,31
N16	SBV8	Falémé	12938	13,36	-11,86
N17	SBV9+19	Sénégal	64285	12,24	-14,75
N18	SBV20	Sénégal	2237	14,90	-12,45
N19	SBV21	Sénégal	13621	15,65	-13,25

TABLE A.5 – Tableau présentant les noeux hydro-économiques et les sous-bassins hydro-économiques du SDAGE.

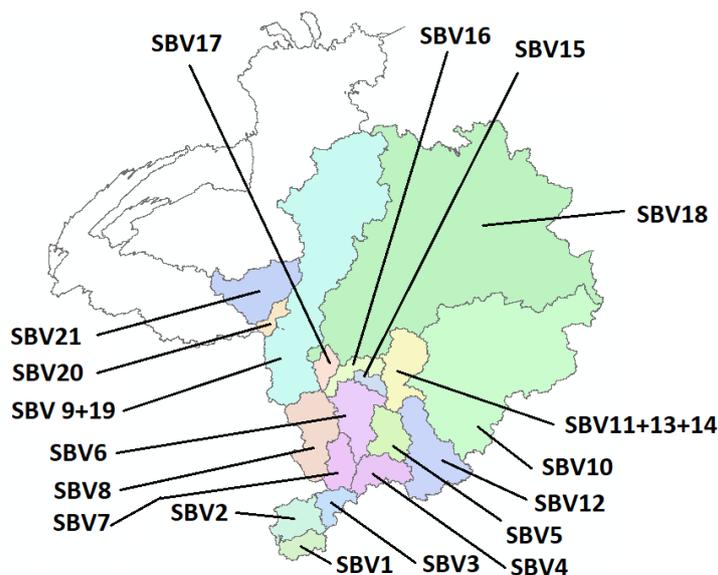


FIGURE A.6 – Morphologies des six sous-bassins hydro-économiques.

Annexe B

Modélisation hydrologique : Débits totaux ou incrémentaux ?

Comme cité en section 2.1, le travail de modélisation et de production des projections hydrologiques a été réalisé sur des débits totaux. Ceci permet de représenter la crue à Bakel, ce que nous ne pourrions pas faire avec des débits incrémentaux.

En effet, si nous comparons les débits totaux et incrémentaux à Bakel (noeud hydro-économique numéro 18), une différence de l'ordre de $10^2 m^3/s$ apparaît (Figure C.1). Par conséquent, il est impossible de qualifier la crue annuelle à Bakel avec les débits incrémentaux.

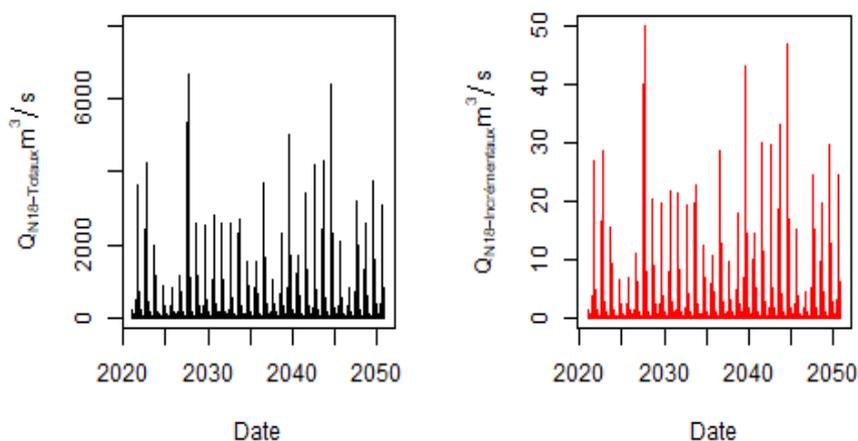


FIGURE B.1 – Comparaison des débits totaux (gauche) et incrémentaux (droite) au noeud 18 (Bakel), pour l'horizon 1, et le scénario de précipitation « CCLM4 AFR-44 CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 rcp4.5 » et celui d'ETP « RCA4 AFR-44 CCCma-CanESM2 rcp4.5 » .

Ceci est clairement lié à la superficie des sous-bassins. Dans le cas des débits totaux, l'ensemble du bassin jusqu'à Bakel est pris en compte (soit $392\,694\text{ km}^2$, Figure B.2,

gauche), alors que dans le cas des débits incréments, seul la superficie du sous-bassin incrémental du noeud 18 est pris en compte (soit 2 237km², Figure B.2, gauche)

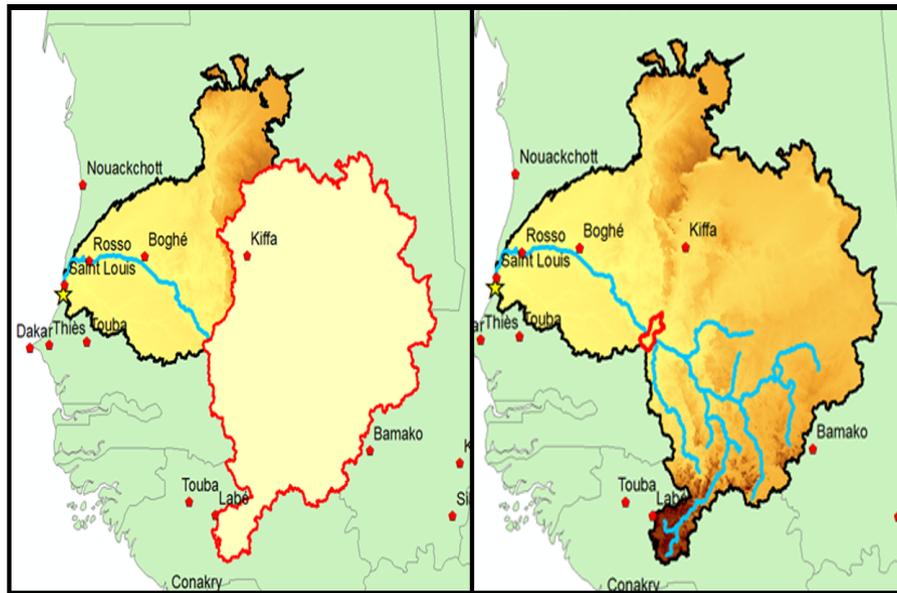


FIGURE B.2 – Comparaison des sous-bassins du N18 dans le cas d’une modélisation des débits totaux (gauche) et incréments (droite). Dans le cas des débits totaux, tous les sous-bassins hydro-économiques en amont sont agrégés à celui du noeud 18.

Annexe C

Méthodes de distribution des débits : Comparaisons

C.1 Trois méthodes de distribution des débits avec le ratio DAR

Bien que l'équation retenue pour distribuer les débits dans un bassin soit une dérivée du ratio des airs de drainage (DAR), il reste à déterminer qu'elle va être la méthode utilisée. En plus des deux méthodes présentées par Wurbs (2012), une troisième existe. Aussi, nous avons trois méthodes possibles. Nous pouvons :

1. Distribuer les débits totaux aux points non jaugés (en utilisant l'air total du sous bassin), puis faire des soustractions récursives des débits totaux pour obtenir les débits incrémentaux.
2. Calculer les débits incrémentaux des sous-bassins hydrologiques, puis distribuer les débits incrémentaux aux points non-jaugés via la méthode DAR.
3. Appliquer l'équation DAR, avec les débits totaux, l'air total du bassin jaugée, et l'air du bassin incrémental non jaugé (méthode hybride de distribution permettant d'obtenir des débits incrémentaux, directement à partir des débits totaux, sans aucune étape de soustraction).

C.1.1 Méthode 1 : Distribution les débits totaux

Les débits futurs ont été déterminés aux stations de Daka Saidou, Bafing Makana, Gourbassi, Oualia, Kayes et Bakel. Dans cette première méthode, nous utilisons ces mêmes débits lors de l'étape distribution. Aussi, l'équation DAR aura pour entrées :

- Pour le ratio des airs de drainage : l'air du bassin drainant l'ensemble de l'exutoire jusqu'au noeud considéré, et l'air du bassin de la station considéré. Un exemple est présenté dans le tableau C.1
- Pour le ratio des précipitations : le rapport des précipitations annuelles sur les surfaces utilisées par le ratio des airs de drainage.

Puis, pour calculer les débits incrémentaux, nous effectuons des soustractions successives. Par exemple : $N1_{incr} = N1_{tot}$; $N2_{incr} = N2_{tot} - N1_{tot}$, etc...

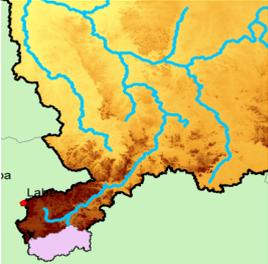
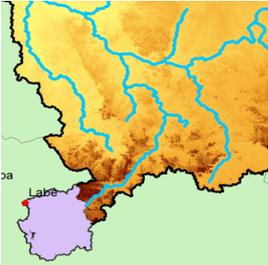
Sous bassin hydrologique	Noeud	Surface sous bassin hydrologique	Surface Noeud
Daka Saidou	N1		
Daka Saidou	N2		
...			
Bafing Makana	N6		
Bafing Makana	N7		

TABLE C.1 – Présentation de la première méthode de distribution des débits : Exemple sur le sur Bafing. Les airs utilisés pour les points non jaugé (noeuds) sont celles de l'exutoire jusqu'à la tête du bassin. Les précipitations sont celles sur ces mêmes surfaces.

C.1.2 Méthode 2 : Distribution les débits incrémentaux

La premier étape est de calculer les débits incrémentaux des sous-bassins hydrologiques. Ils sont calculés comme suit : $Q_{incr}^{DakaSaidou} = Q_{tot}^{DakaSaidou}$; $Q_{incr}^{BafingMakana} = Q_{tot}^{BafingMakana} - Q_{tot}^{DakaSaidou}$; $Q_{incr}^{Oualia} = Q_{tot}^{Oualia}$; $Q_{incr}^{Kayes} = Q_{tot}^{Kayes} - Q_{tot}^{Oualia} - Q_{tot}^{BafingMakana}$; $Q_{incr}^{Bakel} = Q_{tot}^{Bakel} - Q_{tot}^{Kayes}$.

Puis l'équation DAR est utilisée pour la distribution des débits (incrémentaux), et aura pour entrées :

- Pour le ratio des airs de drainage : l'air du bassin incrémental du noeud considéré, et l'air du bassin incrémental de la station considéré. Un exemple est présenté dans le tableau C.2
- Pour le ratio des précipitations : le rapport des précipitations annuelles sur les surfaces utilisées par le ratio des airs de drainage.

C.1.3 Méthode 3 : Distribution les débits « hybride »

Dans cette méthode, nous utilisons l'équation DAR, avec pour données d'entrées :

- Les débits totaux des sous bassins hydrologiques.
- Pour le ratio des airs de drainage : l'air du bassin incrémental du noeud considéré, et l'air du bassin de la station considéré. Un exemple est présenté dans le tableau C.3.
- Pour le ratio des précipitations : le rapport des précipitations annuelles sur les surfaces utilisées par le ratio des airs de drainage.

C.1.4 Suppression des valeurs négatives

Dans la section 2.8, il est mentionné qu'en distribuant des débits, il y est possible d'obtenir des débits incrémentaux négatifs. Or, le modèle hydro-économique n'est pas capable de les prendre en compte. Aussi, nous avons conçu deux versions de la méthode 1 (distribution des débits totaux), et deux versions de la méthode 2 (distribution des débits incrémentaux). La première version voit ses débits négatifs ramenés à 0, et la seconde version conserve ses débits négatifs tels quels (Figure C.1).

C.2 Comparaisons de ces trois méthodes

Les débits incrémentaux ont été calculés pour l'ensemble des noeuds du modèle hydro-économique, avec les trois méthodes. Une comparaison est présentée dans cette section.

Pour réaliser cette comparaison, nous nous appuyons sur deux points de contrôle dans le BFS : la station hydrologique de Kayes, et la station hydrologique de Bakel. En ces deux points, nous allons comparer les débits annuels projetés à Kayes et Bakel avec la somme des débits incrémentaux annuels des sous-bassins incrémentaux situés en amont de Kayes et de Bakel.

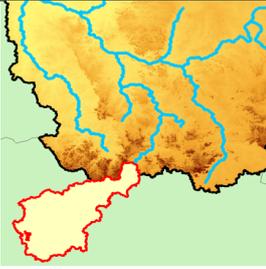
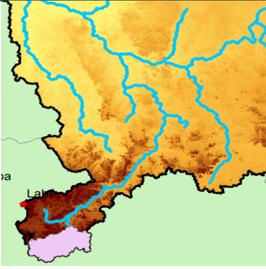
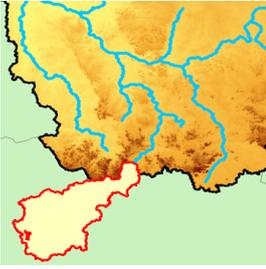
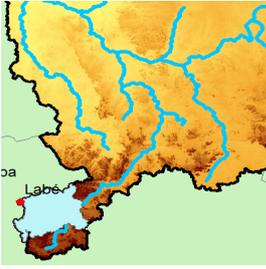
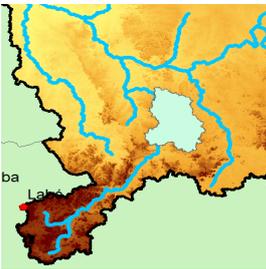
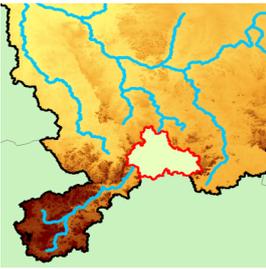
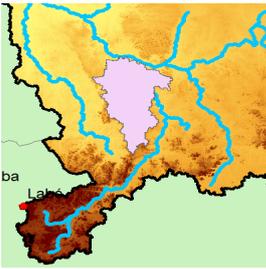
Sous bassin hydrologique	Noeud	Surface sous bassin hydrologique	Surface Noeud
Daka Saidou	N1		
Daka Saidou	N2		
...			
Bafing Makana	N6		
Bafing Makana	N7		

TABLE C.2 – Présentation de la deuxième méthode de distribution des débits : Exemple sur le sur Bafing. Les airs utilisés pour les points non jaugé (noeuds) sont celles des sous bassins incrémentaux (noeuds). Les précipitations sont celles sur ces mêmes surfaces.

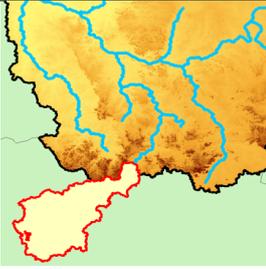
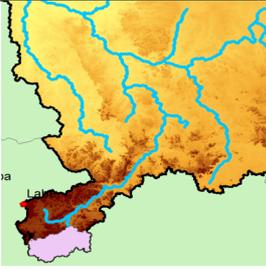
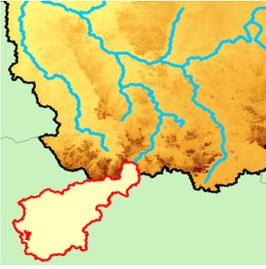
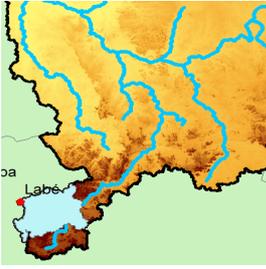
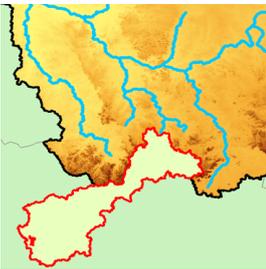
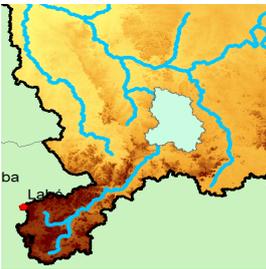
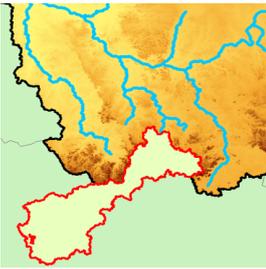
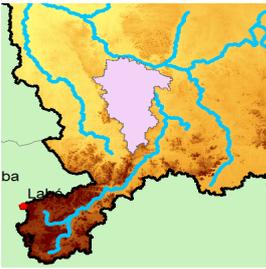
Sous bassin hydrologique	Noeud	Surface sous bassin hydrologique	Surface Noeud
Daka Saidou	N1		
Daka Saidou	N2		
...			
Bafing Makana	N6		
Bafing Makana	N7		

TABLE C.3 – Présentation de la troisième méthode de distribution des débits : Exemple sur le sur Bafing. Les aires utilisées pour les points non jaugé (noeuds) sont celles des sous bassins incrémentaux (noeuds). Les précipitations sont celles sur ces mêmes surfaces.

La figure C.1 présente ces comparaisons aux deux points de contrôle (gauche : Kayes, droite : Bakel) pour le cluster 1 du premier horizon¹ (2040).

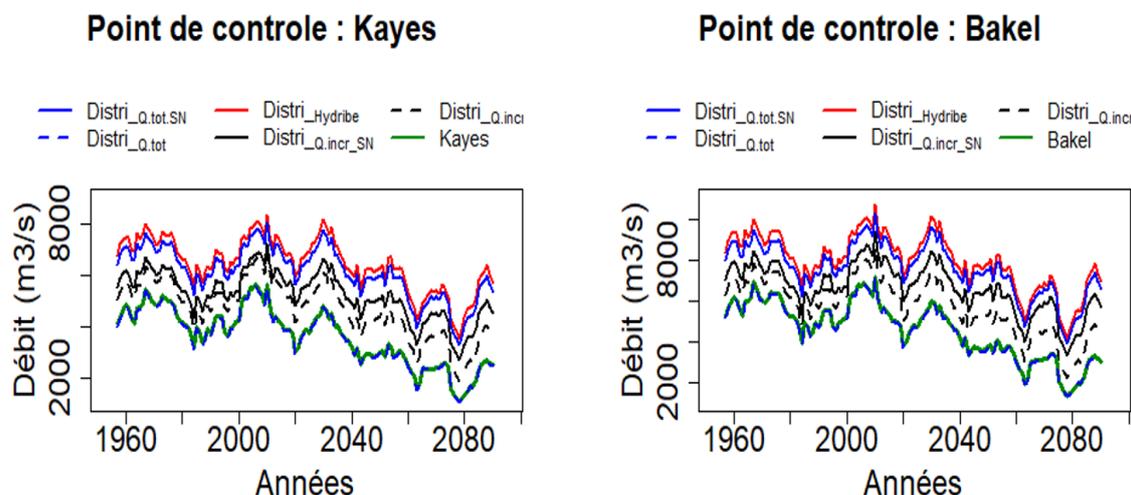


FIGURE C.1 – Comparaisons aux points de contrôle des méthodes de distributions des débits dans le BFS. Données présentées : débits annuels projetés pour le premier cluster de l’horizon 2040 (une moyenne glissante à 10 ans a été appliquée). En vert : Débits aux points de contrôle. En bleu : Résultats avec la méthode de distribution des débits totaux. En noir : Résultats avec la méthode de distribution des débits incrémentaux. En rouge : Résultats avec la méthode de distribution hybride. Les lignes continues représentent les résultats ou les débits négatifs ont été ramenés à 0. Les pointillés représentent les résultats ou les débits négatifs sont conservés tel-quel.

La méthode la plus robuste est la distribution des débits totaux, en conservant les débits négatifs (pointillés bleu ; superposition quasi-parfaite avec les débits du point de contrôle). Toutefois, en ramenant les débits négatifs à 0 (ligne bleu), les débits aux points de contrôle sont fortement sur-estimés. Par conséquent, la méthode qui (i)exclue les débits négatifs et qui (ii) est la plus proche des débits aux points de contrôle est **la distribution des débits incrémentaux**.

Il est intéressant de noter le point suivant : Puisque la distribution des débits totaux (en conservant les débits négatifs) superposent les débits aux points de contrôle, nous pouvons formuler l’hypothèse que les débits négatifs correspondent aux pertes de canaux, jusqu’ici non-quantifiées dans le BFS.

1. Les comparaisons pour tous les autres clusters donnent les mêmes résultats. Par conséquent, seul le premier cluster est présenté.

Annexe D

Données hydro-économiques et bénéfices nets des usages de l'eau dans le BFS

D.1 Le schéma de Développement Intermédiaire

D.1.1 L'hydro-électricité

Les capacités de stockage, les courbes de production hauteur/rendement ainsi que l'ensemble des caractéristiques des centrales hydro-électriques du BFS ont fait l'objet de plusieurs études approfondies, dont les résultats ont été colligés dans Tilmant and Pina (2018). Voici un résumé des principales caractéristiques des infrastructures qui ont été incorporées dans le scénario utilisé dans cette étude (scénario de développement intermédiaire du BFS) :

Noeud	Station	Stockage min (hm3)	Stockage max (hm3)	Capacité (MW)	Affluent
2	Koukoutamba	701	3600	281	Bafing
4	Boureya	2650	4750	161	Bafing
6	Manantali	4760	11300	200	Bafing
12	Gouina	0	0	140	Senegal
13	Félou	0	0	32	Senegal
16	Gourbassi	600	2100	25	Falémé

En accord avec Tractebel Engineering and GDF Suez International Power (2011), le coût marginal à court terme de l'électricité a été fixé de $80USD/MWh$.

D.1.2 La navigation du fleuve Sénégal

L'un des objectifs ciblé par le SDAGE (OMVS, 2011) est le développement de la navigation fluviale : *Les conditions nécessaires à ce développement incluent la garantie d'un tirant d'eau minimum à satisfaire et un débit minimal à satisfaire de $100 m^3/s$ entre Bakel et l'aval.*

Aussi, si un débit minimum de $100 m^3/s$ est observé à Richard Toll (après les prélèvement pour l'agriculture irriguée), le fleuve est alors navigable entre Richard Toll et

Ambidédi (Mali).

Toutefois, malgré l'importance que pourrais revêtir la navigation du fleuve pour désenclaver la région, trop peu d'informations sont disponibles pour attribuer une valeur économique à cette usage de l'eau. Aussi, la navigabilité est assimilée à un indicateur de performance (compris entre 0 et 1), traduisant le pourcentage de temps pour lequel le fleuve est navigable (100% correspondant à douze mois, 50% à 6 mois ...).

D.1.3 L'agriculture de décrue

L'agriculture de décrue est une agriculture traditionnelle qui profite principalement aux riverains de la basse vallée du fleuve Sénégal.

Grâce à leur modèle de propagation de crue, Lamagat and Bader (2003) ont établi des limnigrammes types, défini à Bakel, afin d'assurer une certaine surface pour l'agriculture de décrue (Figure D.1. Afin de garantir un potentiel cultivable en décrue de 50 000 ha, associé à une submersion de 25 à 30 jours des terres, nous admettons qu'un pulse de 4,5 km³ en septembre, à Bakel, est nécessaire.

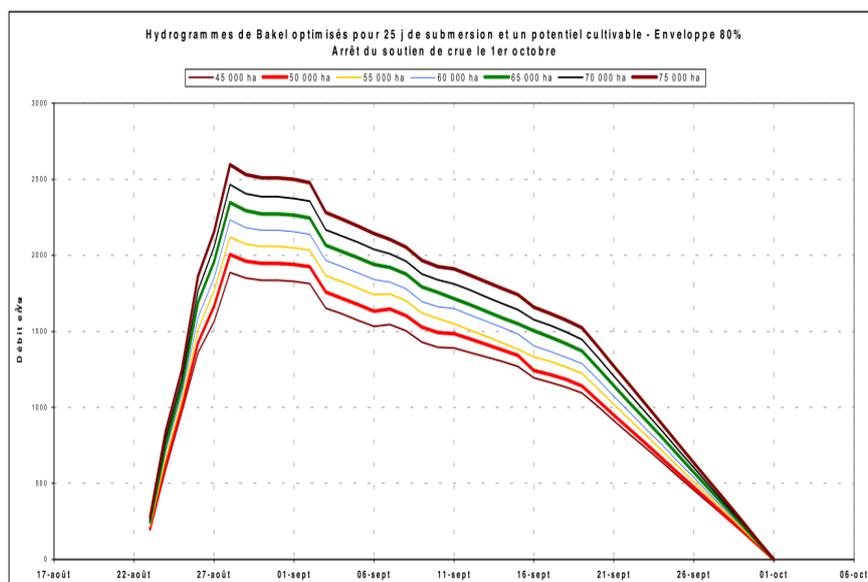


FIGURE D.1 – Limnigrammes types pour l'agriculture de décrue. Extrait de Lamagat and Bader (2003). L'objectif de 50 000 ha figure est rouge.

La principale variété concernée par l'agriculture de décrue est le riz. Aussi, les cultivateurs sont capable de dégager un revenu net de 750 USD par hectare.

D.1.4 La pêche

Le projet d'étude « Système Pêche » (Diouf et al., 1993) a mis en avant l'importance de secteur de la pêche sur l'économie locale. Historiquement, la pêche se concentre dans

la plaine inondable, le long du Sénégal, dans la basse vallée. Lors de la crue annuelle, la plaine inondable représente un habitat essentielle à la reproduction des espèces piscoles, ce qui permet de reconstituer le stock de poisson (Diouf and Bousso, 1988; Diouf et al., 1993). En se basant sur l'annexe 1 de Diouf et al. (1993), Tilmant and Pina (2018) ont compilé les prises annuelles dans la basse vallée, et ont établi une relation entre les prises annuelles et le volume de la crue (Figure D.2).

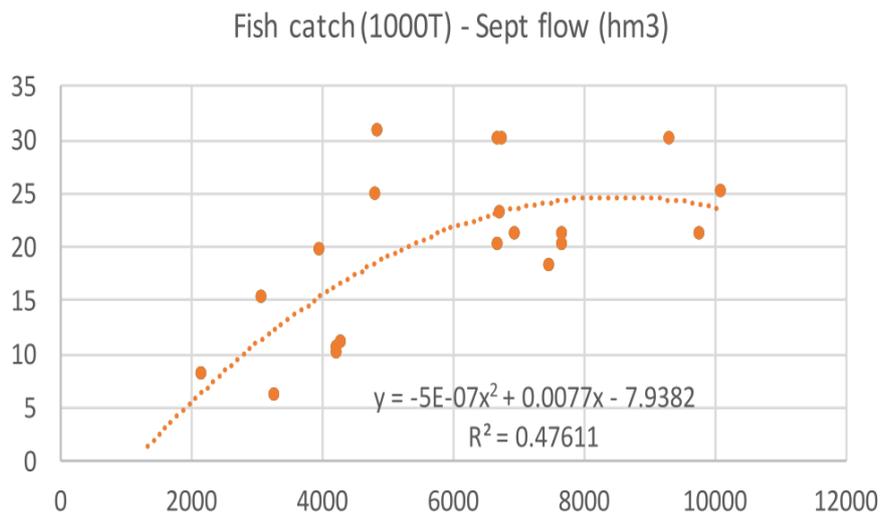


Figure 17. Fish catch in the SRB

FIGURE D.2 – Relation prise piscole et volume de la crue annuelle. Extrait de (Tilmant and Pina, 2018).

Cette courbe répond à l'équation $Prise = -5.10^{-7} * Volume_{Crue}^2 + 0.0077 * Volume_{Crue} - 7.9382$; avec les prises en *Ton*, et le volume annuelle de la crue en hm^3 . Le domaine de validité de cette équation est comprise entre 2000 et 10 000 hm^3 . Aussi, si la crue est inférieure à 2000 hm^3 , les bénéfices liés à la prise dans le fleuve sont considérés comme nul. En revanche, si la crue annuelle exède 8 000 hm^3 , alors les bénéfices sont considérés comme égaux à ceux générés par une crue de 8 000 hm^3 .

En parallèle, les réservoirs créent des stockages qui dynamisent le secteur de la pêche. Se basant sur le réservoir de Manantali, Kantoussan et al. (2014) ont mis en avant que les prises par an peuvent s'assimiler à 25g par hectare de surface libre et par an. Ces résultats ont été élargis aux réservoirs de Koukoutamba, Boureya et Gourbassi. La surface libre du réservoir de Diama est considérée comme un invariant, avec une surface égale à 353 km^2 , ce qui sous entend une prise annuelle fixe.

D.1.5 L'agriculture irriguée

Le SDAGE présente les caractéristiques des principaux périmètres irrigués du bassin du fleuve Sénégal actuels (2010), et futur (horizon de développement pour 255 000 ha en 2025). Ici, nous nous focalisons sur la demande en eau de l'agriculture irriguée pour 2025.

Superficie des périmètres irrigués.

Le tableau D.1 présente les surfaces des périmètres irrigués pour chacun des noeuds du modèle hydro-économique. Il est à noter que 87% d'entre eux se situent dans la basse vallée, le long du Sénégal, entre Bakel et Richard Toll.

Noeud	Surface (ha)
3	19 926
7	1 562
14	10 948
17	862
18	7 147
19	59 936
20	28 919
21	44 402
22	78 498
24	3 827
Total	255 327 ha

TABLE D.1 – Surfaces des périmètres irrigués par noeud du modèle hydro-économique pour le schéma de Développement Intermédiaire.

Besoins en eaux des cultures en climat de référence.

Le logiciel CropWat (Smith, 1992) de la Fao permet d'estimer les besoins en eaux des cultures. Dans le projet TCP précédent (Tilmant and Pina, 2018), les besoins en eau (IWR) ont été calculés sur la période de référence, avec les données de la base de données de ClimWat. CropWat possède de trois composantes :

- Une interface pour les données climatiques ;
- Une interface pour les données agronomiques ;
- Une interface pour les données inhérentes au sol.

Le tableau D.2 présente ces besoins en eaux en climat de référence.

Besoins en eaux des cultures sous climats futurs

Facteur d'ajustement ΔIWR Les IWR répondent à l'équation suivante : $IWR = f(ET_c, Pe)$, avec Pe , les précipitations efficaces ; et ET_c l'évapotranspiration des cultures.

Un ajustement peut être réalisé afin de calculer les IWR futurs, tel que $IWR_{fut} = IWR_{ref} * \Delta IWR$, avec ΔIWR le facteur d'ajustement.

Par conséquent, ΔIWR peut s'écrire de la manière suivante :

$$\Delta IWR = \frac{f(ET_c^{fut} - Pe^{fut})}{f(ET_c^{ref} - Pe^{ref})} \quad (D.1)$$

Une analyse de sensibilité sur les IWR vis-à-vis de deux paramètres climatiques (les précipitations efficaces et l'évapotranspiration potentielle) a été menée sur deux variétés

Noeud	Surface [ha]	Norm	Rendement J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
			[USD/T]											
3	9963	Culture hivernale divers	1000	200	320	360	440	440	400	360	360	360	320	240
3	9963	Riz hivernal	750	1225	1337	278	0	0	0	0	0	0	835	891
7	117	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1431	2560	1657	1581	226	0
7	1329	Culture hivernale divers	1000	476	761	857	1047	1047	952	857	857	857	761	571
7	117	Riz divers	750	0	2541	2353	1976	1788	753	0	0	0	0	0
14	425	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1431	2560	1657	1581	226	0
14	10502	Maïs	103	1058	1337	278	0	0	0	0	0	0	835	891
14	21	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
17	405	Maïs	1000	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
17	97	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1431	2560	1657	1581	226	0
17	360	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
18	3452	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1431	2560	1657	1581	226	0
18	2504	Maïs	103	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
18	557	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
18	35	Maïs	103	1058	1337	278	0	0	0	0	0	0	835	891
18	599	Riz	750	0	2541	2353	1976	1788	753	0	0	0	0	0
19	6500	Maïs	103	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
19	32420	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1419	2540	1644	1569	224	0
19	10278	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
19	10738	Riz	750	0	2544	2356	1979	1791	754	0	0	0	0	0
20	9727	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1638	2931	1897	1810	259	0
20	1028	Maïs	103	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
20	8498	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1519	2718	1759	1679	240	0
20	5845	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
20	3120	Riz	750	0	2879	2666	2239	2026	853	0	0	0	0	0
20	15064	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1638	2931	1897	1810	259	0
21	26318	Canne à sucre	1100	1341	1118	1788	2012	2459	2235	2012	2012	2012	1788	1341
21	83	Maïs	750	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
21	2331	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
21	606	Riz	750	0	3191	2955	2482	2245	945	0	0	0	0	0
22	56872	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1638	2931	1897	1810	259	0
22	1849	Maïs hivernal	103	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
22	6548	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
22	13228	Riz	750	0	3191	2955	2482	2245	945	0	0	0	0	0
24	353	Maïs hivernal	103	0	0	0	0	0	1110	1064	1203	1110	139	0
24	2746	Riz hivernal	750	0	0	0	0	0	1638	2931	1897	1810	259	0
24	485	Maraiçage	5033	857	1428	2665	666	0	0	0	0	0	952	857
24	242	Riz	750	0	3191	2955	2482	2245	945	0	0	0	0	0

TABLE D.2 – Besoins en eau des cultures du BFD sous climat futur. La mention « Maraiçage » renvoie à une polyculture de tomates et oignons. D’après Tilmant and Pina (2018).

présentes dans le BFS : le maïs et la canne à sucre. Elle a été réalisée avec une paramétrisation du sol et des caractéristiques des variétés fixes.

Il en ressort que, pour ces deux variétés, une linéarité apparait entre (i) les IWR et (2) l'ETP0 et les précipitations. Aussi, nous assumons cette linéarité existe pour l'ensemble des cultures. Une illustration de cette linéarité est présentée en figure D.3.

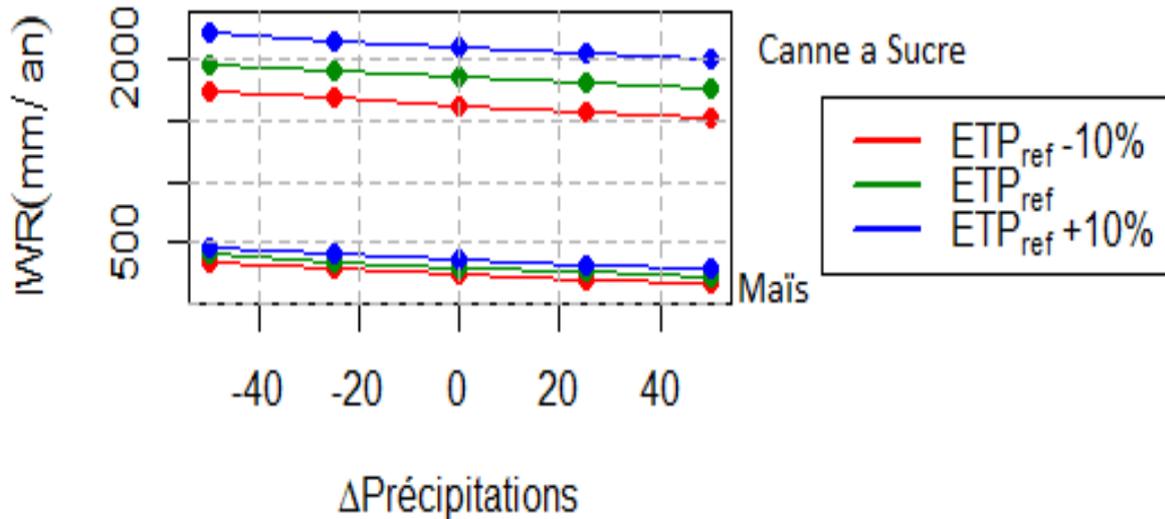


FIGURE D.3 – Etude de sensibilité des IWR réalisée sur Cropwat 8.0 pour deux variétés : le maïs et la canne à sucre. Mise en évidence de la linéarité entre les IWR et les paramètres climatiques (ETP0 et P_e), en réalisant l'hypothèse que les coefficients de cultures (K_c) sont des invariants.

Et du fait de cette linéarité assumée, nous obtenons :

$$\Delta IWR = \frac{ET_c^{fut} - P_e^{fut}}{ET_c^{ref} - P_e^{ref}} \quad (D.2)$$

En faisons l'approximation $ET_c \sim ETP_0$; nous obtenons :

$$\Delta IWR = \frac{ET_0^{fut} - P_e^{fut}}{ET_0^{ref} - P_e^{ref}} \quad (D.3)$$

Avec ETP_0 , l'évapotranspiration potentielle.

Facteur de correction Initialement, les IWR en climat de référence ont été calculés à partir de la base de données de ClimWat. Aussi, une légère différence apparait entre (i) les valeurs d'ETP0 de ClimWat, et (ii) les valeurs d'ETP0 des scénarios climatiques sur la période de référence. Il en est de même pour les précipitations efficaces (Précipitations ClimWat vs Précipitations des scénarios climatique sur la période de référence). Des facteurs de corrections (a et b) ont donc été calculé à l'échelle mensuelle respectivement pour

l'ETP0 et les précipitations efficaces. Nous obtenons donc :

$$\Delta IWR = \frac{a * ET_0^{fut} - b * Pe^{fut}}{a * ETP_0^{ref} - b * Pe^{ref}} \quad (D.4)$$

Avec :

- ETP_0^{ref} et ETP_0^{fut} , les valeurs d'évapotranspiration potentielle en climat de référence et en climat futur respectivement ;
- Pe^{ref} et Pe^{fut} , les valeurs de précipitations efficaces en climat de référence et en climat futur respectivement ;
- a et b les facteurs de corrections, dont les valeurs sont données dans le tableau D.3.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Coef. Corr ETP0 (a)	1.105	1.105	1.124	1.092	1.118	1.194	1.133	1.082	1.057	1.1	1.156	1.123
Coef. Corr Préc. Eff (b)	1.556	1.069	0.75	1.25	1.2	0.885	0.974	1.02	1.009	1.171	1.271	0.515

TABLE D.3 – Table des coefficients de correction Climwat/scénarios climatiques pour le calculs des IWR

Extractions des valeurs de ETP_0^{ref} , ETP_0^{fut} , Pe^{ref} et Pe^{fut} Pour les valeurs ETP_0^{ref} et de Pe^{ref} sont extraites des bases de données de climat de références (du CRU sur la période 1960-2016 et du SIEREM sur la période 1960-1998 pour l'évapotranspiration potentielle et les précipitations respectivement). Seules les cellules dans la basse vallée ont été prises en comptes (ce qui correspond à la majorité (87%) des périmètres irrigués). Un exemple est donné dans la figure D.4.

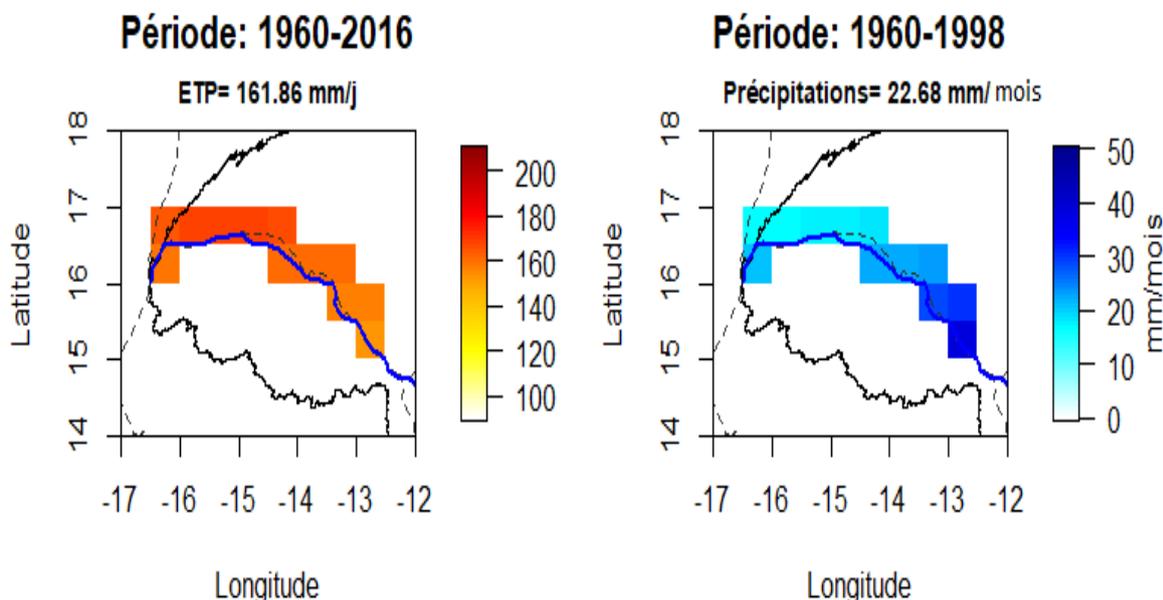


FIGURE D.4 – Exemple d'extraction des paramètres climatiques le long du Sénégal pour l'ajustement des IWR ; à gauche : pour l'ETP (période de référence, données du CRU) , à droite : pour les précipitations efficaces (période de référence, données du SIEREM) .

Similairement aux données des scénarios climatiques sur la période de références, seules les cellules le long du fleuve ont été prises en compte. Pour l'horizon 1, la période s'étend

de 2031-01-01 au 2060-12-31. Pour l'horizon 2, la période s'étend de 2066-01-01 au 2095-12-31. La figure D.5 présente les valeurs mensuelles de ΔIWR pour les horizons 1 et 2 et leurs cinq clusters.

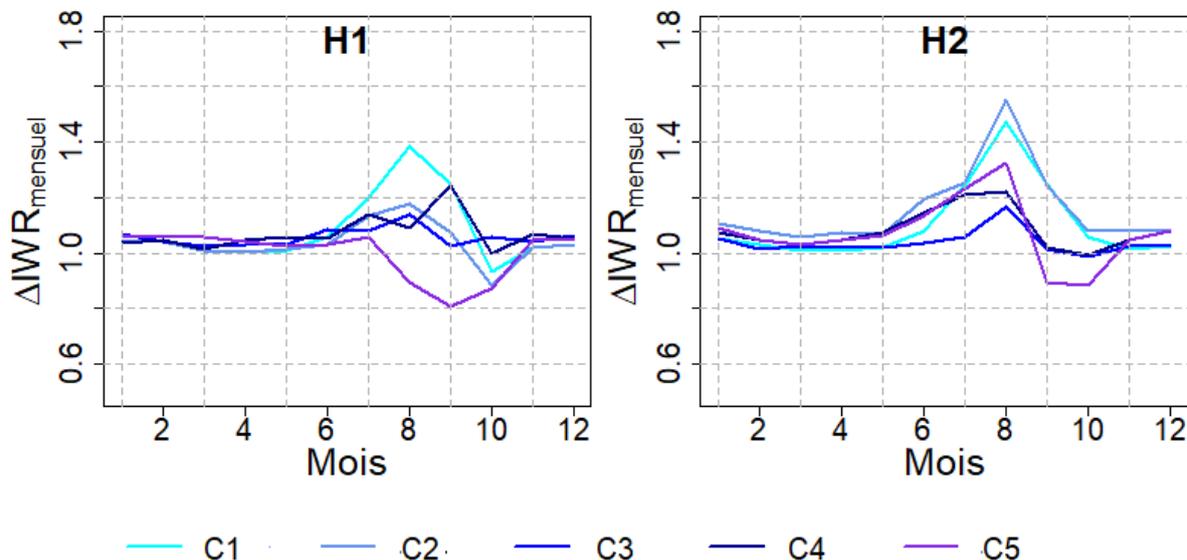


FIGURE D.5 – Valeurs mensuelles de ΔIWR pour l'ajustement des besoins en eau pour les cinq clusters de l'horizon 1 et les cinq cluster de l'horizon 2.

D.2 Le schéma de Développement Complet

Pour ce schéma, tous les secteurs sont identiques à ceux du schéma de Développement Intermédiaire, exception faite de l'hydro-électricité et de l'agriculture irriguée.

Pour l'hydro-électricité, nous avons les centrales listées dans le tableau D.2.

Noeud	Station	Stockage min (hm3)	Stockage max (hm3)	Capacité (MW)	Affluent
1	Balassa	0	0	181	Bafing
2	Koukoutamba	701	3600	281	Bafing
4	Boureya	2650	4750	161	Bafing
5	Bindougou	879	2000	53	Bafing
6	Manantali	4760	11300	200	Bafing
8	Boufofora	140	29	Bakoye	
9	Marela	24.1	3000		24
10	Badoumbe	200	10000	70	Bakoye
12	Gouina	0	0	140	Senegal
13	Félou	0	0	32	Senegal
16	Gourbassi	600	2100	25	Falémé

Pour la superficie des périmètres irrigués est donnée dans le tableau ci-dessous.

Noeud	Surface (ha)
3	19 926
7	1 562
14	11 684
17	1 431
18	11 863
19	99 494
20	46 843
21	73 708
22	130 307
24	6 352
Total	402 435 ha

TABLE D.4 – Surfaces des périmètres irrigués par noeud du modèle hydro-économique pour le schéma de Développement Complet.

Annexe E

Revue bibliographique

E.1 Introduction : Organisation de la revue bibliographique

Au cours du XX^{ème} siècle, le Bassin versant du Fleuve Sénégal (BFS) a connu une baisse drastique des précipitations durant les décennies de 1970, 1980 et 1990. Depuis lors, les causes de cette péjoration climatique ont fait l'objet de nombreuses recherches (comme la campagne AMMA, par exemple). En parallèle, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a souligné l'exposition accrue du Sahel aux changements climatiques.

Pour que la Gestion Intégrée de la Ressource en Eau (GIRE)¹ du BFS soit pérenne, il est primordial d'intégrer l'évolution climatique et les risques associés pour une région aussi exposée que l'est le Sahel. Le projet « » a pour objectif de réaliser une analyse des vulnérabilités en intégrant les changements climatiques. Aussi, l'objet de cette présente annexe est :

- de dresser l'état des lieux des connaissances scientifiques sur le climat, ainsi que sur l'hydrologie du BFS.
- de proposer une synthèse des études portant sur le changement climatique, son impact sur l'hydrologie du BFS et les vulnérabilités inhérentes des usages.

Aussi, la première partie dresse cet état des lieux sur les avancées en matière de recherche en climatologie et en hydrologie. Y seront détaillés d'une part (1) les éléments climatologiques structurant au Sahel ainsi que les efforts en modélisation de l'atmosphère et les sources d'incertitudes ; et d'autre part (2) les caractéristiques hydrologiques et le travail de modélisation réalisé sur le BFS. La deuxième partie est une compilation des études faisant référence aux changements climatiques (tendances pluridécennales des températures, des précipitations, ...), aux projections hydrologiques pour le BFS (évolution de la disponibilité en eau), et aux vulnérabilités des usages de l'eau.

1. En 1992, puis en 2000, la conférence de Dublin et le Partenariat Mondial de l'eau ont fixé les grands axes de la GIRE.

E.2 Les avancées de la recherche : résumé des connaissances scientifiques en climatologie et en hydrologie

Afin de bien discerner les vulnérabilités et les incertitudes avec lesquelles les politiques de la gestion de l'eau doivent composer, il est important d'identifier les sources et les origines des incertitudes. Aussi, cette section donne un condensé des éléments clé en climatologie et hydrologie au Sahel. La section E.2.1 a pour vocation de rappeler les grandes structures climatiques présente au Sahel (paragraphe E.2.1), la variabilité de la mousson à différentes échelles de temps (paragraphe E.2.1), ainsi que les efforts de modélisation et les sources d'incertitudes inhérentes (paragraphe E.2.1). La section E.2.2 reprend les travaux réalisés sur la variabilité hydrologique du fleuve Sénégal (paragraphe E.2.2) ainsi qu'un état des lieux des modèles hydrologiques et hydro-économiques utilisés dans le BFS (E.2.2).

E.2.1 Éléments climatologiques structurant au Sahel

Bien que des initiatives internationales eu été menées², les recherches sur la compréhension du système climatique en Afrique de l'Ouest ont évolué relativement lentement jusqu'au années 2000. Dans l'optique d'insuffler un nouvel élan, et en réponse aux lacunes de connaissances mis en avant par la sécheresse pluridécennale des années 1970, 1980 et 1990, le projet international AMMA, lancé en 2002, a permis de nombreuses avancées dans la compréhension de la mousson en Afrique de l'ouest et au Sahel (Lafore et al., 2011, 2012).

Les grandes structures climatiques au Sahel

Les caractéristiques climatiques régionales en Afrique de l'Ouest sont directement liées à la mousson. La mousson est un système couplé atmosphère-continent-océan, intégrant un grand nombre de processus, pour des échelles spatiales et temporelles très variées. Le schéma de Lafore et al. (2012), donné en figure E.1 en explicite les composantes principales en trois dimensions (Roehrig, 2010)³.

- La zone de convergence inter-tropicale : structure principale, c'est une zone de convection profonde humide, et donc associée aux fortes précipitations de la mousson.
- le Golf de Guinée : caractérisé par une température de surface (SST) peu modulable au cours de l'année (24 à 27°C), il joue un rôle important dans les contrastes de température océan/continent (Hastenrath, 1985).
- La dépression Saharienne : siège d'une convection sèche profonde dans une Couche Limite Atmosphérique instable (d'environ 4km en journée). L'Harmattan est un flux sec qui en résulte, dirigé vers le sud.
- Les basses couches de l'atmosphère sont caractérisées par :

2. Entre autres, l'expérience GAPE en 1974, et les campagnes spécifiques COPT81 (Sommeria and Testud, 1984) et Hapex-Sahel (Goutorbe et al., 1994).

3. Pour de plus amples détails sur ces structures, référez vous aux revues de Hall and Peyrillé (2006); Canut (2010); Lafore et al. (2012).

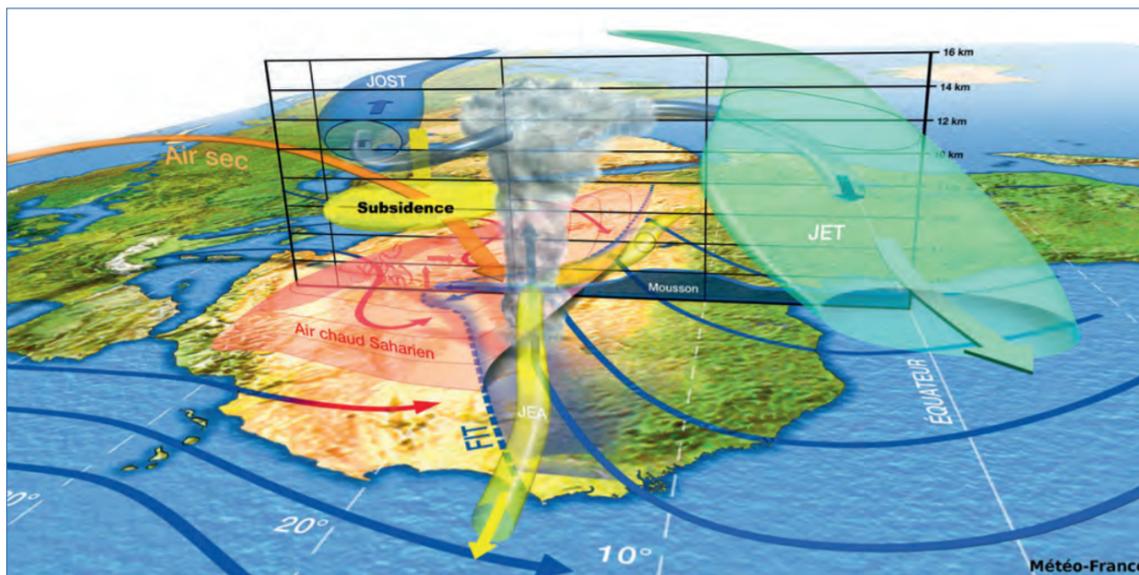


Figure 1 - Schéma synthétisant les composantes essentielles de la mousson de l'Afrique de l'Ouest.

FIGURE E.1 – Composantes climatiques principales de la mousson au Sahel. Source : Lafore et al. (2012)

- Le flux de mousson : les alizés, frais et chargés d'humidité. Créés par la circulation de Hadley, ils se propagent vers le Nord à partir du golf de Guinée .
- L'Harmattan : chaud et sec, il est issu de la dépression saharienne, et se propage vers le sud. Sa rencontre avec le flux de mousson forme Front Inter-Tropical (FIT).
- En altitude, de forts courants s'instaurent :
 - Le Jet d'Est Africain : ayant pour origine le fort gradient de température et d'humidité entre l'Harmattan et les alizés (Cook, 1999).
 - Le Jet d'est Tropical : issue de la circulation de la cellule de Walker et du dégagement de chaleur de la mousson indienne, qui atteignant l'Afrique, se voit réactivé par l'ITCZ (Hastenrath, 1985).
 - Le Jet d'Ouest Sub-Tropical : structure inhérente à la cellule de Hadley et au flux de retour en altitude.

La mousson : Variabilité interannuelle et saisonnière au Sahel

La mousson est le principal phénomène qui conditionne le climat en Afrique de l'Ouest. L'un des objectifs premiers de la campagne AMMA fut d'apporter des éléments de compréhension de la dynamique climatique au Sahel à l'échelle saisonnière et interannuelle.

Variabilité interannuelle de la mousson La variabilité interannuelle de la mousson a été abordée selon deux paradigmes complémentaires. Bien que les interactions surface-atmosphère soient importantes (Zeng et al., 1999; Canut, 2010; Lafore et al., 2012; Charney et al., 1975), les températures de surface de l'océan en sont le principal facteur (Douville,

2006; Giannini et al., 2008; Lafore et al., 2012).

Entre autres, les travaux de Janicot et al. (1998) et de Peyrillé et al. (2007) ont mis en avant que la sécheresse pluri-décennale des années 1970 et 1980 était attribuable à une anomalie positive de SST dans le golf de Guinée. Par ailleurs, une anomalie positive de SST de la méditerranée est capable de moduler positivement les précipitations au Sahel (Fontaine et al., 2010), alors que le couvert végétal agit comme un phénomène amplificateur des précipitations, via le recyclage de l'humidité (Nicholson, 2000).

Variabilité saisonnière de la mousson Au premier ordre, la mousson va suivre l'évolution du forçage radiatif (Nicholson and Grist, 2001). Durant les mois de janvier à mai, l'ITCZ se place sur une position méridionale centrée sur l'équateur. Le « saut de mousson » correspond à la migration rapide de l'ITCZ au cours du mois de juin, jusqu'à une position de 10° Nord (Sultan and Janicot, 2000). Le retrait de la mousson, initialisé au mois de septembre, est quant à lui plus graduel.

Cette migration de l'ITCZ s'accompagne de modifications dans la direction des vents en surface, via une évolution de la position de la dépression saharienne entre mars et mai (Lavaysse et al., 2009). La formation d'une langue froide dans le golf de Guinée en juin renforce le gradient de température océan/continent (Wauthy, 1983; Roehrig, 2010), ce qui entraînerait une accélération des alizés, favorisant la migration de l'ITCZ vers le nord.

Incidence des variabilités temporelles et spatiales de la mousson : Observations météorologiques au Sahel Bien qu'il se soit renforcé depuis les années 50, le réseau de mesures des précipitations en Afrique de l'Ouest reste limité et vétuste, d'où des séries temporelles hydrométéorologiques incomplètes. Cependant, leur répartition a mis en avant que les cumuls annuels de précipitations (Figure E.2) montrent un gradient méridional prononcé en Afrique de l'Ouest, directement lié à la migration de la mousson (L'Hôte and Mahé, 1996; Nicholson, 2013).

Au cours du XX^{ème}, le Sahel a récemment connu de fortes modifications de la pluviométrie à l'échelle pluridécennale. De nombreux auteurs ont étudié les variations des précipitations passées, en ciblant particulièrement la période 1950-2000 (Carbonnel and Hubert, 1992; Le Barbé et al., 2002; Ardoin-Bardin, 2004), ou plus largement l'ensemble du XX^{ème} siècle (L'Hôte et al., 2002; Dacosta et al., 2002; Paturol et al., 2004; Nicholson, 2013; Descroix et al., 2015). Leurs résultats sont unanimes (figure E.3) :

- La période précédant 1950 est assimilée à une pluviométrie moyenne
- La période 1950-1970 est qualifiée de « excédentaire », avec un surplus de précipitations pouvant atteindre +20%.
- La période 1971-1995 constitue un épisode sec de grande ampleur (de -10% à -40% selon les zones), avec de larges conséquences socio-économiques.
- La période post 1995⁴, avec une reprise de la précipitation (Bodian, 2014).

4. Cette date est modulable en fonction de la zone étudiée en Afrique de l'Ouest.

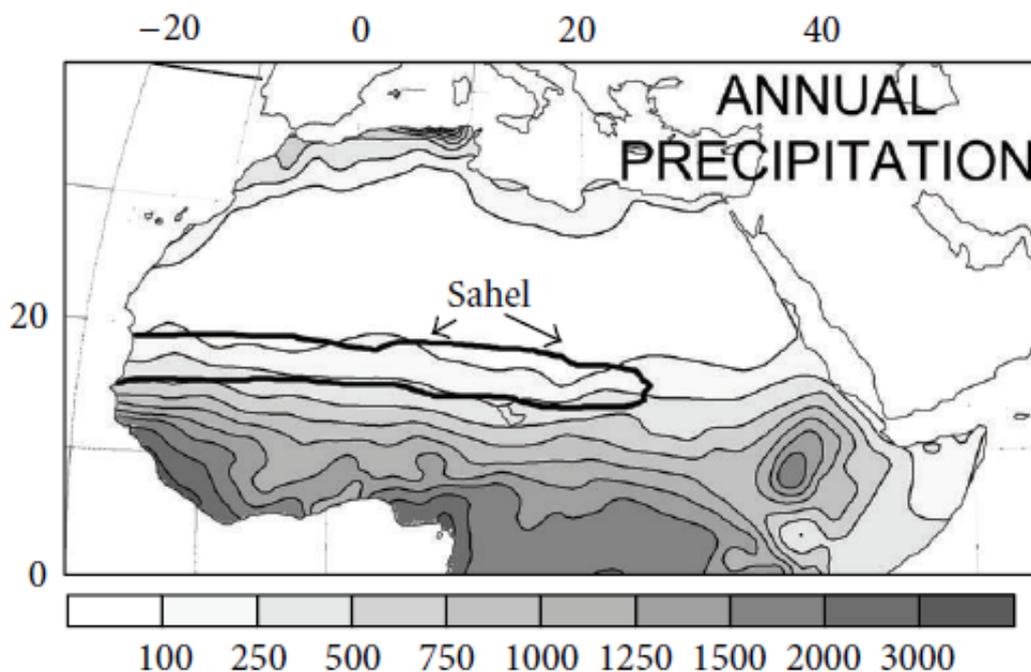


FIGURE E.2 – Moyenne des précipitations annuelles en Afrique de l’Ouest, extrait de (Nicholson, 2013)

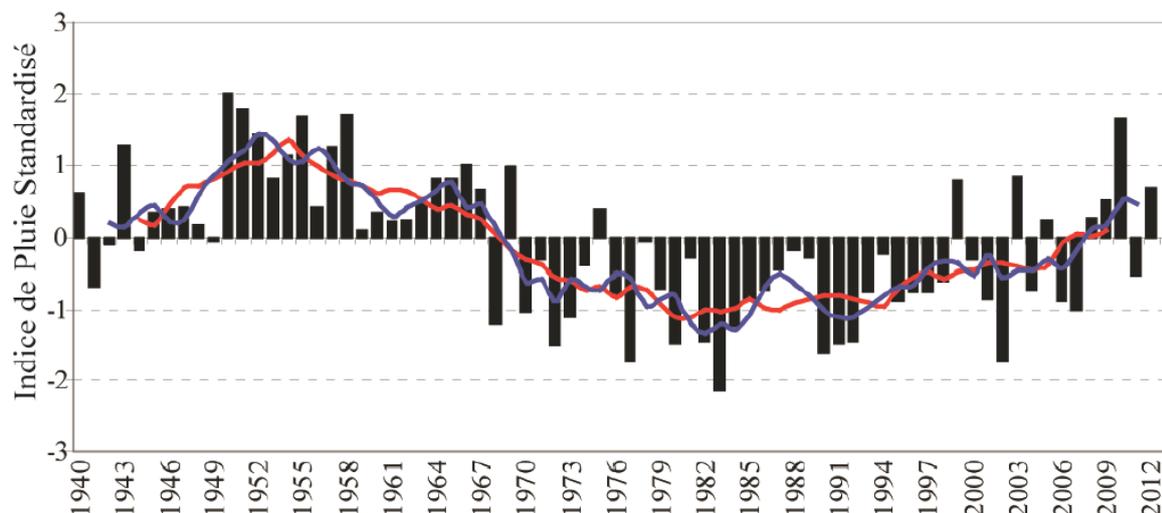


FIGURE E.3 – Variation temporelle des indices standardisés des pluies selon la méthode de Ali and Lebel (2009); Extrait de (Bodian, 2014).

La longue période sèche est un élément structurant dans l'orientation des recherches scientifiques en Afrique de l'Ouest (compréhension de la mousson, représentation de la mousson dans les modèles). Elle a notamment montré la grande vulnérabilité des systèmes face à des changements hydrométéorologiques.

Efforts de modélisation et sources d'incertitudes inhérentes

Le programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) a permis de coordonner, à l'échelle du globe, les efforts scientifiques de modélisation du climat actuel et futur. Les projets CMIP5 (Taylor et al., 2012) et CORDEX (Gutowski et al., 2016) ont facilité l'accès aux projections climatiques issues d'un grand nombre de Modèles de Circulation Globale (GCMs) et Régionale (RCMs). Aussi, la majorité des études relatant du changement climatique dans le BFS s'appuie sur des modèles faisant partie de ces deux ensembles.

Les Modèles de Circulation Globale (GCMs) : Les études de Cook and Vizy (2006), Xue et al. (2010) et Xue et al. (2016) se sont focalisées sur la validation et la crédibilité des Modèles de Circulation Globale (GCMs) pour évaluer la mousson en Afrique de l'Ouest. Elles ont montré que la distribution méridionale de la mousson est mieux reproduite dès lors que les modèles incluent un schéma de SST dûment représentée. Toutefois, lors de la publication du quatrième rapport du GIEC, très peu de GCMs étaient capable de représenter les grandes caractéristiques de la mousson au Sahel. Aussi, le GIEC a lui-même conclu que les GCMs ne pouvaient pas encore de simuler correctement le climat d'Afrique de l'Ouest (IPCC, 2007b).

Les biais présents dans les GCMs sont à la fois visibles sur la dynamique de l'atmosphère et sur les précipitations. La majorité des modèles ne simulent pas une bonne intensité du Jet Est Africain, et du Jet subtropical (Xue et al., 2010). Bien que le cycle annuel des précipitations soit reproduit, un biais persiste sur son amplitude, sa spatialisation (souvent la mousson ne migre pas assez vers le nord) et sur les maximas (Cook and Vizy, 2006; Xue et al., 2016; Dosio and Panitz, 2015). Parmi les principales sources d'incertitudes, sont notamment citées le degré de complexité des couplages atmosphère/océan/surface, la représentation de la convection (explicite vs paramétrisation, nature du schéma utilisé), et les représentations des processus de rétroactions (Nicholson and Grist, 2001; Hall and Peyrillé, 2006; Lafore et al., 2011, 2012). De plus, la taille des mailles et la résolution temporelle des GCMs représentent un frein à la prise en compte des processus de petites échelles inhérents à la dynamique de la mousson.

Les Modèles de Circulation Régionale (RCMs) : Quant à eux, les modèles de circulation régionale (RCMs) sont généralement plus proches des observations. Les performances des RCMs de l'ensemble CORDEX ont été évalués par de nombreux auteurs (Camara et al., 2013; Gbobonyi et al., 2014; Mariotti et al., 2014; Hernández-Díaz et al., 2013; Nikulin et al., 2012; Paxian, 2016; Kim et al., 2014; Mounkaila et al., 2014). Pris individuellement, les RCMs reproduisent mieux les précipitations (moyennes annuelles et saisonnières) que les GCMs. Cependant, des biais importants sur l'amplitude et sur la spatialisation peuvent apparaître (jusqu'à $\pm 50\%$). Les auteurs sus-mentionnés mettent

en avant que les moyennes multi-modèles sont plus performantes car les biais des RCMs se neutralisent mutuellement (Camara et al., 2013; Gbobonyi et al., 2014; Mariotti et al., 2014). Les principales sources d'incertitudes sont à l'instar de celles des GCMs, auxquelles s'ajoute la représentation de la couche limite (cyclicité diurne, humidification de la moyenne troposphère, intensité et profondeur de la convection, ...).

E.2.2 Éléments Hydrologiques clés du BFS

La morphologie du fleuve Sénégal et de son bassin, ses caractéristiques en termes d'infrastructures et de prélèvements, sont bien documentés dans les monographies du fleuve (Orstom, 1974; Bader et al., 2014) et le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, SDAGE (OMVS, 2011).

Variabilité hydrologique du BFS

La partie méridionale du BFS, le Fouta Djallon, est considérée comme « le chateau d'eau » du BFS (OMVS, 2011), alors que la partie septentrionale est presque désertique. Aussi, une zonalité de la pluviométrie apparait clairement (Figure E.4 et tableau E.1), et l'évolution spatiale du couvert végétal s'y superpose (Bader et al., 2014).

Domaine	Précipitations (mm/an)	Températures	Humidité	Saison des pluies
Guinéen	> 1 500	T = 22/24° C	H > 50 %	8 mois
Sud soudanien	1 500 < P > 1 000	T > 27° C	H > 50 %	6 à 8 mois.
Nord soudanien	1 000 < P > 500	T > 27° C	H < 50 %	4 à 6 mois
Sahélien	P < 500	T > 30° C	H ≈ 50%	3 mois

TABLE E.1 – Caractéristiques climatiques pour les principaux domaines du BFS. D'après OMVS (2013b) et Bader et al. (2014)

Variabilités temporelles des débits Alors que le BFS est une zone semi-aride⁵, les indices standardisés des précipitations (McKee et al., 1993) traduisent une sécheresse modérée entre 1970 et le début des années 2000 (Faye et al., 2015b).

Cette situation a entraîné une diminution des écoulements dans l'ensemble du BFS, avec une diminution clair du cumul annuel des débits (Figure E.5). Aussi, la variabilité climatique décennale se répercute directement sur les débits du Sénégal et de ses affluents, et leur diminution est largement amplifiée par rapport aux précipitations (Faye et al., 2015b). Aussi, Bodian et al. (2013) met en avant une évolution des coefficients de tarissement, ce qui traduit une plus grande sollicitation des réserves d'eau contenues dans les nappes phréatiques durant les décennies 1970, 1980 et 1990.

De plus, les tests d'homogénéité et de ruptures de Mann-Kendall et de Pettitt (1979), réalisés sur le BFS par Hubert et al. (2007) et Faye et al. (2015a), montrent clairement que les changements climatiques et l'anthropisation du bassin invalident toutes approches

5. Visible sur l'indice d'humidité climatique, présenté dans Willmott and Feddema (1992).

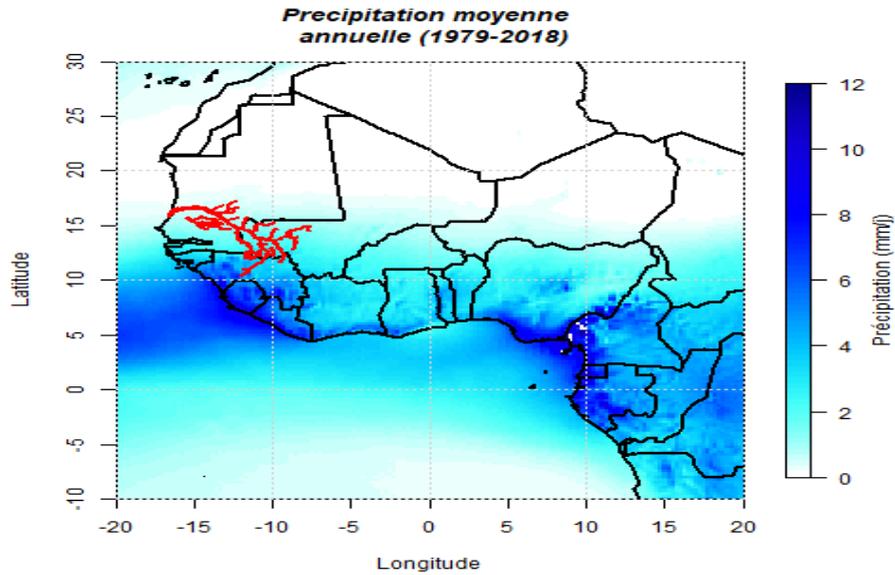


FIGURE E.4 – Précipitations annuelles moyennes sur le BFS. 1. Domaine Guinéen, 2. Domaine Sud soudanien, 3. Domaine Nord Soudanien et 4. Domaine Sahélien. En rouge : le réseau hydrographique du BFS. En noir : contour du bassin versant. Sources : Précipitations totale, ERA5, 1978-2018, résolution : 0.25x0.25.

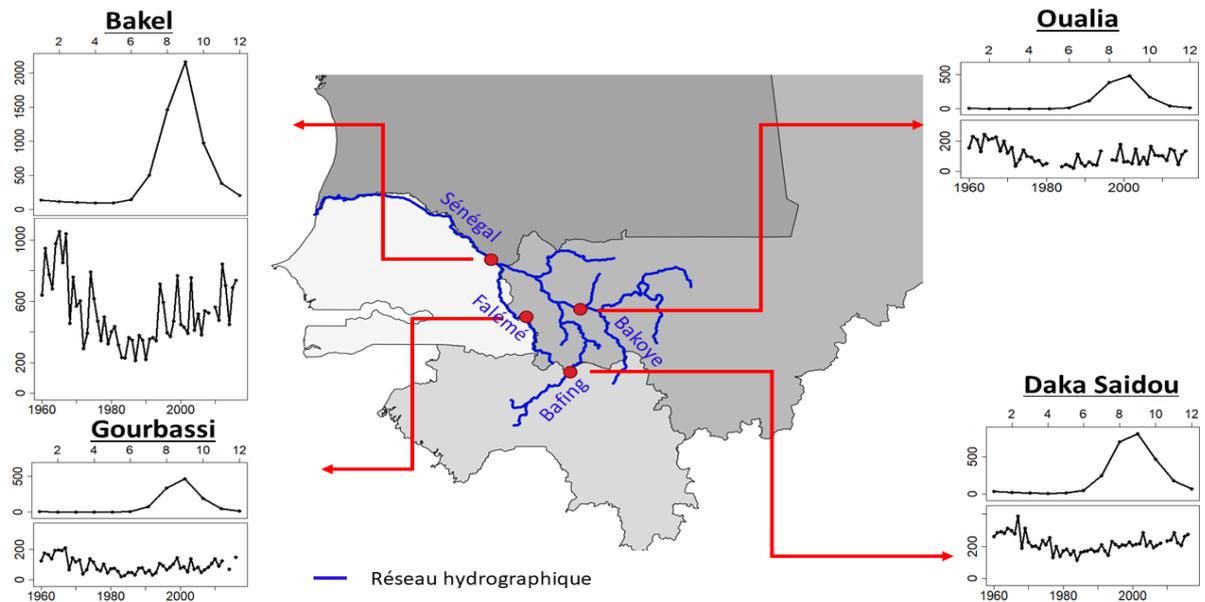


FIGURE E.5 – Pour les stations de Bakel (Sénégal), Gourbassi (Falémé), Daka Saidou (Bafing) et Oualia (Bakoye) : (1) Débits mensuels moyens en m^3/s et (2) Débits annuels moyens (1960-2016); Sources : données mensuelles, OMVS (période : 1960-2016).

statistiques d'évaluation des risques basées sur l'homogénéité des séries hydroclimatiques.

A l'échelle saisonnière, les hydrogrammes de l'ensemble des stations du BFS présentent les mêmes caractéristiques : une crue de juillet à octobre, et une période d'étiage, novembre à juin (Figure E.5). La construction des barrages à importantes capacités ont particulièrement modifié les débits à l'échelle mensuelle (Bodian, 2011).

Les efforts de modélisation en hydrologie et hydro-économie

La modélisation hydrologique se heurte au problème de la rareté des données dans un bassin partiellement jaugé. Aussi, la plupart des modèles hydrologiques ayant été appliqués au BFS sont des modèles conceptuels pluies/débits. Le tableau E.2 liste les modèles hydrologiques et hydro-économiques utilisés pour l'étudier.

Aussi, le modèle GR2M est le populaire de part sa simplicité et sa robustesse. Une version de ce modèle a aussi été appliquée de manière pseudo-discrétisée, en reprenant la grille de GCMs (Ardoin-Bardin et al., 2009). Les modèles de Yates et WBM présentent des performances similaires et moindre respectivement que le modèle GR2M. Le modèle spatialisé d'Andersen et al. (2001) présente pour limite principale le manque de données pour une calibration de qualité afin d'étudier de petits bassins versants. Il est à noter que les modèles de propagation de crue de Lamagat (Lamagat, 1987) et tarrissement ont été utilisés afin d'estimer les débits sur certaines sections du Sénégal et de ses affluents lorsque les chroniques de débits étaient incomplètes (Bader et al., 2014). Ce modèle de propagation a aussi permis de représenter fidèlement la propagation des écoulements entre le lit mineur et le lit majeur dans la vallée (Bader et al., 2017).

Du côté de la modélisation hydro-économique, peu de travaux ont été menés sur le bassin du fleuve Sénégal. Le modèle WEAP a permis d'étudier les impacts d'une potentielle diminution de la ressource en eaux (Artelia, 2018), quand Tilmant and Pina (2018) explorent des scénarios alternatifs de la gestion de l'eau via la « stochastic dual dynamic programming ».

E.3 Changements climatiques : tendances climatiques et hydrologiques, vulnérabilités

Ce section a pour objet les tendances climatiques et hydrologiques (section E.3.1) ainsi que les vulnérabilités vis-à-vis des changements climatiques dans le BFS (section E.3.2).

E.3.1 Les tendances hydro-climatiques dans le BFS

Dans son rapport de 2014, le GIEC donne les grandes lignes de l'évolution du climat pour l'horizon proche (2016-2035) et la fin XXI^{ème} siècle (2081-2100). Ces résultats sont obtenus à partir d'un ensemble de GCMs faisant partie du CMIP5 (Taylor et al., 2012),

Modèle	Type	Référence	Fonctionnement	Utilisé dans les études suivantes
Les modèles hydrologiques				
GR2M	Conceptuel pluie/débit	Ardoin-Bardin (2004)	$Q = f(P, ETP)$, et calage des paramètres (capacité du réservoir, et fonction de production)	Ardoin-Bardin (2004); Ardoin-Bardin et al. (2005); Paturol et al. (2007); Bodian (2011); Bodian et al. (2013, 2015, 2016).
GR4J	Conceptuel pluie/débit	Perrin et al. (2003)	$Q = f(P, ETP)$, et calage de 4 paramètres	Bodian et al. (2018).
Yates	Conceptuel pluie/débit	Yates (1997)	$Q = f(P, ETP)$ et calage d'un paramètre (stock d'Humidité)	Paturol et al. (2003).
Water Balance Model	Conceptuel pluie/débit	Conway and Jones (1999)	$Q = f(P, ETP, HumiditeSol)$ et calage d'un paramètre (stock d'Humidité)	Paturol et al. (2003).
MPI-HM	Modèle distribué à base physique	Hagemann and Gates (2003)	$Q = f(drainge, runoff)$	Paturol et al. (2003).
Mike-SHE	Modèle distribué à base physique	Refsgaard and Storm (1995)	Schéma physique nécessitant un forçage atmosphérique (GCM), une occupation des sols et une représentation de la végétation.	Andersen et al. (2001).
Lamagat	Propagation de crue	Lamagat (1987)	Voir Lamagat (1987).	Bader et al. (2017).
Les modèles hydro-économiques				
Simulsen	Aide à la gestion d'un barrage	Bader et al. (2003), adapté de l'IRD	Représentation en noeud et arc du réseau hydrographique, et édition de règles de gestion.	Bader et al. (2003)
WEAP	Logiciel de planification et allocation	Raskina et al. (1992)	Représentation en noeud et arc du réseau hydrographique, et édition de règles de gestion.	Artelia (2018), Thiam (2016)
SDDP	Méthode d'optimisation d'allocation		Optimise une fonction mathématique regroupant les aspects à traiter	Raso et al. (2017), Tilmant and Pina (2018).

TABLE E.2 – Liste des modèles hydrologiques et hydro-économiques utilisés pour étudier le BFS.

pour différentes trajectoires socio-économiques différentes (RCP⁶). Même si les résultats des modèles peuvent être différents les uns des autres après corrections⁷, le GIEC considère que les modèles climatiques ont tous un degré de réalisme égal (GIEC, 2014). Ces différences peuvent être importantes, et sont par conséquent sources d'incertitudes.

Puisque les problématiques de gestion de l'eau se posent à des échelles plus fines que les mailles des GCMs, les projections des RCMs semblent plus appropriées à l'étude de l'impact des changements climatiques.

Dans la littérature scientifique, les modèles climatiques (GCMs et RCMs) s'accordent sur un consensus à la hausse des températures, plus ou moins prononcée en fonction du RCP (cf paragraphe E.3.1). En revanche, les modèles divergent largement en ce qui concernent les précipitations (cf paragraphe E.3.1).

La température

Les GCMs du CMIP5 expriment un consensus⁸ et montrent une hausse de la température (GIEC, 2014). Elle est de l'ordre de $+1^{\circ}\text{C}$ (RCP 2.6) à $+6^{\circ}\text{C}$ (RCP 8.5) à la fin du XXI^{ème} pour l'Afrique de l'Ouest (GIEC, 2014). Pour l'horizon proche (2016-2035), l'évolution de la température est similaire pour les quatre RCPs, avec une augmentation moyenne de la température comprise entre $0,3^{\circ}\text{C}$ et $0,7^{\circ}\text{C}$, par rapport à la période 1986-2005.

Les résultats des études basées sur l'utilisation de RCMs de CORDEX-Africa montrent le même consensus sur l'Afrique de l'Ouest :

- Pour l'horizon proche (2021-2040), la température devrait augmenter de $+1^{\circ}\text{C}$ avec le RCP 4.5 ou le RCP 8.5 (Laprise et al., 2013; Dike et al., 2014).
- Pour la moitié du siècle (2041–2060), la température devrait augmentée d'environ $+2^{\circ}\text{C}$ indifféremment du RCP, 4.5 ou 8.5 (James and Washington, 2012; Laprise et al., 2013; Dike et al., 2014; Sylla et al., 2016; Dosio and Panitz, 2016; Tall et al., 2017).
- Pour la fin du siècle (2081-2100), la température devrait augmenter d'environ $+4^{\circ}\text{C}$ pour le RCP 4.5, et jusqu'à $+6^{\circ}\text{C}$ pour le RCP 8.5 (James and Washington, 2012; Laprise et al., 2013; Dike et al., 2014; Sylla et al., 2016; Dosio and Panitz, 2016; Tall et al., 2017).

Aussi, l'évolution des températures est bien contrainte dans les modèles climatiques.

Les précipitations

Contrairement à la température, les projections des précipitations présentent de très fortes incertitudes. La figure E.6 met en avant le désaccord des GCMs quant à l'évolution

6. Profils représentatifs d'évolution de concentration des gaz à effets de serre, au nombre de quatre : RCP 2.6, 4.5, 6.5 et 8.5, représentant le forçage radiatif potentiellement induit par les activités anthropiques.

7. Pour plus de détails sur les corrections de biais et la conception de scénarios climatiques à partir de projections, veuillez vous référer à Charron (2016).

8. Au moins 90% des modèles s'accordent sur le signe de la variation.

des précipitations en Afrique de l'Ouest. Ce désaccord s'exprime par une divergence des modèles en terme d'amplitude et de signe de variation (tableau E.3.1, IPCC (2007b); GIEC (2014)).

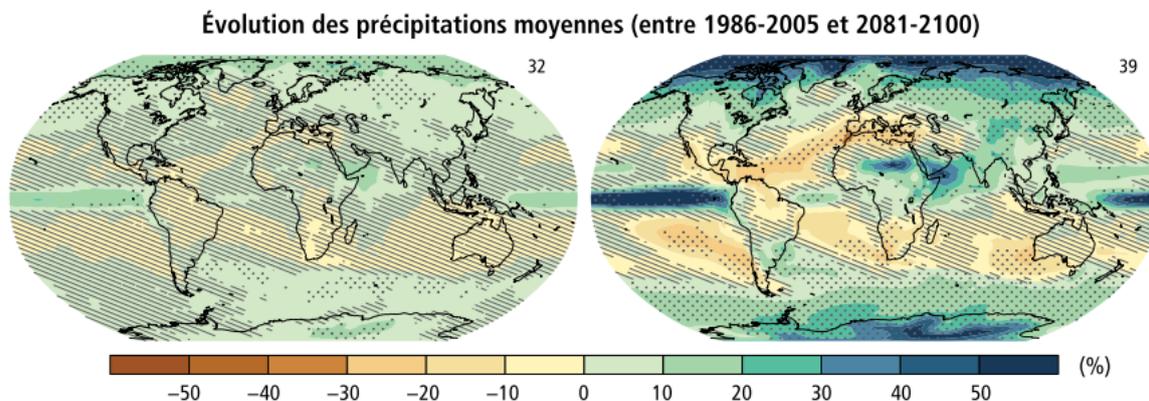


FIGURE E.6 – Moyenne multi-modèle des projections des précipitations pour le RCP 2.6 (à gauche) et le RCP 8.5 (à droite). L'absence de pointillés et de hachures traduit une forte divergence des modèles. Source : GIEC (2014).

Le même constat peut être fait pour les projections issues des RCMs. La figure E.7 montre la moyenne des projections des RCMs de CORDEX-Africa, ainsi que les minimas et maximas, pour les RCP 4.5 et 8.5 (Sylla et al., 2016).

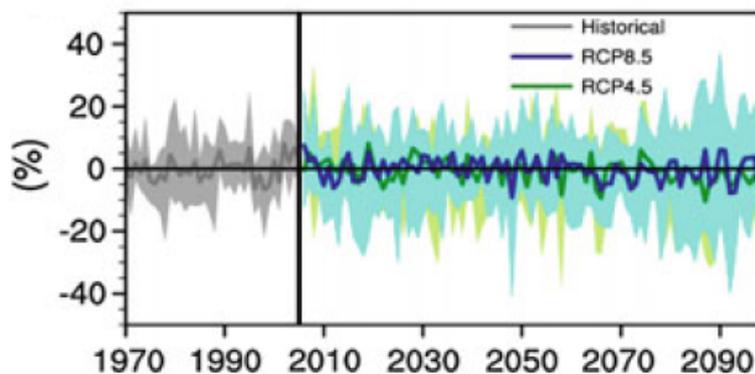


FIGURE E.7 – Moyenne des projections des précipitations des RCMs de CORDEX-Africa, ainsi que les minimas et maximas, pour les RCP 4.5 et 8.5; source : Sylla et al. (2016).

Le tableau E.3.1 est une liste non-exhaustive des études menées sur les projections des précipitations pour l'Afrique de l'Ouest et le Sahel pour différents horizons.

Les débits

Le volume d'eau disponible dans un bassin versant est contrôlé au premier ordre par les précipitations et au deuxième ordre par l'évapotranspiration. Aussi, l'évolution des débits et l'évolution des précipitations vont de pair. Toutefois, cette relation n'est pas linéaire. Les enregistrements de débits, depuis les années 1950, ont montré qu'un déficit

RCP 4.5				
Etude	Type	Modèles	Horizon	Modulation des précipitations
Bodian et al. (2018)	GCMs	CanEsm2 CNRM CSIRO Had GE2-CC Had GE2-ES MICROC5 Multimodèle	2050	-13% +4% -1% -11% +1% -4% -4%
Tall et al. (2017)	RCM	RegCM4	2041-2060 2080-2099	de +1% à +10% de +10% à +25%
RCP 6.0				
Diallo et al. (2012)	GCM RCM	HadCM3 ECHAM5 ICTP-RegCM3 Remo RCA HC-MadRM3P	2031-2050	+4% +5% +7% +5% +9% +10%
Précipitations : RCP 8.5				
Bodian et al. (2018)	GCMs	CanEsm2 CNRM CSIRO Had GE2-CC Had GE2-ES MICROC5 Multimodèle	2050	-23% +0% -1% -11% +1% -8% -8%
Ardoin-Bardin et al. (2009)	GCM	HadCM3-A2	2020 2050 2080	-7% +1% -26%
Mbaye et al. (2015)	RCM	REMO	2071-2100	de -10% à +42%
Tall et al. (2017)	RCM	RegCM4	2041-2060 2080-2099	de +1% à +10% au delà de +50%
Ardoin-Bardin et al. (2005)	GCM	HajCM3	2050 2080	+0% de -20% à -40%
Dosio and Panitz (2015)	GCM RCM	Moyenne ⁹ CCLM	2071-2100	-1,5% -44%

TABLE E.3 – Liste non-exhaustive des études menées sur les projections des précipitations pour l’Afrique de l’Ouest et le Sahel.

de précipitations se traduisait par une baisse drastique des débits.

Puisque aucune tendance claire sur les précipitations futures ne peut être dégagée, il en est de même pour les débits et la disponibilité en eau. Cependant, l'augmentation de température bien contrainte induit une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui a pour effet de favoriser les prélèvements via le retour à l'atmosphère. Le tableau E.3.1 présente une synthèse des études menées sur l'évolution des débits dans le BFS.

RPC 4.5

Étude	Modèle climatique	Modèle Hydrologique	Horizon	Modulation des débits
Mbaye et al. (2015)	RCM REMO	MPI-HM	2071-2100	de -15% à +10%
Bodian et al. (2018)	CamESM2 CNRM CSIRO HadGEM2 CC HadGEM2 ES MIROC5	GR4J	2050	-33% +13% +0% -19% +0% -9%
Sylla et al. (2018)	Ensemble CMIP5 Ensemble CORDEX Ensemble CMIP5 Ensemble CORDEX	IDE	2031-2050	-19%, -15%, -7% -25%, -14%, -10%
			2071-2100	-25%, -22%, -10% -20%, -18%, -17%

RPC 8.5

Mbaye et al. (2015)	REMO	MPI-HM	2071-2100	de -50% à -20%
Ardoïn-Bardin et al. (2005)	HajCM3	GR2M	2080	de -14% à -45%
Bodian et al. (2018)	CamESM2 CNRM CSIRO HadGEM2 CC HadGEM2 ES MIROC5	GR4J	2050	-58% +3% -4% -22% -2% -14%
Ardoïn-Bardin (2009)	ECHAM4	GR2M	2020	+15%
			2050	+10%
			2080	-18%
Sylla et al. (2018)	Ensemble CMIP5 Ensemble CORDEX Ensemble CMIP5 Ensemble CORDEX	IDE	2031-2050	-22%, -17%, -12% -25%, -15%, -13%
			2071-2100	-50%, -40%, -27% -50%, -41%, -30%

TABLE E.4 – Synthèse des études menées sur l'évolution des débits dans le BFS. IDE : Index de disponibilité en eau, qui correspond au ratio entre les précipitations et l'évapotranspiration.

Discussions et conclusions sur les tendances hydro-climatiques

Si l'on souhaite intégrer les effets des changements climatiques dans une étude de vulnérabilités pour le BFS, il est nécessaire de se rappeler que :

- Le GIEC considère que tous les modèles ont un degré de réalisme jugé comme égal. La sélection arbitraire de modèles est donc à proscrire. Les résultats fournis par les

modèles donnent autant de futurs climatiques plausibles (GIEC, 2014). Par ailleurs, l'utilisation de moyenne multi-modèles réduit la variabilité des climats futurs plausibles (Charron, 2016). Il est par conséquent nécessaire de disposer d'ensembles les plus complets pour n'en négliger aucun.

- Dans le BFS, l'évolution des températures fait consensus, et montre un réchauffement plus ou moins important en fonction de l'horizon et du RCP considéré.
- En revanche, les modèles divergent pour les précipitations, au point d'aucune tendance ne peut être dégagée, à la fois pour les horizons proches (2030, 2050) plus distaux (2080, 2100).

La totalité des études menées sur l'évolution des débits listées ci-dessus (tableau E.3.1) est basée sur un petit nombre de modèles climatiques, ou travaille avec des moyennes multi-modèles. La variabilité des futurs plausibles n'est donc pas traitée. A l'instar des précipitations, aucune tendance ne peut être dégagée sur l'évolution future des débits.

E.3.2 Les études de vulnérabilités réalisées sur le BFS

Il est utile de préciser que cette revue de littérature a pour objet les vulnérabilités face aux changements climatiques futurs. Aussi, les études de vulnérabilités portant sur les conséquences de la conception d'équipements de grande ampleur (barrages, périmètres irrigués, ...) sont *de facto* exclues de cette revue.

Il est possible de distinguer trois catégories d'étude de vulnérabilités :

1. La première regroupe les études aux méthodologies empiriques, le plus souvent basées sur le sondage des populations quant aux effets des changements climatiques sur leur quotidien. Bien que n'étant pas prospectives, elles permettent de comprendre quelles sont les sources de vulnérabilités inhérentes aux changements climatiques.
2. La seconde catégorie regroupe les études prospectives, adoptant un point de vue qualitatif. Certaines partent du postulat que le climat futur sera plus aride, d'autre moins aride, sans préciser l'ampleur de ces évolutions, ni se basées sur un consensus scientifique. Elles discutent ensuite des conséquences de cette aridité future, et, le plus souvent, dressent des listes plus ou moins exhaustives des secteurs impactés par ces changements, sans aucune quantification des effets ni des bénéfices que les solutions proposées pourraient apporter.
3. La troisième regroupe les études prospectives adoptant un point de vue quantitatif. Elles cherchent à déterminer les évolutions climatiques en se basant sur les prédictions des GCMs et des RCMs, puis à quantifier l'impact des changements attendus sur des secteurs d'activités (conséquences la disponibilité en eau, et sur l'agriculture, l'hydro-électricité, le secteur industriel, la pêche, ...).

Les études « rétrospectives » principales.

Changements climatiques, stratégies d'adaptation et mobilités (Sall, 2011). Ce rapport s'intéresse à la perception des populations du Sénégal, des changements climatiques, en s'appuyant sur une méthodologie empirique, principalement axée sur le recueil de témoignages, une revue bibliographie, et la structure sociale des sociétés. Les auteurs mettent en avant que les changements climatiques sont des facteurs aggravant les vulnérabilités préexistantes, et vont davantage toucher les populations en bas de l'échelle sociale.

Etude d'impact environnemental et social (EIES) des investissements du PGIRE II(OMVS, 2013a) Dans l'étude, la baisse de disponibilité en eau, per capita, est imputée à la sécheresse pluridécennale des années 1970, 1980 et 1990, ainsi qu'à l'augmentation de la population.

Évaluation de la vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal face aux changements climatiques (Artelia, 2018) L'étude du cabinet Artelia est quantitative, et est par conséquent détaillée ci-après. Toutefois, elle est citée ici puisqu'elle incorpore une enquête d'option importante réalisée auprès des autorités locales du bassin. Il en ressort qu'au niveau local, l'érosion des berges, des terres agricoles et l'envasement constituent un problème majeur pour l'agriculture, de même que les pollutions chimiques de l'eau (orpaillage).

E.3.3 Les études de vulnérabilités « qualitatives »

Les études de vulnérabilités qualitatives traitant des changements climatiques sont les plus abondantes dans le BFS. Deux traits communs peuvent être discernés dans leurs méthodologies : (i) les grandes lignes des changements climatiques sont énoncées, puis (ii) un état des lieux des secteurs impactés (à l'échelle du bassin, nationale, ou locale) est dressé. Si la description des impacts par secteur est généralement très complète voir même exhaustive, une importante imprécision est faite quant à l'évolution du climat. Le plus souvent, il est énoncé qu'une hausse des températures est attendue (ce qui résulte d'un consensus scientifique), ainsi qu'une baisse (ou une hausse) des précipitations. Or, aucune tendance n'est dégagée par la communauté des climatologues (cf section E.3.1). Aussi ces approches échouent-elles à intégrer les incertitudes liés à l'évolution du climat. En revanche, ces études restent d'une grande utilité pour cibler les secteurs les plus sensibles aux conditions climatiques, fournissant ainsi de nombreuses informations sur les vulnérabilités potentielles des secteurs. Voici un résumé des principales études.

Programmes d'Action National d'Adaptation aux Changements Climatiques (PANA) Les PANA de la Guinée (Guinean Ministry, 2007), du Sénégal (Ministère de l'environnement du Sénégal, 2006), du Mali (République du Mali, 2007) et de la Mauritanie (République de Mauritanie, 2004) présentent les usages et les secteurs les plus vulnérables face aux changements climatiques. Le poids socio-environnemental est clairement énoncé comme un facteur aggravant les impacts négatifs du réchauffement global. L'identification des secteurs prioritaires et les matrices de sensibilité établissent que la ressource en eau, l'agriculture, l'élevage, la pêche, l'hydro-électricité et la santé sont les secteurs les plus vulnérables.

Le Sahel face aux changements climatiques (Centre Régional AGRHYMET, 2011) Ce rapport se base sur une hausse des températures, une variabilité accrue des précipitations, ainsi qu'une enquête d'opinion, et des articles scientifiques. En étudiant les variations climatiques passées, le degré d'exposition des populations et leurs dépendances aux précipitations, via l'agriculture pluviale vivrière, sont mis en avant. Les auteurs insistent sur les vulnérabilités du secteur agricole, vis-à-vis de l'augmentation des températures et des baisses généralisées des rendements (pour +2°C, une perte de 10% à 25%

sont attendue pour le maïs, le sorgho, le mils, ...).

Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal (OMVS, 2016) En se basant sur les activités humaines dans le bassin, les besoins en eau, et l'accentuation future de la pression sur l'eau (liée à la démographie et au développement), les auteurs définissent sept Problèmes Environnementaux Prioritaires (PEP). Parmi eux sont cités la baisse de la disponibilité et de la qualité des eaux et le changement climatique. L'évolution climatique présentée dans ce rapport est une synthèse bibliographique, et montre bien le consensus sur l'augmentation des températures, et la divergence sur les précipitations. Les vulnérabilités des usages, comme l'agriculture (pluviale, irrigation et de décrue), la pêche, l'élevage, l'AEP¹⁰, l'hydroélectricité, et le secteur industriel et minier, sont traités qualitativement. Il est montré que la congruence des changements climatiques et l'accentuation de la demande en eau jouera le rôle de facteur aggravant en exacerbant les compétitions des usages.

Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière au Sénégal (Noblet et al., 2018) Une part importante du rapport est dédiée aux tendances des variables climatiques. Basée sur une synthèse bibliographique, les auteurs montrent le consensus sur l'évolution de la température, et l'absence de consensus sur les précipitations. Ils mettent en avant (1) le peu d'études scientifiques s'intéressant aux impacts des changements climatiques sur l'agriculture, la zone cotière et la ressource en eau, les trois secteurs les plus vulnérables, (2) le fait que les travaux existants ne distinguent pas les effets de la variabilité climatique, les effets des changements climatiques des effets anthropiques (fortement à l'oeuvre dans le bassin).

Incidences sécuritaires du changement climatique au Sahel : perspectives politiques (CSAO-OCDE, 2009). Ce rapport fait partie du projet « Incidences sécuritaires du changement climatique au Sahel » (ISCCS). Le projet s'appuie sur un réseau de spécialistes et d'agences techniques, et mène des analyses régionales sur l'impact du changement climatiques au Sahel, en liens avec la sécurité. Le Sahel est identifié comme « Hot-spot », puisque les deux tiers de la population dépend de l'agriculture pluviale. Ceci représente une source importante de vulnérabilité dans l'hypothèse ou les précipitations pourraient se raréfier. De plus, les auteurs montrent qu'il n'y a pas, en 2010, d'étude sur le lien entre les changements climatiques et la sécurité humaine, ce qui représente un frein certains à l'identification des vulnérabilités.

Synthèse des études de vulnérabilités et d'adaptation du secteur de la foresterie aux changements climatiques en Guinée (Traore et al., 2006) Le rapport de Traore et al. (2006) est un document de synthèse qui cible l'impact du changement climatique sur les ressources en foresterie en Guinée, ainsi que les conséquences de ces impacts sur les groupes socioéconomiques. L'étude se base sur une diminution probable

10. L'alimentation en eau potable.

des précipitations et une augmentation de température. La vulnérabilité des formations forestières sera fonction du déficit hydrique des différentes zones climatiques, et qu'une transformation de la savane arborée en une savane sèche est possible si le déficit est supérieur à 200mm.

Leur analyse a permis de classer les agents économiques par niveau de vulnérabilité globale. Par ordre décroissant, sont répertoriés : (1) les petits exploitants et agriculteurs, (2) les ménages urbains, les éleveurs et ménages ruraux, et (3) les autres agents (grands exploitants, artisans urbains, détaillants et transporteurs, ...).

Vulnérabilités de la région de Dakar au changement climatique (Quensière and Retière, 2013) Cette étude, spécifique à la région de Dakar, propose une analyse de fond sur les forces et faiblesses du territoire, et les impacts socio-économiques du changement climatique. En se basant sur une revue bibliographique, les auteurs relèvent les sources de vulnérabilités spécifiques au milieu urbain : réseau de drainage sous-dimensionné, îlots de chaleur, industries polluantes, etc . En réponse à ces vulnérabilités, dix grands objectifs favorisant la résilience sont formulés. Le point marquant de cette étude est le manque certain de mécanismes pour passer du niveau de l'analyse à celui de la mise en oeuvre de solutions pratiques.

Agronomie, économie et social : Impacts des changements climatiques La recherche académique en agronomie s'intéresse de près aux relations entre le changement climatique et les rendements agricoles, que ce soit à l'échelle locale (parcelle, agriculture vivrière des ménages) ou à l'échelle régionale (macro-économie et sécurité alimentaire nationale, voir continentale). Aussi, la littérature scientifique s'y référant est prolifique, et la liste ci-dessous n'est en aucun cas exhaustive .

Les conséquences sur l'agriculture d'un réchauffement et d'une raréfaction des précipitations font consensus. Des études sur les oscillations climatiques récentes le mettent en avant :

- Traore et al. (2013) montrent, sur la période 1965-2005, que la distribution temporelle des précipitations (nombre de jours secs consécutifs) et les températures maximales sont les principaux facteurs climatiques qui influent sur les rendements agricoles (coton, sorghot et d'arachide), davantage que l'augmentation de température liée au changement climatique.
- La World Bank (2007) met en avant que les parcelles non irriguées (drylands) sont particulièrement sensibles au climat, et propose une relation directe entre revenus des fermiers et la quantité des précipitations.

D'autres études discutent des impacts certains d'une réduction de la disponibilité en eau et d'une augmentation des températures sur l'agriculture pluviale et son implication sur l'économie locale (Oyebande, 2013), les diminutions des rendements agricoles, le fourrage et le bétail (Butt et al., 2005; Nkomo et al., 2006; Dinar et al., 2008).

Les thématiques des publications sur les secteurs économiques et sociales restent très variées. Les vulnérabilités des villes vis-à-vis des changements climatiques (Silver et al., 2014), la dégradation des sols et la migration (Hummel, 2016), la démographie et le niveau de développement (Mortimore, 2010) sont autant d'exemples de sujets traités.

Vincent (2004) propose un index agrégé de vulnérabilité aux changements climatiques qui permet d’obtenir un mapping des vulnérabilités sur l’ensemble de l’Afrique (secteurs d’exposition : santé, infrastructure, démographie, ...).

Les études de vulnérabilités « quantitatives »

Suite à sa publication en 2018, l’étude du cabinet Artélia, « Évaluation de la vulnérabilité du bassin du fleuve Sénégal face aux changements climatiques », commandée par l’OMVS, fait référence parmi les études de vulnérabilités vis-à-vis des changements climatiques.

La méthodologie combine une chaîne de modélisation déterministe avec des scénarios de développement hypothétiques. La chaîne de modélisation comporte trois étapes. (1) Les changements climatiques sont quantifiés à l’aide de modèles climatiques pour différents horizons, (2) la disponibilité en eau future est déterminée, et (3) un modèle hydro-économique est utilisé pour connaître l’impact des changements climatiques sur la gestion de l’eau et les secteurs socioéconomiques du BFS, et ce pour les différents scénarios de développement.

Puisque ce rapport est un ouvrage d’intérêt majeur, dresser une critique (positive/négative) des différents points de la méthodologie permettra de cibler ses forces et faiblesses. A terme, cela permettra d’orienter les prochaines études de vulnérabilités et ainsi renforcer le processus de gestion dans le BFS. Cette critique est donnée dans les tableaux E.5, E.6 et E.7.

TABLE E.5 – Démarche méthodologie de l’étude d’Artélia, points forts et faiblesses.

Limite du bassin versant	
Méthodologie	Analyse
Le BFS est découpé en 7 sous-bassins (suivant la phase 2 du SDAGE).	La phase 3 est disponible depuis 2011, et préconise 9 sous-bassins, ou 28 pour l’utilisation du modèle de gestion.

L’étude d’Artelia (2018) est une mine d’informations précieuses. En combinant les scénarios de développement, les demandes en eaux futures, et la disponibilité en eau futures, elle apporte une vraie plus-value dans l’orientation des prises de décisions des politiques.

Les réels points forts de cette étude est l’exhaustivité des secteurs pris en compte dans la modélisation hydro-économique, ainsi que l’intégration des projections de demandes en eaux pour différents horizons. L’alternances des priorisations permet de voir quelles sont les conséquences des orientations politiques.

En revanche, la thématique de l’évolution de la disponibilité en eau n’est traitée que partiellement. L’utilisation d’une moyenne réalisée sur l’ensemble des modèles ne permet pas d’exprimer la variabilité des futurs climatiques plausibles. De plus, l’utilisation d’un modèle hydrologique permettrait d’obtenir des scénarios hydrologiques, et ainsi discuter réellement de l’incidence de l’évolution de la disponibilité en eau.

TABLE E.6 – Démarche méthodologie de l'étude d'Artélia, points forts et faiblesses. Suite (1).

Les changements climatiques

Méthodologie	Résultats	Analyse
Tendances climatiques passées et actuelles		
Pour les sous-bassins, un historique de l'évolution climatique est présenté depuis au moins 1950 (en fonction des stations).	La rupture en 1970-1971 sur les précipitations et la sécheresse pluri-décennale sont mises en avant.	Analyse cohérente avec la littérature scientifique.
Projections futures des variables climatiques :		
Choix des horizons : horizon proche 2021-2050 et distal :2071-2100		La définition des horizons est cohérente avec les besoins de l'OMVS.
Choix des RCPs : RCP 4.5 et RCP 8.5		Trajectoires socio-économiques globales définies par le GIEC.
Choix des modèles climatiques : Moyenne sur 29 modèles de l'ensemble CMIP5		Faiblesse majeure : masque les incertitudes et la variabilité des futurs climatiques plausibles.
Les températures : méthodes de correction des « Deltas »	En 2035 : +1°C pour les 2 RCPs; En 2050 : +1°C pour le RCP 8.5	Les températures futures sont bien contraintes par les modèles climatiques.
Les précipitations : méthode de correction de Ardoin-Bardin et al. (2005)	Variabilité interannuelle importantes des cumuls de précipitations; Pas de modifications jusqu'en 2050 à l'échelle saisonnière; Pour le RCP 8.5, une baisse de pluviométrie de -20 % la première phase de la mousson (mai à août)	Correction proche de la correction de biais; Faiblesse majeure : masque les incertitudes et la variabilité des précipitations futures.

Les projections de la disponibilité en eau

Méthodologie	Résultats	Analyse
Relation pluie-débit : Basée sur la méthode SPEED, une relation linéaire est déterminée.		Bien que son homogénéité eut été vérifiée temporelle et spatialement, la méthode ne s'applique pas pour de faibles précipitations annuelles (<200 ou 400mm); Le fait de ne pas utiliser un modèle hydrologique est une faiblesse majeure de la méthode.
Débits futurs : utilisation de chroniques historiques comme débits futurs.	Puisque les précipitations seraient comparables entre 1990-2010 et 2011-2050, les débits de la période 1990-2010 sont utilisés pour la période 2011-2050. Puisqu'une baisse des précipitations est attendue pour 2050-2100, cela correspondrait à la période sèche de 1970-1990, alors les débits de la période sèche sont ceux utilisés pour la période 2050-2100.	Faiblesse majeure : Méthode qui ne permet pas une prise en compte fiable des changements climatiques.

TABLE E.7 – Démarche méthodologie de l'étude d'Artélia, points forts et faiblesses. Suite (2).

Modélisation hydro-économique	
Méthodologie	Analyse
Les secteurs suivants sont pris en compte : Agriculture, AEP, pêche, élevage, industrie, l'hydro-électricité, la navigation	Point fort : l'ensemble des secteurs clés est pris en compte (sauf l'agriculture pluviale, qui par essence ne dépend que des précipitations, et non de la disponibilité des eaux de surfaces ou souterraines).
Les besoins futurs des secteurs pour l'actuel (2010), 2025, et 2075 sont extraits du SDAGE	Point fort : source la plus fiable
Scénarios de développement : 7 scénarios étant le reflet du nombre de barrages (4 ou 8) pris en compte, la disponibilité en eau (période sèche ou humide), et la demande en eau pour différents horizons. Tests sur les priorités d'usages : priorité sur l'irrigation, le maintien de la crue artificielle, la production hydro-électrique, ou la navigation.	Point fort : combinaison de facteurs sur les priorités, la demande en eau et sur le développement d'infrastructures, qui permet d'étudier beaucoup de scénarios socio-économiques futurs variés.

E.3.4 Conclusions

Les projections climatiques pour le BFS sont nombreuses. Si l'évolution des températures est bien contrainte, l'évolution des précipitations présente de lourdes incertitudes. A ce jour, aucune étude n'a fourni un panel de projections hydrologiques suffisant pour couvrir les futurs climatiques plausibles.

Les études de vulnérabilités réalisées jusqu'ici s'inscrivent dans une volonté certaine de prendre en compte les effets des changements climatiques dans la planification et la gestion de l'eau. Elles ont permis des avancées tangibles dans l'identification des secteurs vulnérables, et ont mis en avant des solutions d'adaptation à plusieurs échelles.

Toutefois, aucune étude ne traite à ce jour l'étendue des futurs hydrologiques possibles. Au vu de l'extrême dépendance de certains secteurs d'activités aux conditions hydro-climatiques, cette lacune représente un carence importante dans l'intégration holistique des risques pour une gestion pérenne de la ressource en eau.

Bibliographie

- Aghabozorgi, S., Seyed Shirخورshidi, A., and Ying Wah, T. (2015). Time-series clustering - A decade review. *Information Systems*, 53 :16–38.
- Akintug, B. and Rasmussen, P. F. (2005). A Markov switching model for annual hydrologic time series. *Water Resources Research*, 41(9) :1–10.
- Ali, A. and Lebel, T. (2009). Climate extremes : progress and future directions. *International Journal of Climatology*, 29(3) :317–319.
- Andersen, J., Refsgaard, J. C., and Jensen, K. H. (2001). Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin - Model construction and validation. *Journal of Hydrology*, 247(3-4) :200–214.
- Ardoin-Bardin, S. (2004). *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. PhD thesis, Université Montpellier II.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., and Mahe, G. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d ' Afrique de l ' Ouest et Centrale. In *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change - Hydroclimatic Variability*, number April, pages 194–202, Foz de Iguaçu (Brazil). IAHS.
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturel, J.-E., Mahé, G., Dieulin, H., and Niel, C. (2009). Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54.
- Artelia (2018). Rapport de diagnostic de l'évaluation de la vulnérabilité. Technical report, Artelia.
- Bader, J. C., Belaud, G., Lamagat, J. P., Ferret, T., and Vauchel, P. (2017). Modélisation de propagation d'écoulement entre lits mineur et majeur sur les fleuves Sénégal et Niger. *Hydrological Sciences Journal*, 62(3) :447–466.
- Bader, J.-C., Cauchy, S., Duffar, L., and Saura, P. (2014). *Monographie hydrologique du fleuve Sénégal. De l'origine des mesures jusqu'en 2011*. IRD, Marseille (France), ird editio edition.
- Bader, J.-C., Lamagat, J.-P., and Guiguen, N. (2003). Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal : analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrological Sciences Journal*, 48(4) :525–538.

- Berhanu, B., Seleshi, Y., Demisse, S. S., and Melesse, A. M. (2015). Flow regime classification and hydrological characterization : A case study of Ethiopian rivers. *Water (Switzerland)*, 7(6) :3149–3165.
- Bodian, A. (2011). *Approche par modélisation pluie - débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal*. PhD thesis, Université Cheikh Anta Diop de Dakar.
- Bodian, A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l’Ouest). *Physio-Géo*, 8(Volume 8) :297–312.
- Bodian, A., Dacosta, H., and Dezetter, A. (2013). Analyse des débits de crues et d’étiages dans le bassin versant du Fleuve Sénégal en amont du barrage de Manantali. *Climat et développement*, 15.
- Bodian, A., Dezetter, A., and Dacosta, H. (2015). Rainfall-runoff modelling of water resources in the upper Senegal River basin. *International Journal of Water Resources Development*, 32(1) :89–101.
- Bodian, A., Dezetter, A., Deme, A., and Diop, L. (2016). Hydrological evaluation of TRMM Rainfall over the Upper Senegal River basin. *Hydrology*, 3(2) :1–18.
- Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K., and Diop, A. (2018). Future climate change impacts on streamflows of Two Main West Africa River Basins : Senegal and Gambia. *Hydrology*, 5(1).
- Butt, T. A., McCarl, B. A., Angerer, J., Dyke, P. T., and Stuth, J. W. (2005). The economic and food security implications of climate change in Mali. *Climatic Change*, 68(3) :355–378.
- Camara, M., Diedhiou, A., Diogo Diallo, M., Diatta, S., Mbaye, I., and Diallo, I. (2013). Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l’Ouest.
- Canut, G. (2010). *Intéraction mousson/Harmattan, échanges de petite échelle*. PhD thesis, Laboratoire d’Aérodynamique, UMR-5560, Toulouse, France.
- Carbonnel, J.-P. and Hubert, P. (1992). Pluviométrie en Afrique de l’Ouest Soudano-sahélienne, Remise en cause de la stationnarité des Séries. *ORSTOM-Édilions, 1992 L-aridilé une contrainte au développement*, page 15.
- CEHQ (2015). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Impacts des changements climatiques sur les régimes de crue, d’étiage et d’hydrolicité à l’horizon 2050*.
- Centre Régional AGRHYMET (2011). Le Sahel face aux changements climatiques. Technical Report Special Issue.
- Charney, J., Stone, P. H., and Quirk, W. J. (1975). Drought in the Sahara : A biogeophysical feedback mechanism. *Science*, 187(4175) :434–435.
- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l’information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d’adaptation*. 2016 edition.

- Conway, D. and Jones, P. (1999). *Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina*. Climatic r edition.
- Cook, K. H. (1999). Generation of the African easterly jet and its role in determining West African precipitation. *Journal of Climate*, 12(5 I) :1165–1184.
- Cook, K. H. and Vizy, E. K. (2006). Coupled model simulations of the West African monsoon system : Twentieth- and twenty-first-century simulations.
- CSAO-OCDE (2009). Incidences sécuritaires du changement climatique au Sahel. *Atelier technique*, page 6.
- Dacosta, H., Kandia, K. Y., and Malou, R. (2002). La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle. *Regional Hydrology : Bridging The Gap between Research and Practice (Proceedings, (2))*:499–506.
- Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., and Quantin, G. (2015). Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l’ouest à travers deux régions : la Sénégalie et le Bassin du Niger Moyen. *Climatologie*, 12(Volume 12) :25–43.
- Diallo, I., Sylla, M., Giorgi, F., Gaye, A., and Camara, M. (2012). Multimodel GCM-RCM Ensemble-Based Projections of Temperature and Precipitation over West Africa for the Early 21st Century.pdf. *International Journal of Geophysics*, page 19.
- Dike, V. N., Shimizu, M. H., Diallo, M., Lin, Z., Nwofor, O. K., and Chineke, T. C. (2014). Modelling present and future African climate using CMIP5 scenarios in HadGEM2-ES. *International Journal of Climatology*, 35(8) :1784–1799.
- Dinar, A., Hassan, R., Mendelsohn, R., and Benhin, J. (2008). Climate Change and Agriculture in Africa : Impact Assessment and Adaptation Strategies. *Trocaire*, pages 83–87.
- Diouf, P., Albaret, J., Bousso, T., Diallo, A., Diallo, P., Deme-Gnigou, I., Le Reste, L., and Kebe, M. (1993). Aménagement de la vallée du fleuve Sénégal. Projet d’étude “SYSTEME PECHE”. *INSTITUT SENEGALAIS RECHERCHES AGRICOLES CENTRE DE RECHERCHES OCEANOGRAPHIQUES DE DAKAR-THIAROYE*.
- Diouf, P. S. and Bousso, T. (1988). Fleuve Sénégal - Environnement aquatique et pêche. Technical report.
- Dosio, A. and Panitz, H. J. (2015). Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models. *Climate Dynamics*, 46(5-6) :1599–1625.
- Dosio, A. and Panitz, H. J. (2016). Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models.
- Douville, H. (2006). Impact of regional SST anomalies on the Indian monsoon response to global warming in the CNRM climate model. *Journal of Climate*, 19(10) :2008–2024.

- Espanmanesh (2019). Optimizing the management of complex water resources systems taking into account the long-term persistence of streamflow process.pdf. Technical report, Université Laval.
- Faye, C., Diop, E. H. S., and Mbaye, I. (2015a). Impacts des changements de climat et des aménagements sur les ressources en eau du fleuve sénégal : Caractérisation et évolution des régimes hydrologiques de sous-bassins versants naturels et aménagés. *Belgeo - Revue belge de géographie*, 4 :1–25.
- Faye, C., Sow, A. A., and Ndong, J. B. (2015b). Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal.
- Fontaine, B., Garcia-Serrano, J., Roucou, P., Rodriguez-Fonseca, B., Losada, T., Chauvin, F., Gervois, S., Sijikumar, S., Ruti, P., and Janicot, S. (2010). Impacts of warm and cold situations in the Mediterranean basins on the West African monsoon : Observed connection patterns (1979-2006) and climate simulations. *Climate Dynamics*, 35(1) :95–114.
- Gboboniyi, E., Sarr, A., Sylla, M., Diallo, I., Lennard, C., Dosio, A., Dhiédou, A., and Kamga, A. (2014). Climatology, annual cycle and interannual variability of precipitation and temperature in CORDEX simulations over West Africa.pdf.
- Gennaretti, F., Sangelantoni, L., and Grenier, P. (2015). Toward daily climate scenarios for Canadian Arctic coastal zones with more realistic temperature- precipitation interdependence. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres RESEARCH*, 11(862).
- Giannini, A., Biasutti, M., and Verstraete, M. M. (2008). A climate model-based review of drought in the Sahel : Desertification, the re-greening and climate change. *Global and Planetary Change*, 64(3-4) :119–128.
- GIEC (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.*
- Giorgi, F., Jones, C., and Asrar, G. (2009). Addressing climate information needs at the regional level : the CORDEX framework. ... *Organization (WMO) Bulletin*, 58(July) :175–183.
- Goutorbe, J. P., Lebel, T., Tinga, A., Bessemoulin, P., Brouwer, J., Dolman, A. J., Engman, E. T., Gash, J. H., Hoepffner, M., Kabat, P., Kerr, Y. H., Monteny, B., Prince, S., Said, F., Sellers, P., and Wallace, J. S. (1994). HAPEX-Sahel : A large-scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Annales Geophysicae*, 12(1) :53–64.
- Guinean Ministry (2007). Plan d'action national d'adaptation aux changements climatiques (PANA) de la république de Guinée.
- Gupta, H. V., Kling', H., Yilmaz, K. K., and Martinez-Baquero, G. F. (2009). Decomposition of the Mean Squared Error & NSE Performance Criteria : Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2) :80–91.

- Gutowski, J. W., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H. S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T., and Tangang, F. (2016). WCRP COordinated Regional Downscaling EXperiment (CORDEX) : A diagnostic MIP for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(11) :4087–4095.
- Hagemann, S. and Gates, L. D. (2003). Improving a subgrid runoff parameterization scheme for climate models by the use of high resolution data derived from satellite observations.
- Haines, A. T., Finlayson, B. L., and McMahon, T. A. (1988). A global classification of river regimes. *Applied Geography*, 8(4) :255–272.
- Hall, N. M. and Peyrillé, P. (2006). An experimental method of measuring the confined compression strength of high-performance concretes. *EDP Sciences*, 134(December 2006) :629–634.
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, J., Lund, J. R., and Howitt, R. E. (2009). Hydro-economic models : Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4) :627–643.
- Hartigan, J. A. and Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136 : A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, 28(1) :100.
- Hastenrath (1985). *Climate and Circulation of the Tropics.pdf*.
- Henriksen, B. J. A., Heasley, J., Kennen, J. G., Nieswand, S., Norton, G. A., and Survey, U. S. G. (2006). Users ' Manual for the Hydroecological Integrity Assessment Process Software (including the New Jersey Assessment Tools) Department of the Interior. *Assessment*.
- Hernández-Díaz, L., Laprise, R., Sushama, L., Martynov, A., Winger, K., and Dugas, B. (2013). Climate simulation over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5).
- Hubert, P., Bader, J. C., and Bendjoudi, H. (2007). Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1) :68–73.
- Hummel, D. (2016). Climate change, land degradation and migration in Mali and Senegal – some policy implications. *Migration and Development*, 5(2) :211–233.
- IPCC (2007a). *Climate Change 2007 - The physical science basis*.
- IPCC (2007b). *Climate Change 2007 : Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assesment*.
- James, R. and Washington, R. (2012). Changes in African temperature and precipitation associated with degrees of global warming. *Climatic Change*.
- Janicot, S., Harzallah, A., Fontaine, B., and Moron, V. (1998). West African monsoon dynamics and eastern equatorial Atlantic and Pacific SST anomalies (1970-88). *Journal of Climate*, 11(8) :1874–1882.

- Kantoussan, J., Ecoutin, J. M., Fontenelle, G., de Morais, L. T., and Laë, R. (2014). Catch per Unit Effort and yields as indicators of exploited fish communities : Application to two West African reservoirs. *Lakes and Reservoirs : Research and Management*, 19(2) :86–97.
- Kim, J., Waliser, D. E., Mattmann, C. A., Goodale, C. E., Hart, A. F., Zimdars, P. A., Crichton, D. J., Jones, C., Nikulin, G., Hewitson, B., Jack, C., Lennard, C., and Favre, A. (2014). Evaluation of the CORDEX-Africa multi-RCM hindcast : Systematic model errors. *Climate Dynamics*, 42(5-6) :1189–1202.
- Klemes, V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1) :13–24.
- Knutti, R. and Sedláček, J. (2012). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4) :369–373.
- Lafore, J.-P., Asencio, N., Bouniol, D., Couvreur, F., Flamant, C., Francoise, G., Hall, N., Janicot, S., and Cécile, K. (2012). Évolution de notre compréhension du système de mousson ouest-africain. (1) :1–6.
- Lafore, J. P., Flamant, C., Guichard, F., Parker, D. J., Bouniol, D., Fink, A. H., Giraud, V., Gosset, M., Hall, N., Höller, H., Jones, S. C., Protat, A., Roca, R., Roux, F., Saïd, F., and Thorncroft, C. (2011). Progress in understanding of weather systems in West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 12(1) :7–12.
- Lamagat, J.-P. (1987). Modèle de propagation des crues du Niger entre Koulikourou et Niamey. page 93.
- Lamagat, J. P. and Bader, J. C. (2003). Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal Programme d ' optimisation de la gestion des réservoirs. pages 2–3.
- Laprise, R., Hernandez-Diaz, L., Tete, K., Sushama, L., and Andrey Martynov, A. (2013). Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *Clim Dyn.*
- Lavaysse, C., Flamant, C., Janicot, S., Parker, D. J., Lafore, J. P., Sultan, B., and Pelon, J. (2009). Seasonal evolution of the West African heat low : A climatological perspective. *Climate Dynamics*, 33(2-3) :313–330.
- Le Barbé, L., Lebel, T., and Tapsoba, D. (2002). Rainfall variability in West Africa during the years 1950-90. *Journal of Climate*, 15(2) :187–202.
- Ledger, D. (1964). Some Hydrological Characteristics of West African Rivers. *Royal Geographical Society*, 35(35) :73–90.
- Lennard, C., Dosio, A., Nikulin, G., Pinto, I., and Seid, H. (2015). Quantifying uncertainty in observational rainfall datasets. *Geophysical Research Abstracts*, 17(EGU2015-901-1).
- L'Hôte, Y. and Mahé, G. (1996). Afrique de l'ouest et centrale : précipitations moyennes annuelles (période 1951-1989). West and central Africa : mean annual rainfall (1951-1989). page 1996.

- L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B., and Triboulet, J.-P. (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4) :563–572.
- Maher, S., Casarotto, C., Tilmant, A., and Pina, J. (2018). Hydro-economic modelling for basin management of the Senegal River. pages 1–16.
- Mariotti, L., Diallo, I., Coppola, E., and Giorgi, F. (2014). Seasonal and intraseasonal changes of African monsoon climates in 21st century CORDEX projections. *Climatic Change*, 125(1) :53–65.
- Mbaye, M. L., Hagemann, S., Haensler, A., Stacke, T., Gaye, A. T., and Afouda, A. (2015). Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in the Upper Senegal Basin (West Africa). *American Journal of Climate Change*, 04(01) :77–93.
- McKee, T., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scale. In *Eighth Conference on Applied Climatology*,.
- Ministère de l'environnement du Sénégal (2006). PLAN D ' ACTION NATIONAL POUR L ' ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES Sénégal. Technical report.
- Mohamed, A. S. (2013). *Approches géochimique et hydrodynamique de la recharge de la nappe du Trarza , Sud-Ouest de la Mauritanie*. PhD thesis, Université Paris Sud XI.
- Mortimore, M. (2010). Adapting to drought in the Sahel : Lessons for climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews : Climate Change*, 1(1) :134–143.
- Mouelhi, S. (2003). *Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier*. PhD thesis, Université Paris VI, Ecole des Mines de Paris.
- Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C., and Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1-4) :200–214.
- Mounkaila, M. S., Abiodun, B. J., and Bayo Omotosho, J. (2014). Assessing the capability of CORDEX models in simulating onset of rainfall in West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 119(1-2) :255–272.
- Mpelasoka, F. S. and Chiew, F. H. (2009). Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5) :1168–1183.
- Naghattini, M. (2017). *Fundamentals of Statistical Hydrology*. Springer, Cham.
- Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970). Nash and Sutcliffe - 1970 - River flow forecasting through conceptual models Part 1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 :282–290.
- Nicholson, S. and Grist, J. (2001). A conceptual model for understanding rainfall variability in Sahel on interannual and interdecadal timescales.pdf. *International Journal of Climatology*, 21 :1733–1757.
- Nicholson, S. E. (2000). Land Surface Processes and Sahel climate. *Reviews of Geophysics*, 38, 1 / February 2000, 38(1999) :117–139.

- Nicholson, S. E. (2013). The West African Sahel : A Review of Recent Studies on the Rainfall Regime and Its Interannual Variability.
- Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., Christensen, O. B., Déqué, M., Fernandez, J., Hänsler, A., van Meijgaard, E., Samuelsson, P., Sylla, M. B., and Sushama, L. (2012). Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations. *Journal of Climate*, 25(18) :6057–6078.
- Nkomo, J. C., Nyong, A. O., and Kulindwa, K. (2006). The Impacts of Climate Change in Africa : The Stern Review on the Economics of Climate Change. *ResearchGate*, pages 1–51.
- Noblet, M., Faye, A., Camara, I., A., S., Sadio, M., and Bah, A. (2018). État Des Lieux Des Connaissances Scientifiques Sur Les Changements Climatiques Pour Les Secteurs Des Ressources En Eau, De L’Agriculture Et De La Zone Côtière.
- Olden, J. D. and Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2) :101–121.
- OMVS (2011). SDAGE - Schéma directeur. Technical report.
- OMVS (2013a). Etude d’impact environnemental et social (EIES) des investissements du PGIRE II. Technical report.
- OMVS (2013b). Evaluation Stratégique Régionale. Technical report.
- OMVS (2016). Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du Fleuve Sénégal. pages 1–139.
- OMVS (2017). Plan d’action régional pour l’amélioration des cultures irriguées dans le bassin du fleuve Sénégal. Technical report.
- Orstom (1974). *Le bassin du fleuve Senegal*.
- Ouarda, T. B., Gingras, H., Bobée, B., and Lemonier, M. (2002). *Synthèse des méthodes simples de régionalisation*.
- Oudin, L. (2004). Recherche d’un modele d’évapotranspiration potentielle pertinent comme entree d’un modele pluie-debit global. page 495.
- Oyebande, L. (2013). Climate Change Impact on Water Resources at the Transboundary Level in West Africa : The Cases of the Senegal, Niger and Volta Basins.
- Paturel, J. E., Barrau, C., Mahé, G., Dezetter, A., and Servat, E. (2007). Modelling the impact of climatic variability on water resources in West and Central Africa from a non-calibrated hydrological model.
- Paturel, J.-E., Ibrehim, B., and L’Aour, A. (2004). Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l’Ouest et centrale au XXeme siècle. *Sud Sciences et technologies*, 13 :40.
- Paturel, J. E., Ouedraogo, M., Mahe, G., Servat, E., and Dezetter, A. (2003). Utilization of hydrological models for evaluating surface water resource models and their spatio-temporal evolution : Application to West Africa. *IAHS-AISH Publication*, (280) :117–123.

- Paxian (2016). Bias reduction in decadal predictions of West African Monsoon rainfall using regional climate models.
- Pereira, M. V. F. and Pinto, L. M. V. G. (1991). Multi-stage stochastic optimization applied to energy planning. *Mathematical Programming*, 52(1-3) :359–375.
- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1-4) :275–289.
- Pettitt, A. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.*, 28(2) :126–135.
- Peyrillé, P., Lafore, J.-P., and Redelsperger, J.-L. (2007). An Idealized Two-Dimensional Framework to Study the West African Monsoon. Part I : Validation and Key Controlling Factors. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64(8) :2765–2782.
- Poff, N. L. R., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., and Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime : A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47(11) :769–784.
- Quensière, J. and Retière, A. (2013). Vulnérabilités de la région de Dakar au changement climatique. Technical report.
- Raskina, P., Hansen, E., Zhu, Z., and Stavisky, D. (1992). Simulation of water supply and demand in the aral sea region. *Water International*, 17(2) :55–67.
- Raso, L., Malaterre, P. O., Bader, J. C., Raso, L., Malaterre, P. O., and An, J. C. B. (2017). An effective streamflow process model for optimal reservoir operation using stochastic dual dynamic programming To cite this version : HAL Id : hal-01761533 An effective streamflow process model for optimal reservoir operation using Stochastic Dual Dynami. *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Rauniyar, S. P., Protat, A., and Kanamori, H. (2017). Uncertainties in TRMM-Era multisatellite-based tropical rainfall estimates over the Maritime Continent. *Earth and Space Science*, 4(5) :275–302.
- Razavi, T. and Coulibaly, P. (2013). Streamflow prediction in ungauged basins : Review of regionalization methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8) :958–975.
- Refsgaard, J. and Storm, B. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, mike she. edition.
- République de Mauritanie (2004). Programme d’action national d’Adaptation aux changements climatiques. Technical report.
- République du Mali (2007). Programme d’Action National d’Adaptation aux Changements Climatiques Mali. Technical report, MINISTERE DE L’EQUIPEMENT ET DES TRANSPORTS.
- Roehrig, R. (2010). *Variabilité Intrasonnière de la Mousson Africaine : Caractérisation et Modélisation*. PhD thesis.

- Sall, M. (2011). *Human Settlements Working Paper Series Changements climatiques , stratégies d ' adaptation et mobilités . Evidence à partir de quatre sites au Sénégal Al Assane Samb.*
- Secrétariat Exécutif du Conseil National de Sécurité Alimentaire (2015). Alimentaire Et De Resilience. Technical report.
- Silver, J., McEwan, C., Petrella, L., and Baguian, H. (2014). Climate change, urban vulnerability and development in Bobo-Dioulasso and Saint-Louis : Learning from across two West African cities. 44(June) :0–30.
- Smith, M. (1992). *CROPWAT : A Computer Program for Irrigation Planning and Management, by M. Smith. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46. Rome.* Food and Agriculture Organisation.
- Sommeria, G. and Testud, J. (1984). COPT 81 : A Field Experiment Designed for the Study of Dynamics and Electrical Activity of Deep Convection in Continental Tropical Regions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 65(1) :4–10.
- Sultan, B. and Janicot, S. (2000). Abrupt shift of the ITC Z over West Africa and intra-seasonal variability. 27(20) :3353–3356.
- Sylla, M., Faye, A., Kluste, N., and Dimobe, K. (2018). Projected increased risk of water deficit over major West African river basins under future climates.pdf. *Climate Change*.
- Sylla, M. B., Kebe, I., Nikiema, M., and Browne Klutse, N. (2016). Climate Change over West Africa : Recent Trends and Future Projections. *Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa*, (April) :1–244.
- Tall, M., Sylla, M. B., Diallo, I., Pal, J. S., Faye, A., Mbaye, M. L., and Gaye, A. T. (2017). Projected impact of climate change in the hydroclimatology of Senegal with a focus over the Lake of Guiers for the twenty-first century. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1-2) :655–665.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4) :485–498.
- Thiam, N. A. (2016). Allocation optimale de l'eau dans le bassin versant du fleuve Sénégal. Technical report, Université Laval, Québec.
- Tilmant, A. and Pina, J. (2018). Enhanced cross-boundary water resources management in the Senegal River Basin. Technical report, Université Laval.
- Tilmant, A., Pina, J., Salman, M., Casarotto, C., Ledbi, F., and Pek, E. (2020). Probabilistic trade-off assessment between competing and vulnerable water users - The case of the Senegal River basin. *Journal of Hydrology*, 587(124915).
- Tractebel Engineering and GDF Suez International Power (2011). Update of the ECOWAS Revised Master Plan for the Generation and Transmission of Electrical Energy Optimal development plan and analysis of transmission network performance and stability. - Final Report Volume 2. (September).

- Traore, B., Corbeels, M., van Wijk, M. T., Rufino, M. C., and Giller, K. E. (2013). Effects of climate variability and climate change on crop production in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 49 :115–125.
- Traore, M. L., Camara, M. C., Bah, M. O., and Kouyate, B. (2006). Synthèse Des Etudes De Vulnérabilité Adaptation Du Secteur Forêt Aux Changements Climatiques En Guinée.
- Tropis (2007). Étude sur la modélisation pluie débit et la conception d'un système d'alerte précoce contre les inondations dans le haut bassin du fleuve Sénégal. Technical report.
- Vincent, K. (2004). Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa. *Tyndall Centre for Climate Change Research*, 56(August) :41.
- Wauthy, B. (1983). Introduction à la climatologie du golfe de Guinée. *Océanographie tropicale*, Vol.18, N°(2) :103–138.
- Willmott, C. J. and Feddema, J. J. (1992). A More Rational Climatic Moisture Index. *The professional Geographer*, 44(I) :84–87.
- World Bank (2007). A Ricardian analysis of the impact of climate change on African Cropland. Technical report.
- Wurbs, R. A. (2006). Methods for Developing Naturalized Monthly Flows at Gaged and Ungaged Sites. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(1) :55–64.
- Wurbs, R. A. (2012). Water rights analysis package (WRAP) modeling system. Technical Report August.
- Wurbs, R. A. and Sisson, E. (1999). Comparative Evaluation of Methods for Distributing Naturalized Streamflows from Gaged to Ungaged Sites. page 148.
- Xue, Y., Sales, F., Lau, W. K., Boone, A., Feng, J., Dirmeyer, P., Guo, Z., Kim, K. M., Kitoh, A., Kumar, V., Pocard-Leclercq, I., Mahowald, N., Moufouma-Okia, W., Pegion, P., Rowell, D. P., Schemm, J., Schubert, S. D., Sealy, A., Thiaw, W. M., Vintzileos, A., Williams, S. F., and Wu, M. L. C. (2010). Intercomparison and analyses of the climatology of the West African Monsoon in the West African Monsoon Modeling and Evaluation project (WAMME) first model intercomparison experiment.
- Xue, Y., Janicot, S., and Lau, W. K. (2016). Variability and predictability of West African monsoon on seasonal and decadal scales. *Climate Dynamics*, 47(11) :3391–3392.
- Yates, D. N. (1997). Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, 201(1-4) :289–310.
- Zeng, N., Neelin, J. D., Lau, K. M., and Tucker, C. J. (1999). Enhancement of interdecadal climate variability in the Sahel by vegetation interaction. *Science*, 286(5444) :1537–1540.