



Organisation des Nations Unies
pour l'alimentation
et l'agriculture



ÉTUDES ODD 6.4 SUIVI DE L'UTILISATION
DURABLE DES RESSOURCES EN EAU

La désagrégation du niveau de stress hydrique par bassin et sous-bassin hydrographique

Cas du bassin du fleuve Sénégal





**ÉTUDES ODD 6.4 SUIVI DE L'UTILISATION
DURABLE DES RESSOURCES EN EAU**

La désagrégation du niveau de stress hydrique par bassin et sous-bassin hydrographique

Cas du bassin du fleuve Sénégal

par

Metogbe Belfrid Djihouessi et Michela Marinelli

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome

Mohamed H'Meyade, Kandas Conde et Moustapha Lo

Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal, Dakar

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
Rome, 2025

Citer comme suit:

Djihouessi, M.B., Marinelli, M., H'Meyade, M., Conde, K. et Lo, M. 2025. *La désagrégation du niveau de stress hydrique par bassin et sous-bassin hydrographique. Cas du bassin du fleuve Sénégal*. Études ODD 6.4 – Suivi de l'utilisation durable des ressources en eau. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cd6644fr>

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites. Le fait qu'une société ou qu'un produit manufacturé, breveté ou non, soit mentionné ne signifie pas que la FAO approuve ou recommande ladite société ou ledit produit de préférence à d'autres sociétés ou produits analogues qui ne sont pas cités.

Les opinions exprimées dans ce produit d'information sont celles du/des auteur(s) et ne reflètent pas nécessairement les points de vue ni les politiques de la FAO.

ISBN 978-92-5-140068-5

© FAO, 2025



Certains droits réservés. Cette œuvre est mise à la disposition du public selon les termes de la licence Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.fr>).

Selon les termes de cette licence, cette œuvre peut être copiée, diffusée et adaptée, sous réserve que la source soit mentionnée. Lorsque l'œuvre est utilisée, rien ne doit laisser entendre que la FAO cautionne une quelconque organisation, produit ou service. L'utilisation du logotype de la FAO n'est pas autorisée. Si l'œuvre est traduite ou adaptée, la traduction ou adaptation doit obligatoirement être accompagnée de la mention de la source ainsi que de la clause de non-responsabilité suivante: «La traduction [ou adaptation] n'a pas été réalisée par l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). La FAO n'est pas responsable du contenu ni de l'exactitude de la traduction [ou de l'adaptation]. L'édition originale [en langue xxxx] est celle qui fait foi.»

Tout différend découlant de la présente licence qui ne pourrait être réglé à l'amiable sera soumis à une procédure d'arbitrage conformément au Règlement d'arbitrage de la Commission des Nations Unies pour le droit commercial international (CNUDCI). Les parties acceptent d'être liées par la sentence arbitrale prononcée conformément au règlement susmentionné, qui réglera définitivement leur différend.

Matériel attribué à des tiers. La présente licence Creative Commons CC BY 4.0 ne s'applique pas aux éléments de la publication sur lesquels la FAO n'a pas de droit d'auteur. Il incombe aux utilisateurs souhaitant réutiliser des informations ou autres éléments contenus dans cette œuvre qui sont attribués à un tiers, tels que des tableaux, des figures ou des images, de déterminer si une autorisation est requise pour leur réutilisation et d'obtenir le cas échéant la permission de l'ayant-droit. Toute action qui serait engagée à la suite d'une utilisation non autorisée d'un élément de l'œuvre sur lequel une tierce partie détient des droits ne pourrait l'être qu'à l'encontre de l'utilisateur.

Photographies attribuées à la FAO. Les photographies présentées dans cette œuvre et attribuées à la FAO ne sont pas couvertes par la licence Creative Commons mentionnée ci-dessus. Toute demande relative à l'utilisation de photographies appartenant à la FAO doit être adressée par courriel à photo-library@fao.org.

Ventes, droits et licences. Les produits d'information de la FAO sous forme électronique, ainsi que la liste des distributeurs auprès desquels peuvent être achetés des exemplaires imprimés de ces produits, sont disponibles sur le site web de la FAO (www.fao.org/publications). Pour toute question d'ordre général sur les publications de la FAO, prière d'écrire à publications@fao.org. Les questions relatives aux droits et licences sur les publications doivent être adressées à copyright@fao.org.

Table des matières

PRÉFACE	ix
REMERCIEMENTS	xi
ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	xii
RÉSUMÉ	xv
1. INTRODUCTION	1
1.1. Contexte et objectifs	1
1.2. Présentation du bassin du fleuve Sénégal	2
1.3. Généralités sur le WEAP	4
1.4. Historique du développement du modèle WEAP fleuve Sénégal	6
2. SOURCES ET CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES	9
2.1. Informations géographiques	9
2.1.1. Situation géographique	10
2.1.2. Occupation du sol	11
2.2. Données climatiques	13
2.2.1. Température	15
2.2.2. Précipitation	15
2.2.3. Humidité relative du sol	17
2.3. Données hydrologiques	18
2.4. Données sur les demandes en eau	19
2.4.1. Demande en eau pour l'AEP	19
2.4.2. Demande en eau pour l'élevage	21
2.4.3. Demande en eau pour l'irrigation	21
2.4.4. Demande en eau pour l'activité minière	22
2.5. Autres données	24
2.6. Possibilité d'amélioration des données	26

3. HYPOTHESES CLES ET APPROCHE DE MODELISATION	29
3.1. Hypothèses clés	29
3.2. Modélisation hydrologique des écoulements	30
3.2.1. Présentation de la méthode «sol-moisture»	31
3.2.2. Calibration et validation du modèle hydrologique	33
3.3. Détermination des EFR	37
3.4. Détermination du stress hydrique	40
4. SCENARIOS	43
4.1. Changement climatique	43
4.2. Niveaux de développement	44
4.3. Classes de gestion environnementale	45
5. STRUCTURE ET SCHEMA DU MODELE	47
5.1. Représentation des composants d'un système dans WEAP	47
5.2. Schématisation du modèle WEAP-BFS	48
5.3. Configuration des paramètres généraux	50
6. RESULTATS DE L'EVALUATION DU STRESS HYDRIQUE	51
6.1. Variation des débits environnementaux en situation actuelle	51
6.2. Situation actuelle du stress hydrique dans le BFS	52
6.3. Influence du changement climatique sur le stress hydrique actuelle	55
6.4. Influence du niveau de développement	59
7. LIMITES DU MODELE ET DEVELOPPEMENT FUTUR	65
7.1. Limites liées aux données disponibles	65
7.2. Limites structurelles du modèle WEAP-BFS	65
7.3. Axes de développement futur	66
8. CONCLUSION GENERALE	67
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	68
ANNEXES	69
Annexe 1. Procédures de mise à jour des données	69
Annexe 2. Répartition des sites de demandes par sous bassin	70
Annexe 3. Données et hypothèses pour l'estimation de la demande en eau pour l'élevage	71
Annexe 4. Données et hypothèses pour l'estimation de la demande en eau pour l'irrigation	72

Annexe 5. Données et hypothèses pour l'estimation de la demande en eau pour l'exploitation des minerais	73
Annexe 6. Détail sur les demandes en eau par pays du BFS	75
Annexe 7. Information sur les réservoirs et les lacs	76
Annexe 8. Details et valeurs retenues sur les Hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS	83
Annexe 9. Details et valeurs retenues sur les Hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS	85
Annexe 10. Impact des changements climatiques et approvisionnement en eau du BFS	93

Figures

1. Carte de la situation géographique du bassin du fleuve Sénegal présentant la densité des populations dans le bassin en 2020	4
2. Présentation de l'interface du logiciel WEAP, qui dispose de barres de menus et de différentes rubriques pour la schématisation, l'entrée des données et la visualisation des résultats. Le A représente le WEAP développé dans le cadre du SDAGE 2050. Le B représente le WEAP mis à jour par la FAO en collaboration avec le SEI et l'OMVS	7
3. Réseau hydrographique du fleuve avec les différents sous bassin	10
4. Occupation du sol du bassin du fleuve Sénegal	12
5. Aperçu de la fenêtre d'entrée des données d'occupation de sol dans le modèle WEAP-BFS pour le sous-sous-Bassin SB01_Bafing	13
6. Aperçu de la fenêtre d'entrée des données climatiques dans le modèle WEAP-BFS pour le sous-sous-Bassin SB01_Bafing	15
7. Séries de précipitations introduites dans le WEAP-BFS pour les différents sous Bassin	17
8. Séries de précipitations introduites dans le WEAP-BFS pour les différents sous Bassin	17
9. Séries de précipitations introduites dans le WEAP-BFS pour les différents sous Bassin	18
10. Chroniques des données de débits pour l'ensemble des stations hydrométriques du bassin du fleuve Sénegal	18
11. Variation mensuelle (A) et annuelle (B) des besoins en eau estimé par activité sur la période 2005-2019 sur le bassin du fleuve Sénegal	23
12. Modèle conceptuel de la méthode de mesure de l'humidité du sol	31
13. Débits observés par rapport aux débits simulés issus de la calibration et de la validation du modèle hydrologique «soil - mousture» pour différentes stations du fleuve Sénegal	34
14. Courbe de durée d'écoulement. Les classes A à D représentent les conditions définies dans le tableau 8	38
15. L'outil FDCShit wizard dans WEAP mise en œuvre pour la détermination des débits environnementaux pour le sous bassin Bafing en amont de Manantali	39
16. Le plugin Stress hydrique de WEAP (FAO, 2024)	41

17. Détail des scénarios S0 et S7 pris en considération dans le modèle WEAP-BFS. SA: Situation Actuelle, SO: Situation Optimisée, DM: Développement Modéré, DCM: Développement Capacité Maximale, DOE: Débit Objectif d'Étiage, DOEC: Débit objectif d'Étiage et de Crue	44
18. Représentation du bassin du fleuve Sénégal (SRB) dans WEAP	48
19. Fenêtre pour la configuration temporelle et du pas de temps du modèle WEAP-BFS	50
20. Besoin en débits environnementaux pour les sous bassins du fleuve Sénégal simulé avec le modèle WEAP SRB pour la période 2015-2024	51
21. Stress hydrique annuel et par saison sur le bassin du fleuve Sénégal en situation actuelle (2020-2024). La ligne jaune matérialise le seuil de dépassement du stress faible pour le stress moyen et la ligne rouge matérialise le seuil dépassement du stress moyen pour le stress élevé	52
22. Désagrégation du stress hydrique de l'année 2024 sur le bassin du fleuve Sénégal en situation actuelle	53
23. Stress hydrique de l'année 2024 sur le bassin du fleuve Sénégal pour les différentes conditions climatiques	59
24. Stress hydrique annuel de l'année 2050 sur le bassin du fleuve Sénégal pour les différentes conditions climatiques	62

Tableaux

1. Présentation des informations géographiques utilisées dans le modèle WEAP-BFS	9
2. Répartition de la superficie des 9 sous-bassins du réseau hydrographique du fleuve Sénégal par pays	11
3. Répartition de la superficie des 9 sous-bassins du réseau hydrographique du fleuve Sénégal par pays	12
4. Description données climatiques utilisées dans le modèle WEAP-Sénégal	16
5. Types de données requises pour le paramétrage des barrages à réservoirs, des ouvrages au fil de l'eau et des lacs dans le WEAP-BFS	25
6. Présentation des catégories d'hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS	29
7. Présentation des catégories d'hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS	33
8. Description des classes de gestion écologique	39
9. Scénarios climatiques projetés pour le bassin du fleuve Sénégal	43
10. Besoin en eau chaque scénario du SDAGE 2050 considéré dans le modèle WEAP-BFS	45
11. Présentation des scénarios de gestion environnementale (EMC) du bassin du fleuve Sénégal	46
12. Composants utilisés pour représenter le système de gestion des ressources en eau d'un bassin versant dans WEAP	47
13. Répartition des points de demande en eau dans le modèle WEAP-Sénégal	49

14. Détail des valeurs permettant le calcul du stress hydrique pour le sous bassin Bafing en situation actuelle	54
15. Transferts annuels d'eau entre les sous-bassins du fleuve Sénégal en situation actuelle (en millions m ³)	55
16. Stress hydrique annuel suivant les différents scenarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche	56
17. Stress hydrique en saison seche suivant les différents scenarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche	57
18. Stress hydrique en saison de pluie suivant les différents scenarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche	57
19. Stress hydrique en saison de pluie suivant les différents scenarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche	61
20. Stress hydrique en saison sèche suivant les différents scenarios climatiques (2035-2050)	63
21. Stress hydrique en saison de pluie suivant les différents scenarios climatiques (2035-2050)	63



Préface

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) soutient le Programme 2030 de développement durable par la transformation vers des systèmes agroalimentaires plus efficaces, inclusifs, résilients et durables pour une amélioration de la production, de la nutrition, de l'environnement et des conditions de vie. La transformation des systèmes agroalimentaires est au cœur du mandat de la FAO.

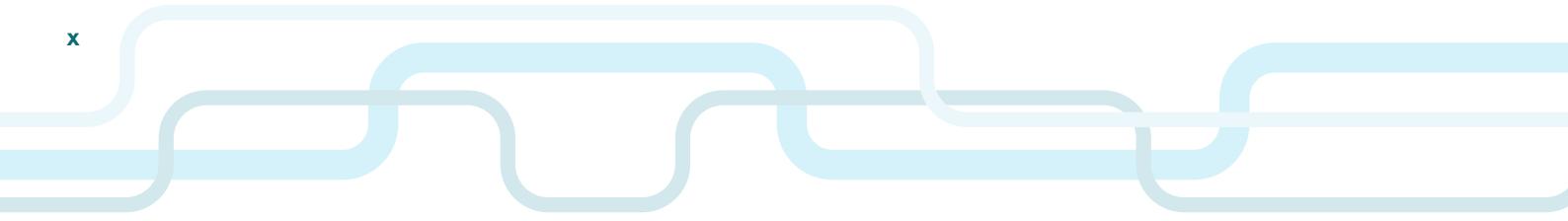
L'eau est l'essence de la vie et est au centre des systèmes agroalimentaires. La voie vers la réduction du stress hydrique passe par des systèmes agroalimentaires durables. Pour assurer une gestion durable des ressources en eau pour tous, il est essentiel de considérer le cycle de l'eau dans son intégralité, y compris toutes les utilisations et tous les utilisateurs.

La FAO est l'organisme dépositaire responsable du suivi de la cible 6.4 des objectifs de développement durable (ODD), qui porte sur l'utilisation et la pénurie d'eau et vise à «augmenter considérablement l'utilisation rationnelle des ressources en eau dans tous les secteurs et garantir la viabilité des retraits et de l'approvisionnement en eau douce afin de tenir compte de la pénurie d'eau et de réduire nettement le nombre de personnes qui souffrent du manque d'eau». À la FAO, la collecte, la gestion et la communication des données relatives aux indicateurs de la cible 6.4 au niveau mondial s'effectuent par le biais du Système mondial d'information sur les ressources en eau de la FAO (AQUASTAT).

En 2015, la FAO a rejoint l'Initiative de suivi intégré pour l'ODD 6 (IMI-SDG6) coordonnée par l'ONU-Eau. Cette initiative vise à accélérer la réalisation des cibles de l'ODD sur l'eau et l'assainissement durable par la mise en place d'un cadre de suivi cohérent et en soutenant les pays dans la réalisation de progrès à travers une prise de décision éclairée sur l'eau. Un tel cadre aidera les pays à progresser grâce à une prise de décision éclairée dans le domaine de l'eau, sur la base d'informations harmonisées, complètes, opportunes et précises.

L'évaluation du cycle de l'eau et des situations potentielles de stress hydrique, tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle infranationale utilisée pour la gestion des ressources en eau, est essentielle pour fournir aux utilisateurs et aux décideurs les informations nécessaires au processus de planification.

Le présent rapport propose une évaluation approfondie du stress hydrique dans le bassin du fleuve Sénégal (BFS) à travers la mise en œuvre d'un modèle hydrologique intégré développé sous le logiciel WEAP (Water Evaluation and Planning). Cette initiative, conduite en partenariat entre la FAO et l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS), a été lancée après l'atelier régional sur la désagrégation de l'indicateur ODD 6.4.2 (niveau de stress hydrique) organisé en avril 2024 par la FAO et l'OMVS. Elle s'inscrit dans le cadre du suivi désagrégé de l'indicateur ODD 6.4.2: prélèvement d'eau douce en proportion des ressources en eau douce disponibles, après avoir pris en compte l'exigence de débit environnemental.



Le modèle WEAP-BFS intègre une désagrégation spatiale en neuf sous-bassins versants, et une désagrégation temporelle mensuelle et saisonnière, afin de refléter au plus près la variabilité hydrologique du bassin. Le choix de ce bassin a principalement été motivé par l'importance capitale du fleuve Sénégal pour les pays qu'il traverse. Les résultats obtenus révèlent une hétérogénéité marquée du stress hydrique entre les sous-bassins. Si certains, comme le Bafing ou la Falémé, présentent une résilience hydrique structurelle, d'autres, tels que la Basse Vallée et la Moyenne Vallée, affichent une vulnérabilité chronique, accentuée par la saisonnalité des débits et la concentration des usages agricoles et domestiques. Ces contrastes soulignent l'importance de concevoir des stratégies de gestion différencierées, ajustées aux réalités locales et aux trajectoires d'évolution propres à chaque entité hydrographique.

Au-delà du diagnostic, le modèle WEAP-BFS se positionne comme un outil d'aide à la décision précieux pour l'OMVS et les États membres de la FAO, en permettant la simulation de politiques publiques intégrées et la priorisation d'interventions selon des critères d'efficacité, d'équité et de durabilité. Il facilite également le dialogue intersectoriel et transfrontalier, en fournissant une base commune de compréhension des enjeux liés à l'eau.

Cependant, pour que cet outil conserve sa pertinence et sa crédibilité à long terme, un engagement collectif est requis pour améliorer la qualité des données, renforcer les capacités techniques et assurer une mise à jour régulière du modèle en fonction des nouvelles connaissances, des infrastructures mises en service et des impacts du changement climatique. Le renforcement de la collecte ainsi que le suivi et l'amélioration de la qualité de données produites sont des conditions *sine qua non* vers la réalisation de l'ODD 6 et l'obtention d'un meilleur suivi de l'ODD 6.4.2.

En coordination et en collaboration avec les autres acteurs, la FAO continuera à soutenir ses États membres pour atteindre cet objectif en fournissant une assistance scientifique et technique.

Remerciements

Ce rapport a été réalisé grâce à la collaboration de l'OMVS. Une mention spéciale à Ahmed Ramdane Sylla, Directeur des Infrastructures Régionales de l'OMVS, pour sa disponibilité, pour avoir toujours facilité notre travail en mettant à disposition tous les données et les outils nécessaires à l'analyse.

Nous tenons également à remercier Brian Joyce de l'Institut de l'environnement de Stockholm (SEI), pour le coaching et le soutien technique fourni sur le modèle WEAP développé pour le bassin du fleuve Sénégal, et Riccardo Biancalani, coordinateur de l'Initiative de suivi intégré pour l'ODD 6 (IMI-SDG6) à la FAO. Lucie Chocholata, responsable du renforcement des capacités, FAO, a supervisé le processus de publication. L'assistance éditoriale a été fournie par Nassila Boukaria, James Morgan et Paolo Mander, FAO.

Cette publication a été réalisée dans le cadre de l'Initiative de suivi intégré pour l'ODD 6 (IMI-SDG6). Nous remercions chaleureusement les entités suivantes pour leur contribution au Fonds fiducie interinstitutions des Nations Unies pour l'eau : l'Agence autrichienne de développement, le ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement, la Commission européenne, le ministère néerlandais des Affaires étrangères, le ministère néerlandais des Infrastructures et de la Gestion de l'eau, l'Agence suédoise de coopération internationale au développement et la Direction du développement et de la coopération suisse.

Nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de quelque manière que ce soit à la réalisation de ce travail.

Abréviations, sigles et acronymes

AEP	alimentation en eau potable
BFS	bassin du fleuve Sénégal
CC	scénario de changement climatique
CHIRPS	Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data
CRU-TS	Climatic Research Unit (CRU) Time-series (TS)
EFR	besoins environnementaux en eau
ELE	élevage
EMC	classe de gestion environnementale
Eq.	équation
ERWR	ressources en eau renouvelables externes
ET_o	évapotranspiration de référence
ET_a	évapotranspiration réelle
FDC	flow duration curve
GEFIS	Système mondial d'information sur les besoins environnementaux en eau
IMI-SGD6	Initiative de suivi intégré de l'objectif du développement durable 6
IRR	irrigation
IRWR	ressources en eau renouvelables internes
MIN	mine
Mm³	millions de mètres cubes
MNT	modèle numérique de terrain
MSWEP	Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation
MW	mégawatt

NSE	Coefficient d'efficacité de Nash
ODD	objectif de développement durable
OMVS	Organisation pour la mise en valeur du Fleuve Sénégal
P	précipitation
Q	débit
SB	sous-bassin
SDAGE	Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux
SEI	Institut de l'environnement de Stockholm (<i>Stockholm Environment Institute</i>)
SIG	système d'information géographique
TFWW	prélèvement total d'eau douce
TRWR	ressources totales renouvelables en eau douce
WEAP	Système d'évaluation et de planification des eaux (<i>Water Evaluation and Planning System</i>)
WEAP-BFS	Modèle WEAP du Bassin du Fleuve Sénégal
WGS 84	World Geodetic System 1984
WSP	Water stress plugin



Résumé

Le présent rapport propose une évaluation approfondie du stress hydrique dans le bassin du fleuve Sénégal (BFS) à travers la mise en œuvre d'un modèle hydrologique intégré développé sous le logiciel WEAP (Water Evaluation and Planning). Cette initiative, conduite en partenariat entre la FAO et l'OMVS, s'inscrit dans le cadre du suivi désagrégé de l'indicateur ODD 6.4.2, relatif à la gestion durable des ressources en eau douce, et vise à renforcer les capacités de planification régionale face aux défis croissants de la sécurité hydrique.

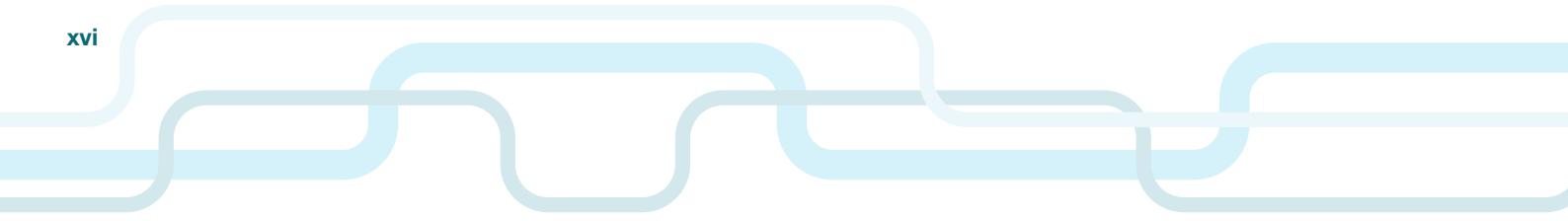
Le modèle WEAP-BFS intègre une désagrégation spatiale en neuf sous-bassins versants, et une désagrégation temporelle mensuelle et saisonnière, afin de refléter au plus près la variabilité hydrologique du bassin. Alimenté par des données climatiques (CHIRPS, MSWEP, CRU-TS), des informations hydrométriques, ainsi que des estimations sectorielles des demandes en eau (AEP, irrigation, élevage, activités minières), le modèle permet d'analyser l'équilibre entre disponibilité et besoins en eau sous différents scénarios de développement et de changement climatique à l'horizon 2050.

Les résultats révèlent une hétérogénéité forte du stress hydrique dans le bassin. Les sous-bassins de la Basse Vallée (SB3) et de la Moyenne Vallée (SB8) apparaissent comme les plus vulnérables, présentant des niveaux de stress hydrique très élevés (>100 pour cent) quel que soit la saison ou le scénario considéré. Cette situation critique s'explique par une concentration des usages, une faible production locale d'eau et une dépendance aux apports amont. À l'inverse, des zones telles que le Bafing (SB1), la Falémé (SB4) ou le Ferlo (SB5) affichent une résilience hydrique marquée, même dans les scénarios climatiques les plus sévères, grâce à une moindre pression anthropique et une relative stabilité des ressources.

Cette évaluation met également en évidence le rôle central des infrastructures hydrauliques (barrages de Manantali, Diama, projets de Koukoutamba et Gourbassi) dans la régulation des écoulements et l'atténuation des périodes de tension. Toutefois, leur efficacité dépendra fortement de la coordination régionale, de la gestion opérationnelle et de la priorisation des usages.

Sur le plan méthodologique, le modèle WEAP-BFS constitue un outil stratégique d'aide à la décision, offrant aux gestionnaires et aux décideurs un cadre analytique robuste pour simuler les effets combinés des politiques d'aménagement, des dynamiques démographiques et des aléas climatiques. Il permet également de soutenir le dialogue intersectoriel et transfrontalier sur la gestion durable de l'eau dans un contexte de ressource partagée.

Néanmoins, des limites importantes subsistent, notamment liées à la qualité des données climatiques et de consommation, en l'absence de mesures directes sur de nombreux points de prélèvement. Le modèle repose en grande partie sur des hypothèses et des valeurs moyennes, ce qui peut induire des marges d'erreur dans les résultats. Il est donc impératif de renforcer les dispositifs d'observation et de collecte de données, de moderniser les systèmes de suivi hydrique, et de former les acteurs régionaux à l'utilisation évolutive du modèle.



En conclusion, le modèle WEAP-BFS, dans sa configuration actuelle, offre une base opérationnelle solide pour anticiper les risques de pénurie, identifier les sous-bassins prioritaires, et guider l'élaboration de stratégies de gestion différencierées, équitables et durables. Sa pleine efficacité dépendra toutefois de l'engagement continu des parties prenantes à améliorer la connaissance du territoire, à partager les données et à renforcer les capacités institutionnelles dans une perspective de gouvernance concertée et résiliente de l'eau dans le bassin du fleuve Sénégal.

1. Introduction

1.1. Contexte et objectifs

L'initiative de suivi intégré de l'objectif de développement durable 6 (IMI-SDG6) a été créée par ONU-Eau en 2015. Elle a été conçue pour soutenir les États membres de l'ONU dans le développement, le suivi et l'utilisation d'indicateurs pour l'évaluation de l'ODD 6. Ainsi, en réunissant les organisations¹ des Nations Unies dépositaires des différents indicateurs mondiaux de l'ODD 6, l'IMI-SDG6 vise l'optimisation de la collaboration entre ces organisations, à travers entre autres, l'harmonisation des méthodologies et des demandes de données, et une sensibilisation plus efficace tout en réduisant la charge de travail liée à l'établissement des rapports. L'IMI-SDG6 vise également l'amélioration de la collaboration intersectorielle et la consolidation des capacités et des données existantes entre les organisations au niveau national.

Dans le cadre de la mise en œuvre des activités de l'IMI-SDG6, la FAO a organisé en avril 2024, en collaboration avec l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal), un atelier régional sur la désagrégation de l'indicateur ODD 6.4.2 (Niveau de stress hydrique) dans le bassin du fleuve Sénégal situé en Afrique de l'Ouest, et dont le bassin s'étend sur quatre pays notamment la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. Suite à cet atelier, les deux institutions (la FAO et l'OMVS) ont convenu de collaborer pour la mise en œuvre d'un modèle de planification intégrée pour l'analyse et la gestion des ressources en eau ainsi que pour le suivi de l'indicateur ODD 6.4.2 dans le bassin du fleuve Sénégal. Le choix de ce bassin a principalement été motivé par l'importance capitale du fleuve Sénégal pour les pays qu'il traverse.

Le fleuve Sénégal offre une multitude de services écosystémiques essentiels et contribue largement à l'économie de la sous-région ouest-africaine. Les prélèvements effectués sur ce fleuve, estimés à 4,7 km³ par an en 2020, permettent d'assurer l'alimentation en eau potable de plusieurs villes, l'irrigation d'une agriculture en pleine expansion, l'élevage d'un cheptel important et l'exploitation minière de nombreuses exploitations. En outre, le fleuve contribue à la production d'électricité, avec des barrages tels que Manantali (200 MW) et Félou (60 MW), et abrite une diversité d'écosystèmes uniques, notamment dans le Fouta Djallon et dans la moyenne et la basse vallée. La gestion de la ressource en eau du bassin du fleuve Sénégal est un défi majeur qui repose sur la nécessité d'assurer durablement sa disponibilité en quantité et en qualité suffisante pour les usages humains et pour les différents écosystèmes aquatiques du bassin.

La perception commune des acteurs décisionnels du bassin du fleuve Sénégal est que la quantité d'eau perdue annuellement est excessive. En 2020, les prélèvements ne représentaient uniquement que 30 pour cent des écoulements. Ceci laisse entrevoir un potentiel important de développement économique pour l'avenir étant donné que 70 pour cent des écoulements sont encore non prélevés. Cette perspective de développement est pleinement traduite dans le

¹ Il s'agit de huit agences sous la coordination d'ONU-Eau à savoir: FAO, PNUE, CEE-ONU, UNESCO, UN-HABITAT, UNICEF, OMS et OMM

Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) à l'horizon 2050, et plus particulièrement dans le scénario «optimisé», où il est prévu une augmentation de 60 pour cent de l'approvisionnement en eau potable, une multiplication par deux des terres irriguées, le développement et le maintien de la navigation sur une période de huit mois par an, ainsi que la stabilisation d'un débit pour préserver l'écosystème. Dans ce contexte, et pour assurer la durabilité de la ressource en eau douce renouvelable, il s'avère impératif d'évaluer la pression exercée par les divers secteurs d'activité économique sur ces ressources, tant à l'échelle du bassin versant qu'à celle des sous-bassins. Cette analyse, pour être complète, doit inclure l'échelle annuelle et saisonnière, afin de garantir une évaluation fiable.

Conformément à ces impératifs, la collaboration entre la FAO et l'OMVS s'est articulée autour des objectifs suivants:

1. produire un modèle d'analyse et de gestion des ressources en eau du bassin du fleuve Sénégal, personnalisé et adapté aux conditions locales;
2. intégrer au modèle un module permettant le calcul et l'analyse de l'indicateur ODD 6.4.2 – niveau de stress hydrique pour le bassin du fleuve Sénégal, désagrégé par unité hydrologique et par saison;
3. fournir une formation au personnel de l'OMVS sur des questions techniques relatives à l'utilisation des outils développés.

L'outil sélectionné par les différentes parties pour atteindre les objectifs fixés est le Water Evaluation and Assessment Planning (WEAP). Ce choix s'explique par le fait que l'OMVS disposait déjà d'un modèle WEAP dans le cadre du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux à l'horizon 2050 (OMVS, 2023), qui fournissait une bonne simulation des scénarios de développement pour le bassin et les sous-bassins. Aussi, le WEAP est doté d'un module complémentaire, spécifiquement conçu pour la désagrégation spatiale et temporelle de l'indicateur 6.4.2., développé récemment par la FAO en collaboration avec le SEI.

1.2. Présentation du bassin du fleuve Sénégal

Le bassin du Fleuve Sénégal (BFS) couvre une superficie de près de 424 000 km² répartis entre la Guinée, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. Il comprend 9 sous-bassins versants, dont la basse vallée du fleuve Sénégal, la moyenne vallée du fleuve Sénégal et les bassins versants des affluents notamment Bafing, Baoulé-Bakoye, Falémé, Ferlo, Terekole Magui Kolimbiné, Karakoro et Gorgol (figure 1).

De manière générale, les précipitations dans le BFS sont très inégalement réparties, avec une décroissance marquée des précipitations d'une zone sud vers le nord. Ainsi, l'essentiel des écoulements du fleuve Sénégal est produit par le haut bassin, tandis que les apports d'eau sont relativement négligeables dans la moyenne et la basse vallée. Les forts débits d'eau enregistrés dans la vallée sont directement le résultat de la propagation des écoulements du haut bassin, qui inondent annuellement le lit majeur sur 10 à 20 km de large. Le débit moyen du fleuve Sénégal à son exutoire est estimé à 11 900 km³/an. Afin de gérer au mieux les importantes quantités d'eau

disponibles, plusieurs ouvrages de régulation ont été installés dans le BFS. Les plus importants sont notamment le barrage de Manantali, mis en service en 1988 pour l'irrigation, puis équipé d'une centrale hydroélectrique de 200 MW en 2001, et le barrage de Diama, mis en service en 1986. Par rapport aux débits naturels, les débits influencés par le barrage de Manantali sont beaucoup plus élevés en période d'étiage, de début de crue et de fin de crue (de mi-novembre à mi-juillet environ), et sont moins élevés en période de crue (de mi-juillet à mi-novembre environ). Le barrage de Diama, quant à lui, permet de réguler l'intrusion saline depuis 1986 en maintenant une réserve d'eau douce en permanence à l'amont du barrage et en provoquant l'abaissement du niveau de la crue à Diama.

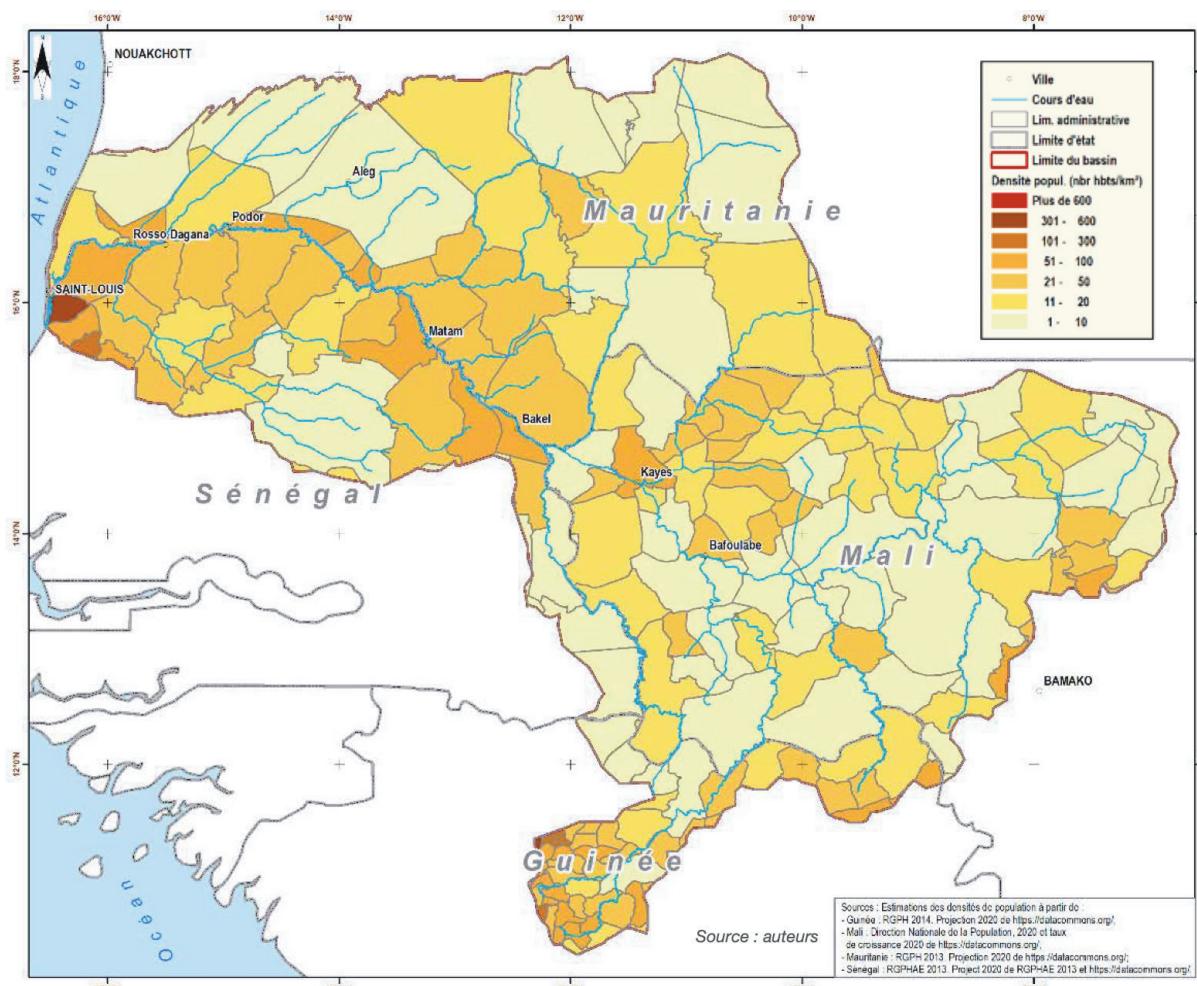
Les écosystèmes du BFS peuvent être regroupés en quatre ensembles relativement homogènes. De l'amont vers l'aval, on retrouve:

1. les écosystèmes du Fouta Djallon, situés en Guinée et dans le sud du Mali, qui s'étendent sur 800 000 ha de forêt dense sèche, dont 50 000 ha de lambeaux de forêts et de nombreuses zones humides de grande valeur;
2. les écosystèmes de savanes soudano-guinéennes le long des affluents du fleuve Sénégal, dans la Haute-Guinée et au Mali, qui se composent de plateaux cuirassés, de plaines alluviales et de bas-fonds;
3. les écosystèmes d'eau douce, présents autour des eaux de surface dans la vallée du fleuve Sénégal, notamment les zones inondables à fort potentiel de rendement;
4. les écosystèmes de la zone deltaïque, composés de zones humides d'eau salée et saumâtre, abritant des formations de mangroves, quelques hectares de peuplements de palétuviers et une zone d'accueil pour les oiseaux migrateurs.

Selon le schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux du BFS pour l'horizon 2050 (OMVS, 2023), la population du bassin passerait de 7,5 à 11,2 millions d'habitants entre 2020 et 2050. La répartition spatiale de cette population sur le bassin en 2020 est présentée à la figure 1. Les moyens d'existence d'une grande partie de cette population continueront de dépendre des principaux cours d'eau, notamment pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation, la pêche et l'énergie hydroélectrique. La tendance globale pour l'avenir est à l'augmentation des prélèvements, car les estimations de 2020 révèlent que seuls 30 pour cent environ des écoulements naturels sont utilisés. En 2050, l'alimentation en eau potable devra approcher les 100 pour cent de couverture, les superficies irriguées devront être multipliées par deux, passant d'environ 200 000 ha à 410 000 ha, et le potentiel de l'hydroélectricité sur le bassin, actuellement de 400 MW (260 MW à Manantali et 140 MW), pourrait être doublé, voire triplé grâce à d'autres barrages qui sont déjà à l'étude, comme Koukoutamba et Gourbassi, et qui seront construits dans les prochaines années, ainsi que Niagara et Boureya, à plus long terme.

Dans ce contexte de développement des ressources en eau transfrontalières, l'OMVS et ses États membres devront veiller, tout en prenant en considération les effets du changement climatique, à ce que l'eau soit disponible en quantité et en qualité suffisante pour les usages humains et pour les écosystèmes. Le modèle WEAP du bassin du fleuve Sénégal a été élaboré à cet égard.

Figure 1. Carte de la situation géographique du bassin du fleuve Sénégal présentant la densité des populations dans le bassin en 2020



Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. <https://cda-omvs.org/wp-content/uploads/2025/01/15161-BRL-OMVS-Schema-Directeur-Amenagement-des-eau-du-fleuve-Senegal-horizon-SDAGE-2050.pdf>

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

1.3. Généralités sur le WEAP

Le système d'évaluation et de planification de l'eau, entendu «Water Evaluation And Planning system» en anglais, dénommé WEAP en abréviation, est un logiciel convivial utilisé pour la planification des ressources en eau. Il offre l'avantage majeur de disposer d'une interface graphique intuitive permettant de construire, visualiser et modifier directement les éléments du système d'eau à étudier, à partir d'un schéma créé sur la base de fichiers SIG et de graphiques standard. Les calculs des simulations dans le WEAP s'effectuent en quelques minutes seulement, et son système de rapports très flexible et complet permet aux utilisateurs de personnaliser les rapports en sélectionnant les unités d'eau (métriques ou anglaises), les années et le format (par exemple, les niveaux absolu, les parts en pourcentage ou les taux de croissance), mais aussi exporter directement tous les tableaux et figures des résultats dans Excel.

Le WEAP se distingue de par son approche intégrée et de par son orientation à faciliter la prise de décision (Sieber, 2006; Lévite *et al.*, 2003; Thiam *et al.*, 2022). Fonctionnant sur le principe de base de la comptabilité de l'eau, qui s'appuie sur le «bilan hydrique», le WEAP permet de confronter directement la demande en eau à l'offre en eau. Il peut être appliqué aux bassins versants, aux sous-bassins uniques ou aux systèmes de rivières complexes (Yao *et al.*, 2021; Thiam *et al.*, 2022).

Au fil des utilisations et des applications, le WEAP est utilisé et perçu comme un outil à trois fonctions majeures à savoir:

1. une base de données: le WEAP fournit un système de stockage pour maintenir l'information sur la demande et l'approvisionnement en eau;
2. un outil de prévision: le WEAP simule la demande en eau, l'approvisionnement, les flux et le stockage, ainsi que la génération, le traitement et le rejet de la pollution;
3. un outil d'analyse politique: WEAP évalue une gamme complète d'options de développement et de gestion de l'eau, tout en prenant en compte les utilisations multiples et concurrentes des systèmes d'eau.

La mise en œuvre d'une simulation dans le logiciel WEAP se fait généralement en plusieurs étapes. La première étape consiste à définir le cadre temporel, les limites spatiales, les composants du système à simuler. Lors de la deuxième étape, les données relatives aux composantes du système sont entrées dans le logiciel pour l'«Année de référence» («Current account» en anglais) et une période de «Reference». Le WEAP est conçu de manière à ce que l'«Année de référence» et la période de «Reference» fournissent un instantané de la demande actuelle en eau, des approvisionnements pour le système et/ou des charges de pollution. Une fois la schématisation du système et l'entrée des données terminées, l'étape suivante WEAP consiste à examiner plusieurs stratégies alternatives de développement et de gestion de la ressource en eau. Ceci se fait à travers la définition d'une série alternative d'hypothèses futures basées sur les politiques, les coûts et les facteurs qui affectent la demande, la pollution, l'approvisionnement et l'hydrologie. La combinaison de l'ensemble de ces alternatifs d'hypothèses ou de politiques permet d'élaborer des scénarios de simulation dont les résultats sont directement disponibles dans les rubriques «Résultats» et «Explorateur de scénarios».

Les questions traitées dans le WEAP couvrent les analyses de la demande sectorielle, la conservation de l'eau, les priorités d'allocation, l'utilisation des eaux souterraines, les opérations de réservoirs, la production d'énergie hydroélectrique, le suivi de la pollution, les analyses des avantages-coûts des projets, ainsi que les exigences de l'écosystème. Différents scénarios peuvent être comparés notamment la suffisance en eau, les coûts et les avantages, et la compatibilité avec les objectifs environnementaux. Il est toutefois important de souligner que le WEAP vise à assister le planificateur «qualifié» plutôt que de le remplacer. Son utilisation requiert une bonne maîtrise du fonctionnement du système à simuler ainsi qu'une disponibilité de données satisfaisante avec la possibilité de personnaliser la structure et le niveau de détail en cas de données limitées, puis de compléter progressivement les données dès qu'elles seront disponibles.

1.4. Historique du développement du modèle WEAP pour le bassin du fleuve Sénégal

Le premier modèle WEAP pour le bassin du fleuve Sénégal (BFS) a été élaboré en 2017 selon les caractéristiques suivantes:

- planifier les allocations de manière globale;
- simuler uniquement les pas de temps annuel.

Ce modèle WEAP a été révisé lors de l'élaboration du SDAGE 2050, en réponse à la décision de l'OMVS d'évaluer divers scénarios prospectifs relatifs à l'activation et à la gestion de cinq réservoirs potentiels, ainsi que leurs implications en termes d'impact sur le changement climatique et de développement de nouveaux objectifs en matière d'approvisionnement en eau potable (AEP), d'irrigation, de production hydroélectrique et de gestion des crues (figure 2A). Ainsi, les objectifs du WEAP SDAGE 2050 étaient:

- avoir un modèle orienté gestion;
- assurer un degré de souplesse optimal en mettant en œuvre une approche simple et une structure adaptative qui permettra les études les plus poussées;
- évaluer divers scénarios prospectifs liés à l'activation et à la gestion des 5 réservoirs envisagés, à l'impact des changements climatiques, à l'évolution de divers objectifs: AEP, irrigation, production hydroélectrique, soutien de crue;
- simuler différents pas de temps: du décadaire au journalier.

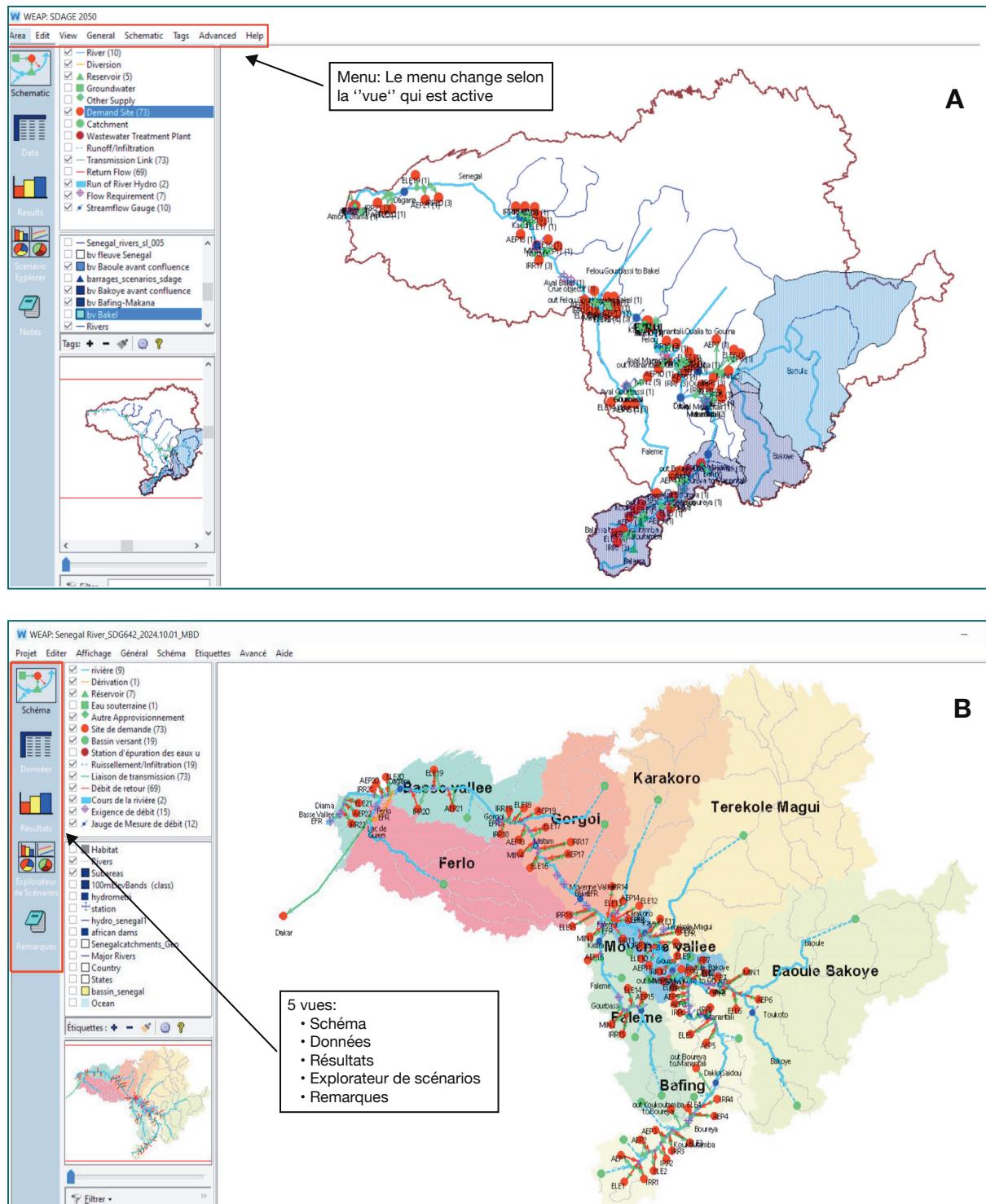
Suite à l'atelier de Conakry sur la désagrégation de l'ODD 6.4.2 dans le bassin du fleuve Sénégal, l'OMVS et la FAO ont décidé d'améliorer le modèle WEAP SDAGE (figure 2B). Ainsi en collaboration avec le SEI, la FAO a amélioré les WEAP pour:

- avoir un modèle orienté gestion et calcul ODD 642;
- avoir un modèle discrétisé spatialement en 9 sous-bassins versants;
- obtenir un modèle flexible permettant de calculer l'indicateur 6.4.2 lié au stress hydrique sous les différents scénarios définis au niveau du SDAGE;
- se doter d'un modèle crédible qui peut être utilisé par les différentes parties prenantes impliquées dans la gestion du BFS.

Il convient de mentionner que le modèle mis à jour inclut l'évaluation des besoins environnementaux en eau selon l'approche FDC shift (Flow Duration Curve Shift, ou Courbe des débits classés).

Dans la suite de ce document, le modèle WEAP du bassin du fleuve Sénégal pour le SDAGE 2050 et le calcul du stress hydrique, mis à jour par la FAO et le SEI en collaboration avec l'OMVS, est désigné par WEAP-BFS.

Figure 2. Présentation de l'interface du logiciel WEAP, qui dispose de barres de menus et de différentes rubriques pour la schématisation, l'entrée des données et la visualisation des résultats. Le A représente le WEAP développé dans le cadre du SDAGE 2050. Le B représente le WEAP mis à jour par la FAO en collaboration avec le SEI et l'OMVS



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page 1 relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.



2. Sources et constitution de la base de données

Fondamentalement cinq types de données ont été utilisées dans le modèle WEAP du bassin du fleuve Sénégal: les données géographiques, les données climatiques, les données hydrologiques, les données sur les demandes en eau et les données sur la ressource (relatives à la planification du bassin). La présente section décrit les approches utilisées pour obtenir chaque type de données. L'ensemble des données utilisées dans le modèle WEAP est stocké dans le dossier WEAP Areas (lié au modèle) suivant le chemin: *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

2.1. Informations géographiques

Le logiciel WEAP dispose d'une interface de visualisation conçue pour aider et orienter l'opérateur dans la construction du schéma du système à modéliser et lui permettre d'affiner les limites de la zone du projet. Pour ce faire, il est possible d'ajouter à cette interface des cartes au format raster ou vecteur. Les paramètres de visualisation des données SIG ajoutées peuvent être ajustés directement dans le WEAP (couleur, affichage des attributs, ajustement des étiquettes, etc.). Cependant, le logiciel ne permet pas de les traiter ou de les modifier. Ces opérations (y compris la définition du système de référence spatiale) devront avoir été effectuées au préalable dans un logiciel SIG avant l'importation des fichiers dans WEAP. Pour le bassin du fleuve Sénégal, les informations SIG à importer dans le WEAP doivent être projetées dans système de référence spatiale WGS 84.

Les informations géographiques utilisées dans le WEAP-BFS (tableau 1) sont relatives à l'emplacement géométrique des entités du bassin (limite du bassin, limite des sous-bassins, des cours d'eau, des plans d'eau, etc.), aux informations topographiques (MNT), aux informations d'utilisation des sols. Ces données peuvent être trouvées dans le dossier *Informations_Geographiques* situé dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

Tableau 1. Présentation des informations géographiques utilisées dans le modèle WEAP-BFS

Type d'information	Source	Format	Commentaire
Limite du bassin du fleuve Sénégal	OMVS	Shapefile	Permet de visualiser la forme et l'étendue du bassin.
Limite des sous-bassins	OMVS	Shapefile	Permet de visualiser la forme et l'étendue des différents sous-bassins.
Limite administrative	OMVS	Shapefile	Permet de visualiser le chevauchement entre les limites administratives et les limites du bassin. Information intéressante pour la dés-agrégration spatiale.
Réseau hydrographique	OMVS	Shapefile	Permet de visualiser la forme et l'étendue des différents sous-bassins.

Tableau 1. (suite)

Type d'information	Source	Format	Commentaire
Localisation des barrages et autres infrastructures	OMVS	Shapefile	Permet de visualiser la position des barrages, des prélèvements AEP, Irrigation, élevage et mines par sous-bassins
Modèle numérique de terrain	OMVS	Raster	Permet de délimiter automatiquement les sous-bassins. C'est important pour visualiser les résultats sous forme de cartes. Les sous-bassins délimités peuvent être ajustés en fonction des informations de terrain.
Utilisation des terres	OMVS	Raster	Il permet de positionner des éléments de calcul des bassins versants au niveau de chaque bief du fleuve Sénégal et de ses affluents.

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

2.1.1. Situation géographique

Le bassin du fleuve s'étend approximativement entre les coordonnées: Latitude Nord: 11°30' N (source du fleuve) à 16° N (embouchure) et Longitude Ouest: 11°30' W (source) à 16°30' W (embouchure) (figure 3). Les informations relatives à la superficie des 9 sous-bassins réseau hydrographique sont présentées dans le tableau 2.

Figure 3. Réseau hydrographique du fleuve avec les différents sous bassin

Source: données venant du SDAGE 2050 du Bassin du Fleuve Sénégal.

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

Tableau 2. Répartition de la superficie des 9 sous-bassins du réseau hydrographique du fleuve Sénégal par pays

Sous-bassin	Superficie en Guinée (en km ²)	Superficie au Mali (en km ²)	Superficie en Mauritanie (en km ²)	Superficie au Sénégal (en km ²)	Total (en km ²)	Proportion du BFS (en %)
Faleme	5 316	12 824	0	11 916	30 056	7
Ferlo	0	0	0	44 215	44 215	10
Basse vallée	0	0	61 197	19 472	80 669	19
Moyenne vallée	0	11 257	2 008	1 015	14 280	3
Gorgol	0	0	23 592	0	23 592	6
Karakoro	0	4 345	45 790	0	50 135	12
Terekole Magui	0	24 877	18 064	0	42 942	10
Baoule – Bakoye	7 314	91 926	0	0	99 240	23
Bafing	19 109	20 115	0	0	39 224	9
BFS entier	31 739	165 345	150 651	76 618	424 352	
Proportion du BFS (en %)	7	39	36	18		100

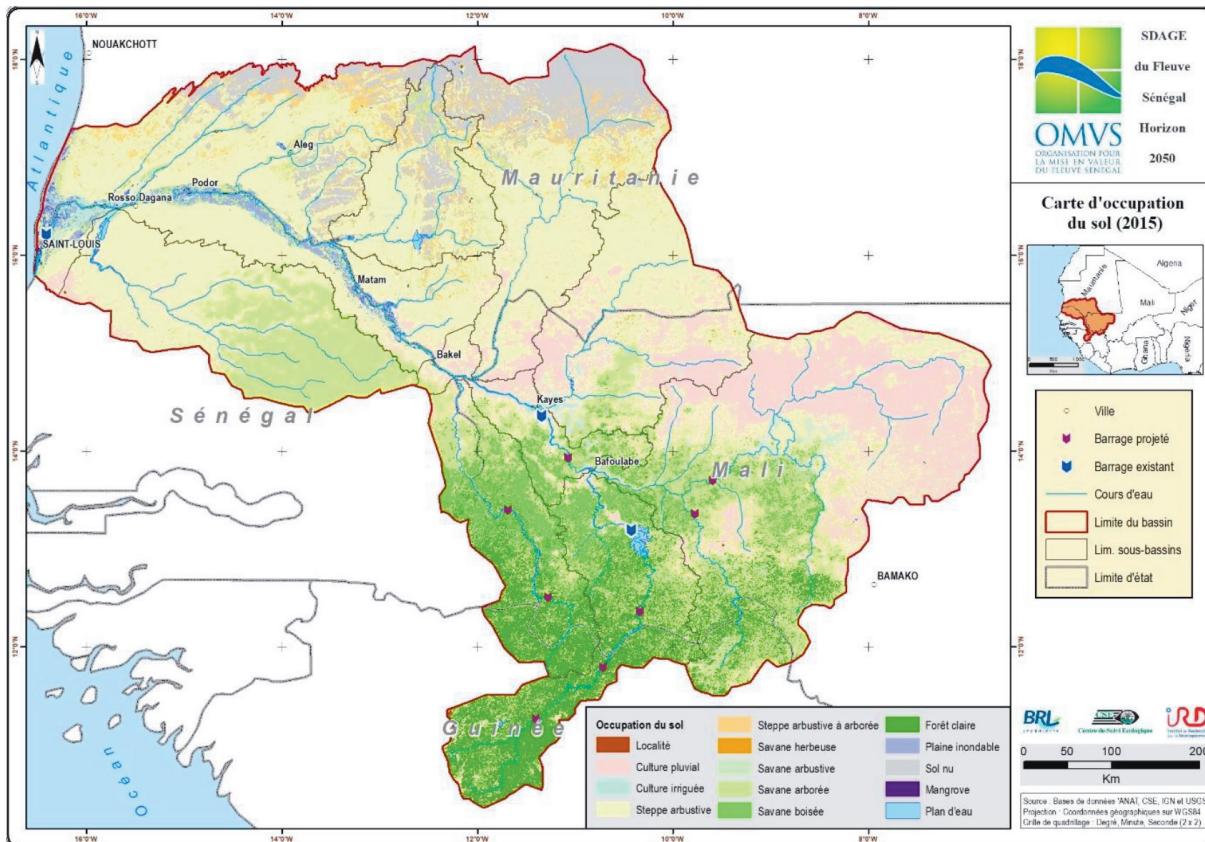
Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

2.1.2 Occupation du sol

Le bassin versant du fleuve Sénégal se distingue par une remarquable diversité de la couverture du sol, répartie entre diverses zones géographiques (figure 4). En amont, dans la zone de la vallée du Fouta Djallon en Guinée, les forêts-galeries et les savanes jouent un rôle essentiel dans la régulation de l'eau. Toutefois, ces zones sont fortement menacées par la déforestation liée à l'agriculture. Au Sénégal, la vallée moyenne du fleuve est dominée par des terres agricoles irriguées, notamment pour la riziculture, soutenues par les barrages de Manantali et Diama. En aval, le delta du fleuve Sénégal, qui s'étend sur le Sénégal et la Mauritanie, et abrite des zones humides d'une importance capitale pour la biodiversité (figure 4).

La spécificité de chaque sous-bassin en matière d'occupation des sols (couverture du sol) est matérialisée par la définition de sous-sous-bassins comme unité hydrologique pour le calcul des écoulements (voir session 3.2). Le nombre d'unités par sous-bassin ainsi que les paramètres de couverture du sol requis pour chaque unité sont indiqués dans le tableau 3. Un aperçu de la fenêtre d'entrée des données dans WEAP est présenté à la figure 5, et le détail des données est fourni en annexe 9.

Figure 4. Occupation du sol du bassin du fleuve Sénegal



Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénegal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. Sections non publiées.

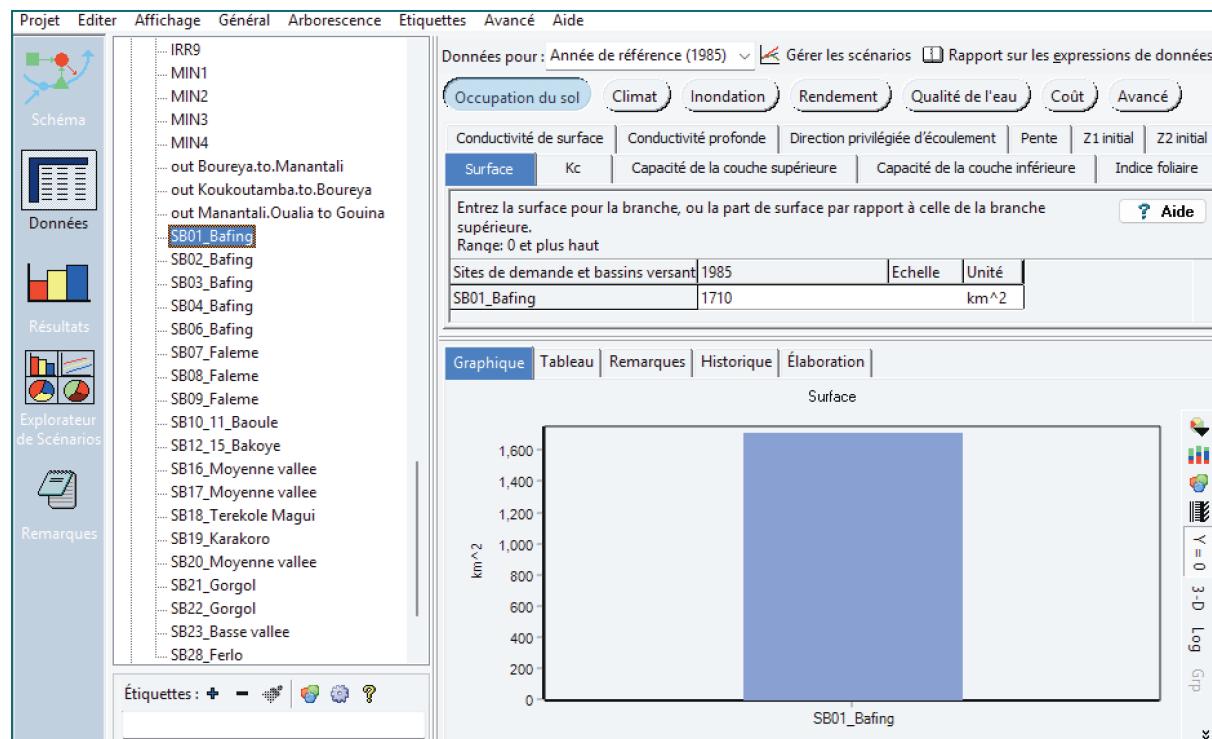
Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

Tableau 3. Répartition de la superficie des 9 sous-bassins du réseau hydrographique du fleuve Sénegal par pays

Sous bassin	Unité hydro par sous bassin	Paramètre définissant l'occupation de sol par unité
Bafing	SB01 à SB06	
Faleme	SB07 à SB09	
Baoule	SB10; SB11	
Bakoye	SB12 à SB15	
Moyenne Valle	SB16; SB17; SB20	
Terekole Magui	SB18	
Karagoro	SB19	
Gorgol	SB21; SB22	
Basse vallée	SB23; SB27	
Ferlo	SB28	

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Figure 5. Aperçu de la fenêtre d'entrée des données d'occupation de sol dans le modèle WEAP-BFS pour le sous-sous-bassin SB01_Bafing



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

2.2. Données climatiques

Dans le WEAP-Sénégal, les données climatiques ont principalement servi à la modélisation des écoulements² dans chaque sous-bassin versant du fleuve suivant la méthode de l'humidité du sol «Soil Moisture Method». Elles ont ainsi permis de calibrer un modèle P-ETa-Q (précipitations-évapotranspiration réelle-débit) permettant de reproduire les écoulements dans le fleuve Sénégal sur une période de référence bien précise, puis d'utiliser le modèle calibré pour simuler les écoulements futurs. Cette approche permet d'intégrer les anomalies liées au changement climatique dans les projections réalisées par le WEAP. Notons que l'évaluation de la calibration du modèle P-ETa-Q a été réalisée à l'aide des débits observés sur le fleuve Sénégal (voir section 2.3 et session 3.2). Différentes périodes de référence ont été choisies pour le calibrage du modèle P-ETa-Q sur la plage de données disponible allant 1905 à décembre 2012.

² Le logiciel WEAP intègre un certain nombre de méthodes hydrologiques pour le calcul des écoulements d'eau sur la base de données climatiques. L'utilisateur peut choisir entre la méthode des coefficients simplifiés, la méthode de l'humidité du sol ou la méthode MABIA (Maîtrise des besoins d'irrigation en agriculture).

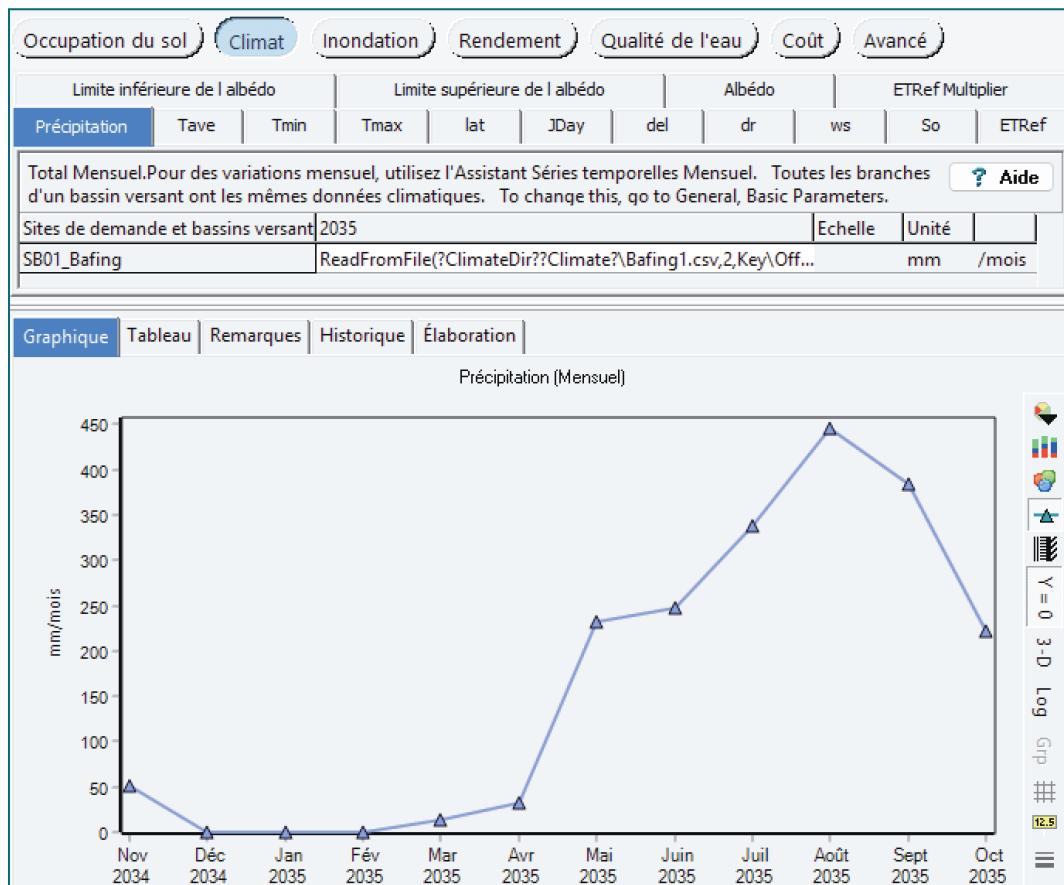
Les critères de sélection des données climatiques pour le WEAP-Sénégal requièrent que les données de pluviométrie, d' ET_0 ³ et de température présentent une bonne chronique (disponibilité) sur la période de référence, soient reconnues comme étant de bonne qualité et fassent l'objet d'une analyse de leurs cumuls moyens mensuels et annuels cohérente. Sur cette base, il s'est avéré que les données historiques des stations sur le terrain ainsi que celles de l'Organisation météorologique mondiale n'avaient pas une bonne chronique sur la période d'étude et ne couvraient l'ensemble du bassin. Les données satellitaires CHIRPS et MSWEP ainsi que les données CRU-TS (Climatic Research Unit Time series) ont alors été utilisées après une analyse de leur cohérence avec les observations au sol.

Les données climatiques employées dans le cadre du WEAP-Sénégal sont archivées dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > Climate*. Au sein de ce répertoire, des dossiers ont été créés pour chaque modèle climatique utilisé (voir la section 3.1 pour la liste des modèles climatiques). Chacun de ces dossiers contient des fichiers Excel pour chaque sous-bassin, où l'on retrouve des informations climatiques telles que présentées dans le tableau 4. La figure 6 montre une illustration de la fenêtre d'entrée des données dans le WEAP. Dans la suite de cette session, une description sommaire des données de température, de précipitations, et d'humidité relative collectées et introduites dans le WEAP-BFS a été faite.

³ Dans la «Soil Moisture Method» utilisée par WEAP, l'évapotranspiration de référence est le type d'évapotranspiration principalement utilisé comme donnée d'entrée pour les calculs. Les étapes sont les suivantes

- L'évapotranspiration actuelle dans le modèle est estimée en entrant d'abord l'évapotranspiration de référence.
- Cette évapotranspiration de référence peut être déterminée à partir de divers paramètres climatiques et topographiques, souvent à l'aide d'équations telles que l'équation de Penman-Monteith, ou provenir de modèles mondiaux d'évapotranspiration de référence mensuelle disponibles auprès d'organisations telles que la FAO.
- Ensuite, les coefficients de culture (K_c), qui sont spécifiques à chaque type d'utilisation des terres, sont définis. Ces valeurs K_c sont multipliées par l'évapotranspiration de référence afin de tenir compte des taux d'évapotranspiration variables selon les types de plantes. Bien que les K_c soient appliqués et configurés au niveau des types d'utilisation des terres dans WEAP, ils sont intrinsèquement liés aux caractéristiques d'évapotranspiration des cultures ou de la végétation présentes sur ces terres.

Figure 6. Aperçu de la fenêtre d'entrée des données climatiques dans le modèle WEAP-BFS pour le sous-sous-bassin SB01_Bafing



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

2.2.1. Température

Les variations mensuelles de la température dans le bassin du fleuve Sénégal, pour la période 1985-2014, soit une durée de 30 ans, montrent des fluctuations des valeurs entre 37 et 22 °C (figure 7). En moyenne, les températures les plus élevées sont enregistrées entre mars et mai dans la zone nord du bassin. Les mois de juillet à septembre, correspondant à la saison des pluies, connaissent des températures légèrement plus fraîches, autour de 25°C.

2.2.2. Précipitation

Du point de vue de l'ingénierie hydrologique, les précipitations sont la principale source d'eau de surface, leur mesure et leur analyse constituent le point de départ des études liées à l'utilisation et au contrôle de l'eau. Elles permettent de mieux expliquer le processus de transformation des précipitations en ruissellement dans le bassin versant. Les données mensuelles relatives aux précipitations, issues de l'ensemble des sous-bassins du fleuve Sénégal pour la période s'étendant de 1985 à 2014 (30 ans), sont représentées dans la figure 8. L'analyse de ces observations met en évidence une période de précipitations particulièrement intenses, s'étendant, en moyenne, de juin à octobre.

Tableau 4. Description des données climatiques utilisées dans le modèle WEAP-Sénégal

Type de données climatique	Description / commentaire	Sources
Précipitations (Précip)	Chronique de précipitations moyenne sur la période 1948 à 2014 (en mm/Mois)	PrincetonV3Monthly**
Température (Tave)	Chronique de températures moyennes mensuelle sur la période 1948 à 2014 (en oC)	PrincetonV3Monthly**
Température minimale (Tmin)	Chronique de températures minimales mensuelle sur la période 1948 à 2014 (en oC)	PrincetonV3Monthly**
Température maximale (Tmax)	Chronique de températures maximales mensuelle sur la période 1948 à 2014 (en oC)	PrincetonV3Monthly**
Humidité (RelHumidity)	Humidité relative moyenne mensuelle (en %)	PrincetonV3Monthly**
Vent (Wind)	Vitesse moyenne du vent mensuelle (en m/sec)	PrincetonV3Monthly**
Évapotranspiration de référence	Chronique d'évapotranspiration de référence mensuelle sur la période 1948 à 2014 (en oC)	PrincetonV3Monthly**
Latitude	Latitude où se trouve le bassin versant	OMVS
Jour julien de l'année (JDay)	Valeur mensuelle du jour Julien sur une année de 365 jours	Valeur conventionnelle
Déclinaison solaire mensuelle (del)	Données par la formule $(360/2/\pi)*(0.4093 * \sin((360*JDay/365) - (360/2/\pi)*1.405))$ (en %)	---
Distance relative entre le soleil et la terre (dr)	Données par la formule $1+0.033*\cos(360*JDay/365)$	---
L'angle de couché du soleil (ws)	Données par la formule $(2*\pi/360)*\text{Arccos}(-1*\tan(lat)*\tan(del))$	---
Radiation solaire mensuelle	Données par la formule: $15.392*dr*(ws*\sin(lat)*\sin(del) + \cos(lat)*\cos(del)*\sin(ws*360/2/\pi))$	---
Albedo	Albédo (à utiliser uniquement lorsque les limites inférieure et supérieure de l'albédo sont laissées en blanc). La configuration par défaut a été utilisée pour ce paramètre	---
Limite supérieure de l'Albedo	La configuration par défaut a été utilisée pour ce paramètre	---
Limite inférieure de l'Albedo	La configuration par défaut a été utilisée pour ce paramètre	---

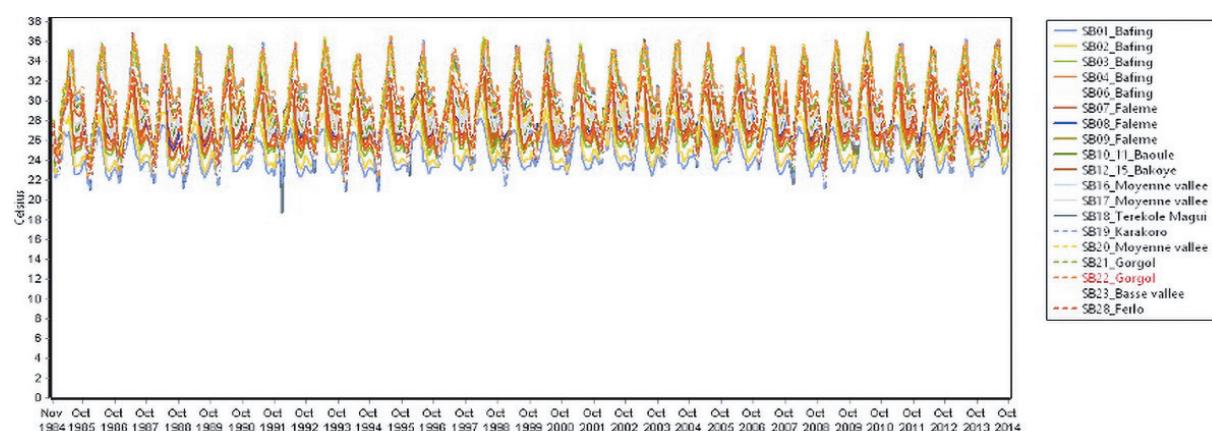
** Données de séries temporelles climatiques extraites de: Princeton v3 (Global, 1948-2014, Monthly, 28 km) (Sheffield et al., 2006).

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

2.2.3. Humidité relative du sol

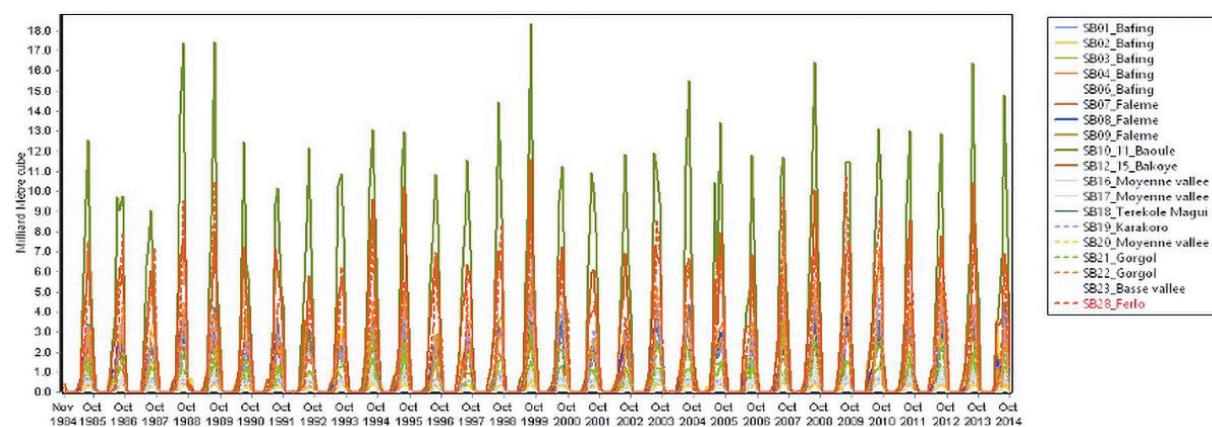
Les données enregistrées montrent de la tête du bassin vers l'exutoire, l'humidité relative du sol montre une variation marquée. On observe des plages de forte humidité (comprises entre 30 et 85 pour cent sur l'année) dans les zones amont, qui se transforment progressivement en plages d'humidité plus faible (allant de 0 à 40 pour cent sur l'année) à mesure que l'on se rapproche de l'exutoire (figure 9).

Figure 7. Séries de précipitations introduites dans le WEAP-BFS pour les différents sous Bassin



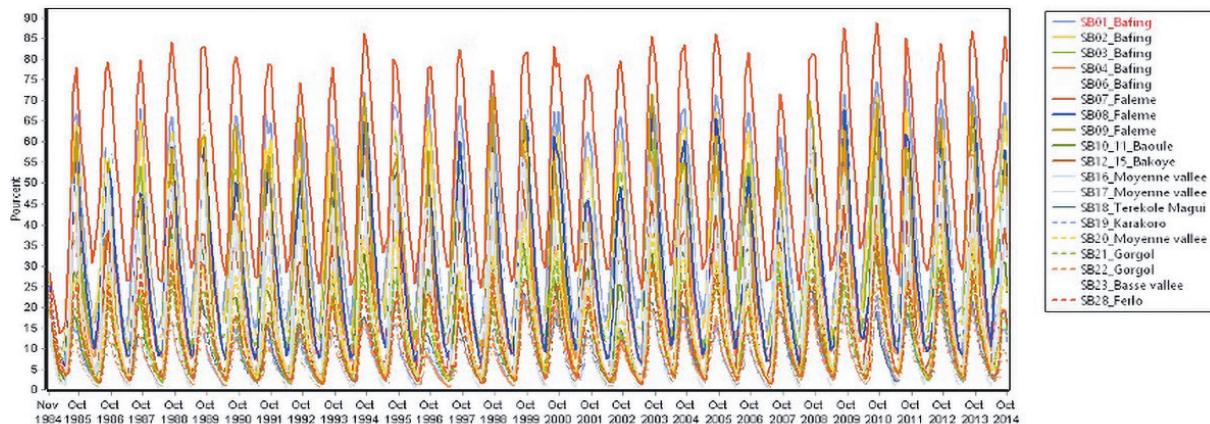
Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Figure 8. Séries de précipitations introduites dans le WEAP-BFS pour les différents sous Bassin



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Figure 9. Séries de précipitations introduites dans le WEAP-BFS pour les différents sous Bassin

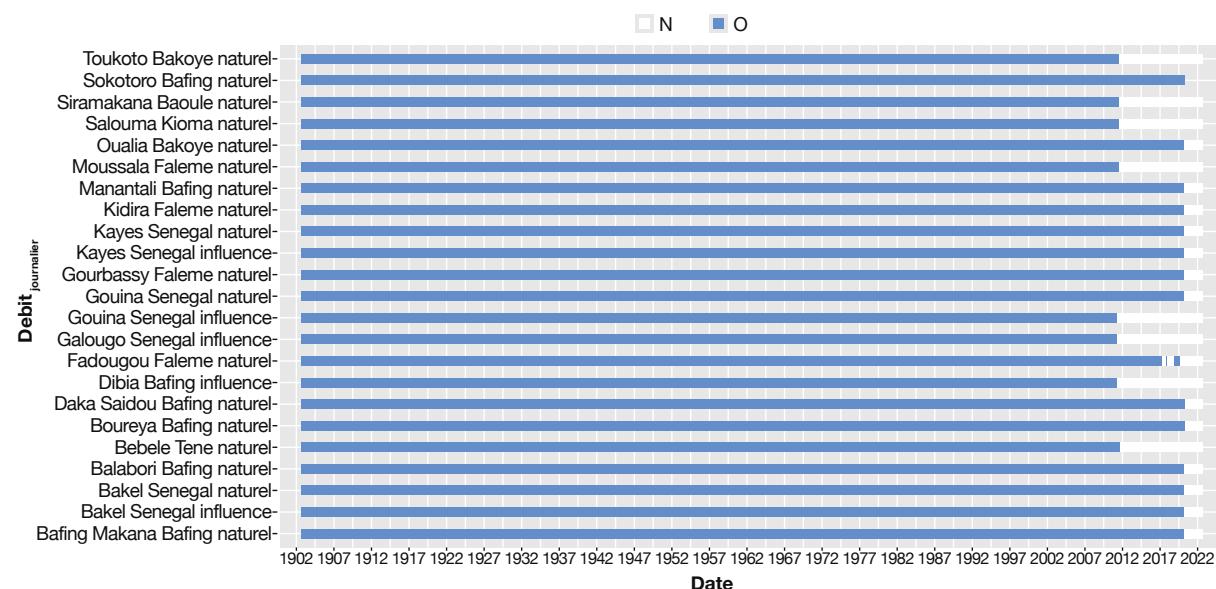


Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

2.3. Données hydrologiques

Les données hydrologiques regroupent principalement les données de débits et de hauteurs d'eau. Celles du WEAP-Sénégal ont été fournies par l'OMVS. Elles ont ensuite été analysées afin d'identifier et de supprimer les données aberrantes, de relever les données douteuses et de les supprimer si nécessaire, mais aussi d'identifier la meilleure période pour le calage des modèles précipitation-ETa-débit. Les chroniques de données obtenues après cette analyse sont présentées sur la figure 10 pour chaque station hydrométrique. Elles ont été sauvegardées dans un fichier Excel au format csv dans le dossier WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data.

Figure 10. Chroniques des données de débits pour l'ensemble des stations hydrométriques du bassin du fleuve Sénégal



Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. Sections non publiées.

Les données de débit ont été principalement utilisées pour évaluer la calibration du modèle précipitation-ET_a-débit. Cette calibration s'est effectuée principalement sur les tronçons non altérés (en amont des principaux prélèvements ou réservoirs) à un pas de temps mensuel (les données originairement journalières ayant été agrégées mensuellement), en s'assurant que le modèle soit calibré pour les années humides, moyennes et sèches.

2.4. Données sur les demandes en eau

Les principaux usages dont les demandes en eau ont été prises en compte dans le WEAP-Sénégal sont les suivantes: l'approvisionnement en eau potable (AEP), l'élevage (ELE), l'irrigation (IRR) et les exploitations minières (MIN) (figure 11). Pour l'ensemble de ces usages, il n'y avait pas ou très peu de mesures directes effectuées sur le terrain par rapport aux quantités d'eau utilisées. De ce fait, l'approche adoptée a été d'estimer (par calcul) les demandes sur la base des informations moyennes relatives à chaque usage (nombre d'habitant, superficie des périmètres irrigués, consommation ou besoin unitaire en eau, etc.). L'année de référence considérée pour l'estimation de l'ensemble des demandes est l'année 2020, et l'année horizon considérée est de 2050, conformément à ce qui a été retenu pour le SDAGE 2050.

Afin de faciliter dans la schématisation des sites de demandes en eaux dans le modèle WEAP-Sénégal, les demandes par usage ont été regroupées et agrégées suivant leur positionnement dans le bassin. Au total, les sites de demandes pris en compte dans le WEAP-Sénégal sont au nombre de:

- 22 sites de demande en eau pour l'approvisionnement en eau potable (de AEP1 à AEP21)
- 21 sites de demande en eau pour l'élevage (de ELE1 à ELE21)
- 22 sites de demande en eau pour l'irrigation (de IRR1 à IRR21)
- 04 sites de demande en eau pour les mines (de MIN1 à MIN4)

L'annexe 2 présente la répartition des sites de demandes par sous-bassin versant.

2.4.1. Demande en eau pour l'AEP

L'estimation des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable dans le bassin du fleuve Sénégal a été effectuée sur la base de la taille de la population et de la consommation unitaire suivant l'équation ci-dessous (Eq.1).

$$\text{Demande}_{(\text{AEP / jour})} = \text{Taille Population} \times \text{Consommation Unitaire} \quad (\text{Eq.1})$$

Deux hypothèses principales ont été émises dans cette approche: (i) les prélèvements sont constants tout au long de l'année et (ii) l'ensemble de la population prélève dans les eaux superficielles pour satisfaire ses besoins en eau potable. Bien que ces hypothèses tendent à maximiser l'estimation de la demande en eau potable, elle demeure un meilleur compromis au vu de l'importance cruciale de toujours garantir de l'eau disponible pour l'alimentation en eau potable (AEP).

Les données de population utilisées ont pour source les recensements démographiques disponibles auprès de l'Institut national de la statistique (RGPH 2014) pour la Guinée, de la Direction nationale de la Population pour le Mali (RGPH 2014), de l'Office national de la statistique (RGPH 2013) pour la Mauritanie et de l'Agence nationale de la statistique et de la démographie

(RGPH AHE 2013) pour le Sénégal. La taille des populations pour l'année 2020 (année de base pour l'estimation des demandes) a été estimée pour chaque commune, district ou sous-préfecture, en appliquant le taux de croissance défini par l'équation ci-dessous (Eq. 2). Dans les cas où les taux de croissance ne sont pas directement disponibles auprès des administrations centrales, la population de l'année 2020 a été calculée en considérant le taux de croissance à partir des informations de la Banque mondiale.

$$\text{Pop}_{2020} = \text{Pop}_{(2020-n)} \times (1+t_{2020-n+1}) \times \dots \times (1+t_{2020}) \quad (\text{Eq.2})$$

n: représente l'écart entre l'année du dernier recensement et l'année 2020;

$t_{2020-n+1}$: repesent de taux de croissance de l'année 2020-n+1

La consommation unitaire considérée est de 45 L/jour/habitant pour la population urbaine desservie par un réseau de distribution, de 30 L/jour/habitant pour la population rurale desservie par un réseau de distribution et de 20 L/jour/habitant pour les populations non desservies (c'est-à-dire n'ayant pas de réseau de distribution et devant se déplacer vers des points d'eau). Aussi, les pertes par réseau sont considérées étant égales à 25 pour cent pour les réseaux en milieu urbain et à 35 pour cent pour les réseaux en milieu rural.

Dans certains cas, les prélèvements sont effectués en dehors du bassin pour l'alimentation en eau potable de la ville et de la région. C'est le cas pour les villes de Dakar (prélèvement effectué au lac de Guiers) et Nouakchott (prélèvement effectué à Jeder Lekraa).

Estimation de l'AEP à l'horizon 2050

L'estimation de la consommation en AEP en 2050 a été déterminée à l'aide de l'équation Eq1. La population considérée pour cet horizon est déterminée par les équations. À cette échéance, les consommations unitaires à l'échelle du bassin du fleuve Sénégal sont de 60 L/jour/habitant pour la population urbaine desservie et de 30 L/jour/habitant pour la population rurale desservie. Il est considéré qu'il n'y aura pas de population non desservie en 2050. Les pertes par réseau sont considérées comme étant égales à 25 pour cent pour les réseaux en milieu urbain et à 35 pour cent pour les réseaux en milieu rural.

$$\text{Pop}_{\text{urbaine_2050}} = \text{Pop}_{\text{urbaine_2010}} \times (1+t_{\text{urbain 2020_2050}})^{30} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\text{Pop}_{\text{rurale_2050}} = \text{Pop}_{\text{rurale_2010}} \times (1+t_{\text{rural 2020_2050}})^{30} \quad (\text{Eq.4})$$

$t_{\text{urbain 2020_2050}}$: taux moyen annuel de croissance de la population urbaine entre 2020 et 2050, soit 0,6 %, 1,2 %, 1,3 % et 1,0 % respectivement pour la Mauritanie, le Mali, la Guinée et le Sénégal;

$t_{\text{rural 2020_2050}}$: taux moyen annuel de croissance de la population rurale entre 2020 et 2050, soit 3,2 %, 3,8 %, 3,6 % et 3,3 % respectivement pour la Mauritanie, le Mali, la Guinée et le Sénégal.

L'ensemble des demandes en eau estimée pour l'alimentation en eau potable peuvent être trouvées dans le fichier Excel *AEP_SA.csv*, situé dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

2.4.2. Demande en eau pour l'élevage

La détermination de la demande en eau pour l'élevage a été faite pour chaque site de demande sur la base des effectifs de cheptel présent, convertis en unité de bétail tropical (UBT) suivant Leloup et Traoré (1989) (annexe 3) et en considérant une consommation unitaire de 40 litres par jour et par UBT (Eq.5).

$$\text{Demande}_{\text{ELE} / \text{jour}} = \text{Nbre de UBT} \times 40 \text{ L} \quad (\text{Eq.5})$$

Demande_{ELE-SB / jour}: Demande en eau de l'élevage, par jour au niveau de chaque site

L'estimation des effectifs de cheptel de chaque sous-bassin versant a été réalisée à partir des derniers recensements nationaux de cheptel effectués dans chaque pays, ainsi que du taux de croissance des espèces considérées (bovins, volailles, etc.) (annexe 3). Il convient de noter que les recensements dans les pays n'ont pas été effectués la même année. Cependant, pour le SDAGE 2050 et le modèle WEAP, l'estimation au niveau de tous les sous-bassins a été ramenée à l'année 2020 (année de référence pour les demandes en eau) selon l'équation Eq.6, afin de garantir une homogénéisation des données.

$$\text{Effectifs_Cheptel}_{2020} = \text{Effectifs_Cheptel}_{2020-n} \times (1 + t)^n \quad (\text{Eq.6})$$

n: représente l'écart entre l'année du dernier recensement et l'année 2020.

Estimation de la demande en eau pour l'élevage à l'horizon 2050

À partir des effectifs de cheptel estimés pour l'année 2020, les effectifs de cheptel à l'horizon 2050 ont été estimés suivant l'équation Eq.7 en considérant que le taux de croissance annuel du cheptel décroît progressivement selon une loi logarithmique présentée en annexe 3.

$$\text{Effectifs_Cheptel}_{2050} = \text{Effectifs_Cheptel}_{2020} \times (1 + t_{2020}) \times (1 + t_{2021}) \times \dots \times (1 + t_{2050}) \quad (\text{Eq.7})$$

L'ensemble des demandes en eau estimée pour l'élevage peuvent être trouvées dans le fichier *ELE_SA.csv*, situé dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

2.4.3. Demande en eau pour l'irrigation

Il existe quelques données sur les prélèvements d'eau destinés à l'irrigation dans le bassin du fleuve Sénégâl. Cependant, ces données sont parcellaires et ne couvrent qu'une faible partie du bassin versant. Face à ce déficit de données, les besoins en eau pour l'irrigation ont été déterminés sur la base des superficies irriguées, de la consommation unitaire d'eau par culture et de l'efficience du réseau d'irrigation et des pratiques agricoles (Eq.8). Cette relation a été appliquée à chaque culture sur le site considéré et la somme de l'ensemble des demandes des cultures permet de déterminer la demande en irrigation de chaque site.

$$\text{Demande}_{\text{IRR}} = \text{Superficie Irriguées} \times \text{Consommation Unitaire/Efficience} \quad (\text{Eq.8})$$

Il a été considéré que l'efficience des réseaux d'irrigation et des pratiques agricoles est égale à 0,5 dans le bassin du fleuve Sénégâl.

Les prélèvements pour l'irrigation ne sont pas constants au cours de l'année, car ils dépendent des conditions climatiques (selon les saisons), mais aussi du stade de développement des cultures. L'hypothèse formulée pour le modèle WEAP-BFS est que l'ensemble des sites irrigués prélèvent l'intégralité de leurs besoins dans les eaux de surface. Cette hypothèse est faite en l'absence de données précises sur les sites prélevant dans les eaux souterraines et sur les pourcentages prélevés sur ces sites. Cette hypothèse maximise la demande en eau pour l'irrigation par site de demande.

Les sources des données sur les superficies irriguées sont présentées dans l'annexe 4 pour chaque pays. L'ensemble des données utilisées concerne la saison 2019-2020. Les données relatives aux cultures effectuées par saison n'étant pas toujours disponibles, certaines hypothèses ont été formulées sur la base des informations recueillies au niveau local dans chaque pays. Par exemple, en Guinée, le riz est cultivé en hivernage et le maïs en contre-saison.

Les consommations unitaires ou besoins unitaires de chaque culture ont été déterminés sur la base de la relation (Eq. 9).

$$\text{Consommation Unitaire} = (Kc \times ET_o) - Pe - Ru_{n-1} \quad (\text{Eq.8})$$

($Kc \times ET_o$) Représente le besoin en eau de la plante obtenu dans la base de données de la FAO; Pe est la précipitation efficace et Ru_{n-1} représente la réserve utile. Le Kc est le coefficient et permet de corriger l' ET_o suivant une culture donnée et son stade de développement.

La demande en eau pour l'irrigation est effective uniquement pour les mois où le Kc est différent de zéro; pour les autres mois, la précipitation suffise à satisfaire les besoins des plantes. Ainsi, il a été possible d'établir le calendrier cultural de chaque culture (annexe 4).

L'ensemble des demandes en eau estimée pour l'irrigation dans le bassin du fleuve Sénégal peuvent être trouvées dans le fichier *IRR_SA.csv*, situé dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

Estimation de la demande en eau pour l'irrigation à l'horizon 2050

Pour l'horizon 2050, il est envisagé que l'ensemble des terres irriguées passeraient de 195 000 hectares à 430 000 hectares dans le bassin du fleuve Sénégal et que l'efficience des réseaux d'irrigation et des pratiques agricoles passerait à 0,7 en raison de l'amélioration de la maîtrise de l'eau. Sur ces bases, l'estimation de la demande en eau a été faite suivant l'équation (Eq.8). L'ensemble des demandes en eau estimée pour l'irrigation dans le bassin du fleuve Sénégal peuvent être trouvées dans le fichier *IRR_SA.csv*, situé dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

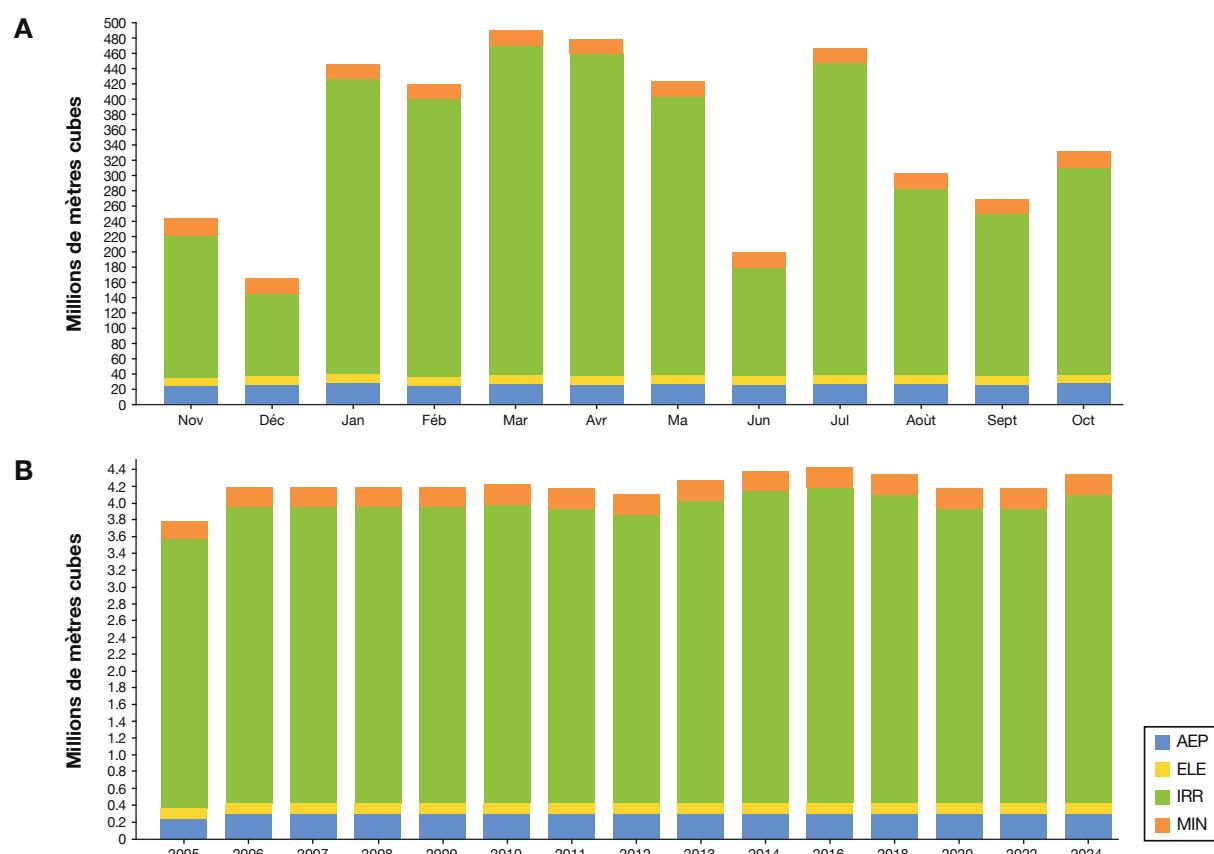
2.4.4. Demande en eau pour l'activité minière

L'estimation des besoins en eau pour l'activité minière a été réalisée en tenant compte de la consommation d'eau par minéral, selon les hypothèses suivantes: (i) prélèvements constants au cours de l'année et (ii) prélèvement de l'ensemble de l'activité minière dans les eaux superficielles pour satisfaire ces besoins.

L'identification des mines du BFS a été réalisée à partir des cadastres miniers et des rapports ITIE des quatre pays concernés. Les mines considérées sont présentées en annexe 5. La consommation en eau de la mine de Sabodala a été considérée comme valeur de référence pour l'estimation de la demande en eau des minerais. Ainsi, pour l'année 2020, la demande en eau pour l'ensemble des minerais dans le bassin du fleuve Sénegal est de 55,264 millions de m³.

L'ensemble des demandes en eau estimée pour l'activité minière dans le bassin du fleuve Sénegal peuvent être trouvées dans le fichier *MIN_SA.csv*, situé dans le répertoire *WEAP Areas > Senegal_River_SDG642 > data*.

Figure 11. Variation mensuelle (A) et annuelle (B) des besoins en eau estimés par activité sur la période 2005-2019 sur le bassin du fleuve Sénegal



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

2.5. Autres données

Les autres données intégrées dans le modèle WEAP-BFS sont les données relatives à la planification de la ressource en eau du bassin. Il s'agit notamment des données concernant les réservoirs naturels (lacs) et artificiels (barrages), les ouvrages au fil de l'eau, ainsi que les ouvrages de dérivation.

Parmi les barrages à réservoir, on retrouve le barrage de Manantali (1988) au Mali, qui régule les débits du fleuve et produit de l'énergie via une centrale hydroélectrique de 200 MW, tout en soutenant l'irrigation dans la vallée du fleuve. Le barrage de Diama, achevé la même année au Sénégal, est conçu pour lutter contre l'intrusion de l'eau salée, garantissant ainsi l'irrigation dans la région. Le Barrage de Férou, construit en 2013 au Mali, soutient la production d'énergie et la régulation hydrologique. En complément, plusieurs barrages au fil de l'eau sont en fonctionnement ou en projet pour diversifier les usages de l'eau. Le barrage de Gouina, achevé en 2022 au Mali, est dédié principalement à la production d'énergie. Les projets en cours incluent Gourbassi au Sénégal et Koukoutamba en Guinée, qui viseront à améliorer la régulation des débits et soutenir l'agriculture.

Le lac de Guiers, situé dans le bassin du fleuve Sénégal, joue un rôle vital dans la gestion des ressources en eau de la région. Il est alimenté par les eaux du fleuve grâce au canal de Taouey (ou Taoue), un ouvrage artificiel qui régule l'apport en eau entre le fleuve et le lac. Ce canal permet de maintenir un niveau d'eau suffisant dans le lac, en particulier lors de périodes sèches, et soutient l'approvisionnement en eau potable pour les villes comme Saint-Louis et Dakar.

Les données de l'ensemble de ces ouvrages, qu'ils soient déjà en construction ou encore en projet, et du lac de Guiers ont été intégrées au modèle WEAP-BFS. Pour les ouvrages non encore construits, les caractéristiques saisies dans le modèle WEAP-BFS sont celles prévues dans les projets. Leur activation se fera à l'entrée de la date de mise en service de l'ouvrage après sa construction. Cette date est maintenue à 2100 tant que l'ouvrage n'est pas encore opérationnel. Le tableau 5 présente la structuration des données à insérer dans le WEAP-BFS pour les barrages et le lac du Guiers. Les données détaillées insérées sont présentées en annexe 6.

Tableau 5. Types de données requises pour le paramétrage des barrages à réservoirs, des ouvrages au fil de l'eau et des lacs dans le WEAP-BFS

Type	Caractéristiques à fournir	Source des données
Physique	Capacité de stockage (Million m ³)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Stockage initial (Million m ³)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Courbe Volume Altitude	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Évaporation nette (mm)	PrincetonV3Monthly**
	Sommet Inactif (Million m ³)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Tmin (C)	PrincetonV3Monthly**
	Tmax (C)	PrincetonV3Monthly**
	Iat	OMVS
	Précipitation (mm)	PrincetonV3Monthly**
	Tave (C)	PrincetonV3Monthly**
Barrages à réservoir et au fil de l'eau	Débit de turbine max	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Hauteur de colonne d'eau (m)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Facteur d'usine (%)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Rendement de production (%)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Priorité d'Hydroélectricité	OMVS
	Demande d'Énergie (Mille GJ)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Priorité	OMVS

Tableau 5. (suite)

Type	Caractéristiques à fournir	Source des données
Lac	Capacité de stockage (Million m ³)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Courbe Volume Altitude	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Évaporation nette (mm)	PrincetonV3Monthly**
	Volume observé (Million m ³)	Société de gestion de l'ouvrage / OMVS
	Tmin (C)	PrincetonV3Monthly**
	Tmax (C)	PrincetonV3Monthly**
Évaporation	Iat	OMVS
	Precipitation (mm)	PrincetonV3Monthly**
	Tave (C)	OMVS

** Données de séries temporelles climatiques extraites de: Princeton v3 (Global, 1948-2014, Monthly, 28 km) (Sheffield et al., 2006).

2.6. Possibilité d'amélioration des données

Les performances du modèle WEAP dépendent directement de la qualité des données introduites. Dans le cas du bassin du fleuve Sénégal, les données hydrologiques disponibles, telles que celles relatives aux débits et aux niveaux d'eau, sont majoritairement de bonne qualité et adaptées à l'optimisation du modèle. Cependant, le principal défi réside dans les données climatiques, où une grande partie provient de sources satellitaires, telles que les estimations de précipitations, de température, d'humidité et de vents. Bien que ces données satellitaires soient actuellement indispensables pour le modèle WEAP, notamment en raison de la faible couverture des stations au sol dans la tête du bassin, elles présentent des incertitudes, notamment des biais spatiaux et temporels. Ces biais peuvent affecter la précision des simulations des écoulements. Dans l'étude actuelle, des corrections de biais ont été appliquées pour réduire ces erreurs, mais l'utilisation de données issues de stations météorologiques terrestres, avec des mesures directes et fréquentes, en particulier dans les régions amont du bassin, permettrait de limiter ces biais et d'améliorer la fiabilité de la calibration et de la validation du modèle WEAP, en offrant des chroniques plus cohérentes et représentatives des conditions locales.

Parallèlement, l'uniformisation des résolutions spatiale et temporelle des données sur les usages de l'eau (AEP, irrigation, élevage, mines) revêt une importance cruciale dans le cadre du modèle WEAP. À l'heure actuelle, les données relatives à l'utilisation de l'eau sont recueillies à des résolutions hétérogènes selon les États membres, ce qui nécessite des efforts d'adaptation pour intégrer et comparer les séries temporelles. L'adoption de protocoles uniformes pour la collecte de ces données, tant sur le plan spatial qu'en termes de fréquence (mensuelle, hebdomadaire, quotidienne), permettrait de garantir la comparabilité des informations entre les différentes parties du bassin. Cette amélioration de la qualité et de la cohérence des données renforcerait la capacité du modèle WEAP à fournir des scénarios de gestion de l'eau adaptés aux besoins spécifiques des secteurs.

Par ailleurs, il est essentiel de renforcer les équipements de mesure directe des débits au niveau des points clés du bassin pour optimiser les performances du modèle WEAP. À l'heure actuelle, les données concernant l'usage de l'eau, en particulier pour l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation, l'élevage et les activités minières, sont obtenues par estimation à partir des besoins en eau unitaire et de la taille des populations ou des surfaces agricoles. Bien que ces estimations fournissent une première approximation utile, elles ne capturent pas toujours les variations réelles et les dynamiques locales de l'utilisation de l'eau. Afin d'affiner ces données, le recours à des mesures directes des débits apparaît comme une nécessité. L'installation de dispositifs de mesure des débits dans les infrastructures de distribution d'AEP, telles que des compteurs de débit sur les canalisations principales, ou dans les systèmes d'irrigation, permettrait de suivre en temps réel la consommation d'eau et d'améliorer la gestion des ressources.

Pour améliorer la qualité des données d'entrée dans le modèle WEAP, plusieurs stratégies peuvent être mises en œuvre:

- Intégration de données multisources: Combinaison de données satellitaires haute résolution et de mesures locales pour une couverture plus précise des paramètres climatiques (précipitations, température) et hydrologiques (débits).
- Utilisation de capteurs IoT pour les mesures en temps réel: Installation de réseaux de capteurs dans les zones agricoles et urbaines afin de collecter des données précises sur les usages de l'eau et les flux d'eau à l'échelle locale.
- L'actualisation des données dans le modèle: Le remplacement en continu des issues de simulation par des données directement mesurées au niveau des usages, au fur et à mesure qu'elles sont disponibles, permettant une gestion plus fine des ressources et des prévisions plus réalistes, particulièrement en période de sécheresse.
- Application de techniques de correction statistique: Utilisation de modèles statistiques avancés, comme les transformations à base de réseaux neuronaux, pour réduire les erreurs dans les séries de données climatiques satellites, notamment les précipitations.
- Renforcement du réseau de stations pour la mesure de la qualité de l'eau: Mise en place de stations dédiées à la mesure de paramètres de qualité de l'eau (tels que les niveaux de pollution, la salinité, les nutriments) afin d'améliorer la gestion des ressources en eau dans le modèle, particulièrement en ce qui concerne l'AEP et l'irrigation.
- Renforcement de la collecte des données sur les eaux souterraines: Développement d'un réseau de mesures des nappes phréatiques et des ressources en eaux souterraines, permettant une meilleure intégration de ces données dans le modèle WEAP pour une gestion holistique des ressources en eau, y compris pour les usages agricoles et domestiques.



3. Hypothèses clés et approche de modélisation

3.1. Hypothèses clés

Il est très utile dans WEAP de créer des variables pour toutes les hypothèses de traitement et de modélisation principales, en particulier celles qui varient en fonction des scénarios. Cela permet d'organiser et de mettre en évidence les parties les plus importantes du modèle, de garantir que des hypothèses cohérentes sont utilisées dans l'ensemble du modèle et de faciliter leur visualisation et leur modification. Bien que les hypothèses clés puissent être considérées comme des variables, elles sont ajoutées en tant que nouvelles branches à l'arborescence de la vue des données, sous les sections «Hypothèses clés». Les hypothèses clés sont particulièrement adaptées lorsqu'une même expression doit être utilisée à plusieurs endroits dans le modèle ou lorsqu'il s'agit de mettre en avant une hypothèse de modélisation majeure. Étant donné que les valeurs des variables d'hypothèses clés peuvent être affichées dans la vue «Résultats», ces variables peuvent également être utilisées pour créer de nouvelles variables de résultat ou des indicateurs alternatifs.

Dans le modèle WEAP-BFS, 11 branches arborescentes ou catégories d'hypothèse ont été créées. Le tableau 6 présente ces branches et les valeurs définies pour chaque élément des hypothèses clés sont présentées en annexe 8.

Tableau 6. Présentation des catégories d'hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS

Nom variable	Définition hypothèse	Commentaires
ClimateDir	Chemin qui conduit au dossier contenant les informations climatiques	Il s'agit du dossier Climate\ contenu dans le dossier Senegal_River_SDG642\ dans le WEAP Areas\.
Climate	Dossier de stockage des données climatiques	Les données climatiques utilisées dans le WEAP-BFS proviennent de bases de données satellites CHIRPS et CRU 2018, préalablement calibrées et validées à l'aide de mesures de stations au sol. Elles couvrent la période 1948-2014. Le fait de les stocker dans un dossier permet une mise à jour facile. Il suffit de remplacer les fichiers du dossier PrincetonV3Monthly par les nouveaux fichiers actualisés, en prenant soin de conserver la structuration des fichiers.
ProjectStart-Year	Année de démarrage du projet	Cette variable est utilisée pour définir l'année de mise en service des barrages. Par défaut, la valeur 2100 est attribuée aux barrages non encore construits. Cette valeur pourra être modifiée lors de la mise en service de ces ouvrages.
Offsets	Point de démarrage	Cette variable permet de spécifier la partie des bases de données (données historiques, données futures) à considérer, en fonction de l'année de référence (CAY). Elle s'applique aux données climatiques ou de demande en eau.

Tableau 6. (suite)

Nom variable	Définition hypothèse	Commentaires
Development Year	Année de démarrage	Pour définir l'année de démarrage des projets dans le bassin, comme l'alimentation en ville de Dakar par les prélèvements sur le fleuve Sénégal par exemple. L'année considérée est 1982
PopGrowth-Rate	Taux de croissance de la population	Dans les cas où cela s'applique, la valeur 2 a été considérée
Dakar Pipeline	Volume d'eau dérivée vers la ville de Dakar	Ce volume est défini en tant que fonction de la croissance démographique de la ville et du pourcentage requis provenant du fleuve Sénégal, étant donné que la ville dispose d'autres sources d'alimentation, notamment l'eau souterraine.
Demandes	Hypothèse sur les demandes en eau	Plusieurs hypothèses sont formulées, par exemple la priorité des usages en cas de manque d'eau ou le taux d'efficience des eaux prélevées en fonction des années pour répondre à la demande. L'annexe 6 présente tous les détails requis.
Hydro-électricité	Hypothèse sur la production de l'électricité par les barrages	Plusieurs hypothèses sont formulées, par exemple l'efficacité de production pour les différents barrages.
Q nat	Débits naturels	Cette variable permet de définir les interpolations à appliquer pour regrouper, par exemple, les valeurs de débit journalières en valeurs mensuelles, ou encore de gérer les valeurs manquantes.
EFR	Hypothèse sur les besoins environnementaux en eau	Cette variable regroupe la définition de la valeur pour l'activation de la prise en compte des besoins environnementaux en eau dans le calcul du stress hydrique. Mais aussi la classe de gestion environnementale par défaut à considérer au cas où elle n'est pas précisée.

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

3.2. Modélisation hydrologique des écoulements

Le modèle WEAP est un outil qui permet de simuler et d'évaluer des scénarios de planification et d'allocation de l'eau au sein d'une unité hydrographique. Pour ce faire, il est impératif de disposer de données projetées sur des horizons futurs, afin d'analyser les scénarios potentiels. L'approche adoptée dans le cadre du WEAP-BFS consiste en une modélisation hydrologique précipitation-débit, s'appuyant sur des données historiques. À la différence d'autres modèles de gestion des ressources qui utilisent des logiciels externes pour la modélisation hydrologique, le WEAP intègre un module interne qui prédit les écoulements en exploitant des variables liées à la couverture du sol et aux paramètres climatiques. Ainsi, à chaque exécution du modèle, WEAP calcule d'abord les débits hydrologiques, qui sont transférés aux rivières et aux aquifères associés. L'allocation de l'eau est effectuée pour le même temps d'exécution, où les contraintes liées aux caractéristiques du réservoir et du réseau de distribution, les réglementations environnementales et en même temps les priorités et les préférences assignées aux différents points de demande sont utilisées comme conditions d'exploitation d'un algorithme de programmation linéaire qui maximise la satisfaction de la demande à la valeur la plus élevée possible. L'unité de modélisation choisie est celle du sous-sous-bassin, et le calibrage et la validation des résultats se font à l'aide des données historiques de débits obtenues au niveau des stations hydrométriques.

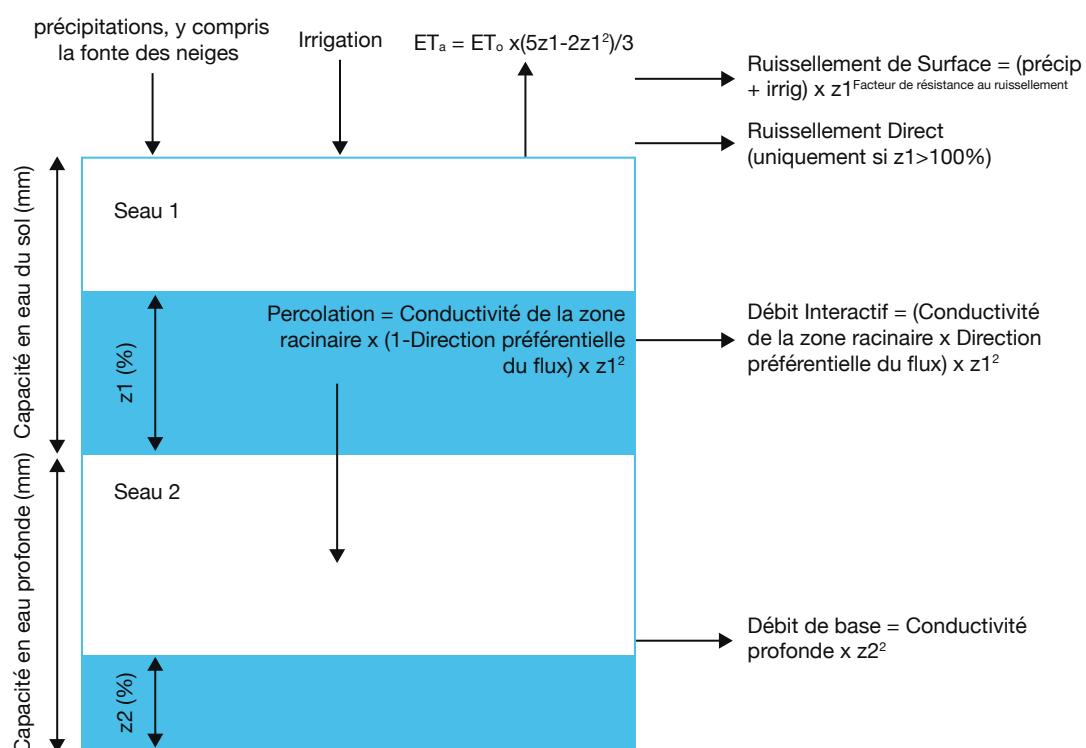
3.2.1. Présentation de la méthode «humidité du sol»

La méthode employée pour l'évaluation du ruissellement et de l'écoulement des eaux souterraines s'inscrit dans le cadre de la méthode du ruissellement pluvial, également connue sous le nom de méthode de l'humidité du sol. Cette approche se distingue comme la plus élaborée parmi celles intégrées dans le modèle WEAP, en ce sens qu'elle prend en compte la complexité du bassin versant, avec deux strates de sol, ainsi que la capacité d'accumulation de neige.

Dans la couche supérieure du sol, l'évapotranspiration est calculée en tenant compte du fait qu'elle simule les précipitations et l'irrigation sur les terres agricoles et non agricoles, le ruissellement de surface et de subsurface, et les changements dans l'humidité du sol, ainsi que l'écoulement vers l'aquifère. Cette approche méthodique permet d'évaluer l'utilisation des terres et/ou les caractéristiques pédologiques afin de modéliser les effets de ces processus sur le milieu. Le débit de base de la rivière et les fluctuations de l'humidité du sol sont simulés dans la strate pédologique la plus inférieure. Ainsi, la mise en œuvre de cette méthode requiert des paramètres pédologiques plus spécifiques et une analyse climatique approfondie pour assurer la fiabilité des résultats.

L'équilibre hydrologique du modèle WEAP comprend les composantes suivantes: l'évapotranspiration, l'infiltration, le ruissellement de surface, le ruissellement de subsurface (ou «Inter Flow»), et le débit de base, comme illustré dans la figure 12. Afin d'évaluer ces composantes dans chacune des unités spatiales de base (dénommées bassins versants), il sera nécessaire de recourir à l'utilisation de données climatologiques et de couverture végétale.

Figure 12. Modèle conceptuel de la méthode de mesure de l'humidité du sol



Il est possible de diviser en N zones fractionnaires représentant différentes utilisations et types de terres. Un bilan hydrique est calculé pour chaque zone, j des N considérées. Dans le modèle du WEAP-BFS, les subdivisions utilisées ont été présentées dans le tableau 3. Le climat est supposé uniforme sur chaque zone discrétisée et le bilan hydrique est donné par l'équation (Eq.9):

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - ET_o(t)k_{c,j}(j) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{z,j} z_{1,j}^2 - (1-f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2 \quad (\text{Eq.9})$$

Où:

$dz_{1,j}$ = Stockage relatif exprimé en fraction du stockage effectif total dans la zone racinaire;
 Rd_j (mm) = capacité de stockage effective dans la zone racinaire pour la fraction j de la couverture de l'utilisation des sols. P_e = précipitations effectives. ET_o = Évapotranspiration de référence calculée selon Penman-Monteith. $k_{c,j}$ est le coefficient de culture pour chaque fraction de couverture terrestre.

$P_e(t) z_{1,j}^{RRF_j}$ = représente le ruissellement de surface, où RRF_j est le facteur de résistance au ruissellement de la couverture du sol. Des valeurs plus élevées de ce paramètre impliquent un ruissellement de surface moins importante. $f_j k_{z,j} z_{1,j}^2$ = Représente le flux interne.
 $(1-f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2$ = Représente la percolation.

$k_{z,j}$ = Conductivité dans la zone racinaire (mm/temps). Et f_j Direction d'écoulement préférée. Coefficient de partage lié au type de sol, à la couverture et à la topographie qui divise l'eau horizontalement et verticalement.

Ainsi, le ruissellement de surface et l'écoulement interne sont donnés par l'expression $RT(t)$ (Eq.10) pour chaque sous-bassin et à l'instant t.

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j (P_e(t) z_{1,j}^{RRF_j} + f_j k_{z,j} z_{1,j}^2) \quad (\text{Eq.10})$$

Le débit de base de la deuxième couche, dans les cas où il n'y a pas de nappe d'eau souterraine, est calculé à l'aide de l'équation (Eq.11):

$$S_{max} dz_2 = \sum_{j=1}^N (1-f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2 - k_{z2} z_2^2 \quad (\text{Eq.11})$$

Où:

S_{max} : percolation en profondeur à partir du stockage supérieur donné dans l'Eq1.

k_{z2} : conductivité dans la zone profonde (mm/temps), qui est donnée comme une valeur unique pour le sous-bassin.

Les équations (Eq.9) et (Eq.11) sont résolues à l'aide d'un algorithme de prédition-correction.

Lorsqu'un aquifère est introduit dans le modèle et qu'une relation entre l'unité de bassin et le nœud d'eau souterraine est établie, le terme de stockage défini dans l'équation 3 est ignoré et la recharge de l'aquifère R (volume/temps) est définie par l'équation (Eq.12) où A est la surface de contribution dans l'unité de captage

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (1-f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2 \quad (\text{Eq.11})$$

3.2.2. Calibration et validation du modèle hydrologique

La calibration et la validation du modèle hydrologique ont été effectuées sur une période allant de 1960 à 2015, en fonction de la longueur de la chronique des débits disponibles pour chaque station hydrométrique (figure 13). 70 pour cent des données ont été utilisées pour la calibration et le reste pour la validation. Le tableau 7 présente les résultats de l'étalonnage des débits d'écoulement au niveau de quelques stations du BFS.

Tableau 7. Présentation des catégories d'hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS

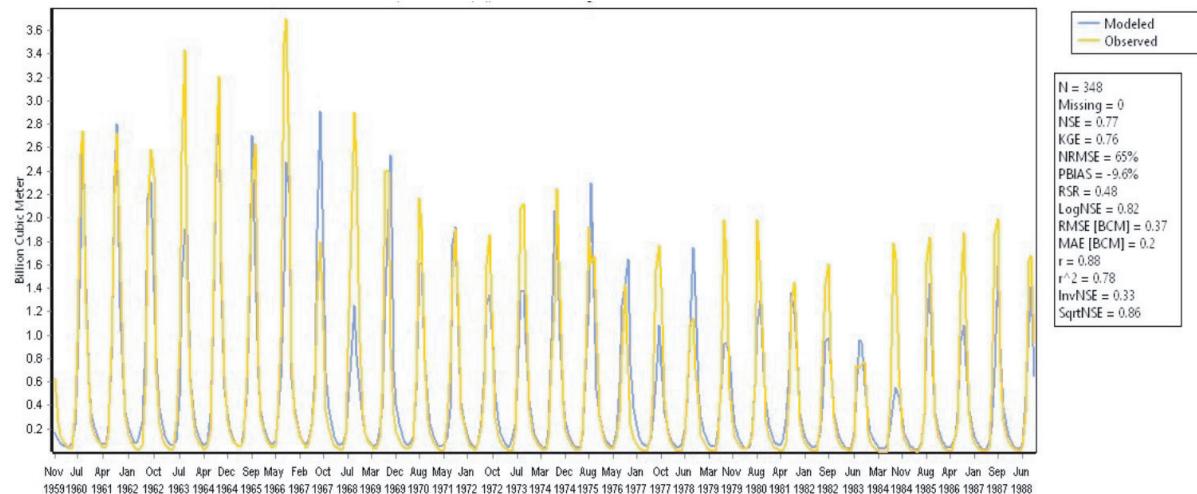
Station	Période considérée	Période calibration	Période validation
Dakka Saidou	1960 à 2010	1960 - 1988	1989 - 2010
Gourbassi	1960 à 2010	1960 - 1988	1989 - 2010
Manantali	1960 à 1986 (avant le barrage)	1960 - 1978	1979-1986
Oualia	1960 à 2010	1960 - 1988	1989 - 2010

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

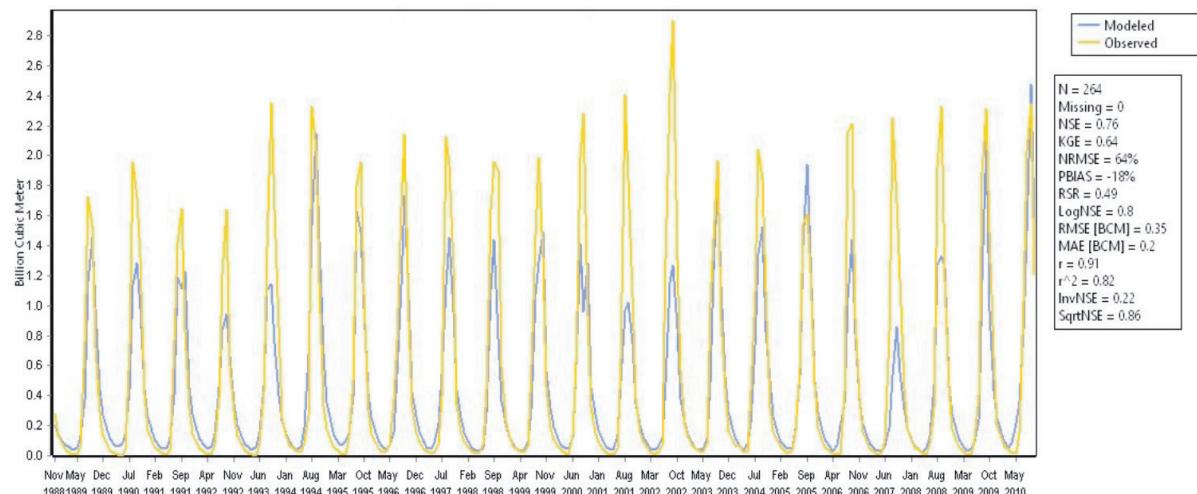
La figure 13 présente les résultats obtenus pour les quatre stations hydrométriques situées à Dakka Saidou, Gourbassi, Manantali et Oualia, utilisées pour le calibrage et la validation du modèle hydrologique du fleuve Sénégal.

Figure 13. Débits observés par rapport aux débits simulés issus de la calibration et de la validation du modèle hydrologique «soil - moisture» pour différentes stations du fleuve Sénegal

Graphe calibration - Dakka Saidou



Graphe validation - Dakka Saidou



Graphe calibration - Gourbassi

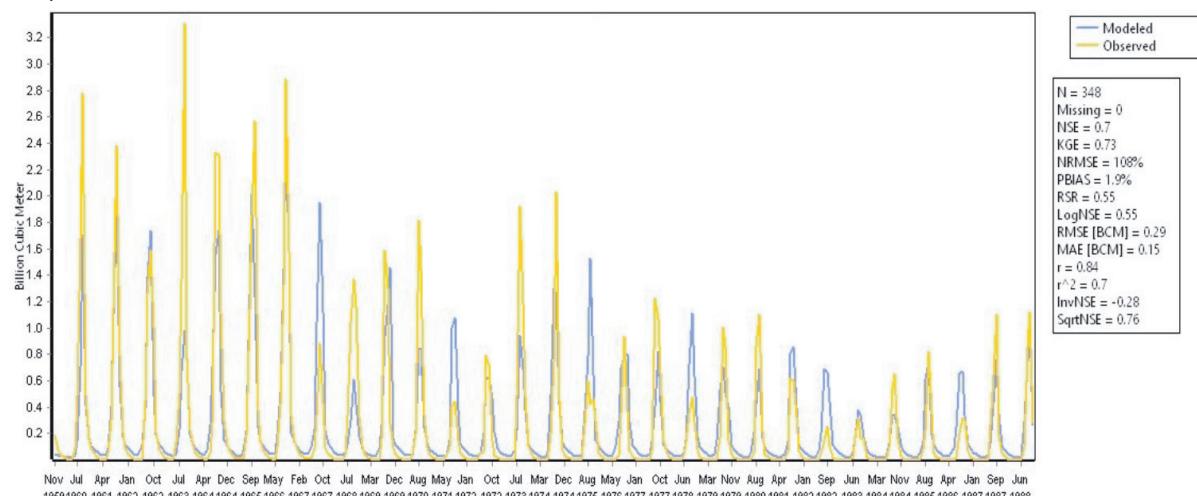
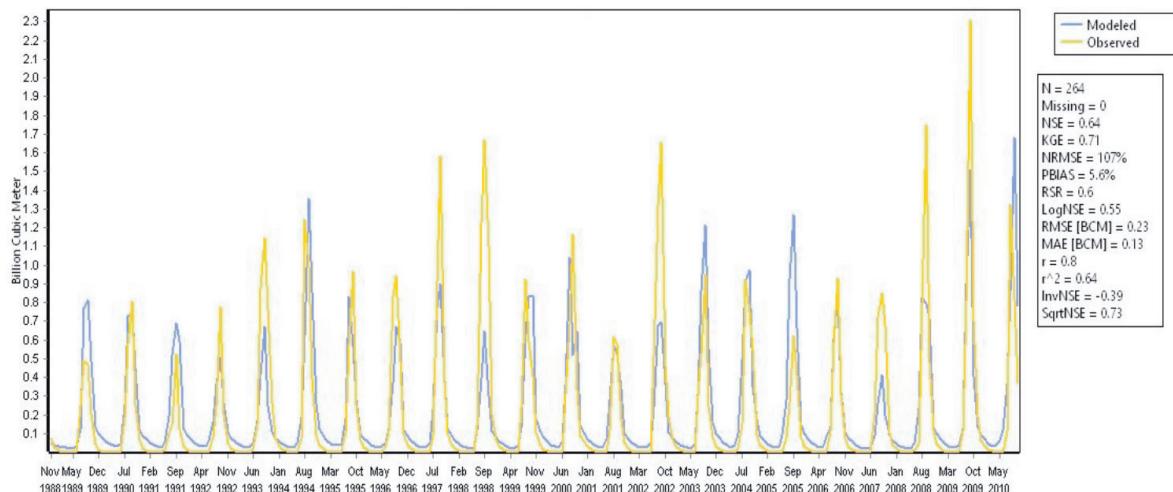
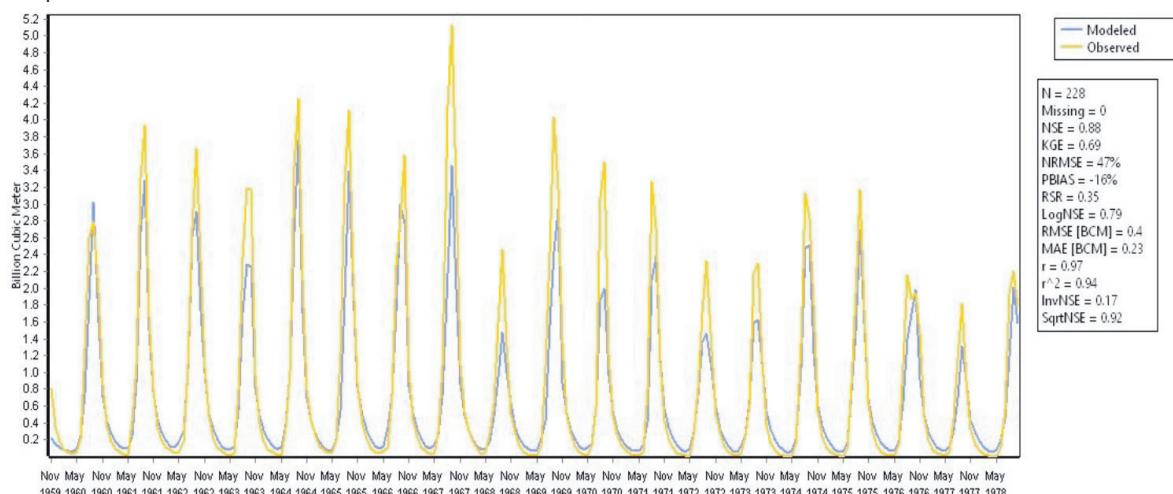


Figure 13. (suite)

Graphe validation - Gourbassi



Graphe calibration - Manatali



Graphe validation - Manatali

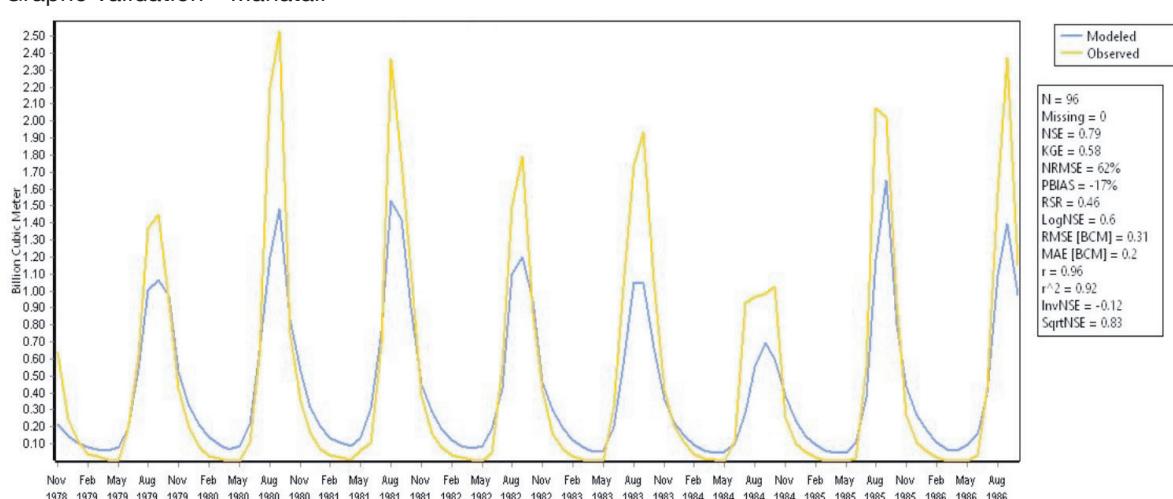
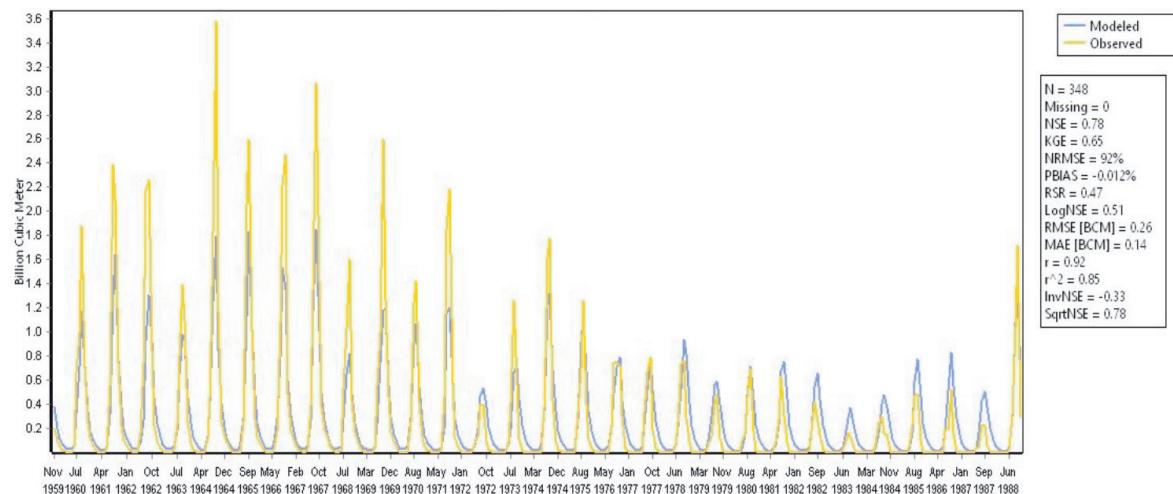
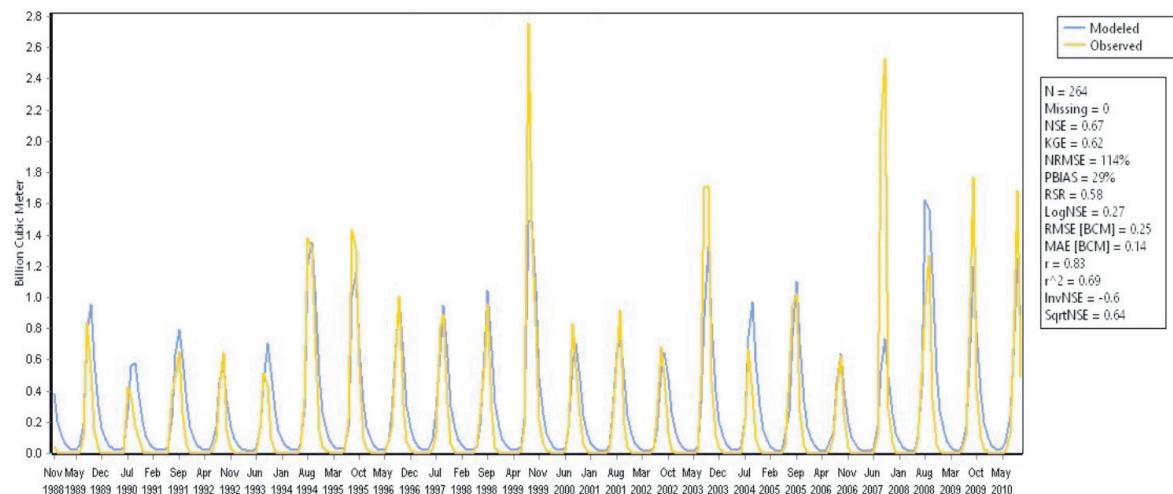


Figure 13. (suite)

Graphe calibration - Oualia



Graphe validation - Oualia



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

En s'appuyant sur le coefficient d'efficacité de Kling-Gupta (KGE), les résultats obtenus révèlent des performances globalement satisfaisantes pour l'ensemble des stations, avec des valeurs de KGE s'échelonnant entre 0,6 et 0,8, aussi bien pour la phase de calibration que pour celle de validation. Ces résultats laissent entrevoir une modélisation satisfaisante des dynamiques hydrologiques du bassin, bien que des optimisations soient préconisées, notamment pour les stations où le KGE est plus faible (proche de 0,6). Ces plus faible de KGE suggèrent que le modèle reproduire moyennement bien les amplitudes et les variabilités des débits

En outre, le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) révèle une performance notable du modèle dans la reproduction des séries chronologiques des débits observés, avec des valeurs s'étendant de 0,7 à 0,9. Ces résultats suggèrent une capacité du modèle à simuler avec précision les

variations spatio-temporelles des débits, ce qui est un indicateur clé de sa fiabilité. Cependant, les stations proches de la limite inférieure, soit 0,7, indiquerait une représentation moyennement bien événements extrêmes ou de l'interaction entre les précipitations et les débits dans certaines zones.

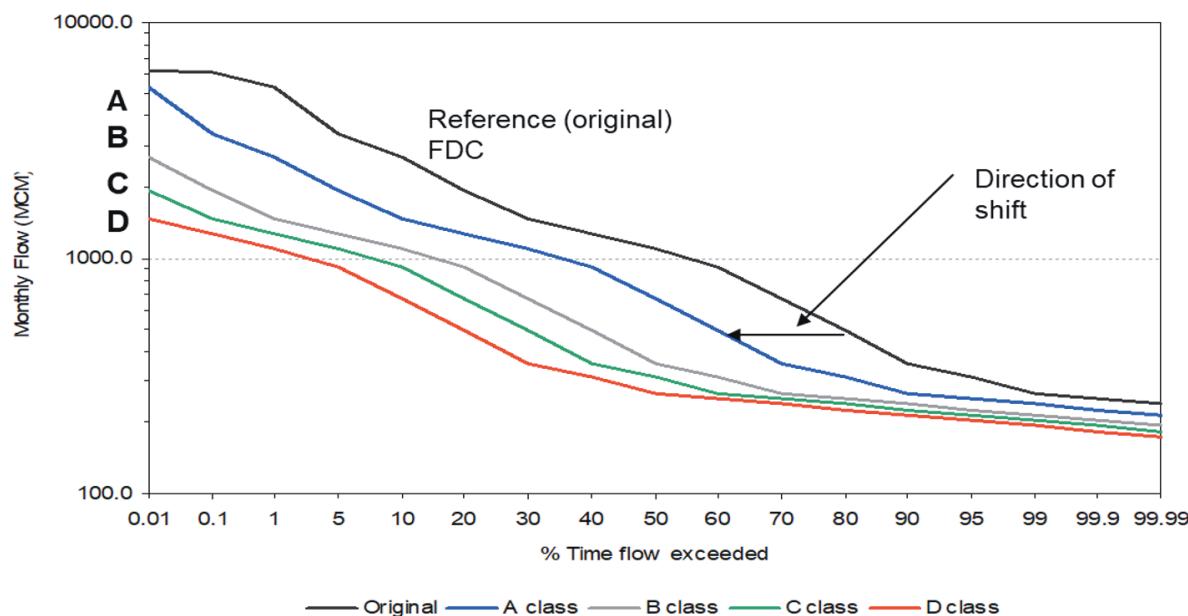
3.3. Détermination des EFR

Dans le cadre de l'indicateur 6.4.2 des ODD, les besoins environnementaux en eau sont définis comme «...la quantité et le timing des débits et des niveaux d'eau douce nécessaires au maintien des écosystèmes aquatiques qui, à leur tour, soutiennent les cultures, les économies, les moyens de subsistance durables et le bien-être de l'homme» (adapté de Arthington *et al.*, 2018). Ce concept de préservation des habitats aquatiques et des processus écologiques d'un cours d'eau dans un «état souhaitable», également désigné sous le terme de «classes de gestion environnementale (EMC)», se réfère à l'état écologique d'un cours d'eau, évalué par l'écart de ses composantes biophysiques par rapport à son état de référence naturel, qui résultera de l'application d'un objectif de gestion spécifique.

Le système de classes de gestion écologique (EMC) revêt une importance majeure pour harmoniser les impératifs humains et la conservation des ressources naturelles au sein des bassins versants. Il se décline en plusieurs classes, allant de la classe A à la classe E (cf. tableau 8). Les classes A et B désignent des conditions naturelles (non altérées) ou essentiellement naturelles, où peu ou pas de modifications ont été apportées et ne devraient pas être autorisées dans le cadre de la gestion. La classe C, quant à elle, est caractérisée par des modifications modérées, dont l'impact sur l'intégrité de l'écosystème est généralement limité, bien que les espèces sensibles puissent être affectées. Les écosystèmes classés dans la catégorie D sont ceux qui ont subi des transformations majeures par rapport à leur état naturel. Ces écosystèmes se caractérisent par une réduction significative du nombre et de la taille des biotes sensibles, ainsi que par une altération notable de la structure de la communauté, bien que cette modification soit jugée acceptable. Les écosystèmes gravement modifiés (classe E) sont en mauvais état et ont perdu la plupart de leurs fonctions et services. Du point de vue de la gestion, cette classe est considérée comme inacceptable, car elle représente des écosystèmes exploités de manière non durable.

Il convient de noter qu'il existe plusieurs méthodes permettant de déterminer les besoins environnementaux en eau. Dans le cadre du WEAP-BFS, l'EFR pour une unité hydrologique est calculé en appliquant l'approche du décalage de la courbe de durée d'écoulement (FDC-Shift) (Smakhtin et Anputhas, 2006), qui est conforme à l'approche méthodologique utilisée dans le Système mondial d'information sur les besoins environnementaux en eau (GEFIS: <https://eflows.iwmi.org/>) présentée dans les lignes directrices de la FAO (FAO, 2019). La méthode utilise des données de débit mensuelles et s'articule autour d'une courbe de durée de débit sur une période d'enregistrement. En pratique, la méthode FDC-Shift implique une modification graduelle d'un FDC, permettant ainsi de réduire les besoins environnementaux en eau totaux tout en préservant certaines caractéristiques de la variabilité naturelle des débits (figure 14). Les classes de EMC élevées (telles que la classe A) requièrent des niveaux de débit plus élevés pour maintenir l'écosystème et préserver la variabilité du débit. Alors que les classes EMC faibles (C et D) requièrent des niveaux de débit plus faibles.

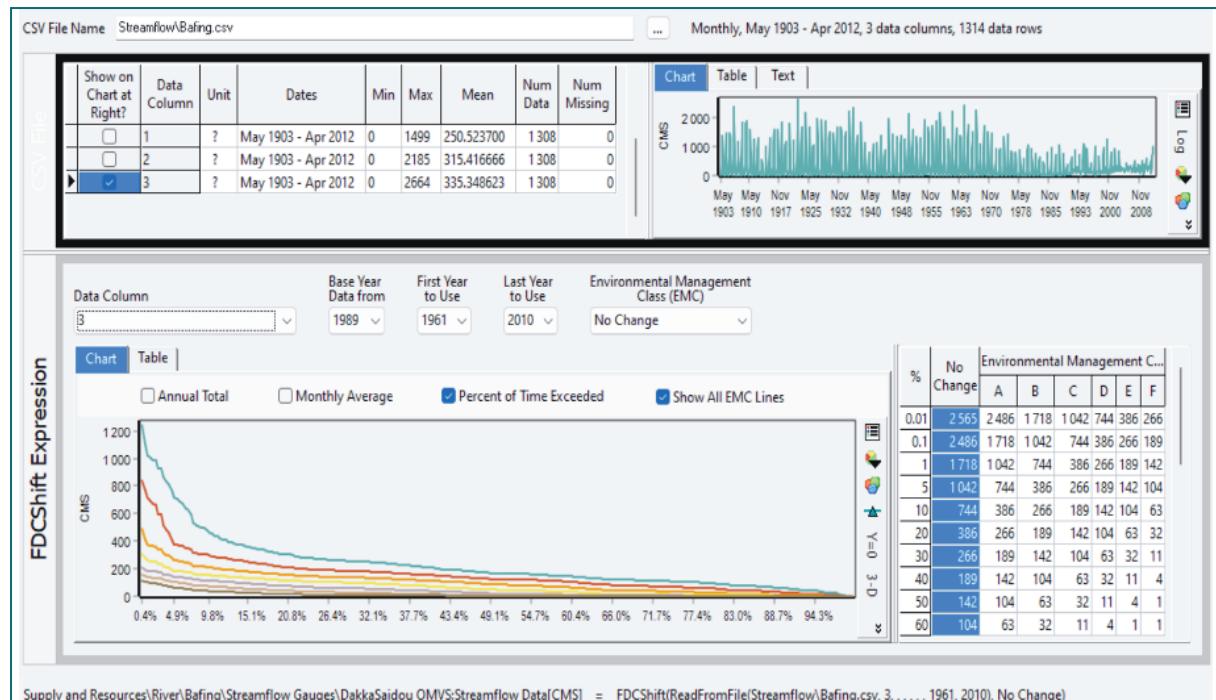
Figure 14. Courbe de durée d'écoulement. Les classes A à D représentent les conditions définies dans le tableau 8



Source: FAO, 2019

Dans le WEAP, l'outil FDCShift Wizard permet de déterminer les différents besoins environnementaux en eau pour différentes EMC en ajustant la courbe de durée d'écoulement (FDC) en fonction des exigences écologiques spécifiques à chaque classe de gestion environnementale figure 15. Cette approche repose sur le principe de déplacement progressif de la courbe FDC pour chaque unité hydrologique afin d'ajuster les débits totaux tout en maintenant les caractéristiques essentielles de la variabilité naturelle des débits. Le FDCShift Wizard applique cette méthode de manière automatique, permettant ainsi d'adapter les besoins environnementaux en eau en fonction des besoins de chaque classe EMC, que ce soit pour des classes nécessitant des débits plus élevés (comme la classe A) ou pour des classes où les débits peuvent être réduits tout en préservant les processus écologiques (comme les classes C et D). Ce processus garantit que les débits ajustés soutiennent les écosystèmes aquatiques tout en respectant les contraintes de gestion des ressources en eau, ce qui facilite ainsi la mise en œuvre des objectifs de gestion durable.

Figure 15. L'outil FDCShift wizard dans WEAP mise en œuvre pour la détermination des besoins environnementaux en eau pour le sous-bassin Bafing en amont de Manantali



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Tableau 8. Description des classes de gestion écologique.

EMC	État écologique le plus probable	Perspective de gestion
Classe A (État naturel ou quasi naturel)	Rivières naturelles avec modification mineure de l'habitat fluvial et riverain.	Rivières et bassins versants protégés. Réserves et parcs nationaux. Aucun nouveau projet hydraulique (barrages, dérivations) n'est autorisé.
Classe B (État légèrement perturbé)	Rivières légèrement modifiées ou importantes sur le plan écologique, dont la biodiversité et les habitats sont pratiquement intacts, malgré l'exploitation des ressources en eau ou les modifications apportées au bassin versant.	Programmes d'approvisionnement en eau ou petits projets d'irrigation existants ou autorisés.
Classe C (État modérément perturbé)	Les habitats et la dynamique des biotes ont été modifiés, mais les fonctions de base de l'écosystème restent intactes. Certaines espèces sensibles ont disparu ou sont moins nombreuses. Présence d'espèces exotiques.	Altérations multiples liées à la nécessité d'un développement socio-économique, par exemple barrages, dérivations, prélèvements, modifications de l'habitat et réduction de la qualité de l'eau.
Classe D (État fortement perturbé)	L'habitat naturel, le biote et les fonctions de base de l'écosystème ont subi des changements majeurs. Faible richesse en espèces et présence accrue d'espèces intolérantes. Prédominance d'espèces exotiques.	Altérations significatives et clairement visibles liées au développement du bassin versant et des ressources en eau, notamment barrages, dérivations, prélèvements importants, modifications de l'habitat et dégradation de la qualité de l'eau.

Tableau 8. (suite)

EMC	État écologique le plus probable	Perspective de gestion
Classe E (État très perturbé ou dégradé)	La diversité et la disponibilité des habitats ont diminué. Les écosystèmes ont été complètement modifiés et les fonctions de base des écosystèmes sont défaillantes. La richesse des espèces a nettement diminué. Seules les espèces tolérantes subsistent. Des espèces exotiques ont envahi l'écosystème.	La forte densité de population humaine et l'exploitation extensive des ressources en eau se traduisent par une eau inadéquate ou polluée dans l'écosystème. Cette situation n'est pas acceptable du point de vue de la gestion. Des interventions de gestion sont nécessaires pour restaurer les schémas d'écoulement et pour «reclasser» la rivière dans une catégorie de gestion supérieure.

Source: FAO document «l'intégration des besoins environnementaux en eau dans l'indicateur 6.4.2 sur le stress hydrique».

3.4. Détermination du stress hydrique

L'indicateur de «stress hydrique» fournit une estimation de la pression exercée par tous les secteurs sur les ressources renouvelables en eau douce du pays. Il est défini comme le prélèvement total d'eau douce (TFWW) par tous les secteurs économiques divisé par la différence entre les ressources totales renouvelables en eau douce (TRWR) et les besoins environnementaux (EFR), multiplié par 100. Il est exprimé en pourcentage entre 0 et 100, où une valeur de stress hydrique de 100 pour cent indique que toutes les ressources en eau douce disponibles, après avoir pris en compte l'EFR, sont prélevées, ce qui indique un niveau élevé de stress hydrique.

L'indicateur de stress hydrique (Eq.12) permet d'évaluer la pression exercée par les différents secteurs économiques sur les ressources en eau douce renouvelables d'un pays. Cet indicateur est calculé en divisant le prélèvement total d'eau douce (TFWW) par la différence entre les ressources totales renouvelables en eau douce (TRWR) et les besoins environnementaux en eau (EFR), puis en multipliant le résultat par 100. Le stress hydrique est exprimé en pourcentage, variant de 0 à 100 pour cent. Un score de 100 pour cent indique que l'ensemble des ressources en eau douce disponibles, après prise en compte des besoins écologiques (EFR), est entièrement prélevé, ce qui traduit un niveau élevé de pression sur les ressources en eau.

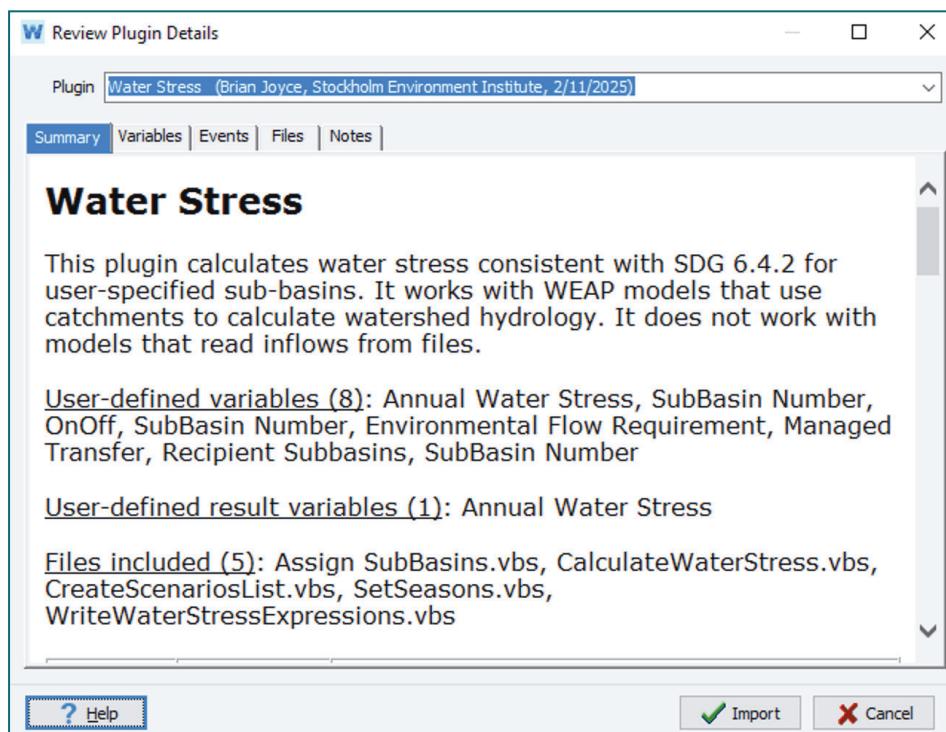
$$\text{Stress hydrique (\%)} = \frac{\text{TFWW}}{\text{TRWR-EFR}} \times 100 \quad (\text{Eq.12})$$

Pour effectuer une évaluation précise du stress hydrique par unité hydrologique et pour chaque saison, il est crucial de considérer les spécificités du système hydrologique analysé, notamment les caractéristiques du bassin versant. Cette approche garantit l'intégration de tous les facteurs influençant l'évaluation du TRWR, du TFWW et de l'EFR, en prenant notamment en compte des données temporelles détaillées, telles que des séries mensuelles. Cette collecte de données fines est d'autant plus importante dans les systèmes complexes où des outils spécialisés, comme le Water Stress Plugin (WSP), se révèlent essentiels. Développé par la FAO en collaboration avec le Centre américain de l'Institut de l'Environnement de Stockholm (SEI), le WSP est intégré dans le Système d'Évaluation et de Planification de l'Eau (WEAP). Le choix du WEAP pour le développement du plug-in est justifié par le fait qu'il utilise une série d'objets hydrologiques pour

simuler les flux d'eau dans un bassin versant. Chaque objet contribue au calcul de l'équilibre global de l'eau dans le bassin, ainsi qu'à l'équilibre de l'eau dans les sous-bassins. Cela implique que, pour chaque terme de l'équation du stress hydrique, il est nécessaire de prendre en compte à la fois les réserves d'eau et les débits associés à ces objets dans le modèle WEAP.

Une fois le plug-in WSP importé, il est possible de calculer l'indicateur ODD 6.4.2 sur une base annuelle et saisonnière, et ce, pour tous les scénarios définis par l'utilisateur. Les résultats obtenus peuvent être présentés sous différents formats: texte, tableau, graphique et carte. Un des premiers actes après l'importation du plug-in consiste à spécifier les exigences de flux, qui seront utilisées dans le calcul du stress hydrique, en particulier dans le cadre des objectifs environnementaux définis pour chaque sous-bassin. Ces informations sont cruciales pour garantir la cohérence et la précision de l'évaluation du stress hydrique à l'échelle du bassin versant.

Figure 16. Le plug-in Stress hydrique de WEAP (FAO, 2024)



Source: outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Pour assurer la cohérence du calcul du stress hydrique, chaque sous-bassin doit disposer d'un EFR à son point le plus en aval. En effet, si un EFR était positionné en amont des demandes d'eau dans un sous-bassin, l'utilisation simultanée de cette eau pour satisfaire à la fois lEFR et les demandes en eau serait contradictoire avec l'équation du stress hydrique. Par ailleurs, l'EFR doit bénéficier de la priorité la plus élevée en termes de répartition des ressources hydriques, car l'évaluation du stress hydrique repose sur l'hypothèse que l'EFR est entièrement satisfait avant toute autre demande en eau. Les sous-bassins peuvent également intégrer des EFR définis localement.

En outre, pour l'évaluation de l'IRWR (Internal Renewable Water Resources), il est nécessaire de prendre en compte les précipitations cumulées et l'évapotranspiration. WEAP, à travers ses modèles hydrologiques, permet de comprendre la distribution des ressources en eau entre les différents réservoirs, le ruissellement de surface et la recharge des nappes souterraines. Il intègre également les variations du stockage des réservoirs, qui peuvent être positives lorsque des ressources sont libérées (diminution du stockage) ou négatives lorsqu'elles sont stockées (augmentation du stockage).

Dans le cadre de l'évaluation du TRWR (Total Renewable Water Resources), la méthodologie du WSP vise à éviter le double comptage des ressources en eau douce dans chaque sous-bassin. Elle permet de compenser les déficits en eau des sous-bassins en aval par les excédents des sous-bassins en amont. Ainsi, les collectivités territoriales peuvent décider de laisser de l'eau dans le fleuve pour une utilisation en aval (lit du fleuve ERWR) ou de transférer de l'eau aux zones en aval par le biais de canaux ou de canalisations (canal ERWR). Ces transferts sont intégrés dans le calcul du TRWR.

La méthodologie de gestion de l'eau garantit que les sous-bassins déficitaires reçoivent uniquement les ressources nécessaires pour couvrir leurs demandes en eau, y compris l'EFR, sans excédent. Ces sous-bassins, bien qu'ayant leurs besoins en eau satisfaits, affichent toujours un stress hydrique de 100 pour cent, ce qui est logique étant donné leur dépendance à l'eau provenant des sous-bassins amont sans déficit. Cependant, dans certains cas, les gestionnaires de l'eau peuvent allouer un quota supplémentaire d'eau aux sous-bassins déficitaires pour répondre à des exigences politiques spécifiques. Une fonctionnalité de "transfert géré" a été intégrée dans la dernière version du WSP, permettant aux gestionnaires de définir manuellement l'eau à transférer des points excédentaires en amont vers les points déficitaires en aval.

Pour le calcul du total des prélèvements d'eau douce (TFWW), il est essentiel de connaître les prélèvements directs en rivière ainsi que le pompage des eaux souterraines au cours de la saison étudiée. Ces informations sont intégrées dans WEAP sous forme d'objets Demande, auxquels une priorité est attribuée. Dans les cas où les données sur les prélèvements sont manquantes, les demandes en eau peuvent servir de substitut pour l'évaluation de l'indicateur 6.4.2.

4. Scénarios

Les scénarios définis dans le modèle WEAP peuvent être classés en deux grandes catégories: les scénarios climatiques, qui intègrent les évolutions possibles du climat, et les scénarios de développement des activités socio-économiques, qui prennent en compte les variations futures des besoins en ressources en eau liées à l'évolution démographique, industrielle et agricole, conformément aux orientations définies dans le SGADE 2050 (Schéma de Gestion de l'Assainissement et du Développement de l'Eau) du bassin du fleuve Sénégal.

4.1. Changement climatique

L'impact du changement climatique sur le bassin du fleuve Sénégal a été étudié à partir des données du projet CORDEX Africa, en tenant compte des scénarios d'émission RCP 4.5 et RCP 8.5. Ces scénarios d'émission, respectivement associés à une trajectoire d'émissions modérées et élevées de gaz à effet de serre, sont utilisés pour explorer l'évolution du climat dans le bassin à l'horizon 2050. Neuf⁴ modèles climatiques régionaux ont été employés pour cette analyse.

Deux périodes de temps ont été considérées: la période de référence, couvrant de 1985 à 2015, et une période projetée centrée sur 2050, allant de 2035 à 2065. Sur la base de ces projections, trois scénarios climatiques ont été définis pour le bassin du fleuve Sénégal, représentant différents futurs possibles selon les modèles et les scénarios d'émission choisis (tableau 9). Ces trois scénarios ont permis d'évaluer un éventail d'impacts possibles du changement climatique sur les ressources en eau du bassin, afin d'adapter les stratégies de gestion de l'eau.

Tableau 9. Scénarios climatiques projetés pour le bassin du fleuve Sénégal

Futurs climatiques	CC1	CC2	CC3
Combinaisons	NOAA x RCP 4.5 x 2035-2065	MIROC x RCP 4.5 x 2035-2065	CSIRO x RCP 8.5 x 2065-2095
Signification	Condition climatique humide stable	Condition climatique sèche stable	Condition climatique très sèche

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Pour les précipitations et les températures, un processus de correction des biais a été appliqué afin d'assurer la cohérence des chroniques CORDEX avec les données d'observation (CHIRPS et CRU 2018). L'objectif de cette correction était de rendre les séries temporelles CORDEX compatibles avec les observations historiques. Cette correction a été réalisée en calculant un correctif de biais sur les données historiques, puis en appliquant ce même correctif aux projections futures. La méthode utilisée pour cette correction était la méthode «quantile-quantile saisonnalisée», qui permet d'ajuster les différences entre les données modèles et les observations en fonction des quantiles, tout en prenant en compte les variations saisonnières des paramètres climatiques.

⁴ Les neufs modèles sont: CCCma_CaESM2_SMHI-RCA4, CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_SMHI-RCA4, CSIRO_QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0_SMHI-RCA4, IPSL-IPSL-CMA5-MR_SMHI-RCA4, MIROC-MIROC5_SMHI-RCA4, MOHC-HadGEM2-ES_SMHI-RCA4, MPI-M-MPI-ESM-LR_SMHI-RCA4, NCC-NorESM1-M_SMHI-RCA4 et NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M_SMHI-RCA4

4.2. Niveaux de développement

Deux niveaux de développement extrait du SDAGE 2050 sont pris en compte dans le modèle WEAP-BFS: La situation actuelle notée SA qui repose sur le maintien des tendances enregistrées en 2020 et la situation optimisée notée S7 qui présente un compromis équilibré dans le développement de l'alimentation en eau potable, de l'irrigation, de la navigation, et de l'hydroélectricité (figure 17).

Figure 17. Détail des scénarios S0 et S7 pris en considération dans le modèle WEAP-BFS. SA: Situation Actuelle, SO: Situation Optimisée, DM: Développement Modéré, DCM: Développement Capacité Maximale, DOE: Débit Objectif d'Étiage, DOEC: Débit objectif d'Étiage et de Crue

Scénarios	Niveaux de développement par secteur																				
	AEP		Navigation			Élevage		Agriculture irriguée				Pêche		Environnement			Hydroélectricité			Mines	
	SA	SO	SA	SO	DCM	SA	SO	SA	SO	DM	DCM	SA	SO	DOE	DOEC	SA	DM	DCM	SA	SO	
S0 – Situation actuelle (2022)																					
S7- Scénario équilibre																					
	Services essentiels				Production alimentaire								Energie			Mines					

Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. Sections non publiées.

L'objectif du SDAGE 2050 est que la gestion de la ressource en eau du bassin occupe une place centrale dans les actions de développement de la région. À court terme (2025), cela implique de garantir l'alimentation en eau potable de 7,5 millions d'habitants, de mettre en service les 200 000 hectares de périmètre déjà équipés pour l'agriculture, de satisfaire la demande en eau de 31 millions de l'UBT et de répondre à la demande de l'industrie minière. En outre, le fleuve Sénégal devrait être navigable une partie de l'année, les débits correspondant au 10e du module des opérations de Manantali et à 52 m³/s à Bakel étant réservés à l'environnement, tout en s'assurant du bon fonctionnement des barrages existants, y compris celui de Gouina. À long terme, en 2050, l'objectif est de couvrir l'alimentation en eau potable de 11,2 millions d'habitants et l'alimentation en eau de 115 millions de l'UBT. Il est prévu que l'ensemble du potentiel irrigable, s'élargissant à 400 000 hectares, soit exploité, et que la capacité des mines en activité soit plus que doublée. En outre, pour répondre aux impératifs environnementaux, il sera nécessaire de veiller à ce que le débit objectif d'étiage à Bakel soit atteint, en plus du débit objectif de crue. L'hydroélectricité devrait avoir connu un développement modéré avec la finalisation des barrages de Koukoutamba et Gourbassi. Le tableau 10 présente une vue d'ensemble des besoins en eaux pour les deux scénarios de développement.

Tableau 10. Besoin en eau chaque scénario du SDAGE 2050 considéré dans le modèle WEAP-BFS

Type d'usage		SA	S7
Alimentation en eau potable (Mm ³)	Directement sur le BFS	116.9	312.3
	Transféré en dehors du BFS	178	196.2
Élevage (Mm ³)		119.7	190.5
Mines (Mm ³)		241.1	582.7
Irrigation (Mm ³)		3558.4	5918.9
Hydroélectricité	Capacité stockage totale (Mm ³)	11300	17000
Environnement	Débit objectif d'étiage à Bakel (m ³ /s)	52	52
	Débit objectif de crue culminant à Bakel (m ³ /s)	--	2 200
Navigation	Débit Bakel entre juillet et janvier (m ³ /s)	--	300
	Débit Diama entre juillet et janvier (m ³ /s)	--	200

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

4.3. Classes de gestion environnementale

La situation actuelle de la gestion environnementale (EMC) du bassin du fleuve Sénégal varie selon les sous-bassins. En accord avec les autorités de gestion, l'EMC le long des bassins du Bafing et du Sénégal est classée en catégorie C, ce qui inclut les sous-bassins du Bafing, de la Moyenne Vallée, du Gorgol et de la Basse Vallée. Cette classification est principalement due à la présence des barrages de Manantali, Gouina et Diama, qui, depuis leur mise en service, n'ont pas intégré la prise en compte des besoins environnementaux en eau dans leur fonctionnement, modifiant ainsi le régime naturel des cours d'eau. En revanche, pour les autres sous-bassins (Baoulé-Bakoye, Falémé, Ferlo, Terekolé Magui Kolimbiné, et Karakoro), la classe EMC retenue est la classe B.

Deux scénarios (tableau 11) sont envisagés pour la gestion environnementale des débits dans le fleuve Sénégal: le scénario EMC actuel, où les barrages ne respectent pas encore les besoins environnementaux en eau, et les scénarios EMC optimistes, dans lesquels les opérations des barrages sont ajustées pour prendre en compte les besoins environnementaux en eau.

Tableau 11. Présentation des scénarios de gestion environnementale (EMC) du bassin du fleuve Sénégal

Sous bassin	Classe EMC Optimiste	Classe EMC SA
Basse Vallée	B	C
Ferlo EFR	B	B
Gorgol	B	C
Karagora	B	B
Moyenne Vallée EFR	B	C
Terekole Magui EFR	B	B
Falame EFR	B	B
Baoule Bakoye EFR	B	B
Bafing EFR	B	C

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

5. Structure et schéma du modèle

5.1. Représentation des composants d'un système dans WEAP

Dans le modèle WEAP, la gestion des ressources en eau d'un bassin versant est représentée par un ensemble d'objets et de modules interconnectés, permettant de simuler les dynamiques d'offre et de demande d'eau, tout en intégrant les priorités et les contraintes propres à chaque secteur d'utilisation. Les principaux composants du système incluent des réservoirs, des débits, des stations de pompage, des unités de demande (telles que l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et la production énergétique), ainsi que les réseaux de transmission d'eau. Chaque composant est associé à des données d'entrée spécifiques, comme les chroniques de précipitations, les débits des cours d'eau, les caractéristiques de la demande (dépendant des dynamiques démographiques, agricoles ou industrielles), et les paramètres opérationnels des infrastructures en place. Les éléments WEAP utilisés pour représenter l'offre, la demande et les éléments de transmission du système, ainsi que les données d'entrée requises pour ces éléments sont résumées dans le tableau 12.

Tableau 12. Composants utilisés pour représenter le système de gestion des ressources en eau d'un bassin versant dans WEAP

Composant système	Élément WEAP	Des données d'entrée
Rivière	— River	Tracer la rivière sur lequel les éléments pourront être placés
Stations de dessalement et sources d'eau extérieures à la zone pilote	◆ Other Supply	Capacité maximale
Aquifères souterrains	■ Groundwater	Capacité totale de stockage, stockage initial, rendement maximum
Demandes en eau non agricoles	● Demand Site	Nombre de comptes par type d'utilisateur, demande annuelle par utilisateur par an, variation mensuelle, % d'eau consommée (le reste étant des eaux usées)
Bassins versants et demandes en eau agricole	● Catchment	Précipitations et autres données climatiques, utilisation des terres, zones irriguées, efficacité de l'irrigation, paramètres d'étalement (capacité en eau du sol, Kc, facteur de résistance au ruissellement, conductivité de la zone racinaire)
Réservoirs et retenues	▲ Reservoir	Géométrie du réservoir, évapotranspiration, volume total, volume mort, volume observé
Les stations d'épuration des eaux usées	● Wastewater Treatment Plant	Capacité maximale
Ouvrages de transport / dérivation de l'eau	— Diversion	Capacité maximale au début de chaque ligne
Ruisseau des eaux de surface et infiltration des eaux souterraines	— Runoff/Infiltration	
Eaux usées générées	— Return Flow	
Jauge de débit (rivière ou ouvrage de dérivation)	↙ Streamflow Gauge	Flux observé

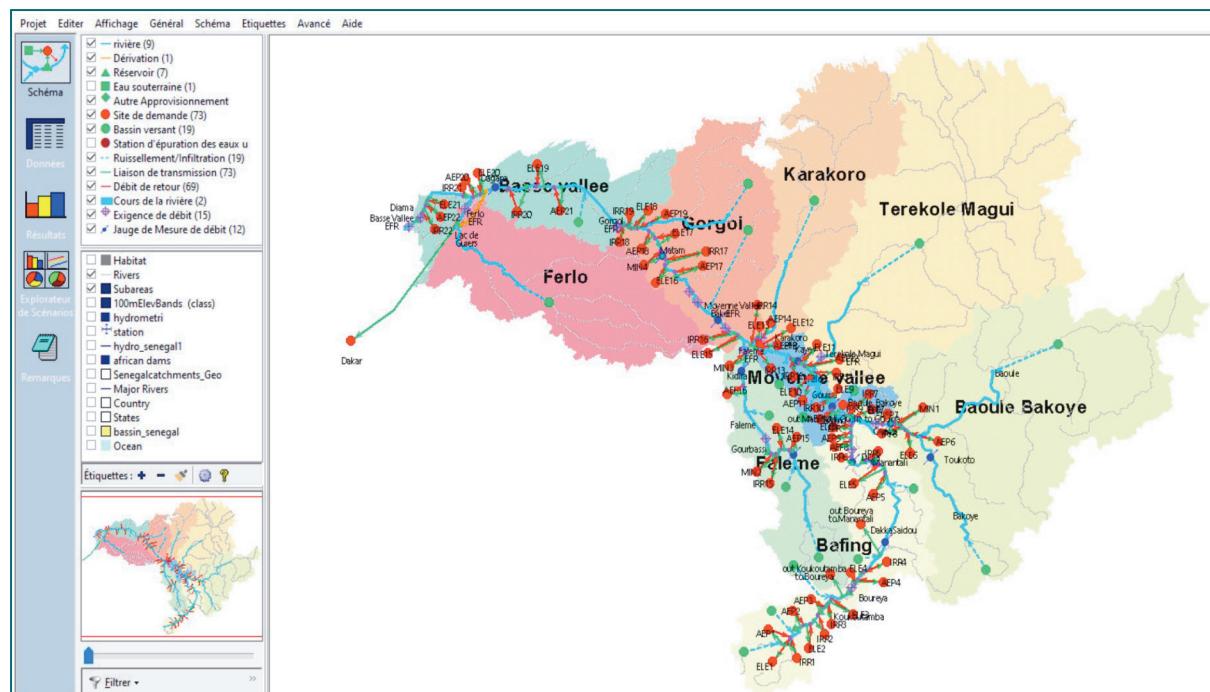
Tableau 12. (suite)

Composant système	Élément WEAP	Des données d'entrée
Liens entre l'eau souterraine, le réservoir ou la structure de transport de l'eau et les demandes agricoles ou non agricoles	Transmission Link	Débit maximum, pertes
Exigence de débit environnemental	Flow Requirement	Besoin de débit (par pas de temps)

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

5.2. Schématisation du modèle WEAP-BFS

La schématisation du modèle WEAP-BFS (figure 18) a intégré trois ensembles d'éléments afin d'assurer une représentation à la fois précise et exhaustive. En premier lieu, l'étendue géographique a été prise en compte en se référant aux shapefiles afin de reproduire fidèlement les frontières du bassin et des sous-bassins. Ensuite, les caractéristiques physiques de chaque sous-bassin ont été considérées, ce qui a permis d'analyser les conditions hydrologiques et environnementales ainsi que de caractériser les approvisionnements. Enfin, l'ensemble des activités présentes dans les sous-bassins a été intégré pour la prise en compte des besoins en eau. Pour chaque activité, notamment l'AEP, l'élevage, l'irrigation et les mines, les demandes en eau ont été spatialement désagrégées en sites de demande selon leur positionnement dans les sous-bassins. Le tableau 13 présente la répartition des sites de demande en eau dans le modèle WEAP-Sénégal.

Figure 18. Représentation du bassin du fleuve Sénegal (BFS) dans WEAP

Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

Chaque site de demande a été relié à une portion du fleuve à travers une liaison de transmission et un écoulement de retour. Cependant, la ville de Dakar fait exception, car elle n'a pas de écoulement de retour, étant donné qu'elle n'est pas localisée dans le BFS. L'approvisionnement en eau du WEAP-BFS est principalement assuré par les ruissellements de surface, lesquels ont été déterminés par modélisation hydrologique selon la méthode «soil-moisture». Cette modélisation s'est appuyée sur des données climatiques open source, vérifiées avec les mesures climatiques de terrain. Le modèle a été calibré à l'aide des données de débits historiques de chaque sous-bassin du fleuve Sénégal et de ses affluents. Les informations relatives aux infrastructures de régulation, notamment celles des barrages de Manantali, Diama et Gouina, ont été intégrées conformément aux données historiques d'exploitation et aux planifications suivant les SDAGE 2050. Le contrôle des exigences des besoins environnementaux en eau dans le WEAP-BFS a été mis en œuvre au niveau des stations hydrométriques.

Tableau 13. Répartition des points de demande en eau dans le modèle WEAP-Sénégal

Type de demande	Identifiant	Sous-bassin
Alimentation en eau potable	AEP1, AEP2, AEP3, AEP4, AEP5, AEP7, AEP8, AEP9	Bafing
	AEP6, AEP7	Baoulée bakoye
	AEP10, AEP11, AEP12, AEP13, AEP14	Moyne Vallee
	AEP15, AEP16	Falamé
	AEP17, AEP18	Gourgouille
	AEP19, AEP20, AEP21, AEP22.	Base vallée
Élevage	AEP DAKAR	Ferlo
	ELE1, ELE2, ELE3, ELE4, ELE5, ELE8	Bafing
	ELE6, ELE7.	Baoulée bakoye
	ELE9, ELE10, ELE11, ELE12, ELE13	Moyne Vallee
	ELV14	Falamé
	ELE15, ELE16, ELE17,	Gourgoul
Irrigation	ELE18, ELE19, ELE20, ELE21	Base vallée
	IRR1, IRR2, IRR3, IRR4, IRR5, IRR6	Bafing
	IRR8, IRR9	Baoulée Bakoye
	IRR7, IRR10, IRR11, IRR12, IRR13, IRR14	Moyen vallée
	IRR15,	falamé
	IRR16, IRR17	Gourgouille
Mine	IRR18, IRR19, IRR20, IRR21, IRR22	Base valée
	MIN 1	Bakoye
	MIN2, MIN3	Falamé
	MIN 4	Gourgouille

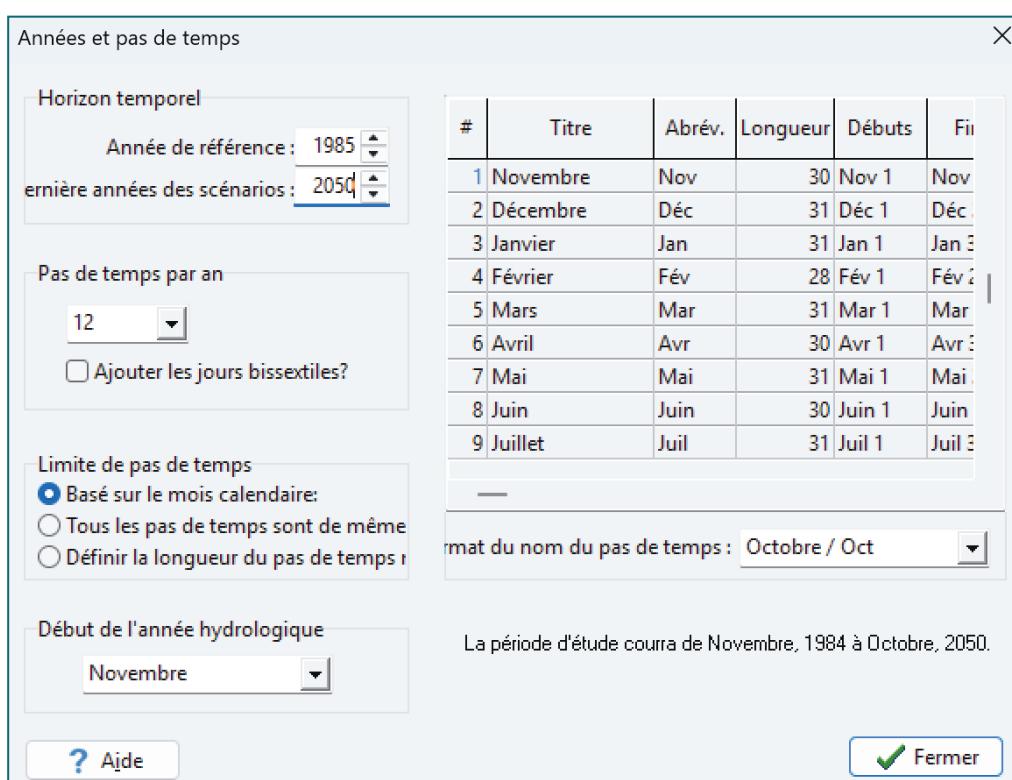
Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

5.3. Configuration des paramètres généraux

Compte tenu de la nature stratégique du SDAGE 2050, un pas de temps mensuel a été retenu pour la modélisation du système dans WEAP-BFS couvrant la période de 1985 à 2065. L'année 1985 a été utilisée comme année d'échauffement, permettant ainsi au modèle de stabiliser ses conditions initiales. Les résultats sont donc présentés pour la période de 1986 à 2065.

L'année hydrologique commence en novembre, avec une période sèche de novembre à juin et une période pluvieuse de juillet à octobre. Cette configuration reflète les variations saisonnières spécifiques du bassin, en adéquation avec les dynamiques climatiques locales, ce qui est essentiel pour une gestion optimale des ressources en eau dans le cadre des projections futures. La figure 19 présente la fenêtre de configuration des paramètres généraux dans le WEAP-BFS. Le pas de temps en années égal à 12 stipule qu'il s'agit d'un modèle mensuel.

Figure 19. Fenêtre pour la configuration temporelle et du pas de temps du modèle WEAP-BFS



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

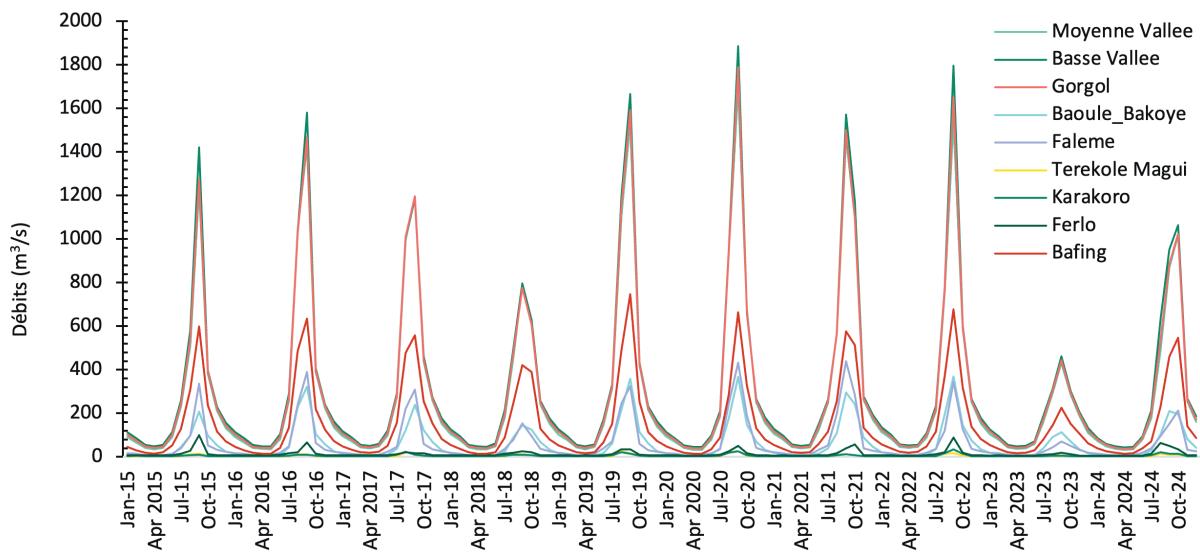
6. Résultats de l'évaluation du stress hydrique

6.1. Variation des besoins environnementaux en eau en situation actuelle

La situation actuelle correspond à des conditions climatiques quasi similaires à celle de la tendance historique enregistrée sur le bassin entre 1985 et 2015, et sur le développement économique quasi similaire à celui enregistré sur le bassin en 2024.

Les exigences de besoins environnementaux en eau (EFR), déterminés sur la période 2015-2024 (figure 20), montrent une variation interannuelle qui est parfaite cohérente avec les débits générés par les précipitations (coefficients de corrélation $r^2 = 0.89$), indiquant que les années avec des précipitations particulièrement intenses requièrent des besoins environnementaux en eau plus élevés. Il est à noter que les EFR pour les bassins de tête, c'est-à-dire les affluents du fleuve Sénégal, sont significativement plus faibles que ceux requis en aval le long du fleuve Sénégal lui-même (Moyenne Vallée, Gorgol, et Basse Vallée). À titre d'exemple, les simulations effectuées ont révélé que, pour les années 2019-2022, la Basse Vallée, le Gorgol et la Moyenne Vallée ont connu des pics d'EFR compris entre 1 600 et 1 900 mètres cubes par seconde (m^3/s), tandis que l'EFR du Bafing a atteint des pics compris entre 800 et 350 m^3/s .

Figure 20. Besoins environnementaux en eau pour les sous-bassins du fleuve Sénégal simulé avec le modèle WEAP-BFS pour la période 2015-2024



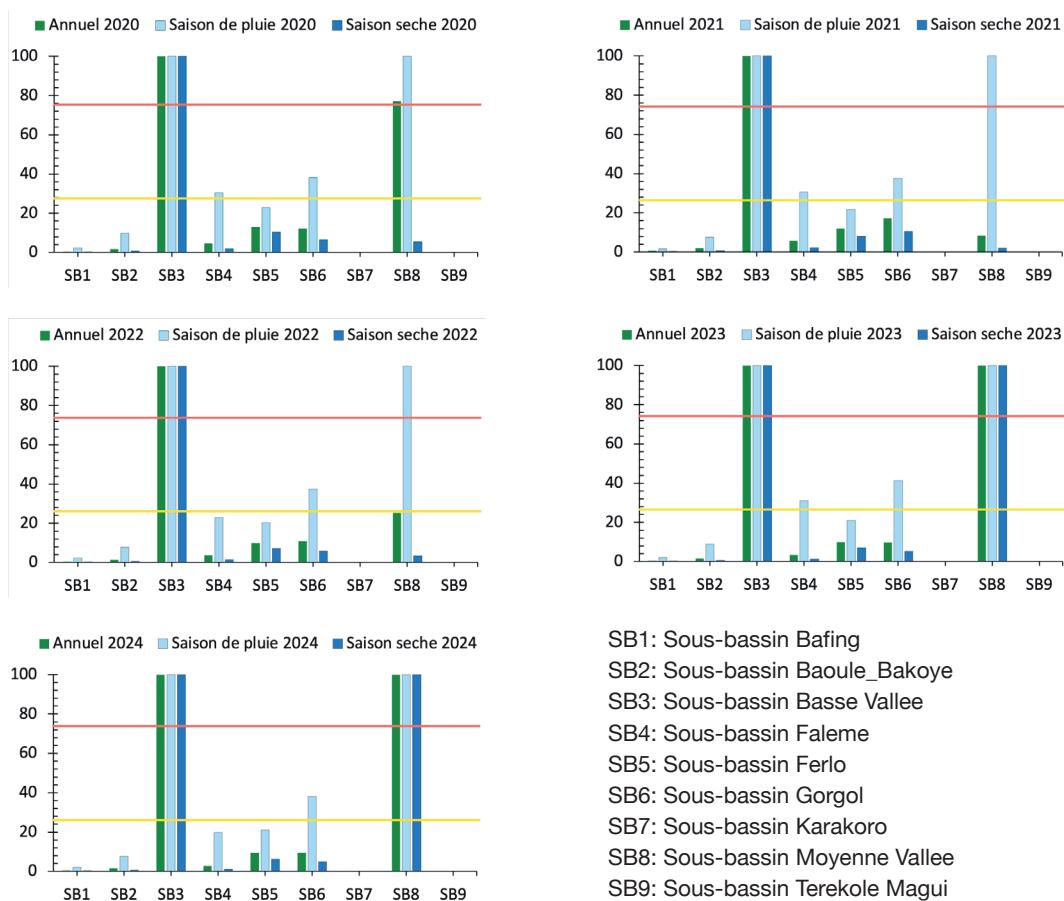
Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

6.2. Situation actuelle du stress hydrique dans le bassin du Fleuve Sénégal

Le calcul et l'analyse du stress hydrique en la situation actuelle a porté sur la période 2020-2024 (5 ans) afin de tenir compte de la variabilité interannuelle naturelle des conditions hydrologiques. De cette manière, les résultats fournissent un aperçu solide et représentatif des tendances habituelles actuelles en matière de disponibilité et de consommation d'eau. Le stress hydrique annuel sur le BFS en situation actuelle est compris entre 100 et 0 (figure 20).

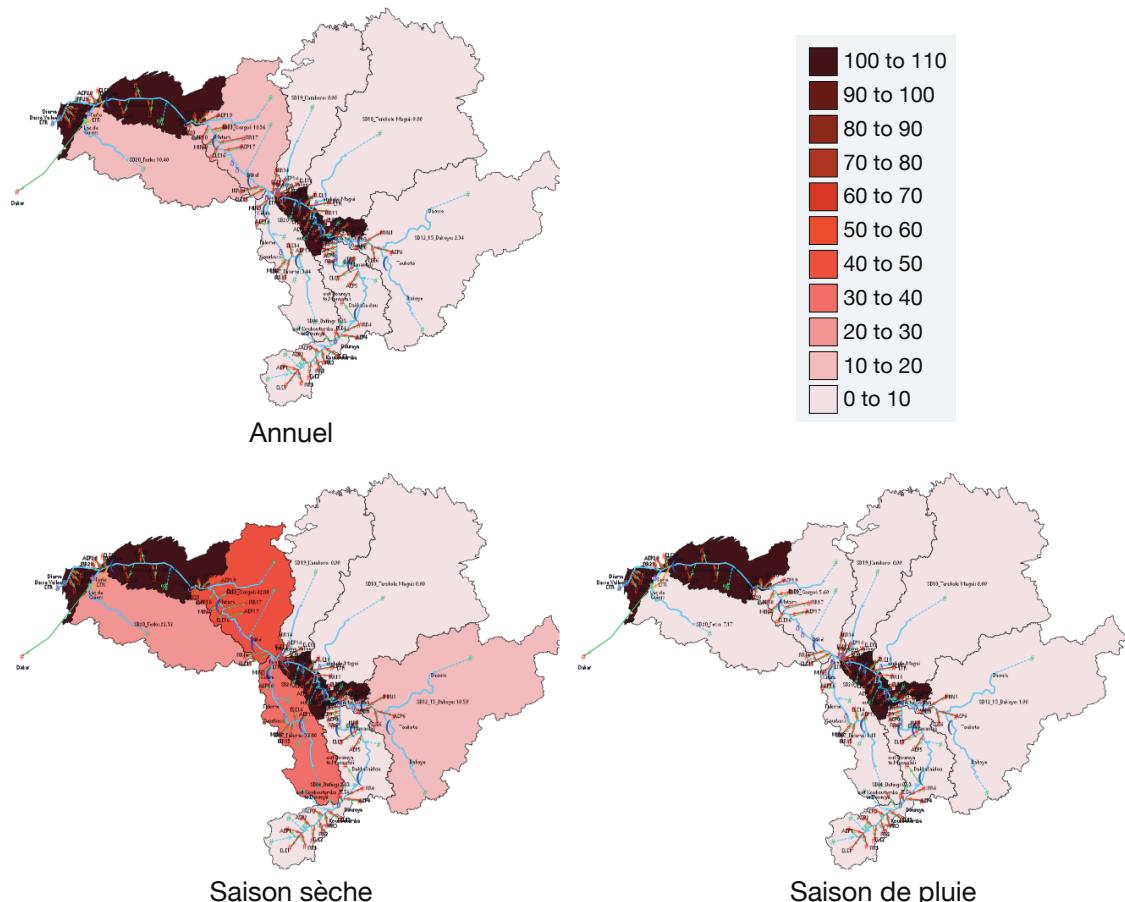
Le sous-bassin de la basse vallée (SB3) a enregistré un stress hydrique constant de 100 tout au long des années analysées. En revanche, le sous-bassin de la moyenne vallée (SB8) a montré une sensibilité marquée au stress hydrique annuel, avec des pics pouvant atteindre 100, comme en 2023 et 2024. À l'inverse, les sous-bassins Karakoro (SB7) et Terekole Magui (SB9) ont affiché des valeurs de stress hydrique de 0, en raison de la faible quantité de prélèvement total d'eau douce (TFWW) sur ces sous-bassins. En conséquence, aucun site de demande en eau n'a été pris en compte dans la conception du modèle WEAP pour ces sous-bassins. L'ensemble des autres sous-bassins présentent un stress hydrique faible, avec un taux inférieur à 25 pour cent.

Figure 21. Stress hydrique annuel et par saison sur le bassin du fleuve Sénegal en situation actuelle (2020-2024). La ligne jaune matérialise le seuil de dépassement du stress faible pour le stress moyen et la ligne rouge matérialise le seuil dépassement du stress moyen pour le stress élevé



La désagrégation du stress hydrique annuel suivant les saisons sèches et humides (figure 21, figure 22) a indiqué que le sous bassin basse vallée est constamment en stress hydrique quel que soit la saison. Le sous bassin de la moyenne vallée est constamment en stress hydrique durant la saison sèche tant qu'en saison pluvieuse ce sous-bassin présente un stress hydrique variable. Cela indique que, même en saison pluvieuse, il peut arriver que les ressources en eau douce disponibles dans ce sous-bassin soient déficitaires par rapport à la demande en eau (par exemple en 2023 et 2024). Les sous-bassins Bafing et Baoule Bakoye ont enregistré un stress hydrique très faible, quelle que soit la saison considérée. Les autres sous bassins (Faleme, Ferlo et Gorgol), ont présenté un stress hydrique moyen en saison sèche (supérieur à 25 pour cent).

Figure 22. Désagrégation dur stress hydrique de l'année 2024 sur le bassin du fleuve Sénégal en situation actuelle



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

Le détail des différents termes ayant permis de calculer le stress hydrique annuel pour le sous-bassin du Bafing est présenté dans le tableau 14. Ces résultats mettent en évidence une disparité significative entre la quantité d'eau douce générée annuellement dans le sous-bassin (l'eau dans la rivière) (en moyenne 40 millions m³) et les prélèvements effectués dans cette même rivière (en moyenne 3 250 millions m³). En outre, le sous-bassin fait face à un déficit en termes de satisfaction des exigences de débit environnementales, avec une moyenne de 340 millions m³, et reçoit de l'eau transférée officiellement par le canal de Taouey (Taoue), avec une moyenne de 340 millions m³. En conséquence, le déficit annuel moyen du sous-bassin Bafing est estimé à 3 450 millions m³.

Le plug-in WPS a été conçu pour optimiser le transfert d'eau entre les bassins, en permettant aux bassins en situation de faible stress hydrique de partager leurs ressources avec ceux qui sont en situation de stress hydrique élevé. La quantité totale d'eau disponible pour le transfert en aval à partir d'un sous-bassin amont est égale à son excédent local. Et la quantité d'eau totale transférée à un sous-bassin ne peut excéder son déficit local. L'objectif est de réduire le stress dans ce dernier. Le tableau 15 illustre les transferts annuels d'eau entre les sous-bassins pour chaque année de simulation de la situation actuelle (2020-2024). Les lignes représentent le sous-bassin source et les colonnes le sous-bassin récepteur (vers).

En situation actuelle, le volume d'eau transféré entre les sous-bassins s'élève à 3 500 millions m³. La basse vallée et la moyenne vallée se distinguent comme les bassins prioritaires pour cette eau. Le sous-bassin Bafing assure en moyenne le transfert de 37 pour cent de cette eau, suivi par la Faleme (20 pour cent), le Ferlo (17 pour cent) et le Baoule Bakoye (14 pour cent).

Tableau 14. Détail des valeurs permettant le calcul du stress hydrique pour le sous-bassin Bafing en situation actuelle

Année:	2020	2021	2022	2023	2024
L'eau dans la rivière	37,9	37	41,7	37	36,3
Recharge des eaux souterraines	0	0	0	0	0
Prélèvements dans la rivière	3 423	3 285,8	3 244	3 130,8	3 134,4
Pompage des eaux souterraines	0	0	0	0	0
Augmentation du stockage	0	0	0	0	0
Diminution du stockage	0	0	0	0	0
Eau exportée (légalement reçue) **	333,4	335,6	341,6	342,8	344,9
Eau importée (disponible transfert)	0	0	0	0	0
Augmentation de l'EFR *	-140,8	-71,2	-64	-111,7	-82,7
Total de l'EFR *	6 323,7	5 216	7 635,1	7 598,9	7 525,7
Débit à l'EFR *	21 239	17 591,6	24 387,2	23 679,9	24 285,2
Excédent local	0	0	0	0	0
Déficit local	3 577,7	3 513,1	3 479,9	3 324,9	3 360,2
Réserve en aval	0	0	0	0	0
Transfert géré libéré	0	0	0	0	0

Tableau 14. (suite)

Année:	2020	2021	2022	2023	2024
Demande en amont	3 577,7	3 513,1	3 479,9	3 324,9	3 360,2
Transfert géré reçu	0	0	0	0	0
TRWR	3 282,2	3 214,6	3 180	3 019,1	3 051,7
TFWW	3 423	3 285,8	3 244	3 130,8	3 134,4
Augmentation de l'EFR	-140,8	-71,2	-64	-111,7	-82,7
Stress hydrique	100	100	100	100	100

* EFR = besoins environnementaux en eau

** Le sous-bassin Basse vallée reçoit officiellement du canal de Taouey (Taoue)

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Tableau 15. Transferts annuels d'eau entre les sous-bassins du fleuve Sénégal en situation actuelle (en millions m³)

Année	2020	2021	2022	2023	2024
Sous Bassin	SB3	SB8	SB3	SB8	SB3
SB1:	1436	0	1352	0	1352
SB2	495	0	511	0	511
SB3	0	0	0	0	0
SB4	658	0	669	0	669
SB5	202	0	209	0	209
SB6	568	0	545	0	545
SB7	110	0	83	0	83
SB8	2	0	18	0	18
SB9	107	0	92	0	92
Total	3578	0	3480	0	3480
				3325	200
				3360	464

SB1: Bafing; SB2: Baoule_Bakoye; SB3: Basse Vallée; SB4: Faleme; SB5: Ferlo; SB6: Gorgol; SB7: Karakoro; SB8: Moyenne Vallée; SB9: Terekole Magui

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

6.3. Influence du changement climatique sur le stress hydrique actuelle

Le stress hydrique actuel (de 2020 à 2024) a été évalué en fonction des trois scénarios de changement climatique pris en compte dans cette étude: CC1 pour une condition climatique humide stable, CC2 pour une condition climatique sèche stable et CC3 pour une condition climatique très sèche (voir les tableaux 16, 17 et 18; figure 23 pour l'exemple de l'année 2024).

De manière générale, la désagrégation du stress hydrique annuel suivant les saisons sèches et humides pour les différents scénarios climatiques simulés suit la même tendance que celle observée en situation actuelle: (1) le stress hydrique en saison sèche est nettement supérieur au stress hydrique en saison de pluie, (2) le sous-bassin de la basse vallée présente un stress de 100, quel que soit la saison considérée, et (3) le sous-bassin de la moyenne vallée présente un stress de 100 en saison sèche.

La comparaison du stress hydrique suivant les scénarios climatiques indique que la condition climatique humide stable (CC1) présente un stress hydrique annuel supérieur à celui de la condition climatique sèche stable (CC2), qui est elle-même supérieure à celle de la condition climatique très sèche stable (CC3). Dans le modèle WEAP-BFS, la demande en eau reste la même, indépendamment des scénarios climatiques. Les prélèvements restent inchangés, que l'année soit humide ou sèche. Par conséquent, le prélèvement total d'eau douce (TFWW), qui est au dénominateur de la formule de calcul du stress hydrique, reste constant d'un scénario climatique à l'autre. En effet, la variation des valeurs du stress hydrique est tributaire du dénominateur (TRWR-EFR), plus spécifiquement de la différence entre les ressources totales renouvelables en eau douce et les besoins en eau douce pour l'environnement.

Tableau 16. Stress hydrique annuel suivant les différents scénarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9
CC1									
2020	1	2	100	6	12	17	0	16	0
2021	1	4	100	9	21	29	0	100	0
2022	1	3	100	5	16	19	0	100	0
2023	1	2	100	7	13	21	0	26	0
2024	1	3	100	10	20	31	0	88	0
CC2									
2020	0	1	100	2	5	7	0	5	0
2021	0	1	100	2	3	6	0	1	0
2022	1	1	100	4	20	18	0	19	0
2023	1	1	100	5	19	23	0	5	0
2024	0	1	100	2	6	9	0	4	0
CC3									
2020	0	1	100	2	6	10	0	3	0
2021	1	1	100	4	20	18	0	5	0
2022	0	1	100	3	6	8	0	1	0
2023	1	1	100	4	7	10	0	3	0
2024	0	1	100	3	10	11	0	4	0

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Tableau 17. Stress hydrique en saison sèche suivant les différents scénarios climatiques
CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9
CC1									
2020	2	11	100	31	19	38	0	100	0
2021	2	11	100	32	20	40	0	100	0
2022	3	16	100	32	22	41	0	100	0
2023	2	9	100	31	20	41	0	100	0
2024	2	8	100	30	21	44	0	100	0
CC2									
2020	1	3	100	10	18	22	0	100	0
2021	2	6	100	25	21	35	0	100	0
2022	2	6	100	31	21	39	0	100	0
2023	2	14	100	39	21	44	0	100	0
2024	5	15	100	40	28	51	0	100	0
CC3									
2020	2	7	100	33	22	37	0	100	0
2021	2	11	100	31	19	39	0	100	0
2022	2	15	100	36	21	43	0	100	0
2023	2	8	100	36	20	43	0	100	0
2024	2	8	100	33	21	43	0	100	0

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Tableau 18. Stress hydrique en saison de pluie suivant les différents scénarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9
CC1									
2020	0	1	100	3	10	10	0	3	0
2021	1	2	100	4	39	23	0	100	0
2022	0	1	100	2	18	12	0	100	0
2023	0	1	100	3	10	14	0	4	0
2024	1	1	100	5	26	24	0	9	0
CC2									
2020	0	1	100	2	5	7	0	5	0
2021	0	1	100	2	3	6	0	1	0
2022	1	1	100	4	20	18	0	19	0
2023	1	1	100	5	19	23	0	5	0
2024	0	1	100	2	6	9	0	4	0

Tableau 18. (suite)

	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7	SB8	SB9
CC3									
2020	0	1	100	2	6	10	0	3	0
2021	1	1	100	4	20	18	0	5	0
2022	0	1	100	3	6	8	0	1	0
2023	1	1	100	4	7	10	0	3	0
2024	0	1	100	3	10	11	0	4	0

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

L'analyse des exigences en matière de besoins environnementaux en eau en fonction des conditions climatiques a permis de mettre en évidence les observations suivantes:

- **Pour les années humides:**

Lors des années humides, le régime général des débits est plus élevé. La courbe de durée d'écoulement (FDC) présente une distribution avec des débits de base plus élevés et des événements à débit élevé plus fréquents. L'application de la méthode de décalage de la FDC dans ces conditions aboutit généralement à des exigences de besoins environnementaux en eau plus élevés, garantissant que l'écosystème reçoit suffisamment d'eau en période d'abondance.

- **Pour les années sèches:**

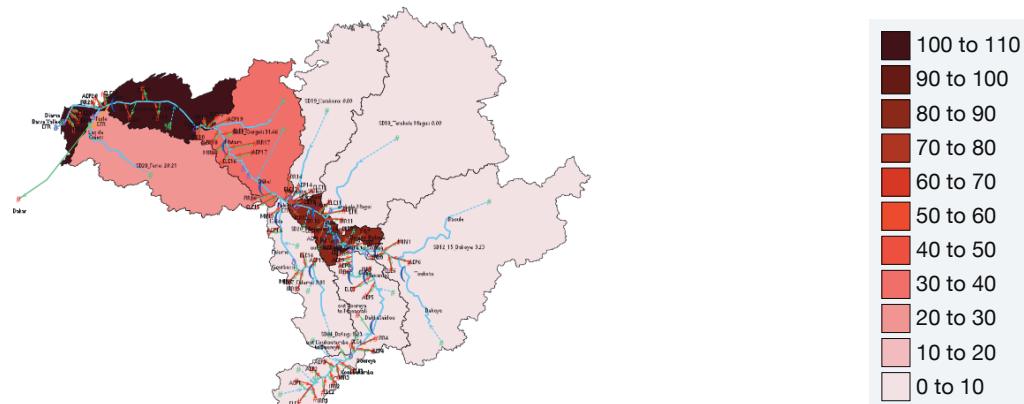
La fréquence des débits faibles augmente lors des années sèches. Ainsi, les débits qui étaient auparavant considérés comme modérés peuvent maintenant se produire plus fréquemment en tant que débits inférieurs. Par conséquent, les valeurs de débit environnemental dérivées dans ces conditions tendent à être plus faibles. Cette réduction reflète la diminution de la disponibilité de l'eau, bien qu'elle souligne également la nécessité d'une allocation prudente de l'eau pour soutenir la santé écologique en cas de stress.

- **Pour les années très sèches:**

Au cours des années très sèches, le FDC se déplace encore plus, montrant une fréquence encore plus élevée de débits très faibles. Les calculs des besoins environnementaux en eau dans ces conditions extrêmes peuvent chuter de manière significative. Ces faibles débits cibles mettent en évidence la vulnérabilité de l'écosystème et soulignent l'importance de mesures supplémentaires de gestion de l'eau (comme les lâchers de réservoirs ou les stratégies de conservation de l'eau) pour prévenir la dégradation écologique.

Cette analyse met en évidence un résultat contre-intuitif: à prélèvements constants, le ratio de stress hydrique peut être plus élevé pendant les années humides - non pas parce que l'eau est plus rare, mais parce que les exigences en besoins environnementaux en eau (EFR) consomment une grande part des ressources en eau renouvelable.

Figure 23. Stress hydrique de l'année 2024 sur le bassin du fleuve Sénegal pour les différentes conditions climatiques



CC1 : condition climatique humide stable



CC2 : condition climatique sèche stable



CC3 : condition climatique très sèche

Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

6.4. Influence du niveau de développement

Le calcul du stress hydrique pour le niveau de développement optimisé (S7) a été effectué pour les différentes conditions climatiques CC1, CC2 et CC3 sur la période 2035 à 2050 (tableaux 19 à 21 et figure 24).

Les niveaux de stress hydrique annuels enregistrés dans les simulations des années humides (CC1) sont généralement plus élevés que ceux enregistrés dans les scénarios plus secs (CC2 et CC3). Les sous-bassins Basse Vallée (SB3) et Moyenne Vallée (SB8) ont présenté des niveaux de stress très élevés (100 pour cent) tout au long de la période analysée. Le sous-bassin Gorgol (SB6), qui présentait des niveaux de stress bas en situation actuelle, est devenu fréquemment soumis à un stress très élevé en situation de développement optimisé, avec des valeurs dépassant le plus souvent 75 pour cent. Les sous-bassins, Bafing (SB1), Baoule Bakoye (SB2), Faleme (SB4) et Ferlo (SB5), restent dans la catégorie de stress faible (<25 pour cent), avec des fluctuations mineures au fil du temps.

Lors des années sèches (CC2), les niveaux de stress hydrique diminuent dans la plupart des sous-bassins. Les sous-bassins bassins Basse Vallée (SB3) et Moyenne Vallée (SB8) continuent à subir un stress très élevé (100 pour cent). Toutefois, le sous-bassin Gorgol (SB6) connaît une réduction notable du stress, en comparaison à la simulation des années humides (CC1) avec des valeurs souvent inférieures à 75 pour cent. De même, les sous-bassins Bafing (SB1), Baoule Bakoye (SB2), Faleme (SB4) et Ferlo (SB5), conservent des niveaux de stress faibles à modérés.

Lors des années très sèches (CC3), les valeurs de stress hydrique sont les plus faibles dans la plupart des sous-bassins en comparaison à CC1 et CC2. Les sous-bassins SB3 et SB8 restent soumis à un stress de 100 pour cent, ce qui confirme que ces sous-bassins sont confrontés à une pénurie d'eau chronique, quelles que soient les conditions climatiques. Le sous-bassin SB6 connaît une réduction significative du stress, de nombreuses valeurs tombant en dessous de 50 pour cent. D'autres sous-bassins, notamment SB1, SB2, SB4 et SB5, continuent d'afficher de faibles niveaux de stress (<25 pour cent). Cette tendance générale met en évidence un paradoxe: le stress hydrique est le plus faible pendant les années les plus pauvres en eau, ce qui peut s'expliquer par le fait que les réductions de l'EFR dans ces conditions laissent une proportion relativement plus importante d'eau disponible pour l'utilisation humaine.

Tout comme pour le stress hydrique annuel, les sous-bassins Basse Vallée (SB3) et Moyenne Vallée (SB8) sont soumis à un stress hydrique permanent pendant la saison sèche (de novembre à juin), à hauteur de 100 pour cent dans l'ensemble des scénarios climatiques (CC1, CC2 et CC3). Le sous-bassin Gorgol SB6 présente également un stress important, avec des valeurs allant d'un stress modéré à élevé (de 57 pour cent à 86 pour cent dans le CC1, de 58 pour cent à 79 pour cent dans le CC2 et de 55 pour cent à 77 pour cent dans le CC3). Cela montre que, bien qu'il soit confronté à des défis, le niveau de stress du sous-bassin SB6 est légèrement plus gérable que celui des sous-bassins SB3 et SB8. Par ailleurs, les sous-bassins Bafing (SB1), Baoule Bakoye (SB2), Faleme (SB4) et Ferlo (SB5) demeurent globalement dans la catégorie de stress faible, avec des niveaux de stress variant entre 1 pour cent et 25 pour cent.

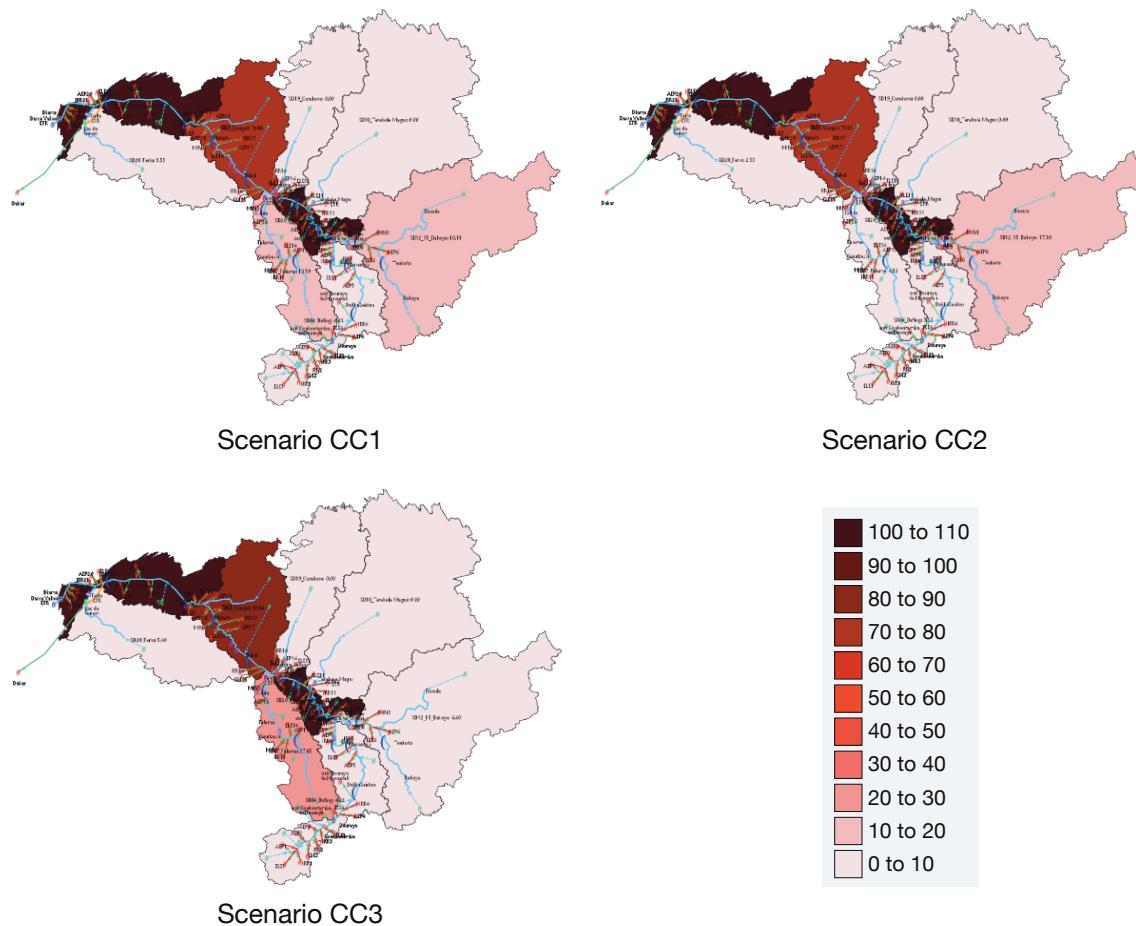
L'analyse des données de la saison des pluies (juillet à octobre) montre que les sous-bassins SB3 et SB8 sont toujours en situation de stress maximal dans tous les scénarios climatiques. Cela confirme que ces sous-bassins sont fortement affectés par la pénurie d'eau, qu'il s'agisse d'une année humide, sèche ou très sèche. Le SB6 affiche une plus grande variabilité de ses niveaux de stress pendant la saison des pluies, avec des valeurs allant de faible à modéré (de 21 pour cent à 85 pour cent dans CC2 et de 5 pour cent à 71 pour cent dans CC3), ce qui suggère une amélioration de sa situation au fil des années plus humides, bien qu'il demeure en situation de stress hydrique modéré. En revanche, les sous-bassins Bafing (SB1), Baoule Bakoye (SB2), Faleme (SB4) et Ferlo (SB5) maintiennent un stress faible, avec des niveaux de stress généralement inférieurs à 70 pour cent. Cela indique que ces sous-bassins bénéficient d'une disponibilité accrue en eau pendant la saison des pluies, ce qui leur permet de maintenir leur résilience même pendant les années sèches ou très sèches.

Tableau 19. Stress hydrique en saison de pluie suivant les différents scénarios climatiques CC1: condition climatique humide stable, CC2: condition climatique sèche stable et CC3 condition climatique très sèche

CC1 Annuel								CC2 Annuel								CC3 Annuel							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8		SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8		SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	8	21	100	13	3	79	100	2035	6	10	100	14	1	40	100	2035	9	7	100	8	1	32	100
2036	9	17	100	13	4	78	100	2036	6	9	100	6	2	63	100	2036	4	10	100	7	1	26	100
2037	9	10	100	13	2	54	100	2037	5	10	100	6	2	63	100	2037	5	6	100	6	1	38	100
2038	7	13	100	7	3	73	100	2038	5	8	100	7	1	39	100	2038	3	11	100	5	0	9	100
2039	5	9	100	7	2	57	100	2039	5	12	100	10	2	67	100	2039	7	8	100	14	3	63	100
2040	5	15	100	7	2	85	100	2040	6	13	100	12	2	65	100	2040	5	7	100	6	1	40	100
2041	6	17	100	10	4	84	100	2041	5	12	100	7	2	73	100	2041	4	7	100	7	2	47	100
2042	6	17	100	9	3	86	100	2042	4	9	100	9	2	57	100	2042	4	9	100	11	2	65	100
2043	6	10	100	9	3	65	100	2043	5	8	100	7	1	39	100	2043	3	6	100	6	1	29	100
2044	8	14	100	11	4	73	100	2044	4	6	100	7	1	36	100	2044	3	6	100	8	1	43	100
2045	7	15	100	8	4	88	100	2045	4	8	100	9	2	56	100	2045	3	6	100	5	1	23	100
2046	5	9	100	10	3	63	100	2046	4	7	100	6	1	31	100	2046	2	8	100	5	1	25	100
2047	6	12	100	8	3	81	100	2047	3	6	100	7	1	33	100	2047	5	7	100	9	2	46	100
2048	5	13	100	6	3	81	100	2048	3	7	100	11	2	53	100	2048	4	10	100	10	2	52	100
2049	5	13	100	7	3	83	100	2049	4	10	100	7	2	67	100	2049	4	11	100	10	2	57	100
2050	6	15	100	10	3	94	100	2050	4	11	100	7	2	81	100	2050	3	8	100	6	1	35	100

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Figure 24. Stress hydrique annuel de l'année 2050 sur le bassin du fleuve Sénégal pour les différentes conditions climatiques



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Note: Veuillez-vous reporter à la clause de non-responsabilité à la page ii relative aux noms et aux frontières qui figurent sur cette carte.

Tableau 20. Stress hydrique en saison sèche suivant les différents scénarios climatiques (2035-2050)

CC1 Saison sèche							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	5	25	100	4	1	57	100
2036	5	27	100	3	1	56	100
2037	6	23	100	3	1	60	100
2038	6	21	100	4	2	65	100
2039	4	24	100	2	1	65	100
2040	5	16	100	4	2	71	100
2041	4	23	100	3	2	58	100
2042	3	24	100	2	2	59	100
2043	4	21	100	2	2	61	100
2044	6	19	100	3	2	73	100
2045	5	18	100	3	2	77	100
2046	3	22	100	2	1	71	100
2047	4	15	100	4	2	78	100
2048	3	24	100	2	2	77	100
2049	3	25	100	2	2	80	100
2050	4	17	100	4	2	86	100

CC2 Saison sèche							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	5.6	27	100	4.7	1.5	58	100
2036	6.6	17	100	3.9	2.1	60	100
2037	4.9	24	100	2.6	1.7	64	100
2038	5.3	26	100	4.5	1.8	64	100
2039	5.5	15	100	4.4	1.9	65	100
2040	4.7	29	100	2.4	1.5	67	100
2041	4.5	26	100	3.9	1.4	68	100
2042	4	24	100	2.4	1.5	70	100
2043	5.6	23	100	4.4	2.1	72	100
2044	5.9	15	100	5.1	2.3	70	100
2045	4.9	20	100	4.7	2.3	76	100
2046	3.8	23	100	3.8	1.5	75	100
2047	5.6	14	100	4.9	2.3	71	100
2048	3.3	18	100	4	2.1	78	100
2049	3.8	21	100	4.1	2.1	80	100
2050	3.7	20	100	2.3	1.5	79	100

Tableau 21. Stress hydrique en saison de pluie suivant les différents scénarios climatiques (2035-2050)

CC1 Saison de pluie							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	88	93	100	97	81	100	100
2036	100	100	108	100	100	100	100
2037	15	7	100	29	4	54	100
2038	11	10	100	18	9	83	100
2039	5	5	100	15	4	55	100
2040	7	15	100	14	3	96	100
2041	43	55	100	78	30	99	100
2042	74	82	100	93	62	100	100
2043	14	10	100	41	7	78	100
2044	20	19	100	48	17	87	100
2045	33	37	100	52	22	98	100
2046	10	7	100	29	5	68	100
2047	9	11	100	19	6	87	100
2048	9	12	100	24	9	89	100
2049	15	18	100	41	13	94	100
2050	34	44	100	69	25	99	100

CC2 Saison de pluie							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	7	5	100	20	1	32	100
2036	6	5	100	9	3	65	100
2037	5	5	100	11	2	63	100
2038	4	3	100	9	1	30	100
2039	5	8	100	21	3	70	100
2040	7	8	100	26	4	67	100
2041	6	8	100	15	5	78	100
2042	5	5	100	18	2	53	100
2043	5	3	100	8	1	28	100
2044	3	3	100	7	1	25	100
2045	4	4	100	13	2	46	100
2046	4	3	100	7	0	21	100
2047	2	3	100	8	1	22	100
2048	3	3	100	16	2	41	100
2049	3	5	100	11	2	61	100
2050	6	8	100	18	5	85	100

Tableau 20. (suite)

CC3 Saison sèche							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	9.6	15	100	4.2	1.6	55	100
2036	8.8	19	100	4.9	2.1	62	100
2037	9.7	20	100	6.1	2.2	64	100
2038	4	17	100	4.4	1.7	61	100
2039	6.9	8	100	12	1.9	55	100
2040	5.1	31	100	2.6	1.6	62	100
2041	4.8	18	100	4.9	2.1	67	100
2042	3.3	15	100	3.9	1.9	69	100
2043	4.9	29	100	4.7	1.6	70	100
2044	3.3	15	100	4.3	2	67	100
2045	3.9	16	100	4.6	2.1	73	100
2046	4.4	13	100	4.4	2.1	70	100
2047	4.8	10	100	4.3	2.1	72	100
2048	3.9	23	100	3.9	2.1	75	100
2049	4.1	24	100	3.9	2.1	75	100
2050	4.1	22	100	4	2.1	77	100

Tableau 21. (suite)

CC3 Saison de pluie							
	SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB8
2035	9	3	100	12	1	23	100
2036	3	6	100	7	0	17	100
2037	3	3	100	6	1	27	100
2038	2	9	100	5	0	5	100
2039	7	8	100	17	5	71	100
2040	5	3	100	8	1	31	100
2041	3	3	100	8	3	37	100
2042	4	5	100	20	3	63	100
2043	2	2	100	7	1	19	100
2044	3	2	100	10	1	33	100
2045	2	3	100	6	0	14	100
2046	2	5	100	6	0	16	100
2047	5	4	100	13	2	35	100
2048	3	5	100	18	2	42	100
2049	4	5	100	18	2	50	100
2050	2	4	100	7	1	23	100

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Dans l'ensemble, les sous-bassins SB3 et SB8 sont ceux qui subissent le plus de stress hydrique à la fois pendant la saison sèche et la saison des pluies, avec un niveau de stress très élevé (100 pour cent) dans tous les scénarios climatiques, ce qui indique qu'ils sont sensibles à la pénurie d'eau, quelles que soient les conditions climatiques. Le SB6 présente des niveaux de stress fluctuants, avec une amélioration notable pendant la saison des pluies lors des années plus sèches (CC2 et CC3), mais reste confronté à des défis importants lors des années humides (CC1). Les autres sous-bassins – SB1, SB2, SB4 et SB5 – présentent un faible niveau de stress au cours des deux saisons, SB1 et SB5 bénéficiant en particulier d'une disponibilité en eau stable, même au cours des années de sécheresse les plus extrêmes (CC3). Ces résultats montrent que certains sous-bassins, tels que SB1 et SB5, sont plus résistants aux différents scénarios climatiques, tandis que d'autres, en particulier SB3 et SB8, devront faire l'objet d'une attention particulière pour résoudre les problèmes de stress hydrique auxquels ils sont confrontés.

7. Limites du modèle et développement futur

Malgré les avancées significatives du modèle WEAP-BFS dans la représentation des dynamiques de stress hydrique à l'échelle du bassin du fleuve Sénégal, plusieurs limites subsistent et doivent être abordées pour améliorer la robustesse et l'utilité opérationnelle de l'outil à moyen et long terme.

7.1. Limites liées aux données disponibles

La performance du modèle est directement tributaire de la qualité et de la représentativité des données utilisées. Or, une grande partie des variables climatiques mobilisées (précipitations, température, humidité relative) provient de jeux de données satellitaires (CHIRPS, MSWEP, CRU-TS) du fait de la faible couverture et de l'hétérogénéité des réseaux de stations météorologiques dans le bassin, notamment en Guinée et au Mali. Bien que des corrections de biais aient été appliquées, des incertitudes persistent, affectant potentiellement la fiabilité des projections hydrologiques.

De même, les données sur les usages de l'eau sont issues d'estimations indirectes basées sur des ratios standards (consommation unitaire, surfaces irriguées, effectifs de cheptel, etc.) en l'absence de dispositifs de mesure sur le terrain. Ce recours à des valeurs par défaut, bien qu'inévitable dans le contexte actuel, limite la finesse de la calibration et la capacité à détecter des dynamiques locales spécifiques.

7.2. Limites structurelles du modèle WEAP-BFS

Le choix de la méthode de l'humidité du sol pour la modélisation hydrologique, bien adaptée aux contextes de données limitées, reste néanmoins une simplification du cycle hydrologique réel. Ce modèle ne permet pas, par exemple, d'intégrer explicitement les échanges entre eaux souterraines et eaux de surface, ni de représenter les effets cumulatifs des prélèvements diffus, pourtant croissants dans certaines zones du bassin.

Par ailleurs, la schématisation des infrastructures hydrauliques (barrages, canaux, transferts interbassins) reste essentiellement statique, ce qui limite l'intégration de stratégies de gestion adaptative, notamment en cas d'années hydrologiques extrêmes ou de conflits d'usage.

7.3. Axes de développement futur

Pour que le modèle WEAP-BFS devienne un véritable levier stratégique de la gestion intégrée et prospective des ressources en eau dans le bassin du fleuve Sénégal, plusieurs pistes d'amélioration sont à considérer:

- Renforcement du réseau d'observation hydro climatique, en ciblant prioritairement les zones sources des écoulements (hauts bassins guinéens et maliens).
- Mise en place de systèmes de mesure directe des prélèvements, notamment pour l'AEP, l'irrigation et les activités minières, à travers des dispositifs de télémétrie ou de relevé périodique.
- Développement d'un couplage avec des modèles spécialisés (par exemple, MODFLOW pour les eaux souterraines, QUAL2K pour la qualité de l'eau), afin d'élargir le champ d'analyse.
- Mise à jour continue des projections socio-économiques (démographie, extension des périmètres irrigués, industrialisation), en partenariat avec les États membres.
- Renforcement des capacités techniques au sein de l'OMVS et des agences nationales, pour favoriser une appropriation complète du modèle et garantir sa pérennité.

8. Conclusion générale

Le développement du modèle WEAP-BFS pour l'analyse du stress hydrique dans le bassin du fleuve Sénégal constitue une avancée majeure dans la mise en œuvre opérationnelle de l'indicateur ODD 6.4.2 à l'échelle régionale. En combinant approche hydrologique, désagrégation spatiale et analyse de scénarios, cet outil offre une lecture fine et contextualisée des tensions sur la ressource en eau, tant en situation actuelle que dans des configurations prospectives à l'horizon 2050.

Les résultats obtenus révèlent une hétérogénéité marquée du stress hydrique entre les sous-bassins. Si certains, comme le Bafing (SB1) ou la Falémé (SB4), présentent une résilience hydrique structurelle, d'autres, tels que la Basse Vallée (SB3) et la Moyenne Vallée (SB8), affichent une vulnérabilité chronique, accentuée par la saisonnalité des débits et la concentration des usages agricoles et domestiques. Ces contrastes soulignent l'importance de concevoir des stratégies de gestion différencierées, ajustées aux réalités locales et aux trajectoires d'évolution propres à chaque entité hydrographique.

Au-delà du diagnostic, le modèle WEAP-BFS se positionne comme un outil d'aide à la décision précieux pour l'OMVS et les États membres, en permettant la simulation de politiques publiques intégrées et la priorisation d'interventions selon des critères d'efficacité, d'équité et de durabilité. Il facilite également le dialogue intersectoriel et transfrontalier, en fournissant une base commune de compréhension des enjeux liés à l'eau.

Cependant, pour que cet outil conserve sa pertinence et sa crédibilité à long terme, un engagement collectif est requis pour améliorer la qualité des données, renforcer les capacités techniques et assurer une mise à jour régulière du modèle en fonction des nouvelles connaissances, des infrastructures mises en service et des impacts du changement climatique.

Ainsi, le WEAP-BFS ne doit pas être perçu comme une fin en soi, mais comme un instrument dynamique, évolutif et stratégique au service d'une gouvernance partagée, inclusive et résiliente des ressources en eau dans le bassin du fleuve Sénégal.

Références bibliographiques

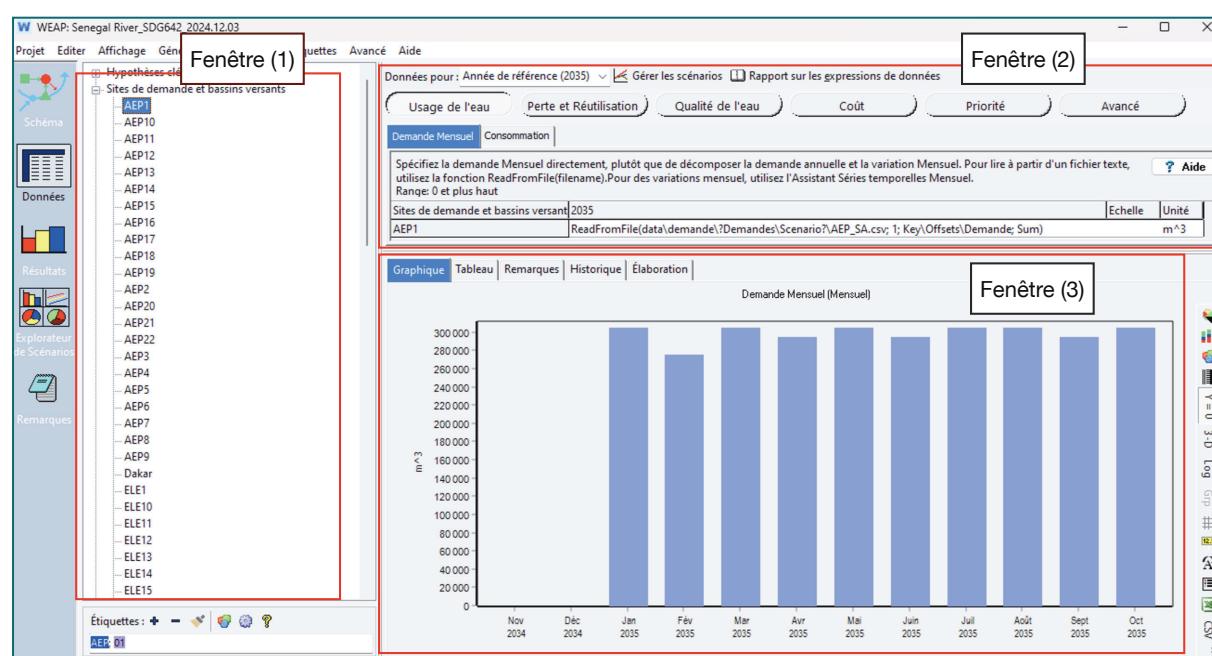
- Arthington A.H., Bhaduri A., Bunn S.E., Jackson S., Tharme R.E., Tickner D., Young W. Acreman M., Natalie Baker N., Capon S., Horn A., Kendy E., Poff N.L., Richter B. et Ward S.** (2018). The Brisbane Declaration and Action Agenda on Environmental Flows. *Front. Environ. Sci.* 6:45. doi: 10.3389/fenvs.2018.00045
- FAO.** 2019. Incorporating environmental flows into “water stress” indicator 6.4.2 - Guidelines for a minimum standard method for global reporting. Rome. 32 p. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Leloup, S. et Traoré, M.**, 1989. La situation fourragère dans le sud-est du Mali. *Régions CMDT de Sikasso et de Koutiala*, 1.
- Lévite, H., Sally, H. et Cour, J.**, 2003. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20-27), p.779-786.
- OMVS, 2023.** Schéma Directeur d’Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l’horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. <https://cda-omvs.org/wp-content/uploads/2025/01/15161-BRL-OMVS-Schema-Directeur-Amenagement-des-eau-du-fleuve-Snenegal-horizon-SDAGE-2050.pdf>
- Sheffield, J., G. Goteti, et E. F. Wood**, 2006: Development of a 50-yr high-resolution global data-set of meteorological forcings for land surface modeling, *J. Climate*, 19 (13), 3088-3111
- Sieber, J.**, 2006. WEAP water evaluation and planning system.
- Thiam, M., Adjei, K.A., Niang, A., Gyamfi, C., Odai, S.N. et Kane, A.**, 2022. Modelling the recent variations of water balance components and water availability within the Senegal River basin: using WEAP21 model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), p.4517-4528.
- Yao, A.B., Mangoua, O.M.J., Georges, E.S., Kane, A. et Goula, B.T.A.**, 2021. Using “Water Evaluation and Planning”(WEAP) model to simulate water demand in Lobo watershed (Central-Western Côte d'Ivoire).
- WEAP User Guide.** 2015. website https://www.weap21.org/webhelp/two-bucket_method.htm (consulté le 3 juillet 2025)

Annexes

Annexe 1. Procédures de mise à jour des données

La vue des Données vous permet de créer des variables et des relations, entrer des hypothèses et des projections utilisant des expressions mathématiques et des relations dynamiques avec Excel. L'entrée des données sur les paramètres relatifs aux caractéristiques des réservoirs s'opère au niveau de la vue Données du logiciel WEAP (figure Annex 1). Ladite vue propose une navigation hiérarchique qui structure les données selon les composantes du système hydrologique. Elle présente 3 fenêtres, la fenêtre (1) est la section qui présente un champ de navigation entre les éléments constitutifs du bassin du fleuve Sénégal, la fenêtre (2) strictement à droite met en avant les différentes caractéristiques d'évaluation relatives à chaque type de donnée, leurs présentations et autres détails utiles pour une meilleure compréhension des modalités de calcul des paramètres. La fenêtre (3) en dessous de la fenêtre (2), est la section qui présente les évolutions des données spécifiques à chaque paramètre sous forme de graphiques en fonction du temps avec des zones de lectures de la base de données, remarques et élaboration. Des graphiques illustrent les différents paramètres et met en évidence les seuils critiques, apportant une visualisation claire des données hydrologiques. Dans la fenêtre (1), vous pouvez acquérir des informations complémentaires sur chaque élément ou sous-élément juste à travers un clic sur ce dernier. Ici sur la figure ci-dessous montre en exemple le réservoir de Manantali qui est intégré sous la catégorie des sites de demande et bassins versants.

Vue Données du modèle WEAP (Données AEP 1)



Source: Outil d'évaluation et de planification de l'eau (WEAP), modifié par les auteurs.

Annexe 2. Répartition des sites de demandes par sous-bassin

Type de demande	Identifiant	Sous-bassin
Alimentation en eau potable	AEP1, AEP2, AEP3, AEP4, AEP5, AEP7, AEP8, AEP9	Bafing
	AEP6, AEP7	Baoulée bakoye
	AEP10, AEP11, AEP12, AEP13, AEP14	Moyne Vallee
	AEP15, AEP16	Falamé
	AEP17, AEP18	Gourgouille
	AEP19, AEP20, AEP21, AEP22.	Base vallée
Élevage	AEP Dakar	Ferlo
	ELE1, ELE2, ELE3, ELE4, ELE5, ELE8	Bafing
	ELE6, ELE7.	Baoulée bakoye
	ELE9, ELE10, ELE11, ELE12, ELE13	Moyne Vallee
	ELV14	Falamé
	ELE15, ELE16, ELE17,	Gourgoul
Irrigation	ELE18, ELE19, ELE20, ELE21	Base vallée
	IRR1, IRR2, IRR3, IRR4, IRR5, IRR6	Bafing
	IRR8, IRR9	Baoulée Bakoye
	IRR7, IRR10, IRR11, IRR12, IRR13, IRR14	Moyen vallée
	IRR15,	falamé
	IRR16, IRR17	Gourgouille
Mine	IRR18, IRR19, IRR20, IRR21, IRR22	Base valée
	MIN 1	Bakoye
	MIN2, MIN3	Falamé
	MIN 4	GOURGOULLE

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Annexe 3. Données et hypothèses pour l'estimation de la demande en eau pour l'élevage

Taux de croissance des cheptels (en %)

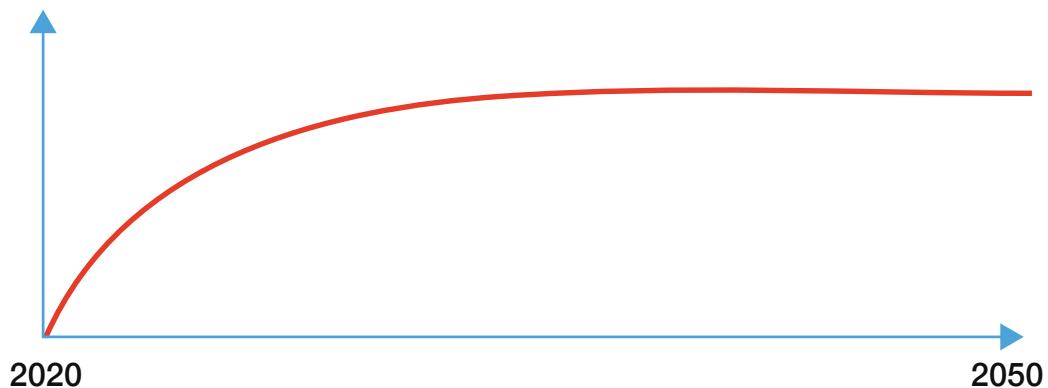
Pays	Bovins	Ovins	Caprins	Porcins	Asins	Camelins	Equins	Volaille	Echelle des données de taux de croissance	Sources des données de taux de croissance
Guinée	5,2	6,4	6,4	3,8	-	-	-	5,0	Pays	Cf Mali et Direction Nationale de l'Élevage, 2000
Mali	3,0	5,0	5,0	1,2	2,0	2,0	2,0	5,0	Pays	Ministère de l'Élevage, 1992
Mauritanie	1,4	5,1	5,1	-	-	0,7	-	5,0	Pays	Cf Mali et Direction Générale de l'Élevage, 2002
Sénégal	1,1	3,2	2,8	3,1	0,5	0,7	0,8	8,7	Pays	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Conversion des données d'effectifs en Unité de Bétail Tropicale* (Leloup et Traoré, 1989)

1 bovin	1 ovin	1 caprin	1 porcin	1 asin	1 camelin	1 équin	1 volaille
0,8 UBT	0,1 UBT	0,1 UBT	0,1 UBT	0,6 UBT	1 UBT	1 UBT	0,01 UBT

Effectifs



Les équivalents UBT et la consommation journalière d'une UBT sont identiques à ceux de 2020

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Annexe 4. Données et hypothèses pour l'estimation de la demande en eau pour l'irrigation

Sources des données de superficie

Pays	Echelle des données de superficies	Source des données de superficies
Guinée	Préfecture	AHAC Guinée, OMVS, DNGR 2019-2020
Mali	Pays	AHAC Mali, OMVS, ADRS 2019-2020
Mauritanie	Wilaya	Direction des Politiques, de la Coopération, du Suivi et de l'Evaluation du Ministère de l'Agriculture et SONADER, 2019-2020
Sénégal	Délégation	SAED, 2019-2020

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Cultures mise en œuvre par saison

Pays	Assolement	Saisonnalité	Echelle des données	Hypothèses
Guinée	<input checked="" type="checkbox"/>	X	Préfecture	<ul style="list-style-type: none"> Riz cultivé en Hivernage Maraîchage en Contre-Saison Maïs en Contre-Saison
Mali	<input checked="" type="checkbox"/>	X	Pays	<ul style="list-style-type: none"> Riz, Sorgho et Arachide cultivés en Hivernage Maraîchage en Contre-Saison Maïs en Contre-Saison
Mauritanie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> / X	Wilaya	Maraîchage cultivé en CSF
Sénégal	<input checked="" type="checkbox"/>	X	Délégation	

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Calendrier cultural construits à partir des données de Kc FAO pour le riz

Riz H - Kc	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Bafing							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Baoule-Bakoye							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Falémé							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Moyenne Vallée							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Terekole Magui							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Karakoro							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Gorgol							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Ferlo							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	
Basse Vallée							1,05	1,13	1,20	1,20	1,05	

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Annexe 5. Données et hypothèses pour l'estimation de la demande en eau pour l'exploitation des minéraux

Situation de la demande en 2020

#	Pays	Entreprise minières	Zones	Sous-bassin	Minerais	Nœud de prélevement	Prélèvements (milliers de m ³)					
							J	F	...	N	D	Total
1a	Guinée	Société Ashanti Goldfield (SAG)	Siguiriri	Baoule-Bakoye	Or	MIN1	419	419	...	419	419	5.024
3b	Mali	SEMONS (Sadiola)	Kayes	Faleme	Or	MIN3	419	419	...	419	419	5.024
3b	Mali	SOMILO	Kéniéba	Faleme	Or	MIN2	419	419	...	419	419	5.024
3b	Mali	YATELA	Kayes	Faleme	Or	MIN3	419	419	...	419	419	5.024
3b	Mali	FEKOLA	Kéniéba	Faleme	Or	MIN2	419	419	...	419	419	5.024
3b	Mali	METEDIA MINING SARL	Kéniéba	Faleme	Or	MIN2	419	419	...	419	419	5.024
9b	Sénégal	SOMIVA	Matam	Basse vallée	Phosphate	MIN4	4.187	4.187	...	4187	4187	50.240
3c	Sénégal	Sabodala Gold Operations SA	Kédougou	Faleme	Or	MIN2	419	419	...	419	419	5.024
3c	Sénégal	Sabodala Gold Operations SA	Kédougou	Faleme	Argent	MIN2	4.187	4.187	...	4187	4187	50.240
3c	Sénégal	Petowal Mining Company (PMC)	Kédougou	Faleme	Or	MIN2	419	419	...	419	419	5.024
3c	Sénégal	Petowal Mining Company (PMC)	Kédougou	Faleme	Argent	MIN2	4.187	4.187	...	4187	4187	50.240
8b	Sénégal		Tambacounda	Ferlo	Manganèse	MIN3	4.187	4.187	...	4187	4187	50.240

Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. Sections non publiées.

Situation de la demande en 2050

#	Pays	Entreprise minières	Zones	Sous-bassin	Minerais	Nœud de prélevement	Prélèvements (milliers de m ³)					
							J	F	...	N	D	Total
1a	Guinée	Société Ashanti Goldfield (SAG)	Sigiri	Baoule-Baktoye	Or	MIN1	837	837	...	837	837	10.048
3b	Mali	SEMOS (Sadiola)	Kayes	Faleme	Or	MIN3	837	837	...	837	837	10.048
3b	Mali	SOMILO	Kéniéba	Faleme	Or	MIN2	837	837	...	837	837	10.048
3b	Mali	YATELA	Kayes	Faleme	Or	MIN3	837	837	...	837	837	10.048
3b	Mali	FEKOLA	Kéniéba	Faleme	Or	MIN2	837	837	...	837	837	10.048
3b	Mali	METEDIA MINING SARL	Kéniéba	Faleme	Or	MIN2	837	837	...	837	837	10.048
9b	Sénégal	SOMIVA	Matam	Basse vallée	Phosphate	MIN4	8.373	8.373	...	8.373	8.373	100.480
3c	Sénégal	Sabodala Gold Operations SA	Kédougou	Faleme	Or	MIN2	837	837	...	837	837	10.048
3c	Sénégal	Sabodala Gold Operations SA	Kédougou	Faleme	Argent	MIN2	8.373	8.373	...	8.373	8.373	100.480
3c	Sénégal	Petowal Mining Company (PMC)	Kédougou	Faleme	Or	MIN2	837	837	...	837	837	10.048
3c	Sénégal	Petowal Mining Company (PMC)	Kédougou	Faleme	Argent	MIN2	8.373	8.373	...	8.373	8.373	100.480
8b	Sénégal	Tambacounda	Farlo	Manganèse	MIN3	8.373	8.373	...	8.373	8.373	100.480	
3c	Sénégal	Kédougou	Faleme	Fer	MIN2	8.373	8.373	...	8.373	8.373	100.480	

Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. Sections non publiées.

Annexe 6. Détail sur les demandes en eau par pays du BFS

Besoin en eau chaque scénario du SDAGE 2050 considéré dans le modèle WEAP-BFS

		SA	S7
Demande en eau (Mm ³) pour les activités:		4 214	7 201
Guinée	AEP	13,8	36,4
	Élevage	19,4	39,2
	Mines	5,0	10,0
	Irrigation	7,9	54,0
Mali	AEP	30,2	81,3
	Élevage	33,0	51,4
	Mines	25,1	50,2
	Irrigation	2,5	65,6
Mauritanie	AEP	28,5	76,7
	Élevage	47,1	74,7
	Mines	-	0
	Irrigation	1 460,3	2 389,2
Sénégal	AEP	44,4	117,9
	Élevage	20,2	25,2
	Mines	211,0	522,5
	Irrigation	2 087,7	3 410,1
Transferts	AEP	178,0	196,2
Hydroélectricité	Capacité stockage totale (Mm ³)	11300	17000
Environnement	Débit objectif d'étiage à Bakel (m ³ /s)	52	52
	Débit objectif de crue culminant à Bakel (m ³ /s)	--	2 200
Navigation	Débit Bakel entre juillet et janvier (m ³ /s)	--	300
	Débit Diama entre juillet et janvier (m ³ /s)	--	200

Source: OMVS, 2023. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin du fleuve Sénégal à l'horizon 2050 (OMVS-SDAGE 2050). Rapport élaboré par BRL Ingénierie et le Centre de Suivi Écologique. Sections non publiées.

Annexe 7. Information sur les réservoirs et les lacs

Nom Barrage	Caractéristiques	Valeurs
Koukoutamba	Capacité de stockage (Million m ³)	ElevationToVolume(549.5) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Koukoutamba,1,0) + 0.001
	Stockage initial (Million m ³)	0.75 * Capacité de stockage[Million m ³]
	Physique	VolumeElevation(0.00, 460.0, 25.91, 490.0, 68.67, 499.6, 221.00, 510.0, 433.40, 516.6, 610.30, 520.0, 1531.00, 530.0, 2055.00, 533.8, 2438.00, 536.2, 4278.00, 545.5, 5000.00, 549.4)
	Evaporation nette (mm)	Evap - Precipitation[mm]
	Opération	Sommet Inactif (Million m ³)
		ElevationToVolume(510) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Koukoutamba,1,0) + 0.001
		Tmin (C)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (C)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,6,Key\Offsets\Climate)
	Évaporation	lat
		13
	Precipitation (mm)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,2,Key\Offsets\Climate)
	Tave (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,1,Key\Offsets\Climate)
	Énergie Hydroélectrique	Débit de turbine max
	Débit de turbine Max. (m ³ /s)	4.55 * Lookup(Zm, Qvmax_out, Linear, PrevTSValue(Hauteur du stockage[m]), 56.23, 86.96, 70.29, 98.39, 80.84, 100.22, 91.38, 87.88) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Koukoutamba,1,0)
		Hauteur de colonne d'eau (m)
		Lookup(Qtot, Zv, Linear, PrevTSValue(Effluent Total du Nœud[m ³])/Seconds, 0, 458.6, 100, 459.7, 450, 460.8, 4280, 469.6)
		Facteur d'usine (%)
		Key\hydro electricite\Plant factor
		Rendement de production (%)
		Key\hydro electricite\Generating Efficiency
		Priorité d'Hydroélectricité
		Key\Demandes\Priorites\hydro power\Koukoutamba
		Demande d'Énergie (Mille GJ)
		Key\hydro electricite\Koukoutamba\oMW/1000*3600*24*0.001
Priorité	Priorité	2

Annexe 7. (suite)

Nom Barrage	Caractéristiques	Valeurs
Boureya	Capacité de stockage (Million m ³)	ElevationToVolume(387.2) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Boureya,1,0) + 0.001
	Stockage initial (Million m ³)	0.75 * Capacité de stockage[Million m ³]
	Courbe Volume Altitude	VolumeElevation(0, 340, 16.41, 345, 101.6, 350, 364.2, 356, 639.8, 360, 1154, 365, 1820, 370, 2643, 375, 3635, 380, 5402, 387.2, 7696, 395, 11345, 405)
	Evaporation nette (mm)	Evap - Precipitation[mm]
	Sommet Inactif (Million m ³)	ElevationToVolume(356) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Boureya,1,0) + 0.001
	Tmin (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,5,Key\Offsets\Climate)
	Tmax (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,6,Key\Offsets\Climate)
	lat	13
	Precipitation (mm)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,2,Key\Offsets\Climate)
	Tave (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,1,Key\Offsets\Climate)
Énergie Hydroélectrique	Débit de turbine max	4 * Lookup(Zm, Qvmax_out, Linear, PrevTSValue(Hauteur du stockage[m]), 25.50, 104.35, 31.88, 118.06, 36.66, 120.27, 41.44, 105.45) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Boureya,1,0)
	Hauteur de colonne d'eau (m)	Lookup(Qtot, Zv, Linear, PrevTSValue(Effluent Total du Nœud[m^3])/Seconds, 0.000, 325.36, 2.466, 325.56, 10.190, 325.76, 27.520, 326.01, 66.460, 326.36, 132.300, 326.76, 221.300, 327.16, 334.800, 327.56, 801.000, 328.96, 1145.000, 329.96, 1517.00, 330.96)
	Facteur d'usine (%)	Key\hydro electricite\Plant factor
	Rendement de production (%)	Key\hydro electricite\Generating Efficiency
	Priorité d'Hydroélectricité	Key\Demandes\Priorites\hydro power\Boureya
	Demande d'Énergie (Mille GJ)	Key\hydro electricite\Boureya\oMW/1000*3600*24*0.001

Annexe 7. (suite)

Nom Barrage	Caractéristiques	Valeurs
Manantali	Physique	Capacité de stockage (Million m ³) ElevationToVolume(210.5) Stockage initial (Million m ³) ElevationToVolume(208.05) Courbe Volume Altitude VolumeElevation(0, 150, 750, 170, 1311, 175, 2179, 180, 3335, 185, 4757, 190, 6427, 195, 8322, 200, 10424, 205, 12711, 210, 15164, 215) Evaporation nette (mm) Evap - Precipitation[mm]
	Opération	Sommet Tampon (Million m ³) 12500 Sommet Inactif (Million m ³) ElevationToVolume(187) Coefficient tampon 1/250
	Évaporation	Tmin (C) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,5,Key\Offsets\Climate) Tmax (C) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,6,Key\Offsets\Climate) lat 13.25 Precipitation (mm) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,2,Key\Offsets\Climate) Tave (C) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,1,Key\Offsets\Climate)
	Énergie Hydroélectrique	Débit de turbine max 4.9724 * Lookup(Zm, Qvmax_out, Linear, PrevTSValue(Hauteur du stockage[m])-Hauteur de colonne d'eau[m], 32.00, 85.20, 40.00, 96.40, 46.00, 98.20, 52.00, 86.10) Hauteur de colonne d'eau (m) Lookup(Qtot, Zv, Linear, PrevTSValue(Effluent Total du Nœud[m ³])/Seconds, 0, 153.7, 555, 155.5, 1100, 157.0, 1665, 158.2, 2070, 159.0, 2500, 159.7, 2800, 160.2, 3110, 160.5, 3645, 161.0, 4325, 161.5, 4480, 162.0) Facteur d'usine (%) Key\hydro electricite\Plant factor Rendement de production (%) Key\hydro electricite\Generating Efficiency Priorité d'Hydroélectricité Key\Demandes\Priorites\hydro power\Manantali Demande d'Énergie (Mille GJ) Key\hydro electricite\Manantali\oMW/1000*3600*24*0.001
	Priorité	Priorité 2

Annexe 7. (suite)

Nom Barrage	Caractéristiques	Valeurs
Balassa	Physique	Capacité de stockage (Million m ³) ElevationToVolume(599.95) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Balassa,1,0) + 0.001
		Stockage initial (Million m ³) 0.75 * Capacité de stockage[Million m ³]
		Courbe Volume Altitude VolumeElevation(0.00, 548.00, 5.10, 554.00, 18.40, 558.00, 46.20, 562.00, 91.30, 566.00, 158.60, 570.00, 250.80, 574.00, 370.50, 578.00, 518.10, 582.00, 794.50, 588.00, 1144.00, 594.00, 1585.0, 600.0)
	Opération	Sommet Inactif (Million m ³) ElevationToVolume(570) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Balassa,1,0) + 0.001
		Tmin (C) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,5,Key\Offsets\Climate)
	Évaporation	Tmax (C) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		Precipitation (mm) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Tave (C) ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,1,Key\Offsets\Climate)
	Énergie Hydroélectrique	Débit de turbine max 4.22 * Lookup(Zm, Qvmax_out, Linear, PrevTSValue(Hauteur du stockage[m]), 33.54, 23.26, 41.92, 26.32, 48.21, 26.81, 54.50, 23.51) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Balassa,1,0)
		Hauteur de colonne d'eau (m) 543
		Facteur d'usine (%) Key\hydro electricite\Plant factor
		Rendement de production (%) Key\hydro electricite\Generating Efficiency
		Priorité d'Hydroélectricité Key\Demandes\Priorites\hydro power\Balassa
		Demande d'Énergie (Mille GJ) Key\hydro electricite\Balassa\oMW/1000*3600*24*0.001

Annexe 7. (suite)

Nom Barrage	Caractéristiques	Valeurs
Gourbassi	Capacité de stockage (Million m ³)	ElevationToVolume(98.13) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Gourbassi,1,0) + 0.001
	Stockage initial (Million m ³)	0.75 * Capacité de stockage[Million m ³]
	Physique	VolumeElevation(0.00, 60.0, 9.50, 67.5, 18.38, 70.0, 32.25, 72.5, 55.10, 75.0, 94.50, 77.5, 164.10, 80.0, 281.10, 82.5, 468.00, 85.0, 743.00, 87.5, 1119.00, 90.0, 1611.00, 92.5, 2247.00, 95.0, 3428.00, 98.5)
	Courbe Volume Altitude	
	Evaporation nette (mm)	Evap - Precipitation[mm]
	Sommet Tampon (Million m ³)	1700 * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Gourbassi,1,0) + 0.001
	Opération	
	Sommet Inactif (Million m ³)	ElevationToVolume(75) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Gourbassi,1,0) + 0.001
	Coefficient tampon	1/250
	Évaporation	
	Tmin (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,5,Key\Offsets\Climate)
	Tmax (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,6,Key\Offsets\Climate)
	lat	13
	Precipitation (mm)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,2,Key\Offsets\Climate)
	Tave (C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,1,Key\Offsets\Climate)
	Énergie Hydroélectrique	
	Débit de turbine max	2.4 * Lookup(Zm, Qvmax_out, Linear, PrevTSValue(Hauteur du stockage[m]), 17.21, 34.78, 21.52, 39.35, 24.75, 40.09, 27.97, 35.15) * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Gourbassi,1,0)
	Hauteur de colonne d'eau (m)	Lookup(Qtot, Zv, Linear, PrevTSValue(Effluent Total du Nœud[m ³])/Seconds, 0.000, 67.11, 1.252, 67.32, 8.774, 67.72, 24.200, 68.12, 72.750, 68.72, 173.000, 69.51, 315.100, 70.36, 467.700, 71.11, 729.300, 72.11, 1183.000, 73.61, 1849.00, 75.61)
	Débit de turbine Max. (m ³ /s)	
	Facteur d'usine (%)	Key\hydro electricite\Plant factor
	Rendement de production (%)	Key\hydro electricite\Generating Efficiency
	Priorité d'Hydroélectricité	4
	Demande d'Énergie (Mille GJ)	104/12
Priorité	Priorité	2

Annexe 7. (suite)

Nom Barrage	Caractéristiques	Valeurs
Diamma	Physique	Capacité de stockage (Million m ³)
		590 * Step(1950, 0.00001, 1988, 1)
		Courbe Volume Altitude
	Évaporation	VolumeElevation(0, 0, 26.9, 0.2, 54.5, 0.4, 83.4, 0.6, 114, 0.8, 130.3, 0.9, 147.3, 1, 165.1, 1.1, 183.9, 1.2, 247.7, 1.5, 590, 2.75)
		Evaporation nette (mm)
	Opération	Sommet Inactif (Million m ³)
		250 * Step(1950, 0.00001, 1988, 1)
	Évaporation	Tmin (C)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (C)
Gouina	Énergie Hydroélectrique	lat
		16.25
		Precipitation (mm)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Tave (C)
	Priorité	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Priorité
		90
		Débit de turbine max
		350 * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Gouina,1,0)
Felou	Énergie Hydroélectrique	Facteur d'usine (%)
		Key\hydro electricite\Plant factor
		Rendement de production (%)
		Key\hydro electricite\Generating Efficiency
		Colonne fixe (m)
	Priorité	24
		Priority d'Hydroélectricité
		Key\Demandes\Priorites\hydro power\Gouina
		Demande d'Énergie (Mille GJ)
		Key\hydro electricite\Gouina\oMW/1000*3600*24*0.001
Felou	Énergie Hydroélectrique	Débit de turbine max
		350 * If(Year>=Key\ProjectStartYear\Felou,1,0)
		Facteur d'usine (%)
		Key\hydro electricite\Plant factor
		Rendement de production (%)
	Priorité	Key\hydro electricite\Generating Efficiency
		Colonne fixe (m)
		14
		Priority d'Hydroélectricité
		Key\Demandes\Priorites\hydro power\Felou
	Demande d'Énergie	Demande d'Énergie (Mille GJ)
		Key\hydro electricite\Felou\oMW/1000*3600*24*0.001

Annexe 7. (suite)

Nom lac	Caractéristiques	Valeurs
Lac de Guiers	Physique	Capacité de stockage (Million m ³)
		18000*10000*2/10 ⁶
		Courbe Volume Altitude
	Évaporation	VolumeElevation(0, 0, 360, 3.5)
		Evaporation nette (mm)
	Évaporation	Volume Observé (Million m ³)
		ElevationToVolume(ReadFromFile(LacdeGuiers.csv, 1)/100)
		Tmin (C)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\ferlo.csv,5,Key\ Offsets\Climate)
		Tmax (C)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\ferlo.csv,6,Key\ Offsets\Climate)
	Évaporation	lat
		16.5
		Precipitation (mm)
	Évaporation	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Ferlo.csv,2,Key\ Offsets\Climate)
		Tave (C)
		ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\ferlo.csv,1,Key\ Offsets\Climate)

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Annexe 8. Details et valeurs retenues sur les Hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS

Description de l'hypothese		Valeur	Unité
ClimateDir		;Climate\	
Climate		;PrincetonV3Monthly	
	Gourbassi	2100	
	Gouina	2100	
ProjectStartYear	Felou	2014	
	Balassa	2100	
	Boureya	2100	
	Koukoutamba	2100	
Offsets	Climate	If(CAY>2005; 1960-CAY; 0)	
	Demande	1982-CAY	
Development Year	1982		
PopGrowthRate	2		
Dakar Pipeline	Capacity	Lookup(LOD, Capacity, Linear, Key\Development Year, 2020, 0.5, 2030, 6, 2040, 6, 2050, 6)	(m³/s)
	AEP	1	
	ELE	1	
Priorites	IRR	3	
	MINE	5	
	DOE	2	
	hydro power = 3		
	Manantali	hydro power	
	Balassa	hydro power	
	Boureya	hydro power	
	Koukoutamba	hydro power	
Demandes	Felou	hydro power	
	Gouina	hydro power	
	AEP	50	
	ELE	100	
Consommation	IRR	85	
	MNE	70	
	Scenario	;Scenario_0\0_Hist	
Crue objectif	QBakel _{10j}	PrevTSValue(Approvisionnement et ressources\rivière\Senegal\Biefs\En dessous de Crue Objectif:Débit cours d'eau[m³])/Days/86400	(m³/s)
	SDecrue		
	Qobj _{50000ha}	MonthlyValues(Nov, 0, Mai, 0, Juin, 479.25, Juil, 1315, Août, 0)	(m³/s)
	Plant factor	100	
	Generating Efficiency	93	
Hydro-électricité	Manantali	205	
	Balassa		
	Boureya		
oMW	Koukoutamba		
	Gourbassi		
	Felou	63	
	Gouina		

Annexe 8. (suite)

	Description de l'hypothèse	Valeur	Unité
Bakel	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 1, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
Kayes	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 14, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
Manantali	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 2, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
BafingMakana	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 5, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
Gourbassi	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 4, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
Balassa	PrevTSValue(Sokotoro[m ³ /s], delai.amont. Manantali[m ³ /s])	(m ³ /s)	
Sokotoro	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 9, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
Balabori	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 8, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
Boureya	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 7, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)	
delai.amont Manantali	2	(m ³ /s)	
Q nat	Balassa.to.Kou outamba	Max(0, PrevTSValue(Balabori[m ³ /s],delai.amont. Manantali[m ³ /s]) - Balassa[m ³ /s])	(m ³ /s)
	Koukoutamba.to.Boureya	PrevTSValue(Boureya[m ³ /s],delai.amont. Manantali[m ³ /s]) - PrevTSValue(Balabori[m ³ /s],delai.amont. Manantali[m ³ /s])	(m ³ /s)
	Boureya.to.Manantali	Manantali[m ³ /s] - PrevTSValue(Boureya[m ³ /s],delai. amont. Manantali[m ³ /s])	(m ³ /s)
	out.Koukoutamba.to.Boureya	Max(0, -Koukoutamba.to.Boureya[m ³ /s])	(m ³ /s)
	out.Boureya.to.Manantali	Max(0, -Boureya.to.Manantali[m ³ /s])	(m ³ /s)
	MO	Manantali[m ³ /s]+Oualia[m ³ /s]	(m ³ /s)
EFR	MO.to.Gouina	Lookup(Nmoy, Y1, Linear, MO[m ³ /s], 0,0.00,71.48,1.09,255.6,-1.31,434.2,-10.62,724.2, 3.92,97 3.2,57.50,1237.9,115.10,1467.4,168.10,1732.7,273.80,197 7.7,316.60,2216,310.70,2482.3,353.60,2786.1,463.80,300 6,500.40,3192.7,525.60)	(m ³ /s)
	MOG	Manantali[m ³ /s] + Oualia[m ³ /s] + Gourbassi[m ³ /s]	(m ³ /s)
	MOG.to.Bakel	Lookup(Nmoy, Y1, Linear, MOG[m ³ /s],0,-11.10,35.9, 3.60, 84.7,6.40,124,14.40,158,21.20,201.6,29.80,239.2,37.20,28 8.7,46.80,358,60.00,440.5,75.30,518.9,89.60,594.6,103.00 ,670.1,116.00,748.9,129.40,820.4,143.30,892.4,159.60,97 4,180.90,1052.3,204.20,1123.5,227.70,1230.4,267.30,146 9.3,374.20,1734.3,499.30,1979.4,593.70,2219.6,666.30,24 79.6,722.70,2690.7,751.80,2940.5,780.20,3273.3,818.00,3 670.1,863.10,4067.1,908.20,6000,1127.80)	(m ³ /s)
	FG.to.Bakel	MOG.to.Bakel[m ³ /s] - MO.to.Gouina[m ³ /s]	(m ³ /s)
EPR	Oualia	ReadFromFile(data\debts\0_Hist\debts_Senegal_amont_1950-2020_IRD-2021-01-22.csv, 3, , Sum, , Interpolate)	(m ³ /s)
	active	1	
	Class	B	

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Annexe 9. Détails et valeurs retenues sur les Hypothèses clés formulées pour le WEAP-BFS

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
Occupation du sol		Surface (km ²)	1710
		Kc	0.9
		Capacité de la couche inférieure (mm)	500
		Indice foliaire	3
		Conductivité de surface (mm/Mois)	105
		Conductivité profonde (mm/Mois)	19.85
		Direction privilégiée d'écoulement	0.999
SB01_Bafing	Climat	Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	12
Avancé	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing1.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
		Surface (km ²)	8890
Occupation du sol		Kc	SB01_Bafing
		Capacité de la couche supérieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Capacité de la couche inférieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Indice foliaire	SB01_Bafing
		Conductivité de surface (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
		Conductivité profonde (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
		Direction privilégiée d'écoulement	SB01_Bafing
SB02_Bafing	Climat	Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing2.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing2.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing2.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	12
Avancé	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing2.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB03_Bafing	Occupation du sol	Surface (km ²)	4150
		Kc	SB01_Bafing
		Capacité de la couche supérieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Capacité de la couche inférieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Indice foliaire	SB01_Bafing
		Conductivité de surface (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
	Climat	Conductivité profonde (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
		Direction privilégiée d'écoulement	SB01_Bafing
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,5,Key\Offsets\Climate)
SB04_05_Bafing	Avancé	Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	12
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing3.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
	Occupation du sol	Surface (km ²)	1450
		Kc	SB01_Bafing
		Capacité de la couche supérieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Capacité de la couche inférieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Indice foliaire	SB01_Bafing
	Climat	Conductivité de surface (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
		Conductivité profonde (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
		Direction privilégiée d'écoulement	SB01_Bafing
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,5,Key\Offsets\Climate)
	Avancé	Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	12
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing4.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB06_Bafing	Occupation du sol	Surface (km ²)	10600
		Kc	0.75
		Capacité de la couche supérieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Capacité de la couche inférieure (mm)	SB01_Bafing[mm]
		Indice foliaire	5
	Climat	Conductivité de surface (mm/Mois)	50
		Conductivité profonde (mm/Mois)	SB01_Bafing[mm]
		Direction privilégiée d'écoulement	SB01_Bafing
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,5,Key\Offsets\Climate)
SB07_Faleme	Avancé	Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	12
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bafing5.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
	Occupation du sol	Surface (km ²)	7400
		Kc	0.5;MonthlyValues(Jan,0.4,Feb,0.4,Mar,0.4,Apr,0.4,May,0.4,Jun,0.4,Jul,0.4,Aug,0.4,Sep,0.1,Oct,0.1,Nov,0.1,Dec,0.1)
		Capacité de la couche supérieure (mm)	800
		Indice foliaire	4
		Conductivité profonde (mm/Mois)	1
	Climat	Direction privilégiée d'écoulement	1
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme1.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme1.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme1.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	13
	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme1.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB08_Faleme	Occupation du sol	Surface (km ²)	9700
		Indice foliaire	10
		Direction privilégiée d'écoulement	0.95
	Climat	Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	13
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme2.csv,2,Key\Offsets\Climate)
	Avancé	Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
SB09_Faleme	Occupation du sol	Surface (km ²)	11800
		Capacité de la couche supérieure (mm)	600
		Indice foliaire	5
		Direction privilégiée d'écoulement	0.95
	Climat	Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme3.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme3.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme3.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	13
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Faleme3.csv,2,Key\Offsets\Climate)
	Avancé	Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB10_11_Baoule	Occupation du sol	Surface (km ²)	58800+700
		Kc	1.25
		Indice foliaire	5
		Conductivité de surface (mm/Mois)	55
		Direction privilégiée d'écoulement	1
	Climat	Z2 initial (%)	10
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Baoule.csv,1,Key\Offsets\Climate)
SB12_15_Bakoye	Occupation du sol	Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Baoule.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Baoule.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	13.5
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Baoule.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
	Avancé	Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
		Surface (km ²)	15600+700+10000+500
SB12_15_Bakoye	Occupation du sol	Kc	1.25
		Indice foliaire	3
		Conductivité de surface (mm/Mois)	90
		Direction privilégiée d'écoulement	0.975
		Z2 initial (%)	10
	Climat	Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bakoye.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bakoye.csv,5,Key\Offsets\Climate)
	Avancé	Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bakoye.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	13.5
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Bakoye.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB16_Moyenne vallée	Occupation du sol	Surface (km ²)	2300
		Capacité de la couche supérieure (mm)	500
		Direction privilégiée d'écoulement	0.8
	Climat	Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 3.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 3.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 3.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	14
	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 3.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
SB17_Moyenne vallée	Climat	Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
		Occupation du sol	Surface (km ²)
			4000
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 2.csv,1,Key\Offsets\Climate)
	Avancé	Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 2.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 2.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	14
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Moyenne vallee 2.csv,2,Key\Offsets\Climate)
SB18_Terekole Magui	Climat	Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
		Occupation du sol	Surface (km ²)
			26400
	Avancé	Indice foliaire	MonthlyValues(Nov,2,Dec,2,Jan,6,Fév,8,Mar,8,Avr,8,Mai,8,Juin,10,Juil,4,Août,2,Sept,2,Oct,2)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Terekole Magui.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Terekole Magui.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Terekole Magui.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	15.5
	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?Terekole Magui.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB19_Karakoro	Climat	Occupation du sol	Surface (km ²)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Karakoro.csv,1,Key\\Offsets\\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Karakoro.csv,5,Key\\Offsets\\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Karakoro.csv,6,Key\\Offsets\\Climate)
		lat	17
	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Karakoro.csv,2,Key\\Offsets\\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
	SB20_Moyenne vallée	Occupation du sol	Surface (km ²)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Moyenne vallee 1.csv,1,Key\\Offsets\\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Moyenne vallee 1.csv,5,Key\\Offsets\\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Moyenne vallee 1.csv,6,Key\\Offsets\\Climate)
		lat	16
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Moyenne vallee 1.csv,2,Key\\Offsets\\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
	SB21_Gorgol	Occupation du sol	Surface (km ²)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Senegal abv Gorgol.csv,1,Key\\Offsets\\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Senegal abv Gorgol.csv,5,Key\\Offsets\\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Senegal abv Gorgol.csv,6,Key\\Offsets\\Climate)
		lat	16
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\\Senegal abv Gorgol.csv,2,Key\\Offsets\\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Annexe 9. (suite)

Sous bassin	Catégorie	Paramètre	Valeur
SB22_Gorgol	Climat	Occupation du sol	Surface (km ²)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Gorgol.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Gorgol.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Gorgol.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	17.5
	Avancé	Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Gorgol.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
	SB23_Basse vallée	Occupation du sol	Surface (km ²)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	16.75
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Base vallee.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)
	SB28_Ferlo	Occupation du sol	Surface (km ²)
		Tave (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Ferlo.csv,1,Key\Offsets\Climate)
		Tmin (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Ferlo.csv,5,Key\Offsets\Climate)
		Tmax (°C)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Ferlo.csv,6,Key\Offsets\Climate)
		lat	15.25
		Précipitation (mm/Mois)	ReadFromFile(?ClimateDir??Climate?\Ferlo.csv,2,Key\Offsets\Climate)
		Modéliser les Glaciers?	Non
		Méthode	Ruisseaulement des Précipitations (méthode de la humidité du sol)

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

Annexe 10. Impact des changements climatiques et approvisionnement en eau du BFS

Les tableaux ci-dessous présentent les quantités d'eau projetées du fleuve Sénégal en fonction des différents scénarios climatiques.

Scénarios climatiques projetés pour le bassin du fleuve Sénégal

	Climat Historique	CC1	CC2	CC3
Hydrologie (Année moyenne m ³ /s)				
Dibia-Bafing	244	217	177	155
Oualia-Baoulé Bakoye	83	206	40	36
Gourbassi – Falémé	83	85	43	49
Gouina - Sénégal	351	343	225	194
Félou	351	343	225	194
Kayes	350	343	225	193
Bakel	503	493	305	280
Matam	501	490	302	277
Kaédi	497	486	298	273
Dagana	489	478	291	266
Superficies maximales inondées dans la vallée (km ²)	1542	1717	1078	707
Hydrologie (Année quinquennale sèche m ³ /s)				
Dibia-Bafing	54	58	36	21
Oualia-Baoulé Bakoye	-	4	3	3
Gourbassi – Falémé	-	1	1	1
Gouina - Sénégal	55	62	40	24
Félou	55	62	40	24
Kayes	54	62	40	24
Bakel	47	57	37	24
Matam	46	56	36	23
Kaédi	44	54	34	22
Dagana	40	48	31	20
Superficies maximales inondées dans la vallée (km ²)	1084	1167	857	518

Source: Élaboré par les auteurs du présent document.

L'eau est l'essence de la vie et est au centre des systèmes agroalimentaires. La voie vers la réduction du stress hydrique passe par des systèmes agroalimentaires durables. Pour assurer une gestion durable des ressources en eau pour tous, il est essentiel de considérer le cycle de l'eau dans son intégralité, y compris toutes les utilisations et tous les utilisateurs. L'évaluation du cycle de l'eau et des situations potentielles de stress hydrique, tant à l'échelle nationale qu'à l'échelle infranationale utilisée pour la gestion des ressources en eau, est essentielle pour fournir aux utilisateurs et aux décideurs les informations nécessaires au processus de planification.

Le présent rapport propose une évaluation approfondie du stress hydrique dans le bassin du fleuve Sénégal (BFS) à travers la mise en œuvre d'un modèle hydrologique intégré développé sous le logiciel WEAP (Water Evaluation and Planning). Cette initiative a été conduite en partenariat entre l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'Organisation pour la mise en valeur du fleuve Sénégal (OMVS) et s'inscrit dans le cadre du suivi désagrégé de l'indicateur ODD 6.4.2: prélèvement d'eau douce en proportion des ressources en eau douce disponibles, après avoir pris en compte l'exigence de débit environnemental.

De plus amples informations et des conseils méthodologiques sont disponibles à l'adresse suivante:
<https://www.fao.org/in-action/integrated-monitoring-initiative-sdg6/resources-support/fr>



ISBN 978-92-5-140068-5



9 789251 400685
CD6644FR/1/09.25