

Projet Cartographie, évaluation et
gestion des ressources en eau trans-
frontalières dans la sous-région IGAD



Tome V

COMPOSANTE MODÉLISATION DES RESSOURCES EN EAU



INTERGOVERNMENTAL AUTHORITY
ON DEVELOPMENT



FACILITÉ AFRICAINE DE L'EAU



OBSERVATOIRE DU SAHARA ET DU SAHEL



Projet Cartographie, évaluation et gestion des ressources
en eau transfrontalières de la sous-région IGAD

Tome V

COMPOSANTE MODELISATION DES
RESSOURCES EN EAU/HYDROLOGIE

Évaluation des ressources en eau transfrontalières
dans la sous-région de l'IGAD

Décembre 2011

Rapport élaboré avec le soutien de:



SEREFACO CONSULTANTS LIMITED

6 Katonga Road, Nakasero, PO Box 6916, KAMPALA

Tél. : 256 41 4342397 or 4255577, Fax : 256 41 4230691

E-mail : serefaco@serefacoconsultants.com

© Intergovernmental Authority on Development et Observatoire du Sahara et du Sahel

ISBN: 978-9973-856-68-5



PRÉFACE

La sous-région IGAD constitue l'une des régions les plus marginales du monde en terme de précipitation disponible pour la croissance de la végétation naturelle et la production agricole. Environ 80 % de la sous-région IGAD est aride et semi-arides avec un faible niveau d'utilisation de l'eau. La population est estimée à **206 millions en 2010** et devrait atteindre **462 millions en 2050** dans une zone de **5,2 millions de km²**.

Les manifestations les plus évidentes ont été les sécheresses périodiques et la désertification qui ont condamné des millions de personnes à la pauvreté perpétuelle et aux décès. Les populations tirent leur subsistance de l'eau et des activités de production primaire basées sur la terre tels que le pastoralisme nomade et l'agriculture de subsistance dans une région où la variabilité des précipitations est élevée. La sous-région est le foyer du plus grand nombre de communautés pastorales estimée à environ **17 millions**. La disponibilité de l'eau est donc vitale pour le développement de la région.

Les préoccupations croissantes sur la rareté de l'eau dans la sous-région IGAD ont attiré l'attention sur plusieurs défis socio-économiques liés à la gestion des ressources en eau.

Premièrement, comme la sous-région aspire au progrès économique et social, la demande en eau va augmenter en raison de la croissance démographique, l'augmentation des revenus, le changement des habitudes alimentaires, l'urbanisation et le développement industriel. Pendant que la demande augmente dans tous les secteurs, l'agriculture consommera la majeure partie de l'eau et focalisera les attentions pour l'ajustement de la pression de la demande.

Deuxièmement, il ya des préoccupations quant à la disponibilité de la sous-région de IGAD d'assez d'eau dans le futur pour répondre aux besoins de sécurité alimentaire d'une population en croissance rapide. Avec la sécurité alimentaire, la sécurité de l'eau est également devenue une question fondamentale pour le développement humain dans la sous-région.

S'il est un fait que l'eau occupe une position charnière dans le développement de la sous-région IGAD, **aucun pays membre ne dispose d'informations suffisantes** pour gérer ses ressources en eau de manière à assurer l'efficacité et l'équité économique dans la répartition de l'eau pour différents usages. En effet, quatre pays de l'IGAD à savoir **l'Erythrée, le Kenya, Djibouti et la Somalie** sont dans la catégorie des pays qui subissent la pénurie d'eau avec moins de **1 000 m³ par personne et par an**, voire moins.

De plus, en l'an 2025, même l'Éthiopie et l'Ouganda, qui ont actuellement suffisamment d'eau, seront en situation de stress hydrique (1000-2000 m³/personne/an) ; tandis que Djibouti, Érythrée, Kenya, Somalie et Soudan seront dans une situation de limite avec « 500 m³/personne/an » et ainsi donc l'eau limitera tout développement durable.

Aucun des États membres de l'IGAD n'a à l'heure actuelle la quantité d'eau par habitant nécessaire pour le développement industriel (2400 m³/jour). Ce manque d'eau limitera considérablement la production alimentaire, le maintien des écosystèmes et du développement économique, parmi d'autres besoins et usages.

Les ressources en eau lient les États membres de l'IGAD en interne et en externe avec les régions adjacentes. Six bassins fluviaux transfrontaliers et six systèmes aquifères transfrontaliers ont été identifiés dans la sous-région IGAD à ce stade de l'étude. **Le ratio des demandes en eau aux moyennes d'approvisionnement disponibles est seulement de 9 % en 2011 et de 15 % en 2031** selon les projections de cette étude intitulée « Cartographie, évaluation et gestion des ressources en eau transfrontalières dans la sous-région IGAD ». Cependant, il y a des problèmes spécifiques qui appellent la nécessité d'une connaissance adéquate des ressources en eau de surface et souterraines.

Cette étude (la première du genre dans la sous-région) a fourni une plateforme pour le recentrage des efforts au sein de la sous-région vers une meilleure quantification et la compréhension de l'ampleur de la pénurie d'eau et d'autres facteurs liés à l'eau qui influent sur le développement socio-économique dans la sous-région. Le plus important des moteurs de la demande en eau dans tous les secteurs est la population qui, dans la sous-région devrait augmenter de 165% entre 2010 et 2030, et de 136 % entre 2030 et 2050. Cette étude démontre que ces augmentations vont créer une augmentation significative des prélèvements d'eau pour l'approvisionnement domestique et pour l'industrie.

L'autre secteur important est l'agriculture, qui combine l'irrigation et l'élevage. Ici encore, la population est le paramètre le plus important du changement, régissant la demande alimentaire et donc la nécessité d'augmenter la productivité agricole à travers le développement de l'irrigation.

Le processus régional a mis en évidence le **faible niveau d'utilisation de l'eau** et donc de sécurité hydrique actuellement estimée à environ **3 %** des ressources en eau renouvelable annuellement comme un indicateur de base de l'absence globale de développement des infrastructures d'eau pour assurer la sécurité hydrique pour l'usage social, économique et environnementale. La sous-région IGAD est l'une des zones les plus vulnérables à la variabilité climatique et aux sécheresses récurrentes.

Par conséquent, il est nécessaire de mieux comprendre en profondeur la situation environnementale et de consolider les capacités de l'IGAD à surveiller les liens entre le climat et les systèmes d'eau avec l'identification et la cartographie des ressources en eau et des risques majeurs liés à la dégradation, la pollution et la détérioration de la qualité de l'eau. Les politiques, stratégies et objectifs de la coopération et la façon de les atteindre doivent être énoncées dans une deuxième phase du projet IGAD.

Il est important de noter que le projet IGAD a été mis en œuvre aux niveaux national et

sous-régional avec la participation active des institutions focales nationales en employant des consultants nationaux et régionaux. La coordination du projet est faite par l'OSS avec la création d'unités de coordination nationales dans les institutions focales nationales en charge de l'eau des Etats membres de l'IGAD. Le comité de pilotage du projet a été mis en place et la coordination régionale et sa facilitation ont été assurées par l'IGAD.

Nous tenons alors à remercier tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce projet : les Ministères en charge de l'Eau et des institutions nationales, les partenaires de coopération de l'IGAD et de l'OSS (particulièrement la Facilité Africaine de l'Eau), les équipes nationales, les consultants nationaux et internationaux, l'équipe du projet au sein du Secrétariat exécutif de l'OSS et le Secrétariat exécutif de l'IGAD.

Notre satisfaction a été de réussir l'appropriation de tous les résultats de ce projet par les équipes nationales ainsi que la mise en place au sein du Secrétariat Exécutif de l'IGAD d'outils performant permettant d'assurer la continuité de ce projet.

Ce projet final se compose de 7 documents indépendants, à savoir :

- Introduction, vue d'ensemble et recommandations
- Tome 1: Rapport de la composante du cadre institutionnel (le présent rapport)
- Tome 2: Rapport de la composante socioéconomique
- Tome 3: Rapport de la composante environnement
- Tome 4: Rapport de la composante SIG/ base de données
- Tome 5: Rapport de la composante Modélisation des ressources en eau/ hydrologie
- Tome 6: Rapport de la composante

Ces remerciements s'adressent aussi à SEREFACO Consultants limited et son équipe pour l'excellent travail qu'il a pu mener malgré toutes les difficultés rencontrées notamment par l'absence de données fiables.

Le Secrétaire Exécutif de l'OSS
Dr Ing. Chedli FEZZANI

Le Secrétaire Exécutif de l'IGAD
Eng. Mahboub Mohamed MAALIM



TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	3
RÉSUMÉ EXÉCUTIF	15
INTRODUCTION	17
1. Contexte.....	17
2. Objectifs.....	17
3. Stratégie de modélisation des ressources en eau	18
INTRODUCTION DES BASSINS HYDROLOGIQUES DE L'IGAD.....	21
1. Description générale des bassins hydrologiques de l'IGAD.....	21
2. Ensembles de données disponibles pour les bassins de l'IGAD	22
3. Lacunes à combler dans les données	31
4. Défis hydrologiques dans les bassins de l'IGAD	31
EXAMEN DU MODÈLE HYDROLOGIQUE SWAT ET MÉTHODES D'ESTIMATION DES PARAMÈTRES	33
1. Introduction à la modélisation hydrologique	33
2. La structure du modèle SWAT (Outil d'évaluation des eaux et du sol).....	34
3. Éléments de simulation attendus pour la modélisation des ressources hydriques	37
ÉTALONNAGE ET VALIDATION DU MODÈLE SWAT POUR LA SOUS-RÉGION DE L'IGAD.....	39
1. Introduction	39
2. Résumé des données de modélisation hydrologique disponibles	39
3. Stratégie de modélisation hydrologique.....	39

4. Recommandations pour les équipements de surveillance hydro-météorologique	45
5. Résultats du modèle hydrologique	48
6. Simulation de l'évapotranspiration mensuelle moyenne	50
7. Ressources en eaux souterraines des bassins transfrontaliers de l'IGAD	53
CONCLUSIONS.....	55
RECOMMANDATIONS.....	57
BIBLIOGRAPHIE	59



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Bilan des ressources hydriques par pays pour les pays de l'IGAD.....	21
Tableau 2. Bassins transfrontaliers de l'IGAD.	41
Tableau 3. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de Danakil (mm répartis sur 68 000 km ² , sauf indication contraire).....	51
Tableau 4. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de Gash Baraka (mm répartis sur 66 000 km ² , sauf indication contraire).....	51
Tableau 5. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de Juba Shebelle (mm répartis sur 802 000 km ² , sauf indication contraire).....	52
Tableau 6. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de l'Ogaden (mm répartis sur 210 000 km ² , sauf indication contraire).....	52
Tableau 7. Ressources hydriques mensuelles simulées du bassin du Turkana mensuelles pour (mm répartis sur 290 000 km ² , sauf indication contraire).....	53
Tableau 8. Variation mensuelle des ressources hydriques disponibles dans le bassin d'Ayesha (million m ³).	53
Tableau 9. Ressources en eaux souterraines et les propriétés aquifères des sous bassins de l'IGAD	54



LISTE DES FIGURES

Figure 1: Bassins transfrontaliers des pays de l'IGAD et les grands systèmes de Lacs / Fleuves transfrontaliers	22
Figure 2: La répartition des types de sol pour les bassins de l'IGAD; La légende sols se trouve dans la figure 3.....	24
Figure 3: la clé pour les types de sols de la FAO dans la Figure 2. La description du système des sols est détaillée dans le système Rosetta (disponible sur: http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953).....	25
Figure 4: La répartition spatiale des types d'utilisation de la terre dans les bassins de l'IGAD.	26
Figure 5: Le modèle numérique d'altitude (DEM pour les bassins de l'IGAD).....	27
Figure 6: Un aperçu schématique des différentes étapes de l'étalonnage du modèle en utilisant SUFI-2.....	36
Figure 7: Emplacement des stations de surveillance des précipitations.....	40
Figure 8: Emplacement des stations de surveillance de la température	41
Figure 9: Principal réseau hydrographique des bassins hydrologiques délimités de l'IGAD..	42
Figure 10: Sous-bassins transfrontaliers délimités des pays de l'IGAD et le Système majeur Lacs/ Rivières.....	43
Figure 11: Emplacement proposé des stations météorologiques proposées de l'IGAD.....	47
Figure 12: Simulation des débits mensuels moyens (1971 - 1990)	49
Figure 13: Simulated Average Monthly Evapotranspiration (1971-1990).....	50



LIST OF ACRONYMS

95PPU	95% d'incertitude de prévision
ADCP	Profileur de Courant par Doppler Acoustique
AET	Evapotranspiration réelle
ASAL	Terres arides et semi-arides
AQUASTAT	Système mondial d'information sur l'eau et l'agriculture de la FAO
BCM	Milliard de mètres cubes
CIESIN	Centre du Réseau d'information internationale de la science de la terre
CN2	Numéro de la courbe
CRU	Unité de recherche sur le climat
DB (BD)	Base de données
DEM	Modèle digital d'altitude
DWRM	Direction de la gestion des Ressources en Eau
FAO	Organisation pour l'alimentation et l'agriculture
GIS	Système d'information géographique
GLC	Couverture Globale de la terre
GLCC	Caractérisation Globale de la couverture Terrestre
HRUs	Unités de réponse hydrologique
IGAD	Autorité intergouvernementale pour le développement
IPCC	Groupe d'experts intergouvernementaux pour le changement climatique
IWRM	Gestion intégrée des ressources en eau
LH-OAT	Hyper cube latin un-à-la fois
MoWR	Ministère des Ressources en Eau et de l'hydrologie
NBI	Initiative du Bassin du Nil
NELSAP	Programme d'Action Auxiliaire des Lacs du Nil Equatorial
NMSA	Agence Nationale des Services Météorologiques
PET	Evapotranspiration potentielle
SM	Humidité du sol
SRTM	Mission de Topographie par Radar Navette
SSO	Observatoire du Sahara et du Sahel
SUFI	Montage d'incertitude Séquentielle
SWAT	Outil d'Evaluation des Eaux et des Sols
TECCONILE	Comité de Coopération Technique pour la Promotion du Développement et de la Protection de l'Environnement du Bassin du Nil
ToR	Termes de référence

UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture
USGS	Relevés Géologiques des Etats Unis
WMO	Organisation Mondiale de la Météorologie



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Ce travail a comporté la collecte de données, la mise en place d'un modèle hydrologique, l'identification du paramètre le plus sensible du modèle, l'étalonnage du modèle et l'analyse de sensibilité pour bassins transfrontaliers de l'IGAD. Le résultat principal de la stratégie a été une meilleure compréhension de la réponse hydrologique de plusieurs bassins versants de l'IGAD et l'utilisation potentielle en termes de résolution des controverses autour des débits fluctuants et des niveaux des eaux des lacs, de l'agriculture durable, du développement rural de la production hydroélectrique et de la gestion environnementale.

La section «Modélisation des Ressources Hydriques » a conceptualisé et développé un modèle hydrologique pour l'évaluation des ressources en eau des bassins transfrontaliers identifiés dans la région de l'IGAD. Cela a impliqué collaboration étroite avec l'expert du GIS / Base de données en vue de la préparation efficace, la présentation et l'archivage des ressources en eau et des données hydrologiques dans le format convenu. Une connaissance approfondie du GIS était nécessaire de la part du participant potentiel dans les modules de la modélisation des ressources en eau. En termes de besoins en logiciel, ArcGIS a été également nécessaire pour la mise en place de modèles hydrologiques / simulation de la composante de modélisation des ressources en eau. Plusieurs ensembles de données météorologiques ont été obtenus pour une modélisation efficace; cependant, le manque persistant de débits quotidiens a encore limité l'étalonnage efficace des bassins hydrologiques délimités de l'IGAD. Plusieurs tentatives ont été menées pour assurer une estimation efficace des ressources en eau pour les bassins de l'IGAD.

Un résumé à l'échelle des composantes simulées des ressources en eau a été présenté pour donner un aperçu général sur les composantes des ressources en eau pour les bassins transfrontaliers de l'IGAD. Des données supplémentaires, en particulier, les débits quotidiens à plusieurs endroits du bassin, sont nécessaires pour améliorer la simulation des ressources en eau. Les données hydrologiques et climatologiques disponibles à partir de l'IGAD bases de données de l'IGAD ont mis en évidence des lacunes importantes, touchant notamment les observations quotidiennes – il manque un certain nombre d'observations. Par ailleurs les données disponibles provenant d'autres sources étaient rares et n'étaient pas dépourvues d'erreurs. Le climat dans le bassin de l'IGAD est assez complexe et pour une utilisation précise des modèles hydrologiques, on peut avoir besoin de suites représentatives des précipitations. Pour les bassins hydrologiques de l'IGAD, l'évaluation de la performance hydrologique du modèle SWAT sur une résolution chronologique journalière / mensuelle devrait révéler les régimes hydrologiques et la sensibilité des variables hydrologiques afin de saisir les bases de données sur précipitations et les estimations des paramètres. Une simple étude de sensibilité a permis de réduire l'envergure de l'enjeu d'étalonnage.

Les résultats de la modélisation des ressources en eau / composante hydrologie de cette étude représentent une première tentative de concevoir de manière exhaustive le modèle des ressources en eau des 6 bassins fluviaux transfrontaliers de la sous-région de l'IGAD. Pour la plupart des bassins, l'estimation des ressources annuelles en eau disponibles ont été bien conformes aux résultats d'autres études (par exemple ceux du Projet des Ressources en Eau de la FAO). Ce fut le cas pour Danakil, Gash-Baraka, Turkana-Omo et Ayesha. Les estimations pour Juba-Shebelle et de l'Ogaden ont montré de grands écarts par rapport aux estimations de la FAO. Toutefois, les estimations se basaient sur des données mises à la disposition du consultant au moment de l'étude. Comme cela a été noté dans le rapport et ailleurs, les ensembles de données étaient limités à la fois dans le temps et dans l'espace. En particulier, l'étalonnage du modèle requiert la disponibilité des données fiables sur le débit pour les grands fleuves à l'intérieur des bassins. Ces données n'étaient pas disponibles pour la présente étude. En tant que telles les estimations pour tous les bassins ont besoin d'investigations supplémentaires avant de pouvoir être utilisées comme base pour des décisions complètes au sujet des bassins. Il est nécessaire pour la collecte de données supplémentaires auprès des pays membres est impérative dès que le mécanisme de partage des données pourra être mis en œuvre. Il se peut que l'absence d'un protocole de partage des données au niveau de l'IGAD soit une des raisons pour lesquelles certains pays ne pouvaient pas offrir leurs données au consultant.

Bassin	Eaus de surface	Eaux souterraines
Danakil	1.0	0.6
Gash-Barka	2.8	1.4
Juba-Shebelle	64.6	43.7
Ogaden	14.1	6.5
Turkana-Omo	28.7	19.3
Ayesha	0.1	-
Total	111.3	71.5

Estimations simulées des ressources en eau disponibles (km³) pour les bassins transfrontaliers de l'IGAD.

Il est également nécessaire d'installer de nouvelles stations de collecte de données dans les bassins transfrontaliers. A l'heure actuelle, les bassins de l'IGAD ont une capacité limitée en termes de réseau de jauge pour la surveillance et les opérations hydrométéorologiques et chaque pays devrait avoir une capacité supplémentaire pour un fonctionnement efficace des réseaux hydrométéorologiques conçus. Une fois que les réseaux sont configurés, il convient de s'assurer que toutes les stations ont une installation complète des équipements pour garantir un contrôle efficace des événements hydrologiques. De nouveaux équipements pour mesurer à la fois les variables climatiques et les variables hydrologiques sont nécessaires pour compléter les données limitées disponibles dans les pays. Les mécanismes de coordination proposés pour la collecte des données, la transmission et le stockage sont consignés dans le rapport « Composante Institution ». L'IGAD devrait établir une composante de renforcement des capacités surtout dans les domaines liés à la modélisation des ressources en eau et cela devrait être fait de telle sorte que les pays membres créent des opportunités de coopération dans le secteur de l'évaluation des ressources hydriques à des niveaux sous-régionaux. Pour garantir une collecte efficace des données pour tous les pays membres de l'IGAD, plusieurs programmes qui appuient la collecte des données et la surveillance efficaces doivent être mis en œuvre et celles-ci devraient aussi assurer un mécanisme pour la réalisation des données et le partage entre les pays membres de l'IGAD.

1

INTRODUCTION

1. CONTEXTE

Le but de la composante des ressources en eau était d'évaluer et d'analyser les ressources en eau des bassins de l'IGAD. Pour cette sous-composante, plusieurs modèles des ressources hydriques transfrontalières ont été développés pour les pays membres de l'IGAD en utilisant la distribution spatiale des ressources naturelles disponibles, y compris l'utilisation des terres, les sols et les composantes des ressources en eau. La majorité des habitants dépendent de ressources naturelles en eau pour la production agricole, industrielle et économique, il en découle que la variabilité des régimes de précipitations influence les ressources en eau dans le système aquifère de l'IGAD, qui à leur tour peuvent affecter la production économique. Le développement de modèles adaptés des ressources en eau a été un outil approprié pour la gestion des ressources en eau, cependant les informations / rapports mis à la disposition des pays de l'IGAD, à savoir l'Éthiopie, le Kenya, le Soudan, l'Ouganda et Djibouti ont fourni des données limitées pour la modélisation des ressources en eau. D'autres rapports fournis comprenaient l'état des rapports sur l'environnement, des rapports sur les ressources en eau et des rapports sur la situation socioéconomique - ce qui n'a pas apporté la plupart des informations requises pour la modélisation des ressources en eau. Toutefois, les données supplémentaires nécessaires pour les régions étudiées ont été obtenues au moyen de consultations supplémentaires et de l'accès aux bases de données internationales. Le succès de la composante de modélisation des ressources en eau était fortement tributaire de la disponibilité des ensembles de données nécessaires pour le climat et l'hydrologie de la région de l'IGAD.

2. OBJECTIFS

L'objectif principal du projet MAM-TWR était d'évaluer et d'analyser les ressources en eau, et les conditions socio-économiques et environnementales de la sous région et de déboucher sur un ensemble de stratégies, de recommandations et de plans d'action pour permettre aux Etats membres de mettre en œuvre et de réaliser un processus intégré de gestion des ressources hydriques transfrontalières. Pour atteindre ces objectifs, une composante de modélisation des ressources en eau a été introduite pour évaluer et analyser des ensembles de données hydrologiques disponibles pour estimer la variabilité spatiale et temporelle du potentiel en eau dans les régions étudiées de l'IGAD. Cela a impliqué le choix d'un outil de simulation des ressources hydrologiques / eau pour la modélisation / simulation de

l'hydrologie, dans le but de renforcer le capacité supplémentaire des pays membres de l'IGAD pour analyser de manière continue et efficace les ressources en eau dans la région de l'IGAD, pour les conditions climatiques variées actuelles et à venir.

Pour permettre la conceptualisation et le développement de plusieurs composantes de modélisation hydrologique en vue d'évaluer les ressources en eau pour les bassins transfrontaliers dans la région de l'IGAD, on a envisagé un certain nombre d'objectifs spécifiques, y compris :

- Identification des sources de données et d'informations relatives à l'eau à des niveaux régionaux, notamment pour les régions de l'IGAD: Ceci a impliqué l'évaluation de données et d'informations
- Identification des lacunes des données et des informations et des méthodes de préciser les moyens de combler ces lacunes; par exemple en l'appliquant des données d'observation de la terre ou en employant des procédures stochastiques de comblement;
- Identification des principaux bassins fluviaux transfrontaliers et les systèmes aquifères sur la base des informations disponibles et des documents d'étude, aux niveaux national et régional
- Identification des ressources en eau et des modèles hydrologiques, y compris l'inventaire des ressources en eau, la modélisation du débit des précipitations et la modélisation des composantes clés du cycle hydrologique. Cela a finalement conduit au développement de la pratique de la formation sur des outils de modélisation climatique et hydrologique sélectionnés. Les outils de modélisation comprennent des modèles de bilan hydrique mis en place dans un environnement GIS et l'évaluation d'un scénario d'utilisation de l'eau
- Préparation d'un système d'archivage des ressources en eau et des données hydrologiques dans un format d'archive convenu - mis en œuvre en étroite collaboration avec le SIG/Base de données.
- Proposer un système clé de surveillance météorologique et hydrologique pour la sous-région de l'IGAD et identifier aussi les équipements hydrométéorologiques nécessaires.

3. STRATÉGIE DE MODÉLISATION DES RESSOURCES EN EAU

L'objectif de la composante de modélisation des ressources en eau était de conceptualiser et de développer un modèle hydrologique d'évaluation des ressources en eau pour les bassins transfrontaliers choisis dans la région de l'IGAD. Travaillant en étroite collaboration avec la composante SIG/Base de données, la composante des ressources en eau visait à atteindre plusieurs objectifs, notamment la préparation, la présentation et l'archivage des ressources en eau et des données hydrologiques dans le format convenu.

Un modèle de simulation physique (par rapport aux modèles conceptuels) a été souhaité pour la simulation du bilan hydrique dans la région de l'IGAD. Cela a nécessité des séries chronologiques à long terme d'entrées hydrologiques et climatiques pour l'étalonnage et la validation. Un certain nombre d'opérations systématiques existantes d'étalonnage automatique de validation ont été appliquées pour cette mission, toutefois, l'application et la validation réussies de telles structures de modèles ressources hydriques nécessite des

ensembles considérables de données journalières.

Une description brève des méthodologies d'anticipation employées pour la composante des ressources hydriques est donnée ci-dessous :

- 1.** Passage en revue des données et des informations disponibles sur les ressources en eau transmises par des consultants nationaux en vue de l'évaluation et de l'analyse au niveau sous-régional. Il s'agissait des activités suivantes :
 - Identification des sources de données et d'informations relatives à l'eau aux niveaux régionaux; identification des lacunes de données et d'informations et les moyens de les combler, tels que l'utilisation d'outils statistiques pour combler les lacunes et les données de télédétection ;
 - Identification des grands bassins fluviaux transfrontaliers et des systèmes aquifères sur la base des informations disponibles et des documents d'étude, aux niveaux national et régional. Des études du plan directeur des pays membres de l'IGAD peuvent être des sources utiles de données et d'informations; cela peut être réalisé en utilisant des outils du SIG, comme ARCHYDRO, SWAT, etc. et du bassin transfrontalier sélectionné et vérifié par les cartes et rapports existants ;
 - Préparation d'une note sur le statut et le format des données et informations nationales sur la base des résultats des études nationales afin d'identifier les lacunes dans les points de collecte des données au niveau sous-régional. Cela a impliqué l'examen et l'évaluation des rapports nationaux, la consultation avec des consultants locaux (IGAD) et les organismes de collecte de données;
 - Validation des résultats et acquisition de données et d'informations supplémentaires – cela a été fait à travers des ateliers/dialogues;
- 2.** Identifications des principaux points de collecte de données pour la surveillance sous régionale Il s'agissait de l'analyse des données existantes climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques existantes et des données et informations – ce qui impliquait la description de l'état de la base de données nationale consacrée à la gestion des ressources en eau des pays membres ;
- 3.** Simulation et évaluation des ressources hydriques transfrontalières de certains grands bassins fluviaux et systèmes aquifères dans la sous-région de l'IGAD : Il s'agissait de l'identification (a) d'un modèle approprié de simulation; l'eau du sol et l'outil d'évaluation (SWAT), (b) de pré traitement d'ensembles de données saisies; (c) l'organisation du modèle; (d) d'essais sur l'étalonnage et de validation du modèle ;
- 4.** L'analyse des ensembles de données climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques et des informations relatives à la gestion des ressources hydriques des pays membres et l'organisation d'une manière cohérente et homogène pour le bassin de l'IGAD (en collaboration avec l'expert en base de données) ;
- 5.** Génération d'entrées pour le développement d'une base de données conceptuelle commune :
 - génération d'une plate-forme globale de modélisation pour les ressources en eau (eaux de surface et eaux souterraines) ;

-
- élaboration de cartes/graphiques des ressources en eau ;
 - réalisation d'un cadre pour harmoniser les stratégies du secteur de l'eau entre les pays membres. Cela implique la représentation dans l'espace des ressources en eau disponibles en utilisant les structures du GIS et des bases de données à des niveaux sous-régionaux ;
 - élaboration de stratégies sous-régionales de renforcement des capacités sous-régionales et nationales sur le moyen au long terme, ce qui impliquera également la formation dans le domaine de la gestion intégrée des ressources hydriques ;
 - élaboration d'une feuille de route pour l'établissement d'organisations transfrontalières de gestion des ressources hydriques - ce qui implique également la formation dans le domaine de la modélisation des ressources en eau.

2

INTRODUCTION DES BASSINS HYDROLOGIQUES DE L'IGAD

1. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES BASSINS HYDROLOGIQUES DE L'IGAD

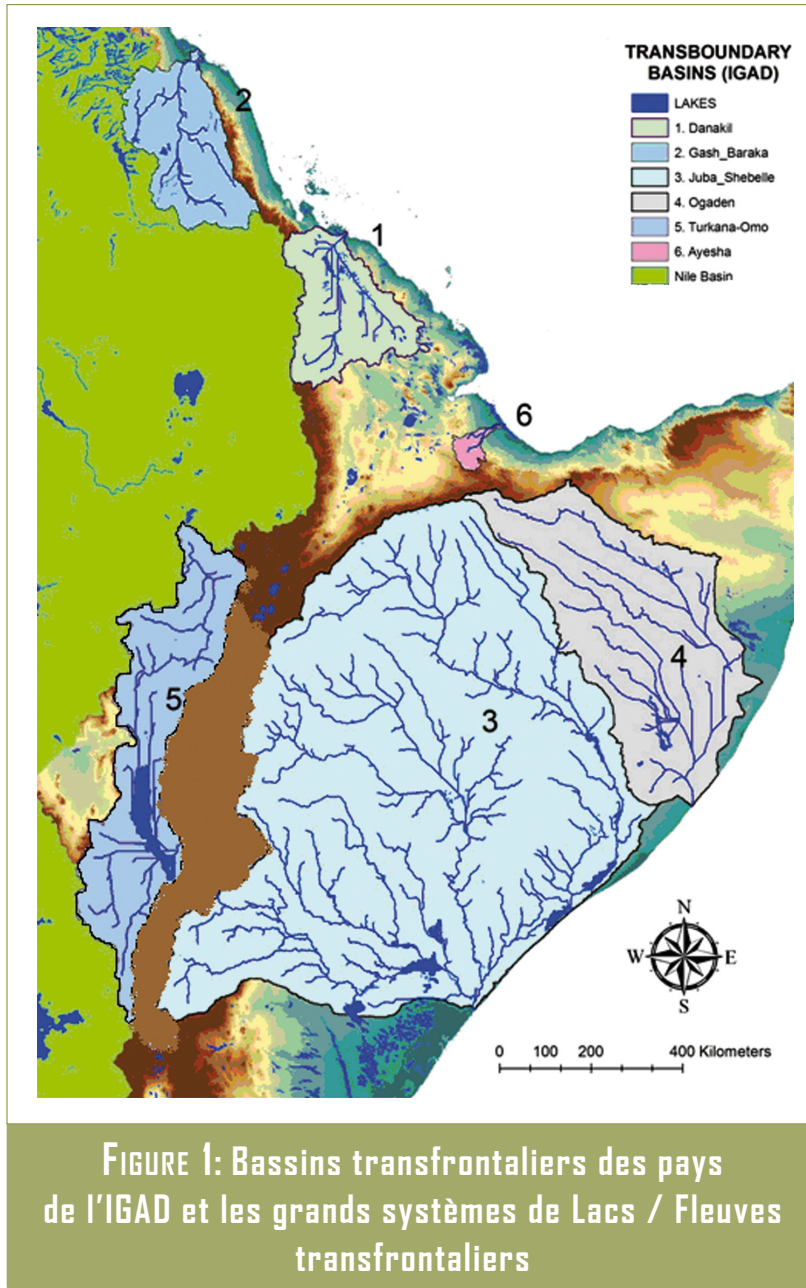
Les bassins hydrologiques de l'IGAD se trouvent à l'Est du bassin du Nil (Figure 1). Les bassins transfrontaliers majeurs définis pour ce projet ont des tailles variables. Un résumé par pays des composantes de base du bilan hydrique est présenté dans le Tableau 1. Les différents sous-bassins varient en termes d'hydrologie de base et englobent également les régions marginales telles que les régions arides et semi-arides, les zones humides, et d'autres espaces naturels cultivés. Les grands bassins transfrontaliers qui ont été pris en considération pour la modélisation des ressources en eau sont présentés dans la Figure 1 et Figure 2. Un résumé général des eaux de surface renouvelables par pays et l'alimentation en eaux souterraines, y compris les flux de surface à caractère transfrontalier se trouvent dans le Tableau 1.

Pays	Superficie (km ²)	Précipitations moyennes (1961-1990) (km ³ /yr)	Ressources hydriques internes (Total) (km ³ /yr)	Ressources hydriques externes (km ³ /yr)	Ressources hydriques totales (km ³ /yr)	Ratio de dépendance (%)	REIR (par hab.) m ³ /yr inhab.	RET (actuel) (par hab.) m ³ /yr inhab.
Djibouti	23,200	5.1	0.3	0.0	0.3	0.0	475	475
Erythrée	117,600	45.1	2.8	3.5	6.3	55.6	765	1,722
Ethiopie	1,104,300	936.0	110.0	0.0	110.0	0.0	1,749	1,749
Kenya	580,370	401.9	20.2	10.0	30.2	33.1	659	985
Somalie	637,660	180.1	6.0	7.5	13.5	55.6	684	1,538
Soudan	2,505,810	1043.7	30.0	119	64.5	76.9	965	2074
Ouganda	241,040	284.5	39.0	27.0	66.0	40.9	1,674	2,833

TABLEAU 1. Bilan des ressources hydriques par pays pour les pays de l'IGAD.

*Extrait de la FAO (2003):
Examen des ressources
hydriques mondiales par pays.*

Les quantités représentent les ressources moyennes en eau douce dans les pays de l'IGAD et la ressource totale en eau est aussi appelée ressources en eau naturelles renouvelables totales. Généralement, plus les ressources hydriques externes sont élevées, plus fragile sera le pays en termes de gestion des ressources hydriques transfrontalières.



2. ENSEMBLES DE DONNEES DISPONIBLES POUR LES BASSINS DE L'IGAD

2.1. Analyse de la situation

Pour une modélisation efficace des ressources hydriques des sous-bassins de l'IGAD, un ensemble de données étaient nécessaires, y compris les données sur le captage de l'eau, des données géophysiques, et des données météorologiques. Les données météorologiques et hydrologiques ont été requises à l'échelle journalière, tandis que les autres données géophysiques ont été requises pour les périodes récentes (environ 5 - 10 ans). Cependant, les rapports disponibles reçus du secrétariat

de l'IGAD n'ont fourni qu'un aperçu général des ressources en eau dans les pays de l'IGAD. Les informations quantitatives données étaient disponibles surtout à grande échelle (dans le temps/espace). Les ensembles de données hydrologiques étaient disponibles principalement sous forme de résumés mensuels et annuels. Pour la modélisation hydrologique, on peut atteindre moins que cela en utilisant des résumés mensuels et annuels. Par conséquent, l'accès aux ensembles de données quotidiennes était nécessaire pour une bonne modélisation des ressources en eau.

Pour la mission concernant les ressources hydriques, les données nécessaires à la modélisation efficace varient et la plupart des données cruciales doivent être disponibles pour une modélisation efficace des ressources en eau.

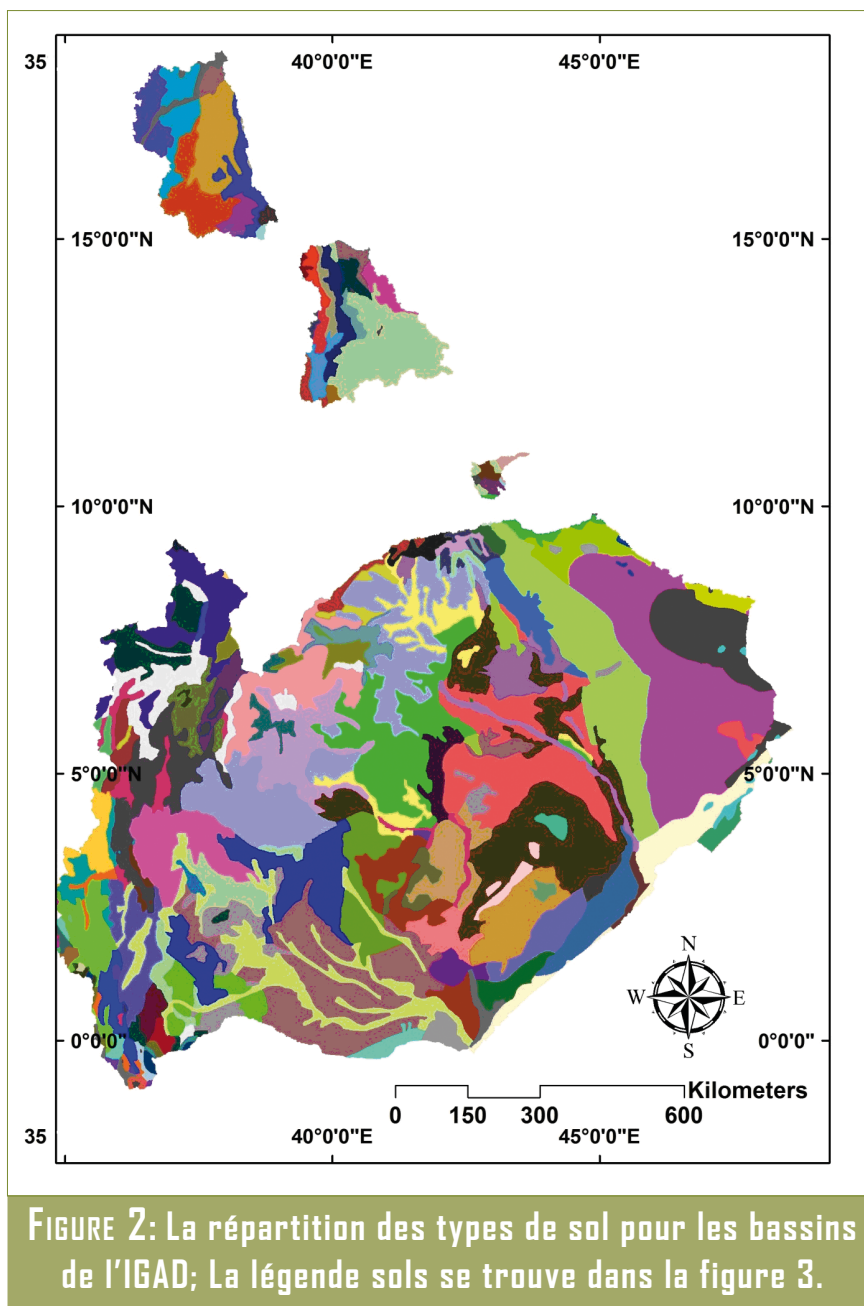
La liste suivante détaille les ensembles de données qui ont été nécessaires pour la modélisation des ressources en eau :

■ Ensembles de données climatiques: Pour la plupart des pays, les ensembles de données climatiques étaient très probablement stockés dans des centres nationaux de données sur la surveillance météorologique ou hydrologique. Ces ensembles de données ont été nécessaires au quotidien sur des échelles quotidiennes pour la modélisation des ressources en eau. On a utilisé l'ensemble de données sur le climat fournis par l'Unité de Recherche Climatique (CRU). Les données sont disponibles sur (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/availability/>).

■ Ensembles de données hydrologiques: Ce type de données sont disponibles auprès de plusieurs sources, dont les centres de données de surveillance hydrologique, les utilisateurs d'eau à grande échelle tels que les centres municipaux de captage d'eau, les centres de prélèvement industriel, les systèmes d'approvisionnement en eau, et les sociétés hydroélectriques. Le réseau hydrographique numérique a été requis et pouvait être obtenu à partir de HYDRO1k de l'USGS ou provenir de la couche d'accumulation de débit pour les zones d'une superficie de drainage en amont supérieures à 1000 km².

■ Ensembles de données spatiales :

- Ensembles de données sur l'utilisation des terres (spatiales): Cet ensemble de données était disponible à partir de plusieurs bases de données nationales sur l'espace. Certaines de ces sources comprennent les archives de la FAO (http://www.africover.org/system/africover_data.php) et la caractérisation de la couverture terrestre mondiale (GLCC) de la base de données de l'USGS (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/glcc/glcc.html>). Les distributions de spatiales de la couverture terrestre dans l'espace (Figure 2 - Figure 3) révèlent que les bassins sont principalement recouverts par des prairies.
- Les données sur la couverture terrestre / l'utilisation de la terre et le sol: Ces informations peuvent être obtenues à partir des archives de la FAO, principalement disponibles surtout en tant que bases de données nationales à but multiple Africover sur les ressources environnementales (MADE). Cela peut être disponible à partir de plusieurs sources, y compris http://www.africover.org/system/africover_data.php. La Figure 4 montre la répartition dans l'espace.
- Ensembles de données sur sols (données spatiales): Cet ensemble de données peut être obtenu à partir des archives de la FAO, principalement disponible en tant que



données spatiales nationales. L'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture des Nations Unies (FAO, 1995) fournit près de 5.000 types de sols à une résolution spatiale de 10 km avec les propriétés du sol pour deux couches (0 - 30 cm et 30 - 100 cm de profondeur). D'autres propriétés du sol (par exemple la granulométrie, la densité, teneur en carbone organique, la capacité disponible en eau, et conductivité hydraulique saturée) peuvent s'obtenir à partir de Reynolds et al. (1999) ou en utilisant des fonctions de pédotransfert mises en place dans le modèle Rosetta (<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953>). La répartition dans l'espace des types de sol se trouve dans la Figure 4 et les bassins de l'IGAD reposent principalement sur les systèmes de sol Be9-3c # 24, Yk15-2a # 361, #215 et Rc23-1/2a .

Soil Type	Fo48-2ab-42	Ne13-3b-158	Rc20-3a-208	So10-2a-252	Xh20-2a-314	Zo13-2-3a-388	Ne29-2bc-823
Classes	Fp9-3a-48	Ne15-3c-159	Rc20-ab-210	So12-3ab-253	Xk12-2a-320	Zo9-3a-392	Nh2-2c - 848
Af14-3c-1	Gh7-2a - 57	Ne20-3b-160	Rc21-2c-211	To6-2bc-257	Xk16-2a-322	Qc20-1a-399	Qc37-1a-881
Ao39-2b-4	I-E-bc-69	Ne28-2a-163	Rc22-2b-213	Vc23-3a-262	Xk19-2a-323	Bc14-2bc - 44	So1-2-3a-936
Ao41-2bc-5	I-R-74	Qc10-1c-167	Rc23-1-2a-215	Vc26-3a-264	Xk20-2a-328	Bh14-3c - 466	So11-2-3a-937
Ao63-3b-6	I-R-bc - 76	Qc19-1c-174	Rc24-1ab-218	Vc27-3a-265	Xy3-2ab-334	Bk31-2a-473	So11-2-3a-938
Bd30-2-3c-9	I-Rc-77	Qc22-1b-179	Rc24-2c-220	Vc29-3a-268	Y3-2a-337	Fo34-3a-493	Tm10-2bc - 9
Bd31-2c-11	I-Re-3a-83	Qc22-1b-180	Rc25-3c-221	Vc37-3a-278	Yh16-2-3c-348	Fo42-2b-496	Tm11-1-2a-942
Be49-3c-20	I-V-88	Qc5-1c-182	Re16-b-235	Vc8-3a-280	Yh17-2c-352	Fo43-2b - 496	Tm9-2c - 948
Be50-2-3c-21	I-Zo-96	Qc8-1a-183	Re24-2c-237	Vc8-3a-281	Yh18-2c-354	Fo49-2a-503	We4-2a - 977
Be8-3c-24	I-c-99	Qc9-1b-184	Re48-2a-240	Vp1-3a-283	Yh19-2a-356	Fp10-2a-560	X7-2ab-987
Be9-3c-26	Jc21-3a-101	Rc18-2b-199	Re59-2b-244	Vp14-3a-286	Yh20-2b-357	Fr7-2a-580	WATER - 197
Bh12-3c-31	Jc21-3a-102	Rc18-3b-201	Re59-2c-246	Xh15-2a-305	Yh21-2ab-358	I-R-660	
Bh13-2-3c-32	Jc5-2a-117	Rc19-2ab-202	Re59-a-247	Xh15-3a-306	Yk19-1-2a-367	I-U-c-665	
Bh4-2c-34	Jc6-2a-118	Rc19-bc-204	Re63-2c-248	Xh15-a-308	Yk2-3a-369	Jc33-2a-675	
Bk24-2bc-35	Ne10-3b-154	Rc2-2b-205	Re64-2a-249	Xh17-2a-310	Yy8-2ab-378	Lc57-2a-717	
D-SS-36	Ne12-2c-155	Rc2-3c-207	SALT-251	Xh19-2a-311	Zo12-2a-387	Lf17-2ab-737	

FIGURE 3: la clé pour les types de sols de la FAO dans la Figure 2. La description du système des sols est détaillée dans le système Rosetta (disponible sur: <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953>).

- Modèle numérique d'altitude (DEM). On peut l'obtenir auprès de plusieurs domaines publics, y compris <http://www2.jpl.nasa.gov>. L'autre source pour un DEM est la base de données géographiques du domaine public HYDRO1k relevant de l'Etude Géologique de (USGS) (<http://edc.usgs.gov/products/elevation/gtopo30/hydro/index.html>), qui est dérivé d'un modèle numérique d'élévation du monde de 30 arc / seconde GTOPO30. L'échelle préférée du DEM devrait être supérieure à « 90m ». La figure 5 présente la répartition dans l'espace.
- Répartition spatiale des principaux points de captage d'eau: Les séries chronologiques des quelques utilisateurs de l'eau (prélèvements) ont été nécessaires. Cela comprenait, les prélèvements d'eau pour la production hydroélectrique, l'approvisionnement en eau, l'irrigation, etc.
- La distribution spatiale des lacs / zones humides et les niveaux d'eau associés.
- Séries chronologiques climatologiques des précipitations, température, débits hydrologiques et d'autres variables climatiques et hydrologiques. Ces données sont très probablement consignées dans les archives des instituts météorologiques et hydrologiques nationaux.
- Les séries chronologiques de l'exploitation des réservoirs.

La disponibilité de la plupart de ces ensembles de données a été considérée comme essentielle pour la mise en œuvre réussie de l'exercice de modélisation des ressources hydriques. Bien que le consultant ait fourni la littérature essentiellement sous forme de rapports nationaux, la plupart des documents disponibles (y compris les rapports nationaux) ont fourni des informations qualitatives renfermant très peu de données quantitatives nécessaires à la modélisation appropriée des ressources en eau. Des efforts supplémentaires sont encore en cours pour obtenir des données détaillées disponibles pour l'installation et la modélisation efficaces des bassins de l'IGAD.

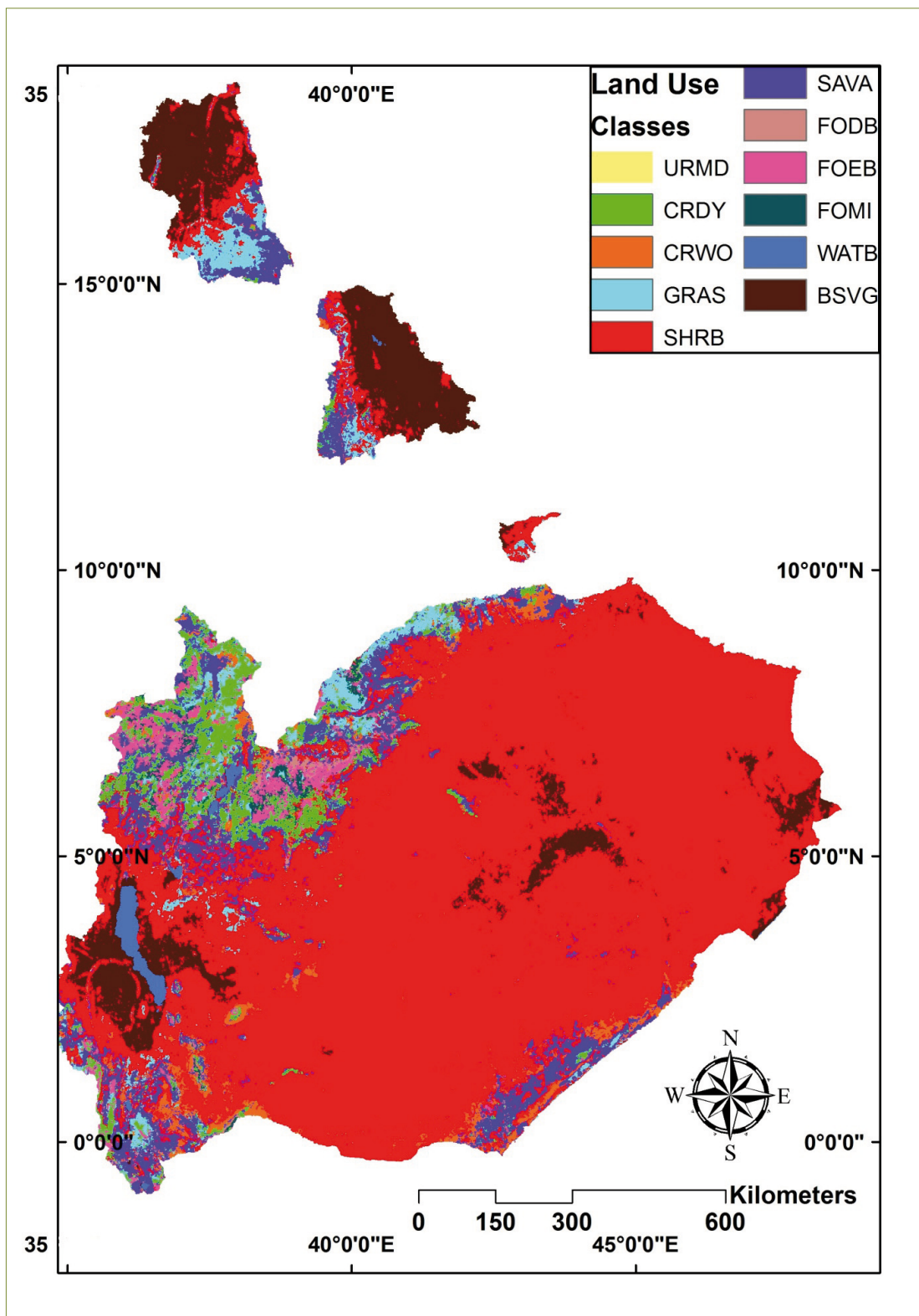


FIGURE 4: La répartition spatiale des types d'utilisation de la terre dans les bassins de l'IGAD.

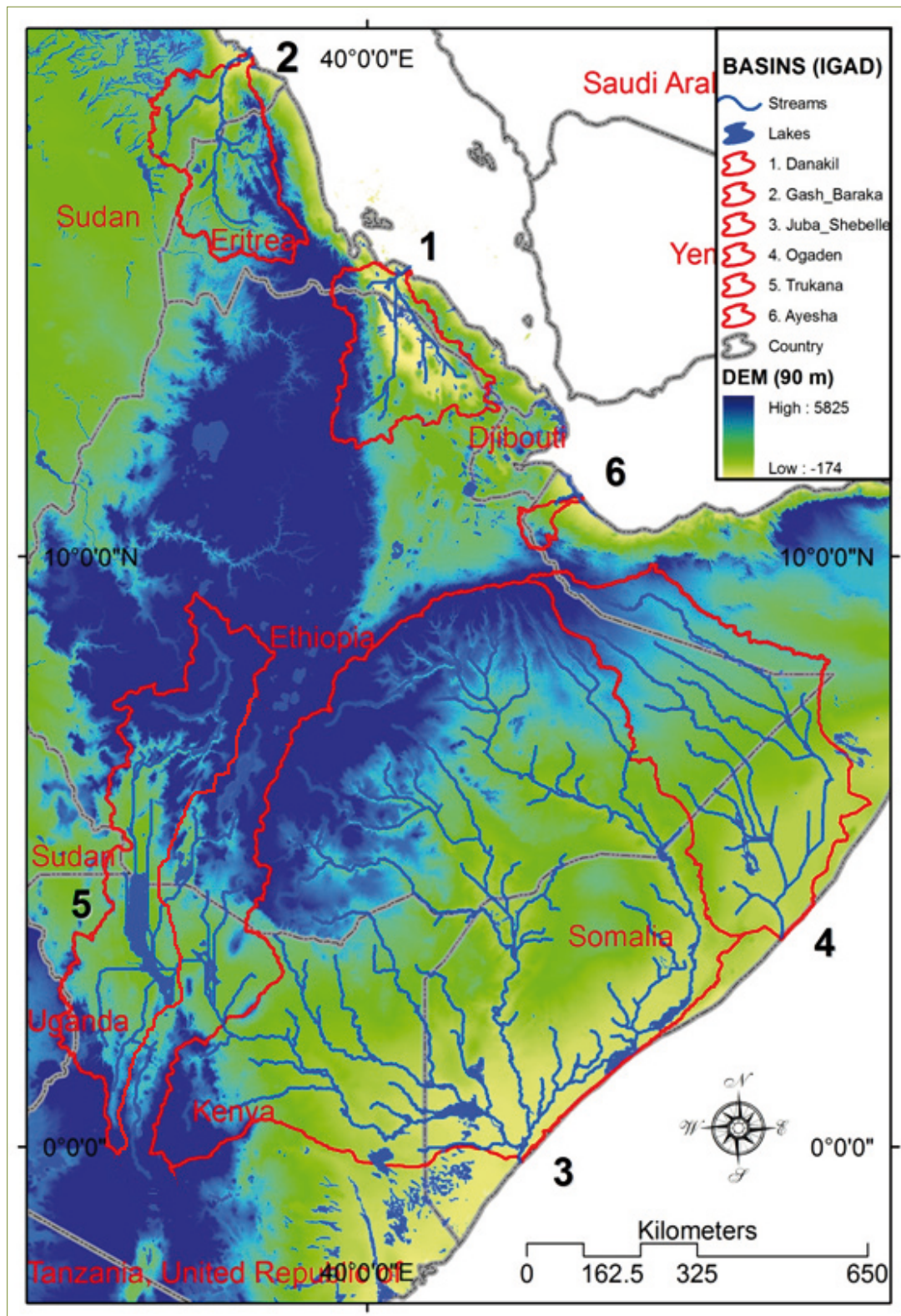


FIGURE 5: Le modèle numérique d'altitude (DEM pour les bassins de l'IGAD).

Une évaluation par pays des données requises pour la modélisation planifiée des ressources en eau en termes de besoins importants de données pour la modélisation des ressources en eau - ce qui comprend: le Modèle digital d'altitude (DEM); les données sur la couverture terrestre / l'utilisation des terres et le sol; les données sur les sols, la répartition spatiale des grands points de captage de l'eau, la répartition spatiale des Lacs / zones humides et associées; séries chronologiques des précipitations, de la température, des débits hydrologiques, l'exploitation des réservoirs et d'autres variables climatiques et hydrologiques sont résumées dans les sections qui suivent.

Les informations nationales offertes, en termes d'aptitude / adéquation de la modélisation des ressources hydriques a été effectuée afin de vérifier l'aptitude de l'ensemble des données présentées en s'adressant à l'objectif de la mission de modélisation des ressources en eau. Les résultats sont discutés brièvement par pays dans la section suivante.

2.2. République de Djibouti

Le rapport sur les ressources hydriques disponibles a décrit certains attributs mensuels des courants hydrologiques, donnant surtout des résumés des principales caractéristiques du bassin versant. On a peu mentionné les agences de collecte de données, les études antérieures qui ont facilité collecte de données sur le climat/ hydrologie et toute autre source susceptible de fournir des données. Ceci est particulièrement observé pour Djibouti par rapport à d'autres pays. Pour accomplir avec succès les tâches de modélisation des ressources hydriques, il est nécessaire d'avoir d'autres séries d'ensembles de données chronologiques (quotidiennes) sur le climat et l'hydrologie.

2.3. République d'Éthiopie

Le rapport sur les ressources hydriques disponibles a décrit les résumés mensuels des principales caractéristiques du bassin versant en ne mentionnant que peu la disponibilité et l'emplacement possible des données observées (comme la pluie, et les débits des fleuves). Les données sur les précipitations ont été principalement disponibles en tant que moyennes mensuelles à l'échelle du bassin, ce qui est insuffisant pour une modélisation hydrologique.

On avait besoin d'ensembles de données supplémentaires et des ensembles de données climatologiques ont été prévus à partir de plusieurs sources, y compris: (a) les ensembles de données de NMSA (Agence Nationale des Services Météorologiques), bien qu'il ait été mentionné qu'ils contenaient des valeurs mensuelles tirées de séries complètes ou partielles de données quotidiennes et (b) la FAO par le biais de la base de données de CLIMWAT, qui contenaient également des valeurs mensuelles moyennes, avec indication du nombre d'années utilisées, mais pas la période (début et fin d'année).

Pour une modélisation efficace des ressources hydriques, d'autres séries chronologiques (quotidiennes) d'ensembles de données climatologiques et hydrologiques étaient nécessaires.

2.4. République de Kenya

Le rapport comportait une description de plusieurs caractéristiques du bassin versant en mentionnant peu la disponibilité et l'emplacement possible des données observées (comme la pluie, et les débits des fleuves). On dispose de peu d'éléments à propos des ensembles de données climatologiques et hydrologiques réelles censées être compilées dans une base de données harmonisées pour la modélisation des ressources hydriques.

Le rapport sur ressources en eau disponibles décrit plusieurs types de ressources en eaux de surface au Kenya, à savoir, la pluviométrie, les débits, les lacs et zones humides, la glace et les glaciers et les océans. En outre, il a été mentionné que les données requises pour la modélisation hydrologique pour le Kenya sont rassemblées par plusieurs organismes, dont le Ministère de l'Environnement et des Ressources naturelles et le Service de la Prospection des Ressources et de Télédétection (DRSRS). Toutefois, les données requises pour la modélisation hydrologique manquaient.

Comme à d'autres endroits de la région, les stations météorologiques ont également subi une baisse importante depuis le début des années 90, mais avec l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), des améliorations sont en cours. Pour réussir à accomplir les tâches de modélisation des ressources hydriques avec succès, d'autres séries chronologiques d'ensembles de données (quotidiennes) seront nécessaires.

2.5. République de Sudan

Les ressources hydrologiques au Soudan se composent principalement de cours d'eau saisonniers, surtout sur le système du Nil. Le rapport sur les ressources hydriques disponibles était essentiellement basé sur les parts qui reviennent au Soudan sur le système du Nil. Il était prévu que davantage de données pourraient être obtenues à partir des Services Météorologiques et hydrologiques du Soudan et de tout autre service responsable de l'archivage des données historiques sur la météorologie et l'hydrologie.

Comparé à des rapports d'autres pays, le rapport du Soudan a peu cité les sources possibles de données climatiques et hydrologiques. Afin de mener les tâches de modélisation des ressources hydriques, des ensembles de données complémentaires ainsi que d'autres sources probables de données climatiques et hydrologiques étaient nécessaires pour la modélisation des ressources hydriques. Les archives nationales du Projet HYDROMET, de TECCONILE, et des projets de NBI pourraient constituer des sources potentielles de données.

2.6. République d'Ouganda

Les rapports ont brièvement couvert (qualitativement) l'état des ressources hydriques existantes. On dispose de peu d'information sur les données réelles (séries chronologiques) qu'on s'attendait compiler dans une base de données harmonisée pour la modélisation des ressources en eau. On espérait recueillir des données supplémentaires afin de modéliser les ressources en eaux de surface des bassins versants importants. Il a été mentionné que seuls 75 des 566 (13 %) stations pluviométriques sont fonctionnelles. Pour réussir à

accomplir les tâches de modélisation des ressources hydriques, d'autres séries d'ensembles de données (quotidiennes) ont été nécessaires. Il est prévu que les données peuvent être obtenues auprès du Département Météorologique de l'Ouganda et de la Direction de Gestion des Ressources (DWRM); ces deux services sont supposés être les principaux agents responsables de l'archivage des données historiques et de leur mise à la disposition du public.

2.7. Autres sources de données

Pour la mise en œuvre réussie des objectifs, plusieurs sources de données pertinentes pour la modélisation des ressources en eau de l'IGAD ont été nécessaires. Il s'agissait notamment des rapports nationaux et d'autres sources qui sont publiques et qui couvrent les transfrontalières de l'IGAD. Certains des ensembles de données qui ont été nécessaires pour la modélisation des ressources en eau (Formation / simulation) sont répertoriés comme suit :

■ **Ensembles de données météorologiques** : les ensembles de données météorologiques et hydrologiques pour plusieurs stations principales du bassin de l'IGAD étaient nécessaires, principalement sur des échelles quotidiennes. Il s'agit notamment de séries chronologiques quotidiennes pour les précipitations, la température, l'humidité, le rayonnement solaire, le vent, le rayonnement net, et autres ;

■ **Données sur le débit** : des enregistrements des débits quotidiens complets dans plusieurs stations d'écoulement ont été nécessaires pour des simulations réussies du modèle. La plupart des bases de données des stations étaient nettement incomplètes avec des écarts allant de quelques mois à plusieurs années au cours de la période historique, ce qui représentait des défis. La disponibilité des données sur le débit était essentielle dans cette mission vu que l'étalonnage efficace dépend de séries de flux à long terme. En général, il y a une tendance à obtenir des mesures limitées à hautes altitudes.

■ **Données sur l'altitude** : un Modèle Numérique d'Altitude (DEM) de résolution minimale de « 90m » était nécessaire. Ceci a été obtenu à partir des archives de la Mission de Topographie par Radar Navette (SRTM) (www.srtm.csi.cgiar.org/). La plupart des bassins retenus dans les régions de l'IGAD étaient relativement montagneux.

■ **Sols, géologie, et couverture de l'utilisation des terres** : les cartes de couverture des sols ont été obtenus à partir de la carte numérique des sols du monde, élaborée par l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) (FAO, 1974, 1997). Les données sur la formation ont été acquises auprès de la FAO. La couverture terrestre et la couverture de l'utilisation des terres ont été obtenues à partir des études de la biomasse de la FAO. Les cartes des sols pouvaient être obtenues pour 5000 types de sol comprenant deux couches (0 - 300 mm et de 300 à 1000 mm de profondeur) avec une résolution spatiale de 10 km.

Un certain nombre d'autres sources de données sur le Web étaient disponibles pour cette mission. Quelques-uns d'entre eux sont brièvement énumérés ici :

1. Ensembles de données spatiales de l'IGAD :

http://www.igad-data.org/index.php?option=com_docman&task=cat_view&gid=3

-
2. SIG, télédétection, des ensembles de données sur l'espace et l'hydrologie
<http://free-gis-data.blogspot.com/2009/04/aster-global-digital-elevation-model.html>
 3. Données Numériques d'Altitude
<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/register.jsp>
 4. Site Web de l'Organisation pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) site (Africover)
<http://www.africover.org/>
 5. OMS / UNICEF Programme Commun de Surveillance pour l'approvisionnement en eau et l'hygiène sur le site : <http://www.wssinfo.org/resources/documents.html>.
 6. Sites spécifiques aux pays fournissant des informations sur les ressources hydriques
Djibouti : http://www.afdevinfo.com/htmlreports/org/org_45502.html
Ethiopie : <http://www.mowr.gov.et/index.php?pageum=11&pagehgt=1430px>
Kenya : http://www.water.go.ke/index.php?option=com_docman&Itemid=62
Soudan : <http://www.moiwr.gov.sd/irrigation/english.php>
Ouganda : <http://www.mwe.go.ug/DWRM/55/Publications-Reports>

Pour les pays de l'IGAD, d'autres organisations auprès desquelles de on peut obtenir des informations relatives aux ressources hydriques et à la modélisation hydrologique comprennent principalement: les ministères chargés de la quantification et de la surveillance des ressources hydriques, de l'agriculture, des ressources naturelles et de l'environnement.

3. Lacunes à combler dans les données

Pour la modélisation hydrologique efficace dans les bassins de l'IGAD (décrit au chapitre 3) des ensembles de données climatologiques et hydrologiques supplémentaires ont été recueillies par étapes quotidiennes. Une possibilité de combler les ensembles de données manquants était d'utiliser des variables climatiques historiques issues de séries de données climatologiques mondiales pour la région de l'IGAD, cependant, cela nécessitait la dérivation des variables climatiques qui peuvent être utilisées pour générer des variables climatiques quotidiennes d'une manière stochastique.

4. Défis hydrologiques dans les bassins de l'IGAD

Les bassins transfrontaliers majeurs définis pour ce projet varient en taille et un résumé par pays des composants de base du bilan hydrique a été brièvement abordé. Les différents sous-bassins varient également en termes d'hydrologie de base et comprennent aussi des régions marginales telles que les régions arides et semi-arides, les zones humides, et d'autres espaces naturels cultivés.

Le changement climatique et le changement d'utilisation des terres font partie des défis qui existaient et qui sont susceptibles de s'aggraver à l'avenir. Pour la modélisation des ressources en eau dans la sous-région de l'IGAD, il existe plusieurs autres défis, notamment :

- L'insuffisance des infrastructures pour les ressources en eau et de la gestion

hydrométéorologique pour soutenir une surveillance optimale des ressources en eaux de surface et en eaux souterraines ;

- Disponibilité variable et irrégulière des données climatologiques et hydrologiques : la disponibilité des ressources de surface et souterraines était limitée pour la plupart des bassins en cours de modélisation ;

- Types variables des précipitations, conduisant à des défis en matière de pluviométrie et gestion des ressources hydriques ;

- Influence des changements climatiques et des changements de l'utilisation des terres: la déforestation et les modes de gestion de l'utilisation des terres ont une grande influence sur la simulation hydrologique des ressources en eau ;

- Informations limitées sur la surveillance et la gestion des systèmes des ressources en eau dans la sous région de l'IGAD.

Le chapitre suivant présente les concepts de base de la modélisation hydrologique et puis décrit brièvement la modélisation scientifique des enjeux hydrologiques dans la sous-région de l'IGAD.

EXAMEN DU MODÈLE HYDROLOGIQUE SWAT ET MÉTHODES D'ESTIMATION DES PARAMÈTRES

1. INTRODUCTION À LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Tous les modèles hydrologiques représentent une simplification du monde réel et dans la plupart des cas, tous les modèles sont, dans une certaine mesure, regroupés, et par ce moyen la mise en place mathématique et le paramétrage sont agrégés dans l'espace et dans le temps. Par conséquent, les paramètres du modèle ne correspondent souvent directement à des entités mesurables et, en général, ne peuvent qu'être estimés indirectement, par exemple grâce à l'étalonnage. Les modèles de captage sont principalement classés en fonction de la description du processus en 3 catégories : empirique, conceptuelle ou physique. Cela signifie que, les modèles à base physique incluent des paramètres qui peuvent être associées à des propriétés physiques du bassin versant, et sont donc attrayants pour représenter les changements physiques tels que ceux dus à l'utilisation des terres et aux changements climatiques.

Toutefois, modèles physiques répartis posent les inconvénients du sur-paramétrage et les questions d'échelle qui compliquent la recherche d'une description véritablement physique des processus et les exigences relatives aux données. En revanche, les modèles conceptuels sont généralement beaucoup plus simples et les paramètres de modèle définis par étalonnage simple et / ou la régionalisation, toutefois, plusieurs défis surgissent en raison des limites des données et de la structure du modèle.

Différents modèles de bassins contiennent un mélange de composantes physiques, conceptuelles et empiriques, et donc la meilleure approche d'estimation des paramètres n'était pas claire surtout lorsque les bonnes données sont rares. Un trait commun des modèles conceptuels et physiques est qu'une identification claire de la structure du modèle doit être précisée avant la modélisation et d'une hypothèse que l'on emploie généralement est que la structure du modèle présélectionné est adéquate.

Pour les sous bassins IGAD, les tâches de la modélisation des ressources hydriques ont nécessité l'élaboration de modèles de précipitations pour simuler les ressources hydriques dans la Sous-région de l'IGAD et fournir également une possibilité future d'étudier l'impact du changement d'utilisation des terres et du changement climatique sur les ressources en eau . Après un examen détaillé de la littérature, le modèle hydrologique sélectionné pour atteindre ces objectifs a été l'Outil d'Évaluation des Eaux du Sol (SWAT, Arnold et al. 2005) et un résumé des caractéristiques du modèle est donné dans les sections suivantes.

2. La structure du modèle SWAT (Outil d'évaluation des eaux et du sol)

SWAT est un modèle hydrologique physique énoncé par Arnold et al. (1998, 2005). Les développements récents des composantes du modèle SWAT incluent la capacité de simuler le modèle en tant que structure regroupées ou répartie. En outre, le modèle a la capacité d'estimer les incertitudes pour les simulations hydrologiques. Cette mission a pris en considération une structure hydrologique conceptuelle simple d'une manière semi-répartie pour représenter les connaissances de base du principe de continuité (ou bilan de masse) pour les bassins hydrologiques de l'IGAD. Les entrées à l'équilibre de masse seront formées des précipitations et de la température et les sorties sont représentées par l'évaporation, la transpiration, la décharge et recharge des eaux souterraines.

Un modèle conceptuel semi-distribué SWAT2005 (Arnold et al. 2005), un modèle qui est couplé à ArcGIS9.2, a été appliqué dans cette mission. Le modèle fait usage de l'environnement GIS pour préparer les fichiers des entrées / sorties ainsi que pour effectuer des manipulations sur le modèle. La construction d'un modèle hydrologique implique plusieurs stratégies, notamment: le pré traitement des trames des ensembles de données des entrées nécessaires (DEM, le sol et l'utilisation des terres); la délimitation et la sélection d'un bassin d'essai à étalonner; l'estimation d'une valeur de paramètre a priori et enfin, la conceptualisation de la structure du modèle, l'étalonnage et la validation.

Pour les quelques sous-régions de l'IGAD, plusieurs sous-bassins ont été sélectionnés sur la base des unités de réponse hydrologique (HRU); essentiellement composée de types dominants d'utilisation des terres et ceux des sols. La délimitation a été faite en utilisant la Mission de Topographie par Radar Navette (SRTM) avec une résolution de 90m et le Modèle Numérique d'altitude (DEM) (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Une zone de drainage de 200 km² a été favorisée comme seuil pour la délimitation du sous-bassin (c'est-à-dire que tous les sous-bassins ont une taille supérieure à 200 km²). Ce seuil a été basé sur la résolution des informations anticipées disponibles, la précision nécessaire dans l'espace en représentant la classe d'utilisation des terres par sous bassin, et l'aspect pratique de la taille d'un projet SWAT.

2.1. L'incertitude du modèle, l'analyse de sensibilité, Mise en place du calage et validation du modèle Calage/Vérification/Simulation du modèle

Les paramètres a priori du modèle ont été spécifiés à deux échelles spatiales, certains paramètres ont été définis pour l'ensemble du bassin tandis que d'autres sont spécifiques à chaque sous-bassin. Les paramètres a priori du modèle ont été calculés à partir des travaux d'Arnold et al. (1998) et de Neitsch et al. (2000, 2005). Une explication de ces paramètres dépassait la portée de ce rapport, et seule une description limitée est donnée ici :

- Les paramètres de la morphologie du canal (à l'échelle du sous-bassin) ont été associés à la morphologie du canal et ont été tirées des bases de données DEM en utilisant l'interface SWAT ArcGIS. Il s'agit notamment de la longueur du canal et de la pente principale du canal.
- Les paramètres des sols ont été tirés de la base de données de la Caractérisation de

l'utilisation de la Couverture terrestre Mondiale (GLCC) appartenant à l'USGS pour ces deux couches à une résolution spatiale de 10 km (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/glcc/glcc.html>). Les paramètres du sol spécifiés comprenaient: la profondeur du sol (mm) la densité de masse (g/cm^3), le sol albédo, la salinité, la capacité moyenne des eaux disponibles, la conductivité saturée (mm / h), la teneur en carbone organique (%), la teneur en argile (%), la teneur en sable (%), et la teneur en fragments de roche (%). Cela a fourni une représentation très approximative puisque la structure verticale du sol peut être plus détaillée et définie par plus que la structure à deux couches utilisée. La structure du sol conçue par la FAO est formée de deux couches, avec la couche supérieure à 300 mm de profondeur et l'autre couche inférieure à 1000 mm de profondeur.

■ La Base de données sur d'utilisation des terres: Les paramètres relatifs à l'utilisation des terres (par exemple hauteur de la canopy, stockage de la canopy couvert, le rapport biomasse-énergie, la température optimale de croissance, l'indice de la surface foliaire maximale potentielle, l'indice de la surface foliaire minimale, la conductance stomatique maximale et la hauteur minimale de la canopy, etc) étaient fondées sur la base de données sur les récoltes qui fait partie de l'environnement SWAT et fournissent une représentation approximative pour la sous-région de l'IGAD. On a effectué une sélection de paramètres à priori de la couverture terrestre / plantes. Le paramètre du numéro de la courbe a été appliqué pour chaque HRU (unité de réponse hydrologique) HRU, basée sur l'utilisation des terres, les sols et la pente à l'intérieur des sous-bassins de drainage. Pour chaque type d'utilisation des terres, jusqu'à quatre numéros de courbe ont été possibles, selon l'efficacité de drainage du sol (appelée aussi classification hydraulique). Des valeurs CN2 basses indiquent des capacités de drainage du sol plus élevées, alors que les surfaces imperméables ou en béton peuvent avoir des valeurs CN2 susceptibles d'atteindre 98.

La plupart des paramètres étant difficiles à mesurer et pouvant ainsi varier dans l'étalonnage, cela voudrait dire que beaucoup de degrés de liberté sont permis. Idéalement, une analyse de sensibilité doit être réalisée pour ces paramètres. De plus, pour chaque étude de cas des sous-bassins ne pouvaient avoir qu'un seul type d'utilisation des terres et de type de sol (type dominant). Basé sur les informations disponibles, l'analyse de sensibilité des paramètres, l'étalonnage, la validation et l'analyse d'incertitude peuvent être effectués à partir des données sur le débit.

La stratégie d'étalonnage qui a été proposée pour cette étude comprenait plusieurs étapes: Sur la base de la topographie, le bassin est divisé en trois régions différentes supposées avoir des réponses hydrologiques similaires. Cela permet de définir la variabilité des paramètres dans l'espace et par conséquent la régionalisation des paramètres. Les régimes hydrologiques de l'IGAD la sous-région de l'IGAD sont essentiellement contrôlés par la topographie du bassin et la couverture terrestre entraînant les trois classes de relief suivantes :

- des pentes abruptes, responsable de l'écoulement rapide de surface ;
- des pentes douces à des plaines, couvertes par l'utilisation mixte des terres composées principalement de zones humides, ce qui crée un stockage des eaux d'écoulement de surface ;
- des pentes douces à des plaines sans terres humides, avec une réponse quelque peu

intermédiaire entre les pentes abruptes et les zones humides.

Une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier les paramètres les plus sensibles, en utilisant la méthode d'échantillonnage hypercube latin un-à-la-fois (LH-OAT). Le résultat de cette étape a donné le classement de la sensibilité des paramètres. Les paramètres les plus sensibles ont ensuite été sélectionnés pour l'étalonnage en utilisant un algorithme semi-automatisé, dénommé SUFI-2. L'algorithme SUFI a été géré comme un outil d'analyse du système, comme indiqué dans la figure 6.

L'incertitude dans les débits simulés a été quantifiée à l'aide de l'incertitude de prédiction à 95 % (95PPU). Deux indices qui ont été utilisés pour quantifier la bonne qualité de la performance de l'étalonnage / l'incertitude sont le « P-factor » et le « facteur R » basés sur la procédure d'optimisation de l'analyse du système SWAT pour l'étalonnage et la validation SWAT (Abbaspour, 2008). Les données disponibles sur le débit pour l'étalonnage ont été traitées avec une marge d'erreur de 10 % lors de l'optimisation. Une approche systématique de l'étalonnage et de la validation est présentée dans la figure 6.

Compte tenu de la qualité des données pour la sous-région de l'IGAD, la modélisation hydrologique a présenté de nombreux défis, y compris la sensibilité à l'hydrologie à la

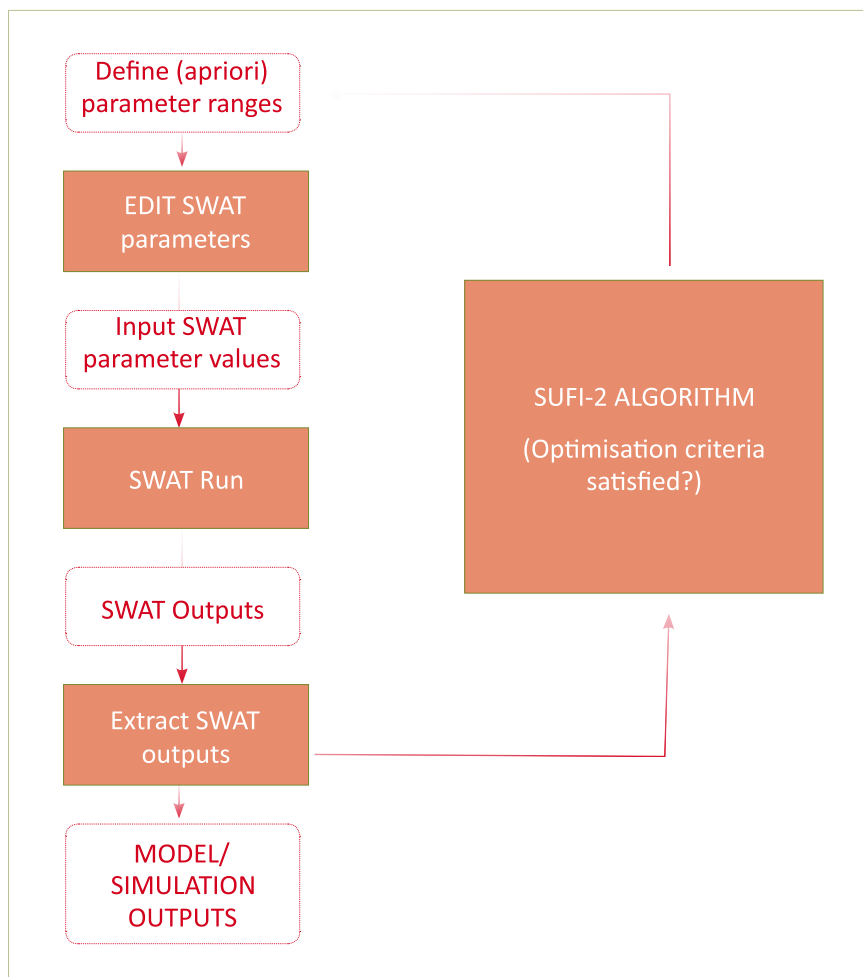


FIGURE 6: Un aperçu schématique des différentes étapes de l'étalonnage du modèle en utilisant SUFI-2.

disposition des entrées climatologiques et l'espace final des paramètres. Des variables simulées dans l'eau bleue, le débit d'eau verte et le stockage de d'eau verte ont été examinées dans le contexte des estimations historiques. Généralement, il était raisonnable de supposer une plus grande confiance dans les simulations du modèle avec la moindre erreur (≈ 1) dans la simulation du climat historique.

La stratégie de simulation adoptée impliquait plusieurs processus, y compris les suivants :

- Exécuter le modèle SWAT en utilisant le climat actuel, simulant des séries chronologiques de 30 ans variables des ressources hydriques mensuelles (y compris les débits, l'évapotranspiration, les eaux du sol, la recharge aquifère profonde et le rendement de l'eau) et estimer l'écoulement annuel moyen à partir de ces séries chronologiques en utilisant le modèle hydrologique étalonné. Cela a été fait par un ensemble de plusieurs simulations des précipitations.
- Calculer la somme des composantes des ressources hydriques simulées pour chaque sous-bassin pour les moyennes hydriques l'échelle du bassin. Compte tenu des différences des caractéristiques physiques et hydroclimatologiques dans la sous-région de l'IGAD, chaque réponse du sous bassin a été évaluée séparément et une moyenne a été calculée pour obtenir la réponse de l'ensemble du bassin. Au cours des simulations des ressources hydriques des modèles spatiaux ont également été présentés.
- Pour évaluer l'incertitude de la propagation, on a pris en considération l'impact combiné de la réduction d'échelle avec l'incertitude des paramètres hydrologiques du modèle hydrologique de l'IGAD. Pour chaque tranche de temps, plusieurs simulations hydrologiques quotidiennes portant sur 30 ans ont été utilisées afin d'estimer l'incertitude totale en adoptant une approche des ensembles de simulation. L'incertitude était considérée comme étant le résultat d'une utilisation des données climatiques saisies et l'incertitude des paramètres.

3. Éléments de simulation attendus pour la modélisation des ressources hydriques

Vu le type de modèle de simulation qui a été prévu pour la modélisation les ressources hydriques, on s'est concentré sur un certain nombre de composantes hydrologiques pour l'étalonnage /la validation /la simulation, cependant le manque d'ensembles de données climatiques et hydrologiques quotidiennes a constitué une limite. Ainsi l'attention s'est focalisée sur la simulation des débits, de l'évapotranspiration potentielle (PET), l'évapotranspiration réelle (AET), l'humidité du sol (SM) et voies d'écoulement et les temps de déplacement à travers le système aquifère.

4

ÉTALONNAGE ET VALIDATION DU MODÈLE SWAT POUR LA SOUS-RÉGION DE L'IGAD

1. INTRODUCTION

Un certain nombre de bassins transfrontaliers pour la sous région de l'IGAD ont été mis en place. Le défi principal dans le processus a été la disponibilité de flux à long terme pour les quelques bassins transfrontaliers : le succès de la modélisation était fortement tributaire de la disponibilité des données hydrologiques nécessaires à l'installation, l'étalonnage et la validation du modèle. Les différents bassins transfrontaliers pris en considération pour la modélisation hydrologique sont résumés dans la figure 9.

2. RÉSUMÉ DES DONNÉES DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DISPONIBLES

Un Modèle numérique d'altitude (DEM) a été obtenu à partir du domaine public. Cela a été appliqué pour délimiter les bassins hydrologiques de l'IGAD. La plupart des ensembles de données fournies variaient de mensuelles à annuelles. Cependant le modèle SWAT des ensembles de données quotidiennes sur les précipitations et la température. En tant que telles, des bases de données hydrologiques chronologiques supplémentaires ont été nécessaires pour la mise en œuvre réussie de la modélisation des ressources hydriques et la réussite de cette modélisation dépendait considérablement de la disponibilité de séries hydrologiques et climatologiques chronologiques pour plusieurs sous bassins de l'IGAD.

Pour faciliter l'exercice de modélisation hydrologique, les ensembles de données supplémentaires de l'Unité de Recherche Climatique (CRU) ont été obtenus, y compris les précipitations et la température à plusieurs emplacements dans la région de l'IGAD (Figure 7 et Figure 8).

3. STRATÉGIE DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

3.1. Sélection des bassins test

Un certain nombre de bassins transfrontaliers ont été considérés pour les simulations hydrologiques. Les bassins hydrologiques ont été délimités en plusieurs sous-bassins afin d'assurer une simulation hydrologique représentative (Figure 9 et Figure 10).

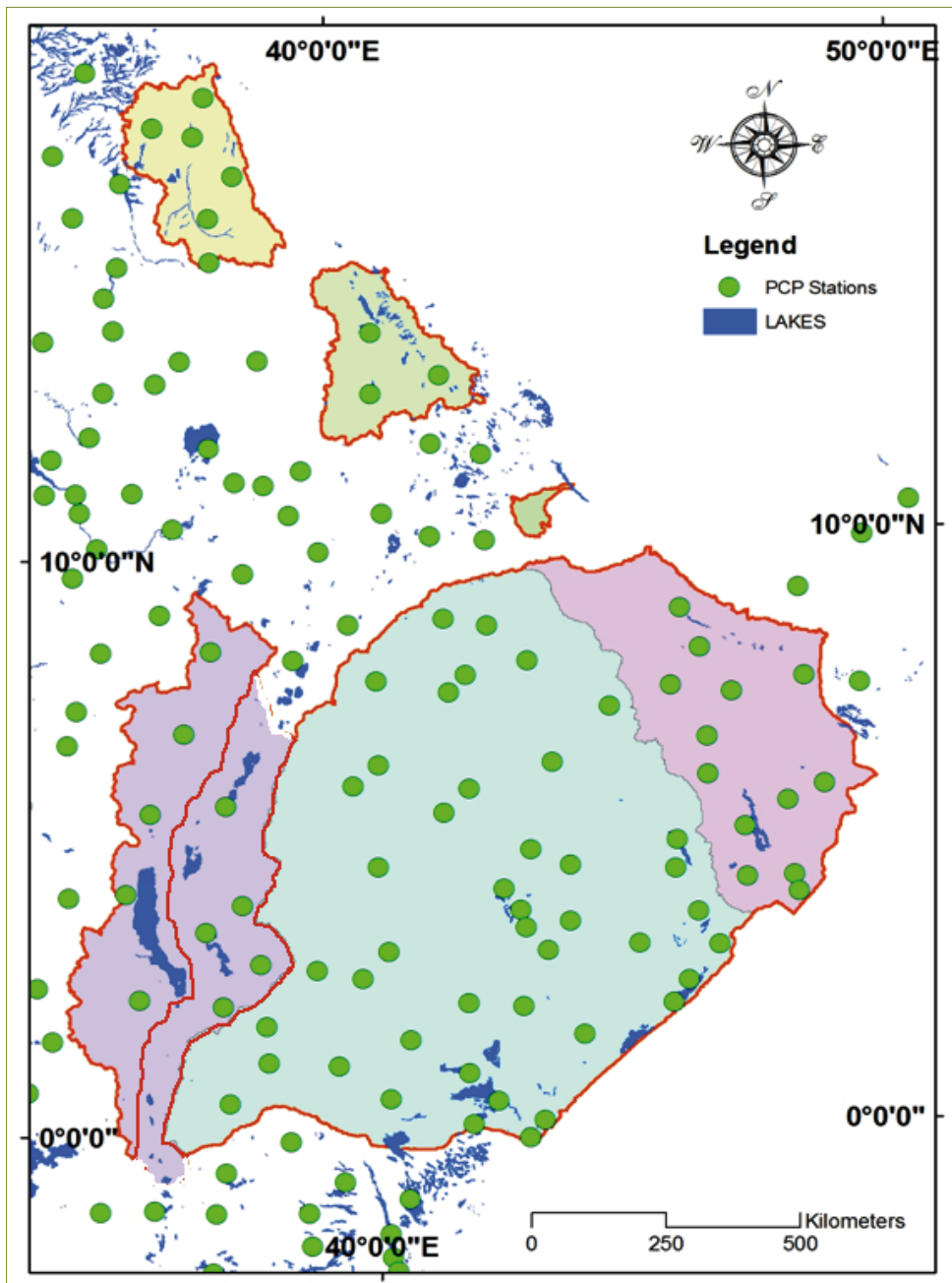
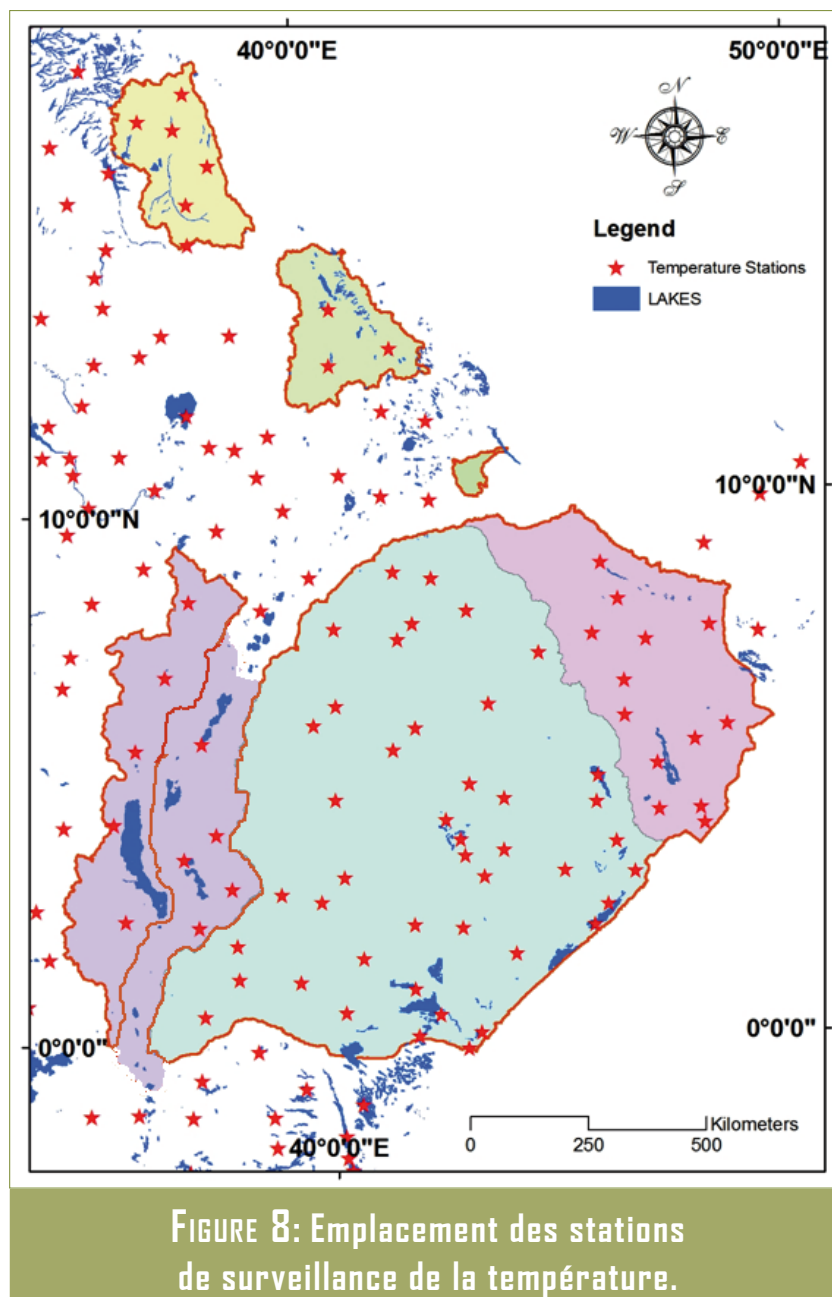


FIGURE 7: Emplacement des stations de surveillance des précipitations.

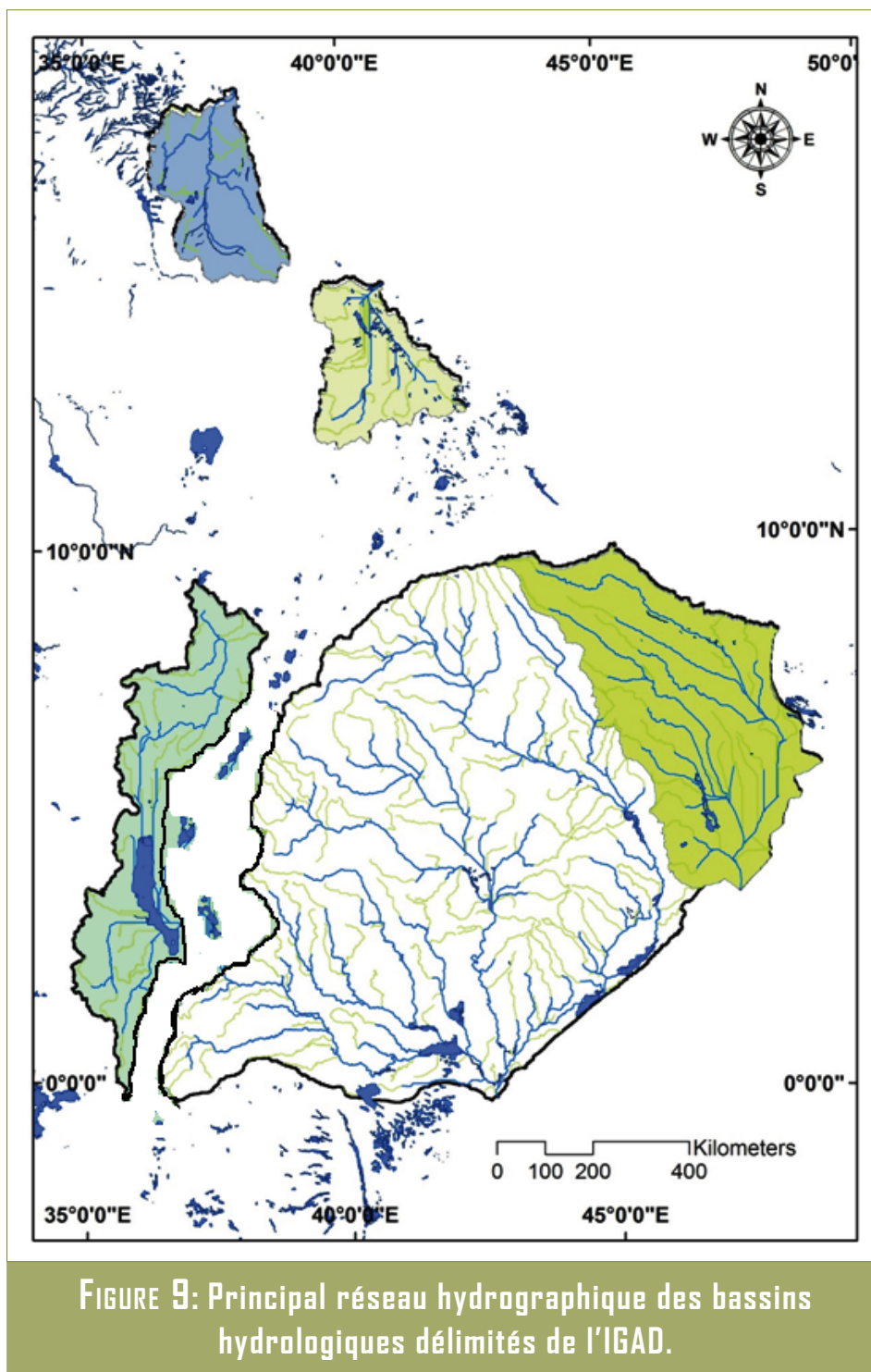
3.2. Délimitation du modèle hydrologique

Les bassins hydrologiques ont été délimités en sous-bassins multiples, qui ont été subdivisés en unités de réponse hydrologique (HRUs). Chaque HRU se composait de types d'utilisation des terres et de types de sols dominants. La délimitation est fondée sur une résolution de 90 m obtenue à partir du modèle numérique d'altitude (DEM) de la Mission de Topographie par Radar Navette (SRTM) (<http://srtm.csi.cgiar.org/>). Une zone de drainage de 200 km²



Bassin (Figure 1)	Numéro de Bassin	Superficie du bassin (km ²)	Pays partageant le bassin
Danakil	TB-1 (1)	61,549	Ethiopie, Erythrée
Gash Baraka	TB-2 (2)	66,549	Erythrée, Soudan
Juba Shebelle	TB-3 (3)	753,202	Ethiopie, Kenya, Somalie
Ogaden	TB-4 (4)	207,363	Ethiopie, Somalie
Turkana Omo	TB-5 (5)	140,052	Ethiopie, Kenya, Soudan, Ouganda
Ayasha	TB-6 (6)	4,963	Ethiopie, Somalie

TABLEAU 2. Bassins transfrontaliers de l'IGAD.



a été choisie comme seuil pour la délimitation d'un sous bassin (c'est-à-dire que tous les sous-bassins ont une superficie de 200 km² environ). Ce seuil a été basé sur la résolution des informations disponibles, la précision spatiale requise en matière de représentation de la classe de l'utilisation des terres par sous bassin, et l'aspect pratique de la taille d'un projet SWAT. Les pays partageant le bassin sont présentés dans le tableau 2 et une carte des sous-bassins délimités se trouve dans la Figure 9 et Figure 10.

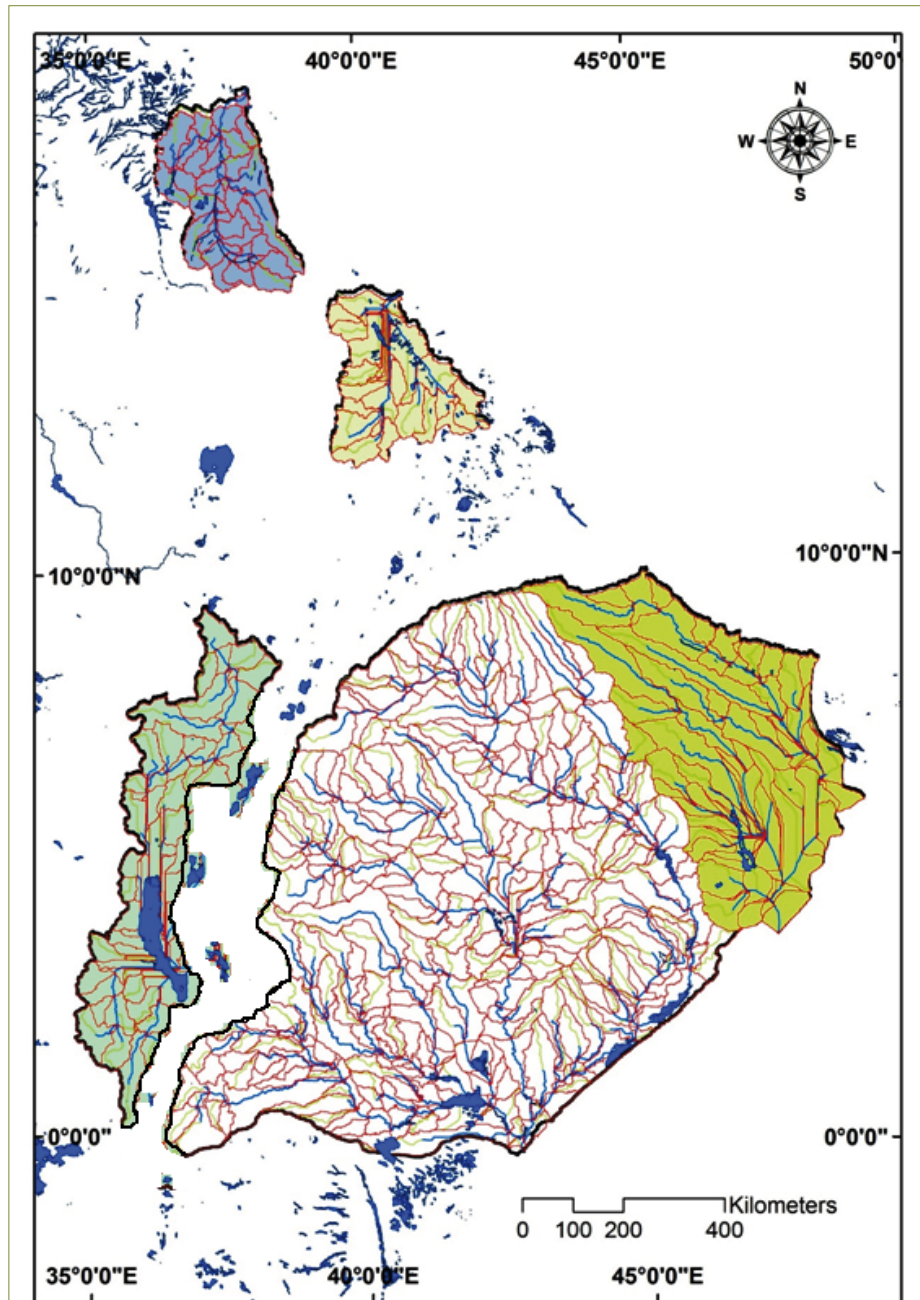


FIGURE 10: Sous-bassins transfrontaliers délimités des pays de l'IGAD et le Système majeur Lacs/ Rivières.

3.3. Sélection des composantes hydrologiques pour la modélisation hydrologique

Pour les simulations hydrologiques plusieurs composantes nécessaires pour la simulation comprenaient l'écoulement, l'évapotranspiration, les eaux du sol et la recharge. Compte tenu des informations limitées qui étaient disponibles sur les caractéristiques des zones humides et les quelques petits lacs dans les bassins, la simulation des lacs et des zones humides a été compromise en utilisant la mise en place de réservoirs linéaires.

3.4. Estimation des valeurs des paramètres a priori

Les paramètres a priori du modèle ont été spécifiés à deux échelles spatiales: (a) au niveau du bassin entier et (b) au niveau du sous-bassin. Chaque sous-bassin avait plusieurs HRU. Les paramètres a priori du modèle ont été conçus à partir des travaux d'Arnold et al. (1998) et de Neitsch et al. (1999). Cela a impliqué plusieurs composantes dont les paramètres de la morphologie des lits, les structures du sol (paramètres pédologiques issus de la base de données sur la Caractérisation la couverture terrestre et de l'utilisation mondiale des terres (GLCC) appartenant à l'USGS pour les deux couches à une résolution spatiale de 10 km (<http://edcsns17.cr.usgs.gov/GLCC/glcc.html>).

Le paramètre du sol spécifié comprenait : la profondeur du sol (mm), la densité de masse (g/cm^3), le sol albédo, la salinité, la capacité moyenne d'eau disponibles, la conductivité saturée (mm / h), la teneur en carbone organique (%), la teneur en argile (%), la teneur en sable (%), et la teneur en fragments de roche (%). Cela a fourni une représentation très approximative puisque la structure verticale du sol était plus détaillée et défini par plus de couches que la structure utilisée à deux couches.

Les paramètres relatifs à l'utilisation des terres (par exemple hauteur de canopy, stockage de canopy, le rapport biomasse-énergie, la température optimale de croissance, indice de la surface foliaire maximale, indice de la surface foliaire minimale, la conductance stomatique maximale et la hauteur minimale de canopy, etc.) reposaient sur la base de données des récoltes qui fait partie du logiciel SWAT, ce qui fournit une représentation approximative pour la sous-région de l'IGAD.

3.5. Stratégie d'étalonnage du modèle

La plupart des paramètres étant difficiles à mesurer, et pouvant ainsi tous varier dans l'étalonnage, cela voudrait dire que beaucoup de degrés de liberté sont permis. Idéalement, une analyse de sensibilité a été réalisée pour ces paramètres. Basées sur les informations disponibles, l'analyse de sensibilité des paramètres, l'étalonnage, la validation et l'analyse d'incertitude ont été réalisées à partir des données sur le débit.

3.6. Analyse de sensibilité des paramètres

Le but de l'analyse de sensibilité est toujours d'identifier le degré de sensibilité des paramètres hydrologiques dans la détermination du débit (en amont d'un emplacement particulier du bassin). Des paramètres hydrologiques qui influencent l'hydrogramme ont été utilisés dans l'analyse de sensibilité et les huit paramètres les plus sensibles ont été retenus pour l'étalonnage. Certains des paramètres importants pour l'étalonnage, en termes de montage de l'hydrographe comprennent; les paramètres de l'écoulement de surface; les eaux des sols, les paramètres du débit des eaux souterraines et les paramètres du canal.

3.7. Limites et sources probables d'incertitude

En raison des contraintes de données, un plan de régionalisation détaillé basé sur

l'identification des rapports entre la valeur du paramètre et les descripteurs de captage n'était pas faisable. Cependant, un schéma simplifié de régionalisation a été testé par le transfert des paramètres du modèle entre les bassins. L'implication de cette opération était que, en l'absence de données mesurées du sous bassin, les paramètres du modèle peuvent ne pas être transférables à des sous-bassins non mesurés au sein de la sous-région de l'IGAD, bien que cela ne compromette pas la nécessité de mener à bien la régionalisation des paramètres du modèle fondée sur les éléments descriptifs physiques du bassin versant.

4. RECOMMANDATIONS POUR LES ÉQUIPEMENTS DE SURVEILLANCE HYDRO-MÉTÉOROLOGIQUE

Un certain nombre d'équipements ont été recommandés pour la collecte de données hydrométéorologiques. La plupart des équipements ont tendance à mesurer des variables multiples et dans la plupart des cas, l'utilisation efficace de cet équipement dépend de l'objectif détaillé prévu. La plupart des équipements sont modernes, électroniques et les opérateurs peuvent exiger une formation avant d'être en mesure d'utiliser ces équipements.

Une liste des équipements prévus pour les opérations hydrométéorologiques est brièvement donnée ici :

1. Equipement hydrométéorologique électronique :

- Profileur de Courant par Doppler Acoustique (ADCP) pour la mesure du débit des fleuves ;
- Transducteurs de pression pour l'enregistrement du niveau d'eau dans les fleuves volatiles ;
- Stations météorologiques automatiques ;
- Stations de mesure automatique de l'évaporation.

2. Equipement pour le niveau des eaux et du débit :

- Indicateur de niveau & collecteur ;
- Indicateur numérique de profondeur de l'eau ;
- Capteur de niveau d'eau enregistreur de décharge d'eau ;
- Propulseur miniature compteur du courant et propulseur standard compteur des Courants ;
- Enregistreur de niveau d'eau.

Les différents emplacements des quelques bassins de l'IGAD subissent diverses profondeurs des précipitations sur l'année, donc des techniques différentes ont pour but d'obtenir des températures et des précipitations représentatives de la zone à laquelle les mesures se réfèrent. Cependant il ya un besoin impérieux d'assurer des mesures exactes de précipitations. Dans le même sens le choix de l'emplacement détermine le degré de précision des mesures, vu le choix du site, le type de jauge, les moyens de prévenir la perte par évaporation et l'effet du vent et des éclaboussures. À titre d'exemple, l'emplacement du

pluviomètre détermine plusieurs facteurs tels que l'impact dû au vent, les obstacles autour l'appareil en terme d'estimations exactes, et étant donné que les précipitations surviennent sous forme de neige, le vent peut avoir des effets néfastes, bien que les brise-vents aient fait preuve d'une certaine efficacité dans la réduction des erreurs de mesure des précipitations.

1. Jauges non enregistreuses

- Jauges générales: Ce sont des jauges qui n'enregistrent pas, utilisées à des fins hypogées et métrologiques ;
- Jauges standard: Généralement considérées comme jauges ordinaires pour des lectures quotidiennes ;
- Jauges de stockage: utilisées pour les mesures des précipitations saisonnières totales en particulier pour les endroits reculés ;

2. Jauges d'enregistrement

En général, ces genres de jauges utilisent le type de pesage, le flotteur ou le seau et comprennent normalement les types suivants :

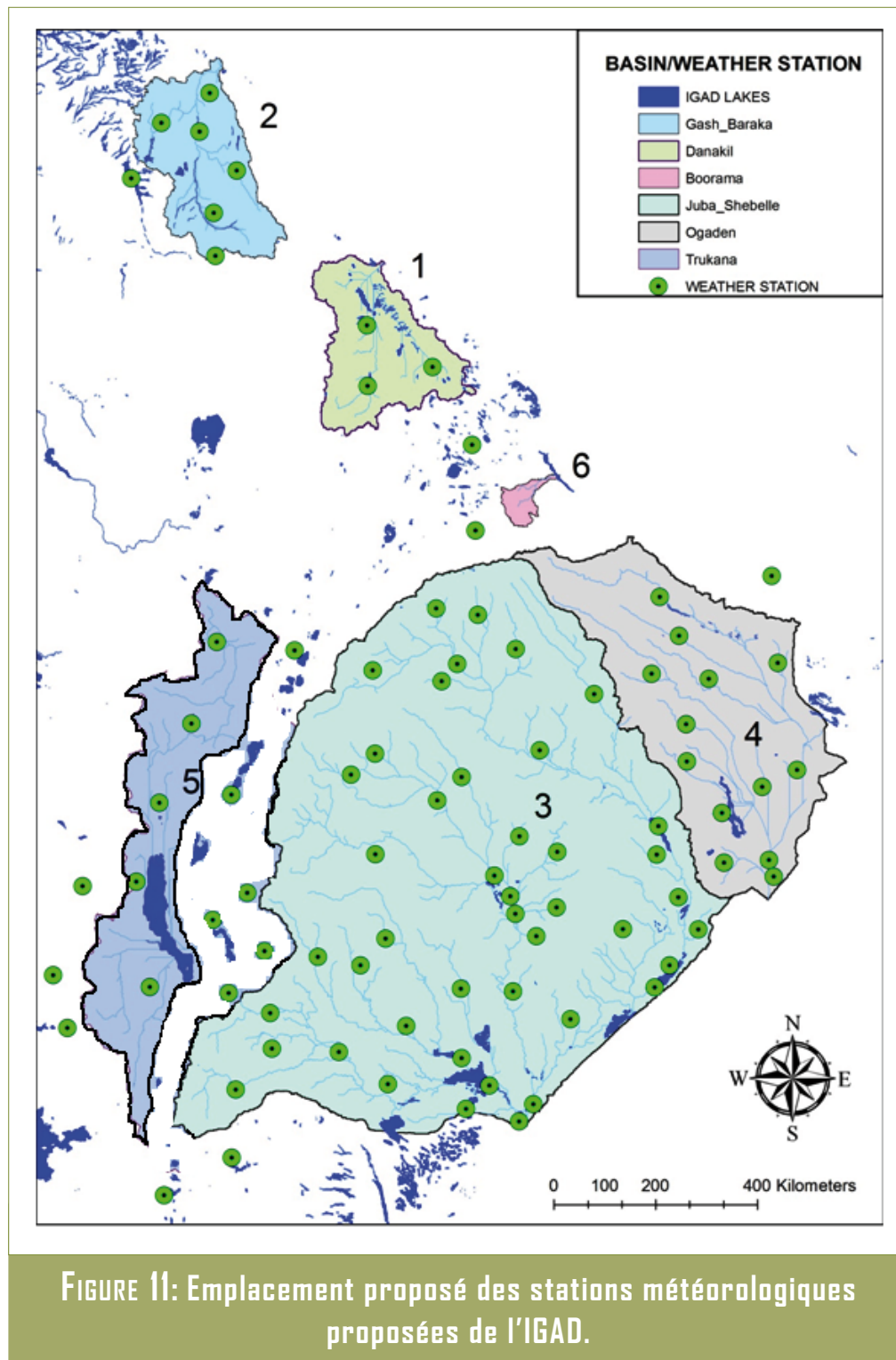
- Pesage: le poids des précipitations reçues est mesuré en continu ;
- Type flottant : la pluviométrie est introduite dans une cuve contenant un flotteur dont le mouvement vertical est transmis à un enregistreur ;
- Type de godet basculant: la précipitation est dirigée à partir d'un récipient métallique à deux compartiments dans un entonnoir collecteur et dans les bords du seau de collecte après une certaine quantité de précipitation est enregistrée ;
- Enregistreurs d'intensité des précipitations: ceux-ci ne sont pas recommandés pour un usage général en raison de leur complexité et pourtant l'intensité peut être facilement déterminée.

En résumé, les différents types de pluviomètres qui pourraient être pris en considération incluent les jauges enregistreuses et non enregistreuses pour la surveillance des précipitations (comme mentionné ci-dessus, elles comprennent principalement le pluviomètre ordinaire; pluviomètre transducteur; pluviomètre non enregistreur; pluviomètre à enregistrement graphique ; pluviomètre basculant; pluviomètre numérique sans fil; pluviomètre collecteur de données).

Quelle que soit la méthode choisie pour l'enregistrement des précipitations, il est crucial que la bonne couverture de la surface soit représentative du bassin versant où la jauge est installée. Des progrès récents ont également fourni des moyens de mesure de précipitations par des systèmes radar. Cela permet l'observation de l'emplacement et le déplacement des zones de précipitations pour des étendues de superficie de 40 - 200 km en fonction des caractéristiques du radar.

Cependant plusieurs facteurs affectent ce développement et pour n'en citer que quelques uns, notamment : le type de précipitation, l'ouverture des faisceaux ; la réfraction des faisceaux; l'atténuation atmosphérique et l'atténuation de l'étendue. Les mesures des précipitations peuvent également être effectuées par voie satellitaire, par l'utilisation

des images enregistrées par scanner ou par l'imagerie des radiomètres à microonde, cependant, cette imagerie a tendance à fournir une quantité limitée de données qui ne sont pas couramment utilisées opérationnellement. Un aperçu détaillé des méthodes de mesure d'autres paramètres météorologiques est donné dans le guide de la WMO (OMM) des instruments météorologiques et des méthodes d'observation. La figure 11 montre l'emplacement proposé de la station météorologique pour le bassin de l'IGAD.



5. RÉSULTATS DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

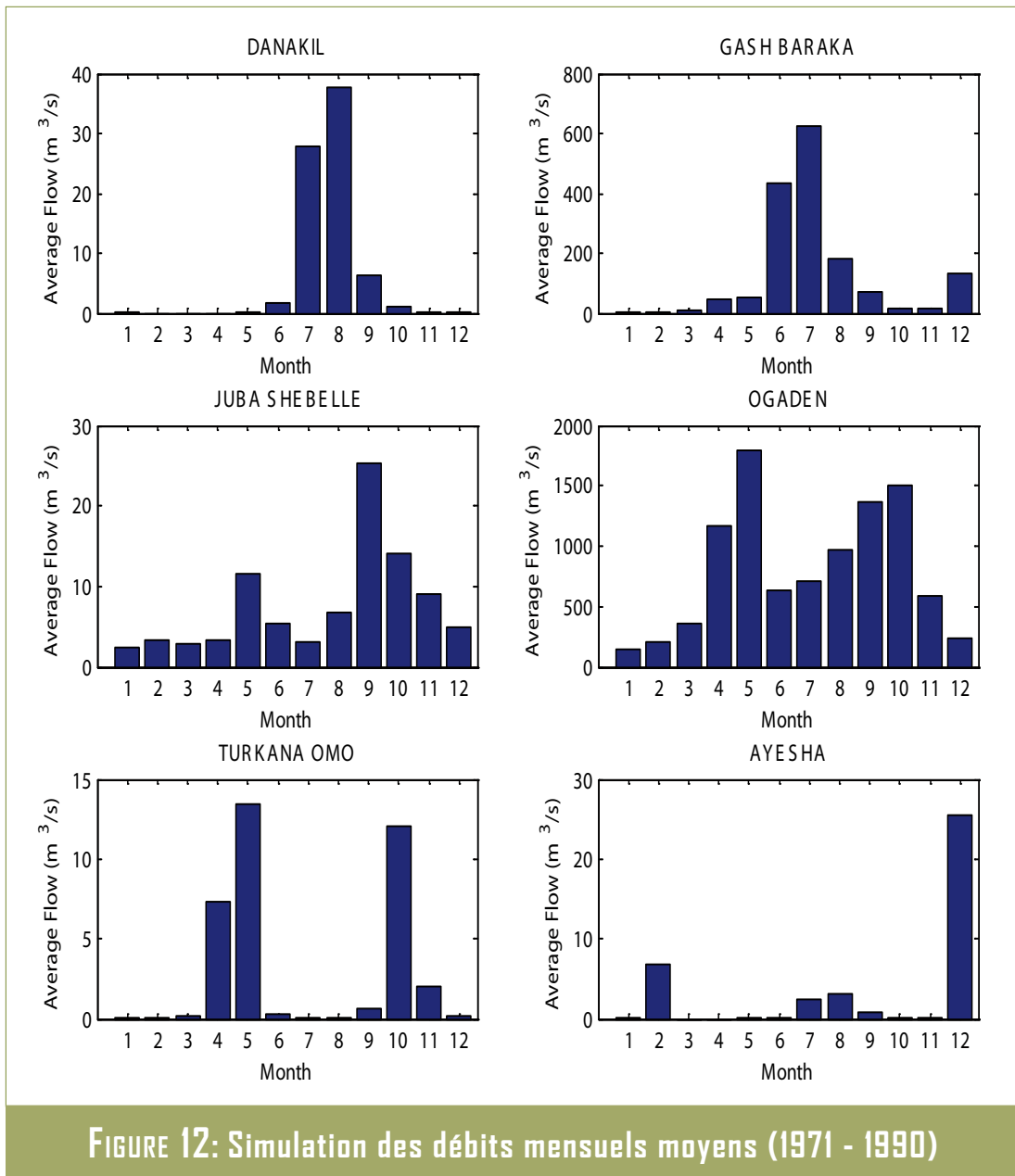
Le modèle Outil d'Évaluation de l'Eau et Sol (SWAT) a été choisi pour modéliser les ressources hydriques. Bien que les modèles à base physique, comme SWAT, soient actuellement largement utilisés et offrent des résultats très détaillés, il existe toujours une limite générale à savoir que, les modèles physiques répartis présentent les inconvénients du sur-paramétrage, et des questions d'échelle qui compliquent la recherche d'une véritable description physique des processus. Souvent, de tels modèles ne peuvent pas toujours fournir un bon ajustement aux données historiquement mesurées pour un certain nombre de raisons, y compris les erreurs structurelles, et les erreurs d'identification des paramètres et les erreurs de données - parce que la description des processus modélisés peut ne pas être exacte ou complète dans le modèle, tous les modèles sont imparfaits et même lorsqu'ils sont mesurés avec des paramètres physiques, ils ne sont pas exempts d'erreurs.

L'étalonnage du modèle a impliqué des valeurs de paramètres d'ajustement jusqu'à ce que le résultat du modèle ait correspondu de façon satisfaisante à la réalité observée. La procédure peut être soit manuelle soit automatisée et le succès d'un étalonnage manuel dépend de l'habileté et des connaissances approfondies du spécialiste en modélisation, tandis que l'utilisation de l'étalonnage automatique peut être favorisée car elle est plus objective, et plus efficace en termes d'exploration la gamme des valeurs possibles des paramètres (l'espace des paramètres).

Les sous bassins délimités de l'IGAD ont des caractéristiques physiques, climatiques et hydrologiques différentes, et donc la sensibilité de l'écoulement des précipitations varie dans l'espace. Les bassins ont des régimes climatologiques variés et la plupart sont typiquement secs et chauds. La configuration d'un modèle HRU réparti a été considérée comme la plus utile pour l'étude des ressources hydriques de l'IGAD. Les limites principales sont les contraintes de données et la topographie complexe du bassin. Les enregistrements des débits sont à peine disponibles pour faciliter l'étalonnage.

Afin de faciliter ces limites, la mise en place du modèle a tenu compte d'une structure hydrologique conceptuelle simple d'une manière semi distribuée pour représenter les connaissances de base du principe de continuité (ou bilan de masse) pour les bassins transfrontaliers IGAD. Les entrées dans l'équilibre de masse ont été formées des précipitations et les sorties ont été représentées par l'évaporation, la transpiration, la décharge et d'autres éléments relatifs aux eaux souterraines tels que la recharge, l'humidité du sol et autres. Un modèle conceptuel semi-distribué, le modèle SWAT2005 qui est couplé à ArcGIS9.2 a été choisi pour cette étude. Le modèle fait usage de l'environnement SIG pour préparer des entrées/sorties des fichiers ainsi que pour effectuer des manipulations du modèle. La construction d'un modèle hydrologique se poursuit et implique le pré traitement des ensembles de données nécessaires de la trame d'entrée (DEM, le sol et l'utilisation des terres); la délimitation et la sélection d'un bassin d'essai à étalonner; l'estimation des valeurs de paramètres a priori et finalement, la conceptualisation de la structure du modèle, la stratégie d'étalonnage et de validation. L'achèvement réussi de toutes ces étapes dépend fortement de la disponibilité des données et des délais.

Les résultats des débits mensuels moyens simulés et l'évapotranspiration sont présentés dans la Figure 12 et Figure 13 respectivement. Les résultats ont été obtenus à l'échelle du bassin (c'est à dire les moyennes du bassin) et doivent être interprétés avec prudence. Les débits observés sur une échelle quotidienne manquaient toujours, l'étalonnage minimum a donc été effectivement réalisé pour obtenir les résultats présentés ici. Cependant, les résultats donnent un aperçu général des composantes prévues des ressources hydriques pour les bassins transfrontaliers de l'IGAD



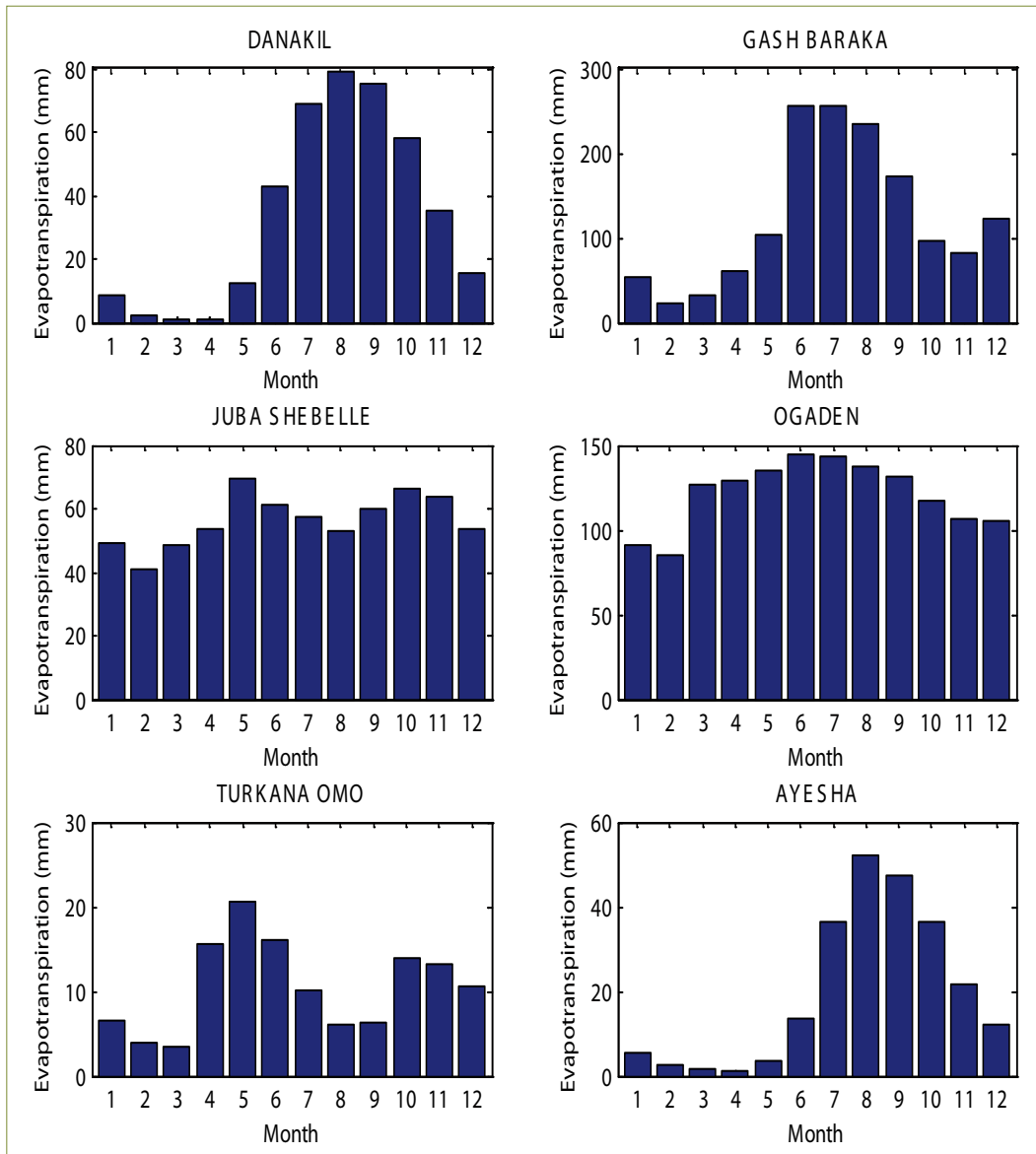


FIGURE 13: Simulated Average Monthly Evapotranspiration (1971-1990)

6. SIMULATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION MENSUELLE MOYENNE

Un résumé des composantes simulées du bilan hydrique, notamment les précipitations (PCP), l'évapotranspiration potentielle (PET), l'évapotranspiration (ET), les eaux du sol (SW), profondeur d'écoulement de surface (SURQ), recharge / percolation (PERC), l'écoulement de surface Terrestre (SURQ) débit des eaux souterraines (GWQ), et rendement de l'eau (WYLD). Chaque bassin de l'IGAD modélisé dans ce projet a été résumé et présenté dans le tableau 3. Cependant, l'interprétation de ces résumés doit se faire avec prudence étant donné que malgré l'étalonnage minimum en raison de l'absence générale de débits journaliers pour faciliter l'étalonnage efficace, les quantités ont été présentées comme des profondeurs à échelle du bassin (en « mm ») pour faciliter la comparaison et la précision de l'estimation / étalonnage à l'avenir.

MON	PCP (mm)	PET (mm)	ET (mm)	SW (mm)	PERC (mm)	SURQ (mm)	GWQ (mm)	WYLD (mm)
JAN	6.2	168.9	8.5	19.1	0.2	0	0.3	0.3
FEB	8.5	173.9	13.7	13.5	0.2	0.1	0.1	0.3
MAR	17.2	277.6	27.6	2.3	0.3	0.5	0.2	0.7
APR	15.5	275.9	14.7	2.1	0.2	0.6	0.2	1
MAY	13.1	256.4	13.3	1.5	0.2	0.1	0.2	0.3
JUN	12.2	263.6	10.9	2.8	0	0	0.1	0.2
JUL	56	274.7	32.4	19.6	3	3.1	0.5	3.9
AUG	68.9	249.9	39.3	32.4	6.3	9.6	2	12
SEP	17.1	226.9	23.2	25.3	0.4	0.6	3.2	4
OCT	4.6	226.6	9.6	20.2	0	0	1.7	1.7
NOV	6.2	197.1	6.8	19.5	0.2	0	0.5	0.6
DEC	7.7	168.4	7.3	19.2	0.3	0.1	0.3	0.5
ANNUAL (mm)	233.2	2759.9	207.4	177.5	11.3	14.7	9.3	25.5
ANNUAL (km³)	15.9	187.7	14.1	12.1	0.8	1.0	0.6	1.7

TABLEAU 3. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de Danakil (mm répartis sur 68 000 km², sauf indication contraire).

MON	PCP (mm)	PET (mm)	ET (mm)	SW (mm)	PERC (mm)	SURQ (mm)	GWQ (mm)	WYLD (mm)
JAN	6.8	156.7	8.4	18.7	0.3	0.1	0.6	0.7
FEB	3.2	162.9	7.7	14.1	0	0	0.3	0.3
MAR	5	265.4	14.8	4.2	0.1	0	0.1	0.2
APR	7.9	275.9	8	3.3	0.6	0.2	0.2	0.4
MAY	14.9	263.1	10.8	4.1	1.6	1.5	0.5	2.1
JUN	23.7	273.9	15.1	8.6	2.4	1.6	1	2.7
JUL	65	274.2	27.7	20.9	8.7	15.1	2.7	18
AUG	64.7	257.2	29.4	27.2	8.8	19.9	5.4	25.5
SEP	21.2	237.4	19.6	24.7	1.7	2.5	5.7	8.3
OCT	10.4	227.6	13.4	20.2	0.8	0.6	3.2	3.9
NOV	8.8	192.6	10.3	18.5	0.1	0.1	1.2	1.4
DEC	10.5	161.2	9.3	18.5	0.8	0.3	0.6	1
ANNUAL (mm)	242.1	2748.1	174.5	183	25.9	41.9	21.5	64.5
ANNUAL (km³)	16.0	181.4	11.5	12.1	1.7	2.8	1.4	4.3

TABLEAU 4. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de Gash Baraka (mm répartis sur 66 000 km², sauf indication contraire).

MON	PCP (mm)	PET (mm)	ET (mm)	SW (mm)	PERC (mm)	SURQ (mm)	GWQ (mm)	WYLD (mm)
JAN	11.5	175.9	15.7	46.2	1.4	1	2.7	3.7
FEB	13.2	179.8	24.7	31.8	1.3	1.4	1.6	3
MAR	35.4	265.8	40.9	20.4	2.6	3	1.6	4.7
APR	114.9	220.2	60.3	46	11.7	16.1	3.1	19.2
MAY	95.6	213.2	54.7	55.4	11.2	19.7	7.2	26.9
JUN	27.7	217.4	31.8	45.8	2.6	3.2	7.9	11.2
JUL	29	225.1	24.5	42.8	3.3	4	5.3	9.4
AUG	29.8	222.1	21.3	41.9	4.5	4.6	3.8	8.5
SEP	37.3	203.7	22.3	43.8	5.8	7	4	11
OCT	73.7	192	36.2	56.5	9.7	14.3	5.4	19.7
NOV	49.8	164.5	34	61.1	5.8	5.1	6.4	11.6
DEC	17.6	163.3	23	53.1	1.5	1.2	5.5	6.7
ANNUAL (mm)	535.5	2443	389.4	544.8	61.4	80.6	54.5	135.6
ANNUAL (km³)	429.5	1959.3	312.3	436.9	49.2	64.6	43.7	108.8

TABLEAU 5. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de Juba Shebelle (mm répartis sur 802 000 km², sauf indication contraire).

MON	PCP (mm)	PET (mm)	ET (mm)	SW (mm)	PERC (mm)	SURQ (mm)	GWQ (mm)	WYLD (mm)
JAN	5.4	174	9.1	36.2	0.5	0.5	1	1.5
FEB	8.4	177.7	16.5	26	0.8	1.2	0.6	1.8
MAR	21.9	273	29.4	14.6	1.3	2.4	0.8	3.2
APR	82.3	244.9	47.7	33.5	4.4	10.5	1.4	11.9
MAY	86	226.2	50.9	47.3	5.4	15.1	3	18.2
JUN	21.2	226.3	27.5	35.9	2	3.4	3.8	7.2
JUL	23.5	237.5	17.9	33.7	3.1	4.5	3	7.7
AUG	29.6	230.8	18.6	34.7	4.5	5.3	3.1	8.5
SEP	38.1	208.5	21.6	38.7	4.6	7.5	3.6	11.1
OCT	64.1	201.7	33	50.6	5.5	12.9	4.3	17.3
NOV	24.2	180.4	23.5	46.2	1.7	3.5	4	7.6
DEC	7.5	167.5	13.6	39.6	0.4	0.4	2.5	2.9
ANNUAL (mm)	412.2	2548.5	309.3	437	34.2	67.2	31.1	98.9
ANNUAL (km³)	86.6	535.2	65.0	91.8	7.2	14.1	6.5	20.8

TABLEAU 6. Ressources hydriques mensuelles simulées pour le bassin de l'Ogaden (mm répartis sur 210 000 km², sauf indication contraire).

MON	PCP (mm)	PET (mm)	ET (mm)	SW (mm)	PERC (mm)	SURQ (mm)	GWQ (mm)	WYLD (mm)
JAN	15.5	171.1	17.8	49.2	2.1	1.3	3.6	5
FEB	17.7	173.9	26.4	36.5	1.8	2	2.3	4.3
MAR	40.3	256.2	46.7	22.9	3.1	3.9	2.2	6.1
APR	111.7	213.6	62.9	45.8	10.8	13.8	3.4	17.2
MAY	95.6	205.2	57	55	10.6	18.2	7	25.3
JUN	41.8	209.6	35.1	49.1	4.7	7.7	7.8	15.6
JUL	44.5	216.1	29.8	46.9	6.4	10.2	6.3	16.7
AUG	43.3	213.2	25.1	46.7	7.6	10.3	5.9	16.4
SEP	47.8	196	24.3	49.4	8.2	12.3	6.4	18.8
OCT	67.4	187.5	35.1	59.2	9.4	12.3	7.5	19.9
NOV	50.3	161.8	33.8	62.7	7	5.7	7.6	13.4
DEC	19.5	160.5	32.1	55	2.7	1.4	6.4	7.9
ANNUAL (mm)	595.4	2364.7	417.1	578.4	74.4	99.1	66.4	166.6
ANNUAL (km ³)	172.7	685.8	121.0	167.7	21.6	28.7	19.3	48.3

TABLEAU 7. Ressources hydriques mensuelles simulées du bassin duTurkana mensuelles pour (mm répartis sur 290 000 km², sauf indication contraire).

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
Débit	0	0	0	0	0.3	1.6	34.8	67	18.9	2.9	0.3	0	125.7

TABLEAU 8. Variation mensuelle des ressources hydriques disponibles dans le bassin d'Ayesha (million m³).

7. RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES DES BASSINS TRANSFRONTALIERS DE L'IGAD

En général les données disponibles sur les eaux souterraines étaient limitées pour faciliter l'étalement, mais un résumé de certaines données disponibles sur les eaux souterraines à partir des Etudes Géologiques Britanniques utilisant des données globales sont disponibles à l'Unesco. Un résumé général des propriétés des aquifères dans la région de l'IGAD est présenté dans le Tableau 9.

Bassin	Classification du Débit l'aquifère	Productivité de l'aquifère (l/s)	Production moyenne annuelle (m ³ /yr)	Epaisseur aquifère saturée (m)	Stockage aquifère et types de débits
Danakil	Moderée	1 - 5	88,301	25 - 100	Débit fracturé
Gash- Barka	Basse	0.1 - 0.5	7,884	< 25	Débit fracturé dans matériau traversé
Juba-Shebelle	Moderée	1 - 5	78,840	25 - 250	Débit inter- granulaire et fracturé
Ogaden	Elevée	5 - 20	394,200	100 - 250	Débit inter- granulaire et fracturé
Turkana-Omo	Moderée à élevé	1- 20	315,360	25 - 100	Débit fracturé
Ayesha	Basse à modérée	0.5 - 1	23,652	25 - 100	Débit fracturé

(Source: <http://www.bgs.ac.uk>)

TABLEAU 9. Ressources en eaux souterraines et les propriétés aquifères des sous bassins de l'IGAD

5

CONCLUSIONS

Ce travail a comporté la collecte de données, l'élaboration d'un modèle hydrologique, l'identification des paramètres les plus sensibles du modèle, l'analyse de l'étalonnage et de la sensibilité du modèle pour les bassins transfrontaliers de l'IGAD. Le résultat principal de cette stratégie a été une meilleure compréhension de la réponse hydrologique de plusieurs bassins versants de l'IGAD et l'utilisation potentielle en termes de résolution des controverses entourant les débits fluctuants et les niveaux des eaux des lacs, l'agriculture durable, le développement rural, la production hydroélectrique et la gestion environnementale.

La section de modélisation des ressources en eau a conceptualisé et développé un modèle hydrologique pour l'évaluation des ressources hydriques des bassins transfrontaliers identifiés dans la région de l'IGAD. Cela a impliqué la collaboration étroite avec les expert GIS / Base de données pour la préparation efficace, la présentation et l'archivage des ressources hydriques et des données hydrologiques dans le format convenu. Une connaissance approfondie du SIG était requise de la part du participant potentiel aux modules de modélisation des ressources hydriques.

En termes de besoins de logiciels, ArcGIS a été également nécessaire pour la mise en place/ la simulation des composantes de la modélisation des ressources hydriques. Plusieurs ensembles de données météorologiques ont été obtenues pour une modélisation efficace; cependant, l'absence persistante de débits journaliers limitait encore l'étalonnage efficace des bassins hydrologiques délimités de l'IGAD. Plusieurs tentatives ont été menées pour assurer une estimation efficace des ressources hydriques pour les bassins de l'IGAD. Un résumé des composantes simulées des ressources hydriques à l'échelle du bassin a été présenté pour donner un aperçu général sur les composantes des ressources hydriques des bassins transfrontaliers de l'IGAD.

La plupart des résultats de l'étude actuelle sont comparables aux estimations des ressources hydriques effectuées par d'autres études telles que l'Etude des Ressources hydriques de la FAO.

Basin	Eau de surface	Eau souterraine
Danakil	1.0	0.6
Gash-Barka	2.8	1.4
Juba-Shebelle	64.6	43.7
Ogaden	14.1	6.5
Turkana-Omo	28.7	19.3
Ayasha	0.1	-
Total	111.3	71.5

TABLE 10. Estimations simulées des ressources hydriques disponibles (km³) pour les bassins transfrontaliers de l'IGAD.

Il y a quelques écarts dans les estimations pour Juba-Shebelle et Danakil. Les différences peuvent être dues à des différences dans les ensembles de données d'étude et la période étudiée. Toutefois, les questions de la disponibilité limitée des données hydrologiques pour la région et les problèmes liés à l'évaluation des ressources hydriques dans de telles conditions sont bien documentées. Par conséquent, la collecte de données supplémentaires auprès des pays est essentielle pour améliorer les estimations. La mise en place de nouveaux réseaux hydrométéorologiques est extrêmement urgente puisque les réseaux dans de nombreux pays sont limités ou inexistant dans de nombreux cas. L'utilisation de matériel de télédétection peut également être utile à court terme. Cependant, même si les résultats des simulations peuvent varier pour certains bassins transfrontaliers, les résultats de cette étude créent une base pour des investigations complémentaires en matière de modélisation des ressources hydriques en termes de mise en place de modèle et de la méthodologie de simulation.

Des données supplémentaires en particulier sur les débits journaliers sont requises à plusieurs endroits dans le bassin pour améliorer la simulation des ressources hydriques. Les données hydrologiques et climatologiques disponibles à partir des bases de données de l'IGAD ont mis en évidence des lacunes importantes, notamment à propos des observations journalières - un certain nombre d'observations manquent. En outre les données disponibles provenant d'autres sources étaient rares et n'étaient pas exemptes d'erreurs. Le climat dans le bassin de l'IGAD est assez complexe et pour une utilisation précise des modèles hydrologiques, des séquences représentatives des précipitations peuvent être nécessaires. Pour les bassins hydrologiques de l'IGAD, de l'évaluation de la performance hydrologique du modèle SWAT sur une résolution chronologique quotidienne / mensuelle devrait révéler les régimes hydrologiques et la sensibilité des variables hydrologiques pour saisir les données sur les précipitations et sur les estimations des paramètres. Une simple étude de sensibilité a permis de réduire la taille du défi d'étalonnage.

6

RECOMMANDATIONS

Malgré la modélisation initiale réussie des bassins transfrontaliers de l'IGAD, la modélisation supplémentaire est nécessaire pourvue que des données supplémentaires soient disponibles pour les simulations hydrologiques efficaces. Il est nécessaire de mettre en place un réseau de surveillance hydrométéorologique - à l'heure actuelle, les bassins de l'IGAD ont une capacité limitée en termes de réseau de mesure pour la surveillance et les opérations hydrométéorologiques et chaque pays devrait avoir une capacité supplémentaire pour un fonctionnement efficace des réseaux hydrométéorologiques mis au point. Une fois que les réseaux sont mis en place, il convient de s'assurer que toutes les stations ont une installation complète des équipements pour garantir une surveillance efficace des événements hydrologiques.

L'IGAD devrait établir une composante de renforcement des capacités en particulier dans les domaines liés à la modélisation des ressources hydriques et cela devrait être fait de telle sorte que les pays membres créent des opportunités de coopération dans l'évaluation des ressources des ressources à des niveaux sous-régionaux. Pour assurer une collecte des données efficaces pour tous les pays membres de l'IGAD, plusieurs programmes qui appuient la collecte de données et le contrôle efficaces doivent être mis en œuvre et ils devraient aussi assurer un mécanisme pour la réalisation et le partage des données entre les pays membres de l'IGAD.

Étant donné le manque important de données hydrologiques et météorologiques requises pour la surveillance et la modélisation des ressources hydriques, il est recommandé de déployer des stations météorologiques à travers l'ensemble des bassins transfrontaliers de l'IGAD, après une étude appropriée de l'emplacement de chaque station. Une source recommandée de tels équipements hydrométéorologiques peut être consultée <http://www.geonica.com/index.php>. Toutefois, une étude séparée est recommandée pour montrer explicitement l'endroit où installer de tels systèmes.



BIBLIOGRAPHIE

Abbaspour, K. C., Yang, J., Reichert, P., Vejdani, M., Haghghat, S. & Srinivasan, R. (2008). SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual.

Arnold, J. G. & Fohrer, N. (2005). Preface: SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modelling. *Hydrological Processes*, 19, 563–572.

Arnold, J. G., Muttiah, R. S., Srinivasan, R. & Allen, P. M. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, 227(1-4), 21–40.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modelling and assessment Part I: Model development. *Journal - American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.

FAO (1974). FAO-UNESCO Soil Map of the World, 1:5.000.000. (1977) Africa, (1974), Volume VI , Africa (1974) Volume I, Legend. Rome, Italy.

FAO (1997). State of the World's Forests, Food and Agriculture Organization. Rome.

Neitsch, S., J.G., A., Williams, J., Temple Texas, USA: ARS Grassland, S., Service, W. R. & Center, T. B. R. (2000). Soil and Water Assessment Tool. User's Manual Version 2000.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. & R., W. J. (2005). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005. Temple Texas, USA: ARS Grassland, Soil and Water Research Service and TAES Blackland Research Center.

Projet Cartographie, évaluation et gestion des ressources en eau transfrontalières dans la sous-région IGAD



COMPOSANTE MODÉLISATION DES RESSOURCES EN EAU

La section modélisation des ressources en eau a conceptualisé et développé un modèle hydrologique pour l'évaluation des ressources en eau des bassins transfrontaliers identifiés dans la région de l'IGAD. Malgré le manque de données (données météorologiques, débits journaliers, etc.) qui ont limité le calage du modèle, plusieurs tentatives ont été menées pour assurer une estimation efficace des ressources en eau pour les bassins de l'IGAD.

L'évaluation de la performance hydrologique du modèle SWAT à un pas de temps journalier / mensuel pour les bassins de l'IGAD a fait face à de grands défis dans la base de données, en particulier concernant les observations journalières - un certain nombre d'observations sont manquantes. Le calage du modèle requiert la disponibilité des données d'écoulements fiables pour les grands fleuves dans les bassins en termes à la fois temporelle et spatiale. Ces données n'étaient pas disponibles pour l'étude actuelle. Par conséquent, l'étude a utilisé les données disponibles provenant d'autres sources qui sont éparses et pas exemptes d'erreurs. Par ailleurs, le modèle a permis de mieux comprendre la réponse hydrologique de plusieurs bassins versants de l'IGAD et l'utilisation potentielle de la ressource. Une étude de sensibilité simple a permis de réduire le défi lié au calage.

La modélisation des ressources en eau des Six (6) bassins fluviaux transfrontaliers identifiés (Danakil, Gash-Baraka, Turkana-Omo, Ayesha, Juba-Shebelle et Ogaden) représentent une première tentative de modélisation compréhensive de leurs ressources en eau dans la sous-région IGAD. Pour la plupart des bassins, l'estimation des ressources en eau annuelles disponibles ont été en bon accord avec les résultats d'autres études. Ainsi, de telles estimations pour tous les bassins ont besoins d'investigations supplémentaires avant de pouvoir être utilisé comme base de prise de décisions sur les bassins. Il y a besoin de collecter des données supplémentaires auprès des pays membres dès que le mécanisme de partage des données est mis en place.

Le modèle a évalué les ressources en eau disponibles pour les bassins transfrontaliers de l'IGAD à 182,8 km³ (111,3 km³ pour les eaux de surface et 71,5 km³ pour les eaux souterraines). Des données supplémentaires, en particulier, des débits journaliers à plusieurs endroits du bassin, sont nécessaires pour améliorer les simulations des ressources en eau ■

Observatoire du Sahara et du Sahel

Bd du Leader Y. Arafat, BP 31, 1080 Tunis Carthage, Tunisie
Tél. : (+216).71.206.633 - Fax : (+216).71.206.636
URL : www.oss-online.org - Email : boc@oss.org.tn

Facilité africaine de l'eau

Banque africaine de développement, BP 323 - 1002 Tunis(ie)
Tél. : (+216).71.103.971 - Fax : (+216).71.348.670
URL : www.africanwaterfacility.org - Email : africanwaterfacility.org

Intergovernmental Authority on Development

Avenue Georges Clemenceau, P.O. Box 2653 Djibouti
Tél. : (+253).354.050 - Fax : (+253).356.994
URL : www.igad.int