

UNIVERSITÉ MONTPELLIER II  
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Mécanique, génie mécanique, génie civil  
Formation Doctorale : Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental  
Ecole Doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau

présentée et soutenue publiquement

par

Sandra ARDOIN-BARDIN

Le 19 Avril 2004

Titre :

Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en  
eau de grands bassins hydrographiques en zone  
soudano-sahélienne

JURY

M. Michel Desbordes, Professeur, Université Montpellier II  
M. Eric Servat, Directeur de Recherche, IRD, Montpellier  
M. Lars Gottschalk, Professeur, Université d'Oslo, Norvège  
M. Pierre Ribstein, Professeur, Université Paris VI  
M. Alain Dezetter, Chargé de Recherche, IRD, Montpellier  
M. Sylvain Bigot, Maître de Conférence, Université Lille I  
M. Mike Bonell, Chef de Section, Unesco, Paris

Président  
Directeur de Thèse  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur



À Guillaume

À Amélie, Lise,  
et Victor.

## REMERCIEMENTS

Il y a quatre ans, lorsque je quittais famille et amis pour suivre le DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental, j'étais loin d'imaginer que je préparerais une thèse. Aujourd'hui, je compile un peu plus de trois longues années de recherche dans ces quelques pages. Et avec le recul, aussi infime soit-il, je me rends compte que cette thèse est certainement l'une des expériences les plus enrichissantes, tant du point de vue personnel que "professionnel", qu'il m'ait été donné de vivre, pour le moment. Au cours de ce travail de recherches, j'ai pu bénéficier du soutien et de l'appui de nombreuses personnes que je tiens à remercier ici.

Tout d'abord, mon directeur de thèse Éric Servat pour la confiance qu'il m'a accordée depuis le DEA. Au-delà d'un encadrement scientifique de qualité, Éric a toujours su prendre le temps de m'écouter, de me conseiller et de m'encourager. Je ne saurai trouver les mots justes pour lui exprimer toute ma gratitude, mais qu'il trouve dans ces quelques lignes une marque de respect et l'expression de mon admiration.

Pierre Ribstein, Professeur à l'Université Paris VI, et Lars Gottschalk, Professeur à l'Université d'Oslo, pour avoir accepté la lourde charge de rapporter ces travaux. Sylvain Bigot, Maître de Conférence à l'Université Lille I, pour le temps consacré à la critique d'une partie de ce manuscrit et pour avoir accepté de faire partie du jury. Mike Bonell, chef de section "Processus hydrologiques et climatiques" de l'Unesco à Paris, pour avoir accepté de participer à mon jury de soutenance pendant le Comité Exécutif de l'Unesco. Enfin, Michel Desbordes, Professeur à l'Université Montpellier II, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Merci, en particulier, à Alain Dezetter qui, m'encadrant depuis le DEA, a définitivement stoppé mon aversion pour les ordinateurs. Présent sur tous les fronts du développement informatique de ma thèse, il m'a fait découvrir les subtilités de la modélisation hydrologique et réconciliée avec la programmation. Je lui en suis particulièrement reconnaissante. Ses qualités humaines, sa disponibilité quotidienne et ses conseils avisés, tant sur le plan scientifique que personnel, font d'Alain quelqu'un que j'apprécie et estime énormément.

Merci encore à Claudine Dieulin. Tout d'abord pour la quantité et la qualité du travail qu'elle a réalisé pour ma thèse : constitution des grilles de données spatialisées, tracés des contours de bassins, réalisation de cartes, et bien d'autres choses encore. Ensuite, pour sa disponibilité sans faille, tant pour répondre à mes nombreuses questions sur l'utilisation d'un SIG que pour me conseiller dans des domaines plus personnels. Et enfin, pour toutes nos discussions passionnantes et surtout pour les franches parties de rigolades autour d'un café.

Je remercie très chaleureusement Hélène Lubès-Niel, dont les connaissances sur la modélisation hydrologique et l'utilisation des tests statistiques m'ont été maintes fois nécessaires. Par ses remarques constructives et son soutien, Hélène m'a apportée une aide précieuse pour l'orientation de mes recherches. Je lui en suis très reconnaissante.

Mes remerciements s'adressent également aux collègues de l'UMR Hydrosociétés, et plus spécialement à Nicole, Jean-François, Gil, Manu, Nathalie, Nadine, Christine et Khristine. Ils m'ont motivée, assistée, réconfortée sans relâche durant ces quatre longues années. Leur bonne humeur et leur gentillesse n'ont pas d'égal. Sans eux, cette thèse n'aurait pu aboutir.

Je tiens à remercier également tous ceux qui, scientifiques ou personnels des services hydrologiques et météorologiques nationaux, ont œuvré pour la réussite de cette thèse, en nous transmettant des données récentes ou en nous apportant un soutien méthodologique : Declan Conway et David Viner, Isabelle Pocard et Bernard Fontaine, Gaston Lienou et Daniel Sighomnou, Telesphore Brou Yao, Saramatou Kone, Sao Sangare, Robert Dessouassi, Abou Amani, Soussou Sambou, Nadji Tellro Wai. Je n'oublie pas non plus les stagiaires et vacataires qui ont travaillé sur des développements spécifiques d'une partie de mes travaux de recherche. Je pense à Sabine, Manu, Emma et Laurence.

Merci à ma famille et tous mes amis pour leur soutien moral. Enfin, merci à Guillaume pour m'avoir toujours encouragée et surtout supportée ma mauvaise humeur, les nuits blanches et la monopolisation quasi permanente de l'ordinateur ces dernières semaines.

# TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	- 1 -
INTRODUCTION .....	- 9 -
CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DU MILIEU ET PRÉSENTATION DES DONNÉES DE L'ÉTUDE .....	- 17 -
1. Présentation de la zone d'étude.....	- 19 -
1.1. Aspects climatiques.....	- 19 -
1.1.1. Unités climatiques.....	- 20 -
1.1.2. Précipitations .....	- 21 -
1.1.2.1. À l'échelle interannuelle.....	- 21 -
1.1.2.2. À l'échelle saisonnière.....	- 23 -
1.1.3. Autres paramètres climatiques .....	- 24 -
1.2. Aspects géomorphologiques.....	- 26 -
1.2.1. Relief .....	- 26 -
1.2.2. Géologie.....	- 27 -
1.2.3. Sols .....	- 28 -
1.2.4. Végétation.....	- 29 -
1.3. Régimes hydrologiques .....	- 30 -
1.4. Aspects socio-économiques.....	- 31 -
1.5. Choix des sous-bassins .....	- 34 -
2. Constitution de la banque de données.....	- 39 -
2.1. Choix de l'échelle spatio-temporelle.....	- 39 -
2.2. Données hydrologiques .....	- 40 -
2.2.1. Sources.....	- 40 -
2.2.2. Critique et comblement des lacunes.....	- 40 -
2.2.2.1. Élimination des données douteuses.....	- 40 -
2.2.2.2. Méthodes de reconstitution .....	- 41 -
2.2.2.2.1. Valeurs journalières.....	- 41 -
2.2.2.2.2. Valeurs mensuelles.....	- 41 -
2.2.2.2.3. Cas particuliers : les étiages .....	- 42 -
2.2.2.3. Données hydrologiques du bassin versant de la Gambie .....	- 42 -
2.2.2.4. Données hydrologiques du bassin versant du Sénégal.....	- 43 -
2.2.2.5. Données hydrologiques du bassin versant du Sassandra.....	- 45 -
2.2.2.6. Données hydrologiques du bassin versant du Logone-Chari .....	- 45 -
2.3. Constitution des grilles de données spatialisées .....	- 46 -
2.3.1. Construction des grilles de pluies .....	- 46 -
2.3.1.1. Données du CRU (Climatic Research Unit).....	- 46 -
2.3.1.2. Données de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement).....	- 47 -
2.3.2. Construction des grilles d'évapotranspiration .....	- 50 -
2.3.2.1. ETP Penman (PEN) .....	- 50 -
2.3.2.2. ETP Penman-Monteith (FAO) .....	- 51 -

2.3.2.3. ETP Thom et Oliver (TO) .....	- 52 -
2.3.3. Construction des grilles " sols" .....	- 52 -
2.3.3.1. Données FAO.....	- 53 -
2.3.3.2. Données Saxton.....	- 54 -
2.3.3.3. Données CRU .....	- 55 -
2.4. Synthèse sur la disponibilité des données.....	- 58 -
3. Conclusions : vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest et Centrale face aux variations climatiques .....	- 60 -
<b>CHAPITRE 2 : CARACTÉRISATION DE LA VARIABILITÉ HYDROCLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE .....</b>	<b>- 63 -</b>
1. La circulation atmosphérique tropicale.....	- 65 -
1.1. Éléments majeurs de la circulation atmosphérique au-dessus des régions étudiées .....	- 65 -
1.1.1. Les alizés .....	- 66 -
1.1.2. La mousson.....	- 66 -
1.1.3. La Zone de Convergence InterTropicale .....	- 67 -
1.2. Circulation atmosphérique et conditions hydroclimatiques.....	- 68 -
2. Analyse climatique diagnostique de la variabilité hydroclimatique de l'Afrique de l'Ouest et Centrale.....	- 68 -
2.1. Les réanalyses de données atmosphériques .....	- 69 -
2.1.1. Présentation des données de réanalyses .....	- 70 -
2.1.2. Diagnostic de la fiabilité des données de réanalyses NCEP/NCAR .....	- 74 -
2.1.2.1. Période homogène en Afrique Tropicale : 1968-1998 .....	- 75 -
2.1.2.2. Paramètres atmosphériques les plus fiables .....	- 75 -
2.1.2.3. Cas des précipitations.....	- 76 -
2.1.2.4. Résolution temporelle et échelle spatiale.....	- 79 -
2.2. Mousson ouest africaine et hydrologie de surface.....	- 80 -
2.2.1. Définitions des outils diagnostiques .....	- 80 -
2.2.1.1. Détermination des structures de variabilité .....	- 80 -
2.2.1.2. Les analyses composites .....	- 83 -
2.2.2. Hydrologie et champs météorologiques.....	- 85 -
2.2.2.1. Géopotential à 1000 hPa .....	- 85 -
2.2.2.2. Vitesse verticale à 400 hPa .....	- 86 -
2.2.2.3. Eau précipitable.....	- 87 -
2.2.2.4. Vitesses des vents à 925 hPa (composantes zonales et méridiennes).....	- 88 -
2.2.2.5. Flux de grande longueur d'onde .....	- 90 -
2.2.2.6. Analyses des composites.....	- 91 -
2.3. Dynamique atmosphérique en relation avec les anomalies hydrologiques.....	- 96 -
3. Approches statistiques et analyses des séries pluviométriques et hydrologiques.....	- 97 -
3.1. Méthodologie mise en œuvre .....	- 97 -
3.1.1. Utilisation d'indices pluviométriques.....	- 97 -
3.1.2. Tests statistiques de détection de rupture.....	- 98 -
3.1.2.1. Test de Pettitt .....	- 98 -
3.1.2.2. Statistique U de Buishand .....	- 99 -
3.1.2.3. Procédure bayésienne de Lee et Heghinian (1977) .....	- 99 -
3.1.2.4. Procédure de Segmentation de Hubert .....	- 100 -
3.1.3. Calcul des variations moyennes.....	- 101 -
3.1.4. Tests de permutation .....	- 101 -
3.2. Caractérisation d'une variabilité des pluies annuelles.....	- 104 -
3.2.1. Calcul des indices .....	- 104 -
3.2.2. Examen de l'homogénéité des séries.....	- 107 -
3.2.3. Test de permutation .....	- 110 -
3.2.4. Conclusions sur la variabilité des pluies annuelles entre 1970 et 2000 .....	- 112 -

3.3. Caractérisation d'une variabilité des écoulements annuels .....	- 112 -
3.3.1. Examen de l'homogénéité des séries.....	- 112 -
3.3.2. Test de permutation .....	- 117 -
3.3.3. Conclusions sur la variabilité des écoulements annuels entre 1970 et 2000 .....	- 118 -
4. Conclusions : modifications de la dynamique de la mousson ouest-africaine et persistance de la sécheresse .....	- 119 -
CHAPITRE 3 : LA MODÉLISATION PLUIE-DÉBIT : ÉVALUATION D'UN OUTIL POUR ÉTUDIER L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU .....	- 123 -
1. Choix d'un type de modélisation : avantages et limites .....	- 125 -
2. Présentation des modèles .....	- 127 -
2.1. Le modèle GR2M .....	- 128 -
2.2. Le modèle WBM (Water Balance Model).....	- 130 -
2.3. Principe d'application des modèles.....	- 132 -
3. Protocole d'identification et d'analyse des paramètres .....	- 132 -
3.1. Fonction objectif ou critère d'optimisation .....	- 133 -
3.2. Coefficients d'appréciation du bilan volumique .....	- 133 -
3.3. Méthodes numériques d'optimisation .....	- 135 -
3.3.1. Principe de la méthode de Rosenbrock (1960) .....	- 135 -
3.3.2. Principe de la méthode de Nelder et Mead (1964).....	- 136 -
4. Phase de calage .....	- 137 -
4.1. Analyse de l'influence du point de départ.....	- 137 -
4.1.1. Analyse des paramètres calés.....	- 139 -
4.1.2. Analyse des performances : comportement de la fonction critère .....	- 141 -
4.2. Identification des options optimales de modélisation .....	- 144 -
4.2.1. Meilleure combinaison de données d'entrée.....	- 145 -
4.2.2. Meilleure "période" de calage/validation.....	- 148 -
4.3. Analyse de la sensibilité des modèles aux paramètres.....	- 153 -
4.3.1. Calage/validation des modèles GR2M et WBM.....	- 154 -
4.3.2. Sensibilité des modèles aux paramètres en terme de performance de la fonction objectif .....	- 157 -
4.3.3. Sensibilité des modèles aux paramètres en terme de bilans volumiques .....	- 159 -
4.3.4. Conclusions sur la sensibilité des modèles aux paramètres .....	- 165 -
4.4. Analyse de la sensibilité des modèles aux données d'entrée.....	- 165 -
4.4.1. Sensibilité des modèles aux erreurs relatives de précipitations .....	- 165 -
4.4.2. Sensibilité des modèles aux erreurs relatives d'ETP .....	- 170 -
4.4.3. Sensibilité des modèles aux erreurs relatives de WHC.....	- 171 -
4.4.4. Conclusions sur la sensibilité des modèles aux données d'entrée .....	- 175 -
5. Protocole de calage pour tous les bassins étudiés .....	- 176 -
5.1. Description du protocole .....	- 176 -
5.2. Présentation des résultats.....	- 177 -
5.2.1. Calage-validation du modèle GR2M .....	- 177 -
5.2.2. Calage-validation du modèle WBM .....	- 184 -
5.3. Comparaison des modèles GR2M et WBM .....	- 190 -
6. Conclusions : performance et robustesse des modèles hydrologiques étudiés.....	-192 -

CHAPITRE 4 : LA QUESTION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE : QUELS SCÉNARIIS ET QUELS MODELES DEVONS-NOUS UTILISER EN AFRIQUE SUB-SAHARIENNE ? .....	- 193 -
1. Le changement climatique.....	- 195 -
1.1. Les mécanismes en jeu .....	- 195 -
1.1.1. L'effet de serre : un phénomène naturel amplifié par les activités humaines .....	- 196 -
1.1.1.1. Gaz à effet de serre.....	- 197 -
1.1.1.2. Aérosols .....	- 199 -
1.1.2. Conclusions sur l'effet de serre .....	- 200 -
1.2. Le bilan scientifique sur l'évolution du climat.....	- 201 -
1.2.1. Création d'un groupe d'experts scientifiques.....	- 201 -
1.2.2. Organisation du groupe.....	- 201 -
1.2.3. Les produits de l'IPCC .....	- 203 -
1.2.4. Bilan 2001 : changements observés et projections pour l'évolution future du système climatique .....	- 203 -
2. Les modèles de circulation générale .....	- 205 -
2.1. Structure des modèles climatiques.....	- 205 -
2.2. Faiblesses et incertitudes des modèles climatiques .....	- 207 -
2.3. Les modèles climatiques disponibles.....	- 208 -
2.4. Critères de sélection des sorties de modèles climatiques.....	- 209 -
3. Développements et applications des scénariis d'émissions.....	- 209 -
3.1. Nature et utilité des scénariis .....	- 210 -
3.2. Scénariis d'émissions du XX <sup>ème</sup> siècle.....	- 211 -
3.2.1. Description des familles de scénariis SRES .....	- 212 -
3.2.2. Comparaisons des familles de scénariis SRES.....	- 213 -
4. Comparaison des projections climatiques pour différents modèles sous plusieurs scénariis SRES.....	- 218 -
4.1. Les modèles climatiques retenus .....	- 218 -
4.2 Limitations.....	- 219 -
4.2.1. Résolution spatiale .....	- 219 -
4.2.2. Période d'étude.....	- 222 -
4.3. Comparaison des précipitations sur la période observée .....	- 223 -
4.3.1. Descriptions des critères retenus.....	- 223 -
4.3.2. Cas des précipitations annuelles .....	- 225 -
4.3.3. Cas des précipitations mensuelles.....	- 232 -
4.4. Comparaison des précipitations annuelles entre modèles et scénariis sur la période 1990-1998.....	- 234 -
4.4.1. Comparaison des modèles climatiques .....	- 234 -
4.4.2. Comparaison des scénariis .....	- 236 -
4.5. Comparaison des précipitations annuelles entre scénariis SRES sur la période 2000-2100 .....	- 239 -
4.6. Conclusions sur la comparaison modèles climatiques et scénariis d'émission SRES .....	- 245 -
5. Méthode d'élaboration de scénariis climatiques .....	- 246 -
5.1. Choix des variables d'intérêts .....	- 247 -
5.2. Recommandations .....	- 248 -
5.3. Utilisation d'une chronique d'anomalies .....	- 249 -
5.4. Utilisation des variations aux horizons.....	- 250 -
5.5. Conclusions sur la génération de scénariis climatiques .....	- 254 -
6. Conclusions : des sorties de modèles à l'élaboration de scénariis climatiques, outils pour l'évaluation des impacts du changement climatique.....	- 256 -

---

CHAPITRE 5 : IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU .....	- 259 -
1. Projections des conditions climatiques selon les scénarii élaborés .....	- 261 -
1.1. Évolution de l'évapotranspiration potentielle .....	- 261 -
1.2. Évolution des précipitations .....	- 265 -
1.3. Conclusions sur les précipitations et ETP issues des scénarii climatiques .....	- 272 -
2. Application des scénarii climatiques dans les modèles pluie-débit .....	- 272 -
2.1. Problème d'échelle.....	- 273 -
2.2. Hypothèses de modélisation .....	- 274 -
2.2.1. Capacité en eau du sol fixes.....	- 274 -
2.2.2. Choix du jeu de paramètres calés.....	- 275 -
2.3. Conclusions sur les hypothèses de modélisation .....	- 277 -
3. Études des impacts sur les ressources en eau .....	- 278 -
3.1. Évolution des débits moyens annuels .....	- 278 -
3.1.1. Études des séries chronologiques annuelles.....	- 279 -
3.1.2. Analyse de la distribution des séries de débits simulés.....	- 281 -
3.1.3. Taux de variation des écoulements moyens annuels.....	- 285 -
3.1.4 Conclusions sur les évolutions futures des écoulements annuels.....	- 292 -
3.2. Évolution des débits moyens mensuels .....	- 293 -
3.3. Conclusions sur l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau .....	- 297 -
4. Conclusions : différenciation régionale des impacts du changement climatique sur les ressources en eau .....	- 299 -
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	- 303 -
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	- 311 -
LISTE DES FIGURES .....	- 331 -
LISTE DES TABLEAUX.....	- 341 -
LISTE DES ABRÉVIATIONS .....	- 347 -
ANNEXES .....	- 351 -



# INTRODUCTION



## 1. Cadre de l'étude et problématique

Les ressources en eau : une préoccupation majeure des sociétés et des États africains

Depuis une vingtaine d'années, un intérêt soutenu se manifeste pour l'étude du climat et de sa variabilité, compte tenu des conséquences parfois dramatiques que celle-ci peut entraîner, quelle que soit la région de la planète considérée. Les implications de cette variabilité sur celle des ressources en eau sont particulièrement fortes et touchent, à leur tour, de très nombreux secteurs d'activités.

Les États africains, spécifiquement ceux de l'Afrique de l'Ouest et Centrale présentent une sensibilité accrue aux situations extrêmes (inondations, sécheresses) en raison de leur structure économique, sociale et démographique. Ces extrêmes entraînent fréquemment des déplacements massifs de population, une paralysie économique, et dans les situations les plus graves, famines et pertes de nombreuses vies humaines (à l'exemple de la sécheresse de 1983-1984). L'évolution des ressources en eau est par conséquent au cœur des préoccupations des États africains, mais également de la communauté scientifique.

### L'évaluation du changement climatique et de ses impacts

Le troisième rapport de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), rendu public au printemps 2001, met clairement en évidence les progrès accomplis au cours de ces dernières décennies par la communauté scientifique internationale en matière d'évolution des phénomènes climatiques. Basés sur l'utilisation de Modèles de Circulation Générale, ces travaux valident également des prévisions de plus en plus affinées sur l'évolution du climat en réponse au forçage d'origine anthropique de l'augmentation des gaz à effet de serre. Ces Modèles de Circulation Générale (MCG), bien qu'imparfaits, sont les seuls outils à notre disposition pour évaluer les impacts du changement climatique sur les ressources en eau.

Trois problèmes majeurs relatifs à l'utilisation des MCG peuvent cependant être soulevés. Tout d'abord, leur résolution n'est pas adaptée à celle de la modélisation hydrologique. À l'échelle de 2,5° carrés ou plus, il n'y a pas beaucoup d'applications hydrologiques pratiques, car la grande majorité des bassins versants des réseaux nationaux sont de taille inférieure à 100 000 km<sup>2</sup>. Ensuite, les différences entre les sorties de Modèles de Circulation Générale

sont très marquées (IPCC, 2001a). Enfin, les précipitations sont généralement peu réalistes : à partir de plusieurs Modèles de Circulation Générale, Casenave (2004) montre bien ce phénomène pour l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Pour augmenter la confiance dans les prévisions, il faut travailler à partir de champs de variations combinés aux observations. Cependant, ce n'est pas parce que certains modèles climatiques concordent dans leurs prévisions, que l'atmosphère répondra comme prévu par ces MCG aux forçages observés.

### Un contexte scientifique favorable

Les débats sur le développement durable et l'accès à la ressource en eau ont sensibilisé davantage la communauté scientifique sur les impacts du changement climatique, comme en témoignent les nombreux programmes de recherches internationaux et nationaux mis en œuvre ces dernières années, sur cette problématique.

Le lancement fin 2000 des travaux de recherche présentés ici s'inscrit pleinement dans ce contexte scientifique. Cela se traduit par :

- la participation au programme FRIEND-AOC (Flow Regimes from International and Experimental Network and Data – Afrique de l'Ouest et Centrale), projet phare du Programme Hydrologique International de l'UNESCO. Ce programme vise à approfondir les connaissances de la variabilité spatiale et temporelle des régimes hydrologiques ;
- la participation à des projets nationaux, portant plus spécifiquement sur la modélisation hydrologique (ECCO-PNRH).

Ce travail a également bénéficié de la mise en place de partenariats, aboutissant à la mise à disposition des données nécessaires au suivi des impacts du changement climatique : les réanalyses du National Centre for Environmental Prediction (Kalnay et al., 1996) auprès du Centre de Recherche en Climatologie (Dijon, France) ; les données climatiques spatialisées à la résolution du demi degré carré (New et al., 1999) auprès du Climate Research Unit (Norwich, U.K.) ; enfin, les données hydrologiques auprès du Centre Agrhymet (Niamey, Niger) et par le réseau de partenaires africains développé dans le cadre du projet FRIEND-AOC. Les rencontres avec ces différents partenaires ont été autant d'occasions de présenter les résultats et de faire évoluer la méthodologie mise en œuvre.

## 2. Problématique et objectifs

L'objectif de ce travail dérive d'un constat simple : compte tenu de la variabilité du climat et des conséquences parfois dramatiques que celle-ci peut entraîner, l'évolution des ressources en eau, pour les États africains de la zone soudano-sahélienne, est une question préoccupante, tant pour le développement économique (agriculture, énergie hydro-électrique) que pour le devenir des populations (santé, alimentation en eau potable, sécurité alimentaire). Il s'agit donc d'apporter une contribution hydrologique aux réflexions menées au sein de la communauté scientifique internationale, en terme de variabilité et d'instabilité du climat.

Les régions d'Afrique de l'Ouest et Centrale sont apparues d'autant plus pertinentes pour évaluer l'évolution des ressources en eau que :

- ces régions sont très fragilisées du point de vue environnemental (forte pression anthropique sur le milieu, déforestation, désertifications, dégradation des sols, etc.). Elles se révèlent ainsi un objet d'étude approprié pour traiter de la variabilité liée à celle du climat et de la modélisation des ressources en eau, dans la mesure où le développement de ces régions repose largement sur leur maîtrise ;
- ces régions sont celles pour lesquelles une importante masse de données a pu être collectées depuis de nombreuses années en partie par l'ORSTOM (aujourd'hui IRD). Cette information disponible constitue un support privilégié pour ces travaux de recherches.

C'est donc pour des bassins d'Afrique de l'Ouest et Centrale (Sénégal, Gambie, Sassandra, Logone-Chari) que l'on cherche à apporter des éléments de réponses aux questions suivantes : Quels indices climatiques identifier pour suivre et anticiper les grandes variations hydrologiques sur le continent africain ? À l'échelle régionale, quelle modélisation hydrologique mettre en œuvre pour appréhender et évaluer les éventuelles modifications sur les ressources en eau ? Comment cette modélisation hydrologique traduit-elle l'impact du changement climatique ?

L'objectif final est donc d'apporter des éléments précis de connaissances quant aux manifestations de la variabilité du climat et son lien avec celle des ressources en eau. Ceci permettra, à partir d'élaboration de différents scénarii climatiques, de contribuer à l'estimation et à la gestion durable des ressources en eau.

Les travaux entrepris s'organisent autour de trois axes de recherches :

- approfondir les connaissances de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques, et donc des ressources en eau. On analysera ici les relations entre les signatures caractéristiques de phénomènes climatiques et la variabilité spatio-temporelle des ressources en eau. À cette fin, l'analyse des séries concomitantes, variables hydrologiques d'une part, autres variables climatiques d'autre part, permettra de replacer cette variabilité hydrologique dans un contexte global. Il s'agit également d'exploiter les séries hydroclimatiques à l'aide de méthodes d'analyses statistiques robustes, comme l'identification de rupture ou l'utilisation du test de permutation, afin de replacer cette variabilité dans un contexte historique ;
- modéliser la production des ressources en eau à l'échelle des bassins versants de quelques milliers à quelques centaines de milliers de kilomètres carrés ou de grandes unités hydrographiques. Le développement ou l'amélioration de modèles hydrologiques travaillant sur de grandes unités d'espace et au pas de temps mensuel est nécessaire pour favoriser l'articulation des approches climatiques et hydrologiques. L'application de ces modèles par une approche semi-distribuée doit permettre de prendre en compte une certaine hétérogénéité des bassins versants (sols, végétation, etc.) et donc une différenciation spatiale des contributions à l'écoulement. Les approches de ce type, moins contraignantes que les approches distribuées qui nécessitent généralement des données nombreuses et peu disponibles, mais plus souples et satisfaisants qu'une approche strictement globale d'un point de vue hydrologique, constituent un outil intéressant dans le cadre d'une problématique tournée vers les impacts du climat sur les ressources en eau ;
- lier la variabilité du climat et la relation pluie-débit. Des scénarii climatiques, élaborés à partir des données de précipitations et de température issues des Modèles de Circulation Générale, seront appliqués aux modèles hydrologiques, afin d'analyser et de quantifier leurs impacts sur les écoulements des rivières et donc, sur les ressources en eau (évolution à long terme, modification des régimes).

Il faut garder à l'esprit qu'il ne rentre pas dans nos intentions de traiter nous même du déterminisme de cette variabilité et de cette instabilité du climat, domaine relevant d'autres compétences. Le but n'est pas non plus de fournir des prévisions fines d'évolution des ressources en eau aux échelles locale et régionale pour les décennies à venir. L'approche

proposée permet d'apporter des éléments de connaissances quant aux manifestations de la variabilité du climat et à leur lien avec la variabilité des ressources en eau.

### 3. Organisation du mémoire

Les quatre unités hydrographiques retenues sont découpées en sous-bassins versants. Pour chacun d'eux (42 au total), nous avons simulé les écoulements pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. La présentation exhaustive de l'ensemble des analyses menées pour ces bassins versants conduirait à un manuscrit trop dense. Aussi le texte est-il volontairement synthétique mais accompagné d'illustrations caractéristiques des résultats obtenus. Cette présentation permet de ne retenir que les éléments essentiels pour chaque unité hydrographique étudiée mais aussi de pouvoir plus aisément les comparer. Le mémoire est articulé en cinq chapitres.

Le premier chapitre présente le contexte géographique et climatique des quatre unités hydrographiques retenues pour cette étude, puis introduit les données utilisées pour constituer la base spatialisée préalable et nécessaire à la modélisation hydrologique.

Le deuxième chapitre est dévolu à la caractérisation de la variabilité hydroclimatique en Afrique de l'Ouest et Centrale sur la période 1950-2000. Cette caractérisation s'appuie sur des analyses climatiques diagnostiques (relation entre mousson ouest africaine et hydrologie de surface) et sur la mise en œuvre de tests statistiques de permutation et de détection de rupture dans les séries ; l'accent est mis sur la décennie 90, témoin de la persistance ou non de la sécheresse.

Le troisième chapitre présente les modèles de bilan hydrologique retenus. Le but est de tester la performance de ces modèles et d'évaluer leur sensibilité aux données d'entrée et aux variations sur leurs paramètres.

Le quatrième chapitre traite spécifiquement du changement climatique. Après un bref rappel des connaissances sur les mécanismes mis en jeu, il présente une évaluation de la fiabilité des sorties de Modèles de Circulation Générale ainsi que les méthodes utilisées pour construire des scénarii climatiques.

Enfin, le cinquième chapitre présente les principales caractéristiques des scénarii climatiques élaborés, ainsi que les impacts du changement climatique sur les ressources en eau. Les simulations d'écoulements pour le XXI<sup>ème</sup> siècle sont présentés et les résultats discutés.



CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DU MILIEU  
ET PRÉSENTATION DES DONNÉES DE  
L'ÉTUDE