



**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

THESE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Mécanique, génie mécanique, génie civil

Formation doctorale : Science de l'Eau dans l'Environnement Continental

Ecole Doctorale : SIBAGHE - Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosciences et Environnement

Présentée et soutenue publiquement

Par

Pierre DIELLO

Le 20 septembre 2007

Titre :

**Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé :
impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique.**

JURY

| | |
|--|--------------------|
| M. Eric SERVAT, Directeur de Recherche, IRD, Montpellier | Président |
| M. Gil MAHÉ, Directeur de Recherche, IRD, Montpellier | Directeur de Thèse |
| M. Pierre RIBSTEIN, Professeur, Université Pierre et Marie Curie, (Paris VI) | Rapporteur |
| M. Yao Téséphore BROU, Professeur, Université d'Artois, Arras | Rapporteur |
| M. Sylvain BIGOT, Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble | Examineur |
| M. Jean-Emmanuel PATUREL, CR HDR, Université Montpellier 2 | Examineur |
| M. Bruno BARBIER, CR, Université Montpellier 2 | Invité |

T ABLE DES MATIERES

| | |
|--|-------------|
| AVANT PROPOS----- | 7 - |
| RESUME----- | 9 - |
| ABSTRACT----- | 11 - |
| LISTE DES FIGURES----- | 13 - |
| LISTE DES TABLEAUX----- | 21 - |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE ----- | 25 - |
| PARTIE I : LE MODELE GR ₂ M DANS LE CONTEXTE SAHELIEEN ----- | 33 - |
| CHAPITRE I LE SAHEL OUEST AFRICAIN ----- | 35 - |
| I.1 Définitions et limites du Sahel ----- | 36 - |
| I.1.1 Définitions ----- | 36 - |
| I.1.2 Le Sahel géopolitique ----- | 36 - |
| I.1.3 Le Sahel bio-climatique----- | 37 - |
| I.1.4 Commentaires et discussion ----- | 40 - |
| I.2 Le milieu physique sahélien : caractéristiques essentielles ----- | 43 - |
| I.2.1 Géologie ----- | 43 - |
| I.2.2 Géomorphologie et sols----- | 45 - |
| I.2.3 Végétation ----- | 49 - |
| I.2.4 Un milieu sec sur fond d'aridité quasi permanente ----- | 50 - |
| I.2.4.1 Notion d'aridité----- | 51 - |
| I.2.4.2 Notion de sécheresse----- | 52 - |
| I.3 Mécanismes climatiques et ressources en eau au Sahel ----- | 53 - |
| I.3.1 La mousson Ouest africaine----- | 53 - |
| I.3.2 Variabilité pluviométrique au Sahel----- | 55 - |
| I.3.3 Variabilité hydrologique au Sahel ----- | 57 - |
| I.4 Milieu humain : Démographie et conditions socio-économiques ----- | 59 - |
| I.5 Conclusion sur le Sahel ----- | 61 - |

CHAPITRE II LES DONNÉES DE L'ÉTUDE----- - 63 -

| | | |
|-------------|--|-------------|
| II.1 | Données hydroclimatiques----- | 64 - |
| II.1.1 | Échelle spatiale et temporelle----- | 64 - |
| II.1.2 | Sources des données hydroclimatiques----- | 65 - |
| II.1.2.1 | Données de la banque SIEREM----- | 65 - |
| II.1.2.2 | Données du CRU----- | 65 - |
| II.1.3 | Grilles de pluie----- | 66 - |
| II.1.4 | Grilles d'évapotranspiration----- | 66 - |
| II.2 | Données de débit----- | 67 - |
| II.2.1 | Présentation des stations et données disponibles----- | 67 - |
| II.2.2 | Ruptures climatiques dans les séries de débit----- | 68 - |
| II.3 | Données WHC----- | 69 - |
| II.4 | Données Landsat----- | 73 - |
| II.4.1 | Présentation des images disponibles----- | 73 - |
| II.4.2 | Corrections radiométriques----- | 77 - |
| II.4.2.1 | Éléments de radiométrie----- | 77 - |
| II.4.2.2 | Nécessité des corrections atmosphériques----- | 79 - |
| II.4.2.3 | Séquence des corrections radiométriques effectuées----- | 82 - |
| II.4.2.4 | Séquence des corrections radiométriques appliquées à l'image ETM+ du 09/01/2003----- | 84 - |
| II.4.3 | Corrections géométriques des images----- | 86 - |
| II.5 | Données MODIS EVI à 250 m----- | 87 - |
| II.6 | Documents cartographiques----- | 87 - |
| II.7 | Données démographiques----- | 89 - |
| II.7.1 | Données disponibles----- | 89 - |
| II.7.2 | Organisation administrative du bassin en 1960, 1985 et 1996----- | 90 - |
| II.7.3 | Population sur le bassin----- | 92 - |
| II.7.4 | Données de natalité et de mortalité----- | 93 - |
| II.8 | Données des statistiques agricoles----- | 94 - |
| II.8.1 | A l'échelle nationale du Burkina Faso----- | 94 - |
| II.8.2 | A l'échelle du bassin du Nakambé à Wayen----- | 94 - |
| II.9 | Conclusion : synthèse sur les données de l'étude----- | 95 - |

CHAPITRE III LE MODÈLE GR₂M : CONCEPTS, PERFORMANCES ET ANALYSE DU FONCTIONNEMENT DU RÉSERVOIR SOL DANS LE CONTEXTE SAHÉLIEN- 97

| | | |
|--------------|---|--------------|
| III.1 | Concepts et architecture de GR₂M----- | 99 - |
| III.1.1 | Concepts des modèles GR (Génie Rural)----- | 99 - |
| III.1.2 | Le modèle GR ₂ M : architecture et fonctionnement----- | 100 - |
| III.2 | Performances de GR₂M au Sahel----- | 102 - |
| III.2.1 | Choix des périodes de calage et de validation----- | 103 - |
| III.3 | Synthèse des résultats----- | 104 - |
| III.3.1 | Performances en calage----- | 105 - |
| III.3.2 | Performances en validation----- | 107 - |
| III.3.3 | Hydrogrammes de simulation----- | 112 - |
| III.4 | Conclusions sur les tests de performance----- | 113 - |
| III.5 | Analyse du fonctionnement théorique du réservoir sol de GR₂M----- | 114 - |
| III.5.1 | Interprétation des équations régissant le fonctionnement du réservoir----- | 114 - |
| III.5.2 | Analyse de l'évolution du ratio $\left(\frac{H}{A}\right)^2$ au Sahel----- | 116 - |
| III.6 | Conclusion----- | 119 - |

**CHAPITRE IV PREMIÈRE TENTATIVE D'AMÉLIORATION DES
PERFORMANCES DE GR₂M AU SAHEL : CAS DU BASSIN DU NAKAMBÉ À
WAYEN ----- - 121 -**

| | | |
|-------------|--|--------------|
| IV.1 | Les données sol de la FAO pour le cas du Nakambé à Wayen ----- | 122 - |
| IV.2 | Recherche d'une WHC « optimum » pour le bassin du Nakambé à Wayen ---- | 124 - |
| IV.2.1 | Génération de nouvelles valeurs du réservoir à partir des fichiers sol de la FAO ----- | 124 - |
| IV.2.2 | Choix des périodes de calage et de validation ----- | 126 - |
| IV.2.3 | Protocole des tests de recherche de l'optimum ----- | 127 - |
| IV.3 | Résultats ----- | 129 - |
| IV.3.1 | Calage sur la période 1965-1972 et validations sur 1973-1986 ; 1987-1995 ; 1973-1995 - | 129 - |
| IV.3.1.1 | Résultats du calage sur la période 1965-1973 ----- | 129 - |
| IV.3.1.2 | Validation sur la période 1973-1986 ----- | 129 - |
| IV.3.1.3 | Validation sur la période 1987-1995 ----- | 130 - |
| IV.3.1.4 | Validation sur la période 1973-1995 ----- | 130 - |
| IV.3.1.5 | Synthèse des résultats du calage sur la période 1965-1972 et des validations sur 1973-1986 ; 1987-1995 ; 1973-1995 ----- | 131 - |
| IV.3.2 | Calage 1973-1986 et validation sur 1965-1972 et 1987-1995 ----- | 133 - |
| IV.3.2.1 | Résultats du calage 1973-1986 ----- | 133 - |
| IV.3.2.2 | Validation sur la période 1965-1972 ----- | 133 - |
| IV.3.2.3 | Validation sur la période 1987-1995 ----- | 134 - |
| IV.3.2.4 | Synthèse des résultats du calage 1973-1986 et des validations sur 1965-1972 et 1987-1995 ----- | 134 - |
| IV.3.3 | Calage sur la période 1987-1995 et validations sur 1965-1972 ; 1973-1986 et 1965-1986 ----- | 136 - |
| IV.3.3.1 | Calage 1987-1995 : résultats ----- | 136 - |
| IV.3.3.2 | Validation sur la période 1965-1972 ----- | 136 - |
| IV.3.3.3 | Validation sur la période 1973-1986 ----- | 137 - |
| IV.3.3.4 | Validation sur la période 1965-1986 ----- | 137 - |
| IV.3.3.5 | Calage 1987-1995 et validation sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986 : Synthèse des résultats - | 138 - |
| IV.4 | Synthèse et conclusion ----- | 139 - |

**PARTIE II : DYNAMIQUE DES ETATS DE SURFACE AU SAHEL : FACTEURS
CONDITIONNELS, INDICATEURS ET IMPLICATIONS HYDROLOGIQUES. --- - 141 -**

**CHAPITRE V FACTEURS CONDITIONNELS DE LA DYNAMIQUE DES ÉTATS DE
SURFACE AU SAHEL : INDICATEURS ET IMPLICATION HYDROLOGIQUES - 143 -**

| | | |
|------------|---|--------------|
| V.1 | Définition et rôle hydrologique des états de surface ----- | 144 - |
| V.1.1 | Définition ----- | 144 - |
| V.1.2 | Rôle hydrologique des états de surface ----- | 144 - |
| V.2 | Facteurs conditionnels de la dynamique des états de surface au Sahel ----- | 146 - |
| V.2.1 | Facteurs naturels ----- | 146 - |
| V.2.1.1 | Facteurs climatiques ----- | 146 - |
| V.2.1.2 | Facteurs physiques et pédologiques ----- | 147 - |
| V.2.2 | Facteurs anthropiques ----- | 147 - |
| V.2.2.1 | Occupation du sol ----- | 147 - |
| V.2.2.2 | Pratiques agropastorales « négatives » ----- | 148 - |
| V.2.2.3 | Les pratiques agropastorales « positives » ----- | 148 - |
| V.2.3 | La question démographique ----- | 152 - |
| V.2.3.1 | Relations population-ressource ----- | 152 - |
| V.2.3.2 | L'exemple du plateau central au Burkina Faso ----- | 153 - |
| V.3 | Modes de transformation du milieu ----- | 154 - |
| V.4 | Indicateurs d'évolution des états de surface ----- | 156 - |
| V.5 | Conclusion ----- | 159 - |

CHAPITRE VI CARACTÉRISATION DES INDICATEURS D'ÉVOLUTION DES ÉTATS DE SURFACE DANS LE SAHEL BURKINABÉ : APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION ----- - 161 -

| | | |
|-------------|---|--------------|
| VI.1 | Difficultés d'une bonne discrimination des sols nus et cultivés en milieu sahélien à l'aide d'images Landsat ----- | 162 - |
| VI.1.1 | Classification non supervisée de l'image ----- | 162 - |
| VI.1.2 | Identification des classes sur le terrain ----- | 164 - |
| VI.1.3 | Agrégation des classes ----- | 165 - |
| VI.1.4 | Matrice de confusion ----- | 168 - |
| VI.1.4.1 | Choix des échantillons ----- | 168 - |
| VI.1.4.2 | Tests de séparabilité des échantillons ----- | 169 - |
| VI.1.4.3 | Matrice de confusion ----- | 170 - |
| VI.1.5 | Nécessité d'une bonne connaissance du terrain ----- | 172 - |
| VI.2 | L'approche objet : la segmentation multi-resolution ----- | 173 - |
| VI.3 | L'approche photo interprétation assistée par ordinateur : PIAO ----- | 174 - |
| VI.3.1 | La Base de Données sur l'Occupation des Terres au Burkina ----- | 174 - |
| VI.3.2 | Adaptation de la nomenclature de la BDOT ----- | 174 - |
| VI.4 | Construction d'une base de connaissance par segmentation multispectrale et photo interprétation assistée par ordinateur (PIAO) ----- | 177 - |
| VI.5 | Application de la démarche aux images LANDSAT de 1972, 1986 ----- | 177 - |
| VI.5.1 | Cas des images de 1972 ----- | 177 - |
| VI.5.2 | Cas des images de 1986 ----- | 177 - |
| VI.5.3 | Cas des images de 1992 ----- | 178 - |
| VI.6 | Synthèse des résultats ----- | 178 - |
| VI.7 | Conclusion ----- | 179 - |

CHAPITRE VII DYNAMIQUE DÉMOGRAPHIQUE ET ÉTATS DE SURFACE SUR LE NAKAMBÉ À WAYEN : INTERRELATIONS ET SCENARI D'ÉVOLUTION -- - 181 -

| | | |
|--------------|--|--------------|
| VII.1 | Démographie et modèles de population ----- | 183 - |
| VII.1.1 | Théories de la dynamique des populations ----- | 183 - |
| VII.1.2 | Modèles mathématiques de la dynamique des populations ----- | 186 - |
| VII.1.3 | Fonction logistique et transition démographique ----- | 189 - |
| VII.2 | Modèle logistique de population pour le Burkina Faso ----- | 191 - |
| VII.2.1 | Définition et calibrage du modèle ----- | 191 - |
| VII.2.2 | Comparaison des résultats du modèle avec les projections des Nations Unies ----- | 194 - |
| VII.2.3 | Comparaison des résultats du modèle avec les projections l'I.N.S.D. ----- | 196 - |
| VII.2.4 | Conclusion partielle ----- | 197 - |
| VII.3 | Modèle logistique de population pour le bassin du Nakambé à Wayen ----- | 197 - |
| VII.3.1 | Rappel des données démographiques disponibles ----- | 197 - |
| VII.3.2 | Définition et calibrage du modèle ----- | 199 - |
| VII.4 | Dynamique démographique et superficies cultivées ----- | 201 - |
| VII.4.1 | A l'échelle du Burkina Faso ----- | 201 - |
| VII.4.2 | A l'échelle du bassin du Nakambé à Wayen ----- | 202 - |
| VII.4.2.1 | Évolution des superficies cultivées sur le bassin ----- | 202 - |
| VII.4.2.2 | Fonction logistique et superficies cultivées sur le bassin ----- | 205 - |
| VII.5 | Modèle logistique d'estimation des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen ----- | 206 - |
| VII.5.1 | Données initiales et finales du modèle ----- | 206 - |
| VII.5.2 | Calibrage du modèle ----- | 207 - |
| VII.6 | Mise en équation des variations des indicateurs ----- | 209 - |
| VII.6.1 | Équation d'état du bassin ----- | 209 - |
| VII.6.2 | Équations de variations des surface en végétation naturelle ----- | 209 - |
| VII.6.3 | Équations de variation des surfaces cultivées ----- | 211 - |
| VII.6.4 | Équations de variation des sols nus ----- | 213 - |

| | | |
|---|---|--------------|
| VII.6.5 | Synthèse des équations ----- | 214 - |
| VII.7 | Modèle d'évolution des surfaces en végétation naturelle ----- | 216 - |
| VII.7.1 | Définition du modèle et hypothèse sur les conditions initiales ----- | 216 - |
| VII.7.2 | Résultats du calibrage du modèle ----- | 217 - |
| VII.8 | Modèle d'évolution des sols nus et des plans d'eau ----- | 218 - |
| VII.8.1 | Évolution de la somme « sols nus + plans d'eau »----- | 218 - |
| VII.8.2 | Détermination de l'évolution des plans d'eau sur le bassin ----- | 218 - |
| VII.8.3 | Détermination de l'évolution des sols nus sur le bassin ----- | 220 - |
| VII.9 | Synthèse des résultats ----- | 221 - |
| VII.10 | Conclusion ----- | 223 - |
| PARTIE III : VERS UNE MODELISATION HYDROLOGIQUE PRENANT EN COMPTE L'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE : CAS DU NAKAMNE A WAYEN. | | 225 - |
| CHAPITRE VIII TRANSCRIPTION DE L'ÉVOLUTION DES ÉTATS DE SURFACE DANS LA WHC DU MODÈLE GR2M ----- | | 227 - |
| VIII.1 | La WHC : interface modèle hydrologique - états de surface ----- | 228 - |
| VIII.2 | Échelle temporelle d'évolution du milieu et pas de temps de GR2M ----- | 229 - |
| VIII.3 | Modulation de la WHC ----- | 230 - |
| VIII.3.1 | Hypothèse d'un « état initial fictif » du milieu ----- | 230 - |
| VIII.3.2 | Modulation de la WHC de l'état zéro à l'état initial T_0 ----- | 231 - |
| VIII.3.3 | Modulation de la WHC de l'état initial T_0 à un état ultérieur T ----- | 234 - |
| VIII.4 | Application au cas du Nakambé à Wayen ----- | 237 - |
| VIII.4.1 | Données WHC de la carte des sols de la FAO ----- | 237 - |
| VIII.4.2 | Calcul de la WHC du bassin de 1963 à 2002 ----- | 238 - |
| VIII.4.2.1 | Exemple de calcul : détermination de la WHC en 1972 à partir de celle de 1963 ----- | 239 - |
| VIII.4.2.2 | WHC évolutive entre 1963 et 2002----- | 243 - |
| VIII.5 | Conclusion ----- | 244 - |
| CHAPITRE IX PERFORMANCES DE GR2M AVEC DES DONNÉES ÉVOLUTIVES DE WHC : CAS DU BASSIN DU NAKAMBÉ À WAYEN ----- | | 245 - |
| IX.1 | Protocole et périodes de calage-validations ----- | 247 - |
| IX.1.1 | Choix des périodes de calage-validations----- | 247 - |
| IX.1.2 | Protocole de calage-validation ----- | 247 - |
| IX.2 | Résultats des performances de GR2M avec les WHC logistiques ----- | 248 - |
| IX.2.1 | Résultats du calage 1965-1972 et des validations sur les périodes 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 ----- | 252 - |
| IX.2.2 | Résultats du calage 1973-1986 et des validations sur les périodes 1965-1972 et 1987-1995 ----- | 254 - |
| IX.2.3 | Résultats du calage 1987-1995 et des validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986 ----- | 256 - |
| IX.2.4 | Calage 1965-1975 et validation 1976-1995 ----- | 258 - |
| IX.2.5 | Calage 1965-1985 et validation 1986-1995 ----- | 259 - |
| IX.2.6 | Synthèse des performances avec les WHC évolutives ----- | 260 - |
| IX.3 | WHC fixe Vs WHC logistique : comparaison des performances dans GR2M - | 261 - |
| IX.3.1 | Calage 1965-1972 et validations sur 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 ----- | 261 - |
| IX.3.2 | Calage 1973-1986 et validations sur 1965-1972 et 1987-1995 ----- | 264 - |
| IX.3.3 | Calage 1987-1995 et validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1995 ----- | 266 - |
| IX.3.4 | Calage 1965-1975 et validation sur 1976-1995 : WHC fixe Vs WHC logistique ----- | 269 - |
| IX.3.5 | Calage 1965-1985 et validation sur 1986-1995 : WHC fixe Vs WHC logistique ----- | 271 - |
| IX.4 | WHC linéaire Vs WHC logistique : comparaison des performances dans GR2M ----- | 272 - |
| IX.5 | Conclusion ----- | 279 - |

| | |
|--|------------|
| CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES | 281 |
| REFERNCES BIBLIOGRAPHIQUES | 291 |
| ANNEXES | 305 |
| ARTICLES ET COMMUNICATIONS | 367 |

AVANT PROPOS

Chaque thèse a son histoire, ses anecdotes, ses déboires... S'il m'était donné de raconter l'histoire de la mienne, elle pourrait très bien commencée comme ceci : « ... et même qu'une après midi du 27 juillet 2007, j'ai failli perdre tout mon travail dans l'incendie qui a ravagé mon bureau ce jour là...»

Que d'émotions, de sueurs froides de larmes et de découragement... La thèse est une aventure difficile qui nous amène bien souvent au bout de nous même à tel point qu'elle ne saurait être l'œuvre d'une seule personne. S'il m'était donc donné de raconter l'histoire de la mienne, je commencerai par dire tout simplement merci !

Merci aux sapeurs pompiers de la ville de Ouagadougou pour leur intervention rapide le jour de l'incendie. Elle a permis de limiter les dégâts. Sans eux, ces lignes n'auraient peut être jamais vu le jour...

Je suis extrêmement reconnaissant à M. Eric SERVAT, directeur de recherche de l'IRD Montpellier et au Professeur Michel DESBORDES, qui m'ont fait confiance en m'acceptant en DEA puis en thèse au sein du laboratoire HydroSciences Montpellier.

Tous mes remerciements vont à M. Paul GINIES (Directeur Général de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement- 2IE), à M. Hama Amadou MAÏGA, Directeur Général Adjoint du même institut, à M. Hama YACOUBA responsable de l'Unité Thématique d'Enseignement et de Recherche – Gestion Valorisation Eau Assainissement (UTER-GVEA) du 2IE qui m'ont permis de terminer cette thèse au sein du 2IE en tant qu'assistant de recherche.

Je tiens à remercier les enseignants et chercheurs d'HydroSciences en particulier aux chercheurs de l'axe 3, pour leur sympathie et aussi pour toutes les fois où ils m'ont posé la redoutable question à laquelle aucun thésard n'échappe : « ... Et alors, tu en es où avec cette thèse ?... » Cette question est pourtant simple et claire. Mais que de balbutiements pour y répondre quand on est soi-même en train de se la poser.

J'ai une pensée particulière à M Pascal KOSUTH, directeur de l'UMR TETIS pour m'avoir permis d'utiliser le logiciel Ecognition au sein de la Maison de la Télédétection de Montpellier.

Un grand merci à Claudine DIEULIN pour sa disponibilité à répondre à mes nombreuses questions concernant les SIG. Son expérience et sa grande maîtrise des SIG font qu'on peut affectueusement et légitimement la surnommée « Mme trucs et astuces SIG ». Merci encore Claudine.

Que M. MAHE et M. PATUREL trouvent ici mes plus sincères remerciements pour l'initiation à la recherche qu'ils m'ont enseignée, les précieux conseils et les aides de toute nature dont j'ai bénéficié dont je continue de bénéficier depuis maintenant cinq ans.

Un grand merci à Harouna KARAMBIRI pour son amitié et ses encouragements.

Merci à l'équipe de la cellule SIG d'AGRHYMET pour m'avoir permis de rassembler les images LANDSAT utilisées dans ce travail. Mes pensées vont particulièrement à M. Alfari Issoufou et à M. Issa GARBA pour leur assistance.

Que Joëlle et Catherine de la documentation de la MSE trouvent ici ma sympathie et ma reconnaissance pour leur disponibilité et leur dévouement à m'aider dans mes recherches de documents bibliographiques.

Tous mes remerciements et mes encouragements aux thésards de la MSE pour leur solidarité et leur sympathie.

RESUME

Les modèles mathématiques en hydrologie sont d'indispensables outils de prévision et de gestion, même si, de façon générale, leur utilisation à des fins opérationnelles reste encore limitée. Arriver à des modèles scientifiquement fondés, relativement simples, robustes, et capables de produire, à des échelles d'espace et de temps données, des résultats de simulations satisfaisants, est un des challenges majeurs des recherches en hydrologie, en particulier dans les régions où la question de l'eau est une véritable contrainte pour le développement. Notre intérêt se porte sur le modèle GR2M (développé au CEMAGREF) dans le contexte sahélien. Les études menées depuis une vingtaine d'années montrent que l'effet conjoint du changement climatique et des activités humaines sur les états de surface est à l'origine du « paradoxe hydrologique » observé depuis les années 1970 sur certains bassins versants de cette région. Les coefficients d'écoulement ont, en effet, très fortement augmenté, entraînant des écoulements plus importants qu'auparavant, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale. Ces modifications de la relation pluie-débit nécessitent de nouvelles approches permettant de prendre en compte conjointement la variabilité climatique et la dimension anthropique dans la modélisation hydrologique de ces bassins.

Cette étude a pour objectif d'intégrer dans le modèle hydrologique GR2M une composante environnementale et humaine par le biais de la WHC (Water Holding Capacity) des sols. Cette donnée, prise comme interface entre le modèle hydrologique et les états de surface, est assimilée à la hauteur maximale du réservoir sol de GR2M. Quatre indicateurs de pression anthropique et climatique sont définis : il s'agit des pourcentages de surfaces en végétation naturelle, en culture, en sols nus, et en plans d'eau. Ces indicateurs sont caractérisés à partir d'images satellites LANDSAT acquises en 1972, 1986, 1992 et 2002 pour le cas particulier du bassin du Nakambé à Wayen. A partir d'une base de données de statistiques agricoles et démographiques, un modèle de population, basé sur une fonction logistique est calibré et validé sur le bassin. L'évolution annuelle des indicateurs sur le bassin en est ensuite déduite. Une méthodologie de transcription de la dynamique des indicateurs est développée. Elle permet de produire des données annuelles de WHC intégrant à la fois l'évolution du milieu et la croissance de la population sur le bassin.

Comparés aux résultats des simulations pour des WHC fixes dans le temps, l'utilisation de données évolutives de capacité en eau du sol apporte des améliorations très significatives dans les performances du modèle.

Mots clés : Variabilité hydrologique, Variabilité climatique, activités anthropiques, état de surface, modélisation hydrologique, modélisation démographique, Burkina Faso, Sahel

Climate Human and environment relationship in the sahhelian part of Burkina Faso: impacts on land use land cover and hydrological modelling

ABSTRACT

Numerical models in hydrology are indispensable prediction tools for water management. One of the most challenging tasks in hydrology is to find simple and robust models, able to satisfactorily simulate river regimes for specific space and time scales. This is particularly true in regions where water related studies are key issues for development. The model used in this study is GR2M (developped at CEMAGREF), and the study area is the Sahel. Studies have shown that the combined effect of climate change and anthropogenic activities on land-cover is responsible for the Sahelian « hydrological paradox », observed since the beginning of the 1970s over several river basins in the Sahel. Indeed, runoff coefficients have strongly increased, leading to greater runoff than before the 1970s, although the regional rainfall have deeply decreased in the meantime. The related modifications of the rainfall-runoff relationships need to be studied according to new approaches, which should include in some way in the hydrological model parameters linked to the climatic variability as well as the anthropogenic activities.

This study has for main goal to integrate in the hydrological model GR2M both climatic/environmental and anthropogenic components, via the WHC (Water Holding Capacity) of soils. The WHC constitutes the interface between the model and the land-cover, and is taken as the maximum height of the soil water reservoir of the GR2M model. Four indexes of anthropogenic and climatic pressure are defined i.e. : surfaces of natural vegetation (including fallows), bare soils, cultures and open water. These indexes are characterized from LANDSAT images taken in 1972, 1986, 1992 and 2002, which cover the surface of the Nakambe basin at the Wayen gauging station. A population model, based on a logistic function, is calibrated and validated for the basin area from statistic data of agriculture and demography. It is used to build the annual evolution of WHC over the basin between the dates of the LANDSAT images, according to a specific methodology of transcription of land-cover change into WHC change, via runoff coefficient data given by the literature. Thus “time-varying” WHC data series are build, which take into account climatic variability, environmental change and population growth. The results are compared to runs of the same model with a WHC “fixed” in time, which is commonly used up to now due to lack of land-cover and population change data series. Using the “time-varying” WHC data series significantly increases the model performances (NASH criteria) and its ability to correctly reproduce the river regime.

Key words: Hydrological variability, climatic variability, human activities, land cover, hydrological modelling, demography, Burkina Faso, Sahel

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|--------|
| Figure I-1 : Le Sahel géopolitique..... | - 37 - |
| Figure I-2 : Limites du « Sahel hydrologique » à partir du tracé des isohyètes sur les périodes 1925-1950 et 1951-1989..... | - 40 - |
| Figure I-3 : Répartition géographique des bassins sahéliens de rive droite du fleuve Niger et du bassin du Nakambé..... | - 42 - |
| Figure I-4: Présentation du Sahel hydrologique..... | - 43 - |
| Figure I-5: Carte géostructurale simplifiée de l'Afrique de l'Ouest (d'après Unesco, 1971; cité par Casenave et Valentin, 1988) | - 45 - |
| Figure I-6 : Esquisse des sols de l'Afrique de l'Ouest (d'après Casenave et Valentin, 1988) | - 46 - |
| Figure I-7 : Profil géomorphologique typique des régions sahéliennes (d'après Vlaar, 1992) - | 48 - |
| Figure I-8 : Principaux types de végétation en Afrique de l'Ouest (d'après le CD-ROM du Global Ecosystem Database / NOAA-EPA)..... | - 49 - |
| Figure I-9 : Positions du Front intertropical (FIT) et leur balancement au cours de l'année (d'après Atlas Jeune Afrique, 1993) | - 54 - |
| Figure I-10 : Zones de type temps associés au FIT (d'après Atlas Jeune Afrique, 1993) | - 55 - |
| Figure I-11 : Variation de l'indice pluviométrique au Sahel et évolution du nombre de stations de mesure (d'après L'hôte et al., 2002)..... | - 56 - |
| Figure I-12 : Évolution de l'hydraulicité moyenne calculée à partir de modules du Sénégal, du Niger et du Chari (d'après Olivry, 1994) | - 58 - |
| Figure I-13: Évolution de la population de 6 pays sahéliens de 1960 à 2000 (Source : Statistiques démographiques de la FAO) | - 59 - |
| Figure II-1 : Carte des bassins retenus | - 68 - |
| Figure II-2 : WHC FAOmax de 6 bassins de rive droite du Fleuve Niger | - 71 - |
| Figure II-3 : Valeurs de WHC FAOmax pour le bassin du Nakambé à Wayen..... | - 72 - |
| Figure II-4 : Présentation des images Landsat disponibles | - 76 - |
| Figure II-5 : Principe de la télédétection et modélisation du cheminement du signal et de ses perturbations (d'après Caloz et Collet, 2001) | - 78 - |
| Figure II-6 : Déplacement supposé de l'histogramme de chaque bande (dans un ordre croissant de fréquence dû à un effet atmosphérique différencié (fort dans le bleu et diminuant en direction des plus grandes longueurs d'onde (d'après Jensen, 1986; in Caloz et Collet, 2001) | - 83 - |

| | |
|--|-------|
| Figure II-7 : Décalage des histogrammes des 5 bandes de l'image Landsat-7 ETM+ du 09/01/2003 du fait des effets atmosphériques | 85 - |
| Figure II-8 : Composition de huit cartes topographiques au 1/200 000 couvrant le bassin du Nakambé (en haut). Zoom sur le lac de Bam dans la région de Kongoussi (en bas)..... | 88 - |
| Figure II-9 : Carte d'occupation du sol au Yatenga en 1973 à partir de Marchal (1983)..... | 89 - |
| Figure II-10 : Organisations administratives du bassin du Nakambé à Wayen de 1960 à 1996- | 91 - |
| - | |
| Figure II-11 : Répartition des densités de population et estimation de la population sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1960, 1975, 1985 et 1996. | 92 - |
| Figure II-12 : Superficies cultivées au Burkina Faso de 1960 à 2003. Comparaison entre données nationales et données FAO | 94 - |
| Figure II-13 : Évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen..... | 95 - |
| Figure III-1 : Architecture du modèle GR2J (Edijatno, 1991) | 100 - |
| Figure III-2 : Schéma de fonctionnement de GR2M | 101 - |
| Figure III-3 : Schéma de fonctionnement de la modélisation entreprise par l'équipe VAHYNE d'HydroSciences Montpellier (d'après Girard, 2002) | 102 - |
| Figure III-4 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de 5 bassins testés (pluie du CRU). Les périodes de calage commencent toutes en 1961 (1962 pour Diongoré). - | 105 - |
| Figure III-5 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de 5 bassins testés. La pluie utilisée en entrée est celle de la grille du CRU. Les périodes de calage commencent toutes en 1970. | 105 - |
| Figure III-6 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de cinq bassins testés (pluie SIEREM). Les périodes de calage commencent toutes à 1961 (1962 pour Diongoré).. - | 106 - |
| Figure III-7 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de cinq bassins testés. La pluie utilisée en entrée est celle de la grille SIEREM. Les périodes de calage commencent toutes en 1970 | 106 - |
| Figure III-8 : Débits moyens mensuels observés et calculés aux exutoires des 5 bassins retenus pour l'évaluation des performances du modèle | 112 - |
| Figure III-9 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1971-1995 : station d'Alcongou..... | 116 - |
| Figure III-10 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1970-1992 : station de Diongoré..... | 117 - |
| Figure III-11 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1970-1992 : station de Koriziena | 117 - |

| | |
|--|---------|
| Figure III-12 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1971-1995 : station de Tera..... | - 117 - |
| Figure III-13 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1971-1995 : station de Wayen..... | - 118 - |
| Figure IV-1 : Cartographie des valeurs des WHC sur le bassin du Nakambé à Wayen..... | - 123 - |
| Figure IV-2 : Hydrogrammes moyens des trois périodes de calage retenues (Wayen) | - 126 - |
| Figure IV-3 : Schéma des tests en calage validation pour le cas de WHC FAOmax..... | - 128 - |
| Figure IV-4: NASH de validation sur la période 1973-1986 en fonction de la WHC..... | - 129 - |
| Figure IV-5 : NASH de validation sur la période 1987-1995 en fonction de la WHC..... | - 130 - |
| Figure IV-6 : NASH de validation sur la période 1973-1995 en fonction de la WHC..... | - 131 - |
| Figure IV-7 : Hydrogrammes moyens de la période de calage 1965-1972 et des périodes de validation 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995..... | - 132 - |
| Figure IV-8: NASH de validation sur la période 1965-1975 en fonction de la WHC..... | - 133 - |
| Figure IV-9 : NASH de validation sur la période 1987-1995 en fonction de la WHC..... | - 134 - |
| Figure IV-10 : Hydrogrammes moyens de la période de calage 1973-1986 et des périodes de validation 1965-1972 et 1987-1995..... | - 135 - |
| Figure IV-11: NASH de validation sur la période 1965-1972 en fonction de la WHC..... | - 136 - |
| Figure IV-12 : NASH de validation sur la période 1973-1986 en fonction de la WHC..... | - 137 - |
| Figure IV-13 : NASH de validation sur la période 1965-1986 en fonction de la WHC..... | - 137 - |
| Figure IV-14 : Hydrogrammes moyens de la période de calage 1987-1995 et des périodes de validation 1965-1972 et 1973-1986, et 1965-1986..... | - 138 - |
| Figure V-1 : Technique du Zaï au Nord du Burkina Faso (Bassin de Tougou) | - 149 - |
| Figure V-2 : Technique de demi-lune au Nord du Burkina Faso (bassin versant de Tougou) - | 149 - |
| Figure V-3 : Expansion de la technique du Zaï au Burkina Faso (d'après Kaboré et Reij, 2003).... | - 150 - |
| Figure V-4 : Barrière d'andropogons dans l'Est du Burkina Faso (Bassin de la Sirba un affluent de rive droite du fleuve Niger) | - 151 - |
| Figure V-5 : Cordons pierreux associé au Zaï (in Kabore et Reij, 2003). | - 151 - |
| Figure V-6 : Technique du paillage à l'Est du Burkina Faso sur le bassin de la Sirba (affluent de rive droite du fleuve Niger)..... | - 152 - |
| Figure V-7 : Modes de transformation du milieu au Sahel d'après l'analyse des pratiques agropastorales | - 155 - |
| Figure V-8 : Transformation du milieu par urbanisation et aménagements hydro agricoles - | 155 - |
| Figure V-9 : Localisation des sites de mesure du ruissellement de Fournier et al., (2000) et de Yacouba et al., (2002) | - 158 - |

Figure VI-1 : Composition colorée de l'image Landsat-ETM+ du 09/01/2003 (image en haut à gauche) et classification non supervisée par maximum de vraisemblance à l'intérieur du bassin (image du milieu) et zoom sur le lac de Bam (image du bas).....**Erreur ! Signet non défini.**

Figure VI-3 : Reconnaissance des classes image par visite de terrain. Exemples d'illustration- 166 -

Figure VI-4 : Agrégation des classes : image classée en 4 classes - 167 -

Figure VI-5 : Parcelles d'entraînement pour la construction de la matrice de confusion. Plan d'eau (bleu), végétation (vert), cultures (jaune) et sols nus (rouge)- 168 -

Figure VI-6 : Culture sous bois dans la région de Kongoussi dans la partie Nord du bassin du Nakambé à Wayen - 169 -

Figure VI-7 : Adaptation de la nomenclature de la BDOT pour l'occupation du sol de 2002 - 175 -

Figure VI-8 : Adaptation de la nomenclature de la BDOT pour l'occupation du sol en 1992. - 176 -

Figure VI-8 : Occupation du sol sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1972- Résultats de la classification des images de 1972 - 177 -

Figure VI-9 : Occupation du sol sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1986- Résultats de la classification des images de 1986 - 178 -

Figure VI-11 : Synthèse des résultats de la classification des images LANDSAT sur le bassin du Nakambé à Wayen - 178 -

Figure VII-1 : Les quatre phases de la transition démographique- 184 -

Figure VII-2 : Allure générale de la courbe logistique (forme en "S" aplati ou sigmoïde)- 189 -

Figure VII-3 : Modélisation de la transition démographique au Burkina Faso (d'après Ruas et Benoit-Cattin, 1991) - 192 -

Figure VII-4 : Résultat de la modélisation des taux de natalité et de mortalité du Burkina Faso à partir d'une fonction logistique - 193 -

Figure VII-5 : Modélisation de l'évolution de la population du Burkina Faso à partir d'une fonction logistique..... - 194 -

Figure VII-6 : Comparaison entre les résultats du modèle et les projections des Nations Unies sur la population du Burkina Faso - 195 -

Figure VII-7 : Comparaison entre les résultats du modèle et les projections de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina Faso..... - 197 -

Figure VII-8 : Estimation de la population totale du bassin du Nakambé à Wayen de 1960, 1975, 1985 et 1996..... - 198 -

Figure VII-9 : Modélisation de la natalité et de la mortalité sur le bassin du Nakambé à Wayen... - 199 -

Figure VII-10 : Modélisation de l'évolution de la population sur le bassin du Nakambé à Wayen . - 200 -

Figure VII-11 : Évolution des superficies cultivées et de la population agricole au Burkina Faso au cours du 20^{ème} siècle - 201 -

Figure VII-12 : Population agricole et superficies cultivées au Burkina Faso au cours du 20^{ème} siècle - 202 -

Figure VII-13 : Évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1972, 1986, 1992 et 2002..... - 203 -

Figure VII-14 : Quatre modèles d'ajustement pour l'évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé sur le période 1972-2002..... - 204 -

Figure VII-15 : Relation population superficies cultivées sur le bassin du Nakambé au cours du 20^{ème} siècle..... - 207 -

Figure VII-16 : Estimation de l'évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen à l'aide d'un modèle de population - 208 -

Figure VII-17 : Modélisation de l'évolution de la population et des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen à partir d'une courbe logistique - 208 -

Figure VII-18 : Scénarii d'évolution des surfaces en végétation naturelle..... - 210 -

Figure VII-19 : Scénarii d'évolution des surfaces cultivées - 212 -

Figure VII-20 : Scénarii d'évolution des sols nus - 213 -

Figure VII-21 : Scenarii d'évolution des plans d'eau - 215 -

Figure VII-22 : Estimation de l'évolution des superficies en végétation naturelle sur le bassin du Nakambé à Wayen à l'aide d'un modèle de population - 217 -

Figure VII-23 : Modèle d'évolution de la somme "sols nus + plans d'eau" à partir de l'équation d'état du bassin et des modèles de végétation et de culture - 218 -

Figure VII-24 : Barrages et retenues d'eau sur le bassin du Nakambé à Wayen (d'après la base de données BDLB du PNGIM-1999) - 219 -

Figure VII-25 : Évolution de la superficie occupée par les plans d'eau sur le bassin du Nakambé à Wayen de 1944 à 2002 - 220 -

Figure VII-26 : Contributions relatives des plans d'eau et des sols nus au modèle $S_{Sn} + S_{Pe}$. - 220 -

Figure VII-27 : Modèle d'évolution des sols nus sur le bassin du Nakambé à Wayen entre 1940 et 2002..... - 221 -

Figure VII-28 : Estimations de l'évolution des quatre indicateurs et de la population de 1944 à 2002 sur le bassin du Nakambé à Wayen - 221 -

Figure VIII-1 : Modification des proportions des états de surface entre deux dates T_0 et T sous l'effet de l'homme et du climat - 229 -

| | |
|---|---------|
| Figure VIII-2 : Mode de transformation du milieu avec l'hypothèse d'un état fictif constitué à 100% de végétation naturelle | - 230 - |
| Figure VIII-3 : Modulation de la WHC pour un milieu qui, initialement en végétation naturelle, évoluerait vers un état anthropisé constitué des 4 types d'états de surface. | - 233 - |
| Figure VIII-4 : Modulation de la WHC pour un milieu passant d'un état initial anthropisé vers un autre état anthropisé avec des proportions différentes pour les 4 types d'états de surface.... | - 236 - |
| Figure VIII-5 : Évolution logistique de la WHC entre 1963 et 2002 sur le bassin du Nakambé à Wayen | - 243 - |
| Figure IX-1 : Dix sept jeux de données pour l'évaluation des performances de GR2M avec des données évolutives et fixes de WHC..... | - 248 - |
| Figure IX-2 : Résultats des performances de GR2M avec des WHC logistiques. NASH de calage en fonction du NASH de validation pour les 10 périodes de calage-validations | - 249 - |
| Figure IX-3 : Hydrogramme de simulation pour la période 1973-1986 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972 | - 252 - |
| Figure IX-4 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1973-1986..... | - 252 - |
| Figure IX-5 : Hydrogramme de simulation pour la période 1987-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972 | - 253 - |
| Figure IX-6 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1987-1995. | - 253 - |
| Figure IX-7 : Hydrogramme de simulation pour la période 1973-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972..... | - 253 - |
| Figure IX-8 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1973-1995. | - 254 - |
| Figure IX-9 : Hydrogramme de simulation pour la période 1987-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1973-1986..... | - 255 - |
| Figure IX-10 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1987-1995. | - 255 - |
| Figure IX-11 : Hydrogramme de simulation pour la période 1965-1972 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995..... | - 256 - |
| Figure IX-12 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1965-1972..... | - 256 - |
| Figure IX-13 : Hydrogramme de simulation pour la période 1973-1986 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995..... | - 257 - |
| Figure IX-14 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1973-1986. | - 257 - |
| Figure IX-15 : Hydrogramme de simulation pour la période 1965-1986 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995..... | - 257 - |
| Figure IX-16 : Débits moyens mensuels observé et simulé sur la période 1965-1986. | - 258 - |
| Figure IX-17 : Hydrogramme de simulation pour la période 1976-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1975..... | - 259 - |

| | |
|--|---------|
| Figure IX-18 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1976-1995. | - 259 - |
| Figure IX-19 : Hydrogramme de simulation pour la période 1986-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1985..... | - 260 - |
| Figure IX-20 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1976-1995..... | - 260 - |
| Figure IX-21 : NASH de calage en fonction du NASH de validation pour l'ensemble des tests réalisés..... | - 261 - |
| Figure IX-22 : NASH WHC Logistique en fonction du NASH WHC Fixe pour les 3 périodes de validation associées à la période de calage 1965-1972..... | - 262 - |
| Figure IX-23 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 3 périodes de validation avec des WHC fixes et logistiques | - 262 - |
| Figure IX-24 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 2 périodes de validation avec des WHC fixes et évolutives. | - 264 - |
| Figure IX-25 : NASH WHC Logistique en fonction du NASH WHC Fixe pour 2 périodes de validation associées à la période de calage 1987-1995..... | - 266 - |
| Figure IX-26 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 3 périodes de validation avec des WHC fixes et évolutives | - 267 - |
| Figure IX-27 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur la période 1976-1995 avec des WHC fixes et évolutives..... | - 269 - |
| Figure IX-28 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur la période 1986-1995 avec des WHC fixes et évolutives | - 272 - |
| Figure IX-29 : NASH WHC Logistique en fonction du NASH WHC Linéaire pour l'ensemble des tests de calage-validations retenues. | - 273 - |
| Figure 30 : Quatre clichés du bassin du Nakambé à Wayen caractérisant l'évolution des états de surface entre 1972 et 2002..... | - 285 - |
| Figure 31 : Évolution de la WHC suivant un modèle logistique de population sur le bassin du Nakambé à Wayen de 1963 à 2002 | - 287 - |

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Volume des apports annuels des tributaires de l'Océan Atlantique pour les décennies 70 et 80 par rapport à la moyenne 1951-1990 (d'après Olivry et al., 1993).....- 58 -

Tableau I-2 : Taux moyen de croissance par décennie dans les pays sahéliens (d'après Raynaud, 1997)- 59 -

Tableau II-1 : Caractéristiques des stations retenues- 67 -

Tableau II-2 : Résultats des tests de détection de rupture sur les séries chronologiques de débits des stations étudiées- Statistique de Buihand- 69 -

Tableau II-3 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau (d'après Fao-Unesco, 1974-1981)- 70 -

Tableau II-4 : Caractéristiques spectrales et spatiales des images disponibles.....- 74 -

Tableau II-5 : Images Landsat disponibles pour l'étude- 75 -

Tableau II-6 : Tableau des statistiques de base des réflectances apparentes pour les 1 à 5 bandes de l'image Landsat ETM+ du 09/01/2003 - 86 -

Tableau II-7 : Tableau de calcul des luminances corrigées par ajustement empirique pour l'image Landsat ETM+ du 09/01/2003..... - 86 -

Tableau II-8 : Taux de natalité et de mortalité disponibles à l'échelle nationale et sur le bassin du Nakambé à Wayen.- 93 -

Tableau II-9 : Synthèse sur les données de l'étude- 96 -

Tableau III-1 : Exemple de découpages en périodes croissantes de calage et de validation pour la série des débits de la station d'Alcongui (1961 - 1995) - 104 -

Tableau III-2 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1961-1995. (Pluie CRU).....- 108 -

Tableau III-3 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1970-1995. (Pluie CRU)- 109 -

Tableau III-4 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1961-1995. (Pluie SIEREM) - 110 -

Tableau III-5 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1970-1995. (Pluie SIEREM).....- 111 -

Tableau III-6 : Modules calculés et observés sur chacun des cinq bassins testés- 113 -

| | |
|--|---------|
| Tableau III-7 : Caractéristiques des périodes de calage - validation retenues et valeurs de A pour les bassins d'Alcongou de Tera et de Wayen..... | - 116 - |
| Tableau III-8 : Valeurs minimum, moyenne et maximum du ratio $\left(\frac{H}{A}\right)^2$ pour l'ensemble des cinq bassins testés..... | - 118 - |
| Tableau IV-1 : Valeurs de WHC par maille correspondant à une capacité de rétention en eau de 10 mm pour le bassin du Nakambé à Wayen | - 125 - |
| Tableau IV-2 : Périodes de calage et de validation retenues pour la recherche de l'optimum de WHC | - 126 - |
| Tableau IV-3 : Résultats du calage sur la période 1965-1972 pour WHC = 133 mm..... | - 129 - |
| Tableau IV-4 : Validations sur les périodes 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 avec les paramètres du calage 1965-1972 | - 132 - |
| Tableau IV-5 : Résultats du calage sur la période 1965-1972 pour WHC = 133 mm..... | - 133 - |
| Tableau IV-6 : Validations sur les périodes 1965-1975, 1987-1995 avec les paramètres du calage 1976-1986 | - 135 - |
| Tableau IV-7 : Résultats du calage sur la période 1987-1995 pour WHC=133 mm..... | - 136 - |
| Tableau IV-8 : Calage 1987-1995 et validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986 : synthèse des résultats..... | - 138 - |
| Tableau IV-9 : Synthèse des résultats de la recherche d'un optimum de WHC pour le cas du bassin du Nakambé à Wayen..... | - 140 - |
| Tableau V-1 : Coefficients d'écoulement pour chaque type d'état de surface dans la région de Bondoukuy (Fournier et al., 2000) | - 157 - |
| Tableau V-2 : Coefficients d'écoulement pour chaque type d'état de surface dans le bassin supérieur du Nakambé au Nord du Burkina (Yacouba et al., 2002) | - 157 - |
| Tableau VI-1 : Correspondance entre les 15 classes de l'image et les 4 types d'état de surface- | 165 |
| - | |
| Tableau VI-2 : Tests de séparabilité des échantillons sélectionnée sr le terrain | - 169 - |
| Tableau VI-3 : Matrice de confusion de la classification non supervisée de l'image ETM+ de janvier 2003 | - 171 - |
| Tableau VI-4 : Précision de la classification | - 172 - |
| Tableau VI-5 : Erreurs de commission et d'omission de la classification..... | - 172 - |
| Tableau VI-6 : Niveau 1 de la nomenclature de la BDOT | - 175 - |
| Tableau VII-1 :Coefficients de freinages des modèles de natalité et de mortalité pour le cas du Burkina (d'après Ruas et Benoit-Cattin, 1991)..... | - 191 - |

| | |
|--|---------|
| Tableau VII-2 : Résultats du calage des modèles de natalité et de mortalité pour le Burkina Faso - 193 - | |
| Tableau VII-3 : Projections des Nations Unies pour la population du Burkina Faso (Source: http://esa.un.org/unpp/) | - 195 - |
| Tableau VII-4 : Projections de la population du Burkina Faso selon trois hypothèses de fécondité des femmes (d'après l'INSD.....) | - 196 - |
| Tableau VII-5 : Données démographiques du bassin du Nakambé à Wayen au cours du 20 ^{ème} siècle. (* = données nationales)..... | - 198 - |
| Tableau VII-6 : Résultats du calage des modèles de natalité et de mortalité pour le Bassin.. | - 199 - |
| Tableau VII-7 : Ordres de grandeur des données démographiques sur le bassin et à l'échelle du Burkina Faso. Les données manquantes (*) pour le bassin ont été remplacées par les moyennes nationales | - 200 - |
| Tableau VII-8 : Superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen (résultats des traitements d'images du chapitre VI)..... | - 202 - |
| Tableau VII-9 : Résultats du calage du modèle pour les superficies cultivées sur le Bassin du Nakambé à Wayen | - 207 - |
| Tableau VII-10 : Résultats du calage du modèle logistique pour les superficies en végétation naturelle sur le Bassin du Nakambé à Wayen..... | - 217 - |
| Tableau VII-11 : Évolution quinquennale de la population et des pourcentages de cultures, de végétation naturelle, de sols nus et de plans d'eau sur le bassin du Nakambé à Wayen..... | - 222 - |
| Tableau VIII-1 : Tableau des coefficients de ruissellement au Nord et au Sud du Burkina Faso (d'après Fournier et al., 2000; et Yacouba et al., 2002)..... | - 228 - |
| Tableau VIII-2 : Valeurs des WHC de la FAO pour chaque maille du bassin du Nakambé à Wayen | - 237 - |
| Tableau VIII-3 : WHC de 1972 en fonction de celle de 1963 et du jeu de coefficients de ruissellement utilisé | - 239 - |
| Tableau VIII-4 : Valeurs de la WHC du bassin du Nakambé à Wayen en fonction du jeu de coefficients de ruissellement utilisé | - 240 - |
| Tableau VIII-5 : Valeurs de la WHC en 1972 pour chaque maille du bassin. Cas des coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002) | - 241 - |
| Tableau VIII-6 : Valeurs de la WHC en 1972 pour chaque maille du bassin. Cas des coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000) | - 242 - |
| Tableau IX-1 : Périodes de calage-validations retenues | - 247 - |
| Tableau IX-2 : Performances de GR2M sur le Nakambé à Wayen. Cas de l'évolution logistique de la WHC. Calage-validation croisés | - 250 - |

| | |
|---|---------|
| Tableau IX-3 : Performances de GR2M sur le Nakambé à Wayen. Cas de l'évolution logistique de la WHC. Calage sur les périodes 1965-1975 ; 1965-1985 et validations sur 1976-1995 ; 1986-1995 - | 251 - |
| Tableau IX-4 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives (évolution logistique)..... | - 263 - |
| Tableau IX-5 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives (évolution logistique)..... | - 265 - |
| Tableau IX-6 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et logistiques..... | - 268 - |
| Tableau IX-7 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives. Calage sur 1965-1975 et validation sur 1976-1995..... | - 270 - |
| Tableau IX-8 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives. Calage sur 1965-1985 et validation sur 1986-1995..... | - 271 - |
| Tableau IX-9 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques..... | - 274 - |
| Tableau IX-10 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques..... | - 275 - |
| Tableau IX-11 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques..... | - 276 - |
| Tableau IX-12 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques. Calage sur 1965-1975 et validation sur 1976-1995 | - 277 - |
| Tableau IX-13 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques. Calage sur 1965-1985 et validation sur 1986-1995..... | - 278 - |

INTRODUCTION GENERALE

Contexte climatique et environnemental au Sahel de l'origine des stations à nos jours.

Si de nombreuses régions du monde sont soumises à des fluctuations climatiques spectaculaires, le Sahel se distingue par la sévérité et la persistance du déficit pluviométrique qu'il connaît depuis maintenant plus de trois décennies. Plusieurs études sur la variabilité climatique et les ressources en eau ont mis en évidence le caractère singulier de ce déficit (Carbonnel et Hubert, 1992; Mahé et Olivry, 1995; Khodja *et al.*, 1998; Paturel *et al.*, 1998; Mahé *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 1999; Ouedraogo, 2001). A l'échelle annuelle, cette diminution des quantités précipitées est imputable, en grande partie, à une baisse généralisée du nombre d'événements pluvieux, que Tapsoba *et al.*, (2002) estiment entre -20 à -40%. Les séries de données disponibles montrent que la sécheresse qui s'en est suivie, et qui persiste encore de nos jours (L'hôte *et al.*, 2002; Ardoin *et al.*, 2003; L'hôte *et al.*, 2003), n'a pas eu d'égal, en durée, et en intensité, malgré son caractère fortement hétérogène dans l'espace (Paturel *et al.*, 1998; Ouedraogo, 2001).

Durant la même période, la croissance démographique a fortement réduit l'espace vital sur les sols fertiles dans ces régions. La densité de population au km² de terrain cultivable n'a cessé d'augmenter, atteignant des valeurs très élevées dans les pays comme la Mauritanie (633 hab./km²), le Mali (293 hab./km²), le Burkina Faso (228 hab./km²) et le Sénégal (moins de 100

hab./km²) (Leisinger et Schmitt, 1994). La pression sur les terres n'est pas encore telle qu'une intensification des pratiques agricoles soit incontournable, mais elle est déjà suffisante pour entraîner des dégâts écologiques importants (Harrison, 1991; Mathieu, 1998). La gestion durable de l'environnement se pose donc désormais en terme de déséquilibre entre ressources naturelles d'une part (sols cultivables, eau en quantité et en qualité, végétation...) et besoins accrus d'une population en croissance rapide, d'autre part (Geny *et al.*, 1992).

Réponses hydrologiques des bassins versants face au changement climatique.

Les déficits pluviométriques enregistrés depuis le début des années 70 et leurs effets cumulés ont fortement influencé les régimes hydrologiques des grands bassins fluviaux d'Afrique intertropicale. D'une façon générale, l'hydraulicité des fleuves a fortement diminué. Les débits moyens annuels ont baissés de plus de 30% et quelques fois au delà de 50% (Mahé et Olivry, 1995; Servat *et al.*, 1997; Mahé *et al.*, 1999). L'écoulement a même cessé sur le Niger à Niamey et le Sénégal à Bakel en 1984 !

Relativement épargnés jusqu'en 1980, les fleuves des régions plus humides ont également connu des écoulements en baisse dans des proportions importantes (Laraque *et al.*, 2001). Sur le bassin tropical humide du Niger, les apports souterrains diminuent depuis 1970, réduisant le volume annuel de la crue du fleuve ainsi que son maximum. Le volume annuel écoulé a diminué de 20% pendant la décennie 70 et de 46% pendant la décennie 80 (Olivry *et al.*, 1998; Mahé *et al.*, 2001). A côté de l'effondrement des débits des grands systèmes hydrologiques intertropicaux, apparaît un « paradoxe » de fonctionnement dans certains hydrosystèmes de plus petite taille.

En effet, à partir de l'étude des conséquences de la sécheresse sur les écoulements de petits bassins versants d'Afrique soudano-sahélienne, Albergel (1987) montre que ponctuellement, à probabilité d'occurrence équivalente, un événement pluviométrique fort engendre une crue plus forte après 1969 qu'avant 1969. Cette étude montre également que ces nouvelles conditions de ruissellement apparaissent plus favorables dans les zones où on observe une diminution du couvert végétal et une extension des surfaces cultivées. De même, Pouyaud (1987), montre que les coefficients d'écoulements et les écoulements annuels ont augmenté sur de petits bassins versants (moins de 500 km²) en zone sahélienne, du fait de l'impact des variations climatiques sur la végétation et la dénudation du sol. Plusieurs études ont par la suite confirmé ces résultats. On peut citer entre autres celle d'Albergel et Valentin (1991) qui met en évidence une augmentation des coefficients d'écoulement sur le bassin versant de Boulsa-Kognere au Burkina Faso. Plus récemment, sur un petit bassin versant dans le Sud-Ouest nigérien, Seguis *et al.*, (2003) analysant la sensibilité de l'écoulement aux changements climatiques (diminution de la

pluviométrie) et environnementaux (augmentation des surfaces cultivées), constatent une augmentation des écoulement de 30% depuis 1970. A partir d'exemples de rivières du Burkina Faso, du Mali et du Niger, Mahé *et al.*, (2003) montrent que l'augmentation du ruissellement s'observe également sur des bassins versants de plus grande taille. Les coefficients d'écoulement sur le bassin du Nakambé à Wayen (20 800 km²) ont ainsi augmenté de 108% après 1970. Ce phénomène a été relié à l'augmentation des surfaces cultivées et des sols nus au dépend de la végétation naturelle. La même observation a été faite sur le bassin de la Sirba à Garbe Kourou (38 750 km²) et du Gorouol à Alcongui (44 850 km²).avec des augmentations respectives de 61% et supérieur à 40%.

Analyses et éléments de réflexion.

Ces études successives, menées depuis une vingtaine d'années (Albergel, 1987; Pouyaud, 1987; Albergel et Valentin, 1991; Mahé *et al.*, 2003; Séguis *et al.*, 2003) laissent supposer que l'effet conjoint du changement climatique et des activités humaines sur les états de surface est à l'origine de la variabilité hydrologique observée au niveau des bassins versants sahéliens. Ces changements hydroclimatiques suscitent des interrogations dans la communauté scientifique et posent de véritables problèmes techniques et opérationnels dans l'élaboration et/ou l'exécution des politiques d'aménagement, de gestion et de protection des ressources hydriques dans les pays concernés. En effet, dans les régions touchées ces dernières décennies par un phénomène de sécheresse, convient-il ou non d'intégrer les années récentes dans la continuité des séries chronologiques, ou alors, doit-on faire l'hypothèse d'une modification plus durable du climat, et ne prendre en compte que les trente dernières années ? Peut-on séparer la variabilité due aux impacts anthropiques de celle due au changement du climat ? Quel sens donner à la norme hydrologique, ou du moins, quelles limites d'application pour ces normes dans un contexte de variabilité hydrologique importante ?

Toutes ces questions ramènent en définitive à la problématique de la prévision et de la gestion durable des ressources en eau, et, par conséquent, à celle de la modélisation hydrologique et/ou climatique. En effet, une gestion durable et efficace impose de disposer d'outils de prévision performants. Prédire pour mieux gérer suppose l'élaboration ou l'amélioration de modèles mathématiques capables de simuler de façon satisfaisante le fonctionnement des hydrosystèmes et l'évolution du climat. Cependant, le modèle n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité. Cette réalité que l'on tente de modéliser, est une combinaison de plusieurs niveaux de réalités, chacune pouvant faire l'objet d'une discipline particulière. Les hydrologues, par exemple, étudient les mécanismes de transfert hydrique à l'intérieur des bassins versants ; les physiciens,

les géochimistes, les écophysiologistes, les bioclimatologues explorent les mécanismes régissant les flux d'eau, d'énergie et de matière dans le bassin versant ; les géomorphologues, les pédologues, les écologues s'intéressent, quant à eux, à l'analyse morphogénétique et aux équilibres environnementaux.

La compréhension du fonctionnement du bassin versant est donc enrichie par l'apport fécond de toutes ces disciplines. Ainsi, l'amélioration de notre aptitude à simuler par modèle le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant passe nécessairement par une vision globale et intégrée de la réalité. Une vision qui serait à la fois entre, à travers et au delà de toute les disciplines : c'est la transdisciplinarité (Nicolescu, 1996). Sa finalité est *la compréhension du monde présent*, dont un des impératifs est l'unité de la connaissance.

Problématique de l'étude

Notre ambition reste modeste par rapport à la problématique globale ainsi posée. La réflexion que nous menons dans ce travail se veut être, cependant, une contribution vers une variabilité climatique dans un modèle hydrologique au Sahel.

Dans ce milieu, la répartition des pluies entre infiltration et écoulement est sous le contrôle quasi exclusif des états de surface (Collinet et Valentin, 1979; Chevalier et Valentin, 1984; Casenave et Valentin, 1991, 1992). La variabilité hydrologique des bassins versants y est, par conséquent, directement liée à celle des états de surface.

De nombreux modèles ont été élaborés pour étudier, évaluer et prédire les impacts du changement climatique et des modifications anthropiques sur les ressources en eau sous divers climats. Le modèle que nous avons choisi d'utiliser dans le cadre de ce travail, est GR2M (modèle Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel). Robuste et peu consommateur en données, ce modèle doit sa simplicité grâce notamment au faible nombre de paramètres nécessaires pour son fonctionnement. Son pas de temps mensuel est également un atout important pour deux raisons au moins. D'une part, il correspond au pas de temps des gestionnaires des ressources, et, d'autre part, il permet de palier les lacunes au niveau des séries de données de la plupart des bassins au Sahel. C'est donc un modèle très adapté au contexte sahélien.

De nombreuses raisons peuvent être avancées pour tenter d'expliquer cette contre performance. Nous portons plus particulièrement notre réflexion sur les incertitudes liées à la structure du modèle. Cela nous amène à faire l'hypothèse que si GR2M ne reproduit pas avec satisfaction les écoulements au niveau des bassins sahéliens, c'est parce que les concepts et équations du modèle

ne prennent pas suffisamment en compte une particularité hydrologique majeure de ce milieu : les états de surface. Considérer l'hypothèse précédente revient à poser le problème suivant : *comment peut-on prendre en compte une dimension physique et environnementale dans un modèle hydrologique tel que GR2M, de manière à ce qu'il puisse reproduire de façon satisfaisante les débits à l'exutoire des bassins versants au Sahel ?*

Notre réflexion se concentrera sur la fonction de production du modèle : le réservoir sol. Ce réservoir nous intéresse plus particulièrement, car il peut servir d'interface entre le modèle et la dynamique du milieu. En effet, la péjoration climatique, associée à l'augmentation des superficies cultivées et des superficies de sols dégradés, au détriment de la végétation, a profondément modifié les états de surface de telle sorte que le ruissellement augmente et l'infiltration baisse. Une conséquence directe de ce phénomène est la baisse du stock d'eau dans le sol. *Peut-on rapprocher ce mode de fonctionnement de celui du réservoir sol de GR2M de manière à pouvoir intégrer la dynamique des états de surface dans le modèle ?*

Objectifs

L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer notre aptitude à simuler par modèle le fonctionnement des bassins versants au Sahel pour une meilleure évaluation prédictive et gestion des ressources en eau de cette région au cours du 21^{ème} siècle. Au-delà donc du strict cadre de la recherche, nous avons également des préoccupations de développement car la zone sahélienne est une des plus démunies en matière d'eau. Prédire pour mieux gérer est un impératif de développement qui passe nécessairement par l'élaboration et/ou l'amélioration de modèles efficaces à cet effet.

Plusieurs objectifs spécifiques doivent être considérés.

En effet, l'une des grandes difficultés qui se posent aujourd'hui à l'hydrologie est la caractérisation et la modélisation du comportement hydrologique du sol. Notre premier objectif spécifique sera d'analyser comment GR2M représente conceptuellement le comportement hydrologique des sols au Sahel.

Le modèle GR2M est constitué de deux réservoirs dont le « réservoir sol » qui se caractérise par sa hauteur maximale A , assimilée à une capacité maximale de rétention en eau du sol (WHC :

Water Holding Capacity en anglais). Les valeurs de A sont fixes pour chaque unité de terrain et pour toute la durée des simulations. Elles n'intègrent donc, ni une possible dynamique d'évolution du climat, ni une probable évolution de l'environnement liée au climat mais aussi aux activités humaines qui le modifient profondément dans ces régions. Cette donnée du « réservoir sol » est primordiale, car, on pourrait la lier à des paramètres descriptifs et constitutifs des états de surface dont l'importance pour l'hydrologie sahélienne est fondamentale. Il s'en suit donc les deux objectifs spécifiques suivants :

- caractériser la dynamique d'évolution des états de surface au Sahel à l'aide d'images satellites,
- transcrire l'évolution des états de surface dans la donnée du « réservoir sol », afin de produire une série temporelle de WHC, fonction de différents scénarii liés au climat, aux activités anthropiques et à la dynamique démographique des milieux à modéliser. Ce troisième objectif est donc, avant tout, d'ordre méthodologique. Il s'appuiera sur des techniques et méthodes de deux disciplines extérieures à l'hydrologie, afin de mieux nous aider à comprendre et à modéliser le comportement hydrologique des bassins versants sahéliens. Ce sont, la télédétection, pour la caractérisation des états de surface, et la démographie, pour l'évolution de la population.

Les séries temporelles de WHC ainsi produites serviront comme données d'entrée du modèle. Les performances du modèle seront analysées et comparées au cas classique où les valeurs de WHC restent fixes dans le temps.

Organisation du travail

Ce mémoire s'articule autour de trois parties :

La première partie présente le contexte sahélien, les données disponibles et fait le point sur l'état de l'art en matière de modélisation hydrologique. Elle approfondira les concepts et analysera les idées de base du modèle GR2M.

La deuxième partie montrera, tout d'abord, comment, numériquement, on peut améliorer la reproduction des écoulements aux exutoires des bassins testés. Les chapitres suivants présenteront les étapes de la méthode d'intégration des données environnementales dans le modèle.

La dernière partie est une application de la démarche développée tout au long de ce travail. Des séries annuelles de capacité en eau du sol sont produites pour le cas particulier du bassin du Nakambé à Wayen. Les résultats de simulations sont ensuite analysés et discutés.

PARTIE I

LE MODELE GR₂M DANS LE CONTEXTE SAHELIEN

CHAPITRE I

LE SAHEL OUEST AFRICAIN

La sécheresse qui continue d'affecter l'ensemble du Sahel ouest africain (L'hôte *et al.*, 2002; Ardoin *et al.*, 2003) met en évidence deux données importantes de ce domaine climatique : la fragilité des écosystèmes, et la vulnérabilité des populations locales. Une production scientifique importante et variée en a répertorié les manifestations de cette sécheresse, depuis les réactions des différentes populations jusqu'aux problèmes liés à l'évolution à moyen et long terme des paramètres naturels. En effet, des débats du début des années 1970 sur les causes de la sécheresse, aux recommandations touchant les zones arides formulées à la suite de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement en 1992, en passant par les concepts du développement durable, le Sahel ne cesse de fournir matière à préoccupations et à réflexions.

Ce premier chapitre n'a pas la prétention de faire un tour complet de toutes ces questions. Cela nécessiterait, en effet, des investigations plus importantes dépassant largement le cadre de ce travail. Notre propos, dans ce chapitre, est de mettre en évidence des traits caractéristiques du milieu sahélien pouvant servir de base à l'analyse et à la compréhension des nouveaux comportements hydrologiques apparus autour des années 70 sur certains hydrosystèmes sahéliens.

I.1 Définitions et limites du Sahel

I.1.1 Définitions

Etymologiquement, Sahel provient du mot arabe *sahil*, qui signifie « rivage », en l'occurrence le rivage sud du Sahara. C'est une définition séduisante mais très simplificatrice de la réalité car c'est à un ensemble hétérogène de situations environnementales et sociales, auxquelles on est confronté quand on parcourt les aires sahéliennes. Cette diversité, issue de différentes combinaisons entre données physiques, modes d'exploitation du milieu et conditions socio-économiques, en fait un milieu complexe dont les limites sont difficiles à définir. C'est ainsi qu'il n'est pas rare de rencontrer des enclaves sahéliennes au Sahara, et au sud, des enclaves sahariennes au Sahel.

Dans son acception courante, le Sahel représente une bande de territoire d'environ 5 000 km de long et 300 km de large située entre le Sahara et la zone soudanienne d'Afrique de l'Ouest et Centrale. On peut le situer, grossièrement, entre les latitudes 14° et 18° Nord dans la partie occidentale de l'Afrique et entre les latitudes 12° et 16° Nord au Tchad.

L'identité réelle du Sahel en tant qu'entité géographique suscite des interrogations car c'est d'abord à partir de l'observation du climat, des sols et de la végétation qu'on tire les principaux critères permettant d'en tracer les limites et d'en décrire les caractères. Ces critères variant d'une discipline scientifique à l'autre, agronomes, climatologues, écologues, géologues, hydrologues, géopoliticiens ont chacun une conception du Sahel qui diffère de celle des autres. On comprend ainsi Raynaut (1997) lorsqu'il affirme qu'il n'y a pas un Sahel mais des « Sahels ». Ces différents « Sahels » présentent néanmoins des traits communs permettant certains regroupements.

I.1.2 Le Sahel géopolitique

Le premier, et probablement le plus facile à circonscrire parce que ses limites épousent des frontières d'États, est le « Sahel géopolitique » ou « Sahel politique » que Bernus *et al.*, (1993), qualifient de « Grand Sahel ». Ce Sahel géopolitique correspond à la région des neuf pays membres du Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS). Ce sont : le Burkina Faso, le Cap Vert, la Gambie, la Guinée-Bissau, le Mali, la Mauritanie, le Niger, le Sénégal et le Tchad (Figure I-1). Il regroupe les pays africains confrontés, depuis le début des années 1970, à une crise environnementale et socio-économique majeure (dégradation des

écosystèmes, chute des productions agricoles, grave crise économique et sociale, etc.). Bien qu'aisément définissables, les limites du « Grand Sahel » sont cependant discutables car, dans cette association, apparaissent des pays « plus sahéliens » que d'autres. En effet, des états comme la Gambie ou la Guinée-Bissau ne peuvent pas être considérés comme « véritablement » sahéliens et ne font partie du groupe de pays uniquement parce que leurs gouvernements en ont décidé ainsi, suite à des années successives de déficits agricoles. Le Sénégal et le Burkina Faso sont, quant à eux, en position de « transition » vis-à-vis de la nature sahélienne, du fait des caractéristiques propres à leur zone méridionale.

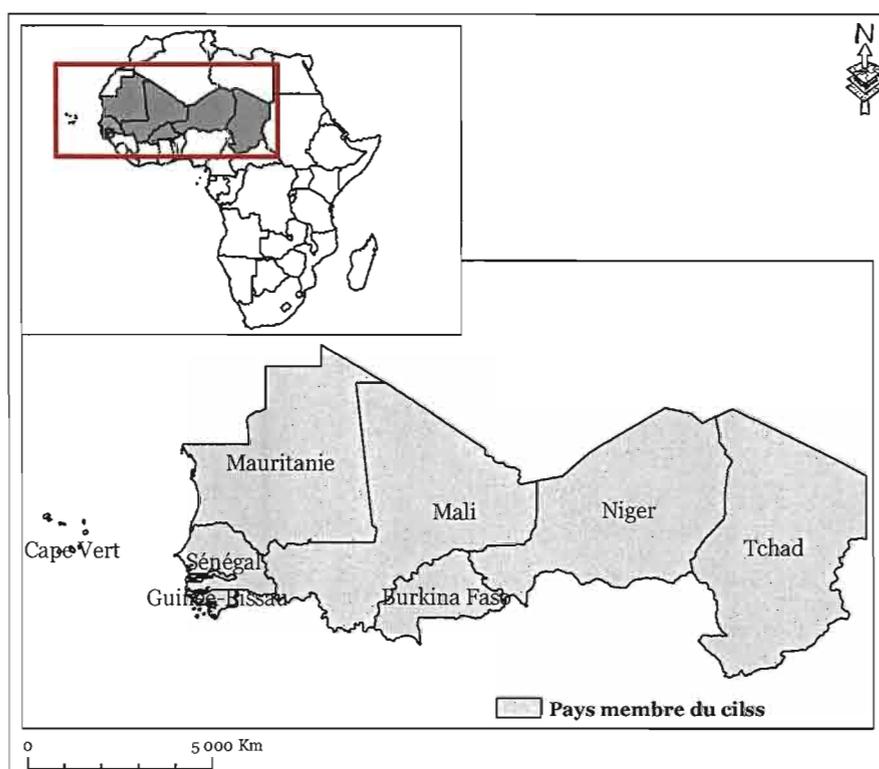


Figure I-1 : Le Sahel géopolitique

I.1.3 Le Sahel bio-climatique

Le second regroupement, que l'on appelle « Sahel bio-climatique », est le Sahel tel que l'entendent les climatologues, écologues, agronomes, hydrologues, etc. Il correspond à une zone écologique et climatique encadrée par des isohyètes « moyennes ». C'est le plus difficile à circonscrire car les valeurs de ces isohyètes diffèrent d'une discipline à l'autre : 100-150 mm ou

moins, au nord ? 500-700 mm ou davantage, au sud ? De plus, le tracé et la position de ces isohyètes varient selon la période d'observation prise en compte.

Ainsi, Courel (1984) fixe les limites du Sahel bio-climatique entre les isohyètes 200 et 700 mm. Pour Giri (1983), le Sahel bio-climatique est compris entre les isohyètes 150 et 650 mm avec la subdivision suivante :

- le « Sahel des nomades » encadré par les isohyètes 150 et 400 mm, que Thiombiano (2000) définit comme une zone agro-pastorale caractérisée par une faible densité de populations (< 2 habitants/km²) ;
- le « Sahel des sédentaires » correspondant à la zone située entre 400 et 650 mm.

Pour les climatologues, le climat sahélien est compris entre les isohyètes annuelles 150 et 750 mm (L'hôte *et al.*, 1996).

Toupet (1992) propose 100 mm et 700 mm comme limites septentrionale et méridionale du Sahel. Il justifie ces limites par le fait qu'autour de la trace au sol de ces isohyètes apparaît des modifications significatives dans le modelé des paysages, les processus d'érosion et de pédogenèse, la composition floristique et les types de végétation. Sur cette base, il distingue trois domaines :

- le domaine sahélo-saharien entre 100 et 200 mm ;
- le domaine sahélien stricto sensu entre 200 et 500 mm ;
- le domaine sahélo-soudanien entre 500 et 700 mm.

Certains bio-climatologues proposent également une autre zonation plus ou moins fine du Sahel comportant plusieurs secteurs identifiés par leur végétation :

- le secteur subdésertique, correspondant à des pluviométries inférieures à 200-250 mm,
- le secteur sahélien avec des précipitations comprises entre 200-250 à 550 mm,
- le secteur sub-sahélien avec des précipitations comprises entre 550 et 750 mm,
- le secteur nord soudanien, avec des précipitations variant entre 750 et 1000 mm.

Monod (1973) penche pour un domaine écologique autonome présentant des caractéristiques propres telles que :

- la concentration saisonnière de pluies estivales peu abondantes et limitées à une série de fortes averses,
- l'ampleur de leurs variations interannuelles, avec des alternances d'années sèches et humides,
- l'importance des prairies de plantes herbacées annuelles par rapport aux steppes sahariennes et aux savanes soudaniennes de graminées vivaces.

Pour certains agro-écologistes, le Sahel est la zone comprise entre la limite méridionale de l'aire de *Stipagrostis pungens* et la limite septentrionale de l'aire de *Butyrospermum parkii* (karité). Ces limites correspondent grossièrement aux isohyètes 150 et 700 mm.

La limite nord du Sahel correspond, pour les agronomes, à la limite des cultures sous pluies. Cette limite est fixée entre les isohyètes 200 et 400 mm. Quant à la limite sud, différents auteurs envisagent un Sahel étendu, allant jusqu'à 750 mm, voire 1 000 mm, donc bien au sud de Bamako et de Ouagadougou, respectivement capitales du Mali et du Burkina Faso.

Le « Sahel hydrologique » correspond à la zone de l'Afrique située entre les isohyètes 300 mm au nord et 750 mm au sud (Rodier, 1964). Brunet-Moret *et al.*, (1986) proposent une définition que L'Hôte *et al.*, (1995) qualifient de « plus hydrologique » : le Sahel est compris entre les isohyètes 300 et 700 mm. Il y a disparition des cours d'eau à écoulement permanent, apparition de vastes zones inondables, tendance à l'endoréisme et, du point de vue botanique, disparition du karité et apparition des épineux.

Enfin, Casenave et Valentin (1988) proposent : « La zone sahélienne, [...], dans son acception hydrologique, est comprise entre les isohyètes 200 et 750-850 mm. La limite sud de cette zone, plus qu'à un total pluviométrique, correspond à la disparition du phénomène de dégradation du réseau hydrographique. »

I.1.4 Commentaires et discussion

Comme écrit plus haut, selon la période d'observation prise en compte, les isohyètes limites n'ont pas les mêmes positions géographiques. Ainsi, d'une période d'observation à une autre, les parts sahéliennes des états concernés sont plus ou moins importantes, laissant apparaître des états « plus » sahéliens que d'autres (Figure I-2)

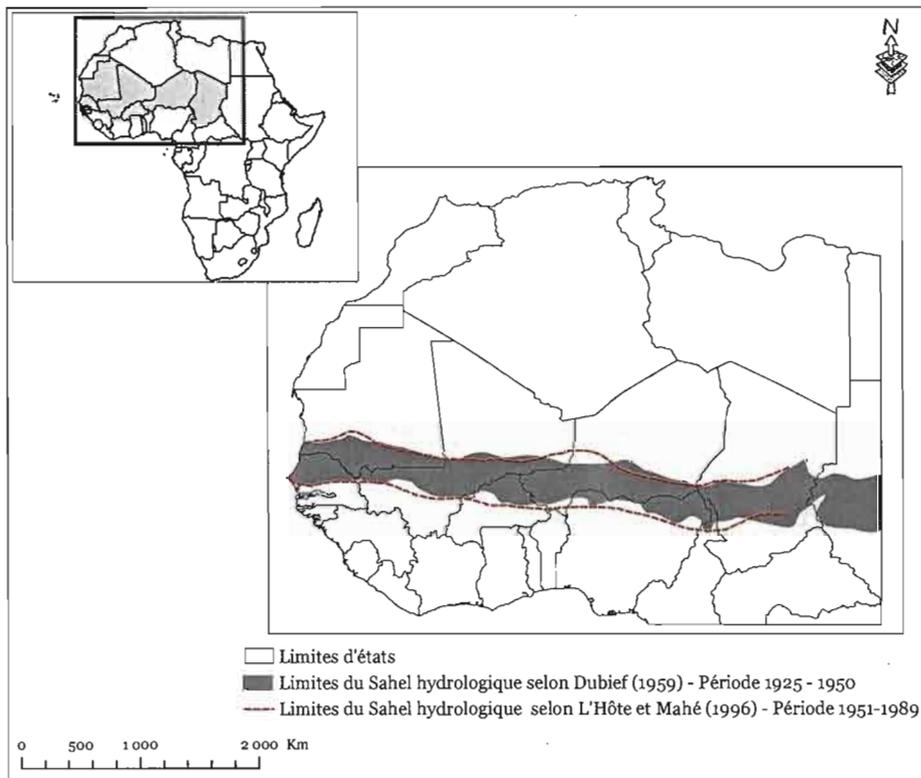


Figure I-2 : Limites du « Sahel hydrologique » à partir du tracé des isohyètes sur les périodes 1925-1950 et 1951-1989

La difficulté à s'accorder sur les limites du Sahel traduit la complexité intrinsèque de ce milieu, caractérisé par une multitude de situations locales. Il est donc important qu'un accord soit fait quant à la conception à prendre en compte dès lors que le Sahel fait l'objet d'une réflexion qui se veut multidisciplinaire.

Nous cherchons, en effet, dans le cadre de ce travail, à prendre en compte la variabilité de l'environnement dans les modèles hydrologiques au Sahel. En toute rigueur, il nous faudrait

définir un Sahel conciliant les conceptions de toutes les disciplines auxquelles nous avons recours : hydrologie, climatologie, pédologie, socio-économie, etc. On pourrait, en théorie, y arriver, mais avec cependant le risque de ne produire qu'une définition de plus. Nous nous limiterons donc aux conceptions hydrologiques du Sahel en essayant toutefois de nous fixer sur des limites.

D'un point de vue hydrologique, il est admis que le Sahel correspond à une zone où il y a disparition des cours d'eau à écoulement permanent, apparition de vastes zones inondables, et tendance à un certain endoréisme. Les différentes définitions proposées par les hydrologues pour la limite nord du Sahel fluctuent entre 200 et 300 mm, soit un écart de 100 mm, ce qui est non négligeable vu le milieu considéré. Quant à sa limite sud, comprise entre 700 et 850 mm selon les définitions, l'écart est encore plus grand puisqu'il est de 150 mm.

Nous choisissons l'isohyète la plus septentrionale comme limite nord de ce domaine climatique. Quant à la limite sud, notre choix est guidé par des raisons plus objectives. En effet, les études hydroclimatiques menées depuis une vingtaine d'années ont montré un phénomène hydrologique propre aux régions sahéliennes et d'apparence paradoxale : l'augmentation des coefficients d'écoulements depuis les années 1970 alors que la pluviométrie régionale a fortement baissée durant la même période. La répartition géographique des bassins sur lesquels ce phénomène a été mis en évidence, est telle qu'au sud de l'isohyète 750 mm, le phénomène ne s'observe plus (Figure I-3). L'isohyète 750 mm est donc prise comme limite méridionale du Sahel hydrologique. Il est important de préciser que la période de considérée pour ces isohyètes est la période 1951-1989. La Figure I-4 présente ainsi les limites du Sahel hydrologique selon notre conception. Il est important de préciser que la période considérée pour ces isohyètes est la période 1951-1989.

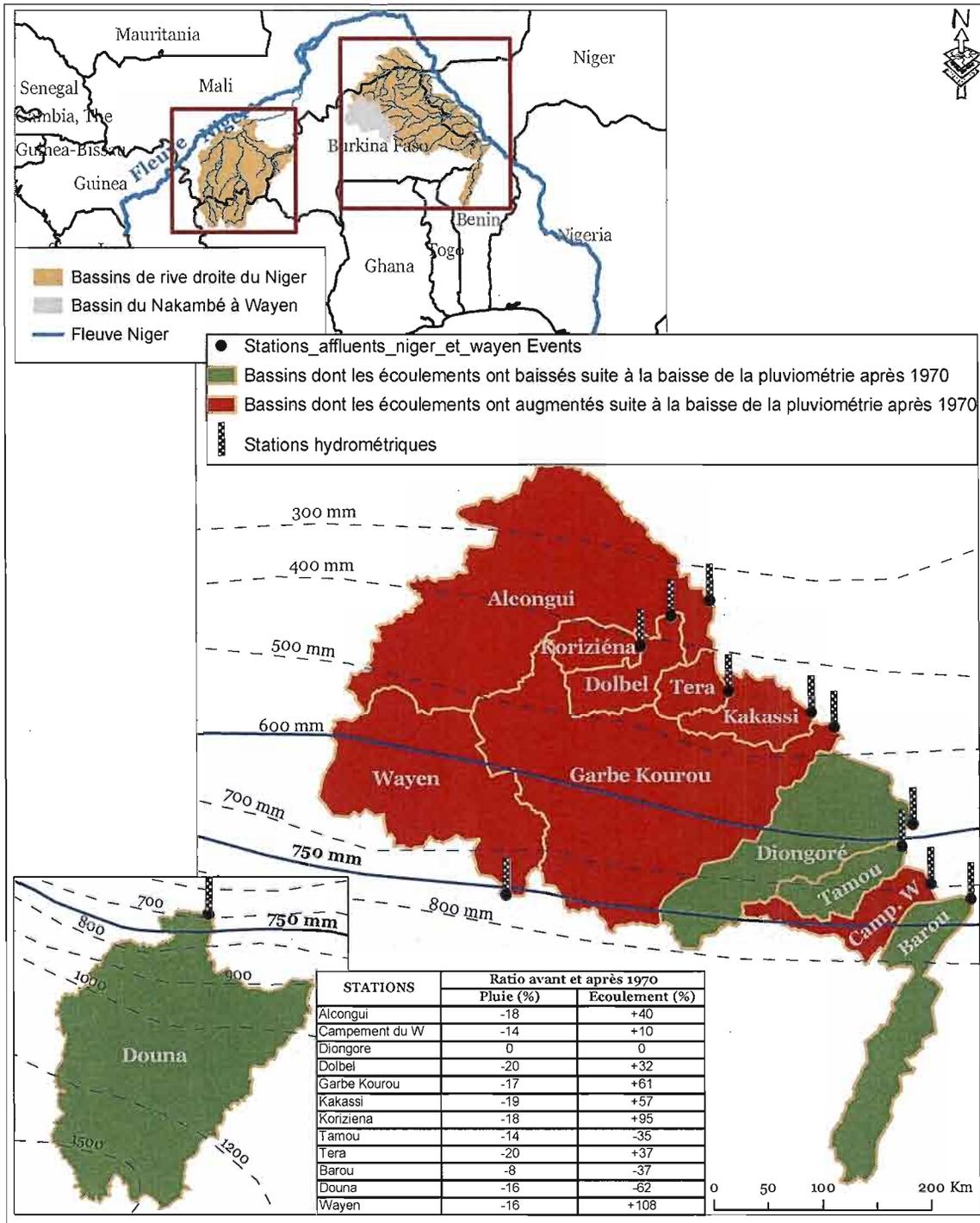


Figure I-3 : Répartition géographique des bassins sahéliens de rive droite du fleuve Niger et du bassin du Nakambé.

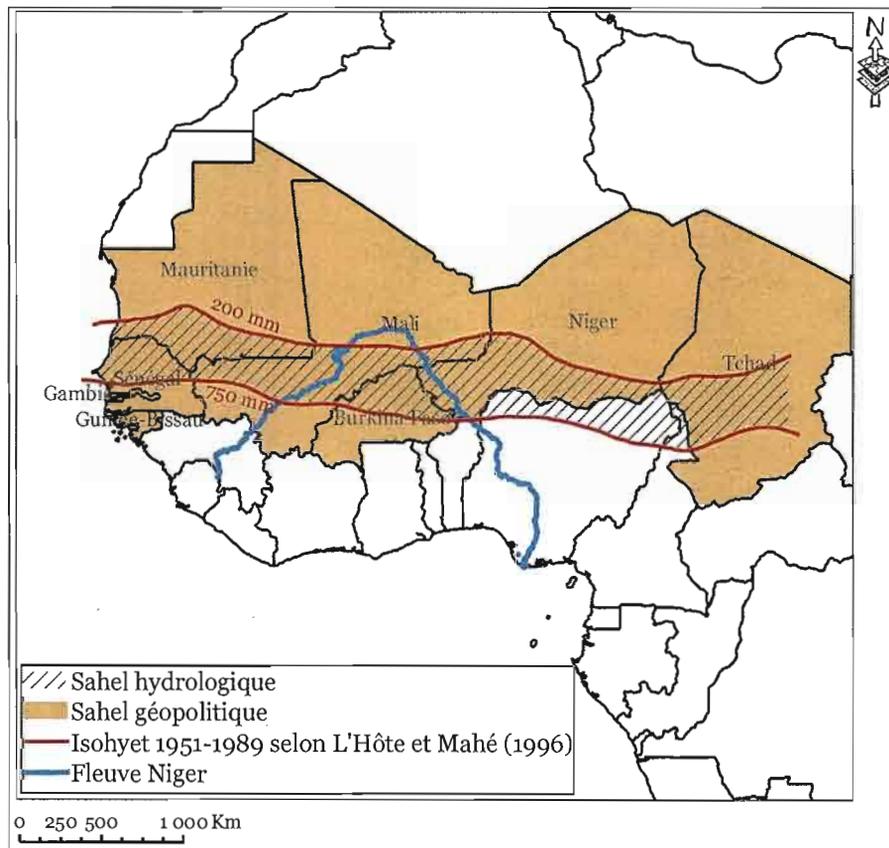


Figure I-4: Présentation du Sahel hydrologique

I.2 Le milieu physique sahélien : caractéristiques essentielles

I.2.1 Géologie

Le Sahel ouest africain est formé de 4 grands ensembles géologiques :

Le socle précambrien ou craton ouest africain : il occupe les trois quart du Burkina Faso et la partie occidentale du Niger. Il est constitué de formations cristallines métamorphiques ou volcano-sédimentaires attribuées au Précambrien inférieur et moyen. Il regroupe :

- des granites et des gneiss,
- des formations plus ou moins métamorphiques à dominante schisteuse et quartzitique.

Le bassin de Taoudeni : Formation sédimentaire attribuée au Précambrien A (900-1100 millions d'années) et au Cambro-Ordovicien, composée de trois séries :

- série 1 : généralement gréseuse avec cependant des calcaires à stromatolites du Précambrien supérieur,
- série 2 : débute par des tillites auxquels succèdent des calcaires dolomitiques et des pélites alternant avec des grès,
- série 3 : attribué à l'Ordovicien, elle est principalement détritique (grès, quartzites). Dans le domaine sahélien, ce bassin couvre le Sud-Est Mauritanien, le Centre et le Sud-Ouest du Mali.

Le bassin du Niger : C'est une vaste cuvette remplie de séries paléozoïques (grès et argile), au Nord, et de dépôts secondaires (grès et argilites) et tertiaires (calcaire, marnes, schistes et grès) du Continental Terminal, au Sud. Ce bassin inclut l'Est du Mali, la plus grande partie du Niger et le Nord du Nigéria.

Le bassin Sénégal-Mauritanien : Formations sédimentaires marines débutant au Jurassique supérieur et allant jusqu'à l'Eocène supérieur. Elles sont presque totalement recouvertes par le Continental Terminal et les dépôts quaternaires, marins ou continentaux. Le bassin couvre la majeure partie du Sénégal, et le Sud-Ouest de la Mauritanie.

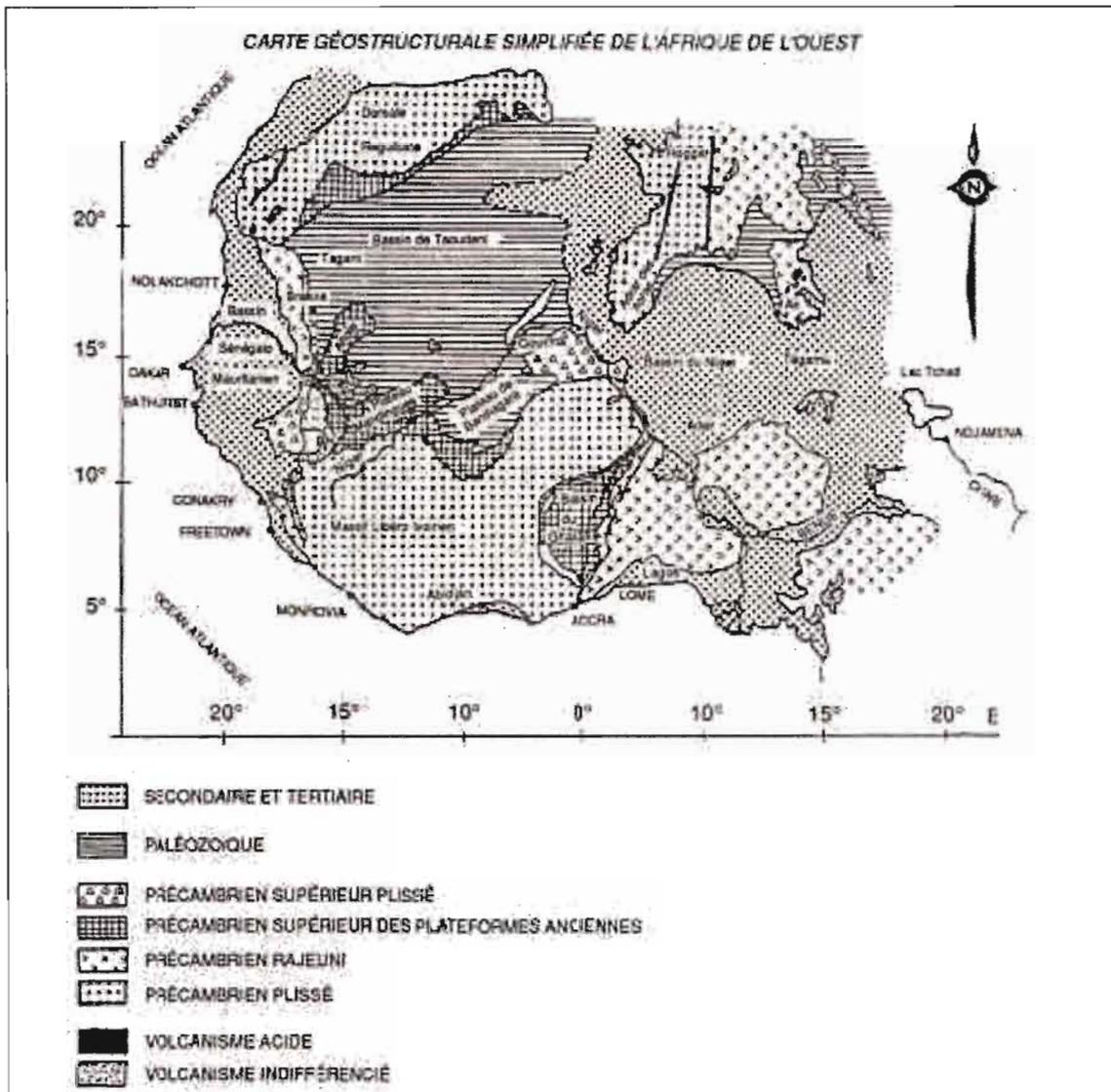


Figure I-5: Carte géostructurale simplifiée de l'Afrique de l'Ouest (d'après Unesco, 1971; cité par Casenave et Valentin, 1988)

I.2.2 Géomorphologie et sols

D'une façon générale, le potentiel de rendement naturel des sols au Sahel est très bas en raison de la faible fertilité qui les caractérise. Pauvres en substances nutritives, ils ne gardent pratiquement pas l'eau et sont très peu résistants à l'érosion éolienne et hydrique. Deux niveaux d'échelle peuvent être considérés quant à la distribution des différents types de sols au Sahel.

A l'échelle continentale, les grands types de sols se répartissent en fonction des zones climatiques.

On a du Nord au Sud (Figure I-6) :

- les sols minéraux bruts des déserts,
- les sols peu évolués subdésertiques,
- les sols isohumiques,
- les sols ferrugineux tropicaux peu ou non lessivés,
- les sols ferrugineux lessivés,
- les associations de sols ferrugineux tropicaux lessivés et de sols ferrallitiques,
- les sols ferrallitiques faiblement ou moyennement désaturés,
- les sols hydromorphes (ce type de sol dont le caractère est déterminé par un excès d'eau joue un rôle important sur le plan hydrologique).

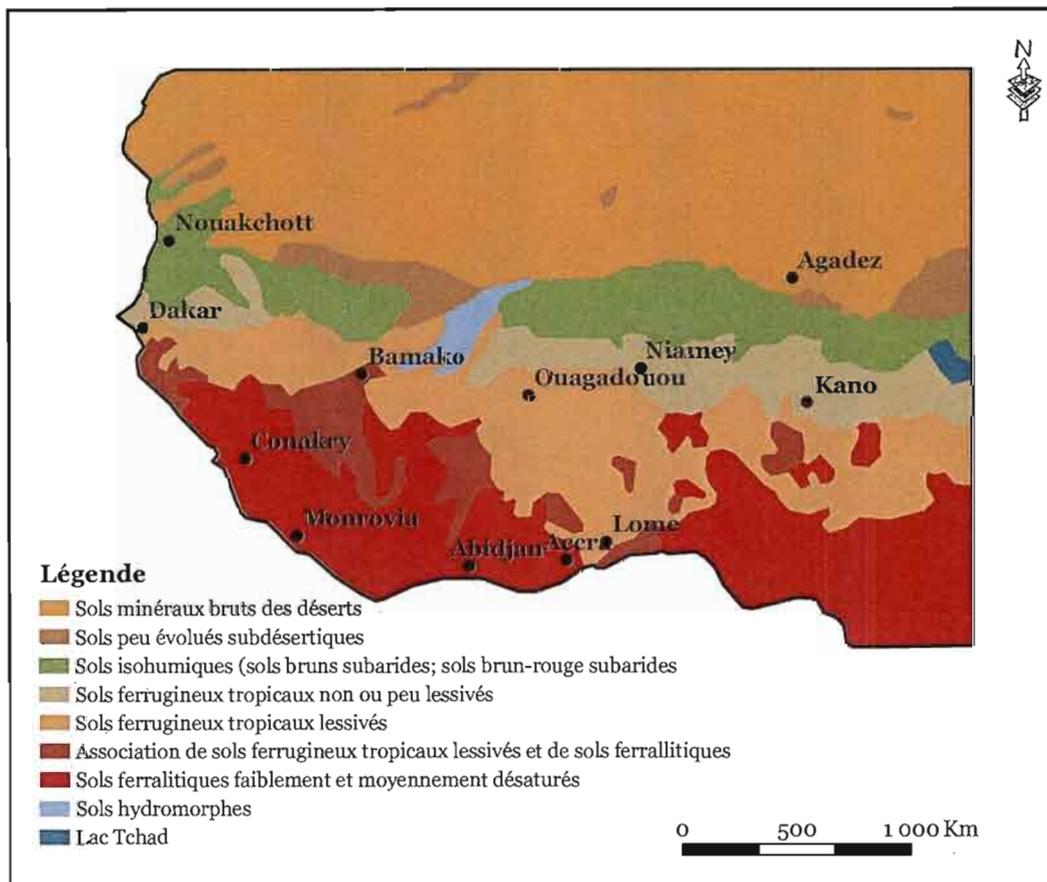


Figure I-6 : Esquisse des sols de l'Afrique de l'Ouest (d'après Casenave et Valentin, 1988)

Aux échelles plus fines, il est plus pertinent d'associer la géomorphologie du milieu à l'étude de la distribution des sols. A l'échelle des versants, les variations de la couverture pédologique s'ordonnent selon la pente de la séquence topographique ou « toposéquence ». Pour une région donnée, il est possible de repérer un nombre limité de toposéquences, le long desquelles la succession latérale des horizons pédologiques reste toujours la même. Gavaud (1971), lors d'un premier inventaire des principales toposéquences de la zone tropicale à longue saison sèche, a identifié 11 grands types de couvertures pédologiques. On peut cependant considérer le profil géomorphologique de la Figure I-7 comme typique des régions sahéliennes.

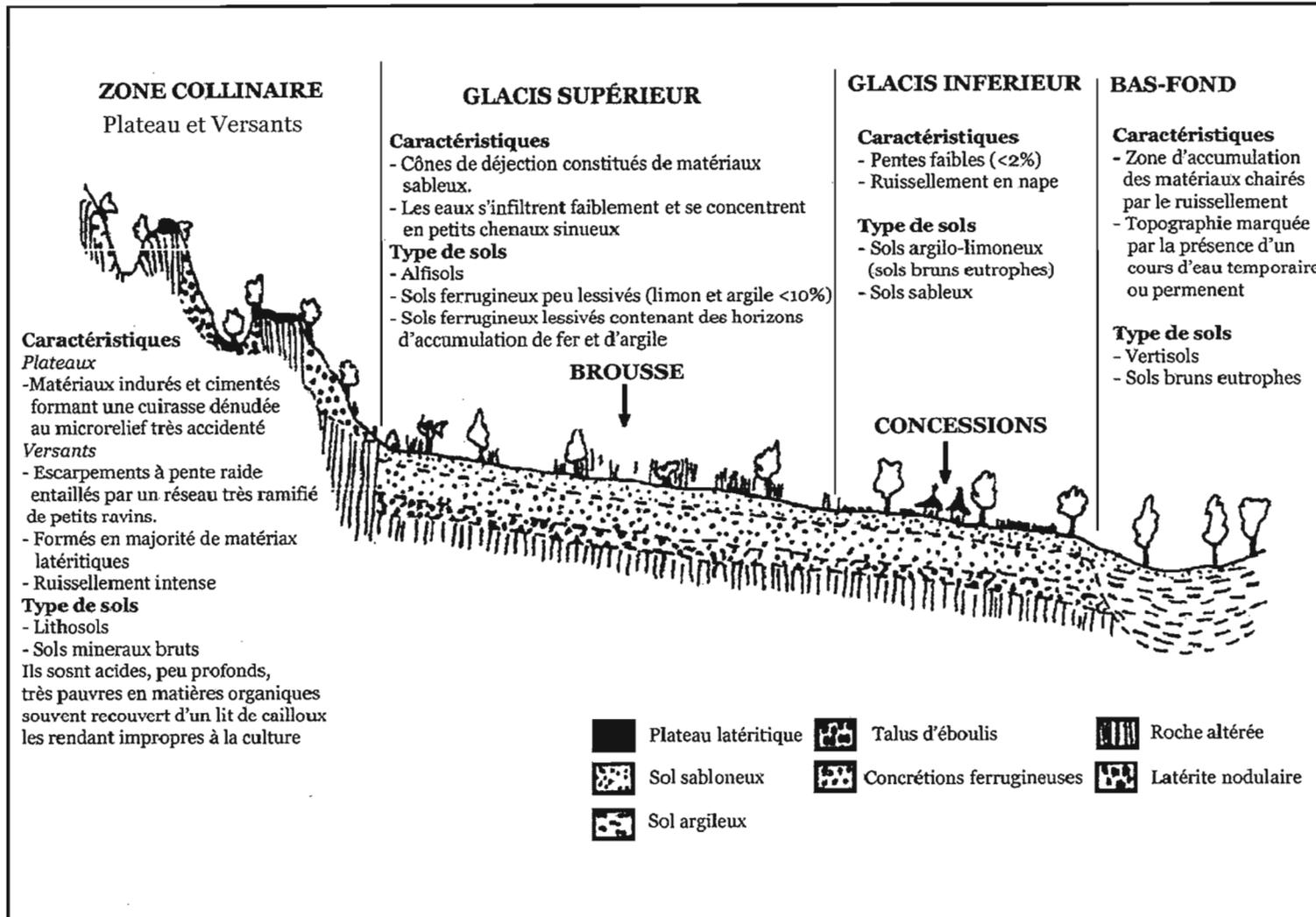


Figure I-7 : Profil géomorphologique typique des régions sahéliennes (d'après Vlaar, 1992)

I.2.3 Végétation

La densité et la diversité de la végétation en Afrique de l'Ouest s'intensifient du nord au sud avec l'augmentation des précipitations. On observe une stratification du couvert végétal allant du désert saharien du nord aux savanes et forêts au sud. Le NOAA-EPA définit des unités cartographiques basées sur une classification essentiellement physionomique (Figure I-8).

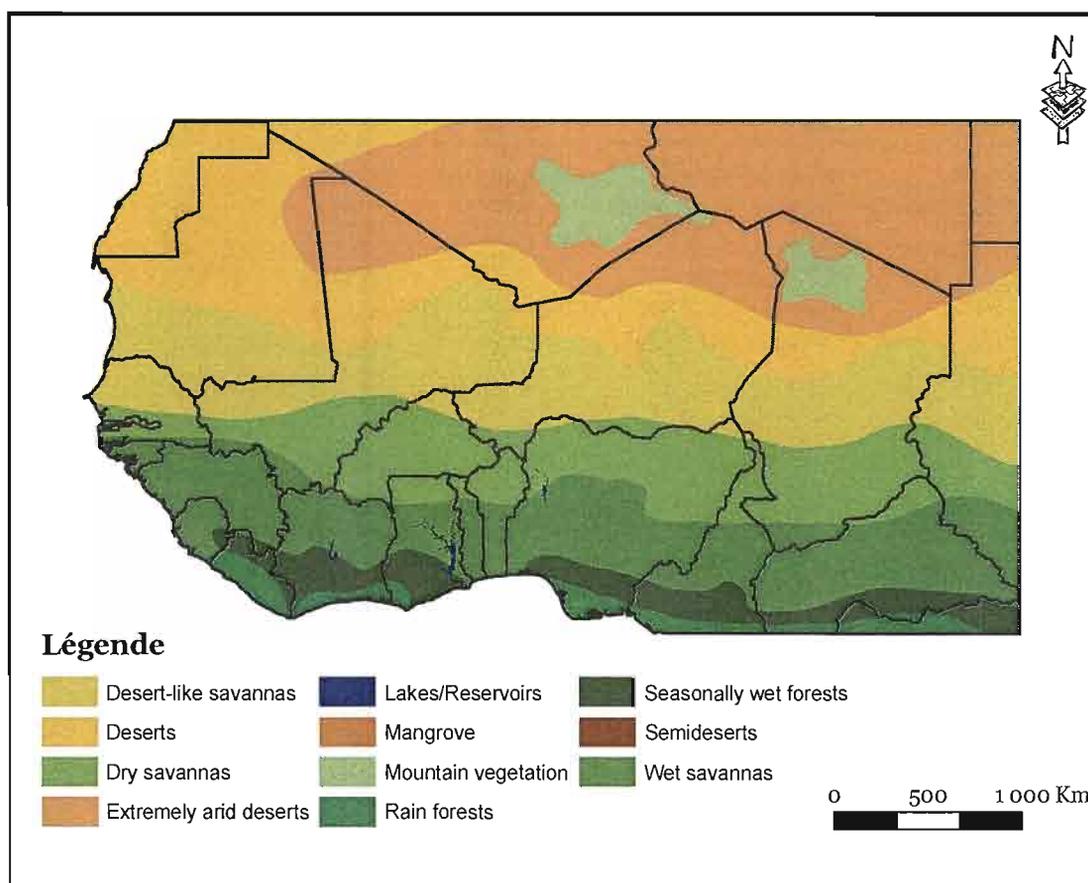


Figure I-8 : Principaux types de végétation en Afrique de l'Ouest (d'après le CD-ROM du Global Ecosystem Database / NOAA-EPA)

La couverture végétale typique du Sahel est la steppe arbustive et/ou arborée. Localement discontinue, elle se présente comme une mosaïque de formations variées ayant le même fond floristique. La steppe se compose d'un tapis herbacé discontinu parsemé d'arbres et d'arbustes. La strate herbacée haute de 50 à 80 cm, est constituée d'espèces annuelles à dominante graminéennes (Courel, 1984). Les espèces constituant le couvert végétal au Sahel peuvent être regroupées suivants les trois grands ensembles définis ci-après (in Karambiri, 2003) :

- les forêts ripicoles composées de *Anogeissus leiocarpus*, *Crataeva adansonii* et *Hallea stagnina* qui se localisent sur les sols hydromorphes le long des cours d'eau et dans les zones de mare ;

- les steppes arborées et arbustives constituées essentiellement de *Acacia senegal*, *Acacia nilotica*, *Acacia raddiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Bauhinia rufescens*, *Boscia angustifolia*, *Commiphora africana*, *Combretum glutinosum*, *Pterocarpus lucens* et *Ziziphus mauritiana*. Cette végétation souvent disposée en bandes plus ou moins parallèles, alterne, surtout dans l'extrême nord du Sahel burkinabé, avec des espaces nus ou herbeux formant ainsi des brousses tigrées ou fourrés tigrés ;

- les graminées saisonnières et composées principalement de *Aristida mutabilis*, *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis* et d'autres espèces telles que *Alysicarpus ovalifolius*, *Zornio glochidiata*, etc.

I.2.4 Un milieu sec sur fond d'aridité quasi permanente

Pour les régions sahéliennes, les seuls épisodes de pluie surviennent en saison hivernale (juin à septembre) et toutes les ressources en eau en dépendent, ainsi que les ressources végétales naturelles et cultivées. A l'échelle annuelle ou interannuelle, ces apports et leur variabilité constituent les éléments moteurs de la dynamique du fonctionnement et de l'évolution des hydrosystèmes, à travers un jeu d'offre (les précipitations) et de demande (demande évaporatoire due au rayonnement solaire net disponible à la surface de la terre) (Arora, 2002). Pour un intervalle de temps donné, ce jeu de « l'offre en précipitation » et de la « demande évaporatoire » détermine les composantes du bilan hydrique (évapotranspiration, écoulement) et fixe les quantités d'eau qui seront disponibles pour les végétaux et les êtres vivants. On se retrouve dans des conditions d'abondance et d'humidité lorsque les quantités d'eau sont suffisantes pour permettre le développement des végétaux et satisfaire les besoins

des êtres vivants. A l'opposé, lorsque ces quantités sont insuffisantes, on dit qu'il y a sécheresse ou aridité selon que le manque d'eau soit passager ou permanent.

La mauvaise répartition des pluies pendant la courte saison humide, les fortes températures, l'éloignement des sources d'humidité océaniques et la présence d'anticyclones étendus et durables confèrent à cette région du monde son caractère sec et aride. Aridité et sécheresse sont deux notions complexes et confusions sont faciles.

1.2.4.1 Notion d'aridité

L'aridité est un concept climatique à référence spatiale. Elle caractérise un milieu dont les précipitations moyennes annuelles sont faibles et très déficitaires par rapport à l'évapotranspiration. Son extension est déterminée par les répartitions respectives des précipitations et des températures, principaux facteurs d'intensité de l'évapotranspiration. La présence d'anticyclones étendus et durables, l'éloignement des sources d'humidité océaniques, et l'effet d'abri des barrières montagneuses sont également des causes d'extension de l'aridité. Suivant l'ampleur du déficit hydrique dans le milieu, il est devenu classique de distinguer trois degrés d'aridité correspondant à des zonalités climatiques :

- les régions dites *hyper-arides* : les précipitations y sont exceptionnellement faibles (10 à 50 mm en moyenne annuelle, si tant est que la moyenne ait, ici, un sens), très inégalement réparties avec, parfois, des interruptions de plus de 12 mois consécutifs ! L'écoulement y est rare, épisodique, et inorganisé,
- les régions *arides* : elles reçoivent de faibles pluies (moyenne annuelle comprise entre 50 et 150 mm dans la zone tropicale). Ces pluies sont concentrées sur une seule saison et sont très irrégulières d'une année à l'autre. L'écoulement dans les talwegs est intermittent, fragmenté ou en crues isolées consécutives à des averses rares, de courte durée et de forte intensité. Il est affaibli par les ponctions énormes de l'évaporation et de l'infiltration ; les points d'eau permanents sont dus aux résurgences de petites nappes d'inféro-flux au niveau de seuils rocheux,
- les régions *semi-arides* : les pluies, réparties sur quelques mois de l'année sont assez abondantes pour assurer à la végétation et à l'écoulement des eaux un rythme saisonnier. Mis à part le cas exceptionnel des cours d'eau allogènes, l'écoulement se fait par crues isolées parfois soudaines et violentes.

Réduite la plupart du temps à sa seule composante climatique, l'aridité possède également une composante édaphique qui vient accentuer ou atténuer la première en fonction des propriétés physico-hydriques du sol, du couvert végétal et de l'activité humaine (Floret et Pontanier, 1984; Floret *et al.*, 1992). L'aridité au Sahel se manifeste surtout par ses conséquences :

- *édaphiques* : extrême dénuement de la végétation, raréfaction et adaptation des êtres vivants,
- *hydrologiques* : faiblesse et irrégularité extrême des écoulements, dégradation fonctionnelle des réseaux hydrographiques,
- *géomorphologiques* : processus d'érosion et d'accumulation spécifiques, pauvreté des sols, etc.

L'aridité s'exprime quantitativement par différents indices conventionnels ou empiriques. La plupart de ces indices sont de simples rapports hydro-thermiques fondés principalement sur des grandeurs moyennes de précipitations et de température (Aubreville, 1949; Meigs, 1952; Emberger, 1971). Ces indices sont utilisés pour définir les degrés d'aridité et les conditions de l'écoulement fluvial. Ils ont été proposés par des climatologues, des morphologues, des géographes et des botanistes. Ces indices sont en général calculés annuellement (parfois mensuellement) et sont surtout utilisables à petite échelle (Floret et Pontanier, 1984).

1.2.4.2 Notion de sécheresse

La sécheresse est un concept météorologique à référence temporelle. C'est un phénomène conjoncturel (période sèche, année sèche) correspondant à une concordance atmosphérique défavorable plus ou moins limitée dans le temps. Contrairement à une idée répandue, la sécheresse n'est pas simplement synonyme de faibles précipitations. En effet, malgré un déficit pluviométrique, une bonne répartition des pluies peut engendrer une bonne campagne agricole. Inversement, des cumuls pluviométriques annuels proches de leur valeur moyenne mais mal répartis peuvent entraîner de mauvaises récoltes. C'est ainsi que Adefolalu (1986), distingue :

- la sécheresse météorologique qui correspond à des précipitations inférieures à la "normale",
- la sécheresse agricole qui correspond à une situation pendant laquelle la demande en eau des diverses cultures n'est pas satisfaite,
- la sécheresse hydrologique qui correspond à une situation déficitaire des ressources en eau superficielle et souterraine.

Plusieurs auteurs (Sircoulon, 1974; Adefolalu, 1986; Le Borgne, 1990; Leprun *et al.*, 1995) ont souligné la difficulté à définir la sécheresse car les définitions précises varient énormément d'un pays à l'autre. Aux États-Unis, le terme est utilisé quand une zone étendue reçoit 30% ou moins de précipitation qu'en temps normal sur un minimum de vingt et un jours. En Australie, on parle de sécheresse quand une région reçoit moins de 10% de précipitations par rapport à la moyenne annuelle, alors qu'en Inde la sécheresse est déclarée quand les précipitations annuelles sont inférieures de 75% aux normales saisonnières. On dit qu'il y a sécheresse en France quand moins de 0,2 mm de pluie est tombé sur une période d'au moins quinze jours.

D'après Beran et Rodier (1987), la sécheresse désigne un déficit, sur un temps assez long et sur une grande étendue, des disponibilités naturelles en eau par rapport à la valeur moyenne de ces disponibilités (précipitations, écoulement superficiel, écoulement souterrain). Les caractéristiques de la sécheresse sont ainsi définies en termes de conséquences. Comme l'a bien remarqué Sircoulon (1974), la sécheresse revêt un caractère exceptionnel quelle que soit la définition que l'on adopte.

I.3 Mécanismes climatiques et ressources en eau au Sahel

I.3.1 La mousson Ouest africaine

En Afrique de l'Ouest et au Sahel, l'alternance de deux masses d'air, qui s'opposent par leur humidité, détermine le cycle saisonnier du climat.

La saison sèche, d'octobre à mai, est soumise aux influences des masses d'air boréal en provenance des régions continentales de l'hémisphère nord. Deux anticyclones caractérisent ces masses d'air :

- l'anticyclone des Açores, essentiellement localisé dans les basses couches de l'atmosphère, est à l'origine des vents frais et riches en vapeur d'eau venant du nord : les alizés,
- l'anticyclone maghrébin ou l'anticyclone du Sahara donnant naissance à l'harmattan, vent chaud et sec de direction nord-est à est, chargé de sable et de poussière.

Durant la saison humide (de juin à septembre), les basses pressions pelliculaires liées à l'énorme apport radiatif que reçoit le Sahara laissent pénétrer les masses d'air austral issues

de l'anticyclone Sainte-Hélène. Ce sont des vents maritimes très humides et tièdes de direction sud-ouest appelés moussons.

Les deux masses d'air boréal (Harmattan) et austral (mousson) convergent vers une ceinture dépressionnaire d'environ 200 km de large, appelée Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT). Cette zone de convergence dessine l'équateur météorologique dont la trace au sol est connue sous le nom de Front Intertropical (FIT). Le FIT est situé en moyenne vers la latitude 8° N en janvier-février et atteint 20° N en juillet-août qui sont ses positions extrêmes méridionale et septentrionale (Figure I-9). Différentes zones de temps sont définies selon la position du front au cours du cycle annuel des oscillations du FIT (Figure I-10).

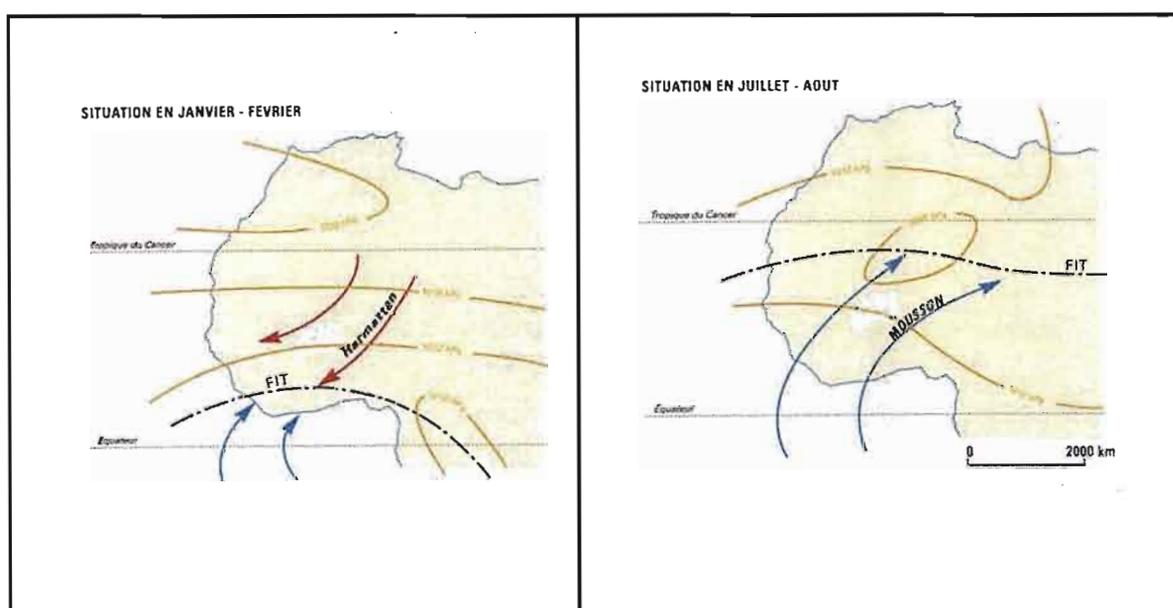


Figure I-9 : Positions du Front intertropical (FIT) et leur balancement au cours de l'année (d'après Atlas Jeune Afrique, 1993)

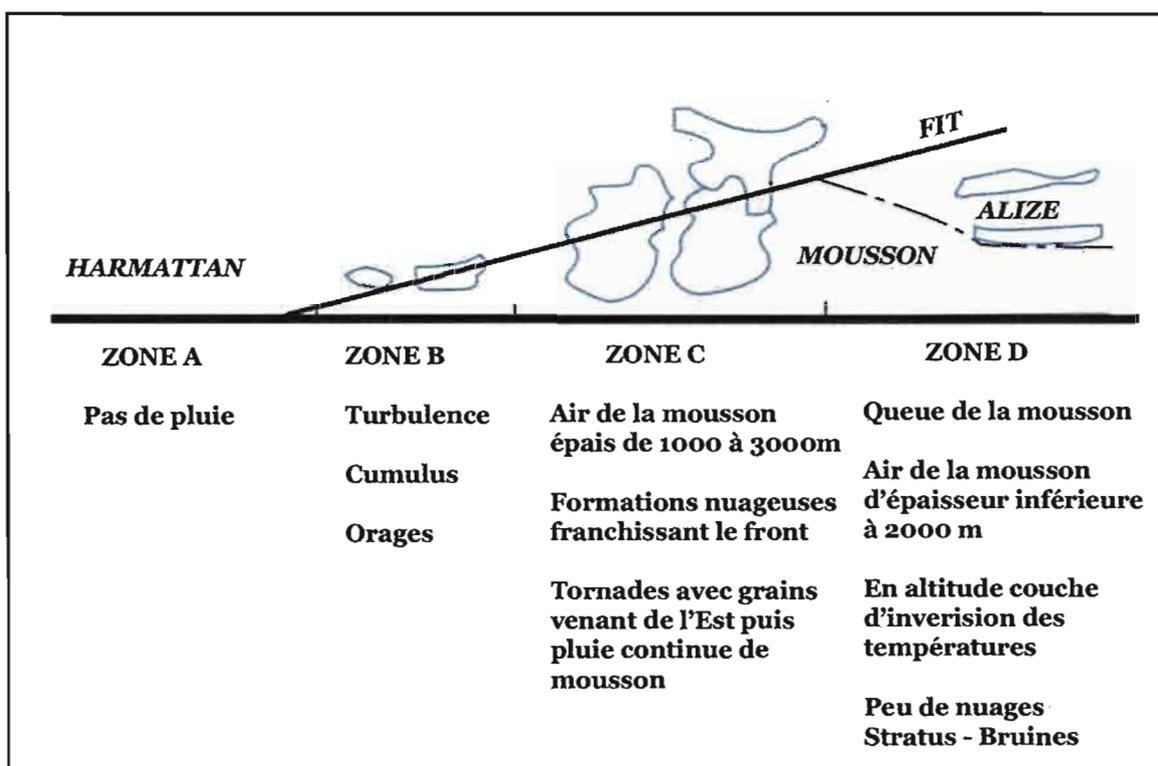


Figure I-10 : Zones de type temps associés au FIT (d'après Atlas Jeune Afrique, 1993)

I.3.2 Variabilité pluviométrique au Sahel

Le Sahel est sans doute l'exemple le plus dramatique où la variabilité pluviométrique qui ait été quantitativement et directement mesurée sur plusieurs décennies. On se souvient encore des images rapportées par les médias suite aux famines des années 1970 et 1980 dans lesquelles les pays sahéliens étaient plongés. Sécheresse, aridité et famine sont devenues les symboles de cette région du monde qui, en 110 ans de mesures hydroclimatiques (1896-2006), a connu plus de 50 années de sécheresse ! L'analyse des données pluviométriques depuis l'origine des stations jusqu'aux années récentes montre, en effet, que le Sahel africain a connu plusieurs phases de sécheresse, sans toutefois que l'on puisse dégager une quelconque périodicité (Figure I-11).

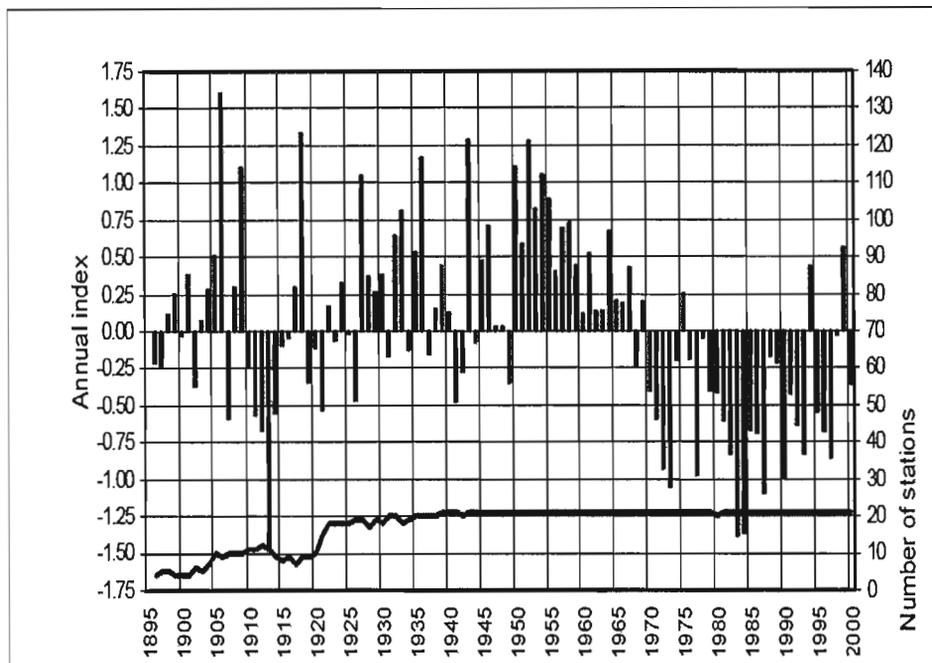


Figure I-11 : Variation de l'indice pluviométrique au Sahel et évolution du nombre de stations de mesure (d'après L'hôte et al., 2002)

La sécheresse de 1910–1916 :

Sept années successives de sécheresse au cours desquelles, les régions sahéliennes ont connu des déficits pluviométriques importants dont le plus sévère fut celui de 1913 (année de la « Grande Bérin » c'est-à-dire de la « grande famine » en songhaï, ou encore année « tasbanen », année « calamiteuse » en langue peul). Cette sécheresse s'est étendue de la Mauritanie et du Sénégal jusqu'au au Soudan actuel. Elle a également affectée toute la moitié nord du Nigéria. Les récits des militaires, des voyageurs ou des commerçants, les témoignages des populations et les études socio-économiques faites à l'époque sont unanimes pour souligner les ravages de cette sécheresse. « Ce ne sont que puits taris, lacs asséchés, troupeaux décimés, récoltes insuffisantes, exode de population, famine généralisée... » (Sircoulon, 1976; Le Borgne, 1990). Selon Le Borgne (1990), la dizaine de postes pluviométriques se répartissant sur le Sénégal, le Burkina Faso, le Niger, le Togo et la Côte d'Ivoire, dont on disposait alors, présentait des déficits pluviométriques allant de 30 à 60%.

La sécheresse de 1936-1950 :

Le Sahel a connu entre 1936 et 1950 une seconde vague de sécheresse avec une phase aiguë de 1940 à 1944 (Sircoulon, 1976). Le déficit pluviométrique des années 40 a fortement marqué les populations du Sahel et le souvenir des famines d'alors reste encore vivace. C'est ainsi qu'en pays Songhaï au Niger, l'année 1942 s'appelle « Wande Waasun » c'est-à-dire « éloigne ton épouse ». Cette seconde phase de sécheresse fut ressentie avec une rigueur et

une extension très variables d'un pays à l'autre et d'une année à l'autre. La densité des postes fonctionnant à cette époque ne permet pas de tracer des courbes d'iso-déficits précises mais elle est toutefois très largement suffisante pour acquérir une vue d'ensemble du phénomène sécheresse. En général ce sont les années 1941 et 1942 qui offrent les déficits les plus importants, mais les années 1940, 1944 et 1949 se sont aussi traduites par des hauteurs pluviométriques largement déficitaires et qui ont touché grandes surfaces.

La sécheresse de 1970 à nos jours :

Après une période de 20 années de pluviométrie excédentaire (1950-1969, exception faite de l'année 1968), le Sahel connaît depuis 1970 une série de 35 années sèches à très sèches avec seulement 3 années humides dont 1994 et 1999 au cours de la décennie passée. Plusieurs études sur la variabilité climatique et les ressources en eau ont permis de mettre en évidence le caractère singulier de ce déficit pluviométrique (Carbonnel et Hubert, 1992; Mahé et Olivry, 1995; Khodja *et al.*, 1998; Paturel *et al.*, 1998; Mahé *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 1999; Ouedraogo, 2001). Les épisodes de sécheresse les plus sévères sont ceux de 1973-1974, et 1983-1984. Malgré les années humides de 1994 et 1999 et une extension moins forte de la sécheresse depuis 1994, une récente étude (Ardoin *et al.*, 2003) a montré que la sécheresse a encore persisté dans les régions sahéliennes jusqu'à la fin de la décennie 1990. Certains auteurs (Sene et Ozer, 2002) se demandent si les évènements plus humides de la décennie 1990 ne constituent pas un signe vers un retour progressif à des conditions pluviométriques plus favorables. En tout état de cause, tous s'accordent pour dire que la continuité de la période de sécheresse ou l'identification d'une rupture pluviométrique vers des conditions plus humides ne pourra se vérifier statistiquement que dans une dizaine d'années.

I.3.3 Variabilité hydrologique au Sahel

Les déficits pluviométriques observés en Afrique de l'Ouest depuis le début de la décennie 1970, et leurs effets cumulés ont largement affecté les régimes des cours d'eau de la région. Les écoulements des cours d'eau ont en général baissé de plus de 30% et parfois même dépassé de 50% (Servat *et al.*, 1997). L'hydraulicité des cours d'eau a également été affectée avec une diminution marquée de la puissance des crues (Figure I-12).

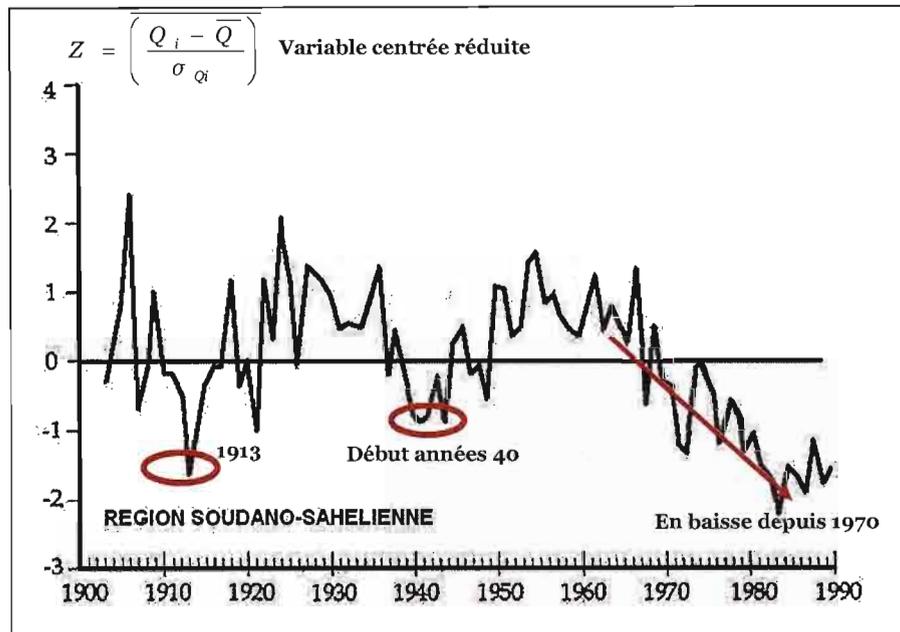


Figure I-12 : Évolution de l'hydraulicité moyenne calculée à partir de modules du Sénégal, du Niger et du Chari (d'après Olivry, 1994)

Cette variabilité pluviométrique a conduit à une diminution durable des ressources en eau de toute l'Afrique intertropicale. Les volumes des apports d'eau des tributaires de l'Océan Atlantique ont, en effet, diminué entre les décennies 70 et 80 par rapport à la moyenne 1951-1990 (Tableau I-1). La diminution marquée de l'abondance de la ressource en eau dans la région est telle qu'on estime qu'un retour éventuel à des conditions de précipitation excédentaires devra être soutenu sur plusieurs années pour permettre la reconstitution des aquifères et un retour à des conditions hydrologiques « normales ».

Tableau I-1 : Volume des apports annuels des tributaires de l'Océan Atlantique pour les décennies 70 et 80 par rapport à la moyenne 1951-1990 (d'après Olivry et al., 1993)

| Régions hydrologiques | Apports moyens (km ³ /an) | | |
|---|--------------------------------------|---------------|----------------|
| | 1951-1990 | 1971-1980 | 1981-1990 |
| Afrique humide (Congo, Cameroun, Gabon, Guinée Côte et Golfe, Côtes Nigeria, Zaïre) | 2350 | 2190 (-7%) | 1985 (-16%) |
| Afrique sèche (Sénégal, Gambie, Niger) | 235 | 205 (-13%) | 170 (-27%) |
| Total (Du Sénégal au Congo) | 2585 | 2395 (-7%) | 2155 (-17%) |

I.4 Milieu humain : Démographie et conditions socio-économiques

La question démographique en Afrique de l'Ouest et donc au Sahel est au cœur de nombreuses discussions traitant des problèmes sociaux et environnementaux que connaissent aujourd'hui les États de cette région. Le continent africain en général, et l'Afrique sahélienne en particulier, a en effet, vu sa population doubler, voire tripler dans certains cas, au cours des 40 dernières années (Figure I-13).

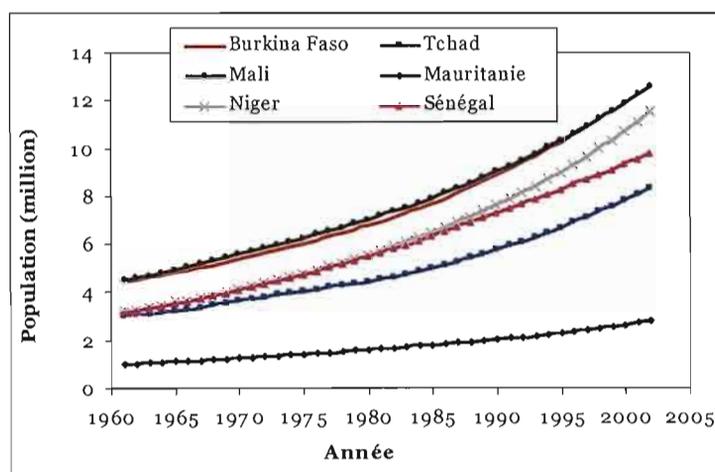


Figure I-13: Évolution de la population de 6 pays sahéliens de 1960 à 2000 (Source : Statistiques démographiques de la FAO)

Les estimations de l'évolution de la population de 6 pays sahéliens de 1960 à 2000 illustrent notre propos et met même en évidence un taux d'accroissement moyen qui n'a lui-même cessé de croître (Tableau I-2).

Tableau I-2 : Taux moyen de croissance par décennie dans les pays sahéliens (d'après Raynaut, 1997)

| Décennie | 1950-1960 | 1960-1970 | 1970-1980 | 1980-1990 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Croissance annuelle (%) | 1.6 | 2.5 | 2.8 | 3.2 |

Ce phénomène démographique a atteint une telle ampleur que lorsque l' « on examine les rétroactions entre population, agriculture et environnement, il y va quasiment de la survie de l'Afrique [...]. Premier trait : l'explosion démographique, phénomène le plus marquant de l'actualité et du devenir du continent africain [...]. L'impact de cette explosion ? Il est déjà terrible aujourd'hui et les prévisions nous mènent droit à la catastrophe si rien n'est fait » (Falloux, 1992; Raynaut, 1997).

Les débats autour des causes humaines (et climatiques) de la dégradation de l'environnement au Sahel ont commencé dès les années 1930 (Stebbing, 1935, 1938). Ils se sont intensifiés après les sécheresses des années 1970 et 1980 et continuent de nos jours. Extension des surfaces cultivées, surpâturage et coupe abusive du bois ont été à de nombreuses reprises évoqués. L'idée d'une relation nécessaire entre croissance de la population, pauvreté et dégradation du milieu s'est progressivement imposée comme une évidence sous des formulations variables entre les décennies 1980 et 1990 avec un impact médiatique au début des années 1990 alors que se préparait la conférence mondiale sur l'environnement de Rio.

La pauvreté entraîne une dégradation de l'environnement lorsque les « pauvres » se mettent à surexploiter ce qui forme l'assise de leurs ressources, sacrifiant ainsi le futur au sauvetage du présent. L'impitoyable logique des impératifs à court terme force les paysans sans terre à défricher des parcelles dans la forêt pluviale, à labourer des pentes trop raides et à raccourcir les périodes de jachère. En retour, le déclin écologique perpétue la pauvreté car les écosystèmes dégradés ne donnent plus aux paysans pauvres que des rendements en diminution (Brown, 1990; Raynaut, 1997).

Cleaver et Schreiber (1994) parlent de cercle vicieux entre croissance démographique, mode d'utilisation des ressources naturelles, pauvreté et dégradation de l'environnement. En effet, la surexploitation des ressources naturelles, suite à l'augmentation rapide de la population, provoque une stagnation de la production agricole qui entraîne à son tour une croissance économique plus faible. La croissance de la population se poursuit, entraînant une exploitation encore accrue des ressources naturelles, et ainsi de suite.

Cependant, une analyse comparative de 4 cas de figure africains (Mathieu, 1998) permet, dans une certaine mesure, de remettre en cause la portée souvent présentée comme générale du schéma liant croissance démographique, augmentation de la pauvreté et dégradation de l'environnement. En effet, Mathieu (1998) montre que l'augmentation de la population peut avoir un effet inverse car les processus réels en jeu obéissent à des causalités complexes liées aux échelles de temps et d'espace considérées. Cette question sera développée plus loin au chapitre V

I.5 Conclusion sur le Sahel

Ce premier chapitre, a mis en évidence la complexité et la fragilité du milieu sahélien. Région hétérogène aux contours variables, le Sahel ouest Africain fournit l'exemple le plus dramatique de la variabilité climatique sur plusieurs décennies qui ait été quantitativement et directement mesurée. Il est aujourd'hui au cœur de la problématique du changement climatique global et soulève de nombreuses questions : Quelle est l'occurrence de cette sécheresse dans l'histoire humaine récente du Sahel ? Peut-on trouver une explication adéquate de cette sécheresse dans les composantes naturelles qui façonnent le système climatique ? Notre compréhension de la variabilité climatique est-elle suffisante pour permettre de développer des aptitudes de prévision saisonnière de la pluviométrie ? (Hulme, 2001).

La recherche d'explications physiques aux variations climatiques locales, régionales ou planétaires est aujourd'hui une problématique centrale des recherches en climatologie. Très vite, les chercheurs ont été amenés à considérer les interactions océan-atmosphère-continent pour mieux comprendre les variations du climat et leurs impacts sur le milieu et les hommes. On sait aujourd'hui que l'un des éléments moteur de la variabilité du climat en Afrique de l'Ouest et à l'échelle de la planète est la Mousson Ouest Africaine. C'est ainsi que depuis 2001 plus de 60 laboratoires européens, africains et américains se sont regroupés au sein d'un vaste programme de recherche pour faire avancer les connaissances sur la Mousson Africaine dans ses aspects physiques, chimiques, hydrologiques et son conditionnement par les interactions océan-continent, le rôle des caractéristiques de la surface, ainsi que les interactions avec l'océan Atlantique tropical et les moyennes latitudes. Ce programme, dénommé AMMA (Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine), vise sur le plan pratique à améliorer les bases scientifiques qui permettront d'aborder les problèmes de ressources en eau, de sécurité alimentaire et de santé dans les pays d'Afrique de l'Ouest.

C H A P I T R E **II**

L E S D O N N E E S D E L' E T U D E

Le caractère multidisciplinaire de notre étude a conduit à rassembler une quantité importante de données de diverses sources et de types variés. L'objet de ce deuxième chapitre est d'en faire une présentation. Une partie des données auxquelles nous avons eu recours sont utilisables directement. Elles ont, en effet, fait l'objet de critiques dans diverses études qui ont mis en évidence leurs qualités et leurs homogénéités. Ce sont essentiellement les données hydroclimatiques. Pour ces données, une simple description est faite. Une seconde partie des données a nécessité des analyses et prétraitements pour les rendre soit directement utilisables, soit pour permettre leurs traitements ultérieurs. Pour ces données, les méthodes de prétraitements sont précisées et les résultats intermédiaires sont présentés.

II.1 Données hydroclimatiques

II.1.1 Échelle spatiale et temporelle

La question de l'échelle est une problématique centrale en hydrologie tant au niveau de la compréhension des phénomènes et des processus qu'à celui du transfert des résultats et lois d'une échelle à une autre. Un choix cohérent et pertinent de l'échelle spatiale et temporelle est indispensable pour mieux situer la représentativité des résultats et mesures et aussi leurs transposabilités à d'autres échelles (Lebel, 1991).

Berne *et al.*, (2004) comparent le bassin versant à un filtre passe bas qui admet en entrée la pluie et donne en sortie les débits. Le temps caractéristique d'un tel filtre définit sa dynamique temporelle en même temps qu'il s'impose comme l'échelle de temps minimum nécessaire à l'entrée pluie pour éviter un lissage de la réponse du filtre (les débits). Ils estiment l'échelle spatio-temporelle de la pluie en région méditerranéenne comme une fonction de la surface du bassin versant. Ainsi, selon ces auteurs, pour des bassins urbains de l'ordre de 1000 ha, l'échelle temporelle requise pour la pluie est de 5 minutes et l'échelle spatiale autour de 3 km. Ces échelles passent respectivement à 3 minutes et 2 km pour un bassin de 100 ha.

Les bassins que nous étudions couvrent des superficies de l'ordre de plusieurs milliers de km² et se situent en région sahélienne d'Afrique de l'Ouest, avec, très souvent, un problème de disponibilité des données à des échelles temporelles fines. Par ailleurs, nos objectifs se situent dans les contextes globaux de la gestion et de la planification des ressources en eau, objectifs pour lesquelles l'échelle mensuelle est reconnue comme pertinente. Cette échelle est également bien adaptée pour décrire les régimes hydrologiques des bassins de la région dont les crues ont une forme se rapprochant de celle de l'hydrogramme unitaire. Des études ont montré par ailleurs que l'échelle spatiale du demi-degré carré est suffisante pour une description correcte de la variabilité spatiale des pluies mensuelles (Arnell et Reynards, 1996; Yates, 1997). Toutes ces raisons ont guidé notre choix vers le pas de temps mensuel et le pas d'espace du demi-degré carré.

II.1.2 Sources des données hydroclimatiques

Les données hydroclimatiques utilisées dans cette étude proviennent essentiellement :

- de la banque de données du Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (SIEREM) de l'UMR HydroSciences Montpellier (France),
- de la Climate Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia à Norwich (UFA - Angleterre).

II.1.2.1 Données de la banque SIEREM

La réalisation de cette banque de données s'est faite à partir des données hydrologiques et climatiques collectées par l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-ORSTOM) en Afrique de l'Ouest et Centrale. Le travail de mise en forme et de critique a été mené au sein de l'équipe VAHYNE (analyse de la variabilité hydrologique et impacts sur les ressources en eau) de l'IRD. Par la suite, les chroniques des données hydroclimatiques de la base ont été couplées à des données environnementales spatialisées au moyen d'un SIG de manière à construire un Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eau et leur Modélisation (Boyer *et al.*, 2006) à l'échelle de l'Afrique de l'Ouest et Centrale. La banque SIEREM est accessible sur Internet (<http://www.hydrosociences.org/sierem/>). La banque est alimentée par les données des services nationaux, les organismes inter-états et organismes de recherche tels que la FAO, l'Asecna, l'Aghrymet, et par le biais du réseau de chercheurs FRIEND-AOC.

II.1.2.2 Données du CRU

La Climate Research Unit fournit des grilles de pluie et d'ETP mensuelles au demi-degré carré sur toute l'Afrique de l'Ouest. Les grilles ont été construites par interpolation selon la longitude et la latitude (fonction Spline). Les données ayant servi à la production de ces grilles proviennent des agences météorologiques nationales, du National Climatic Data Center (NCDC), de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et d'autres sources publiées (New *et al.*, 1999, 2000). Ces données ont subi un contrôle de qualité et les stations n'y répondant pas ont été supprimées ou remplacées par des moyennes de séries.

II.1.3 Grilles de pluie

Deux grilles de pluie ont été utilisées dans notre étude : la grille CRU et la grille SIEREM.

La grille CRU couvre la période allant de 1901 à 1995. Les grilles de pluie ont été élaborées par interpolation selon une fonction Spline à partir d'une centaine de postes pluviométriques couvrant le Mali, le Burkina et la Côte d'Ivoire.

Obtenues par Krigeage, la grille SIEREM couvre la période de 1901 à 1998. Un ensemble de 140 stations pluviométriques couvrant le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire et le Mali ont servi à son élaboration.

Une étude comparative des deux grilles de pluie (Ouedraogo, 2001) a révélé des différences significatives entre les deux séries de données du fait de la différence des nombres de postes utilisés et de la méthode d'interpolation.

II.1.4 Grilles d'évapotranspiration

L'évapotranspiration potentielle représente une grande part du bilan hydrique des milieux arides et semi-arides. C'est une donnée climatique essentielle dont les valeurs sont obtenues par mesure indirecte d'autres paramètres climatiques.

Plusieurs méthodes de calcul, pour la plupart empiriques existent dans la littérature. Celle décrite par Penman (1956) est considérée comme plus satisfaisante de toutes. Basée sur une évaluation objective du bilan énergétique de la surface évaporante, cette méthode rend bien compte du processus physique réel en évaluant le volume des échanges d'eau entre une surface évaporante et l'atmosphère par le biais du "bilan énergétique".

$$ETP_{Pen} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n + A_h) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6.43 \cdot (1 + 0.536 \cdot U_2) D}{\lambda} \quad \text{éq. II-1}$$

Où :

- R_n = radiation nette (mm.j^{-1})
- D = déficit de pression de vapeur (kPa)
- Δ = gradient de pression de vapeur saturée (kPa)
- γ = constante psychrométrique (kPa)
- λ = chaleur latente de vaporisation de l'eau (M.J.Kg^{-1})
- A_h = énergie advectée (mm.j^{-1})
- U_2 = vitesse du vent à 2 mètres (m.s^{-1})

La formule de Penman intègre de nombreuses variables (température de l'air, durée d'insolation, albédo, vitesse du vent, humidité de l'air, rayonnement solaire) conditionnant l'ETP. Cela entraîne une application numérique non aisée puisqu'il faut disposer de nombreuses mesures et calibrer correctement de nombreux paramètres. Nous disposons d'une grille d'ETP mensuelle à la résolution d'un demi-degré carré sur la période allant de 1903 à 1995. Ces fichiers proviennent du CRU.

II.2 Données de débit

II.2.1 Présentation des stations et données disponibles

Les données de débit proviennent de la banque de données SIEREM. Les bassins sélectionnés sont considérés comme représentatifs des conditions d'écoulement au Sahel. Ce sont quatre bassins de rive droite du fleuve Niger prenant leur source au Burkina Faso et le bassin du Nakambé à Wayen (Figure II-1). Le choix de ces cinq bassins a été guidé par le fait qu'ils ont pour la plupart connu une augmentation des coefficients d'écoulement depuis la rupture climatique survenue au Sahel autour des années 1970. Les périodes d'observation et le nombre de mois manquant dans chaque série de débit sont donnés au Tableau II-1.

Tableau II-1 : Caractéristiques des stations retenues

| Stations | Nb d'années d'observation | Lacunes (mois) | Ratio avant et après 1970 (%) | |
|------------------|---------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|
| | | | Pluie | Coeff. écoulement |
| Alcongui | 40 (1961 – 2000) | 33 | -10 | +40 |
| Diongoré | 31 (1962 – 1992) | 44 | 0 | 0 |
| Koriziena | 22 (1961 – 1982) | 0 | -18 | +95 |
| Tera | 35 (1961 – 1995) | 12 | -20 | +37 |
| Wayen | 36 (1965 – 2000) | 15 | -16 | +108 |

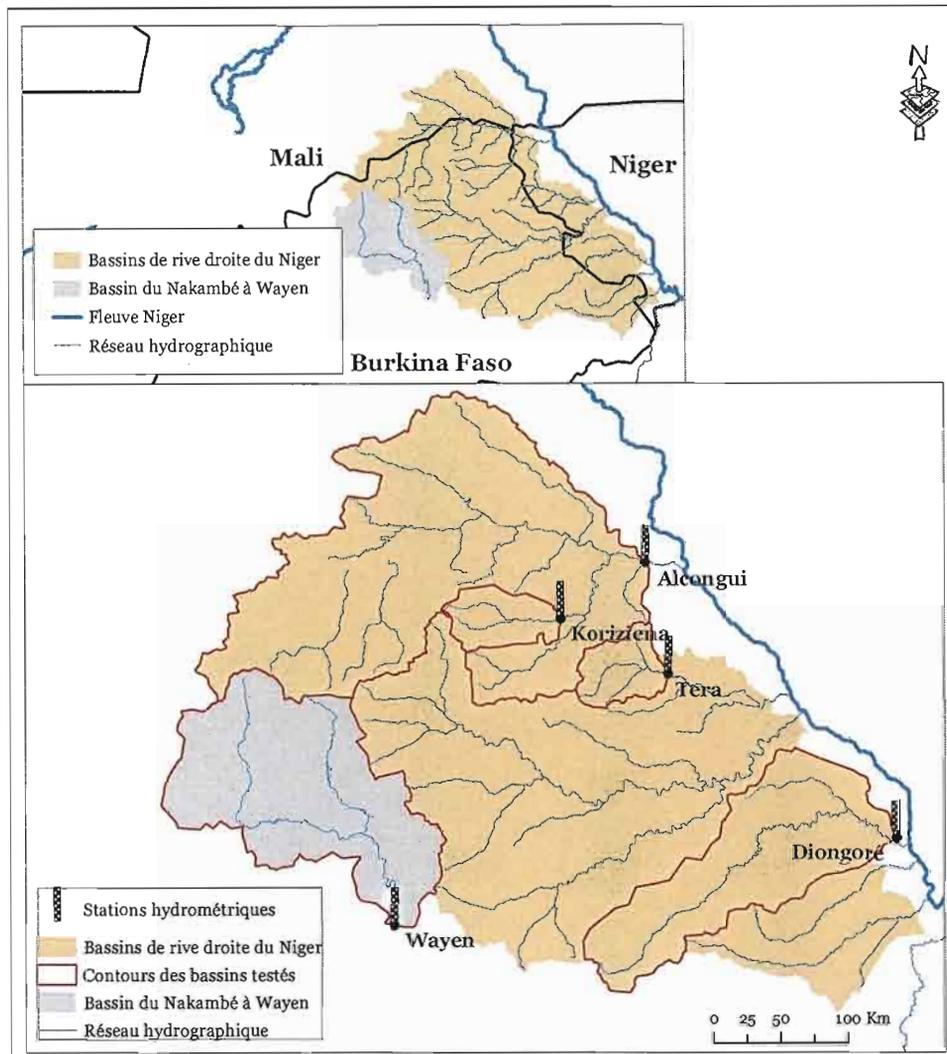


Figure II-1 : Carte des bassins retenus

II.2.2 Ruptures climatiques dans les séries de débit

Le Tableau II-1 montre qu'à l'exception de la station de Diongoré, les 4 autres stations retenues ont connu une augmentation des coefficients de ruissellement après 1970. Le coefficient d'écoulement est le rapport entre l'écoulement (exprimé en lame d'eau) et la hauteur de précipitation. La pluviométrie ayant globalement baissé dans la zone sahélienne après 1970, nous avons cherché à savoir si l'augmentation des coefficients s'est accompagnée d'une augmentation des débits aux stations concernées. Le logiciel Khronostat propose des tests de détection de « ruptures » dans une série chronologique. Nous l'avons utilisé à cet effet. Les résultats des tests statistiques retenus sont présentés au Tableau II-2 les graphiques correspondants sont en annexe III.

Tableau II-2 : Résultats des tests de détection de rupture sur les séries chronologiques de débits des stations étudiées- Statistique de Buihand

| Stations | Hypothèse nulle (Absence de rupture) | | |
|------------------|--------------------------------------|--------------|--------------|
| | Seuil de 90% | Seuil de 95% | Seuil de 99% |
| Alcongui | Rejetée | Rejetée | Rejetée |
| Diongoré | Acceptée | Acceptée | Acceptée |
| Koriziena | Acceptée | Acceptée | Acceptée |
| Tera | Acceptée | Acceptée | Acceptée |
| Wayen | Rejetée | Acceptée | Acceptée |

Hormis la station d'Alcongui, aucune autre station à ce seuil de confiance ne présente une rupture dans les séries de données. La station de Wayen présente une rupture en 1972 au seuil de 90%. Globalement, au seuil de 99%, aucune rupture n'est observée dans les séries de débit des stations étudiées à l'exception de la station d'Alcongui pour laquelle les écoulements ont fortement baissé comparativement à la période avant la date de rupture. En effet, les tests de segmentation de Hubert montrent que la moyenne des débits sur la période 1961-1982 est de 10.5 m³/s avec un écart type de 4.6 m³/s, tandis qu'on a une moyenne de 2.9 m³/s pour la période 1983-1997 avec un écart type de 2.3 m³/s.

II.3 Données WHC

La capacité de rétention en eau du sol (ou Water Holding Capacity en anglais) est une donnée importante pour la démarche de modélisation que nous entreprenons dans le cadre de cette réflexion car elle correspond au dimensionnement du réservoir sol du modèle GR2M que nous utilisons. Une valeur fixe de capacité en eau est attribuée à chaque bassin versant et est calculée à partir de la version numérisée de la carte des sols de établie par la FAO (*Digital Soil Map of the world*, Fao-Unesco, 1974-1981). Cette carte couvre la terre entière et contient au total 4930 unités de sol.

La FAO définit 7 classes des sols dont les valeurs de capacité de rétention en eau sont déterminées en fonction de caractéristiques agro-pédologiques comme la profondeur racinaire, la granulométrie du sol, le couvert végétal, et des limites de succion standardisées (point de flétrissement et capacité au champ). Les limites de chaque classe sont données au Tableau II-3. Aucune information n'est disponible quant à la valeur à attribuer à la classe W (Wetlands) qui correspond à des types de sols marécageux. Lors d'études antérieures, une valeur arbitraire de 1000 mm a été attribuée à cette classe (Dray, 2001; Ouedraogo, 2001; Ardoin, 2004).

Tableau II-3 : Classification des sols selon la capacité de rétention en eau (d'après Fao-Unesco, 1974-1981)

| Classe | Capacité de rétention en eau |
|--------------|------------------------------|
| | WHC (mm) |
| A | > 200 |
| B | 150 – 200 |
| C | 100 – 150 |
| D | 60 – 100 |
| E | 20 – 60 |
| F | 0 – 20 |
| W (Wetlands) | N. C. |

Afin de déterminer la WHC des bassins sur lesquels nous avons travaillé, Dieulin (2005) a mis au point une méthode dont nous rappelons ici les principales étapes.

La carte des sols de la FAO découpe la zone d'étude en polygones irréguliers auxquels sont associés des valeurs de WHC. Pour les besoins de notre modélisation, nous devons croiser cette information avec le contour des bassins et avec une grille régulière dont la maille unité fait $\frac{1}{2}$ degré carré et extraire la valeur de WHC sur cette maille unité.

Pour chaque type de sol et de WHC associé, on retient 3 valeurs de capacité de rétention en eau : une valeur minimale (que nous noterons FAOmin) correspondant à la limite inférieure de la classe considérée, une valeur maximale (FAOmax) égale à sa limite supérieure et, une valeur moyenne (FAOmoy) égale à la moyenne arithmétique des limites inférieure et supérieure de la classe.

A ces trois valeurs de WHC s'ajoute une quatrième appelée FAOsaxton. Cette dernière valeur de WHC est obtenue en recalculant les WHC de la FAO en prenant en compte d'autres fonctions de pédo-transfert dans le sol (Raynolds *et al.*, 1999).

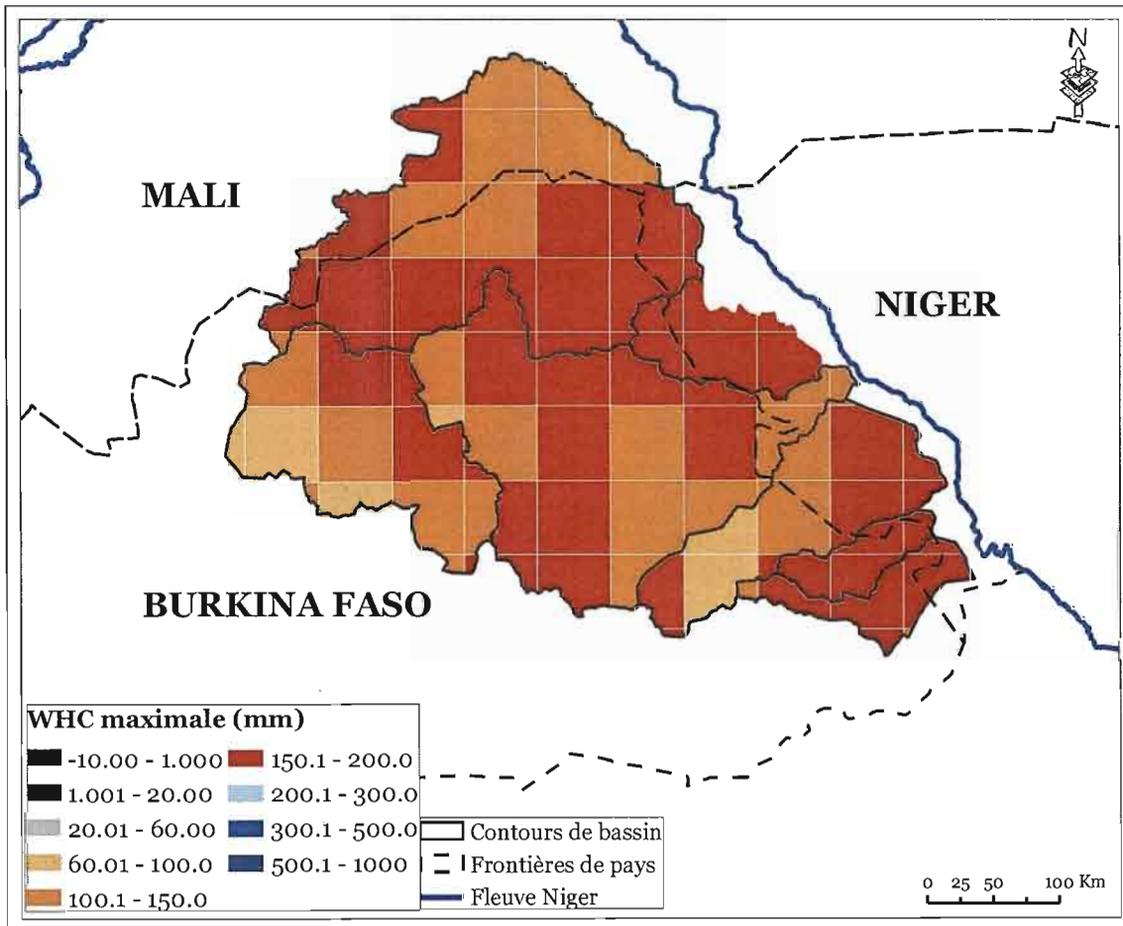


Figure II-2 : WHC FAOmax de 6 bassins de rive droite du Fleuve Niger

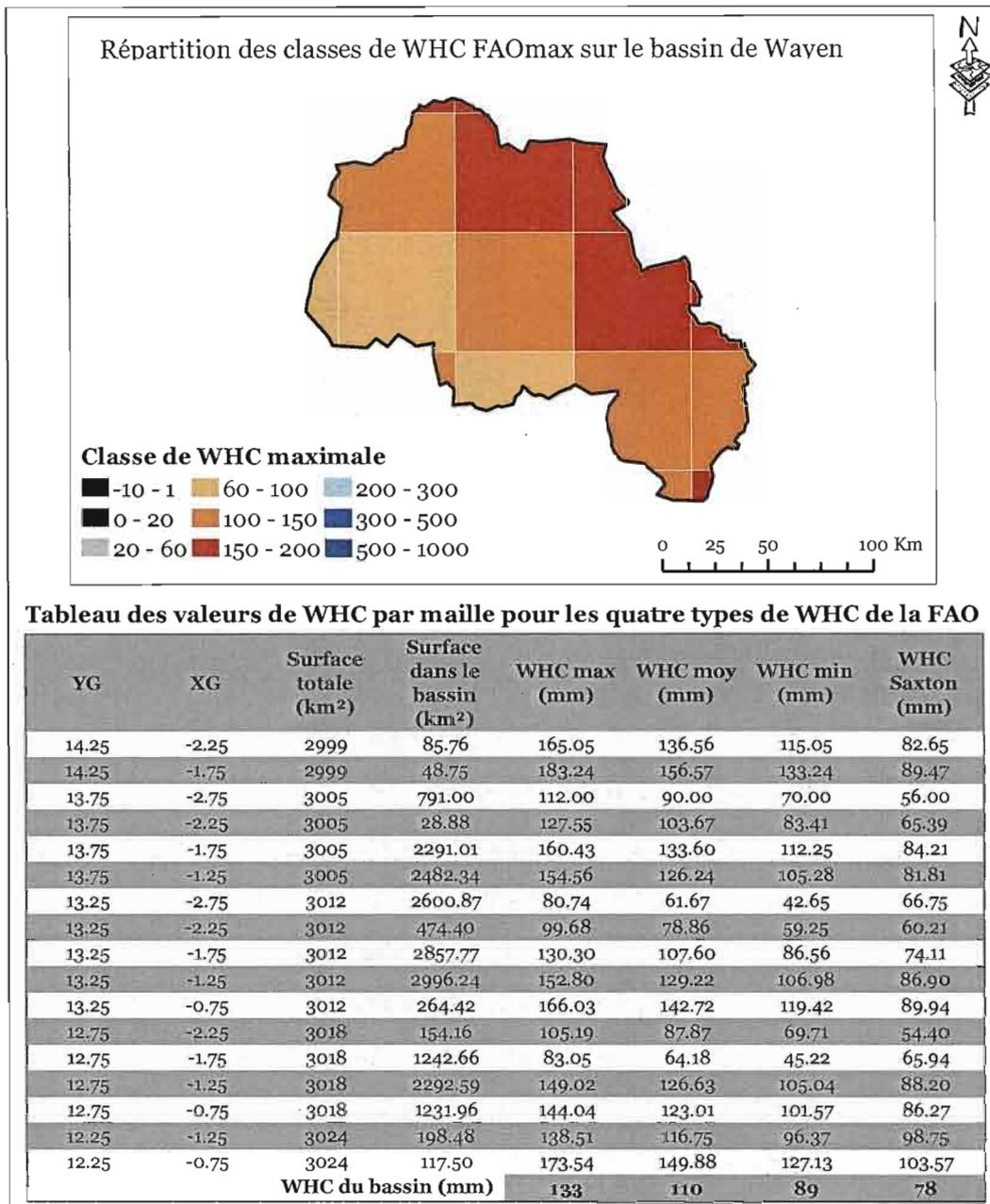


Figure II-3 : Valeurs de WHC FAOmax pour le bassin du Nakambé à Wayen

Il faut noter qu'aux vues de la figure II-3, les valeurs de WHC peuvent varier grandement dans l'espace et que la valeur moyenne du bassin n'est peut-être pas suffisante pour caractériser le bassin versant.

II.4 Données Landsat

II.4.1 Présentation des images disponibles

Un des objectifs de ce travail est de caractériser, à l'aide d'images satellites, l'évolution de l'occupation du sol sur le bassin du Nakambé. Nous disposons de séries de données climatiques et hydrologiques courant globalement la période 1960-2004. Afin de permettre une mise en parallèle de l'évolution du milieu et du climat sur le bassin, nous avons acquis des images Landsat-1 MSS (Multi-Spectral Scanner) de 1972, Landsat-5 TM (Thematic Mapper) de 1986 et 1992, et, Landsat-7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) de 2002 et 2003 (Figure II-4).

Ces images permettent donc d'avoir un état du bassin pour les décennies 1970, 1980, 1990 et 2000. Le choix des données Landsat exclut, bien évidemment, la possibilité d'avoir des images datant des années 1960 puisque le programme des satellites Landsat n'a commencé qu'en 1972. Nous nous sommes donc basé sur les études de Dray (2001) et de Marchal (1983) pour avoir un état du bassin pour cette décennie.

Les caractéristiques spectrales et spatiales des différentes images sont données au Tableau II-4. Le nombre d'images, les dates d'acquisition ainsi que l'origine des images sont précisés au Tableau II-5.

Tableau II-4 : Caractéristiques spectrales et spatiales des images disponibles.

(*) La résolution géométrique de l'image TM de 1986 est de 28.5 m

| Landsat-1 Multi Spectral Scanner de 1972 | | |
|---|----------------------------------|--------------------------------|
| Fauchée : 180 Km | | |
| Bandes spectrales | Résolution spectrale (µm) | Résolution spatiale (m) |
| Bande 1 = MSS Bande 4 (Vert visible) | 0.50 – 0.60 | 60 |
| Bande 2 = MSS Bande 5 (Rouge visible) | 0.60 – 0.70 | 60 |
| Bande 3 = MSS Bande 6 (Proche Infra Rouge) | 0.70 – 0.80 | 60 |
| Bande 4 = MSS Bande 7 (Proche Infra Rouge) | 0.80 – 1.10 | 60 |
| Landsat-5 TM de 1986 et 1992 | | |
| Fauchée : 185 Km | | |
| Bande 1 (Bleu visible) | 0.45 – 0.52 | 28.5 / 30 (*) |
| Bande 2 (Vert visible) | 0.52 – 0.60 | 28.5 / 30 (*) |
| Bande 3 (Rouge visible) | 0.63 – 0.69 | 28.5 / 30 (*) |
| Bande 4 (Proche Infra Rouge) | 0.76 – 0.90 | 28.5 / 30 (*) |
| Bande 5 (Proche Infra Rouge) | 1.55 – 1.75 | 28.5 / 30 (*) |
| Landsat-7 ETM+ de 2002 et 2003 | | |
| Fauchée : 185 Km | | |
| Bande 1 (Bleu visible) | 0.45 – 0.52 | 30 |
| Bande 2 (vert Visible) | 0.52 – 0.60 | 30 |
| Bande 3 (Rouge visible) | 0.63 – 0.69 | 30 |
| Bande 4 (Proche Infra Rouge) | 0.76 – 0.90 | 30 |
| Bande 5 (Proche Infra Rouge) | 1.55 – 1.75 | 30 |

Tableau II-5 : Images Landsat disponibles pour l'étude

| | Landsat-1 MSS | Landsat-5 TM | Landsat-7 ETM+ |
|---------------------------|---|---|--|
| Nombre d'images | 2 (1972) | 1 (1984) 2 (1986) 4 (1992) | 4 (2002) 1 (2003) |
| Date d'acquisition | 12 novembre 1972 13 novembre 1972 | 19 novembre 1984 18 janvier 1986 8 octobre 1986 17 octobre 1992 10 janvier 1992 | 06 janvier 2002 22 novembre 2002 28 octobre 2002 13 janvier 2002 09 janvier 2003 |
| Source | <ul style="list-style-type: none"> - USGS (US Geological Survey) - Centre Régional AGRHMET (Niger) - CONED (Burkina Faso) - Tropical Rain Forest Information Center's Orthorectified Landsat Atlas DVD Series | | |

L'examen individuel des images présentées à la Figure II-4 n'a fait ressortir, visuellement, aucun défaut de lignage ni de chatoiement. On remarque cependant de légers voiles nuageux sur certaines images. C'est le cas des images Landsat-1 MSS du 13 novembre 1972, et Landsat-7 ETM+ du 22/11/2002 et du 28/10/2002. Toutefois, ces voiles nuageux sont tous situés à l'extérieur des limites du bassin versant. L'application d'un masque permet de s'affranchir d'un éventuel prétraitement visant à les supprimer ou, du moins, à atténuer leurs effets sur les comptes numériques des images concernées.

Dans certains cas, il n'a pas été possible de couvrir entièrement la surface du bassin (Figure II-4) faute d'images disponibles. Des solutions alternatives ont donc été proposées afin de palier ces insuffisances. Trois cas de figure se sont présentés :

- toute une partie nord du bassin n'est pas couverte par les images de 1972. La seule image disponible couvrant cette partie du bassin, date du 16/02/1979. Cette image n'a pas pu être prise en compte car la surface manquante est relativement importante, et l'ajout d'une image de 1979 biaiserait les résultats. De plus, l'année 1979 est trop éloignée de 1972. Nous avons donc eu recours aux études de Dray (2001) et de Marchal (1983) pour compléter la partie manquante.

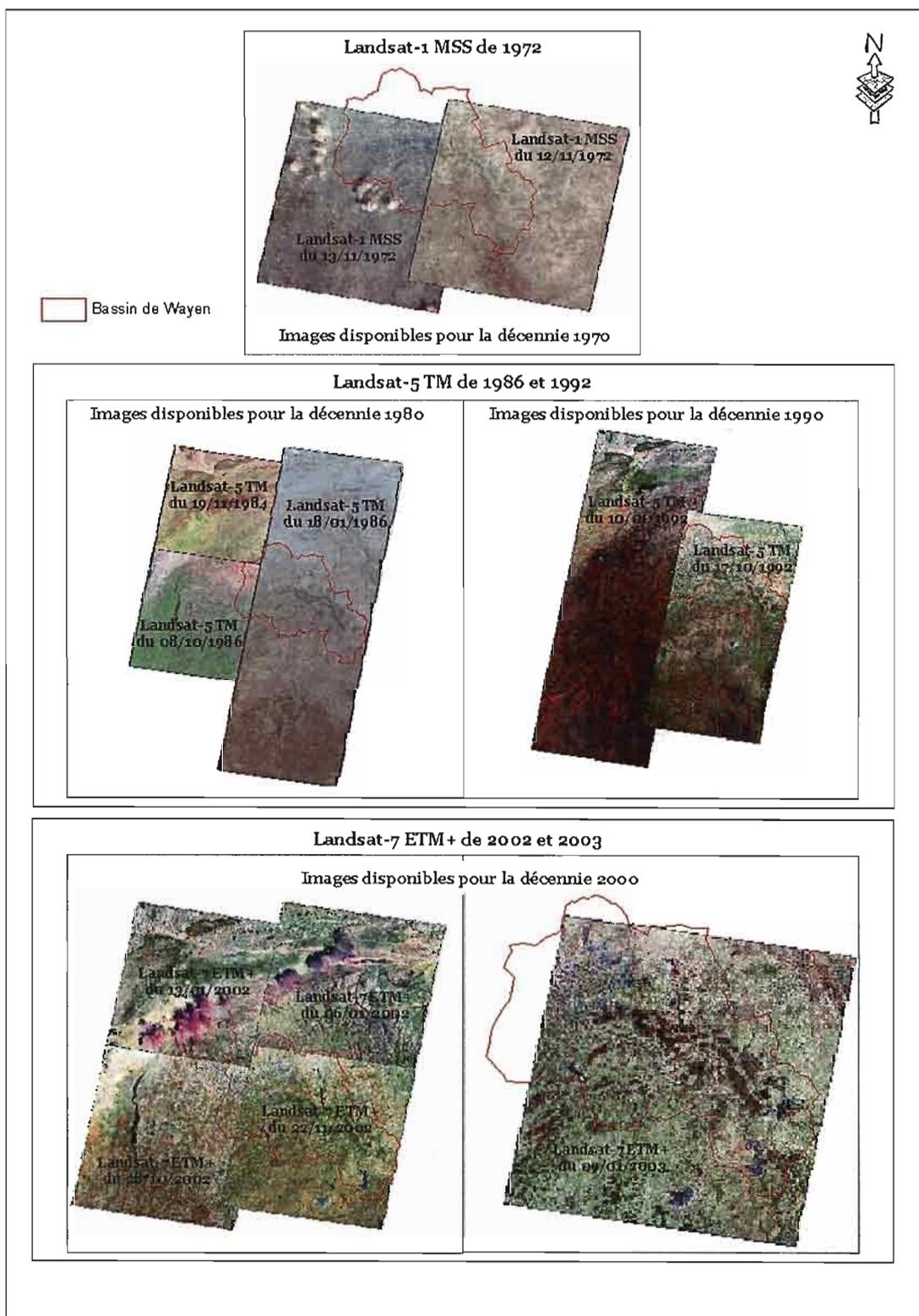


Figure II-4 : Présentation des images Landsat disponibles

- une toute petite portion (moins de 0.5%) au nord du bassin n'est pas couverte par les images Landsat-5 TM de 1986. Nous avons pris en compte une image datant de 1984 (Landsat-5 TM du 19/11/1984) afin d'assurer une couverture complète du bassin. Nous considérons que cet ajout n'influencera pas le résultat final des traitements ultérieurs (classification) au vu de l'étendue de la surface manquante.
- L'image du Landsat ETM+ du 09/01/2003 ne couvre pas non plus entièrement le bassin. Cette image nous a essentiellement servi comme base de travail pour l'échantillonnage de zone d'entraînement sur le terrain. Nous n'avons donc pas cherché à compléter la couverture du bassin avec des images de la même année.

II.4.2 Corrections radiométriques

Les données satellites sont de nos jours largement utilisées dans les domaines des sciences de l'eau et de l'environnement. L'utilisation de ce type de données pour l'étude de l'occupation du sol et de la détection de changements dans l'évolution du milieu requiert dans certains cas des prétraitements avant toute classification. Afin de bien comprendre et justifier la nécessité de ces corrections dans les traitements d'images, il convient de rappeler quelque peu les principes d'acquisition d'image de télédétection et les cheminements des rayonnements électromagnétiques.

II.4.2.1 Éléments de radiométrie

La Figure II-5 présente le principe d'acquisition des images de télédétection et décrit les cheminements des rayonnements électromagnétiques depuis le soleil jusqu'au satellite en passant par le pixel au sol.

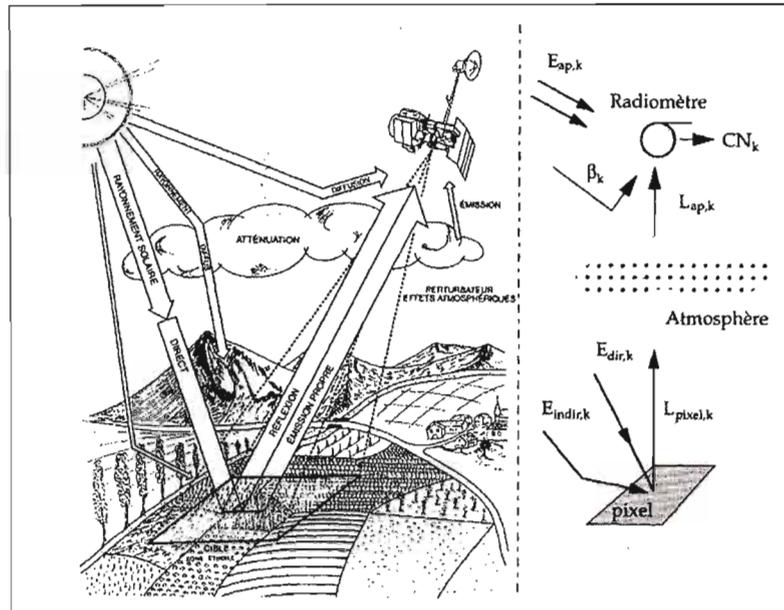


Figure II-5 : Principe de la télédétection et modélisation du cheminement du signal et de ses perturbations (d'après Caloz et Collet, 2001)

L'énergie totale reçue par le satellite pour une bande spectrale k donnée peut être modélisée suivant l'équation suivante :

$$L_{ap,k} = \alpha_k L_{pixel,k} + \beta_k \quad \text{éq. II-2}$$

Où :

- $L_{ap,k}$ est l'énergie apparente arrivant à l'entrée du radiomètre dans la bande spectrale k ,
- $L_{pixel,k}$ correspond à l'énergie réellement émise par le pixel dans la bande spectrale k . Le terme $\alpha_k L_{pixel,k}$ est l'énergie théorique reçue par le satellite de la part du pixel. Le facteur multiplicatif α_k rend compte des atténuations subies par les rayonnements dans la bande spectrale k lors de leurs parcours jusqu'au satellite. Ces atténuations sont dues aux interactions d'absorption des rayonnements électromagnétiques avec l'atmosphère.
- le terme β_k , dit additif, rend compte des rayonnements solaires n'ayant pas interagi au préalable avec le pixel (interaction de diffusion avec l'atmosphère). C'est l'énergie solaire réfléchiée par l'atmosphère et directement perçue par le radiomètre.

Le signal $L_{ap,k}$ traverse ensuite le radiomètre et est transformé en compte numérique CN_k dans la bande spectrale k . Les CN_k sont généralement compris entre 0 et 255 (codage en 8 bits) pour les images numériques. La précision de la transformation de l'énergie $L_{ap,k}$ en compte numérique est plus ou moins précise en fonction du type de capteur embarqué à bord du satellite.

II.4.2.2 Nécessité des corrections atmosphériques

D'après le principe d'acquisition des images de télédétection décrit précédemment, les deux points suivants méritent d'être soulignés :

1. à conditions d'observation équivalentes, des capteurs différents, embarqués à bord du même satellite, donneront des comptes numériques différents pour le même objet visé au sol ;
2. le contenu informatif d'une image brute (les comptes numériques CN_k) dans une bande spectrale k donnée présente une insuffisance liée au fait que les comptes numériques dans l'image ne correspondent pas exactement à l'énergie émise par les objets visés au sol.

Il apparaît donc, qu'en toute rigueur, toute image brute de télédétection doit faire l'objet de corrections radiométriques afin de restituer, dans la mesure du possible, les propriétés spectrales spécifiques à chaque type d'occupation du sol, de manière à favoriser sa détermination par des moyens tant visuels que numériques, et, le cas échéant, d'observer son évolution (Caloz et Collet, 2001). La littérature montre cependant que ces corrections ne sont pas toujours nécessaires (Song *et al.*, 2001). Il est évident que dans une étude diachronique comme celle que nous entreprenons de faire, ces corrections sont indispensables car les images utilisées doivent présenter des caractéristiques les plus homogènes possibles de sorte que leurs comparaisons puissent être associées à de réels changements du milieu et non à des artéfacts liés aux images elles mêmes. Idéalement, les images devraient provenir du même capteur et les dates d'acquisition devraient être les plus proches possibles en mois, jour et heure. Ces conditions idéales étant loin d'être respectées dans notre cas, et pour parer quelque peu à ces lacunes, des corrections atmosphériques ont été effectuées sur les images utilisées dans l'étude. La question qui s'est alors posée a été de savoir quelle méthode conviendrait le mieux au cas particulier de ce travail.

En effet, plusieurs méthodes de correction des effets atmosphériques sur les images de télédétection ont été proposées lors d'études consacrées à cette problématique. Si, individuellement, les perturbations dues à l'atmosphère sont relativement bien connues et modélisées (Chandrasekhar, 1960), la caractérisation de l'effet global de l'atmosphère sur les rayonnements électromagnétiques est une question majeure en télédétection. On distingue globalement deux groupes de méthodes de correction radiométriques.

Les corrections radiométriques absolues dans lesquelles les caractéristiques atmosphériques de la date de prise de vue sont estimées à l'aide d'équations physiques et utilisées pour convertir les comptes numériques des images en valeurs de réflectance au sol (réflectance que mesurerait un radiomètre à proximité du pixel sans effets parasites sur la mesure). On peut citer entre autre la méthode 5S ou 6S (Second/Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum, Tanré, 1986; Vermote *et al.*, 1997), les modèles de transfert radiatif (Haan *et al.*, 1991; Vermote *et al.*, 1997), la méthode du DOS (Dark Object Substraction, Spanner *et al.*, 1990; Huguenin *et al.*, 1997), les corrections par la méthode du Modified Dense Dark Vegetation (MDDV, Liang *et al.*, 1997), etc.

Cependant, l'hétérogénéité spatiale des conditions atmosphériques, le manque fréquent ou l'insuffisance d'informations pour satisfaire aux modèles de transfert radiatif, sont souvent cités comme facteurs limitant sévèrement ces types de corrections (Coppin et Bauer, 1994; Liang *et al.*, 1997; Caloz et Collet, 2001). A ces facteurs il faut ajouter l'indispensable recours aux images aux images d'archives pour les études diachroniques. Très souvent, on ne dispose, pour ces images, que d'informations sommaires, sinon douteuses, sur les conditions atmosphériques présentes lors de la prise de vue. D'autre part, une récente étude sur une vingtaine d'images TM et ETM+ datant de 1984 à 2002 (Schroeder *et al.*, 2006) a mis en évidence le fait que les méthodes absolues telles que 6S, DOS et MDDV donnaient un jeu d'images corrigées dont la similitude radiométrique dans le temps est moins bonne que celle des images originales.

Les corrections dites relatives constituent le second groupe des méthodes de correction radiométriques. Ces dernières sont basées sur l'hypothèse d'une relation linéaire entre la bande k d'une image prise comme référence et les bandes k_i des images des autres images. Cette relation peut être déterminée à travers des mesures radiométriques sur des unités d'observation pseudo-invariants (PIFs, Pseudo Invariant Features) dans les images (Schott *et al.*, 1988; Coppin et Bauer, 1994; Vogelmann *et al.*, 2001). La difficulté ici est de pouvoir choisir des unités d'observation pseudo-invariants communes à l'ensemble des images à traiter. Des méthodes statistiques permettent une détermination automatique des PIFs. C'est

le cas la méthode MAD (Multivariate Alteration Detection) utilisée par Liang *et al.*, (1997) et plus récemment par Canty *et al.*, (2004).

Notre choix s'est porté sur une correction par ajustement empirique. Dans cette méthode, les effets atmosphériques sont assimilés à la luminance minimale présente sur une même image, toutes bandes confondues. Cette valeur est donc retranchée de l'ensemble des luminances de l'image. Ce type de correction s'apparente à la méthode des invariants radiométriques appelée DOS (Dark Objects Substraction, Spanner *et al.*, 1990; Huguenin *et al.*, 1997), dans laquelle on suppose qu'il existe dans la zone d'étude, des surfaces qui conservent leurs propriétés radiométriques (eaux profondes ne contenant ni algues, ni sédiments, toits d'immeubles de grandes taille, etc. Ainsi, en l'absence d'effets atmosphériques, les comptes numériques de ces surfaces devraient être voisins d'une image à l'autre. Les écarts observés sont donc assimilés aux perturbations dues à l'atmosphère. La méthode consiste à imposer à ces surfaces la même valeur radiométrique pour toutes les images. A la différence de la méthode du DOS pour laquelle les effets atmosphériques sont connus seulement après une détermination des surfaces invariantes, dans l'ajustement empirique ils sont directement assimilés à la luminance minimale présente sur l'image. Avant de donner une description plus détaillée de cet ajustement, précisons tout d'abord les trois raisons qui ont guidé notre choix pour cette méthode :

- la simplicité de la mise en œuvre de la méthode de l'ajustement empirique. La luminance minimale de l'image est facilement accessible par simple génération des statistiques de base sur les comptes numériques de l'image. Tous les logiciels de traitement d'image offrent cette possibilité.
- les capteurs TM des satellites Landsat ont des bandes spectrales placées dans des portions du spectre électromagnétique où les rayonnements sont faiblement affectés par les interactions d'absorption de l'atmosphère. De ce fait, les effets atmosphériques sur les images de ces capteurs sont principalement dus à la diffusion. Cette diffusion correspondant au terme additif β_k (on néglige le facteur α_k . Rappelons que l'énergie totale perçue par le radiomètre est $L_{ap,k} = \alpha_k L_{pixel,k} + \beta_k$).
- cette méthode donne de très bons résultats comparativement à ses homologues qui nécessitent souvent beaucoup plus de moyens et d'informations dans leur mise en œuvre (Song *et al.*, 2001).

II.4.2.3 Séquence des corrections radiométriques effectuées

Nous décrivons dans cette section les différentes étapes des corrections radiométriques effectuées sur les images de l'étude.

Transformation des comptes numériques en luminance apparente

La relation entre les CN_k et la grandeur physique qu'est la luminance L_k est linéaire et est donnée par :

$$L_{ap,k} = a_k \cdot CN_k \quad \text{éq. II-3}$$

Avec :

- $L_{ap,k}$: la luminance apparente de la bande k ,
- a_k : le coefficient d'étalonnage pour la bande k .

Le coefficient a_k est calculé à partir des courbes d'étalonnage du radiomètre. Il intègre les phénomènes internes au radiomètre.

Conversion des luminances en réflectance apparente

A partir des luminances et en tenant compte des conditions d'éclairement extra-atmosphériques relatives à chaque bande spectrale, les valeurs de luminance apparente sont transformées en réflectance apparente (ρ_k) selon la relation ci-dessous (Henry *et al.*, 1996) cité par Caloz et Collet (2001) :

$$\rho_k = \frac{\pi \cdot u_t^2}{\cos \theta_s} \frac{L_{ap,k}}{E_{ap,k}} \quad \text{éq. II-4}$$

Avec :

- θ_s : Angle zénithal solaire déduite de l'angle d'élévation du soleil lors de la prise de vue,
- u_t^2 : Facteur de correction pour la distance Terre-Soleil,
- $E_{ap,k}$: Éclairement solaire au niveau du satellite.

Compensation des perturbations atmosphériques : ajustement empirique

On fait l'hypothèse que les minima respectifs de chaque bande spectrale d'une même image coïncident pour la même valeur. Ces minima sont décalés dans l'image pour chaque bande (Figure II-6). Ce glissement est attribué à la diffusion sélective de Mie, et la correction consiste à faire glisser les histogrammes de chaque bande de sorte que les valeurs minimales de chaque bande deviennent identiques.

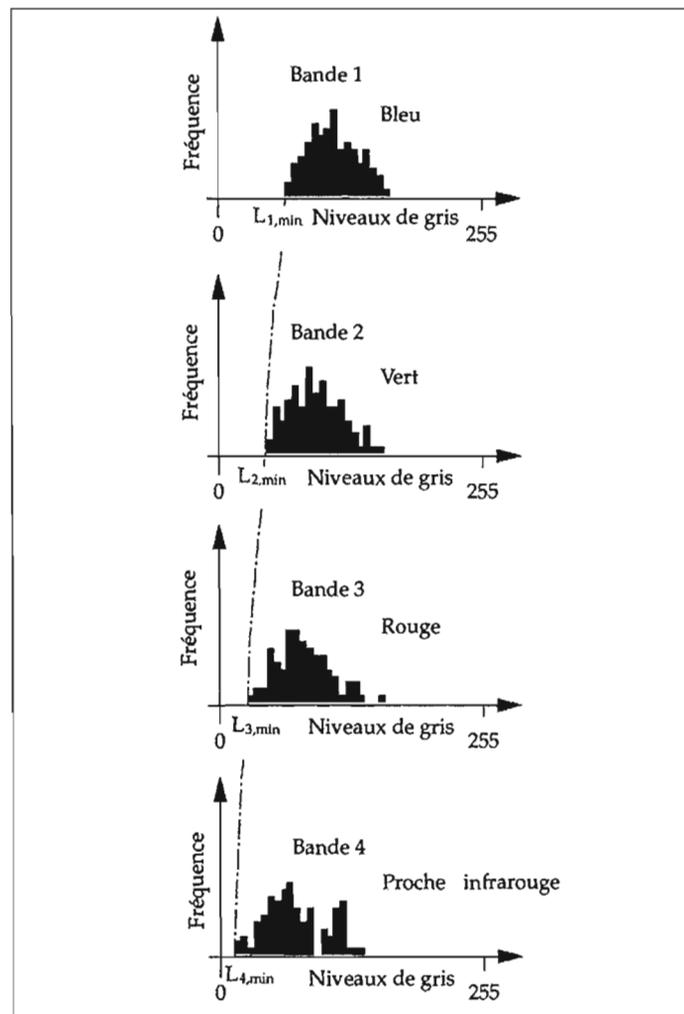


Figure II-6 : Déplacement supposé de l'histogramme de chaque bande (dans un ordre croissant de fréquence dû à un effet atmosphérique différencié (fort dans le bleu et diminuant en direction des plus grandes longueurs d'onde (d'après Jensen, 1986; in Caloz et Collet, 2001)

Si $\min(L_{\min})$ est la luminance spectrale minimale observée pour toute les bande de l'image, les luminances de l'image sont corrigées selon l'équation (d'après Jensen, 1986; in Caloz et Collet, 2001) :

$$L_{cor,k} = L_k - (L_{\min,k} - \min(L_{\min})) \quad \text{éq. II-5}$$

Nous présentons dans la section suivante un exemple de séquence complète des corrections radiométriques effectuées pour le cas de l'image Landsat ETM+ du 09/01/2003.

II.4.2.4 Séquence des corrections radiométriques appliquées à l'image ETM+ du 09/01/2003

La séquence des traitements a été effectuée à l'aide de la version 4.2 du logiciel de traitements d'images ENVI. Ce logiciel offre un module permettant de procéder assez facilement à la conversion des comptes numériques en réflectance extra-atmosphérique.

Conversion des comptes numériques en réflectance apparente (réflectance extra-atmosphérique)

Pour le cas de l'image Landsat ETM+ du 09/01/2003, les informations suivantes, disponibles dans l'en-tête de l'image ont été fournies au logiciel :

- date d'acquisition : 09/01/2003
- angle d'élévation du soleil à cette date : 45.44°

Les comptes numériques de l'image sont automatiquement convertis en en réflectance apparente.

Correction atmosphérique par ajustement empirique

La Figure II-7 présente l'histogramme des fréquences de l'image ETM+ de janvier 2003 pour les 6 bandes spectrales

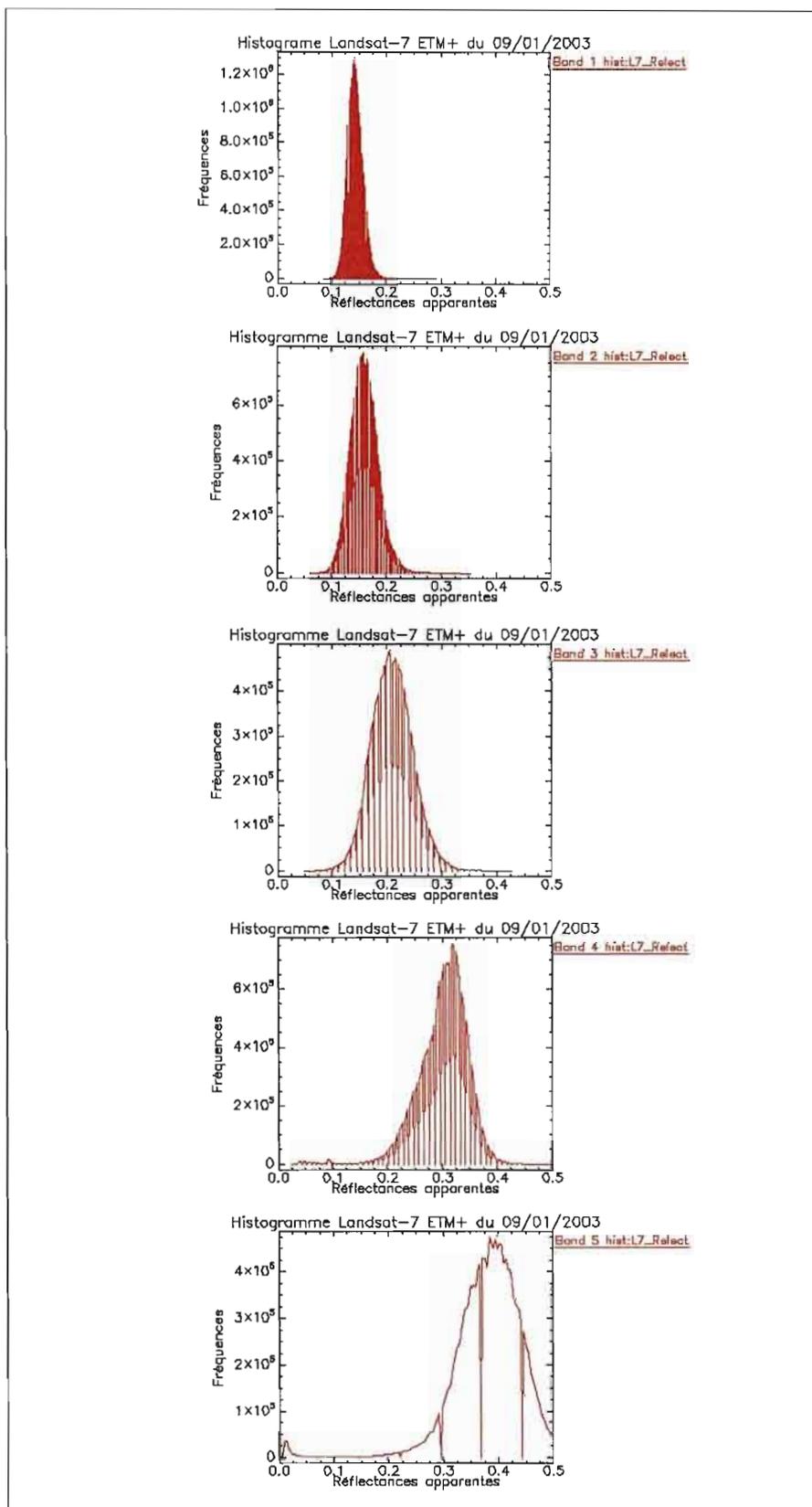


Figure II-7 : Décalage des histogrammes des 5 bandes de l'image Landsat-7 ETM+ du 09/01/2003 du fait des effets atmosphériques

Tableau II-6 : Tableau des statistiques de base des réflectances apparentes pour les 1 à 5 bandes de l'image Landsat ETM+ du 09/01/2003

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart type |
|----------------|---------|---------|---------|------------|
| Bande 1 | 0.0837 | 0.2904 | 0.1432 | 0.0145 |
| Bande 2 | 0.0599 | 0.3521 | 0.1598 | 0.0252 |
| Bande 3 | 0.0465 | 0.4266 | 0.2100 | 0.0375 |
| Bande 4 | 0.0238 | 0.5493 | 0.3015 | 0.0465 |
| Bande 5 | 0.0001 | 0.5934 | 0.3838 | 0.0643 |

Tableau II-7 : Tableau de calcul des luminances corrigées par ajustement empirique pour l'image Landsat ETM+ du 09/01/2003

| Luminance minimum sur l'ensemble des 5 bandes : $\min(L_{\min}) = 0.0001$ | | | |
|---|--------------|---------------------------------|----------------------|
| $L_{cor,k} = L_k - (L_{\min,k} - \min(L_{\min}))$ | | | |
| | $L_{\min,k}$ | $L_{\min,k} - \min(L_{\min,k})$ | $L_{cor,k}$ |
| Bande 1 | 0.0837 | $0.0837 - 0.0001 = 0.0836$ | $L_{cor,1} - 0.0836$ |
| Bande 2 | 0.0599 | $0.0599 - 0.0001 = 0.0597$ | $L_{cor,2} - 0.0597$ |
| Bande 3 | 0.0465 | $0.0465 - 0.0001 = 0.0464$ | $L_{cor,3} - 0.0464$ |
| Bande 4 | 0.0238 | $0.0238 - 0.0001 = 0.0236$ | $L_{cor,4} - 0.0236$ |
| Bande 5 | 0.0001 | $0.0001 - 0.0001 = 0$ | $L_{cor,5} - 0$ |

II.4.3 Corrections géométriques des images

Des corrections géométriques ont été appliquées aux images afin de les géoréférencer dans le système de coordonnées UTM et de les rendre superposables pour permettre la comparaison des classifications entre les différentes dates. L'image Landsat TM du 18/01/1986 a été choisie comme référence. Cette image provient du Tropical Rain Forest Information Center's Orthorectified Landsat Atlas DVD Series. Elle a été orthorectifiée et re-échantillonnée à 28.5 m. L'orthorectification a été faite à l'aide de points de contrôles géodésiques et de données d'altitude disponibles sur le site www.geocover.com.

II.5 Données MODIS EVI à 250 m

Pour la validation des traitements d'image de 2002, on a eu recours à l'indice de végétation amélioré (EVI : Enhanced Vegetation Index) issu des images MODIS à 250 m. Le capteur MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un instrument clé à bord des satellites EOS-Terra (Earth Observing System-Terra ou EOS AM) et EOS-Aqua (Earth Observing System-Aqua ou EOS AM) de la NASA. La rotation du satellite EOS-Terra sur son orbite autour de la terre se fait de sorte qu'il passe au-dessus de l'équateur dans le sens Nord-Sud le matin, tandis que le satellite EOS-Aqua passe en sens inverse au-dessus de l'équateur dans l'après-midi. Le capteur MODIS fournit deux types d'indices de végétation le NDVI (Normalized Vegetation Index), et depuis peu, un nouvel indice de végétation appelé EVI (Enhanced Vegetation Index). Ces images ont une résolution de 250 m. L'EVI est intéressant pour plusieurs raisons :

- il ne sature pas sur les couverts à forte densité végétale,
- il est sensible aux petites variations de biomasse verte. Ceci est particulièrement important pour le milieu sahélien qui est très peu couvrant et dont l'activité de la végétation est liée au cycle saisonnier des pluies,
- la répétitivité tous les 16 jours des données MODIS permet un suivi de l'évolution de l'EVI au cours de l'année. Cette caractéristique est mise à profit dans la discrimination des sols nus et des sols cultivés.

II.6 Documents cartographiques

Des documents cartographiques ont également été consultés soit pour compléter les cartes d'occupation du sol issues des traitements d'images soit pour procéder au calage des images.

La Figure II-8 présente une composition de huit cartes topographiques au 1/200 000 couvrant le bassin du Nakambé à Wayen au Burkina Faso. Ces cartes ont été dessinées et publiées pour la première fois en 1955 par l'Institut Géographique Nationale de France (IGN – France).

Elles ont servi au calage des images Landsat utilisées dans l'étude. Ces cartes ont également servi comme complément d'information dans la finalisation de la carte d'occupation du sol en 1972 sur le bassin.



Figure II-8 : Composition de huit cartes topographiques au 1/200 000 couvrant le bassin du Nakambé (en haut). Zoom sur le lac de Bam dans la région de Kongoussi (en bas)

Une carte des milieux naturels du Burkina Faso (Guillobez, 1985) a également été utilisée pour compléter les cartes d'occupation du sol sur le bassin pour l'année 1986.

Marchal (1983) a établi des cartes d'occupation du sol en 1952 et 1973 dans la province du Yatenga au Nord du Burkina Faso. Cette province couvre une partie Nord du bassin du Nakambé. La carte de 1973 a été scannée et géoréférencée afin d'être prise en compte dans les traitements d'images pour l'année 1972 (Figure II-8 et Figure II-9.)

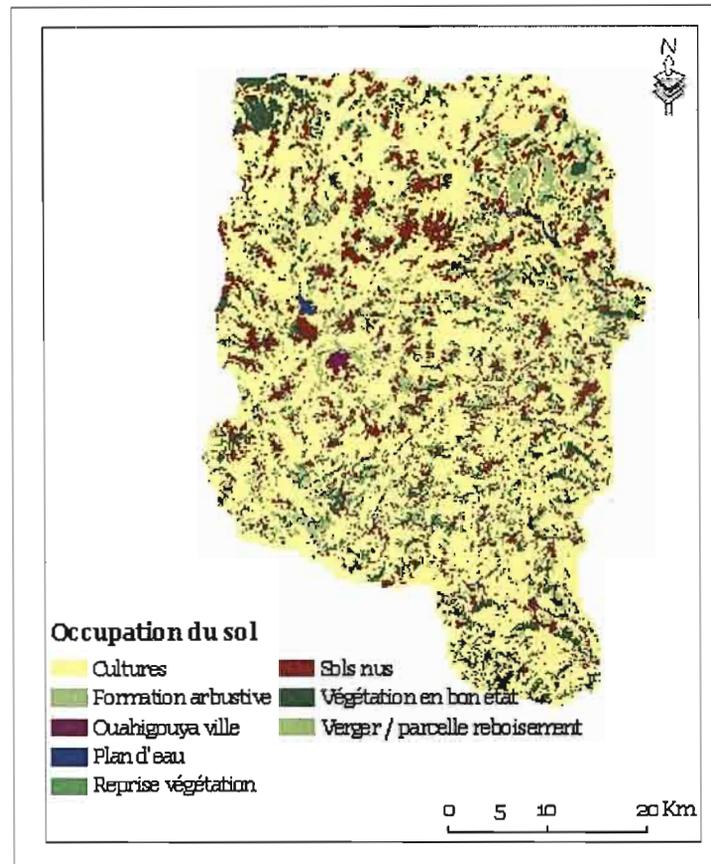


Figure II-9 : Carte d'occupation du sol au Yatenga en 1973 à partir de Marchal (1983)

II.7 Données démographiques

II.7.1 Données disponibles

Les contraintes liées à la disponibilité en images satellites nous ont amené à restreindre la mise en œuvre de la démarche de modélisation hydrologique que nous menons dans cette réflexion au seul cas du bassin du Nakambé à Wayen (Burkina Faso). De ce fait, les aspects démographiques développés dans notre étude concernent ce bassin en particulier, et le Burkina Faso en général. Nous nous sommes donc procuré les résultats des recensements et enquêtes démographiques qui ont eu lieu dans ce pays au cours du 20^{ème} siècle.

Les documents les plus anciens que nous avons consultés datent des années 1949-1950. A cette date, le Service de la Statistique Générale de l'Afrique Occidentale Française a publié pour la première fois les états des populations par canton, en 8 fascicules séparés. Ces états ont été établis à la suite de demandes administratives et complétaient l'ensemble de la documentation démographique qu'il était d'usage de fournir annuellement à cette époque.

Ces statistiques n'ont malheureusement pas pu être prises en compte dans notre étude car le document ne comportait aucune carte montrant les limites des différents cantons constituant le pays. Il ne nous était donc pas possible de déduire de ces informations l'organisation administrative du bassin et donc sa population à cette époque.

En 1960-1961, une enquête démographique par sondage a été réalisée en Haute Volta (actuel Burkina Faso). Après cette date, un Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RPGH) est organisé tous les dix ans selon les recommandations des Nations-Unies. Le Burkina Faso a donc connu un RGPH en 1975, 1985, 1996 et en fin 2006. Les résultats du dernier recensement n'étaient pas disponibles au moment où nous menions nos investigations pour la collecte des informations démographiques. Ils n'ont donc pas été pris en compte dans la présente étude.

Notre objectif est d'estimer l'évolution de la population sur le bassin à partir des données des recensements et enquêtes démographiques réalisés au Burkina Faso. Les limites du bassin ne coïncidant pas avec celles des unités administratives (cercles en 1960-1961, départements en 1975, et provinces en 1985 et 1996), une première approche simple, et du reste, plus réaliste, aurait été de disposer des fichiers complets des villages du pays avec leurs positions géographiques et le nombre d'habitants par village. Malheureusement, nous ne disposons que d'un seul fichier des villages du Burkina Faso : celui de 1985. Cette approche fut donc abandonnée au profit d'une démarche alternative : l'approche par la densité de population.

Cette approche est moins bien précise puisqu'elle ne tient pas compte des disparités locales au niveau de la répartition des densités de population. En effet, à côté de zones densément peuplées subsistent des espaces à faible occupation humaine, le plus souvent du fait de conditions pédoclimatiques (fertilité des terres, proximité de cours d'eau...), ou de certaines activités telles que les mines d'or, etc. Les résultats des estimations hériteront donc de cette insuffisance et devront être interprétés avec prudence.

II.7.2 Organisation administrative du bassin en 1960, 1985 et 1996

L'approche par densité de population nécessite de disposer des formats numériques des différents découpages administratifs du territoire national Burkinabé lors des recensements démographiques. Lorsque cela n'était pas possible, nous nous sommes contentés des formats papier qui furent scannés et géoréférencés à l'aide du logiciel MapScan.

Un fichier des densités de population par unité administrative a ensuite été associé à ces couvertures numériques dans le SIG ArcGIS. La superposition des contours du bassin permet d'extraire la répartition des densités de population sur le bassin aux différents recensements. Connaissant les superficies des unités administratives constituant le bassin on estime facilement la population du bassin à la date du recensement concerné.

La Figure II-10 donne une synthèse des différentes organisations administratives du bassin de 1960 à 1996. Elles ont été déduites de celles du pays pour la même période. Les détails sont fournis en annexe.

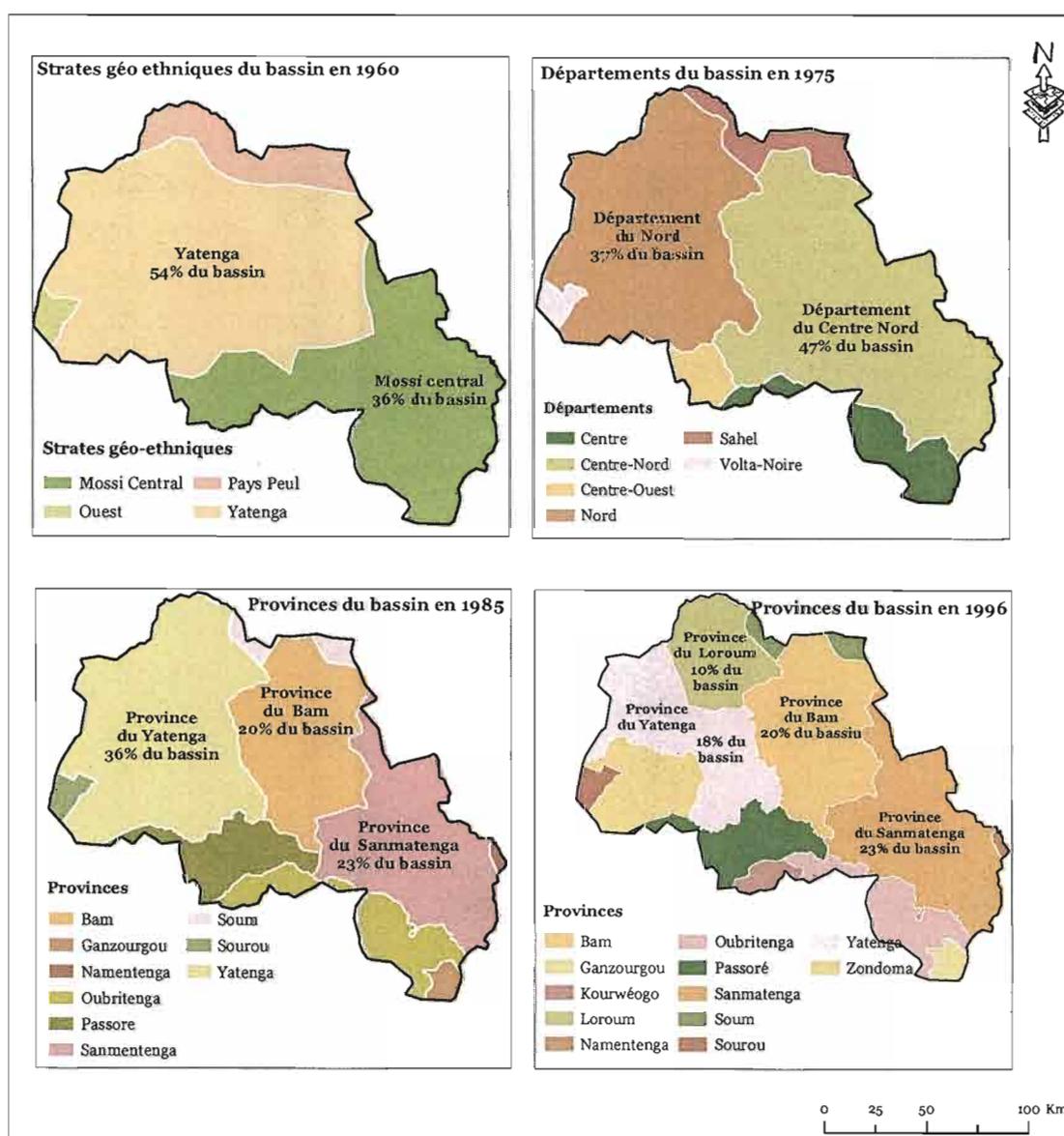


Figure II-10 : Organisations administratives du bassin du Nakambé à Wayen de 1960 à 1996

II.7.3 Population sur le bassin

Les données disponibles ont permis d'estimer la population du bassin aux recensements de 1960, 1975, 1985 et 1996. La Figure II-11 en donne une synthèse. Les détails sont fournis en annexe. Il faut souligner que les estimations faites sur la population ne tiennent pas compte des phénomènes migratoires à l'échelle nationale ou internationale alors qu'ils revêtent un caractère important en particulier pour le Burkina Faso.

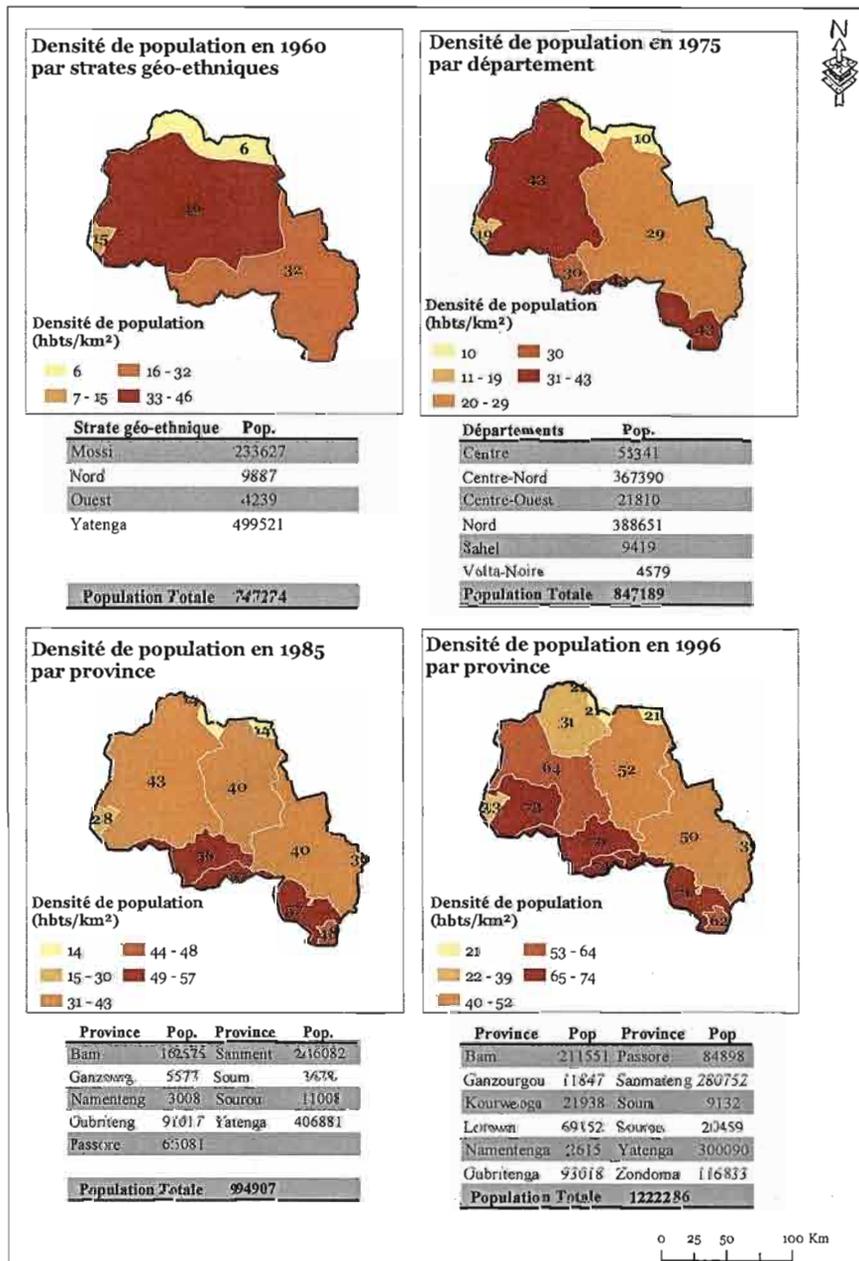


Figure II-11 : Répartition des densités de population et estimation de la population sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1960, 1975, 1985 et 1996.

II.7.4 Données de natalité et de mortalité

Notre intérêt s'est particulièrement porté sur les données de natalité et la mortalité que nous considérons comme facteurs majeurs de la dynamique des populations. Par ailleurs, le modèle de population que nous envisageons de d'utiliser pour le bassin est basé sur une généralisation du concept de transition démographique : la population est estimée à partir de la modélisation de la natalité et de la mortalité.

Tout comme dans le cas de la population, les données de natalité et de mortalité ne sont disponibles qu'à l'échelle des unités administratives et seulement pour les recensements des années 1985 et 1996. Pour les années 1960 et 1975, les informations sur ces deux paramètres n'étaient disponibles qu'à l'échelle nationale. Dans ces cas, les valeurs de la natalité et la mortalité sur le bassin ont été estimées équivalentes à celles du pays.

Pour 1985 et 1996 années pour lesquelles les données de natalité et de mortalité étaient disponibles à l'échelle de la province (unité administrative de ces années), la natalité et la mortalité du bassin ont été estimées à partir des moyennes de la natalité et de la mortalité pondérées par la superficie de l'unité administrative contenue dans le bassin.

Tableau II-8 : Taux de natalité et de mortalité disponibles à l'échelle nationale et sur le bassin du Nakambé à Wayen.

| Année | Taux de Natalité (‰) | | Taux de Mortalité (‰) | |
|-------------|-------------------------|--------|--------------------------|--------|
| | Burkina | Bassin | Burkina | Bassin |
| 1960 | 49.1 | 49.1 | 32 | ? |
| 1975 | 42.5 | 46 | 24 | ? |
| 1985 | 47.9 | 48 | 18.5 | 18.3 |
| 1996 | 47.8 | 48.5 | 16 | 15.4 |

II.8 Données des statistiques agricoles

II.8.1 A l'échelle nationale du Burkina Faso

Le dernier type de données que nous avons utilisées dans l'étude concerne les statistiques agricoles. Ces données proviennent de la Direction de la Statistique Agricoles du Burkina Faso et des publications de la FAO.

Les données de la FAO vont de 1961 à 2003 tandis que celles de la Direction de la Statistique Agricole du Burkina Faso couvrent la période 1984-2001. Une comparaison des deux séries de données montre une certaine homogénéité même si les valeurs présentent des écarts quelque fois importants Figure II-12.

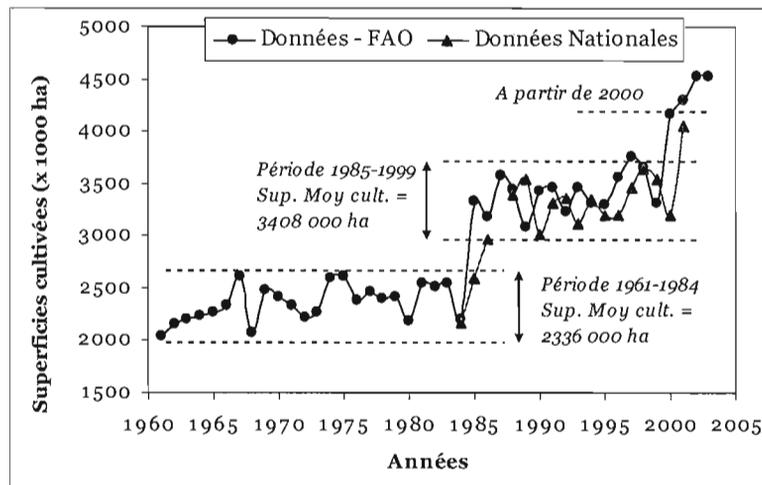


Figure II-12 : Superficies cultivées au Burkina Faso de 1960 à 2003. Comparaison entre données nationales et données FAO

II.8.2 A l'échelle du bassin du Nakambé à Wayen

Les données des statistiques agricoles sont disponibles à l'échelle des provinces du pays. Nous avons donc eu recours aux couvertures thématiques sur les différents découpages administratifs du bassin aux différents recensements afin d'estimer les superficies cultivées sur le bassin.

Tout comme dans l'estimation de la population du bassin, nous avons estimé les superficies cultivées à partir d'une approche par « densité de terres cultivées » dans les provinces. C'est donc une méthode qui hérite des limites de cette approche puisqu'on ne tient pas compte des disparités locales au niveau de chaque province. Par ailleurs, les données n'étaient pas disponibles pour certaines provinces ce qui ajoute l'éventualité d'une sous-estimation des

surfaces cultivées sur le bassin. Cependant, ces données ont le mérite de donner des ordres de grandeurs des superficies cultivées sur le bassin. Elles montrent notamment que depuis 1985-1986, les superficies cultivées n'ont pas véritablement variées sur le bassin. Ce qui est en accord avec plusieurs études qui ont mis en évidence la saturation du bassin en termes de terres cultivables.

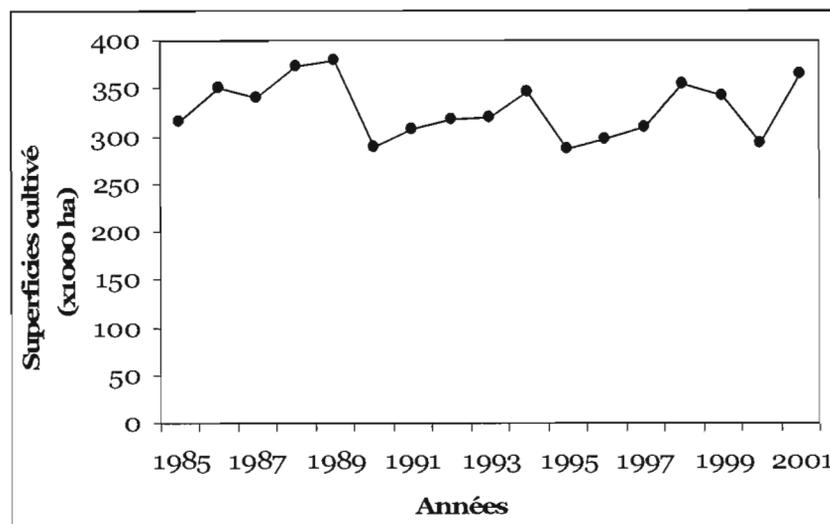


Figure II-13 : Évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen

II.9 Conclusion : synthèse sur les données de l'étude

La diversité des données collectées dans le cadre de cette étude (Tableau II-9) révèle son caractère multidisciplinaire. En effet, notre principal objectif est d'améliorer les performances du modèle hydrologique GR2M à travers la prise en compte d'une dimension environnementale dans le modèle. Un important travail de collecte et de mise en forme de données a permis de constituer une masse d'informations permettant d'atteindre cet objectif.

Nous disposons pour notre étude de données de télédétection pour la caractérisation des états de surface sur le bassin qui nous sert de champs d'expérimentation de la démarche de modélisation que nous entreprenons. Ces images ne nous donneront que l'état d'occupation des terres sur le bassin aux dates de la prise de vue des images. L'intervalle de temps entre les images étant très variable et loin du pas de temps des données d'entrée du modèle (données mensuelles), nous avons eu recours aux données de population et de statistique agricole dans le but d'estimer l'évolution des états de surface à un pas de temps régulier et raisonnable pour nos objectifs (l'année).

Tableau II-9 : Synthèse sur les données de l'étude

| Type de données | Désignation | Caractéristiques et observations |
|---------------------------------|------------------------------|---|
| Données hydroclimatiques | Pluie | 2 grilles de pluies (SIEREM et CRU) au demi-degré carré couvrant globalement la période 1901 à 1998 |
| | Débits | Débits mensuels des 4 bassins de rive droite du Niger et du bassin du Nakambé à Wayen |
| | ETP | Grille d'ETP de Penman couvrant le période allant de 1903 à 1995 |
| Données de télédétection | Landsat | 12 images couvrant globalement le bassin du Nakambé à Wayen et datant de 1972, 1986, 1992, 2002 et 2003 |
| | MODIS | Images MODIS de 2003 sur une fenêtre couvrant le Burkina Faso |
| Données démographiques | Population | Données des recensements et enquêtes démographiques de 1960-1961, 1975, 1985 et 1996 |
| | Natalité | |
| | Mortalité | |
| Statistiques agricoles | Superficies cultivées | Données annuelles des superficies cultivées à l'échelle du Burkina et du bassin du Nakambé |

CHAPITRE **III**

L E M O D E L E G R 2 M : C O N C E P T S , P E R F O R M A N C E S E T A N A L Y S E D U F O N C T I O N N E M E N T D U R E S E R V O I R S O L D A N S L E C O N T E X T E S A H E L I E N .

Les modèles mathématiques sont d'indispensables outils de prévision et de gestion, même si, de façon générale, leur utilisation à des fins opérationnelles est délicate. Arriver à des modèles mathématiques scientifiquement fondés, relativement simples, robustes, et capables de produire, à des échelles d'espace et de temps données, des résultats de simulations satisfaisants, est un des challenges majeurs des recherches en hydrologie. Il est évident que dans le contexte climatique général actuel, de tels modèles susciteraient de fabuleux espoirs, en particulier dans les régions où la question de l'eau est une véritable contrainte pour le développement. Beaucoup reste encore à faire, et la seule simulation des écoulements à l'exutoire des bassins versants n'est plus, et de loin, le seul objectif auquel doivent répondre les modèles hydrologiques modernes. De nombreux problèmes environnementaux actuels nécessitent par exemple l'élaboration de modèles couplant les flux hydriques aux flux d'énergie ou de matière (sédiments, solutés, biomasse). Et pourtant, l'unanimité est loin d'être faite quant au mode de représentation le plus appropriée pour simuler de façon satisfaisante les « simples » débits à la sortie des bassins versants.

Que devient l'eau des pluies (Penman, 1963) ? D'où vient l'eau des ruisseaux (Hewlett, 1961) ? Ces deux questions fondamentales restent donc encore aujourd'hui posées à l'hydrologie, même si les nombreuses études, observations et mesures de terrain menées depuis plus d'un siècle ont permis d'y apporter des réponses partielles.

L'une des grandes difficultés qui se posent à l'hydrologie est la caractérisation et la modélisation du comportement hydrodynamique du sol. On ne sait pas vraiment déduire de la description physique et géomorphologique d'un bassin versant une connaissance des mécanismes hydrologiques qui y prédominent, et encore moins, une modélisation de la relation pluie-débit (Grésillon, 1994). C'est justement à cette problématique globale que nous essayons d'apporter un éclairage tout au long de ce travail.

La réflexion menée dans ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence la façon dont est pris en compte le fonctionnement du sol dans le modèle hydrologique GR2M (Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel), pris dans le contexte particulier du Sahel Ouest africain. Après une présentation du concept et des idées de base des modèles GR, nous mènerons la réflexion en vue des deux objectifs suivant :

- évaluer l'efficacité de GR2M dans le contexte sahélien à partir de la simulation par le modèle des débits de 5 bassins versants représentatifs des écoulements au Sahel,
- analyser le fonctionnement réel du réservoir sol du modèle à travers le cas de ces cinq bassins.

III.1 Concepts et architecture de GR2M

III.1.1 Concepts des modèles GR (Génie Rural)

« Outre la difficulté de mise en œuvre, et la longueur des réglages, on ne maîtrise pas toujours le fonctionnement réel du modèle. » C'est en substance les conclusions de Michel en 1983 après l'essai d'un modèle conceptuel CREC à 9 paramètres sur le bassin expérimental d'Orgeval (Galea, 1972). L'idée des modèles GR est donc parti de ce constat d'échec et du questionnement suivant : peut-on construire un modèle hydrologique simple et efficace en partant du plus élémentaire des modèles (un réservoir et un paramètre) et en ne compliquant cette architecture que pour faire face aux difficultés à produire les débits réels et non pour satisfaire des conceptions à priori sur le cycle hydrologique ? Il a fallu, pour ce faire, chercher à savoir « que peut-on faire en hydrologie avec un modèle à un paramètre ? ». Le constat fut qu'il « *semble nécessaire de compliquer davantage ce modèle élémentaire en prenant deux réservoirs et deux paramètres : un réservoir S assurant le bilan de l'eau non gravitaire avec A comme premier paramètre et un réservoir R, dont le paramètre est B, assurant le routage des débits* » (Michel, 1983). Le résultat est le modèle GR2J (Génie Rural à deux paramètres au pas de temps Journalier) (Edijatno, 1987, 1991).

Le mode de fonctionnement de GR2J est simple. Le réservoir S reçoit une fraction de la pluie P et est soumis à l'évaporation E. La fraction complémentaire de la pluie va dans le réservoir R à vidange quadratique. La Figure III-1 présente l'architecture de ce modèle.

Toujours dans le but de reproduire au mieux les débits observés aux exutoires des bassins versants, ce premier modèle fut par la suite complexifié en y ajoutant un paramètre supplémentaire (modèle GR3J) puis deux (modèle GR4J) (Maklouf, 1994).

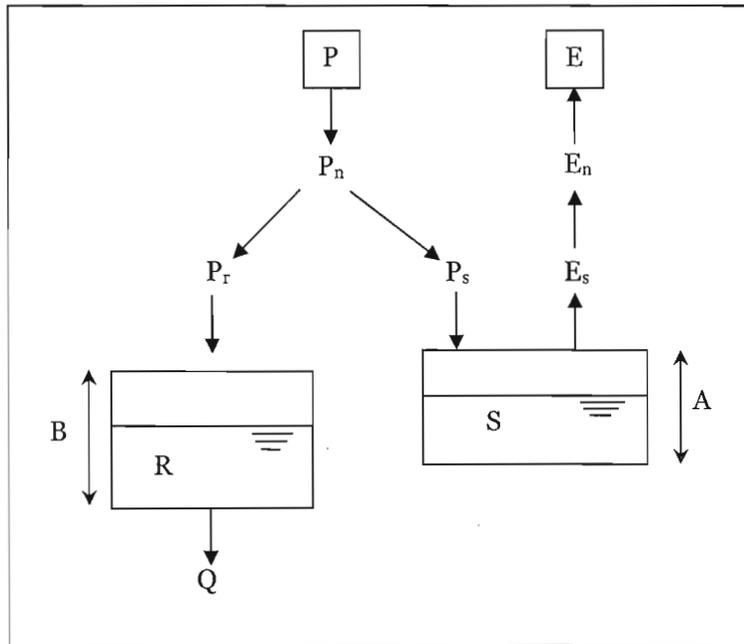


Figure III-1 : Architecture du modèle GR2J (Edijatno, 1991)

III.1.2 Le modèle GR2M : architecture et fonctionnement

GR2M (Génie Rural à deux paramètres en Mensuel) fut construit à partir de variantes de modèles inspirés du modèle GR4J sur un ensemble de bassins français (Maklouf, 1994). Nous rappelons ici le principe de fonctionnement du modèle. Un schéma est présenté à la Figure III-2.

Les deux entrées P et ETP sont modulées par le premier paramètre X_1 à optimiser ($0 < X_1 < 1$). On obtient deux nouvelles « entrées » P' et ETP' desquelles on soustrait une

même quantité U de la forme :
$$U = \frac{P' \cdot ETP'}{(\sqrt{P'} + \sqrt{ETP'})^2}$$

Ces opérations sur la pluie et l'ETP donnent respectivement : $P_n = P' - U$ et $E_n = ETP' - U$

Si H est le niveau du réservoir sol au début du pas de temps, une partie de P_n l'augmente à H_1 qui est de la forme (Maklouf, 1994) :

$$H_1 = \frac{H + AV}{1 + \frac{HV}{A}} \quad \text{où} \quad V = \tanh\left(\frac{P_n}{A}\right)$$

Le complément P_e de P_n est : $P_e = P_n - (H_1 - H)$

Sous l'effet de E_n , le niveau du réservoir passe de H_1 à H_2 qui sera le niveau du réservoir au début du pas de temps suivant. H_2 est de la forme :

$$H_2 = \frac{H_1(1-W)}{1+W\left(1-\frac{H_1}{A}\right)} \quad \text{où} \quad W = \tanh\left(\frac{E_n}{A}\right)$$

Le réservoir eau gravitaire reçoit $\frac{4}{5}P_e$. Son niveau passe de S à $S_1 = S + \frac{4}{5}P_e$ tandis que

$\frac{1}{5}P_e$ s'écoule directement. Le réservoir eau gravitaire est linéaire. Il délivre un débit

$Q_g = X_2 \cdot S_1$ où X_2 est le second paramètre du modèle. L'écoulement total s'écrit :

$$Q = Q_g + \frac{1}{5}P_e$$

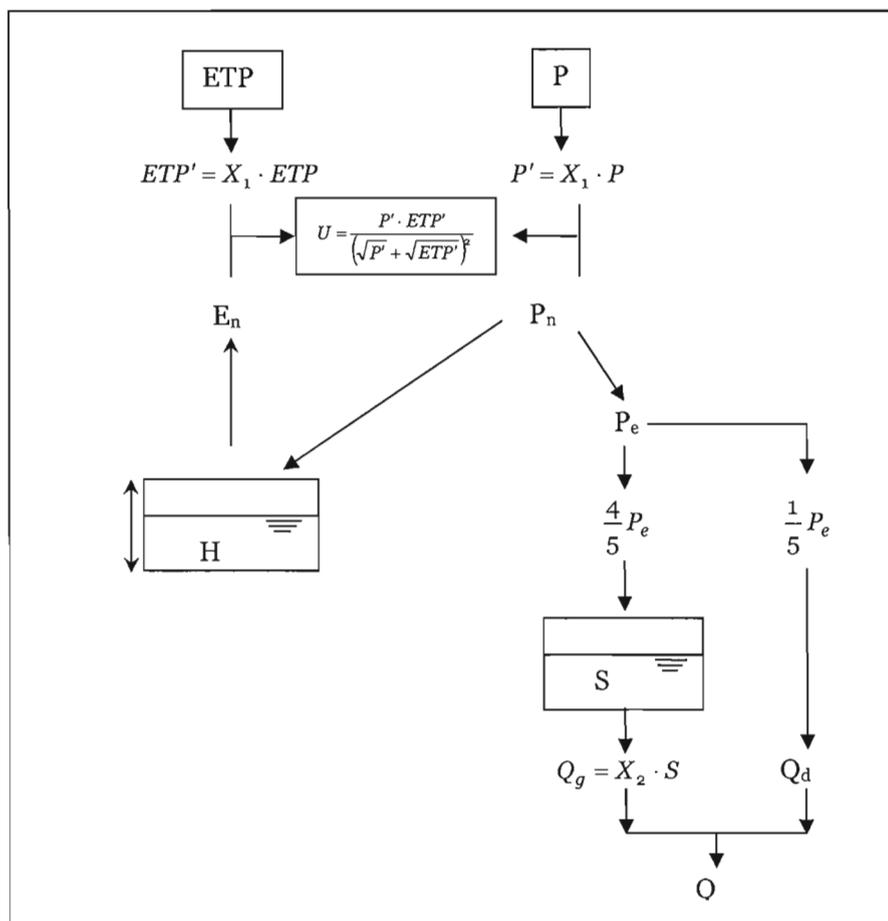


Figure III-2 : Schéma de fonctionnement de GR2M

Dans le cadre de l'analyse de la variabilité hydrologique et de ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale, l'équipe VAHYNE du Laboratoire HydroSciences Montpellier a entrepris une démarche de modélisation spatialisée afin de cartographier et régionaliser les lames d'eau mensuelles et annuelles écoulées. Pour ce faire, l'espace est discrétisé en mailles d'un demi-degré carré, résolution reconnue comme pertinente pour représenter la variabilité spatiale (Arnell et Reynards, 1996; Yates, 1997). Les contours du bassin versant sont superposés à cette grille, et l'écoulement est calculé pour chaque maille du bassin, indépendamment les unes des autres, et ce pour chaque pas de temps. L'écoulement total à l'exutoire du bassin est obtenu par sommation des contributions élémentaires pondérées des différentes mailles qui constituent le bassin. Le modèle utilisé dans cette démarche de modélisation est GR2M auquel on a couplé un SIG (Figure III-3).

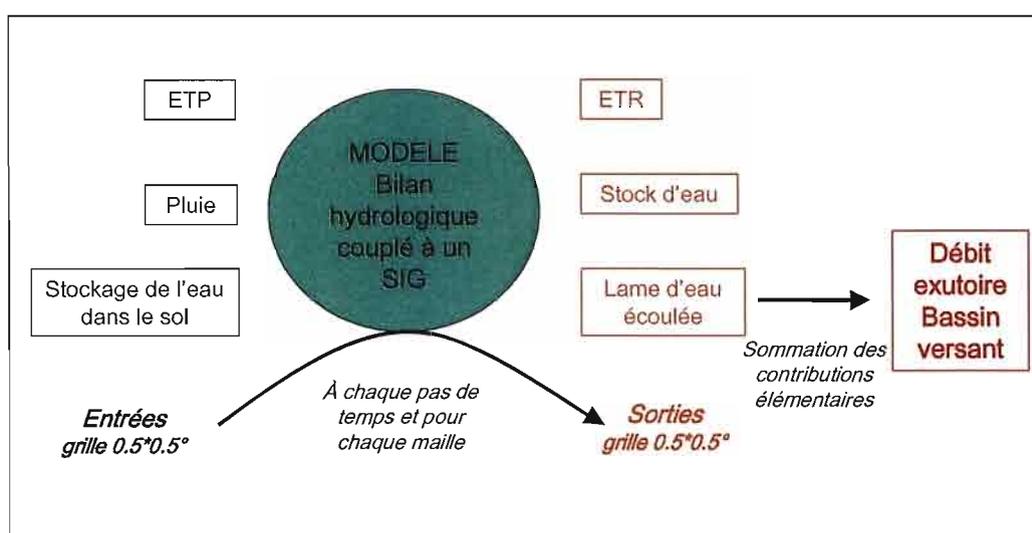


Figure III-3 : Schéma de fonctionnement de la modélisation entreprise par l'équipe VAHYNE d'HydroSciences Montpellier (d'après Girard, 2002)

C'est cette démarche de modélisation qui est adoptée dans le cadre de ce travail.

III.2 Performances de GR2M au Sahel

La rupture climatique survenue dans les régions sahéliennes autour des années 1970 a profondément modifié les régimes hydrologiques des cours d'eau de ce domaine climatique. La plupart des séries de données de pluie et de débits ont vu leurs moyennes changer après cette période. La réponse des bassins versants à l'impulsion pluviométrique a également changé de telle sorte qu'à pluie égale, le ruissellement est plus élevé après 1970 qu'avant. Il est donc primordial de s'assurer que les modèles de simulation pluie-débit couramment utilisés au Sahel rendent bien compte de ces nouvelles conditions hydroclimatiques.

Les tests menés ici, visent donc à évaluer les performances de GR2M dans le contexte sahélien.

III.2.1 Choix des périodes de calage et de validation

Les modèles conceptuels globaux requièrent une phase de spécification des paramètres qui doit se faire sur des séries de données suffisamment longues pour lesquelles il faut supposer qu'il n'y a pas eu de changement dans les caractéristiques hydrologiques ou physiographiques du bassin versant. La rupture climatique au Sahel ayant introduit une hétérogénéité dans les séries de données climatiques, et aussi une modification du fonctionnement hydrologique des bassins versants, le choix des périodes de calage devient primordial pour la spécification des paramètres du modèle.

Nous avons défini des périodes de longueur croissante dans les séries de débits des bassins concernés par cette évaluation en commençant par une longueur minimale de 5 ans. L'augmentation de la longueur des séries se fait par incréments successifs de 5 années jusqu'à la longueur totale de la série. Le Tableau III-1 montre un exemple de découpages pour une série de débits allant de 1961 à 1995 (cas de la station d'Alcongui).

L'année 1970 ayant été retenue comme date de la rupture climatique au Sahel, on voit donc que certaines périodes de calage (et de validation) peuvent être

- homogènes au sens que l'on peut présumer qu'il n'y a pas de ruptures au sein des séries de pluie et de débit,
- au contraire, inclure l'année de la rupture climatique.

Tableau III-1 : Exemple de découpages en périodes croissantes de calage et de validation pour la série des débits de la station d'Alcongui (1961 - 1995)

| Périodes de calage | Périodes de validation |
|--------------------|---|
| 1961-1965 | 1966-1970 ; 1966-1975 ; 1966-1980 ; 1966-1985 ; 1966-1990 ; 1966-1995 |
| 1961-1970 | 1971-1975 ; 1971-1980 ; 1971-1985 ; 1971-1990 ; 1971-1995 |
| 1961-1975 | 1976-1980 ; 1976-1985 ; 1976-1990 ; 1976-1995 |
| 1961-1980 | 1981-1985 ; 1981-1990 ; 1981-1995 |
| 1961-1985 | 1986-1990 ; 1986-1995 |
| 1961-1990 | 1991-1995 |
| 1970-1975 | 1976-1980 ; 1976-1985 ; 1976-1990 ; 1976-1995 |
| 1970-1980 | 1981-1985 ; 1981-1990 ; 1981-1995 |
| 1970-1985 | 1986-1990 ; 1986-1995 |
| 1970-1990 | 1991-1995 |

III.3 Synthèse des résultats

Les performances de GR2M ont été évaluées sur les cinq bassins versants retenus pour l'étude et présentés au chapitre II.

Pour mesurer la qualité de l'ajustement et faciliter la comparaison des ajustements sur différents bassins dont les écoulements correspondent à des ordres de grandeur différents, il est indiqué d'utiliser un critère adimensionnel. Nous avons donc choisi d'utiliser le critère proposé par Nash et Sutcliffe (1970) que nous désignerons par l'appellation NASH et qui s'écrit comme suit :

$$NASH = 100 \cdot \left[1 - \frac{\sum_i (Q_{obs}^i - Q_{cal}^i)^2}{\sum_i (Q_{obs}^i - Q_m)^2} \right] \text{ en \%} \quad \text{éq. III-1}$$

Les performances sont d'autant meilleures que le critère de NASH est proche de 100.

III.3.1 Performances en calage

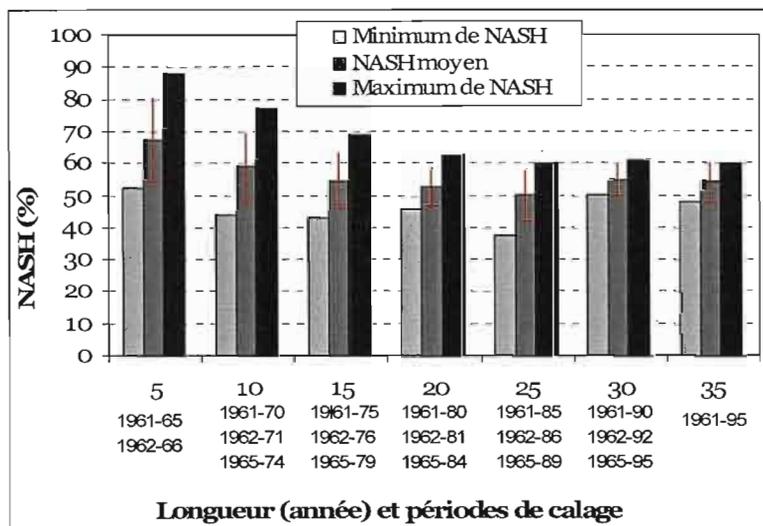


Figure III-4 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de 5 bassins testés (pluie du CRU). Les périodes de calage commencent toutes en 1961 (1962 pour Diongoré).

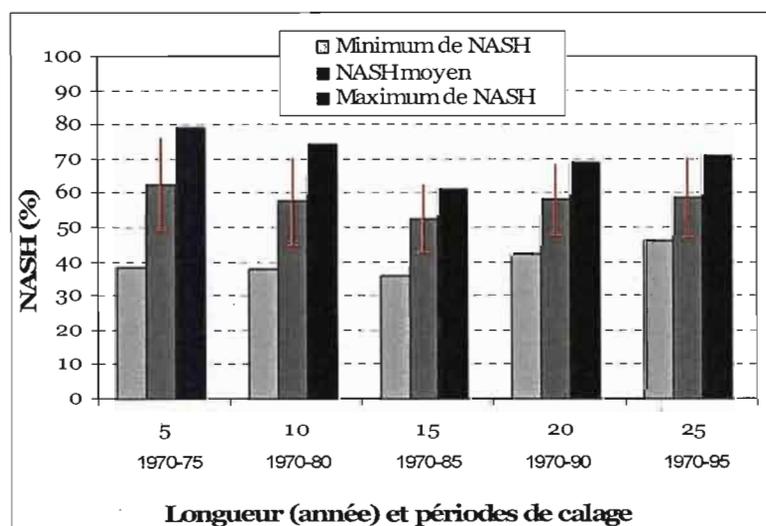


Figure III-5 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de 5 bassins testés. La pluie utilisée en entrée est celle de la grille du CRU. Les périodes de calage commencent toutes en 1970.

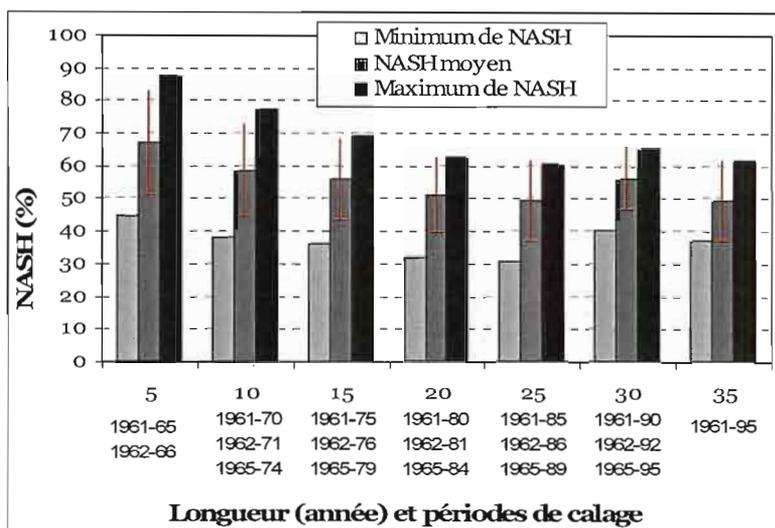


Figure III-6 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de cinq bassins testés (pluie SIEREM). Les périodes de calage commencent toutes à 1961 (1962 pour Diongoré).

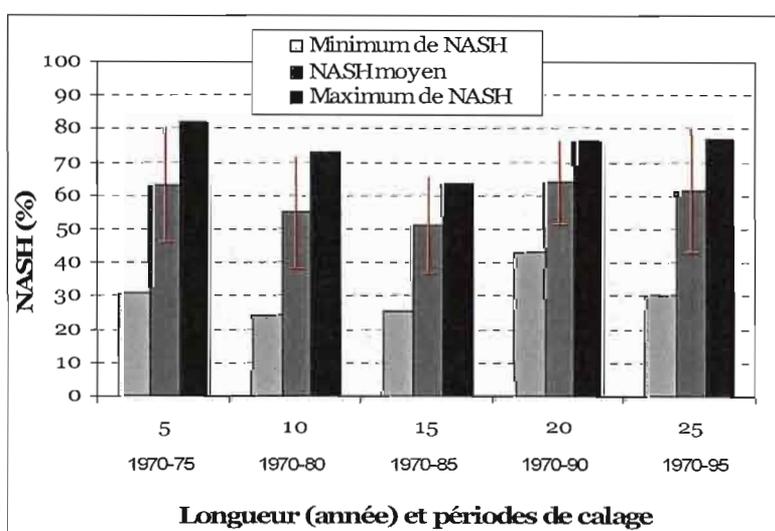


Figure III-7 : Meilleures performances de GR2M en calage pour l'ensemble de cinq bassins testés. La pluie utilisée en entrée est celle de la grille SIEREM. Les périodes de calage commencent toutes en 1970

Les NASH de calage sont globalement satisfaisants quelle que soit la grille de pluie utilisée. Les valeurs moyennes sont en général au dessus de 50% avec des maximums approchant quelques fois les 90%. De telles performances sont cependant à relativiser car elles sont obtenues sur des périodes de calage courtes (5 ans).

Pour les périodes de calage débutant en 1961, les valeurs du critère de NASH diminuent puis se stabilisent pour des périodes de calage de longueur supérieures à 15 ans, donc terminant au-delà de 1975 (Figure III-4 et Figure III-6) et incluant donc l'année de rupture 1970.

Pour les périodes de calage débutant en 1970, quelle que soit la longueur de la période de calage, il n'y a pas d'évolution notable des critères de Nash (Figure III-5 et Figure III-7).

Comme on pouvait s'y attendre, il apparaît que, les périodes de calage relativement homogènes (pas de ruptures mises en évidence : entre 61 et 70 ou après 70) conduisent aux meilleurs calages du modèle.

III.3.2 Performances en validation

Les résultats des tests en validation du modèle sont donnés de manière synthétique aux Tableau III-2, 4, 5, et 6. Les détails sur les hydrogrammes simulés et observés sont fournis en annexe.

Les tests de performance de GR2M en validation montrent que de façon générale, on n'arrive pas à valider correctement le modèle. Les valeurs de NASH sont globalement inférieures à 50% avec assez souvent des critères de NASH négatifs. Les quelques valeurs satisfaisantes de NASH sont en général obtenues, une fois encore, sur des périodes de validation assez courtes (5 ans au maximum)

Tableau III-2 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1961-1995. (Pluie CRU)

| | | Validations avec Cal61-65 | Validations avec Cal61-70 | Validations avec Cal61-75 | Validations avec Cal61-80 | Validations avec Cal61-85 | Validations avec Cal61-90 |
|-----------|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Alcongui | Minimum | 36.28 | 37.87 | 31.70 | 8.81 | -80.25 | -126.70 |
| | Moyenne | 39.68 | 45.42 | 40.06 | 18.08 | -48.15 | -126.70 |
| | Maximum | 43.01 | 53.97 | 52.84 | 23.30 | -16.04 | -126.70 |
| | Écart type | 2.88 | 6.60 | 7.79 | 6.57 | 32.10 | -126.70 |
| | | Validations avec Ca62-66 | Validations avec Cal62-71 | Validations avec Cal62-76 | Validations avec Cal62-81 | Validations avec Cal62-86 | — |
| Diongoré | Minimum | 40.86 | -10.48 | -258.74 | 26.15 | 59.33 | |
| | Moyenne | 50.38 | 17.95 | -75.55 | 36.93 | 59.33 | |
| | Maximum | 64.86 | 38.04 | 39.64 | 47.71 | 59.33 | — |
| | Écart type | 8.60 | 19.38 | 130.96 | 10.78 | 0.00 | |
| | | Validations avec Cal61-65 | Validations avec Cal61-70 | Validations avec Cal61-75 | Validations avec Cal61-80 | — | — |
| Koriziena | Minimum | 30.87 | 34.30 | 40.23 | 27.1 | | |
| | Moyenne | 33.58 | 39.16 | 46.43 | 27.1 | | |
| | Maximum | 37.47 | 45.12 | 52.64 | 27.1 | — | — |
| | Écart type | 2.53 | 4.48 | 6.21 | 0.0 | | |
| | | Validations avec Cal61-65 | Validations avec Cal61-70 | Validations avec Cal61-75 | Validations avec Cal61-80 | Validations avec Cal61-85 | Validations avec Cal61-90 |
| Tera | Minimum | 42.30 | 35.58 | 46.22 | 48.37 | 51.92 | 71.30 (*) |
| | Moyenne | 45.03 | 39.97 | 46.80 | 48.92 | 53.03 | 71.30 (*) |
| | Maximum | 53.86 | 42.20 | 47.40 | 49.58 | 54.15 | 71.30 (*) |
| | Écart type | 4.05 | 2.35 | 0.42 | 0.50 | 1.11 | 0.00 (*) |
| | | Validations avec Cal65-69 | Validations avec Cal65-74 | Validations avec Cal65-79 | Validations avec Cal65-84 | Validations avec Cal65-89 | — |
| Wayen | Minimum | 29.44 | 36.43 | 33.66 | 57.10 | 68.31 | |
| | Moyenne | 34.24 | 43.10 | 42.90 | 58.39 | 68.31 | |
| | Maximum | 40.16 | 48.00 | 49.64 | 59.68 | 68.31 | — |
| | Écart type | 4.53 | 4.45 | 6.76 | 1.29 | 0.00 | |

Tableau III-3 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1970-1995. (Pluie CRU)

| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
|-----------|------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Alcongui | Minimum | 19.16 | -24.63 | -327.63 | |
| | Moyenne | 47.70 | 7.82 | -263.40 | - |
| | Maximum | 74.32 | 34.77 | -199.18 | |
| | Écart type | 20.00 | 24.56 | 64.22 | |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Diongoré | Minimum | -736.89 | 28.66 | 40.18 | 72.38 (*) |
| | Moyenne | -208.56 | 34.61 | 43.44 | 72.38 (*) |
| | Maximum | 22.09 | 40.27 | 46.69 | 72.38 (*) |
| | Écart type | 311.04 | 4.74 | 3.26 | 0.00 (*) |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Koriziena | Minimum | (*) Série trop courte. La validation en se fait que sur 2 années | | | |
| | Moyenne | | | | |
| | Maximum | | | | |
| | Écart type | | | | |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Tera | Minimum | 7.08 | 13.36 | 15.13 | 8.01 (*) |
| | Moyenne | 10.53 | 14.40 | 15.76 | 8.01 (*) |
| | Maximum | 12.77 | 15.38 | 16.40 | 8.01 (*) |
| | Écart type | 2.22 | 0.83 | 0.64 | 0.00 (*) |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Wayen | Minimum | 45.90 | 46.18 | 69.05 | 74.30 (*) |
| | Moyenne | 52.19 | 55.89 | 70.39 | 74.30 (*) |
| | Maximum | 60.93 | 63.19 | 71.73 | 74.30 (*) |
| | Écart type | 6.18 | 7.15 | 1.34 | 0.00 (*) |

Tableau III-4 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1961-1995. (Pluie SIEREM)

| | | Validations avec Cal61-65 | Validations avec Cal61-70 | Validations avec Cal61-75 | Validations avec Cal61-80 | Validations avec Cal61-85 | Validations avec Cal61-90 |
|-----------|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Alcongui | Minimum | 24.15 | 23.45 | 17.01 | 1.41 | -104.20 | -248.07 |
| | Moyenne | 28.76 | 31.07 | 22.31 | 13.61 | -31.13 | -248.07 |
| | Maximum | 34.58 | 45.89 | 26.16 | 22.63 | 41.94 | -248.07 |
| | Écart type | 3.83 | 7.95 | 3.60 | 8.95 | 73.07 | -248.07 |
| | | Validations avec Ca62-66 | Validations avec Cal62-71 | Validations avec Cal62-76 | Validations avec Cal62-81 | Validations avec Cal62-86 | - |
| Diongoré | Minimum | 54.72 | 43.88 | 19.19 | 45.58 | 81.50 | |
| | Moyenne | 59.46 | 50.48 | 44.67 | 57.52 | 81.50 | |
| | Maximum | 63.26 | 63.86 | 69.08 | 69.46 | 81.50 | - |
| | Écart type | 3.04 | 7.85 | 20.38 | 11.94 | 0.00 | |
| | | Validations avec Cal61-65 | Validations avec Cal61-70 | Validations avec Cal61-75 | Validations avec Cal61-80 | - | - |
| Koriziena | Minimum | 22.89 | 20.89 | 20.00 | 20.7 | | |
| | Moyenne | 26.25 | 22.11 | 20.07 | 20.7 | | |
| | Maximum | 29.73 | 24.03 | 20.14 | 20.7 | - | - |
| | Écart type | 2.68 | 1.37 | 0.07 | 0.0 | | |
| | | Validations avec Cal61-65 | Validations avec Cal61-70 | Validations avec Cal61-75 | Validations avec Cal61-80 | Validations avec Cal61-85 | Validations avec Cal61-90 |
| Tera | Minimum | 32.88 | 35.32 | 37.18 | 41.75 | 52.78 | 87.97 |
| | Moyenne | 39.46 | 38.22 | 40.93 | 47.08 | 55.87 | 87.97 |
| | Maximum | 54.07 | 42.54 | 46.49 | 52.32 | 58.96 | 87.97 |
| | Écart type | 7.17 | 2.61 | 3.74 | 4.31 | 3.09 | 0.00 |
| | | Validations avec Cal65-69 | Validations avec Cal65-74 | Validations avec Cal65-79 | Validations avec Cal65-84 | Validations avec Cal65-89 | - |
| Wayen | Minimum | 32.81 | 43.04 | 39.16 | 55.76 | 70.95 | |
| | Moyenne | 38.05 | 48.33 | 45.77 | 58.35 | 70.95 | - |
| | Maximum | 44.76 | 57.15 | 51.96 | 60.95 | 70.95 | |

Tableau III-5 : Performances de GR2M sur les 5 bassins testés. Périodes de calages - validations définies sur 1970-1995. (Pluie SIEREM)

| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
|-----------|------------|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Alcongui | Minimum | -4.20 | -74.24 | -697.62 | -814.85 |
| | Moyenne | 28.38 | -7.04 | -425.60 | -814.85 |
| | Maximum | 44.30 | 33.14 | -153.58 | -814.85 |
| | Écart type | 19.10 | 47.82 | 272.02 | 0.00 |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Diongoré | Minimum | -80.78 | 45.99 | 79.45 | 72.38 |
| | Moyenne | 20.19 | 62.90 | 80.71 | 72.38 |
| | Maximum | 68.75 | 71.49 | 81.97 | 72.38 |
| | Écart type | 60.91 | 11.96 | 1.26 | 0.00 |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Koriziena | Minimum | <i>Série trop courte. La validation en se fait que sur 2 années</i> | | | |
| | Moyenne | | | | |
| | Maximum | | | | |
| | Écart type | | | | |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Tera | Minimum | 0.64 | 9.28 | 17.15 | 20.09 |
| | Moyenne | 7.42 | 12.83 | 17.91 | 20.09 |
| | Maximum | 12.46 | 15.23 | 18.67 | 20.09 |
| | Écart type | 4.73 | 2.56 | 0.76 | 0.00 |
| | | Validations avec Cal70-75 | Validations avec Cal70-80 | Validations avec Cal70-85 | Validations avec Cal70-90 |
| Wayen | Minimum | 46.82 | 46.28 | 69.25 | 74.61 |
| | Moyenne | 52.53 | 55.53 | 70.89 | 74.61 |
| | Maximum | 59.57 | 63.00 | 72.52 | 74.61 |
| | Écart type | 4.59 | 6.94 | 1.64 | 0.00 |

III.3.3 Hydrogrammes de simulation

Mais que signifie un NASH de 70% par rapport à un NASH de 50% ou moins ? Et par rapport aux hydrogrammes observés ? Aussi, pour mieux apprécier ces chiffres, nous avons tracé les hydrogrammes des débits moyens mensuels observés et simulés sur différentes périodes de validation pour les 5 bassins concernés par le test (Figure III-8).

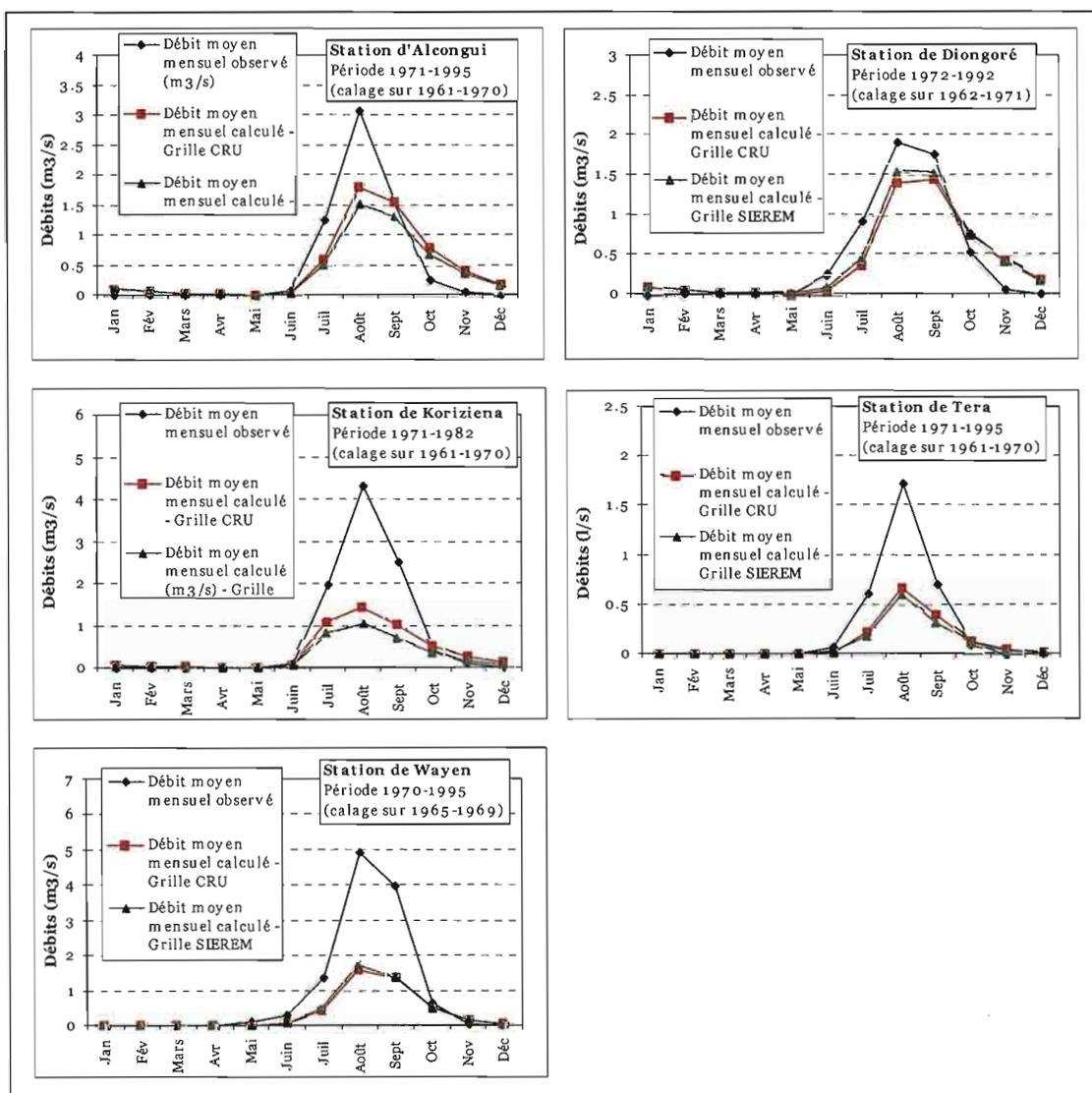


Figure III-8 : Débits moyens mensuels observés et calculés aux exutoires des 5 bassins retenus pour l'évaluation des performances du modèle

Le Tableau III-6 montre que le modèle sous-estime les débits avec des écarts au-delà de 60% pour les stations de Koriziena et de Wayen.

Tableau III-6 : Modules calculés et observés sur chacun des cinq bassins testés

| Station | Module Observé (m ³ /s) | | Module calculé (m ³ /s) | | Différence module observé / calculé (%) | |
|------------------|------------------------------------|--------|------------------------------------|--------|---|--------|
| | Période | Valeur | CRU | SIEREM | CRU | SIEREM |
| Alcongui | 1971-1995 | 7.0 | 6.0 | 5 | 14 | 29 |
| Diongoré | 1972-1992 | 6.7 | 5.9 | 6.3 | 12 | 5 |
| Koriziena | 1971-1982 | 10 | 4.6 | 3.1 | 54 | 69 |
| Tera | 1971-1995 | 3.3 | 1.6 | 1.4 | 53 | 59 |
| Wayen | 1970-1995 | 12.1 | 4.2 | 4.6 | 65 | 62 |

III.4 Conclusions sur les tests de performance

Les tests de performance de GR2M sur les 5 bassins de la zone sahélienne ont mis en évidence 3 éléments fondamentaux du comportement global de GR2M :

- un calage relativement correct dans l'ensemble avec une baisse de performance pour les périodes incluant la rupture climatique survenue en 1970,
- une validation non satisfaisante caractérisée par des critères de NASH généralement inférieurs à 50% avec assez souvent des NASH négatifs,
- des écarts importants de entre les modules observés et calculés quelque soit la source de pluie utilisée.

Ces résultats amènent tout naturellement à se demander pourquoi cette contre-performance de GR2M quand on sait qu'il donne de bons résultats notamment en milieu méditerranéen tropical (Maklouf et Michel, 1994) et tropical (Ouedraogo, 2001; Ardoïn, 2004) ?

Nous avons donc entrepris de nous intéresser au fonctionnement du réservoir sol de GR2M, car c'est lui qui régit la fonction de production du modèle.

III.5 Analyse du fonctionnement théorique du réservoir sol de GR2M

III.5.1 Interprétation des équations régissant le fonctionnement du réservoir

Dans GR2M, le fonctionnement du bassin est représenté par deux réservoirs dont un représente le sol. Caractérisé par sa hauteur maximale A , ce réservoir est d'une importance capitale puisque c'est lui qui régit la fonction de production du modèle. Sa particularité est que sa seule entrée est P_n (pluie modulée), et sa seule sortie est l'évapotranspiration E_n (évapotranspiration modulée). Son niveau ne varie donc que sous l'effet de ces deux variables.

Le réservoir sol de GR2M peut servir d'interface entre le modèle et la dynamique du milieu. En effet, la péjoration climatique, associée à l'augmentation des superficies cultivées et des superficies de sols dégradés, au détriment de la végétation, a profondément modifié les états de surface au Sahel, de telle sorte que le ruissellement augmente et l'infiltration baisse. Une conséquence directe de ce phénomène est la baisse de la capacité de rétention en eau du sol. Essayons de rapprocher ce mode de fonctionnement à celui du réservoir sol du modèle.

Soit H le niveau du réservoir au début d'un pas de temps i . Si au cours de ce pas de temps, une quantité de pluie élémentaire dP_n arrive à l'entrée du réservoir sol, la pluie nette correspondante sera (Makloul et Michel, 1994) :

$$\left[\left(\frac{H}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \quad \text{éq. III-2}$$

La quantité d'eau qui entre dans le réservoir est :

$$\left[1 - \left(\frac{H}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \quad \text{éq. III-3}$$

La variation du niveau du réservoir sera donc :

$$dH = \left[1 - \left(\frac{H}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \quad \text{éq. III-4}$$

D'après l'équation 4, on peut écrire que :

$$dH = \left[1 - \left(\frac{H}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \xrightarrow{A \rightarrow \infty} dP_n \quad \text{éq. III-5}$$

$$dH = \left[1 - \left(\frac{H}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \xrightarrow{A \rightarrow 0} 0 \quad \text{éq. III-6}$$

Ces deux dernières équations signifient que :

- Plus A est grand, plus la variation dH , du niveau du réservoir, tend vers la pluie modulée dP_n : **dans ce cas, toute la pluie modulée va dans le réservoir sol,**
- Plus A est petit, plus la variation dH , du niveau du réservoir sol tend vers 0 : **dans ce cas toute la pluie modulée va dans le réservoir gravitaire,**

Le ratio $\left(\frac{H}{A} \right)^2$ représente le taux de remplissage du réservoir au début du pas de temps. Nous avons cherché à caractériser l'évolution de ce ratio en utilisant les données sol extraites de la carte des sols de la FAO. Cette caractérisation a concerné les 5 bassins initialement retenus pour l'évaluation des performances du modèle GR2M au Sahel.

III.5.2 Analyse de l'évolution du ratio $\left(\frac{H}{A}\right)^2$ au Sahel

Nous avons calculé le taux de remplissage du réservoir sol lors du fonctionnement du modèle en validation pour les cinq bassins initialement retenus pour l'évaluation de l'efficacité de GR2M au Sahel. Le Tableau II-7 donne les détails des périodes de calage-validations retenues ainsi que les hauteurs maximales du réservoir sol pour chacun des cinq bassins testés.

Les Figure III-9, Figure III-12, et Figure III-13 donnent l'évolution de $\left(\frac{H}{A}\right)^2$ au début de chaque pas de temps sur la période 1971-1995 pour les trois bassins.

Tableau III-7 : Caractéristiques des périodes de calage - validation retenues et valeurs de A pour les bassins d'Alcongui de Tera et de Wayen

| Stations | Période de calage | Période de validation | A (mm) |
|-----------|-------------------|-----------------------|--------|
| Alcongui | 1961-1970 | 1971-1995 | 89.47 |
| Diongoré | 1962-1970 | 1971-1992 | 91.06 |
| Koriziena | 1961-1970 | 1971-1982 | 107.34 |
| Tera | 1962-1971 | 1972-1995 | 108.88 |
| Wayen | 1965-1970 | 1971-1995 | 78.49 |

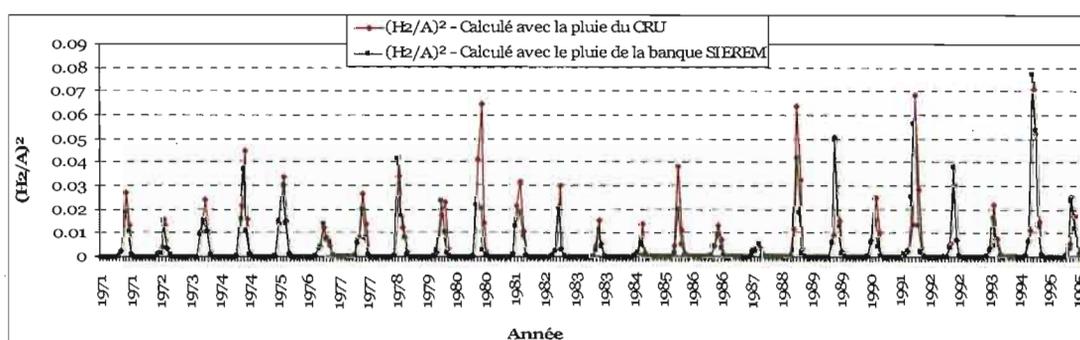


Figure III-9 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1971-1995 : station d'Alcongui

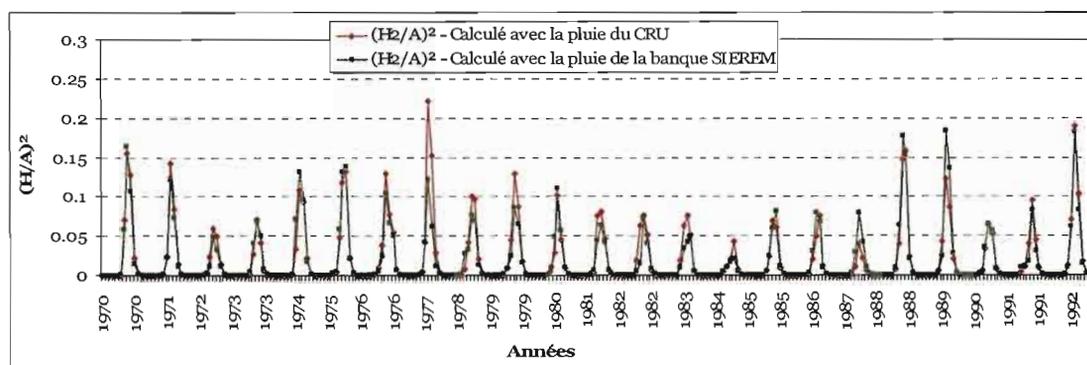


Figure III-10 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1970-1992 : station de Diongoré

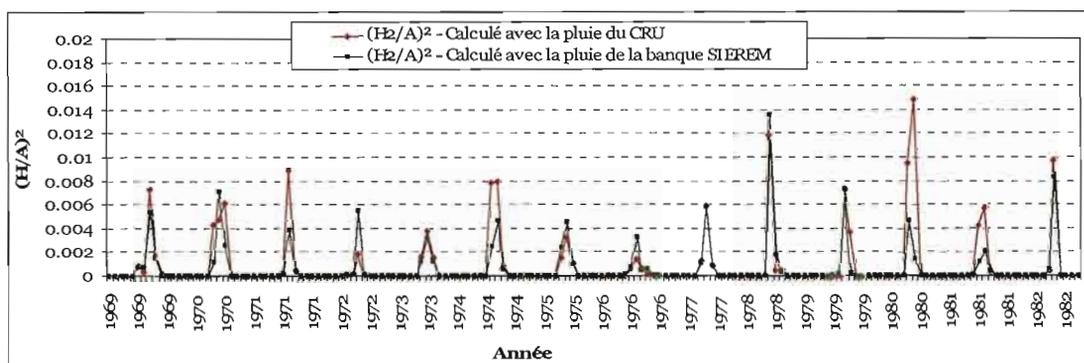


Figure III-11 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1970-1992 : station de Koriziéna

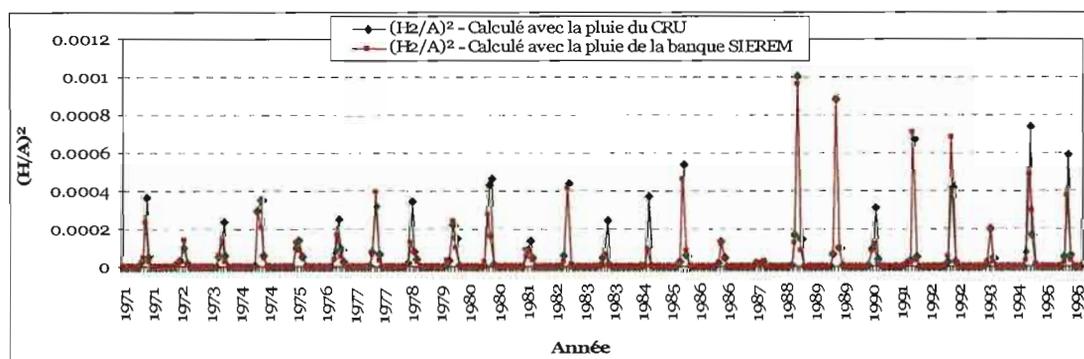


Figure III-12 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1971-1995 : station de Tera

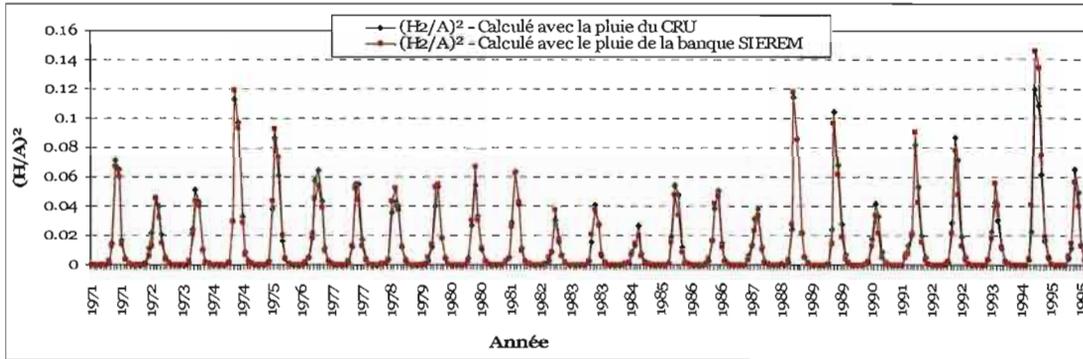


Figure III-13 : Évolution du taux de remplissage du réservoir sol sur la période 1971-1995 : station de Wayen

Tableau III-8 : Valeurs minimum, moyenne et maximum du ratio $\left(\frac{H}{A}\right)^2$ pour l'ensemble des cinq bassins testés

| | Pluie CRU | | | | |
|-------------|--------------|----------|-----------|------|-------|
| | Alcongou | Diongoré | Koriziena | Tera | Wayen |
| Minimum (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Moyenne (%) | 0.5 | 2.1 | 0.1 | 0.0 | 1.5 |
| Maximum (%) | 7.0 | 22.2 | 1.5 | 0.1 | 13.2 |
| | Pluie SIEREM | | | | |
| | Alcongou | Diongoré | Koriziena | Tera | Wayen |
| Minimum (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Moyenne (%) | 0.4 | 1.9 | 0.1 | 0.0 | 1.4 |
| Maximum (%) | 7.8 | 18.2 | 1.4 | 0.1 | 14.5 |

Il ressort que globalement, au début de chaque pas de temps, le ratio $\left(\frac{H}{A}\right)^2$ est en moyenne compris entre zéro et 2% avec des maximums inférieurs 25%. Ce résultat met en évidence un fait important du fonctionnement du réservoir sol : **la quasi-totalité de la pluie nette est absorbée par le réservoir sol**. Ceci peut expliquer le phénomène de la sous-estimation des débits par le modèle.

III.6 Conclusion

Deux résultats essentiels peuvent être tirés de ce chapitre.

Les tests de performance de GR2M sur 5 bassins versants représentatifs des conditions d'écoulement au Sahel ont montré que le modèle ne reproduit pas avec satisfaction les débits aux exutoires des bassins testés. Les débits calculés par le modèle sont quasi systématiquement inférieurs aux débits observés avec parfois des écarts parfois importants. Les hydrogrammes de simulation sont en général corrects. Les dates des maximums sont respectées.

Pour mieux comprendre cette contre-performance du modèle dans le contexte sahélien, nous avons analysé théoriquement le fonctionnement du réservoir sol à partir des équations de base du modèle. L'équation régissant la variation du niveau du réservoir sol dans le modèle est de la forme :

$$dH = \left[1 - \left(\frac{H}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n$$

Da cette équation nous avons déduits deux résultats fondamentaux :

- plus A est grand, plus la répartition de la pluie nette entre écoulement et infiltration est au profit de l'infiltration. Seulement une faible portion de la pluie nette est disponible pour le ruissellement,
- plus A est petit, plus la répartition de la pluie nette entre écoulement et infiltration est au profit de l'écoulement.

En utilisant les données de capacité de rétention en eau extraites de la carte des sols de la FAO pour les 5 bassins initialement retenus, nous avons, que la quasi-totalité de la pluie nette était absorbée par le réservoir sol de GR2M. La part destinée à l'écoulement est donc fortement réduite engendrant ainsi, une sous-estimation des débits simulés à l'exutoire des bassins testés. Il apparaît donc clairement que les données sol fourni par la FAO conduisent à des réservoirs sol de grandes capacités au Sahel qui ne permettent pas une simulation satisfaisante des écoulements par le modèle.

C HAPITRE **IV**

P REMIERE TENTATIVE D'AMELIORATION DES PERFORMANCES DE **GR2M AU SAHEL : CAS DU NAKAMBE A WAYEN**

Dans le troisième chapitre, nous avons évalué la performance du modèle GR2M sur 5 bassins représentatifs des conditions d'écoulement au Sahel. Les résultats ont montré que les données sol de la FAO, que nous assimilons à la hauteur maximale du réservoir sol de GR2M, sont trop élevées pour permettre une reproduction satisfaisante des débits. Avec ces données sol, nous avons montré que la majeure partie de la pluie nette reste dans le réservoir sol. Les débits calculés par le modèle sont alors quasi systématiquement inférieurs aux débits observés aux exutoires des bassins testés.

Si les données de capacité de rétention en eau des sols de la FAO conduisent à un surdimensionnement du réservoir sol de GR2M au Sahel, la question qui se pose tout naturellement c'est de savoir quelle hauteur maximale de réservoir il faut prendre pour améliorer les performances de simulation du modèle au Sahel ?

L'objectif de ce chapitre est donc de rechercher la hauteur optimale du réservoir sol de GR2M dans le contexte particulier du Sahel. Nous restreignons cette étude au seul cas du bassin du Nakambé à Wayen.

IV.1 Les données sol de la FAO pour le cas du Nakambé à Wayen

Au chapitre II, nous avons présenté la structure des données sol fournies par la FAO. Nous avons notamment montré la méthodologie de calcul des valeurs de WHC des bassins à partir de la version numérisée de la carte des sols établie par la FAO (Dieulin, 2005). Rappelons que cette méthodologie a fait ressortir quatre valeurs de WHC correspondant respectivement à la valeur minimale (WhcFaomin), moyenne (WhcFaomoy), maximale (WhcFaomax) et « Saxton » (WhcFaosaxton) de WHC.

La Figure IV-1 présente une cartographie des valeurs des données sol sur le bassin du Nakambé à Wayen. Les différentes valeurs de WHC par unité de surface (maille d'un demi degré carré) contribuent à la WHC du bassin proportionnellement à la surface qu'elles occupent. La WHC totale est obtenue en faisant la somme pondérée de ces différentes contributions. Ainsi, la WHC du bassin du Nakambé à Wayen prend les valeurs de 133 mm, 110 mm, 89 mm et 77 mm, correspondant respectivement à WhcFaomax, WhcFaomoy, WhcFaomin et WhcFaosaxton.

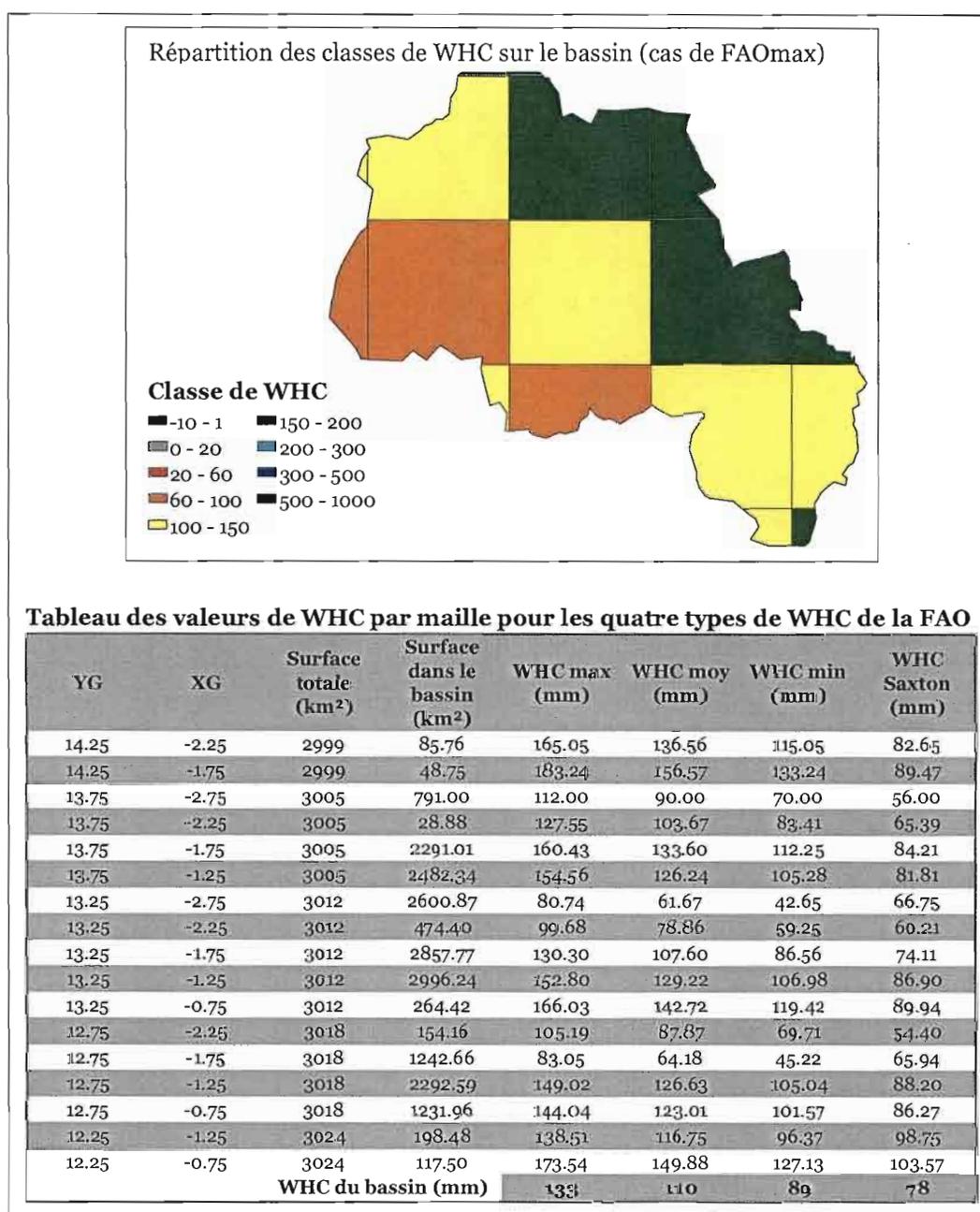


Figure IV-1 : Cartographie des valeurs des WHC sur le bassin du Nakambé à Wayen

IV.2 Recherche d'une WHC « optimum » pour le bassin du Nakambé à Wayen

IV.2.1 Génération de nouvelles valeurs du réservoir à partir des fichiers sol de la FAO

Connaissant les surfaces des différentes mailles qui concernent le bassin, le pourcentage d'inclusion de ces mailles dans le bassin, la valeur de WHC propre à chaque maille, et en respectant l'hypothèse de conservation de la variabilité relative interne entre les WHC des mailles du bassin, il est possible de « générer de nouvelles » valeurs de WHC des mailles de manière à modifier la WHC et donc la valeur A du réservoir sol du modèle.

Considérons par exemple les différentes mailles constitutives du bassin et leurs valeurs propres de WhcFaomax. La hauteur du réservoir sol du bassin est alors de 133 mm. Si l'on souhaite ramener cette valeur à 10 mm, on doit multiplier les valeurs des WhcFaomax de chaque maille par le ratio $\frac{10}{133}$.

Nous avons ainsi généré des fichiers de WHC correspondant à des WHC du bassin allant de 5 à 400 mm par pas de 5, soit 80 fichiers pour chacun des 4 types de WHC que nous avons. On obtient un ensemble de $4 \times 80 = 320$ fichiers sol pour le bassin du Nakambé à Wayen.

Tableau IV-1 : Valeurs de WHC par maille correspondant à une capacité de rétention en eau de 10 mm pour le bassin du Nakambé à Wayen

| Coordonnées maille | | WHC | Contribution | WHC | Contribution | WHC | Contribution | WHC | Contribution |
|---------------------------|-------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| YG | XG | FAOmax Pondérée | à la WHC du bassin | FAOmoy Pondérée | à la WHC du bassin | FAOmin Pondérée | à la WHC du bassin | FAOsaxton Pondérée | à la WHC du bassin |
| 14.25 | -2.25 | 12.39 | 0.05 | 12.41 | 0.05 | 12.90 | 0.05 | 10.53 | 0.04 |
| 14.25 | -1.75 | 13.76 | 0.03 | 14.22 | 0.03 | 14.94 | 0.04 | 11.40 | 0.03 |
| 13.75 | -2.75 | 8.41 | 0.33 | 8.18 | 0.32 | 7.85 | 0.31 | 7.13 | 0.28 |
| 13.75 | -2.25 | 9.58 | 0.01 | 9.42 | 0.01 | 9.35 | 0.01 | 8.33 | 0.01 |
| 13.75 | -1.75 | 12.05 | 1.37 | 12.14 | 1.38 | 12.58 | 1.43 | 10.73 | 1.22 |
| 13.75 | -1.25 | 11.61 | 1.43 | 11.47 | 1.41 | 11.80 | 1.45 | 10.42 | 1.28 |
| 13.25 | -2.75 | 6.06 | 0.78 | 5.60 | 0.72 | 4.78 | 0.62 | 8.50 | 1.10 |
| 13.25 | -2.25 | 7.49 | 0.18 | 7.16 | 0.17 | 6.64 | 0.16 | 7.67 | 0.18 |
| 13.25 | -1.75 | 9.79 | 1.39 | 9.77 | 1.39 | 9.70 | 1.38 | 9.44 | 1.34 |
| 13.25 | -1.25 | 11.48 | 1.71 | 11.74 | 1.74 | 11.99 | 1.78 | 11.07 | 1.65 |
| 13.25 | -0.75 | 12.47 | 0.16 | 12.97 | 0.17 | 13.39 | 0.18 | 11.46 | 0.15 |
| 12.75 | -2.25 | 7.90 | 0.06 | 7.98 | 0.06 | 7.82 | 0.06 | 6.93 | 0.05 |
| 12.75 | -1.75 | 6.24 | 0.38 | 5.83 | 0.36 | 5.07 | 0.31 | 8.40 | 0.52 |
| 12.75 | -1.25 | 11.19 | 1.27 | 11.50 | 1.31 | 11.78 | 1.34 | 11.24 | 1.28 |
| 12.75 | -0.75 | 10.82 | 0.66 | 11.17 | 0.68 | 11.39 | 0.70 | 10.99 | 0.67 |
| 12.25 | -1.25 | 10.40 | 0.10 | 10.61 | 0.10 | 10.80 | 0.11 | 12.58 | 0.12 |
| 12.25 | -0.75 | 13.03 | 0.08 | 13.62 | 0.08 | 14.25 | 0.08 | 13.19 | 0.08 |
| WHC du bassin (mm) | | | 10 | | 10 | | 10 | | 10 |

IV.2.2 Choix des périodes de calage et de validation

Les données de débit utilisées couvrent la période 1965-1995. Cette série a été découpée en trois parties de manière à ce que les limites de chaque partie coïncident avec les dates d'acquisition des images des satellites LANDSAT que nous avons sur le bassin du Nakambé. Les images datent de 1972, 1986, 1992 et 2002. Comme les débits disponibles commencent en 1965, les trois périodes de calage que nous retenons sont : 1965-1972 ; 1973-1986 ; 1987-1995. Ce découpage nous permettra par la suite de faire le lien entre l'occupation du sol à ces différentes dates et l'évolution des valeurs de WHC. Pour chaque période de calage choisie, on procède à une série de validations sur les périodes restantes (Tableau IV-2).

Tableau IV-2 : Périodes de calage et de validation retenues pour la recherche de l'optimum de WHC

| Périodes de calage | Périodes de validation |
|--------------------|-----------------------------------|
| 1965-1972 | 1973-1986 ; 1987-1995 ; 1973-1995 |
| 1973-1986 | 1965-1972 ; 1987-1995 |
| 1987-1995 | 1965-1972 ; 1973-1986 ; 1965-1986 |

Il est intéressant de donner les caractéristiques hydrologiques de ces trois périodes de calage retenues. Elles nous serviront ultérieurement dans l'interprétation des résultats. On peut noter sur la Figure IV-2 l'augmentation des hydrogrammes moyens sur les trois périodes correspondant à un changement de la réponse du bassin.

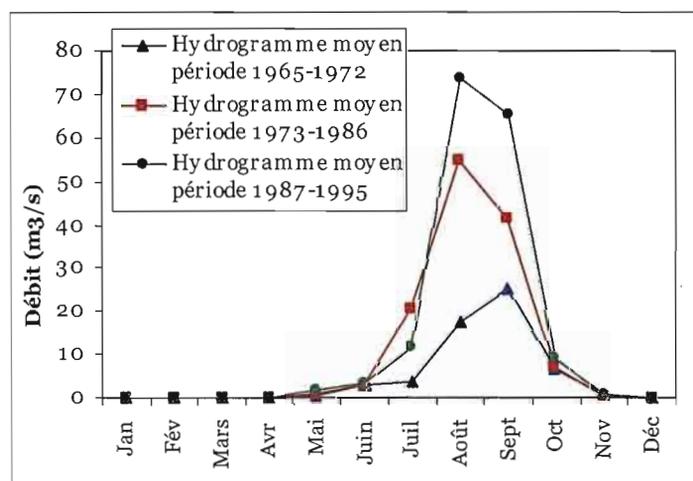


Figure IV-2 : Hydrogrammes moyens des trois périodes de calage retenues (Wayen)

IV.2.3 Protocole des tests de recherche de l'optimum

Pour une période donnée, on cale le modèle en utilisant la WHC de la FAO. Le résultat de ce calage peut être représenté par un triplet $(X_1, X_2, NASH)_{calage}$ qui regroupe les valeurs des paramètres X_1 , X_2 et la valeur du NASH obtenue. Le modèle est ensuite validé sur les autres périodes restantes. De même, on obtient un triplet $(X_1, X_2, NASH)_{validation}$ propre à chaque période de validation.

On fait ensuite varier la valeur de WHC du bassin entre 5 et 400 mm en répétant les opérations de calage et validation décrites plus haut. On repère le Nash du triplet $(X_1, X_2, NASH)_{validation}$ le plus élevé et la valeur de la WHC correspondante.

La figure IV-3 montre la démarche suivie. $3 \times 80 + 3 = 243$ opérations sont à répéter pour chaque période (1965-72, 73-86, 87-95) et pour chaque type de fichiers de pluie (CRU et SIEREM).

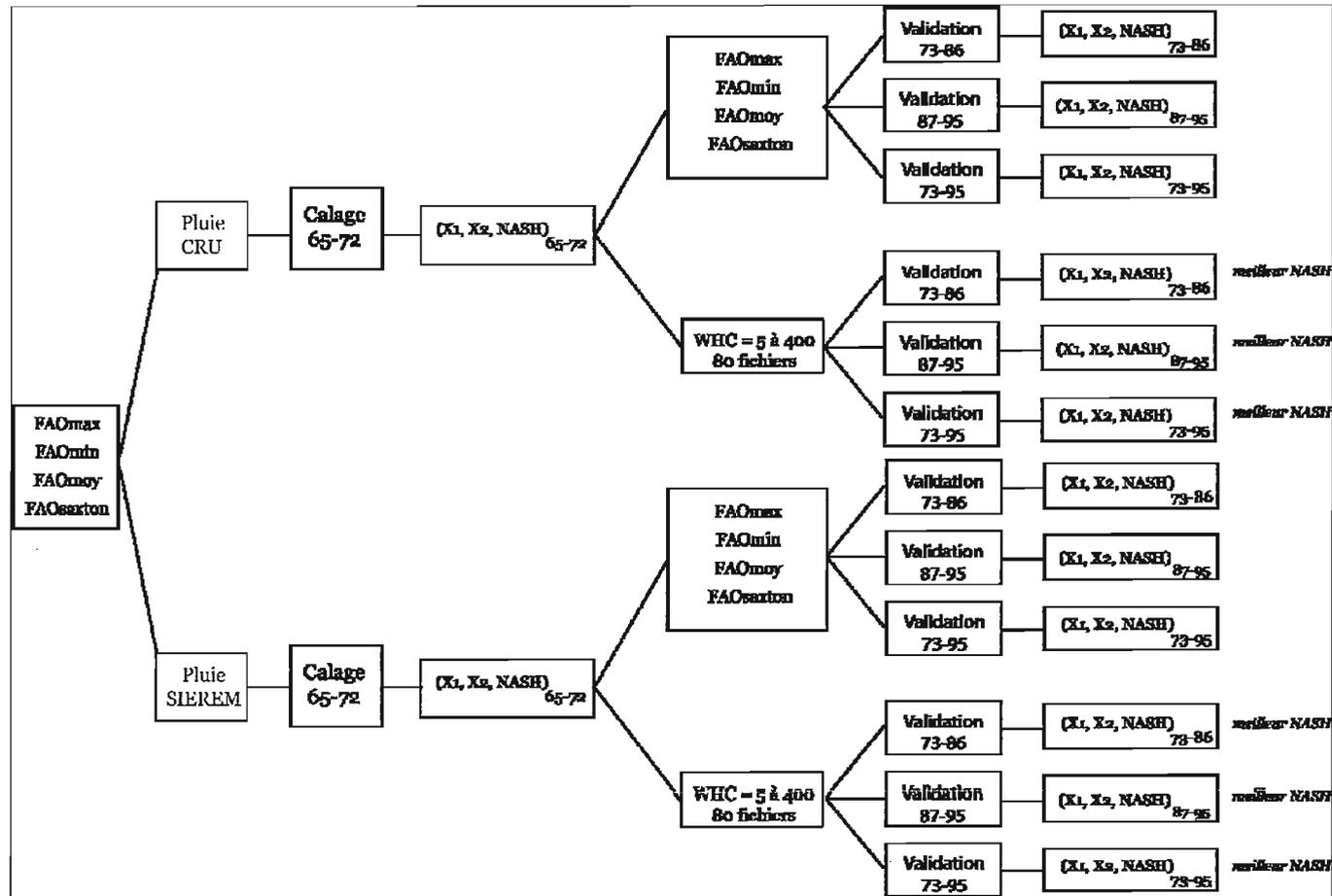


Figure IV-3 : Schéma des tests en calage validation pour le cas de WHC FAOmax

IV.3 Résultats

IV.3.1 Calage sur la période 1965-1972 et validations sur 1973-1986 ; 1987-1995 ; 1973-1995

IV.3.1.1 Résultats du calage sur la période 1965-1973

Le Tableau IV-3 donne les paramètres X1, X2 et le NASH de calage du modèle sur la période 1965-1972.

Tableau IV-3 : Résultats du calage sur la période 1965-1972 pour WHC = 133 mm

| | X1 | X2 | NASH (%) |
|-----------------|-----|-----|----------|
| A=133 mm | 0.3 | 0.9 | 62 |

IV.3.1.2 Validation sur la période 1973-1986

Nous avons procédé à la validation du modèle sur la période 1973-1986 pour WHC=133 mm. La même opération a été effectuée en faisant varier la WHC de 5 à 400 mm. Les résultats sont présentés à la Figure IV-4. L'optimum de NASH est obtenu pour WHC = 60 mm. On a un gain de près de 20 points de NASH en baissant la WHC de 133 mm à 60 mm sur la période de validation.

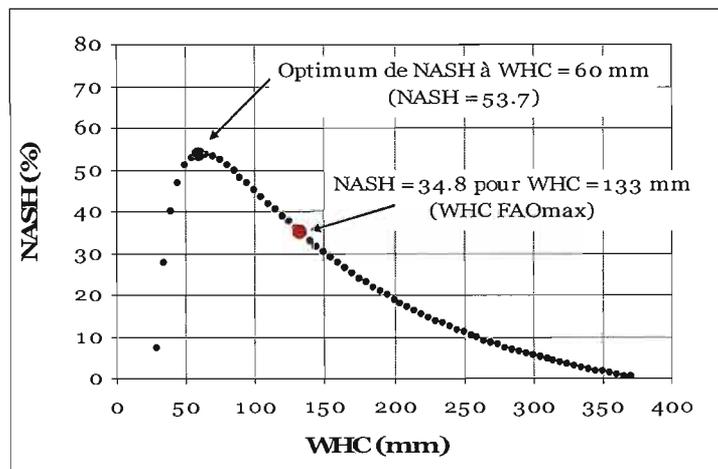


Figure IV-4: NASH de validation sur la période 1973-1986 en fonction de la WHC.

IV.3.1.3 Validation sur la période 1987-1995

De la même manière que précédemment, le modèle a été validé sur la période 1987-1995 et les résultats sont donnés à la Figure IV-5. L'optimum de NASH est obtenu pour une WHC égale à 70 mm avec un NASH de 70%, soit un gain de plus de 18 points.

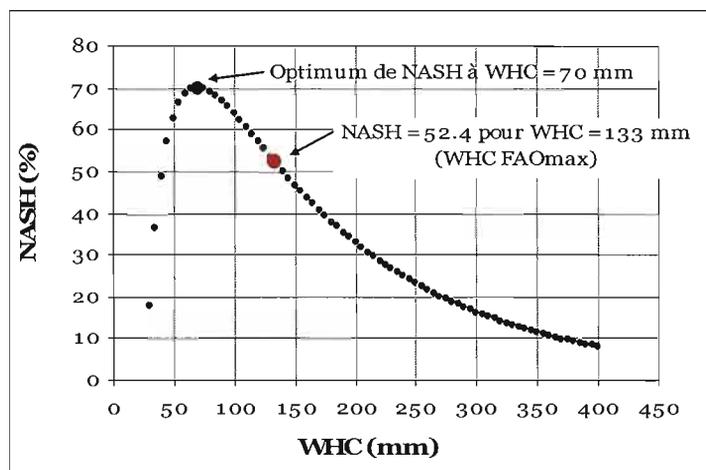


Figure IV-5 : NASH de validation sur la période 1987-1995 en fonction de la WHC

IV.3.1.4 Validation sur la période 1973-1995

La dernière validation du modèle avec les paramètres de calage de la période 1965-1972 a concerné la période 1973-1995. Les résultats sont donnés Figure IV-6 et. Le NASH passe de 48% à 65%, soit une augmentation de 19 points.

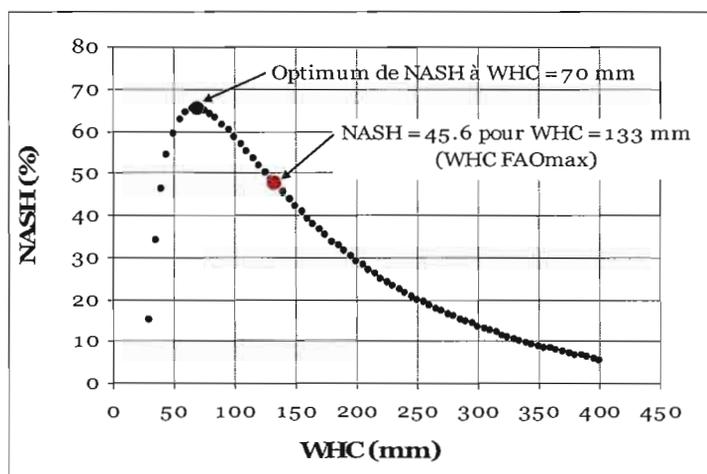


Figure IV-6 : NASH de validation sur la période 1973-1995 en fonction de la WHC

IV.3.1.5 Synthèse des résultats du calage sur la période 1965-1972 et des validations sur 1973-1986 ; 1987-1995 ; 1973-1995

Le Tableau IV-4 donne une synthèse des résultats obtenus pour cette première série de calage-validations. Il apparaît globalement qu'en calant le modèle sur la période 1965-1972 avec une WHC de 133 mm, on obtient des résultats de validation très appréciable lorsque qu'on diminue la WHC : **Les gains de NASH sont de l'ordre de 20 points !**

La WHC optimale est de 60 mm pour la période 1973-1985 et de 70 mm pour les deux autres périodes (1987-1995 et 1973-1995).

Il est intéressant de noter que ces résultats sont en accord total avec les conclusions du chapitre 3 sur le fonctionnement du réservoir sol du modèle. En effet, la Figure IV-7 montre que la période de calage 1965-1972 est caractérisée, en moyenne, par des débits plus faibles que ceux des périodes de validation 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 alors que les pluies de ces dernières périodes sont bien inférieures à celles observées entre 1965 et 1972. Caler le modèle sur la période 1965-1972 et chercher à le valider sur 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 revient à « demander » au modèle de produire plus de débit avec moins de pluie (la pluviométrie ayant baissée sur ces périodes). On ne peut y parvenir qu'en diminuant la valeur de A. Il est à noter que les valeurs de WHC « optimales » sont inférieures à toutes celles obtenues à partir des données de la FAO (Tableau IV-4).

Tableau IV-4 : Validations sur les périodes 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 avec les paramètres du calage 1965-1972

| Validation | Fichiers sol | X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) |
|------------|--------------|-----|-----|--------|----------|
| 1973-1986 | WHC Faomax | | | 133 | 34.8 |
| | WHC optimale | 0.3 | 0.9 | 60 | 53.7 |
| 1987-1995 | WHC Faomax | | | 133 | 52.4 |
| | WHC optimale | 0.3 | 0.9 | 70 | 70 |
| 1973-1995 | WHC Faomax | | | 133 | 47.6 |
| | WHC optimale | 0.3 | 0.9 | 70 | 65.3 |

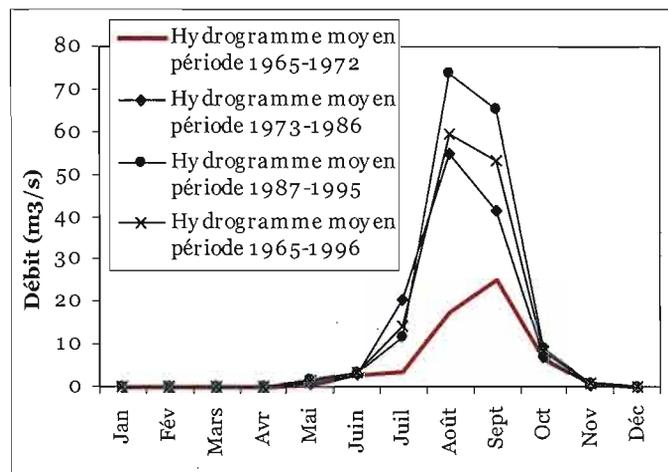


Figure IV-7 : Hydrogrammes moyens de la période de calage 1965-1972 et des périodes de validation 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995

IV.3.2 Calage 1973-1986 et validation sur 1965-1972 et 1987-1995

IV.3.2.1 Résultats du calage 1973-1985

Les valeurs des paramètres de calage sur la période 1973-1986 sont données au Tableau IV-5.

Tableau IV-5 : Résultats du calage sur la période 1965-1972 pour WHC = 133 mm

| | X1 | X2 | NASH (%) |
|-----------|-----|-----|----------|
| A= 133 mm | 0.4 | 0.8 | 58.2 |

IV.3.2.2 Validation sur la période 1965-1972

En suivant le même protocole de validation que précédemment, on a les résultats présentés à la Figure IV-8. L'optimum de NASH est obtenu pour une WHC égale à 285 mm avec un NASH de 57%.

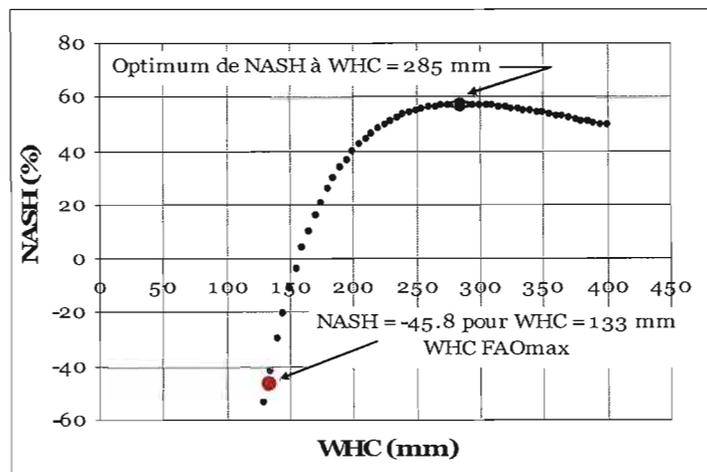


Figure IV-8: NASH de validation sur la période 1965-1975 en fonction de la WHC.

IV.3.2.3 Validation sur la période 1987-1995

La période 1987-1995 est la seconde période de validation du modèle après l'avoir calé sur 1965-1972. Les résultats sont donnés à la Figure IV-9. La WHC optimale (145 mm) est proche de la WHC de départ (133mm). Les critères de NASH sont tous deux égaux à 57%.

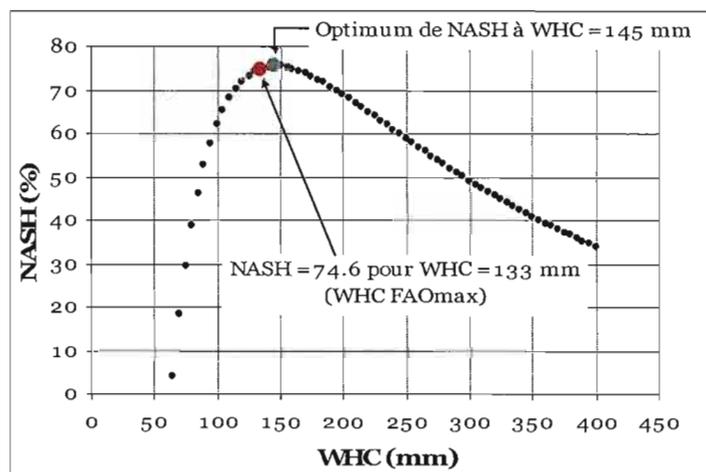


Figure IV-9 : NASH de validation sur la période 1987-1995 en fonction de la WHC

IV.3.2.4 Synthèse des résultats du calage 1973-1986 et des validations sur 1965-1972 et 1987-1995

Les résultats de cette deuxième série de calage validation sont synthétisés au Tableau IV-6. On remarque également une très bonne amélioration des valeurs du critère de NASH comparativement aux valeurs données par la FAO. On remarque que pour la période de validation 1965-1972, le modèle « réclame » une valeur de WHC=285 mm ce qui est largement au dessus des 133 mm. Ce résultat peut paraître en contradiction avec les conclusions du chapitre 3 sur le fonctionnement du réservoir sol, mais il n'en est rien. En effet, nous avons calé le modèle sur une période où les débits moyens sont élevés et nous avons cherché à le valider sur une période à débits faibles en moyenne (Cf. hydrogrammes de ces périodes à la Figure IV-10). Lors de la validation, on demande au modèle de produire de faibles débits avec plus de pluie en entrée (la période avant 1970 étant globalement plus pluvieuse que celle d'après). La taille du réservoir doit donc s'ajuster sur des valeurs élevées afin de retenir une grande partie de la pluie nette et ne laisser qu'une petite partie au ruissellement (débits faibles).

Pour la seconde période de validation (1973-1995), on remarque que les valeurs de WHC ainsi que les critères de NASH sont proches (74.6% pour A=133 mm et 75.4% pour A=145 mm). Cela

s'explique facilement par le fait que les périodes de calage et de validation sont de caractéristiques équivalentes du point de vue du hydroclimatique. Ces deux périodes se situent, en effet, après la rupture climatique : baisse de la pluviométrie et augmentation des coefficients d'écoulements

Tableau IV-6 : Validations sur les périodes 1965-1975, 1987-1995 avec les paramètres du calage 1976-1986

| Validation | Fichiers sol | X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) |
|------------|--------------|-----|-----|--------|----------|
| 1965-1972 | WHC Faomax | 0.4 | 0.8 | 133 | -45.8 |
| | WHC optimale | | | 285 | 57.1 |
| Validation | Fichiers sol | X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) |
| 1987-1995 | WHC Faomax | 0.4 | 0.8 | 133 | 74.6 |
| | WHC optimale | | | 145 | 75.4 |

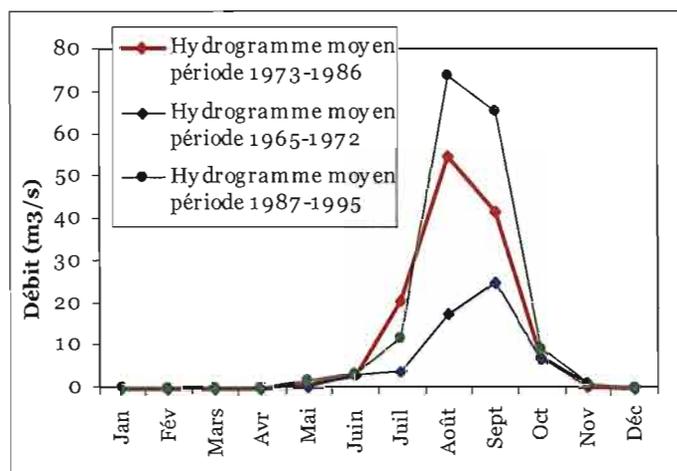


Figure IV-10 : Hydrogrammes moyens de la période de calage 1973-1986 et des périodes de validation 1965-1972 et 1987-1995

IV.3.3 Calage sur la période 1987-1995 et validations sur 1965-1972 ; 1973-1986 et 1965-1986

IV.3.3.1 Calage 1987-1995 : résultats

Le Tableau IV-7 donne les paramètres de spécification du modèle sur la période 1987-1995.

Tableau IV-7 : Résultats du calage sur la période 1987-1995 pour WHC=133 mm

| | X1 | X2 | NASH (%) |
|-----------|-----|-----|----------|
| A= 133 mm | 0.4 | 0.8 | 75.2 |

IV.3.3.2 Validation sur la période 1965-1972

Le modèle a été validé sur la période 1965-1972. L'évolution des valeurs du critère de NASH est présentée à la Figure IV-11.

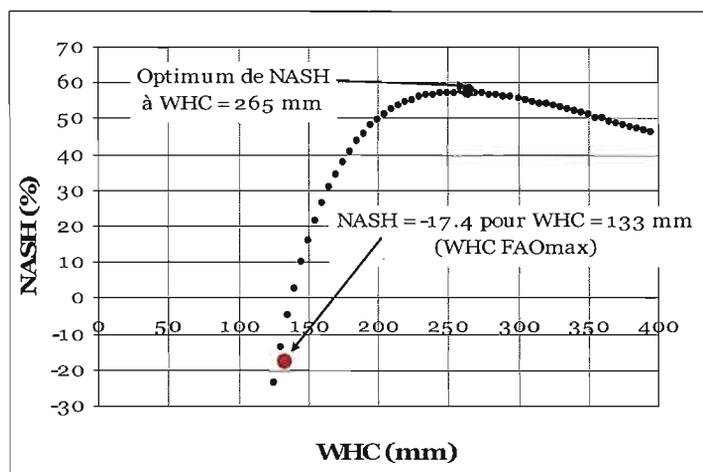


Figure IV-11: NASH de validation sur la période 1965-1972 en fonction de la WHC.

IV.3.3.3 Validation sur la période 1973-1986

La Figure IV-12 donne les résultats de la validation du modèle sur la période 1973-1986.

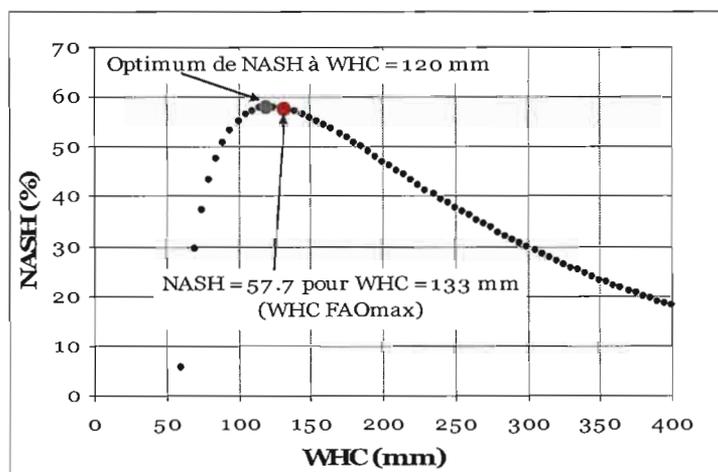


Figure IV-12 : NASH de validation sur la période 1973-1986 en fonction de la WHC

IV.3.3.4 Validation sur la période 1965-1986

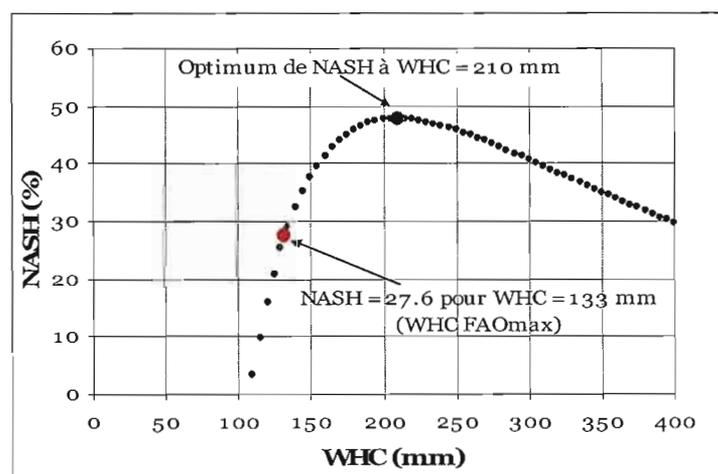


Figure IV-13 : NASH de validation sur la période 1965-1986 en fonction de la WHC

IV.3.3.5 Calage 1987-1995 et validation sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986 : Synthèse des résultats

Tableau IV-8 : Calage 1987-1995 et validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986 : synthèse des résultats

| Validation | Fichiers sol | X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) |
|------------|--------------|-----|-----|--------|----------|
| 1965-1972 | WHC Faomax | 0.4 | 0.8 | 133 | -17.4 |
| | WHC optimale | | | 265 | 57.4 |
| 1973-1986 | WHC Faomax | 0.4 | 0.8 | 133 | 57.7 |
| | WHC optimale | | | 120 | 58.1 |
| 1965-1986 | WHC Faomax | 0.4 | 0.8 | 133 | 26.6 |
| | WHC optimale | | | 210 | 47.8 |

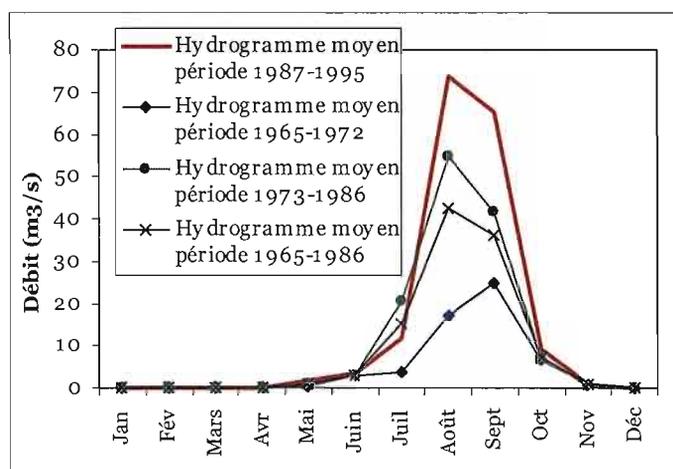


Figure IV-14 : Hydrogrammes moyens de la période de calage 1987-1995 et des périodes de validation 1965-1972 et 1973-1986, et 1965-1986

Ces résultats rejoignent les analyses faites plus haut lors des deux précédentes phases de calage et de validation.

IV.4 Synthèse et conclusion

Nous avons rassemblé au Tableau IV-9 l'ensemble des résultats obtenus lors de cette recherche d'optimum de WHC pour le cas du bassin du Nakambé à Wayen. Trois constats ressortent de l'analyse de ces résultats :

1. l'utilisation de la valeur de WHC donnée par la FAO ($WHC_{FAOmax} = 133$ mm) en validation donne de mauvais résultats.
2. il est possible d'ajuster des hauteurs de réservoir qui permettent d'obtenir des valeurs de Nash bien supérieures (même si elles restent assez faibles dans l'absolu...) pour chaque période de notre étude.
3. tous les essais montrent que de 1965 à 1995, les valeurs de WHC doivent diminuer.

Ces résultats, purement numériques, doivent être à rapprocher des observations de terrain, notamment de l'évolution des états de surface pour une meilleure prise en compte de la dynamique du milieu dans le modèle : la taille du réservoir sol ne peut être gardée comme constante sur la période de travail.

Tableau IV-9 : Synthèse des résultats de la recherche d'un optimum de WHC pour le cas du bassin du Nakambé à Wayen

| Calage 1965-1972 | | | | Validation 1973-1986 | | Validation 1987-1995 | | Validation 1973-1995 | |
|------------------|-----|--------|----------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------|
| X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) | NASH (%) | | NASH (%) | | NASH (%) | |
| | | | | WHC Faomax (A=133mm) | WHC optimale (A=60 mm) | WHC Faomax (A=133mm) | WHC optimale (A=70 mm) | WHC Faomax | WHC optimale |
| 0.262 | 0.9 | 133 | 61.62 | 34.8 | 53.7 | 52.4 | 70 | 47.6 | 65.3 |
| | | | | Gain de NASH | +18.9 | +17.6 | +35.2 | +12.8 | +30.5 |

| Calage 1973-1986 | | | | Validation 1965-1972 | | Validation 1987-1995 | |
|------------------|--------|--------|----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|
| X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) | NASH (%) | | NASH (%) | |
| | | | | WHC Faomax (A=133mm) | WHC optimale (A=285 mm) | WHC Faomax (A=133mm) | WHC optimale (A=145 mm) |
| 0.4029 | 0.7641 | 133 | 58.2 | -45.8 | 57.1 | 74.6 | 75.4 |
| | | | | Gain de NASH | +102.9 | +120.4 | +121.2 |

| Calage 1987-1995 | | | | Validation 1965-1972 | | Validation 1973-1986 | | Validation 1965-1986 | |
|------------------|--------|--------|----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------|
| X1 | X2 | A (mm) | NASH (%) | NASH (%) | | NASH (%) | | NASH (%) | |
| | | | | WHC Faomax (A=133mm) | WHC optimale (A=265 mm) | WHC Faomax (A=133mm) | WHC optimale (A=120 mm) | WHC Faomax | WHC optimale |
| 0.3863 | 0.7580 | 133 | 75.2 | -17.4 | 57.4 | 57.7 | 58.1 | 26.6 | 47.8 |
| | | | | Gain de NASH | +74.8 | +75.1 | +75.5 | +44 | +65.2 |

PARTIE II

DYNAMIQUE DES ETATS DE SURFACE AU SAHEL : FACTEURS CONDITIONNELS, INDICATEURS ET IMPLICATIONS HYDROLOGIQUES

C HAPITRE **V**

F **ACTEURS CONDITIONNELS DE LA DYNAMIQUE DES ETATS DE SURFACE AU SAHEL : INDICATEURS ET IMPLICATIONS HYDROLOGIQUES**

L'évolution du milieu est déterminée par un ensemble de facteurs en interaction permanente. Au Sahel, l'environnement totalement naturel, au sens de « sans influence humaine », n'existe presque plus. Les paysages que l'on peut observer lorsque l'on parcourt les aires sahéniennes résultent d'un équilibre entre une pression naturelle, qui tend à promouvoir une végétation en équilibre avec les conditions climatiques et, une pression humaine, qui tend globalement à dégrader le milieu.

Ces interactions entre le climat, l'homme et son environnement représentent les éléments moteurs de la dynamique des états de surface au Sahel. Après une définition du concept d'état de surface, nous décrirons et analyserons les facteurs conditionnels des modifications de l'environnement qui ont un impact sur les états de surface et au final sur les capacités d'infiltration et de ruissellement des sols. A partir de l'analyse des pratiques agropastorales, et des différents modes de transformation du milieu au Sahel, quatre indicateurs de pression anthropique et/ou climatique seront définis et leur choix justifié.

V.1 Définition et rôle hydrologique des états de surface

V.1.1 Définition

Le terme « état de surface », au sens de Casenave et Valentin (1991), désigne toute surface élémentaire, toute association de surfaces élémentaires, toute juxtaposition de surfaces élémentaires, et tout système interdépendant de surfaces élémentaires.

La surface élémentaire se définit comme tout ensemble homogène constitué à un instant donné, du couvert végétal, du type de sol et des organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques (les croûtes).

V.1.2 Rôle hydrologique des états de surface

Dans les régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest, les sols pauvres en matières organiques et mal protégés par une végétation peu développée ont tendance à subir, sous l'effet des fortes intensités de pluie (150 à 200 mm.h⁻¹ en 5 mn et 60 à 70 mm.h⁻¹ pendant 30 mn), des réorganisations superficielles importantes qui limitent l'infiltration. Ces caractéristiques de surface sont déterminantes pour l'hydrologie dans ces régions. En effet, plusieurs études ont mis en évidence le rôle joué par les caractéristiques physiques des premiers centimètres du sol même si les données utilisées dans ces études ont, pour la plupart, été recueillies sur des échantillons remaniés au laboratoire.

Des études anciennes (Audry et Rossetti, 1962; Gavaud, 1968; Bocquier, 1971; Leprun, 1978; Bougere, 1979; Leprun, 1979; Escadafal, 1981) se sont intéressées à cette problématique et ont entrepris l'analyse des organisations superficielles en zone sahélienne et sub-désertique. Ces analyses n'étaient cependant pas combinées à des études expérimentales du comportement des sols. C'est à la fin des années 70 et, avec les premiers résultats des mesures sous pluies simulées, que l'influence déterminante des organisations superficielles sur le comportement des sols vis-à-vis de l'eau a été mise en évidence (Collinet et Lafforgue, 1979; Collinet et Valentin, 1979; Valentin, 1981; Albergel *et al.*, 1986; Casenave et Valentin, 1991). Des expérimentations sur 139 parcelles soumises à 860 averses simulées ont permis de mettre en évidence et de hiérarchiser l'influence des facteurs conditionnels de l'infiltration sur une vaste zone géographique (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Cameroun, Congo et Sénégal).

Pour chacune des parcelles testées, 8 variables caractéristiques du milieu ont été mesurées : le couvert végétal (V) ; la taille des constituants de surface (T) ; le microrelief (R) ; les

réorganisations superficielles (P) ; les traces d'érosion (E) ; l'activité faunique (B) ; les fentes en surface (F) ; les traces d'hydromorphie (H). Cinq variables représentatives de l'infiltration ont également été quantifiées à partir des enregistrements obtenus à chacune des averses simulées (Casenave, 1982). Ce sont : le coefficient d'infiltration sur l'ensemble du protocole (KI) ; l'intensité limite de ruissellement (II) ; la pluie d'imbibition sur sol sec (Pi_s) ; la pluie d'imbibition sur sol humide (Pi_h) ; les détentions superficielles récupérables (Dr).

Une analyse factorielle des correspondances (AFC) réalisée sur les variables regroupées en classes a permis de distinguer deux groupes de variables très cohérents.

- Dans le premier groupe, la faible infiltration s'explique par l'absence de végétation, par de fortes réorganisations superficielles, par une activité faunique nulle et par une taille importante des constituants en surface.
- Dans le second groupe, la forte infiltration s'explique par une végétation importante, par l'absence de croûte et par une activité biologique moyenne à forte.

Cette AFC a également mis en évidence une opposition entre les parcelles de régions sèches (pluie moyenne interannuelle inférieure à 850 mm) et celles des régions plus humides.

La validité des mesures sous pluies simulées a été étudiée par Albergel et Thébé (1986) sur un bassin versant soudano-sahélien du Nord du Cameroun. Cette étude a montré notamment que les ruissellements mesurés sur trois parcelles d'un même site au cours de deux saisons sèches différentes donnaient des échantillons statistiquement homogènes dont la variabilité reste dans l'ordre de grandeur de la précision de mesure. Cette étude a également montré que sur les parcelles sans végétation, le ruissellement mesuré sous pluies simulées est équivalent à celui mesuré sous pluies naturelles. Par contre, une surestimation du ruissellement sur les parcelles couvertes de végétation a été constatée. Cette surestimation reste cependant faible (<10%) pour les faibles couvertures végétales habituelle du Sahel mais peut atteindre 30% si la couverture végétale dépasse 50% de la surface de la parcelle.

Des études récentes ont également mis en évidence le caractère prédominant des états de surface dans la modification de l'écoulement en milieu sahélien (Dolman *et al.*, 1997; Nicholson, 2000; Legesse *et al.*, 2003; Mahé *et al.*, 2003; Séguis *et al.*, 2003; Mahé *et al.*, 2005).

V.2 Facteurs conditionnels de la dynamique des états de surface au Sahel

A l'image de la formule de la dégradation des sols donnée par Blaikie et Brookfield (1987), la dynamique d'évolution des états de surface est le résultat de l'interaction d'un ensemble de facteurs positifs et négatifs de telle sorte que l'on peut écrire :

$$\left(\begin{array}{c} \text{Transformation} \\ \text{nette} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Processus} \\ \sum \text{naturels de} \\ \text{dégradation} \\ + \\ \text{Interférences} \\ \sum \text{négatives de} \\ \text{l'homme} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \sum \text{Régénérescences} \\ \text{naturelles} \\ + \\ \text{Aménagements} \\ \sum \text{et} \\ \text{restaurations} \end{array} \right)$$

De cette équation se dégagent deux groupes de facteurs qui conditionnent l'évolution du milieu :

V.2.1 Facteurs naturels

Les processus naturels de dégradation et de régénérescence du milieu sont essentiellement régis par les facteurs climatiques, physiques et pédologiques.

V.2.1.1 Facteurs climatiques

Les plus déterminants sont la pluie et l'évapotranspiration. Ces deux facteurs contrôlent quasi exclusivement l'état du milieu en zone sahélienne. Ils déterminent, en effet, les composantes du bilan hydrique et fixent les quantités d'eau qui seront disponibles pour les végétaux et les êtres vivants. Ce jeu de l'offre en précipitation et de la demande évaporatoire du milieu constitue un facteur conditionnel majeur de l'évolution des hydrosystèmes de la région. Lorsque les quantités d'eau ne sont pas suffisantes pour satisfaire la demande évaporatoire et permettre le développement des végétaux, on parle de sécheresse ou d'aridité selon que le manque d'eau soit passager ou permanent.

L'érosivité des précipitations intervient également dans les phénomènes de dégradation naturelle du milieu en régions sahéliennes. En effet, la battance due au choc des gouttes de pluie avec la surface du sol favorise l'encroûtement, et, par conséquent, l'écoulement superficiel de l'eau. Il s'en suit une réduction de l'infiltration dont la conséquence sur le milieu est la détérioration du couvert végétal. Ce type de dégradation provoque l'apparition de plaques de sols dénudés appelées « Zipellés » par les populations locales au Nord du

Burkina Faso, et, que Marchal (1983) qualifie de « lèpre » du Yatenga (Nord du Burkina Faso).

V.2.1.2 Facteurs physiques et pédologiques

Les conséquences du manque d'eau dans le milieu sont plus ou moins marquées en fonction des conditions physiques et pédologiques. Combinés aux conditions climatiques, ces facteurs physiques et pédologiques confèrent au milieu ses « prédispositions à la dégradation et/ou à la régénérescence ». Les principales composantes de ces prédispositions sont la topographie, la nature des sols, et le type de couverture végétale.

Leur nature et l'organisation des différents horizons sont déterminantes :

- pour les flux d'eau caractérisant les phénomènes de ruissellement, et d'infiltration,
- pour les flux de matière régissant les phénomènes d'érosion à travers les transports solides,
- pour les flux de chaleur conditionnant les phénomènes d'évaporation.

La nature du sol permet de définir sa stabilité et sa sensibilité aux phénomènes de dégradation. En effet, une caractéristique intrinsèque du sol est sa cohésion qui est un élément important dans les mécanismes d'encroûtement pendant les pluies. La cohésion u sol fait appel à diverses caractéristiques pédologiques telles que la granulométrie, le taux de matière organique et l'humidité au moment de l'événement pluvieux.

La topographie du milieu intervient dans les processus hydrologiques et pédologiques tels que le ruissellement et l'érosion. Les écoulements et les transports solides peuvent être sensiblement affectés. Ces phénomènes sont souvent d'autant plus importants que les versants présentent de fortes pentes. L'importance de la topographie intervient surtout lorsque la couverture végétale est insuffisante pour assurer une bonne protection des sols contre l'érosion.

V.2.2 Facteurs anthropiques

V.2.2.1 Occupation du sol

L'un des principaux moteurs de l'évolution du milieu est l'occupation des sols due aux activités anthropiques. Plusieurs études ont montré que les changements dans la végétation (augmentation des surfaces cultivées et des surfaces de sol nu au dépends de la végétation naturelle) ont un impact sur les paramètres climatiques tels que l'albédo (Fuller et Ottke, 2002), les précipitations (Taylor *et al.*, 2002) et les écoulements (Lorup *et al.*, 1998;

Bronstert *et al.*, 2002; Mahe *et al.*, 2002; Niehoff *et al.*, 2002; Pell *et al.*, 2002; Legesse *et al.*, 2003).

V.2.2.2 Pratiques agropastorales « négatives »

Au Sahel les actions humaines tendant à dégrader le milieu sont bien connues et, les plus souvent citées, sont la coupe abusive du bois, le défrichage pour la mise en culture, les feux de brousse, et le surpâturage. Ces pratiques inadaptées vis-à-vis des conditions pédoclimatiques locales de la zone peuvent, néanmoins, se justifier dans ces régions par le déséquilibre entre ressources naturelles, capacité de production et besoins accrus d'une population en croissance rapide, ce qui « perpétue » la situation de pauvreté des populations concernées. La crise climatique des années 1970 y a exacerbé cette situation de fragilité environnementale et d'insécurité alimentaire à travers la baisse récurrente des productions agricoles. Assurer une certaine « sécurité alimentaire » dans un tel contexte est donc une question de survie pour les populations locales. Les pratiques agricoles, encore traditionnelles et rudimentaires, ne permettent une augmentation des rendements que par le biais d'un accroissement des superficies cultivées. Les paysans défrichent alors des parcelles dans les forêts pluviales, labourent des pentes trop raides, colonisent les terres marginales et fragiles à l'érosion, raccourcissent, sinon suppriment, les périodes de jachère... Cette surexploitation des ressources naturelles dans le contexte de baisse globale de la pluviosité a entraîné une dégradation du milieu, à un point tel que les écosystèmes sahéliens sont de moins en moins capables de se régénérer et de fournir aux populations des rendements suffisants pour vivre et faire face à la crise climatique et économique.

V.2.2.3 Les pratiques agropastorales « positives »

On assiste en région sahélienne, et cela depuis plus d'une décennie, à l'apparition de nouvelles pratiques agropastorales tendant à favoriser une certaine régénérescence du milieu à travers ce qu'on appelle communément les techniques de Conservation des Eaux et des Sols (CES). En effet, les terres, qui, jadis, étaient considérées comme marginales, sont dorénavant colonisées en faisant appel à de nouvelles pratiques de conservation et de restauration des sols telles que le zaï et les demi-lunes qui sont les plus répandues et les plus citées dans la littérature ces dernières années.

Le Zaï consiste à creuser des trous (poquets) afin de recueillir les eaux de ruissellement. Un apport de fumure organique permet d'enrichir localement le sol et favorise une meilleure croissance des semis. L'activité perforatrice des termites améliore également l'infiltration des eaux. La technique est reprise la saison suivante avec des poquets creusés en des emplacements différents dans le champ et ainsi de suite. Le sol s'enrichit donc progressivement en matière organique jusqu'à sa restauration complète (Figure V-1).

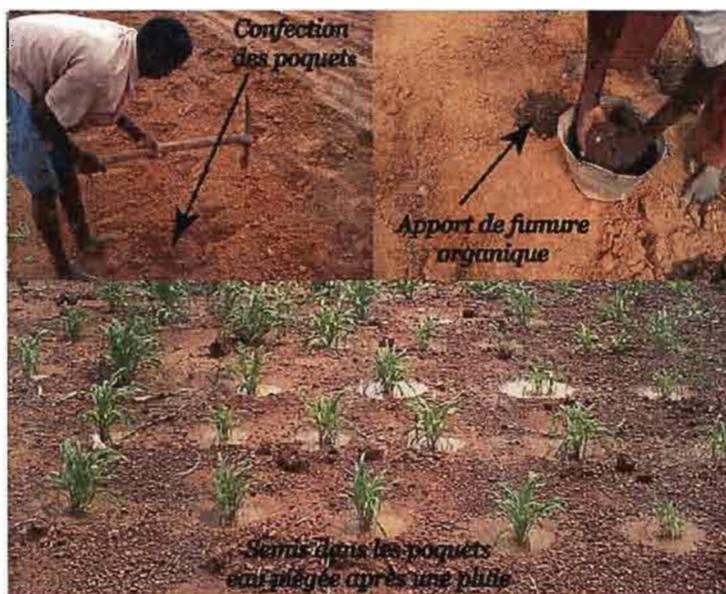


Figure V-1 : Technique du Zaï au Nord du Burkina Faso (Bassin de Tougou)

Les demi-lunes ressemblent fort à la technique du Zaï, sauf que les « trous » ont un diamètre plus grand (1 m à 2.5 m) avec une profondeur de 0.20 m. La terre excavée est mise en dépôt du côté aval comme une banquette (diguette en terre) revêtue parfois de blocs de pierre. L'application de matière organique n'est pas primordiale comme pour le Zaï car la capacité de stockage de l'eau est plus importante (Figure V-2).

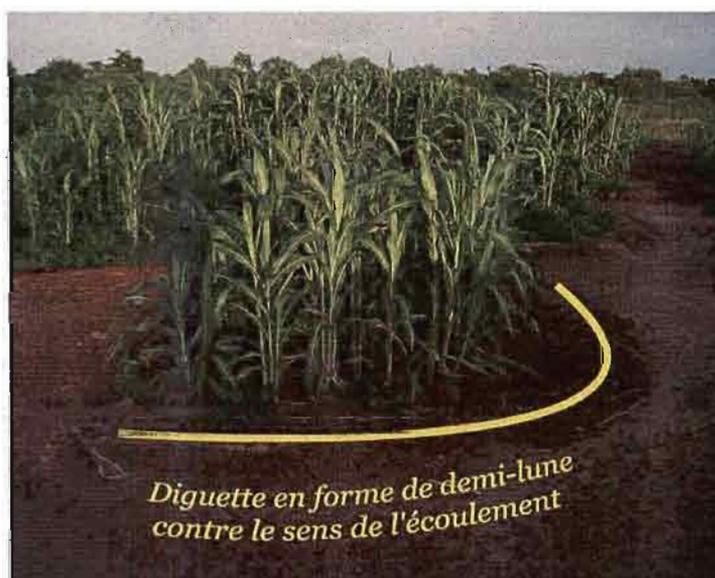


Figure V-2 : Technique de demi-lune au Nord du Burkina Faso (bassin versant de Tougou)

Des études récentes ont mis en évidence une nette amélioration des rendements et une certaine reprise de la végétation dans les parcelles où sont pratiquées ces techniques de conservation des eaux et des sols. D'après Kaboré et Reij (2003) en année moyenne un champ en Zaï produit environ 300 à 400 kg de sorgho par hectare, ces chiffres pouvant atteindre 1500 kg/ha en année humide. La technique du Zaï, par exemple, est en pleine expansion au Burkina Faso et dans la sous région, même s'il est aujourd'hui difficile d'estimer l'ensemble des superficies régénérées à l'aide de ces techniques. La Figure V-3 montre pour le cas du Burkina Faso, la distribution des zones où est pratiqué le Zaï.

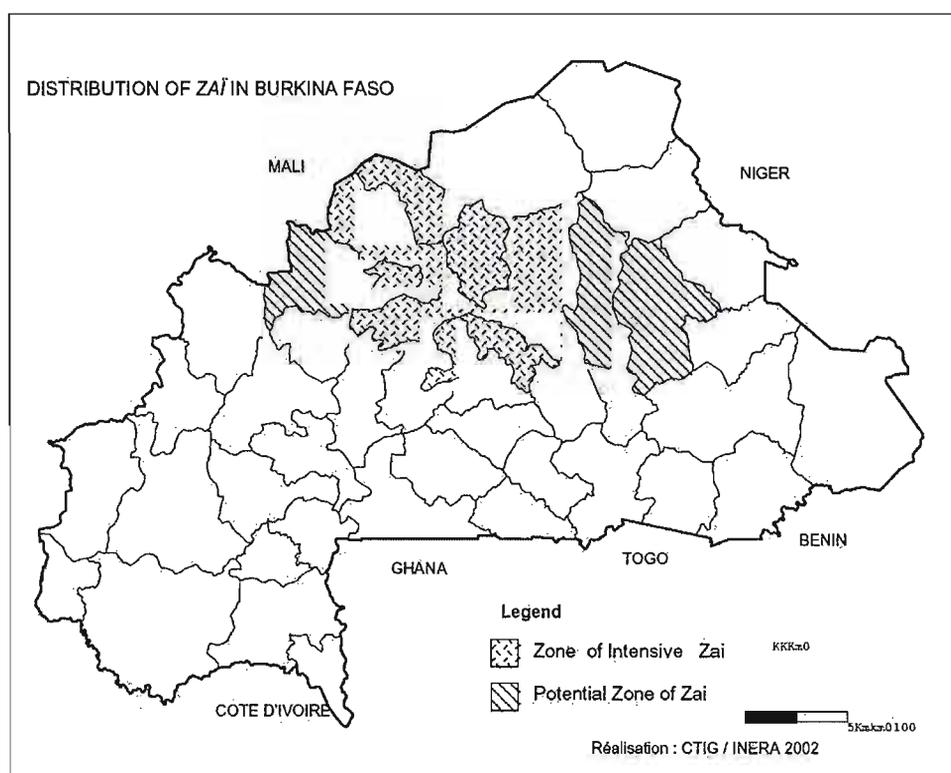


Figure V-3 : Expansion de la technique du Zaï au Burkina Faso (d'après Kaboré et Reij, 2003)

Plusieurs autres types de techniques de conservation des eaux et des sols existent et sont plus ou moins efficaces. Sans entrer dans les détails, nous proposons trois illustrations respectivement pour les techniques des haies d'andropogons, des cordons pierreux et du paillage. Le lecteur pourra se reporter à des ouvrages spécialisés tels que celui de Vlaar (1992) pour plus d'informations.

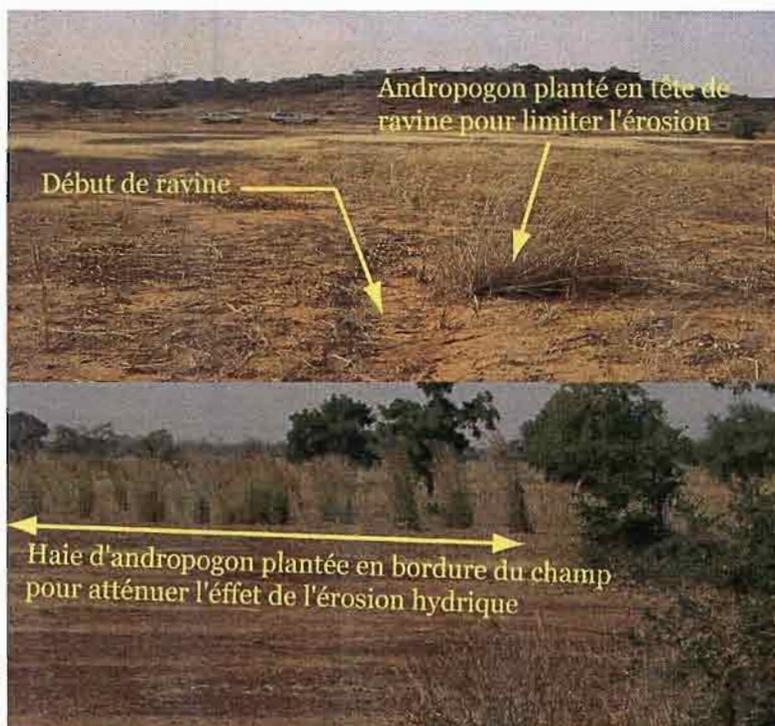


Figure V-4 : Barrière d'andropogons dans l'Est du Burkina Faso (Bassin de la Sirba un affluent de rive droite du fleuve Niger)

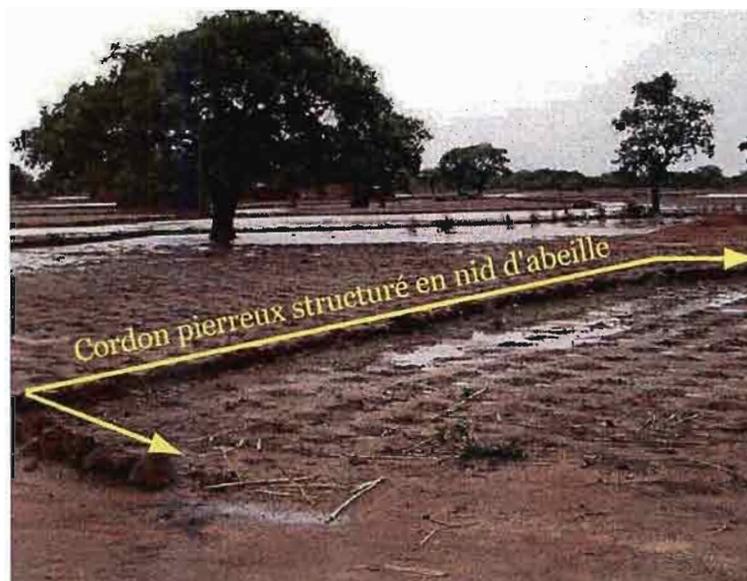


Figure V-5 : Cordons pierreux associé au Zaï (in Kabore et Reij, 2003).

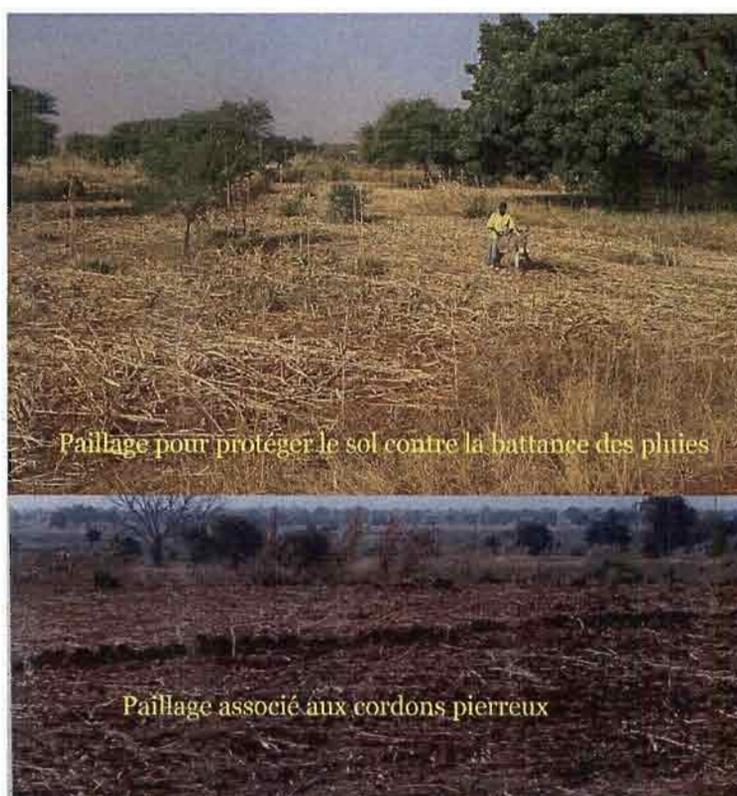


Figure V-6 : Technique du paillage à l'Est du Burkina Faso sur le bassin de la Sirba (affluent de rive droite du fleuve Niger)

V.2.3 La question démographique

V.2.3.1 Relations population-ressource

Au cours des trente dernières années, la problématique du rôle de la démographie dans l'évolution du milieu a été marqué par deux courants de pensées opposés : les malthusiens, (Malthus, 1803), et les néo-malthusiens (Midows *et al.*, 1972), pour qui toute croissance démographique s'accompagne d'une dégradation de l'environnement, et, les Boserupiens (Boserup, 1965, 1981) qui pensent qu'un accroissement de la pression démographique est nécessaire à tout progrès technique et donc ne constitue pas en soi une menace pour l'environnement. Ces derniers estiment que la croissance démographique conduit à une plus grande intensification des pratiques agricoles et à l'adoption de techniques de conservation des sols qui, *in fine*, augmentent la production de manière durable (Tiffen *et al.*, 1994). Certains scientifiques affirment même qu'il y a, en fait peu, de preuves des dégradations des terres et mêmes que les rendements n'auraient pratiquement jamais baissé à cause d'une éventuelle dégradation des terres.

Il existe, cependant, un accord général sur l'importance des liens entre population, environnement et développement (Arizpe *et al.*, 1994), même si ces liens sont l'un des aspects les plus controversés des recherches sur les ressources naturelles (Mathieu, 1998).

Une vision conciliante des conceptions Malthusienne et Boserupienne des relations population-environnement est l'hypothèse d'une évolution selon une courbe en U entre la croissance de la population et les ressources naturelles (Bilsborrow, 1987; Boisseau *et al.*, 1999). Selon cette hypothèse, l'augmentation de la population entraîne dans un premier temps une dégradation du milieu (théorie Malthusienne), mais, par la suite, cette croissance démographique peut entraîner une meilleure protection de l'environnement (conception Boserupienne).

V.2.3.2 L'exemple du plateau central au Burkina Faso

L'exemple du plateau central du Burkina Faso est très révélateur de ce cercle vicieux entre population, pauvreté et dégradation du milieu. La population de cette région est passée de 250 000 habitants en 1930 à 530 000 habitants en 1975. Depuis les années 1980, cette partie du pays est considérée comme la plus densément peuplée.

Pendant la période 1975-1980, on a observé une forte réduction des jachères, une augmentation de l'érosion, une perte de la productivité des terres et une forte croissance des superficies cultivées (Marchal, 1977, 1984, 1984). D'après Marchal (1977), déjà en 1970, 80% des terres fertiles étaient cultivées en permanence et 40% de l'ensemble des terres cultivées l'étaient sur des terres marginales et dégradées.

L'exemple du plateau central Burkinabé semble confirmer la vision conciliante des conceptions Malthusienne et Boserupienne. En effet, l'intensification des techniques de conservation des sols dans la région amène à penser qu'une certaine prise de conscience des problèmes de dégradation est à l'origine de ces réactions d'adaptation. Cela reste encore à vérifier et à démontrer car de nombreuses questions se posent et méritent d'être élucidées. Serait-on véritablement rentré dans une phase « Boserupienne » après une longue phase « Malthusienne » ? Les densités de populations seraient-elles, aujourd'hui, telles que les producteurs effectuent les investissements nécessaires dans la conservation des ressources naturelles ? Est-il envisageable que les barrières antiérosives, les terrasses, le zaï, l'agroforesterie, etc. permettent de réduire les coefficients d'écoulement et d'augmenter à nouveau l'infiltration ? Une meilleure gestion de l'élevage peut-elle permettre de reconstituer le couvert végétal ? Est-ce que le reboisement permettra de restaurer le couvert végétal ? Ce sont autant de questions qui se posent et qui traduisent la singularité du contexte sahélien et plus généralement africain. Certains auteurs (Quesnel, 1994) ont montré sur des exemples particuliers tirés du contexte africain que ni la réponse Malthusienne ni la réponse

Boseupienne ne s'observe. D'autres comme Kaboré et Reij (2003) pensent que le plateau central Burkinabé est une exception à la théorie de Boserup (1970) puisque la croissance de la population et l'augmentation de la pression sur les ressources disponibles ne s'est pas accompagnée d'une intensification mais plutôt d'une extensification de l'agriculture.

V.3 Modes de transformation du milieu

L'analyse des facteurs conditionnels de transformation du milieu et des pratiques agropastorales permet, globalement, de dégager cinq modes de transformation possibles pouvant avoir un impact sur les états de surface et au final sur les écoulements et l'infiltration :

1. *La dégradation climatique et anthropique des sols* : due au dessèchement du couvert végétal avec encroûtement et dénudation des sols sous l'effet conjugué des actions de l'homme et du climat,
2. *La mise en culture* : due au défrichage de la végétation pour la création de nouvelles parcelles de culture,
3. *La mise en jachère* : ne pas ensemer un champ au cours d'une ou de plusieurs saisons successives afin de permettre au sol de se régénérer,
4. *La restauration des sols* : toutes les techniques de récupération des terres dégradées à l'aide de pratiques telles que le zaï, les demi-lunes ou le reboisement,
5. *Les aménagements hydro agricoles et l'urbanisation.*

Pour plus de clarté et de lisibilité, les quatre premiers modes de transformation du milieu au Sahel sont illustrés à la Figure V-7. Le schéma de transformation du milieu par urbanisation et aménagements hydro-agricoles est présenté à la Figure V-8.

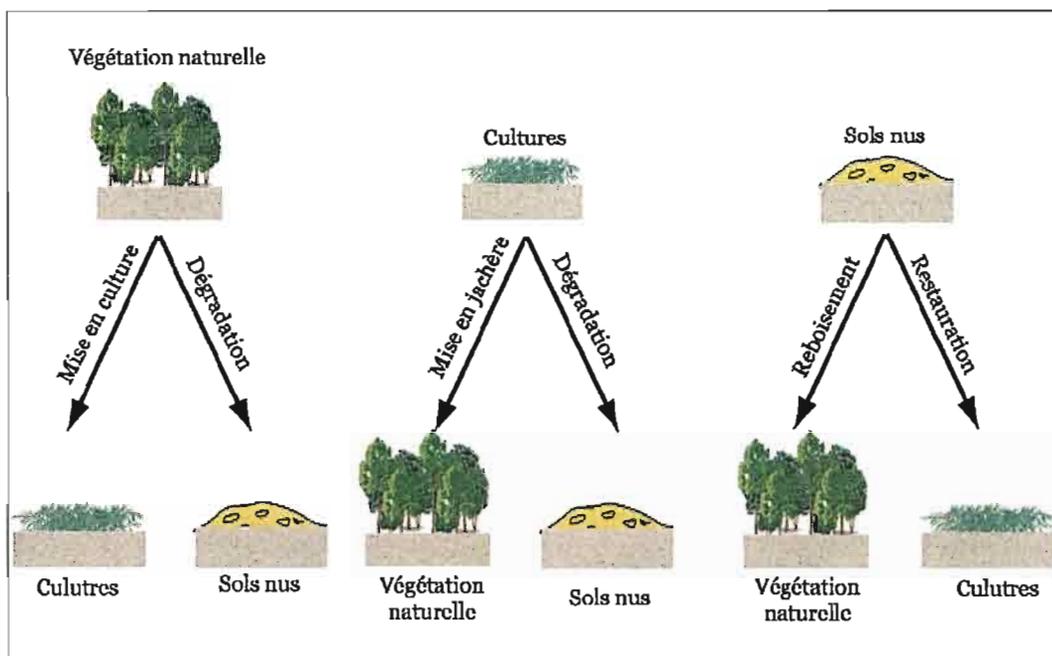


Figure V-7 : Modes de transformation du milieu au Sahel d'après l'analyse des pratiques agropastorales

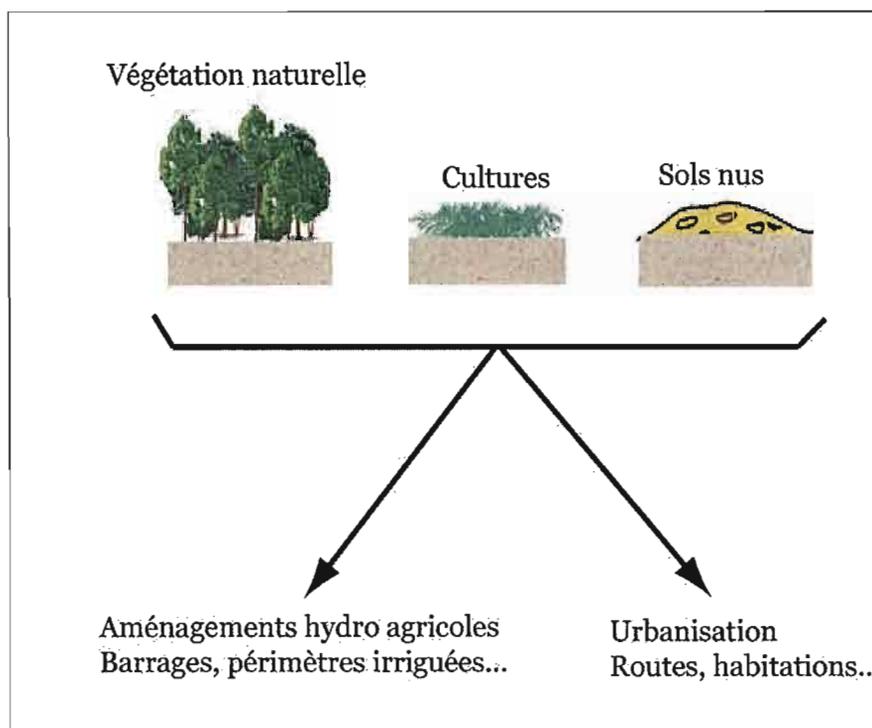


Figure V-8 : Transformation du milieu par urbanisation et aménagements hydro agricoles

V.4 Indicateurs d'évolution des états de surface

De nombreuses définitions de la notion d'indicateur existent dans la littérature. Nous retenons qu'un indicateur est une variable simple ou complexe, quantitative ou qualitative dont le suivi et/ou la comparaison dans le temps (ou dans l'espace) permet d'apprécier ou de mesurer des changements intervenus dans un système donné. Ils servent souvent de variables lorsqu'on étudie par modélisation les changements survenant dans les systèmes environnementaux complexes.

De façon générale, il n'existe pas de bon indicateur en soi, mais des indicateurs appropriés à un contexte particulier et pour des objectifs bien définis. Dans notre cas, nous cherchons à définir des indicateurs environnementaux qui pourraient nous renseigner sur les capacités d'infiltration et de ruissellement des sols pour une meilleure prise en compte de la variabilité du milieu dans les modèles hydrologiques au Sahel. Cet objectif fixe donc un certain nombre de critères que les indicateurs que nous recherchons doivent satisfaire. Ils doivent en effet :

- être facile à utiliser,
- être disponibles et mesurable à grande échelle ;
- pouvant être évalué sur des valeurs passées et présentes sur des chroniques relativement longues ;
- être intégrable dans le modèle hydrologique que nous envisageons d'utiliser.

L'analyse des pratiques agropastorales et des modes de transformation du milieu au Sahel nous permet de retenir 4 types d'états de surface :

- les surfaces en végétation naturelle (jachères y compris),
- les surfaces cultivées,
- les sols nus (sols complètement dégradés et dénudés),
- les plans d'eau (barrages et autres retenues d'eau).

Ces clés de caractérisation de la dynamique du milieu seront prises comme indicateurs de la dynamique des états de surface et nous renseigneront sur l'importance de la pression anthropique et/ou climatique sur le milieu d'étude. Ces indicateurs conviennent parfaitement à nos besoins hydrologiques et satisfont également aux exigences énoncées plus haut.

En effet, les images de télédétection que nous avons utilisés lors de ce travail (images LANDSAT) nous permettent d'extraire des cartes thématiques de la distribution géographique de ces indicateurs pour les années passées et présentes et cela sur l'ensemble de notre zone d'étude. Ces cartes thématiques établies, il devient aisé d'extraire les informations recherchées pour chaque indicateur.

Par ailleurs, le rôle hydrologique de ces paramètres de surface a été présenté au début du présent chapitre. Plusieurs études (Biro et Galabert, 1967; Roose, 1989; Fournier *et al.*, 2000) se sont intéressées à la caractérisation de l'aptitude au ruissellement des sols de ces différents types d'états de surface. Ces études permettent de transformer ces indicateurs environnementaux en indices hydrologiques (coefficients de ruissellement) intégrables dans les modèles hydrologiques.

Des valeurs expérimentales ont été proposées pour chacun des indicateurs que nous avons retenus. Au Tableau V-1 sont présentés les coefficients de ruissellement obtenus par Fournier *et al.*, (2000) dans la région de Bondoukuy (dans la province du Mouhoun au sud-Ouest du Burkina Faso) et au Tableau V-2 ceux de Yacouba *et al.*, (2002) dans le bassin supérieur du Nakambé. La localisation géographique de ces deux sites est présentée à la Figure V-9.

Tableau V-1 : Coefficients d'écoulement pour chaque type d'état de surface dans la région de Bondoukuy (Fournier *et al.*, 2000)

| | Végétation naturelle | Cultures | Sols nus |
|--|----------------------|----------|----------|
| Coefficients de ruissellement (%) | 13 | 20 | 50 |

Tableau V-2 : Coefficients d'écoulement pour chaque type d'état de surface dans le bassin supérieur du Nakambé au Nord du Burkina (Yacouba *et al.*, 2002)

| | Végétation naturelle | Cultures | Sols nus |
|--|----------------------|----------|----------|
| Coefficients de ruissellement (%) | 17 | 24 | 54 |

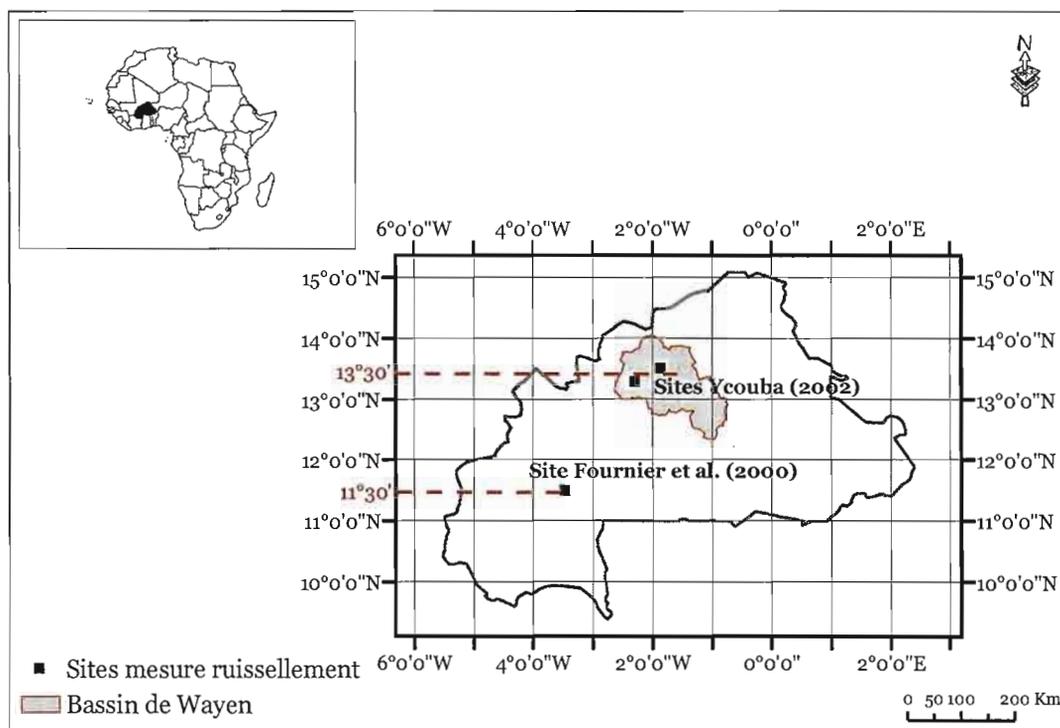


Figure V-9 : Localisation des sites de mesure du ruissellement de Fournier et al., (2000) et de Yacouba et al., (2002)

On peut noter un léger écart entre les différents coefficients de ruissellement entre le Nord et le Sud (4%) ce qui fait penser au gradient Nord-Sud des conditions pédoclimatiques que l'on rencontre à l'échelle du Burkina. Les deux sites de mesure sont globalement distants de 2 degrés de latitude, et on peut considérer qu'on perd 2% de coefficient de ruissellement par latitude du Nord au Sud et pour chaque indicateur d'état de surface.

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le concept d'état de surface a été défini et ses implications en hydrologie sahélienne précisés.

Une analyse des facteurs conditionnels de la dynamique du milieu au Sahel et des pratiques agropastorales a permis de dresser un schéma d'évolution à travers 5 modes de transformation possibles. Nous en avons déduit 4 types d'états de surface qui nous serviront d'indicateurs de la pression anthropique et/ou climatique dans notre zone d'étude. Sur la base d'études récentes, des indices de production de ruissellement ont été associés à chacun des quatre indicateurs retenus. Ces indices sont d'une importance capitale dans le type de modélisation que nous envisageons de faire puisqu'ils nous permettront ultérieurement de transcrire l'évolution du milieu dans une variable d'entrée du modèle.

CHAPITRE VI

CARACTERISATION DES INDICATEURS D'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE DANS LE SAHEL BURKINABE : APPORT DE LA TELEDECTION

L'analyse menée au chapitre 5 sur les facteurs conditionnels de la dynamique du milieu au Sahel et sur les pratiques agropastorales a permis de mettre en évidence 5 modes possibles de transformation du milieu. Quatre types d'états de surface ont été déduits de ces modes de transformation et ont été pris comme indicateurs de la pression anthropique et/ou climatique au Sahel. A partir d'images de satellites LANDSAT, et sur l'exemple du bassin du Nakambé à Wayen, nous dressons dans ce chapitre, un état des lieux des quatre indicateurs aux dates précises des images disponibles pour notre étude : 1972, 1986, 1992 et 2002.

VI.1 Difficultés d'une bonne discrimination des sols nus et cultivés en milieu sahélien à l'aide d'images Landsat

L'image Landsat ETM+ du 09/01/2003 nous a servi de base de travail pour la mise en évidence de la difficulté de discriminer les sols nus et les sols cultivés au sol au moyen de l'imagerie LANDSAT. Deux principales raisons ont guidé notre choix pour cette image. La première est que c'est une image récente et de très bonne qualité. D'autre part, les visites de terrain que nous avons effectuées pour la sélection des parcelles d'entraînement datent quasiment de la même époque (2003-2004). Cela maximise nos chances pour qu'il y ait une bonne concordance entre les données de terrain et celles de l'image. L'image ne couvre pas l'ensemble du bassin versant mais cela n'est pas gênant pour ce que nous entreprenons de faire.

Une méthodologie en 4 étapes a été mise en œuvre à cet effet. Elles sont listées ci-dessous.

1. classification non supervisée de l'image en 15 classes ;
2. identification et description de chacune des 15 classes par visite de terrain ;
3. agrégation des 15 classes en 4 classes d'états de surface ;
4. validation par construction d'une matrice de confusion ;

La description et les résultats intermédiaires de chaque étape sont présentés dans les sections qui suivent.

VI.1.1 Classification non supervisée de l'image

L'image a été classée à l'aide du logiciel ENVI. La méthode de classification utilisée est celle du maximum de vraisemblance. Nous avons choisi arbitrairement 15 classes. Ce nombre relativement élevé de classes permet d'avoir un premier résultat de classification avec une grande diversité de classes. Ces unités seront agrégées par la suite pour former les classes thématiques d'état de surface qui nous intéressent. Nous présentons à la Figure VI-1 une composition colorée de l'image et le résultat de cette première classification.

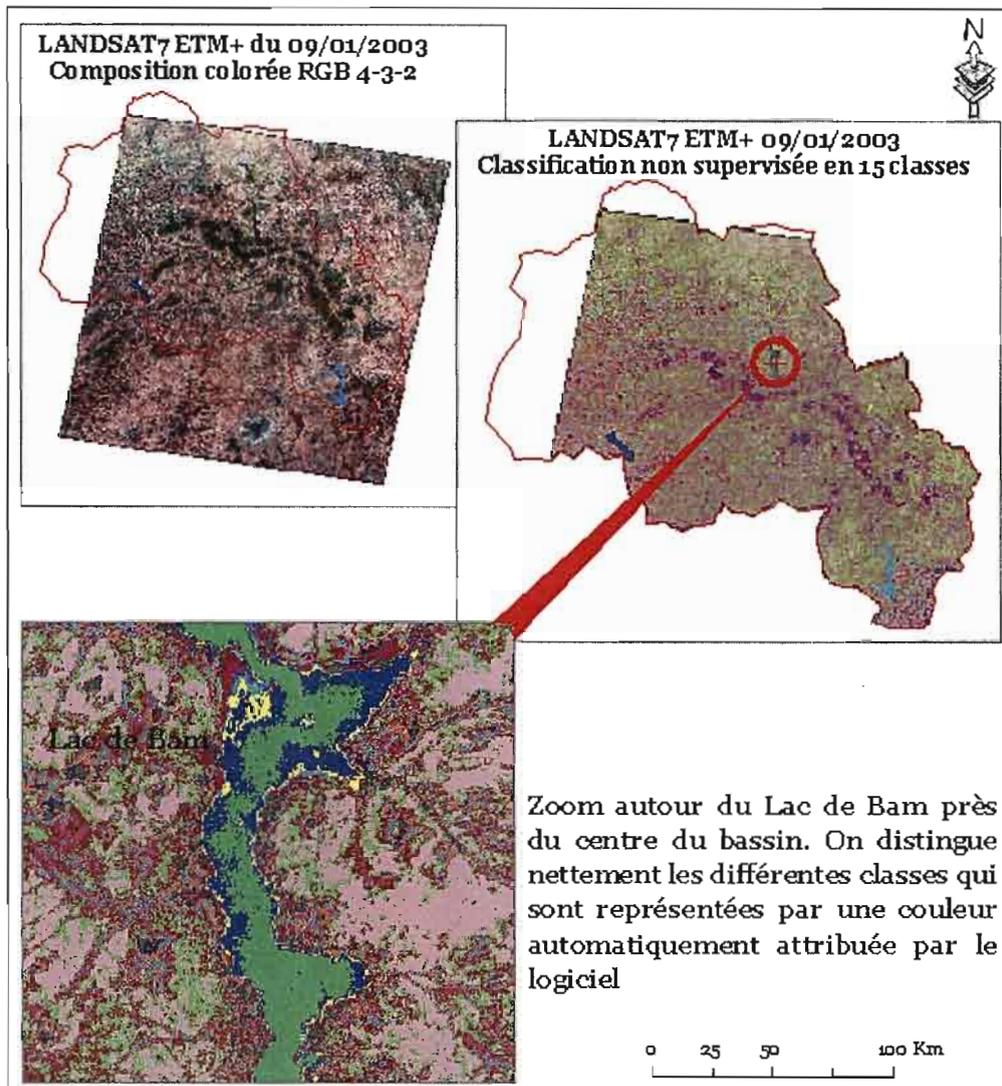


Figure VI-1 : Composition colorée de l'image LandSat-ETM+ du 09/01/2003 (image en haut à gauche) et classification non supervisée par maximum de vraisemblance à l'intérieur du bassin (image en haut à droite) et zoom sur le lac de Bam (image du bas)

VI.1.2 Identification des classes sur le terrain

A l'issue de cette première étape, il fallait affecter à chacune des 15 classes un état de surface sur le terrain. Nous nous sommes limités à 4 types d'état de surface :

- la végétation naturelle (anciennes jachères y compris),
- les sols nus,
- les cultures,
- les plans d'eau.

Nous nous sommes efforcés de faire en sorte qu'à chacune des 15 classes il soit affecté un des 6 types d'états de surface retenus. Cela n'a pas toujours été évident car le milieu naturel n'est pas toujours aussi bien différencié.

Des sites d'échantillonnage ont donc été sélectionnés directement à l'image et au sein de chacune des 15 classes. Un soin particulier a été accordé à cette opération car les sites sélectionnés devaient être très homogènes (une seule couleur : celle de la classe considérée), de forme simple (carré ou rectangulaire) et suffisamment étendus en surface. La taille minimale retenue pour chaque échantillon est de 60 m x 60 m soit une surface minimale de 4 pixels d'image par échantillon. Ces coordonnées ont ensuite été chargées sur un GPS pour nous permettre de les retrouver sur le terrain. Le GPS a été programmé de manière à prendre notre position toutes les 30 secondes durant les missions de reconnaissance et d'échantillonnage sur le terrain.

Parallèlement à la reconnaissance des sites préalablement choisis à l'image, nous avons également délimité au GPS des sites d'états de surface lorsque ces derniers étaient bien nets sur le terrain. Ces sites nous serviront plus tard dans la validation des résultats. La Figure VI-2 présente les trajets parcourus lors des visites de terrain ainsi que les points d'échantillonnage.

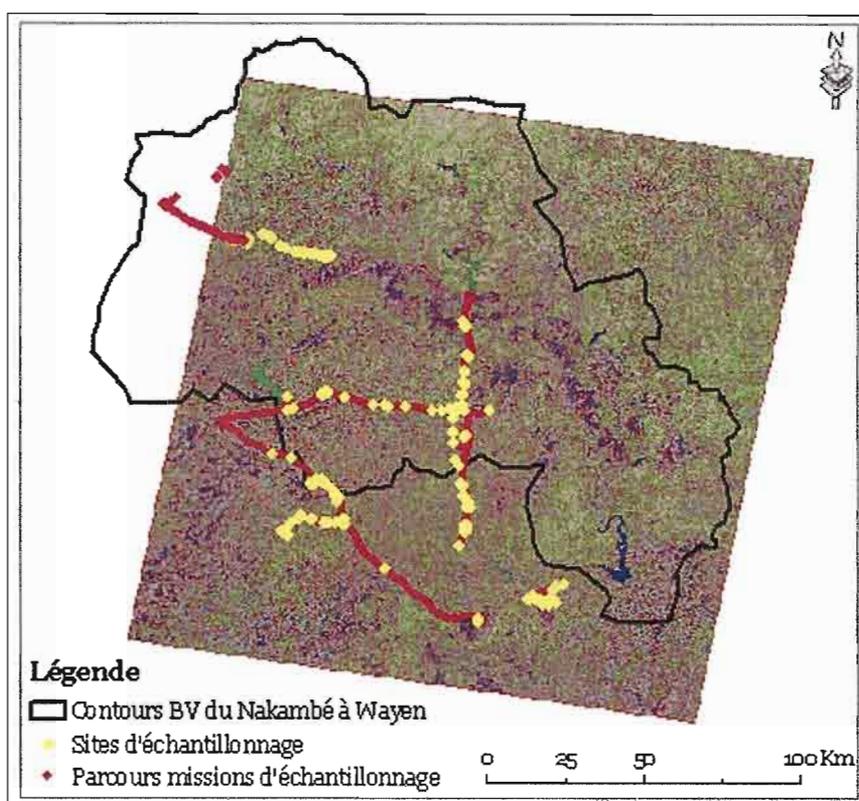


Figure VI-2 : Missions d'échantillonnage d'états de surface et de reconnaissance des classes issues de la classification non supervisée

VI.1.3 Agrégation des classes

La Figure VI-3 présente des exemples de classes image identifiés sur le terrain. Les missions de reconnaissance sur le terrain ont permis d'associer un des 4 types d'état de surface à chacune des 15 classes de l'image (Tableau VI-1). Les classes image ont par la suite été agrégées pour produire une première carte thématique d'occupation du sol de l'image.

Tableau VI-1 : Correspondance entre les 15 classes de l'image et les 4 types d'état de surface

| Numéro Classe image | État de surface Terrain | Numéro Classe image | État de surface Terrain |
|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| 1 | eau | 9 | Végétation naturelle |
| 2 | eau | 10 | Végétation naturelle |
| 3 | eau | 11 | Cultures |
| 4 | eau | 12 | Cultures |
| 5 | eau | 13 | Sols nus |
| 6 | Végétation naturelle | 14 | Cultures |
| 7 | Végétation naturelle | 15 | Sols nus |
| 8 | Végétation naturelle | | |

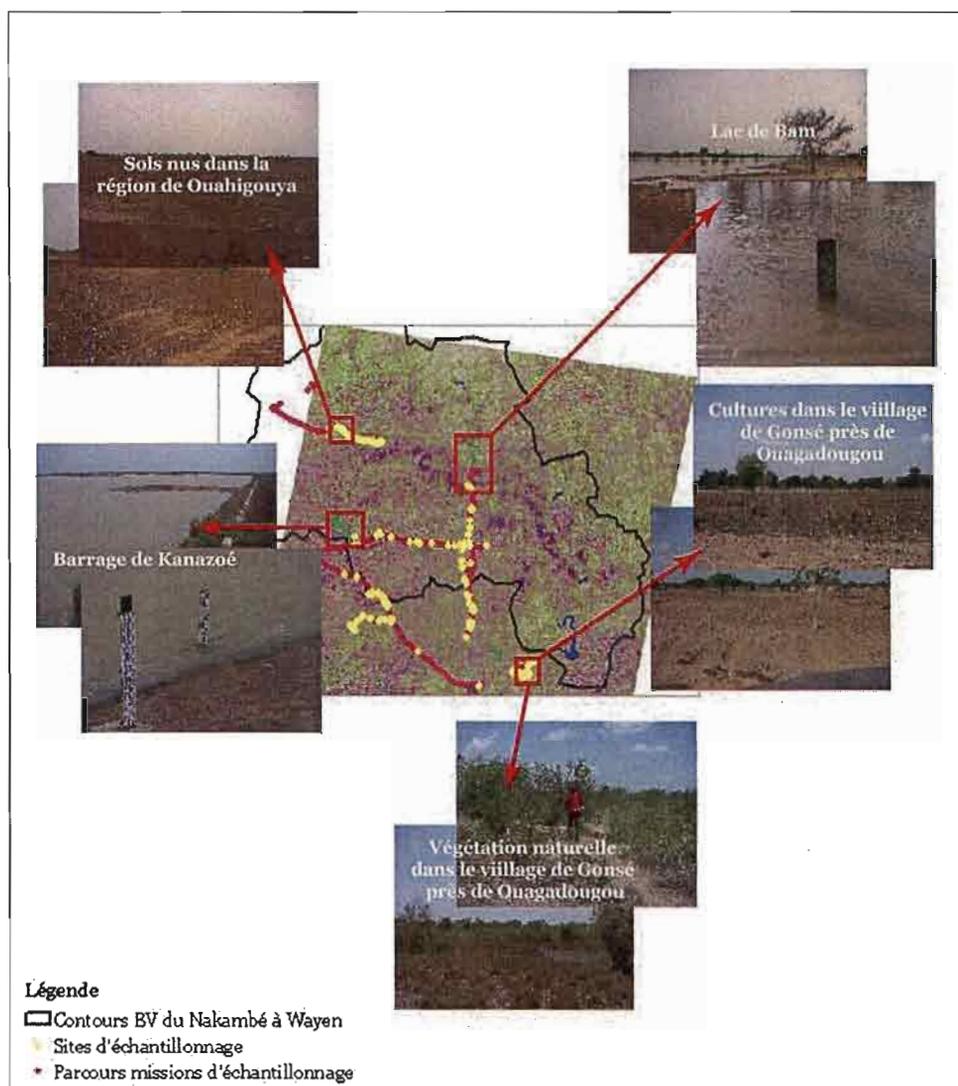


Figure VI-3 : Reconnaissance des classes image par visite de terrain. Exemples d'illustration

La Figure VI-4 donne la synthèse des trois premières étapes de la méthode de classification que nous avons adoptée.

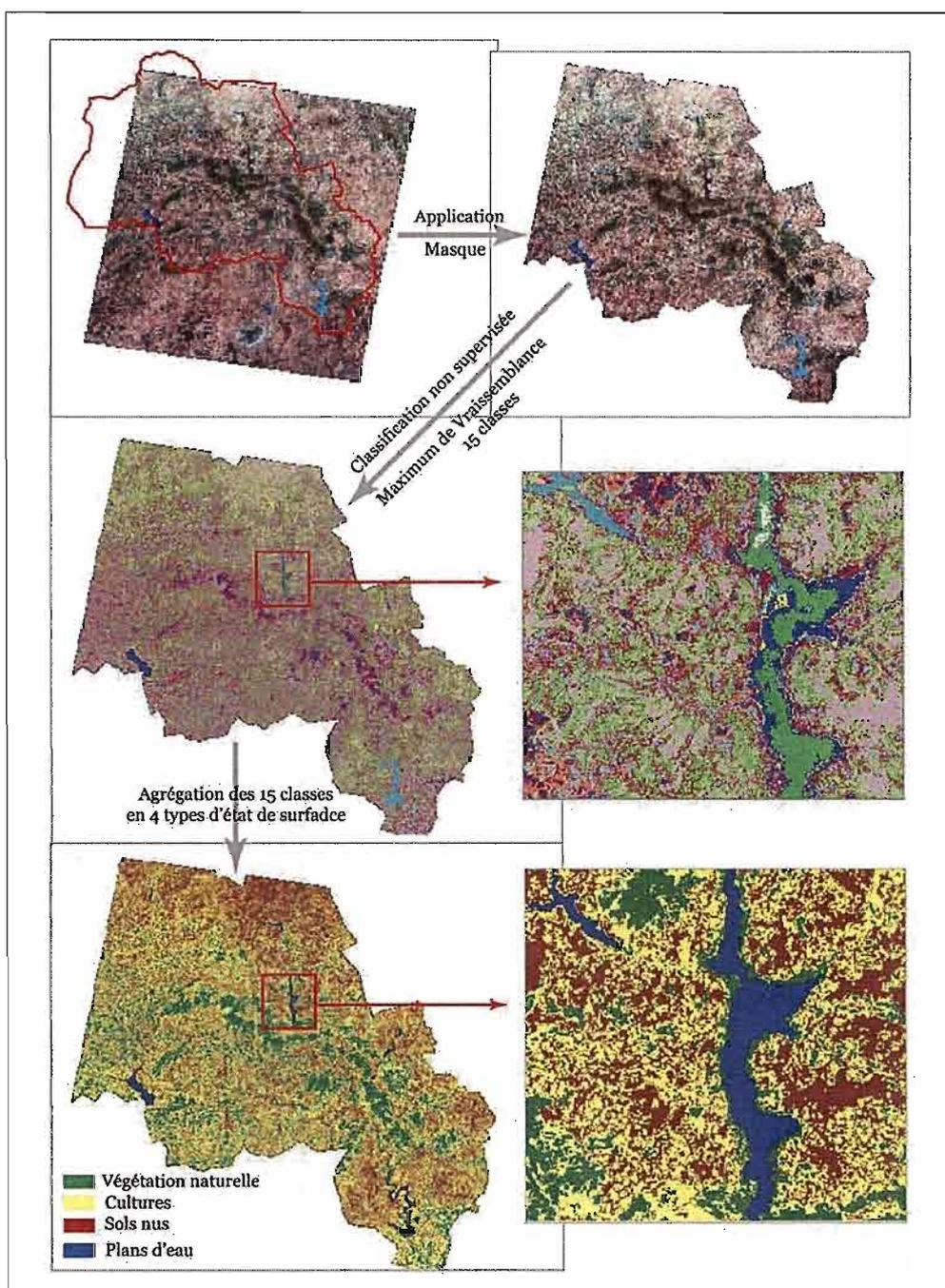


Figure VI-4 : Agrégation des classes : image classée en 4 classes

VI.1.4 Matrice de confusion

VI.1.4.1 Choix des échantillons

Elle a été construite à partir d'échantillons récoltés sur le terrain lors des missions de reconnaissance de terrain. Les échantillons ont été sélectionnés de manière à ce que leurs signatures spectrales diffèrent les unes des autres. Des tests de séparabilité ont permis d'éliminer les échantillons dont les signatures spectrales présentaient de fortes confusions avec celles des autres. La Figure VI-5 présente les échantillons retenus.

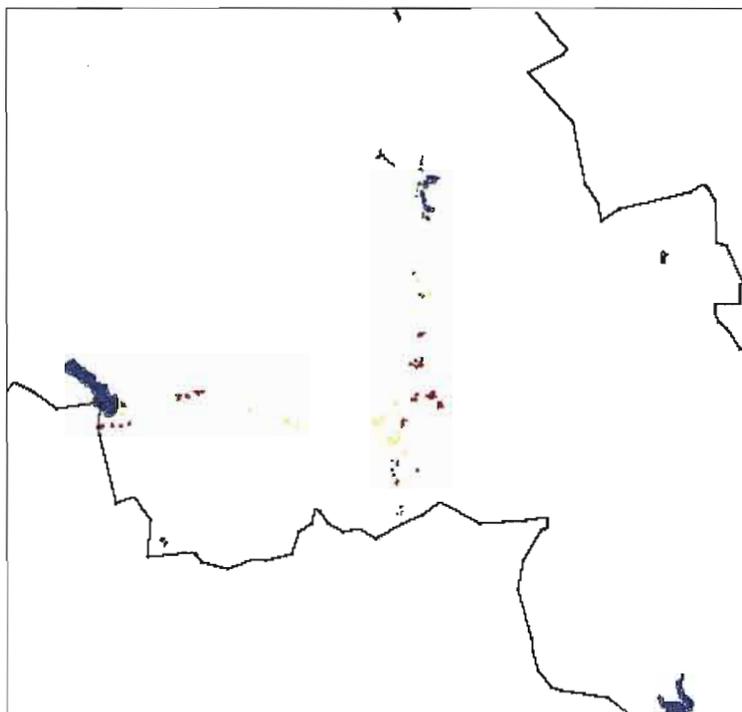


Figure VI-5 : Parcelles d'entraînement pour la construction de la matrice de confusion. Plan d'eau (bleu), végétation (vert), cultures (jaune) et sols nus (rouge)

VI.1.4.2 Tests de séparabilité des échantillons

Le Tableau VI-2 présente le résultat de la séparabilité des échantillons relevés sur le terrain. On remarque que les cultures et les sols nus se confondent (1.63 et 1.61). Une confusion existe également entre certaines zones cultivées et la végétation. Le test de séparabilité est en effet 1.81. Ce sont en général des zones cultivées avec une forte concentration de ligneux (culture sous bois). Ces zones sont parfois difficiles à différencier et le choix de l'affectation à l'une ou l'autre est subjectif (Figure VI-6).



Figure VI-6 : Culture sous bois dans la région de Kongoussi dans la partie Nord du bassin du Nakambé à Wayen

Tableau VI-2 : Tests de séparabilité des échantillons sélectionnée sr le terrain

| Échantillons état de surface | | Test de séparabilité (doit être supérieur à 1.9) |
|---------------------------------------|----|---|
| Cultures – Terrain [4281 points] | Vs | Végétation – Terrain [2558 points] 1.61 |
| Cultures- Terrain [4281 points] | Vs | Sols nus – Terrain [6673 point] 1.63 |
| Sols nus- Terrain [6673 points] | Vs | Végétation – Terrain [2558 points] 1.81 |
| Plan eau- Terrain [65558 points] | Vs | Sols nus – Terrain [6673 points] 2.00 |
| Plan d'eau- Terrain [65558 points] | Vs | Végétation – Terrain [2558 points] 2.00 |
| Cultures- Terrain [4281 points] | Vs | Plan d'eau – Terrain [65558 points] 2.00 |

VI.1.4.3 Matrice de confusion

La matrice de confusion est aussi connue sous les termes matrice d'erreur, tableau de contingence ou matrice d'erreur de classification. C'est un outil permettant de comparer deux cartes thématiques. Elle est présentée habituellement sous forme de tableau ou de matrice. La matrice de confusion permet de calculer une gamme de mesures décrivant la précision de la carte classifiée par rapport à des données de référence (cartes, échantillons de terrain). Les cellules de la matrice contiennent un nombre de pixels basé sur l'information dérivée de l'assignation des pixels sur la carte classifiée et la carte de référence. Les valeurs de la diagonale de la matrice représentent le nombre de pixels correctement classifiés.

- *Précision globale* : La proportion du nombre total de pixels correctement classifiés par rapport au nombre total de pixels de la matrice donne la « précision globale » de la classification. Ce nombre est généralement donné sous forme de pourcentage.
- *Précision de production* : pour chaque rangée de la matrice, la proportion de pixels correctement classifiés (nombre de pixels des cellules de la diagonale) par rapport au nombre total de pixels de la rangée donne une mesure de la précision de classification pour la classe représentée par la rangée. Cette proportion, exprimée en pourcentage, est aussi connue sous le terme « précision de production », car elle fournit une mesure de la qualité de l'analyse lors de la production de la carte classifiée.
- *Précision de l'utilisateur* : une mesure semblable de la précision peut être également effectuée pour chaque colonne en comparant la proportion de pixels correctement classifiés de cette colonne (nombre sur la diagonale) au nombre total de pixels de la colonne, ce résultat est exprimé en pourcentage. La précision de la colonne est également connue sous le terme de « précision de l'utilisateur » puisqu'elle fournit à l'utilisateur une mesure de la probabilité d'une classification adéquate des pixels durant le processus de classification de la carte. La précision de production de chacune des classes sera différente parce que certaines classes possèdent une réponse spectrale distincte donnant ainsi une meilleure classification.
- En additionnant la précision de production de chaque rangée de la matrice et en divisant le résultat par le nombre de classes (n), on peut déterminer la « précision moyenne » de la carte classifiée (différente de la « précision globale » définie précédemment).

- *Erreur d'omission* : le total des valeurs dans les cellules non diagonales de n'importe quelle rangée de la matrice de confusion représente le nombre de pixels incorrectement attribués à des classes autres que celle représentée par la rangée. Cette valeur s'appelle « erreur d'omission », elle peut être calculée pour chaque classe en divisant ce total par la somme des totaux des rangées.
- *Erreur de commission* : de façon similaire, le total des valeurs des cellules non diagonales de n'importe quelle colonne représente le nombre de pixels qui ont été incorrectement inclus dans la classe représentée par la colonne. Cette valeur s'appelle « erreur de commission ». Elle représente une mesure plus complète de la précision de la classification car elle compare le nombre de pixels de chaque cellule de la matrice avec une distribution aléatoire de pixels.

Les résultats de la classification de l'image de janvier 2003 a donné la matrice de confusion du Tableau VI-3. Les Tableau VI-4 et Tableau VI-5 donnent respectivement les différentes précisions de la classification réalisée et les erreurs de commission et d'omission. La, précision globale est de 88.7%.

Tableau VI-3 : Matrice de confusion de la classification non supervisée de l'image ETM+ de janvier 2003

| | | Pixels échantillon terrain | | | | Total |
|----------------------|------------|----------------------------|------------|----------|------------|-------|
| | | Cultures | Plan d'eau | Sols nus | Végétation | |
| Pixels image classée | Non classé | 0 | 1354 | 0 | 0 | 1354 |
| | Cultures | 2088 | 1 | 3433 | 362 | 5884 |
| | Plan d'eau | 0 | 63898 | 0 | 5 | 63903 |
| | Sols nus | 2189 | 0 | 2047 | 60 | 4296 |
| | Végétation | 4 | 305 | 1193 | 2131 | 3633 |
| | Total | 4281 | 65558 | 6673 | 2558 | 79070 |

Tableau VI-4 : Précision de la classification

| Class | Type de précision | | | |
|-------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Précision producteur (%) | Précision utilisateur (%) | Précision producteur (pixels) | Précision utilisateur (pixels) |
| Cultures | 48.77 | 35.49 | 2088/4281 | 2088/5884 |
| Plan d'eau | 97.47 | 99.99 | 63898/65558 | 63898/63903 |
| Sols nus | 30.68 | 47.65 | 2047/6673 | 2047/4296 |
| Végétation | 83.31 | 58.66 | 2131/2558 | 2131/3633 |

Tableau VI-5 : Erreurs de commission et d'omission de la classification

| Class | Types d'erreurs | | | |
|-------------------|-----------------|--------------|---------------------|------------------|
| | Commission (%) | Omission (%) | Commission (pixels) | Omission (pixel) |
| Cultures | 64.51 | 51.23 | 3796/5884 | 2193/4281 |
| Plan d'eau | 0.01 | 2.53 | 5/63903 | 1660/65558 |
| Sols nus | 52.35 | 69.32 | 2249/4296 | 4626/6673 |
| Végétation | 41.34 | 16.69 | 1502/3633 | 427/2558 |

On constate que malgré une précision globale relativement correcte, les erreurs de commissions et d'omission sont très élevées.

VI.1.5 Nécessité d'une bonne connaissance du terrain

Le milieu sahélien est très peu couvrant et relativement homogène ce qui ne permet pas une bonne discrimination des indicateurs choisis. En effet, nous cherchons à discriminer les surfaces en végétation, les surfaces cultivées, les surfaces de sols nus et les plans d'eau. La plupart des images disponibles et de bonne qualité ont été acquises en saison sèche (meilleures conditions atmosphériques du fait du peu de voile nuageux à cette époque de l'année). A cette période, il ne reste plus rien sur les terres cultivées après les récoltes. Les paysans récupèrent jusqu'aux dernières tiges des semis pour divers usages (domestiques, foin pour le bétail,...). L'effet du sol devient donc dominant et la signature spectrale des sols ainsi mises à nus est identique à celles des sols dégradés. Il en résulte donc une forte confusion entre les classes.

Une très bonne connaissance du terrain est nécessaire pour une meilleure discrimination des pixels. Nous choisissons donc une démarche combinant une approche objet (segmentation

multispectrale) et une approche basée sur la Photo Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO). Cette façon de faire nous semble plus appropriée au regard du contexte environnemental de la zone étudiée et des données à notre disposition. Elle nous permet de tirer profit des avantages de chacune des méthodes prise individuellement.

VI.2 L'approche objet : la segmentation multi-résolution

La segmentation multi-résolution est une technique ascendante de croissance de région commençant par un objet constitué d'un seul pixel de l'image. Les plus petits objets de l'image sont ensuite fusionnés dans de plus grands. Durant tous ce processus de fusion par paires d'objets, le procédé fondamental d'optimisation réduit au minimum l'hétérogénéité pondérée. A chaque itération sont fusionnés les deux objets adjacents de l'image qui, une fois réunis ont la plus faible croissance d'hétérogénéité. Si la plus faible croissance d'hétérogénéité excède le seuil défini par le paramètre d'échelle, le processus s'arrête.

La segmentation n'est pas un but en soi. Dans la plupart des cas, un procédé de segmentation suivant un critère relativement général d'homogénéité, ne pourra pas extraire directement les zones ou les objets d'intérêt final. Dans l'approche orientée objet d'analyse d'image d'eCognition, les objets de l'image résultant d'un procédé de segmentation sont prévus pour être des primitives d'objets de l'image, servant de porteurs d'information et de brique de construction pour les classifications ou les segmentations suivantes. Dans ce sens, le meilleur résultat de segmentation est celui qui fournit les meilleures informations pour les traitements suivants.

VI.3 L'approche photo interprétation assistée par ordinateur : PIAO

C'est l'identification et la délimitation d'unités thématiques directement à l'image. Elle nécessite une très bonne connaissance du milieu étudié. Elle est considérée comme une des plus pertinentes pour la caractérisation de l'occupation du sol.

VI.3.1 La Base de Données sur l'Occupation des Terres au Burkina

Le projet BDOT (Base de Donnée d'Occupation des Terres) financé par le Royaume du Danemark, a été commandité par le Projet National de Gestion des Terroirs (PNGT), et réalisé par IGN-FI en partenariat avec l'Institut Géographique du Burkina (IGB). L'objectif de la BDOT est de fournir aux utilisateurs une information sur l'occupation du sol en 1992 et en 2002 qui soit :

- Homogène
- Comparable entre les régions
- Susceptible de suivre les changements de l'occupation des terres régulièrement

L'échelle du 1/200000 a été retenue pour la réalisation de la cartographie du projet BDOT. La saisie des éléments de l'occupation des terres a cependant été faite à des échelles de l'ordre du 1/50 000 rendant possible une utilisation du produit final à une échelle voisine du 1/100000. La surface de la plus petite unité cartographiée dans le cadre du projet est de 25 ha sauf pour les classes de l'urbain (classe 1) et les plans d'eau (Classe 5) pour lesquelles, l'unité minimum de cartographie est de 5 ha. Le linéaire minimum est de 100m.

VI.3.2 Adaptation de la nomenclature de la BDOT

La nomenclature BDOT a été entérinée après le second comité de pilotage qui a eu lieu le 04 mars 2004 dans les locaux du PNGT.

La nomenclature BDOT est une nomenclature hiérarchisée en 4 niveaux et est parfaitement conforme au second niveau à la classification standard CORINE LAND COVER.

Elle contient (Tableau VI-6) 47 types différents d'états de surface hiérarchisés comme suit :

- 5 postes au Niveau 1
- 15 postes au niveau 2
- 38 postes au niveau 3
- 9 postes au niveau 4

Tableau VI-6 : Niveau 1 de la nomenclature de la BDOT

| Code | Nomenclature Niveau 1 | Code | Nomenclature Niveau 1 |
|------|----------------------------------|------|----------------------------------|
| 111 | Territoires artificialisés | 314 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 112 | Territoires artificialisés | 321 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 113 | Territoires artificialisés | 322 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 121 | Territoires artificialisés | 331 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 122 | Territoires artificialisés | 332 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 123 | Territoires artificialisés | 333 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 124 | Territoires artificialisés | 334 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 131 | Territoires artificialisés | 335 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 132 | Territoires artificialisés | 411 | Zones humides |
| 133 | Territoires artificialisés | 412 | Zones humides |
| 141 | Territoires artificialisés | 413 | Zones humides |
| 142 | Territoires artificialisés | 511 | Surfaces en eau |
| 211 | Territoires agricoles | 512 | Surfaces en eau |
| 212 | Territoires agricoles | 513 | Surfaces en eau |
| 213 | Territoires agricoles | 3211 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 221 | Territoires agricoles | 3212 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 222 | Territoires agricoles | 3213 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 241 | Territoires agricoles | 3331 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 242 | Territoires agricoles | 3332 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 243 | Territoires agricoles | 3333 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 244 | Territoires agricoles | 3334 | Forêts et milieux semi- naturels |
| 311 | Forêts et milieux semi- naturels | 5121 | Surfaces en eau |
| 312 | Forêts et milieux semi- naturels | 5122 | Surfaces en eau |
| 313 | Forêts et milieux semi- naturels | | |

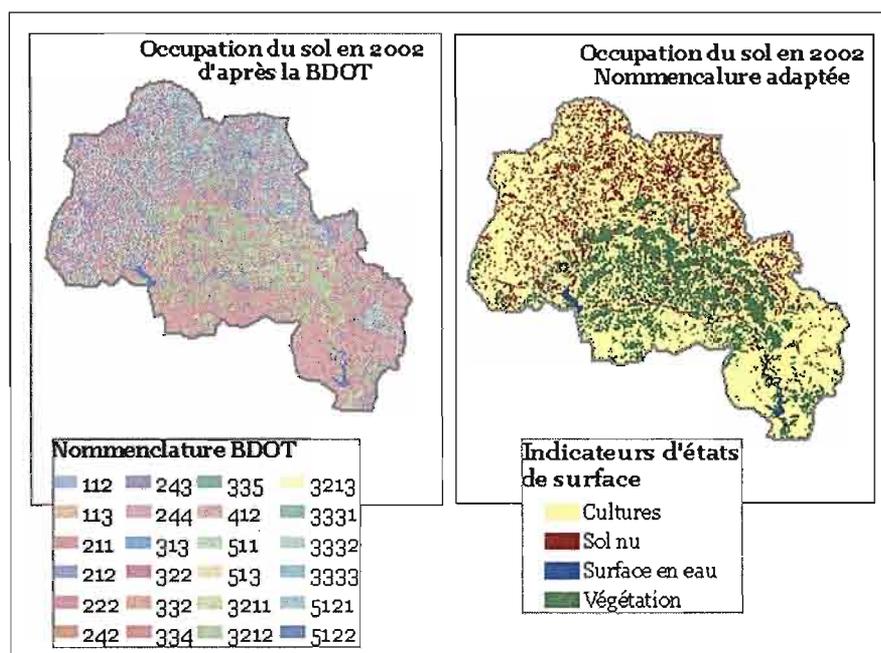


Figure VI-7 : Adaptation de la nomenclature de la BDOT pour l'occupation du sol de 2002

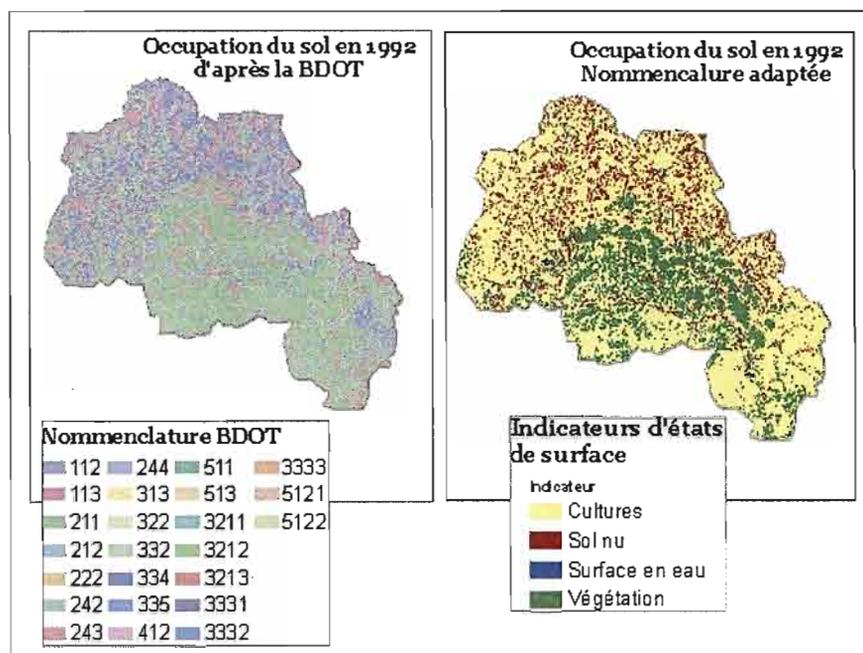


Figure VI-8 : Adaptation de la nomenclature de la BDOT pour l'occupation du sol en 1992

VI.4 Construction d'une base de connaissance par segmentation multispectrale et photo interprétation assistée par ordinateur (PIAO)

VI.5 Application de la démarche aux images LANDSAT de 1972, 1986

VI.5.1 Cas des images de 1972

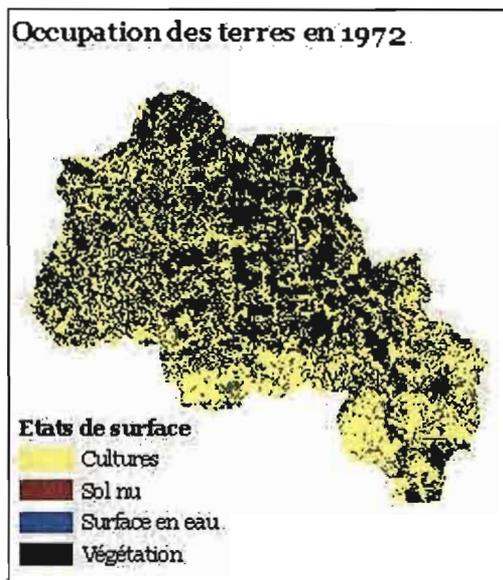


Figure VI-9 : Occupation du sol sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1972- Résultats de la classification des images de 1972

VI.5.2 Cas des images de 1986

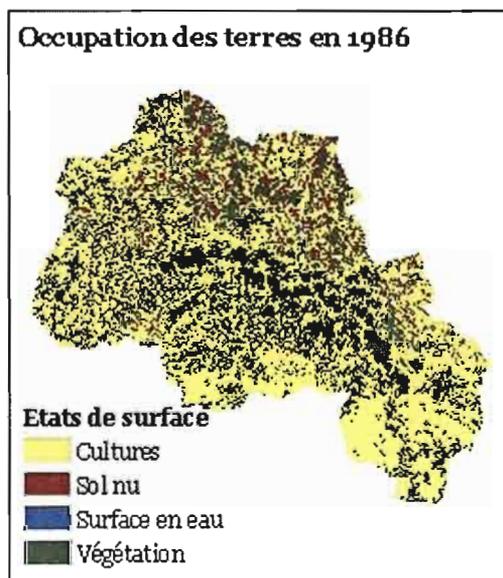


Figure VI-10 : Occupation du sol sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1986- Résultats de la classification des images de 1986

VI.5.3 Cas des images de 1992

VI.6 Synthèse des résultats

Ces résultats permettent d'extraire les superficies occupées par chaque indicateur sur le bassin à la date de prise de vue des images.

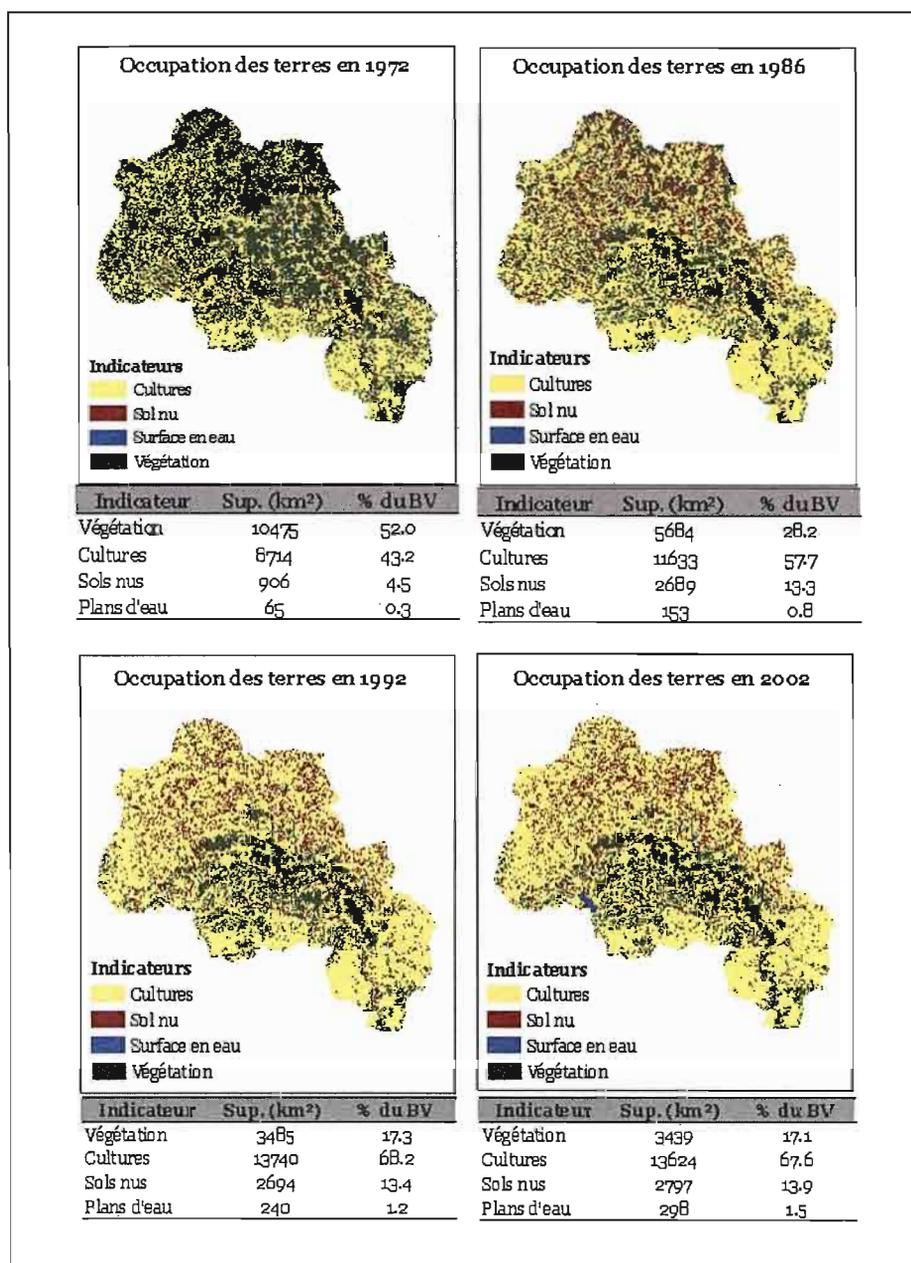


Figure VI-11 : Synthèse des résultats de la classification des images LANDSAT sur le bassin du Nakambé à Wayen

VI.7 Conclusion

Nous avons montré dans ce chapitre la difficulté qu'il y a à discriminer, dans le contexte sahélien, les classes d'états de surface qui nous intéressent. Une première démarche « classique » s'est en effet révélée inefficace pour résoudre le problème des fortes confusions entre les sols nus et les sols cultivées. En effet, malgré une précision globale de 89%, les erreurs de commission et d'omission sont très élevées. Le résultat d'une telle classification ne peut être accepté dans le type de travail que nous menons.

Nous avons opté pour une méthode combinant à la fois l'approche objet et l'approche photo-interprétation assistée par ordinateur.

Cette méthode nous a permis de caractériser l'évolution des états de surface sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1972, 1986, 1992 et 2002. Les résultats obtenus montrent que l'évolution des superficies cultivées sur le bassin a connue une dynamique en deux temps entre 1972 et 2002. On a, en effet, une première période allant de 1972 à 1992, pendant laquelle les superficies cultivées augmentent fortement. On passe de 0.87 million d'hectares en 1972 à 1.37 million d'hectares en 1992, soit pratiquement le double en 20 ans ! Entre 1992 et 2002, les surfaces cultivées sur le bassin ne varient pratiquement pas. Les chiffres obtenus montrent une certaine stabilisation avec cependant une certaine tendance à la baisse. Ce changement dans la dynamique d'évolution des terres cultivées montre qu'au début de la décennie 1990 tout le potentiel de terres cultivables sur le bassin a quasiment été utilisé. Cette augmentation des surfaces cultivées s'est faite au détriment de la végétation naturelle qui a connue une forte diminution pendant la même période. On est passé de 10475 km² (52% du bassin) de surface en végétation en 1972 à 3439 km² (17% du bassin) soit une diminution de deux tiers quasiment. Les traitements d'images ont également montré que les surfaces de sols nus ont également augmentées sur le bassin entre 1972 et 2002. En effet, de 4.5% de la surface du bassin en 1972, les sols nus sont passés à 13.8% en 2002.

CHAPITRE **VII**

DYNAMIQUE DEMOGRAPHIQUE ET ETATS DE SURFACE SUR LE NAKAMBE A WAYEN : INTERRELATIONS ET SCENARII D'EVOLUTION

La question démographique en Afrique de l'Ouest et au Sahel est au cœur de nombreuses discussions liées aux problèmes sociaux et environnementaux que connaissent aujourd'hui les états de cette région. L'Afrique sahélienne a, en effet, vu sa population doubler, voire tripler au cours des 40 dernières années. Déjà dans les années 1930, avaient lieu les premiers débats autour des causes humaines (et climatiques) de la dégradation de l'environnement au Sahel (Stebbing, 1935, 1938). Ces débats se sont intensifiés après les sécheresses des années 1970 et 1980 avec même un impact médiatique important au début des années 1990, alors que se préparait la conférence mondiale sur l'environnement de Rio en 1992. Extension des surfaces cultivées, surpâturage, et coupe abusive du bois ont été à de nombreuses reprises évoqués. Dans le contexte climatique et environnemental actuel, et au vu de l'importance des ressources en eau dans le développement socio-économique des états de la région, on peut s'interroger sur les implications hydrologiques des interactions population-environnement, quand on sait que plusieurs études hydrologiques menées dans la région depuis une vingtaine d'années ont mis en évidence un paradoxe hydrologique caractérisé par des conditions de ruissellement plus favorables dans les zones où on a une diminution du couvert végétal, une extension des surfaces cultivées et des surfaces dégradées.

Nous abordons donc dans ce chapitre la problématique des interrelations entre la dynamique démographique et les états de surface à travers l'exemple du bassin du Nakambé à Wayen. L'étude menée au chapitre V sur les facteurs conditionnels de la dynamique des états de surface a abouti à la définition de 6 modes de transformation du milieu en région sahélienne, sous l'effet conjoint de l'homme et du climat. Quatre indicateurs de pression anthropique et/ou climatique ont été déduits de ces modes de transformation du milieu. Ce sont : les surfaces cultivées, les surfaces de sols nus et dégradés, les surfaces en végétation naturelle (y compris les jachères), et les plans d'eau.

Les résultats obtenus au chapitre VI ont permis de dresser des cartes d'occupation du sol donnant les valeurs de ces indicateurs en 1972, 1986, 1992 et 2002. Si ces résultats permettent de se faire une idée de l'évolution globale des états de surface sur le bassin durant la période 1972-2002, nous ne sommes pas capables définir leurs évolutions au fil des ans. Nous avons, en effet, sur une trentaine d'années d'évolution, seulement 4 « clichés » du bassin : 1972, 1986, 1992 et 2002 mais aucune information entre ces dates.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer un outil permettant de caractériser la dynamique d'évolution des indicateurs entre les dates de prise de vue des images en tenant compte de la dynamique démographique et des pratiques culturelles des populations vivant sur le bassin.

VII.1 Démographie et modèles de population

VII.1.1 Théories de la dynamique des populations

L'histoire des théories sur la dynamique des populations est marquée par 2 courants de pensées qui s'accordent difficilement sur les perspectives du développement démographique à moyen ou long terme. La théorie de la transition démographique, mise au point par l'Américain Notestein (1944; 1945) à la fin des années 1930, s'était imposée comme référence de base de l'après-guerre. Notestein distinguait 4 phases dans la dynamique des populations :

- une première phase dite pré-industrielle où la natalité et la mortalité sont élevées et plus ou moins en équilibre selon les événements de l'époque (guerres, famines, épidémies) ;
- au cours de la deuxième phase, le taux de mortalité (en particulier la mortalité infantile) commence à décroître, grâce au développement du pays et à l'amélioration des conditions sanitaires. Dans le même temps, le taux de natalité reste très élevé, ce qui engendre une très forte croissance démographique ;
- quelques années ou décennies plus tard la fécondité baisse à son tour. On entre alors dans la troisième phase de l'évolution de la population pendant laquelle le taux de croissance commence à baisser ;
- enfin, la phase finale, que Notestein appelle « *incipient decline* » (déclin commençant). Les familles limitent les naissances jusqu'à n'avoir plus que 2 enfants en moyenne, ce qui assure le remplacement des générations lorsque la mortalité est basse. La croissance cesse alors et la population se stabilise à son niveau maximum.

Cette description en quatre temps de l'évolution des populations est donnée à la Figure VII-1.

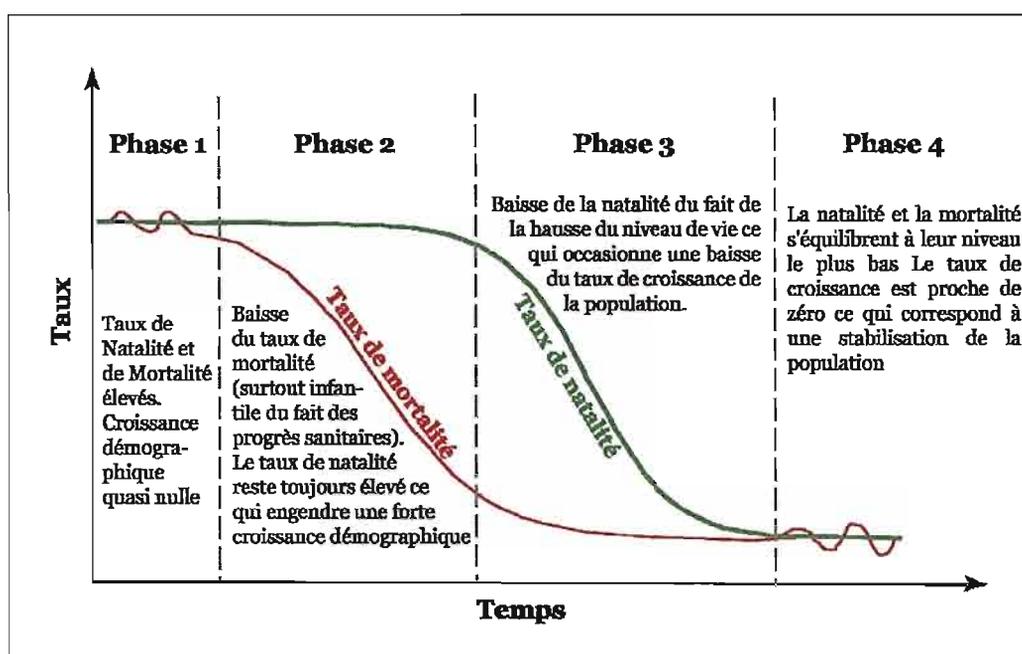


Figure VII-1 : Les quatre phases de la transition démographique

Ce schéma est plus ou moins bien respecté selon les pays. L'Angleterre suit assez bien le modèle théorique (décalage très net entre les deux courbes), alors qu'en France la natalité et la mortalité ont décliné à peu près au même rythme. Le cas des pays africains est différent. En effet, alors qu'ils étaient en phase 2, le taux de mortalité de certains pays africains a augmenté plus vite que le taux de natalité et ces pays se sont retrouvés à nouveau en phase 1 (sida, guerres...). Par exemple, au Zimbabwe, environ 26% des adultes sont infectés par le virus et l'espérance de vie a chuté de 41 ans en 1995 à 33 ans en 2005.

Le principal « reproche » fait à la théorie de la transition démographique est la notion d'équilibre final spontané de la population. Plusieurs faits tendent, en effet, à mettre en doute la stabilisation de la population après la transition démographique. Le changement fondamental des comportements de fécondité depuis les années 1980 et surtout depuis 1990, conduit à un tout autre futur que l'équilibre final promis par la théorie de la transition démographique.

En effet, le nombre des nations qui n'assurent plus le renouvellement de leurs générations ne cesse d'augmenter alors que la plupart sont considérées comme avoir accompli leur transition démographique (aujourd'hui, plus d'une dizaine de nations, pour la plupart européennes, voient le nombre des décès supérieur à sur celui des naissances). Les résultats des nombreuses études sur la stabilisation finale de la population mondiale du fait du déclin progressif de la natalité ne cessent d'être corrigés. En 1974, la date était fixée à 2075, avec 12,2 milliards d'habitants dans le monde. Trois ans plus tard, on avait rapproché la date de

50 ans et diminué l'estimation de la population mondiale à 11 milliards. En 1991, on ne prévoyait plus qu'une population mondiale de 8,6 milliards pour l'an 2025, prévision abaissée à 7,8 milliards en 2001. Depuis, les corrections se succèdent toujours dans le même sens. La date du futur maximum de l'humanité se rapproche, et ce maximum est de moins en moins élevé sans que l'on sache trop s'il sera suivi d'un plateau ou d'une décrue plus ou moins prononcée.

S'appuyant sur les idées de Cantillon (1755), Landry et Sauvy (Landry, 1909, 1933, 1934; Sauvy, 1952-1954) ont développé une tout autre théorie : celle de la révolution démographique ou théorie du régime démographique contemporain. Cette théorie fut complétée par les travaux des démographes tels que Bourgeois-Pichat (1987), Chesnais (1987), Bourcier de Carbon (1997) et Dupâquier (1997).

Le régime démographique contemporain serait le troisième stade d'une longue évolution. Cette évolution commencerait avec un régime primitif où il n'y a aucune restriction volontaire à la fécondité.

On entre ensuite dans un régime démographique dit intermédiaire, où la fécondité est contrôlée par le biais de la nuptialité. Dans ce régime intermédiaire, la pression des besoins entraîne aussi bien chez les individus que dans les normes sociales, des restrictions de la nuptialité. Ces restrictions ont pour effet de maintenir, pour les individus et les familles, un certain degré de bien-être que l'on entend conserver. Le niveau de la population s'établira à une plus ou moins grande distance du maximum, selon que les exigences en faits de bien-être seront plus ou moins grandes (Landry *et al.*, 1949).

Dans le troisième stade, donc celui du régime démographique contemporain, la fécondité est déliée de ses déterminants sociaux traditionnels et se lie toujours plus étroitement aux utilités individuelles. On note une aspiration générale, non plus à un simple maintien, mais à une amélioration de sa condition et de celle de ses enfants (Landry, 1934). C'est une conséquence logique de l'idée de progrès et de la rationalisation croissante de la conduite. Le résultat final serait qu'il n'y a plus d'équilibre de la population. L'accroissement de la population ne découlerait plus nécessairement du progrès technique, on pourrait même voir la population décroître malgré ces progrès. Le régime nouveau se définit comme un régime non d'équilibre mais de mouvement (Landry, 1934). La question fondamentale devient donc la détermination des éléments qui influent désormais le plus sur la fécondité.

VII.1.2 Modèles mathématiques de la dynamique des populations

L'étude des lois d'accroissement d'une population a fait l'objet de recherches qui remontent au 18^{ème} siècle avec les premiers travaux d'Euler (1760). Par la suite, Lotka (1939) entame l'étude systématique d'une population soumise à des taux de fécondité et de mortalité constants. Il montre qu'une telle population est exponentielle et propose le terme de « population malthusienne » pour désigner une population soumise à une mortalité constante et qui croît exponentiellement. Plusieurs modèles de population existent et sont plus ou moins puissants pour décrire mathématiquement la croissance de la population. On distingue classiquement 2 types de modèles : les modèles déterministes où le hasard n'intervient pas, et les modèles stochastiques (ou aléatoires) dans lesquels on suppose que les mécanismes d'évolution sont entachés de certaines variations dues au hasard. On s'intéressera plus particulièrement au modèle logistique qui décrit bien le phénomène de croissance puis de saturation si l'on considère que pour un territoire donné, les ressources disponibles sont limitées et qu'au-delà d'un certain maximum la population commence à décroître.

Les théories mathématiques des populations (Hillion, 1986) nous enseignent que l'accroissement d'une population $x(t)$, entre les instants t et $t + dt$, est imputable à 4 causes qui n'interfèrent pas :

- les naissances d'individus à l'intérieur de la population entre t et $t + dt$;
- les morts d'individus appartenant à la population entre les instants t et $t + dt$;
- l'émigration d'individus qui quittent le domaine géographique de la population entre t et $t + dt$;
- l'immigration d'individus qui viennent s'installer sur le domaine géographique entre t et $t + dt$.

Pour établir les équations mathématiques de la dynamique de cette population, une hypothèse fondamentale est que *le nombre de modifications (naissances, morts, émigrations et immigrations) survenus entre deux instants consécutifs t et $t + dt$ ne dépend que de deux facteurs :*

- l'instant t , résumant toutes les causes qui ne sont pas imputables à la population (changement du climat, environnement, progrès de la médecine qui augmenterait la longévité des individus,...) ;

- la taille x de la population, qui résume toutes les causes non imputables à la population (une surpopulation peut augmenter l'émigration, freiner l'immigration, et entraîner une limitation des ressources).

La traduction mathématique de cette hypothèse suivant un modèle déterministe continu est :

$$\frac{dx}{dt} = x \cdot r(t, x) \quad \text{éq. VII-1}$$

Où :

- x est la taille de la population à l'instant t ;
- $r(t, x)$ le taux de croissance de la population, qui est une fonction de l'instant t et du niveau de la population cet instant.

Pour $r(t, x)$ ne dépendant ni de t ni de x , c'est-à-dire $r(t, x) = r$, l'équation différentielle précédente devient :

$$\frac{dx}{dt} = r \cdot x \quad \text{éq. VII-2}$$

Cette équation s'intègre facilement en $x(t) = x(t_0) \cdot e^{r \cdot t}$ pour $t \geq 0$, traduisant une augmentation exponentielle de la population.

- pour $r > 0$, la population croît sans limite ;
- pour $r = 0$, la population est stationnaire ;
- pour $r < 0$, la population décroît vers 0.

Comme le taux de croissance entre deux instants t et $t+1$ est égal à $\frac{x(t+1) - x(t)}{x(t)} = e^r - 1$,

la population $x(t)$ avec $t = 0, 1, 2, \dots, n, \dots$, est une population malthusienne de taux d'accroissement $\rho = e^r - 1$. Ce modèle n'est applicable qu'au cours d'une période de forte expansion de la population.

En effet, Quetelet (1835), écrit, dans son ouvrage « *Sur l'homme et le développement de ses facultés* », que : « Si le développement a lieu au milieu d'obstacles qui tendent à l'arrêter, et qui agissent d'une manière uniforme, c'est-à-dire si l'état social ne change point, la

population n'augmente pas d'une manière indéfinie mais elle tend de plus en plus à devenir stationnaire. »

Verhulst (1838) donna à la thèse de Quetelet la première formulation mathématique en posant : $r(t, x) = r - bx$, qui est un cas particulier des modèles généraux étudiés plus tard, pour lesquels le taux d'accroissement s'écrit $r(t, x) = r - f(t) \cdot x^k$ dans lesquels le freinage de la population, représenté par $f(t) \cdot x^k$, est dû aux interactions possibles entre les individus de la population x^k et aux conditions extérieures $f(t)$.

Le cas le plus simple des modèles généraux du taux de croissance est obtenu en supposant $k = 1$ et $f(t)$ constante. Ce cas simple correspond au modèle proposé par Verhulst qui conduit à l'équation différentielle suivante :

$$\frac{dx}{dt} = rx - bx^2 \quad \text{éq. VII-3}$$

La solution de cette équation différentielle est de la forme :

$$x(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad \text{éq. VII-4}$$

Où :

- r est le coefficient de freinage du modèle
- t_0 est défini par $x(0) = \frac{K}{1 + e^{rt_0}}$
- $K = \frac{r}{b}$ est une constante dépendant de la forme du taux d'accroissement
($r(t, x) = r - bx$)
- t le temps

Connue sous le nom de fonction logistique, ce type de fonction, que l'on retrouve en dynamique de la population, correspond au mécanisme naturel de croissance ou de décroissance d'une variable, freinée par le niveau de sa valeur (x) et par la résultante d'autres paramètres que l'on considère comme constantes. C'est une courbe en « S » aplati (appelée sigmoïde) dont l'allure générale est donnée à la Figure VII-2.

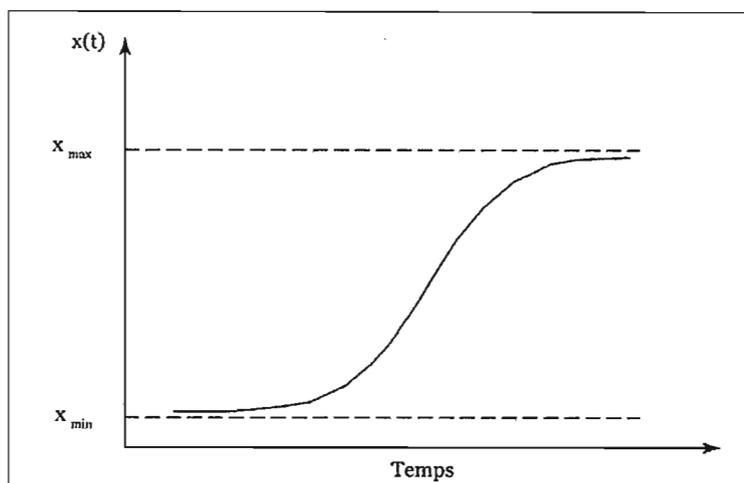


Figure VII-2 : Allure générale de la courbe logistique (forme en "S" aplati ou sigmoïde)

VII.1.3 Fonction logistique et transition démographique

Malgré les nombreuses controverses, la loi logistique reste un précieux outil mathématique de modélisation de la transition démographique. En effet, la transition démographique se caractérise par des taux bruts de mortalité et de natalité qui décroissent d'une valeur asymptotique à l'autre, découpant ainsi le temps en quatre intervalles correspondant chacun à une certaine logique économique et agricole (description donnée par la Figure VII-1). Cette dynamique en quatre temps rappelle celle de la fonction logistique, qui, dès sa découverte a servi de base mathématique pour rendre compte de la transition démographique. Artzrouni (1986) propose une nouvelle famille de courbes de croissance qui généralisent les logistiques et permettent de rendre compte, avec souplesse, du phénomène de la transition démographique.

Artzrouni approxime les taux de natalité et de mortalité par une fonction baptisée "antilogistique" et qui est définie par "une constante moins une fonction logistique". L'équation de la fonction « antilogistique » est la suivante :

$$f(t) = C - \frac{A}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad \text{éq. VII-5}$$

Où :

- C est la valeur maximale du phénomène étudié (taux de natalité/mortalité,...) ;

- A est l'ampleur de la baisse ;
- t_0 est la date du point d'inflexion de la courbe. A cette date, le taux a baissé de moitié ;
- $r = \frac{4s}{A}$ avec s la pente de la courbe au point d'inflexion.

La population totale $P(t)$ qui découle de cette hypothèse recouvre un ensemble de courbes contenant les exponentielles pures, ainsi que des courbes qui suivent une trajectoire exponentielle (croissante ou décroissante) après une période de croissance rapide. Comme cas particulier, l'on obtient des logistiques généralisées qui ont une limite supérieure et qui rendent compte de la transition démographique avec une souplesse que n'ont pas les logistiques ordinaires (Artzrouni, 1986).

Les équations des courbes de natalité, de mortalité et de population se déduisent donc comme suit :

$$Nat(t) = Nat_{initiale} - \frac{Nat_{initiale} - Nat_{finale}}{1 + e^{-r_{Nat}(t_0_{Nat} - t)}} \quad \text{éq. VII-6}$$

$$Mort(t) = Mort_{initiale} - \frac{Mort_{initiale} - Mort_{finale}}{1 + e^{r_{Mort}(t_0_{Mort} - t)}} \quad \text{éq. VII-7}$$

$$Pop(t) = Pop(t-1) \times (1 + T_{Démogr.}) \quad \text{éq. VII-8}$$

Où :

- $Nat(t)$ est le taux de natalité à la date t ;
- $Mort(t)$ est le taux de mortalité à la date t ;
- $Nat_{initiale}$ et Nat_{finale} sont les taux initiaux et finaux de la natalité ;
- $Mort_{initiale}$ et $Mort_{finale}$ sont les taux initiaux et finaux de la mortalité ;
- r_{Nat} et r_{Mort} sont respectivement les coefficients de freinage de la natalité et de la mortalité ;
- $t_{0_{Nat}}$ et $t_{0_{Mort}}$ sont respectivement les dates des points d'inflexion des courbes de natalité et de mortalité ;
- $Pop(t)$ est la population à la date t ;
- $Pop(t-1)$ est la population à la date $t-1$;
- $T_{Démogr}$ est le taux de croissance démographique qui est la différence entre le taux de natalité et mortalité.

Ces équations seront utilisées pour modéliser l'évolution de la population d'abord à l'échelle du Burkina Faso, puis sur le bassin du Nakambé à Wayen.

VII.2 Modèle logistique de population pour le Burkina Faso

VII.2.1 Définition et calibrage du modèle

Pour le cas de la population du Burkina Faso, l'étalonnage de la courbe logistique nécessite la connaissance des taux de natalité et de mortalité initiaux et finaux, de la date supposée du point d'inflexion, et des intensités du « freinage » de la natalité et de la mortalité.

Dans une étude sur la modélisation technico-démographique des futurs alimentaires du Burkina Faso, Ruas et Benoit-Cattin (1991) ont proposé un étalonnage de la courbe logistique pour la population du Burkina Faso sur la base des hypothèses suivantes :

- les taux initiaux de natalité et de mortalité sont supposés égaux à 5.5% et les taux finaux à 1.2%. Ces taux correspondent aux situations extrêmes observables dans le monde ;
- les points d'inflexion des courbes de mortalité et de natalité sont supposés égaux respectivement à 1960 et 2020 ce qui correspond à une transition démographique sur 60 ans centrée sur 1990. Cette année est retenue comme date à partir de laquelle le taux de croissance démographique atteint son maximum et commence à baisser.

Les statistiques démographiques disponibles à l'époque ont permis de déterminer les valeurs des coefficients de freinage r_{Nat} et r_{Mort} (Tableau VII-1). La population totale du Burkina à l'horizon 2080 a alors été estimée à 32 millions d'habitants. Le modèle global de transition démographique pour le Burkina, d'après ces auteurs, est donné à la Figure VII-3.

Tableau VII-1 : Coefficients de freinages des modèles de natalité et de mortalité pour le cas du Burkina (d'après Ruas et Benoit-Cattin, 1991)

| | Valeur initiale (‰) | Valeur finale (‰) | r | t_0 |
|---------------------|---------------------|-------------------|-------|-------|
| Modèle de natalité | 55 | 12 | 0.085 | 2020 |
| Modèle de mortalité | 55 | 12 | 0.065 | 1960 |

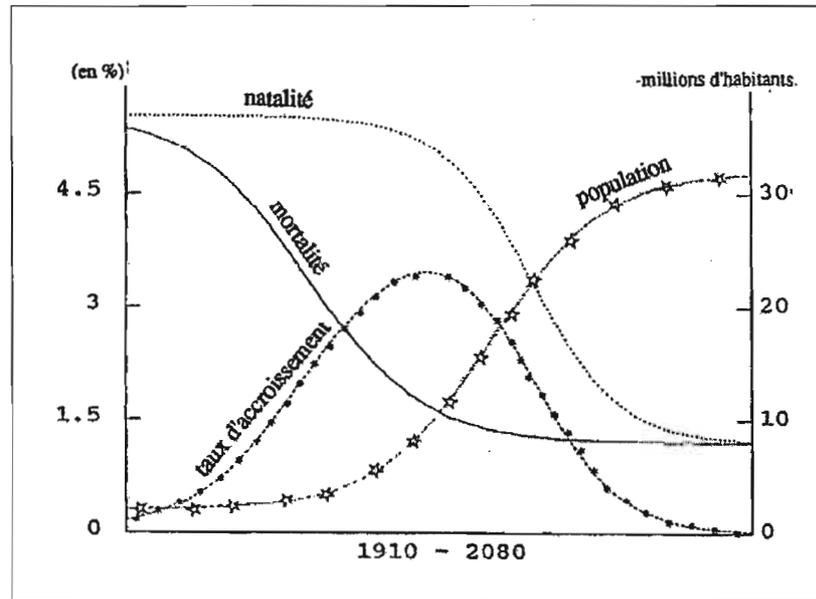


Figure VII-3 : Modélisation de la transition démographique au Burkina Faso (d'après Ruas et Benoit-Cattin, 1991)

Les données actuelles à notre disposition permettent de refaire un nouveau calibrage du modèle avec cependant une démarche différente.

On suppose que les dates t_{oNat} et t_{oMort} des points d'inflexion de la natalité et de la mortalité se situent entre 1900 et 2100. Les coefficients de freinage r_{Nat} et r_{Mort} des deux modèles sont pris dans l'intervalle $]0; 1[$. Pour chaque modèle, nous cherchons par itérations successives le couple $(r; t_0)$ qui minimise la somme des carrés des écarts entre les valeurs calculées et observées. Le pas de balayage des coefficients r_{Nat} et r_{Mort} est de 10^{-3} et celui de t_0 est l'année. Une automatisation de la démarche (200 x 1000 opérations) permet donc de trouver le meilleur couple $(r; t_0)$.

Les résultats des calages sont présentés au Tableau VII-2 et la Figure VII-4 donne les courbes d'évolution de la natalité et de la mortalité.

Tableau VII-2 : Résultats du calage des modèles de natalité et de mortalité pour le Burkina Faso

| | Valeur initiale (‰) | Valeur finale (‰) | r | t_0 | Somme Carré Écart |
|---------------------|---------------------------|-------------------------|-------|-------|-------------------------|
| Modèle de natalité | 50 | 12 | 0.022 | 2100 | 10.83 |
| Modèle de mortalité | 50 | 12 | 0.064 | 1962 | 0.67 |

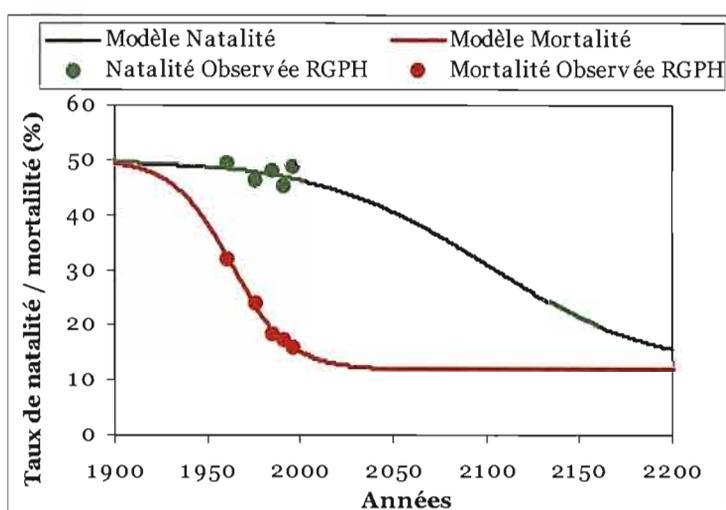


Figure VII-4 : Résultat de la modélisation des taux de natalité et de mortalité du Burkina Faso à partir d'une fonction logistique

Le modèle montre que le Burkina Faso entre « timidement » dans la deuxième phase de la transition démographique, la natalité n'ayant pas encore véritablement commencé à baisser. Les points d'inflexion de la mortalité et de la natalité se situent respectivement en 1962 et 2100. Ce qui équivaut à une transition démographique relativement longue s'étendant sur 138 ans à cause de la très lente baisse de la natalité.

Ces 2 modèles permettent de déduire l'évolution du taux de croissance démographique, et, finalement, la variation annuelle de la population (Figure VII-5). D'après les résultats du modèle, le maximum du taux de croissance démographique sera atteint en 2011. Cette date correspond à la date à partir de laquelle la croissance démographique devrait commencer à baisser. Les résultats du dernier recensement général de la population qui a eu lieu entre le 9 et le 23 décembre 2006 pourront nous renseigner, ultérieurement à nos travaux présents sur la justesse des ajustements faits jusque là.

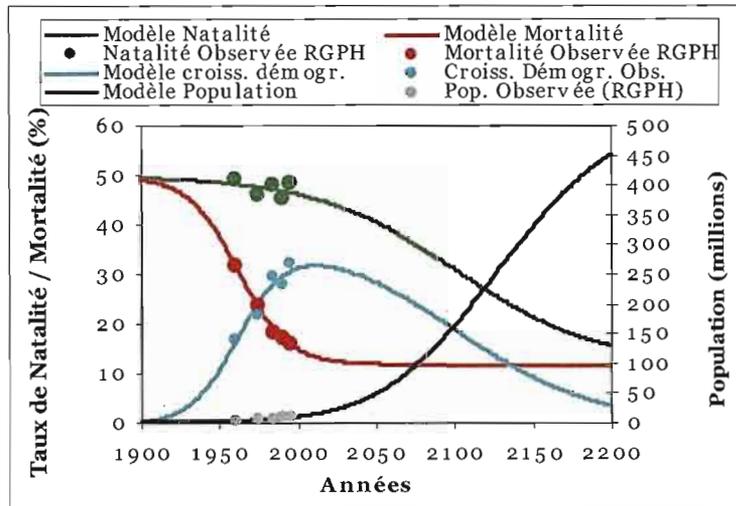


Figure VII-5 : Modélisation de l'évolution de la population du Burkina Faso à partir d'une fonction logistique

La natalité et la mortalité, ainsi que la mobilité géographique (émigration, immigration), constituent les trois facteurs de l'évolution et de la composition d'une population donnée. Il ne nous a pas été possible d'estimer la mobilité géographique sur le bassin faute de données. Ce dernier facteur n'a donc pas été pris en compte dans les analyses démographiques réalisées dans la présente étude. Cette contrainte constitue une insuffisance dont nous sommes conscients.

VII.2.2 Comparaison des résultats du modèle avec les projections des Nations Unies

La division du département des affaires sociales et économiques du secrétariat des Nations Unies pour les perspectives de population du monde a publié en 2005 les projections d'évolution de la population du Burkina Faso jusqu'en 2050 (<http://esa.un.org/unpp>). Les tendances de la fertilité totale, l'espérance de vie à la naissance, la mortalité infantile et la migration internationale sont prises en compte dans l'élaboration de ces projections. Les données de ces projections sont présentées au Tableau VII-3. Elles sont comparées aux résultats du modèle à la Figure VII-6.

Tableau VII-3 : Projections des Nations Unies pour la population du Burkina Faso (Source: <http://esa.un.org/unpp/>)

| Population (millions) | | | | | Population (millions) | | | | |
|-----------------------|-------------|-----------|------------|------------|-----------------------|-------------|-----------|------------|------------|
| Année | Hyp. Faible | Hyp. Moy. | Hyp. Forte | Hyp. Const | Année | Hyp. Faible | Hyp. Moy. | Hyp. forte | Hyp. Const |
| 1950 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | 3.98 | 2005 | 13.93 | 13.93 | 13.93 | 13.93 |
| 1955 | 4.24 | 4.24 | 4.24 | 4.24 | 2010 | 15.98 | 16.10 | 16.22 | 16.26 |
| 1960 | 4.56 | 4.56 | 4.56 | 4.56 | 2015 | 18.14 | 18.48 | 18.81 | 19.05 |
| 1965 | 4.93 | 4.93 | 4.93 | 4.93 | 2020 | 20.38 | 21.03 | 21.69 | 22.39 |
| 1970 | 5.45 | 5.45 | 5.45 | 5.45 | 2025 | 22.70 | 23.73 | 24.76 | 26.38 |
| 1975 | 6.10 | 6.10 | 6.10 | 6.10 | 2030 | 25.01 | 26.51 | 28.01 | 31.19 |
| 1980 | 6.83 | 6.83 | 6.83 | 6.83 | 2035 | 27.22 | 29.31 | 31.44 | 37.01 |
| 1985 | 7.71 | 7.71 | 7.71 | 7.71 | 2040 | 29.28 | 32.10 | 35.03 | 44.05 |
| 1990 | 8.87 | 8.87 | 8.87 | 8.87 | 2045 | 31.16 | 34.85 | 38.74 | 52.55 |
| 1995 | 10.27 | 10.27 | 10.27 | 10.27 | 2050 | 32.83 | 37.50 | 42.53 | 62.83 |
| 2000 | 11.88 | 11.88 | 11.88 | 11.88 | | | | | |

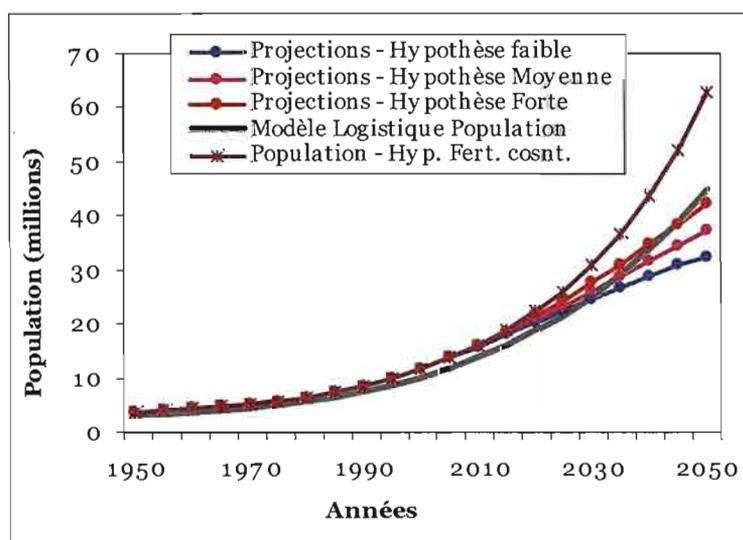


Figure VII-6 : Comparaison entre les résultats du modèle et les projections des Nations Unies sur la population du Burkina Faso

Le modèle s'ajuste relativement bien avec les projections des Nations Unies pour le Burkina jusqu'en 2020 toutes hypothèses confondues. Après 2020 le modèle donne des estimations supérieures, en hypothèse forte, aux projections de la division des Nations Unies pour la population.

VII.2.3 Comparaison des résultats du modèle avec les projections I.N.S.D.

L'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina Faso (INSD) a publié en 2003 (Tableau VII-4) des projections de la population nationale suivant trois hypothèses basées sur l'Indice Synthétique de Fécondité (ISF). L'ISF mesure le nombre moyen d'enfants nés vivants qu'aurait une femme, en fin de période féconde, dans les conditions de fécondité actuelle. Ces projections ont été faites jusqu'en 2051. Elles sont comparées aux résultats du modèle à la Figure VII-7.

Tableau VII-4 : Projections de la population du Burkina Faso selon trois hypothèses de fécondité des femmes (d'après l'INSD)

| Année | Fécondité constante | Fécondité moyenne | Fécondité basse |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | (ISF=6.8) Population | (ISF=4.6) Population | (ISF=3.0) Population |
| 1960 | 4.35 | 4.35 | 4.35 |
| 1975 | 5.64 | 5.64 | 5.64 |
| 1985 | 7.96 | 7.96 | 7.96 |
| 1991 | 9.19 | 9.19 | 9.19 |
| 1996 | 10.31 | 10.31 | 10.31 |
| 2001 | 12.05 | 12.04 | 12.04 |
| 2006 | 14.21 | 14.16 | 14.14 |
| 2011 | 16.89 | 16.70 | 16.60 |
| 2016 | 20.11 | 19.63 | 19.36 |
| 2021 | 23.97 | 22.94 | 22.38 |
| 2026 | 28.66 | 26.71 | 25.65 |
| 2031 | 34.39 | 30.96 | 29.12 |
| 2036 | 41.41 | 35.75 | 32.75 |
| 2041 | 49.98 | 41.09 | 36.44 |
| 2046 | 60.42 | 46.98 | 40.12 |
| 2051 | 73.15 | 53.53 | 43.80 |

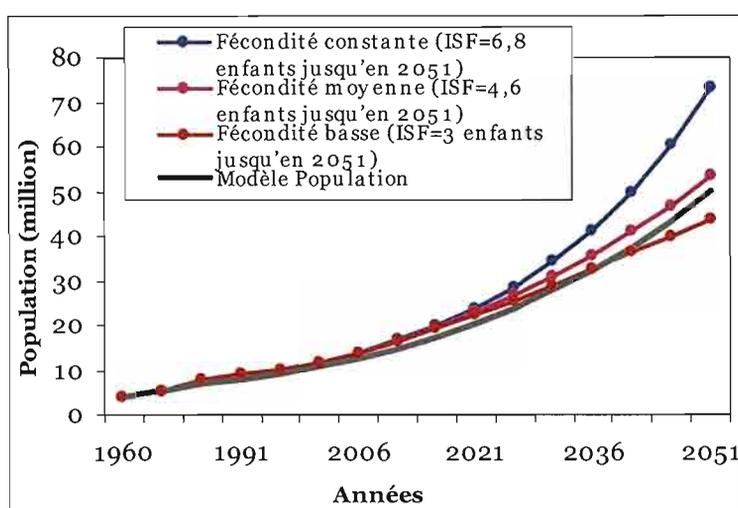


Figure VII-7 : Comparaison entre les résultats du modèle et les projections de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina Faso

Les projections du modèle sont proches de celles de l'INSD-Burkina en hypothèse de fécondité basse avec une sous estimation de la population donnée par le modèle. La situation s'inverse à partir de 2041 où la population estimée par le modèle s'écarte significativement de celles de l'INSD-Burkina en hypothèse de fécondité basse, et tend vers les projections de l'INSD en hypothèse de fécondité moyenne.

VII.2.4 Conclusion partielle

Malgré ses insuffisances, le modèle est globalement en accord avec les perspectives démographiques du Burkina Faso selon les Nations Unies et l'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina. Ce modèle sera donc utilisé pour estimer l'évolution de la population sur le bassin du Nakambé à Wayen. La même démarche de calibrage sera utilisée.

VII.3 Modèle logistique de population pour le bassin du Nakambé à Wayen

VII.3.1 Rappel des données démographiques disponibles

Au chapitre II, nous avons présenté l'ensemble des données de population et de statistique agricole que nous avons rassemblé dans le cadre de cette étude. Rappelons qu'elles ne sont disponibles, dans le meilleurs des cas, qu'à l'échelle des unités administratives (strates géo-ethniques pour la période 1960-1974, départements pour 1975-1984, et provinces de 1985 à 1996). Une approche par la densité a donc été utilisée pour estimer, à l'échelle du bassin, les paramètres démographiques tels que la population totale, les taux de natalité et de mortalité.

Ce travail préliminaire a permis d'avoir, pour les années 1960, 1975, 1985 et 1996 la population totale, les taux de natalité et de mortalité pour le bassin du Nakambé à Wayen. Le Tableau VII-5 récapitule les données démographiques du bassin de 1960 à 1996, et la Figure VII-15 donne l'évolution de sa population pour la même période.

Tableau VII-5 : Données démographiques du bassin du Nakambé à Wayen au cours du 20^{ème} siècle. (* = données nationales)

| | 1960 | 1975 | 1985 | 1996 |
|------------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| Population | 747 274 | 847 189 | 994 907 | 1 222 286 |
| Taux de natalité (‰) | 49.1 | 46 | 48 | 48.5 |
| Taux de mortalité (‰) | 32 | 24 | 18.5* | 16* |

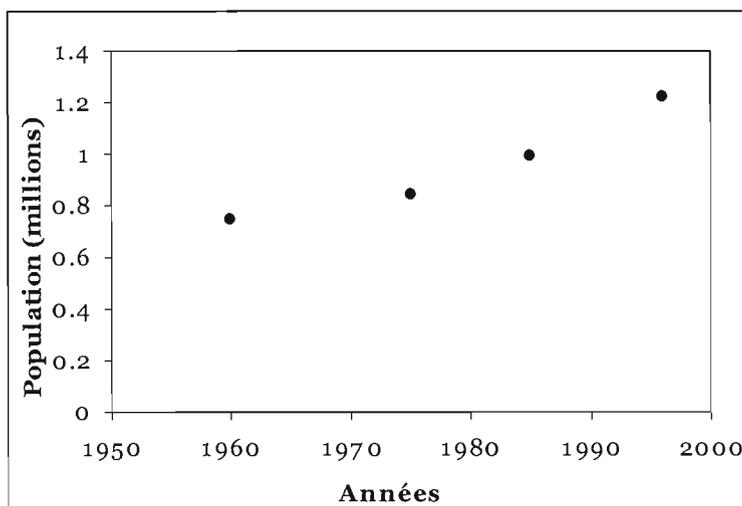


Figure VII-8 : Estimation de la population totale du bassin du Nakambé à Wayen de 1960, 1975, 1985 et 1996

A l'image de tout le pays, la population sur le bassin a augmenté de façon exponentielle au cours du 20^{ème} siècle. Elle a quasiment doublé en 45 ans avec un taux de croissance annuel moyen qui n'a cessé d'augmenter durant la même période. On est en effet passé de 0.84% durant la décennie 1960 à 1.87% à la fin de la décennie 1990 soit un peu plus du double en 4 décennies ! Malgré une politique gouvernementale favorisant la contraception et la planification familiale, le taux de natalité reste encore très élevé sur le bassin puisqu'il avoisine 48%.

VII.3.2 Définition et calibrage du modèle

Les modèles de natalité et de mortalité sur le bassin ont été calibrés en suivant le même schéma que lors du calibrage à l'échelle nationale. Les paramètres démographiques utilisés, les coefficients de freinage ainsi que les dates des points d'inflexion des deux modèles sont donnés au Tableau VII-6. Les courbes d'évolution de la natalité et de la mortalité sont présentées à la Figure VII-9.

Tableau VII-6 : Résultats du calage des modèles de natalité et de mortalité pour le Bassin

| | Valeur initiale (%) | Valeur finale (%) | r | t_0 | Somme carré écarts |
|----------------------------|---------------------|-------------------|-------|-------|--------------------|
| Modèle de natalité | 50 | 12 | 0.024 | 2100 | 6.2 |
| Modèle de mortalité | 50 | 12 | 0.07 | 1962 | 2.3 |

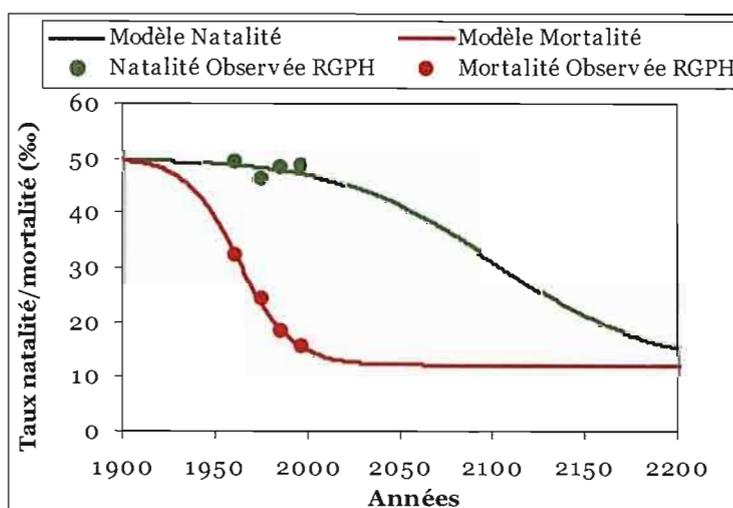


Figure VII-9 : Modélisation de la natalité et de la mortalité sur le bassin du Nakambé à Wayen

La natalité et la mortalité sur le bassin évoluent quasiment de la même manière qu'à l'échelle de tout le pays. Cela peut se justifier par le fait que le plateau central du Burkina Faso, dont le bassin du Nakambé à Wayen couvre une bonne partie, est la région la plus peuplée et celle qui a les plus forts taux de natalité. Cette partie du pays constitue en quelque sorte le « moteur démographique » du pays. Les données de natalité et de mortalité sont du même ordre de grandeur sur le bassin et à l'échelle nationale (Tableau VII-7).

Tableau VII-7 : Ordres de grandeur des données démographiques sur le bassin et à l'échelle du Burkina Faso. Les données manquantes (*) pour le bassin ont été remplacées par les moyennes nationales

| Année | Taux de Natalité (%) | | Taux de Mortalité (%) | | Population | |
|-------|----------------------|--------|-----------------------|--------|------------|-----------|
| | Burkina | Bassin | Burkina | Bassin | Burkina | Bassin |
| 1960 | 49.1 | 49.1 | 32 | 32* | 4 349 000 | 747274 |
| 1975 | 42.5 | 46 | 24 | 24* | 5 638 203 | 847996 |
| 1985 | 47.9 | 48 | 18.5 | 18.3 | 7 964 705 | 994907 |
| 1996 | 47.8 | 48.5 | 16 | 15.4 | 10 312 609 | 1 222 286 |

De ces deux modèles, on déduit l'évolution du taux de croissance de la population sur le bassin ainsi que l'évolution du nombre d'habitants sur le bassin. Les résultats sont donnés à la Figure VII-10.

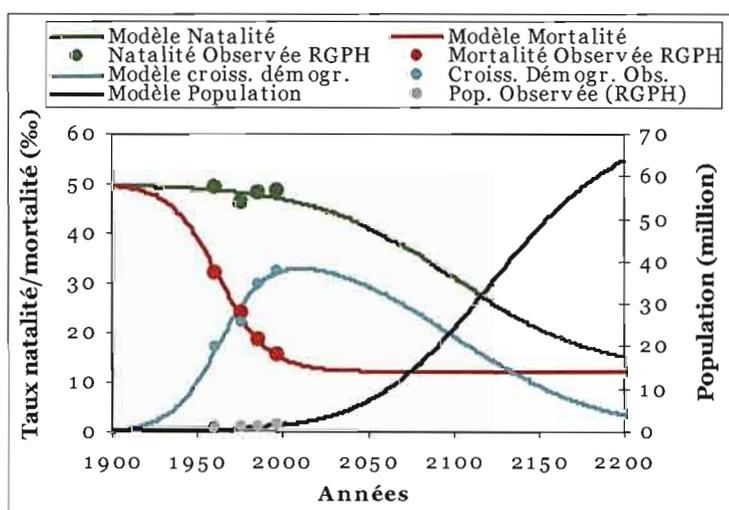


Figure VII-10 : Modélisation de l'évolution de la population sur le bassin du Nakambé à Wayen

Nous trouvons d'après le modèle que la croissance démographique commencera à baisser sur le bassin du Nakambé à Wayen en 2010, c'est-à-dire quasiment à la même date que sur l'ensemble du pays. Le taux de natalité est élevé et baisse très lentement ce qui a pour conséquence de maintenir une croissance démographique relativement élevée. La population du bassin à l'horizon 2050 est estimée à 7.3 million d'habitants. D'après notre modèle, environ 24 millions de personnes vivront sur le bassin du Nakambé à Wayen en 2100 !

VII.4 Dynamique démographique et superficies cultivées

VII.4.1 A l'échelle du Burkina Faso

Les statistiques démographiques et agricoles ont permis de faire une étude comparée de l'évolution de la population agricole et des superficies cultivées sur l'ensemble du Burkina Faso. Ces deux variables ont une évolution exponentielle au cours du 20^{ème} siècle, avec un rythme de croissance plus lent pour les superficies cultivées (Figure VII-11). L'étude comparative fait également ressortir que la croissance de la population agricole dans ce pays est corrélée à l'expansion des surfaces agricoles sur la période 1961-2002. Toutefois, les nuages de points définissent trois périodes bien distinctes à l'intérieur desquelles aucune tendance réelle ne se dégage (Figure VII-12).

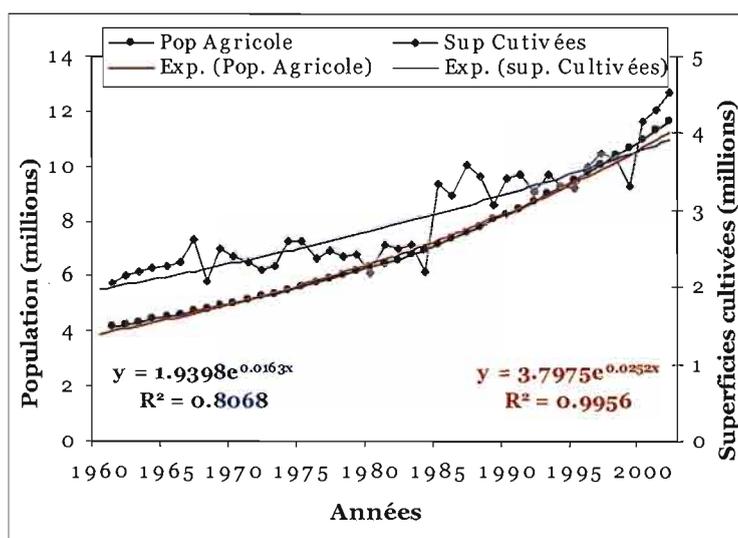


Figure VII-11 : Évolution des superficies cultivées et de la population agricole au Burkina Faso au cours du 20^{ème} siècle

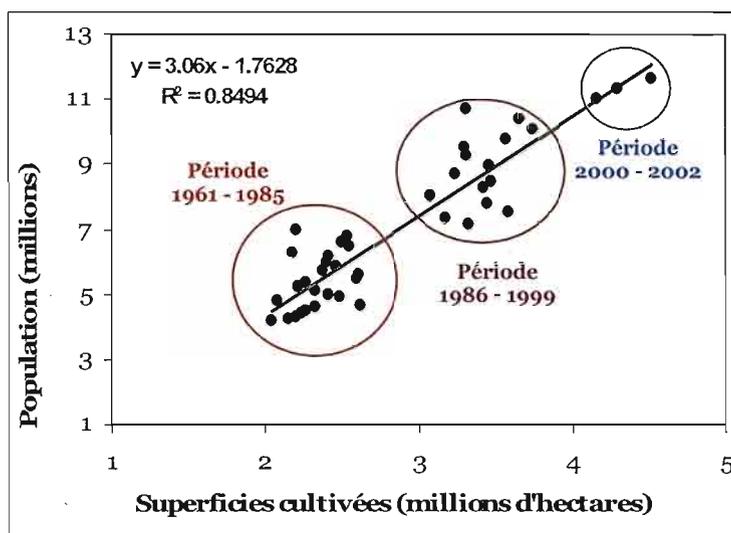


Figure VII-12 : Population agricole et superficies cultivées au Burkina Faso au cours du 20^{ème} siècle

VII.4.2 A l'échelle du bassin du Nakambé à Wayen

VII.4.2.1 Évolution des superficies cultivées sur le bassin

Les traitements d'images effectués au chapitre VI ont abouti à l'estimation des superficies cultivées sur le bassin en 1972, 1986, 1992 et 2002. Un rappel des résultats obtenus est donné Tableau VII-8, et l'évolution globale sur l'ensemble de la période est présentée à la Figure VII-13.

Tableau VII-8 : Superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen (résultats des traitements d'images du chapitre VI)

| | 1972 | 1986 | 1992 | 2002 |
|-----------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|
| Superficies cultivées (ha) | 871 400 | 1 163 300 | 1 374 000 | 1 362 400 |

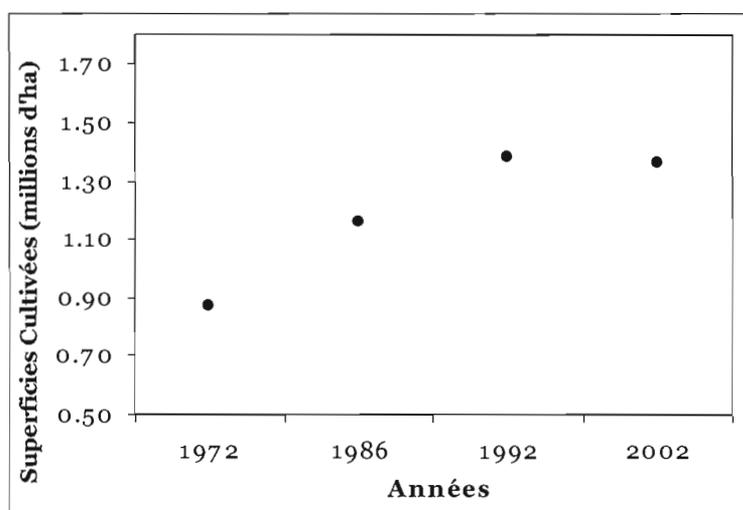


Figure VII-13 : Évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1972, 1986, 1992 et 2002

Les résultats du Tableau VII-8 et de la Figure VII-13 montrent que l'évolution des superficies cultivées sur le bassin a connu une dynamique en deux temps entre 1972 et 2002. On a, en effet, une première période allant de 1972 à 1992, pendant laquelle les superficies cultivées augmentent fortement. On passe de 0.87 million d'hectares en 1972 à 1.37 millions d'hectares en 1992, soit une augmentation de près de 60% en 20 ans !

Entre 1992 et 2002, les surfaces cultivées sur le bassin ne varient pratiquement pas. Les chiffres obtenus montrent une tendance à la baisse qui fait beaucoup plus penser à une stabilisation des superficies cultivées car la baisse est relativement faible en 10 ans et peut être liée aux erreurs dans les traitements d'images.

Ce changement dans la dynamique d'évolution des terres cultivées montre qu'au début de la décennie 1990 tout le potentiel de terres cultivables sur le bassin a quasiment été utilisé. Cette observation est en accord avec plusieurs études sur la dynamique démographique et les ressources naturelles sur le pays. En effet, déjà au début de la décennie 1980, Marchal (1977) montrait que sur une bonne partie nord du bassin (province du Yatenga), 80% des terres fertiles étaient cultivées en permanence et que 40% de l'ensemble des terres cultivées l'étaient sur des terres marginales et dégradées. Une étude récente (Drabo *et al.*, 2002) a également mis en évidence une forte réduction de la disponibilité en terres cultivables sur l'ensemble du Burkina entraînant de profondes mutations dans les questions foncières (compétition pour le contrôle foncier) et d'importants flux migratoires des populations vers des zones plus favorables à l'agriculture.

A partir de ces résultats, plusieurs modèles d'ajustement peuvent permettre d'estimer les superficies cultivées annuellement sur le bassin pour la période 1972-2002. Nous avons testé quatre fonctions d'ajustement dont les résultats sont présentés à la Figure VII-14.

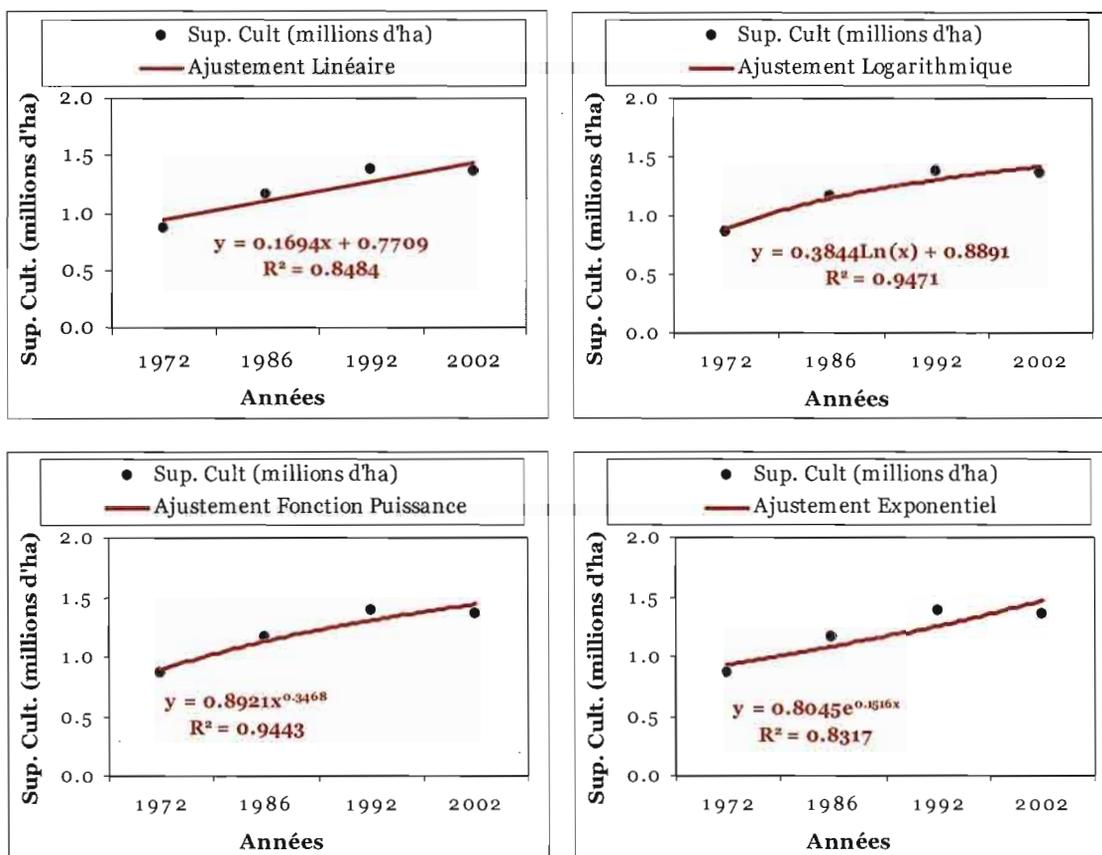


Figure VII-14 : Quatre modèles d'ajustement pour l'évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé sur le période 1972-2002

Bien que ne correspondant à aucune réalité, chacun de ces modèles s'ajuste bien avec les données des traitements d'images. L'un ou l'autre de ces quatre modèles pourrait donc être choisi pour estimer l'évolution annuelle des superficies cultivées sur le bassin pour la période 1972-2002. Cependant, aucun d'entre eux ne peut traduire la forte augmentation puis la stabilisation des superficies cultivées autour des années 1990.

Ce mode d'évolution s'apparente beaucoup plus à une évolution de type logistique. En effet, on imagine aisément qu'à l'époque où le bassin était très peu peuplé et que les conditions climatiques étaient favorables, les rendements des superficies cultivées couvraient les besoins alimentaires des populations. Les aires cultivées étaient à leur niveau le plus bas et fluctuaient plus ou moins. Au fil des années, la population a augmentée avec un rythme relativement élevé sur le bassin entraînant une augmentation des besoins alimentaires, et donc une nécessité d'augmenter les rendements afin d'assurer une certaine sécurité

alimentaire. Mais, entre temps les conditions climatiques et le contexte socio-économique se sont fortement dégradés dans les régions sahéliennes (début des années 1970). L'agriculture étant encore rudimentaire et traditionnelle, la seule possibilité d'augmenter les rendements est l'accroissement des surfaces cultivées. On assiste alors pendant cette deuxième phase à une explosion des superficies cultivées sur le bassin. Les terres disponibles (surfaces en végétation naturelle, et même les terres marginales considérées jadis comme incultes) sont occupées par les cultures jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de terre. Le phénomène de l'augmentation des superficies cultivées s'arrête alors et on assiste à une phase de stabilisation.

A ce stade de l'évolution du bassin, la population a atteint un certain niveau et continue de croître entraînant toujours avec elle des besoins alimentaires encore plus importants. A un moment donné, les besoins alimentaires seront tels qu'il faudra être en mesure de produire plus sur des surfaces réduites. On assistera alors à une modernisation des moyens et techniques de production permettant de répondre aux besoins alimentaires des populations. C'est ce que Ruas et Benoit-Cattin (1991) appellent la transition technico-démographique. Nous allons donc utiliser un modèle d'évolution logistique à la dynamique des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen.

VII.4.2.2 Fonction logistique et superficies cultivées sur le bassin

On peut concevoir que pour un bassin versant donné, la surface S_{Cult} , occupée par les cultures à une date t ne peut dépasser une certaine valeur maximale $S_{max_{Cult}}$ (on ne peut mettre en culture plus de terres qu'il n'en existe). La variation de superficie entre deux dates, peut être considérée comme proportionnelle à la différence $S_{max_{Cult}} - S_{Cult}$. Cette différence s'interprète comme la "place libre" dans le milieu qui pourrait être occupée par les surfaces cultivées au cours de leur évolution dans le temps. On peut donc écrire que:

$$\frac{1}{S_{Cult}} \frac{dS_{Cult}}{dt} = k(S_{max_{Cult}} - S_{Cult}) \quad \text{éq. VII-9}$$

En normalisant par $x = \frac{S_{Cult}}{S_{max_{Cult}}}$ et en posant $r = kS_{max_{Cult}}$, on obtient :

$$\frac{dx}{dt} = rx(1-x) = f(x) \quad \text{éq. VII-10}$$

La solution de cette dernière équation différentielle s'écrit:

$$x(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad \text{éq. VII-11}$$

$x(t)$ est l'équation de la fonction logistique, et, Artzrouni (1986) a montré qu'une « antilogistique » rendait très bien compte du mode d'évolution de la fonction logistique et avec plus de souplesse. En utilisant la formulation « antilogistique » on a :

$$S_{Cult}(t) = S_{Cult-finale} - \frac{S_{Cult-finale} - S_{Cult-initial}}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad \text{éq. VII-12}$$

Cette équation sera utilisée pour estimer l'évolution des superficies cultivées sur le bassin.

VII.5 Modèle logistique d'estimation des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen

VII.5.1 Données initiales et finales du modèle

L'accroissement de la population sur le bassin est fortement corrélé à l'expansion des surfaces cultivées sur le bassin pour la période 1972-1992 (Figure VII-15). Après cette période, la corrélation n'a plus une grande signification puisque les superficies cultivées sur le bassin n'évoluent quasiment plus.

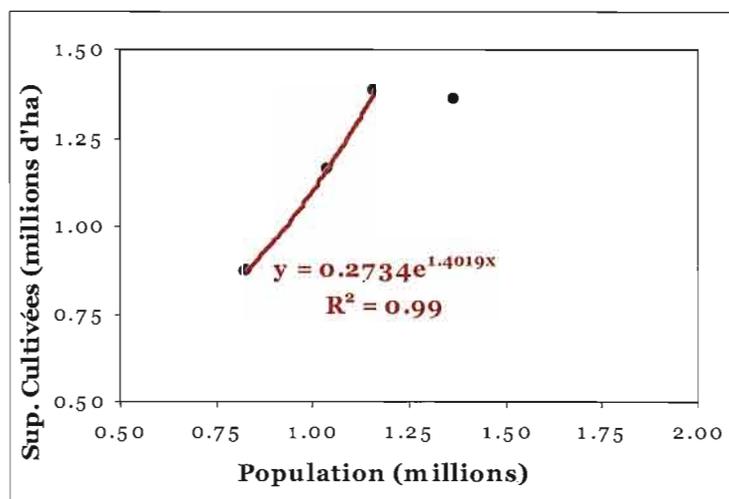


Figure VII-15 : Relation population superficies cultivées sur le bassin du Nakambé au cours du 20^{ème} siècle

La population du bassin est estimée à 413 000 habitants en 1910 d'après le modèle de population. Nous faisons l'hypothèse que la relation population - surfaces cultivées sur le bassin suit une loi exponentielle entre 1910 et 1992. Cette hypothèse se justifie par le fait que la période 1910-1992 correspond à la phase de forte croissance des 2 paramètres sur le bassin. En utilisant la relation de la Figure VII-15, on peut estimer la surface totale cultivée sur le bassin à 487 552 hectares.

Le maximum de superficies cultivées est pris égal à 1 374 000 hectares et est atteint à partir de 1992.

VII.5.2 Calibrage du modèle

Nous cherchons à déterminer r et t_0 pour calibrer le modèle. Ces paramètres sont à déterminer de telle manière que les données du modèle soient les plus proches possibles des résultats des traitements d'images. Connaissant les valeurs initiales et finales des superficies cultivées sur le bassin, il est possible de déterminer automatiquement par itérations successives le couple (r, t_0) qui minimise la somme des carrés des écarts entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs trouvées lors des traitements d'images.

Les résultats du calibrage du modèle sont donnés au Tableau VII-9. La Figure VII-16 donne l'évolution des superficies cultivées sur le bassin.

Tableau VII-9 : Résultats du calage du modèle pour les superficies cultivées sur le Bassin du Nakambé à Wayen

| | Valeur initiale | Valeur finale | r | t_0 | Somme carrés écarts |
|--|-----------------|---------------|-------|-------|---------------------|
| Superficies cultivées (10⁶ ha) | 0.48 | 1.37 | 0.129 | 1975 | 0.011 |

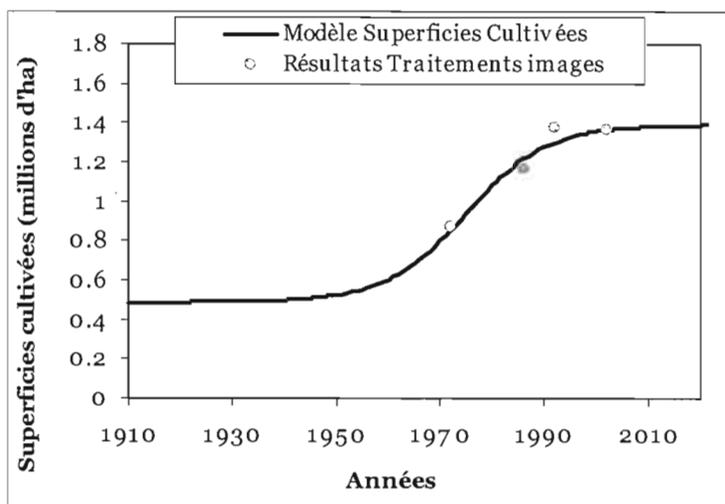


Figure VII-16 : Estimation de l'évolution des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen à l'aide d'un modèle de population

D'après le modèle, en 1975, la moitié du potentiel de terres cultivables sur le bassin du Nakambé à Wayen avait déjà été utilisé, et autour de la décennie 1990, soit environ 20 ans après, tout l'espace cultivable a été mis en culture sur le bassin. La Figure VII-17 montre l'évolution de la population et des superficies cultivées sur le bassin sur la base d'un modèle logistique.

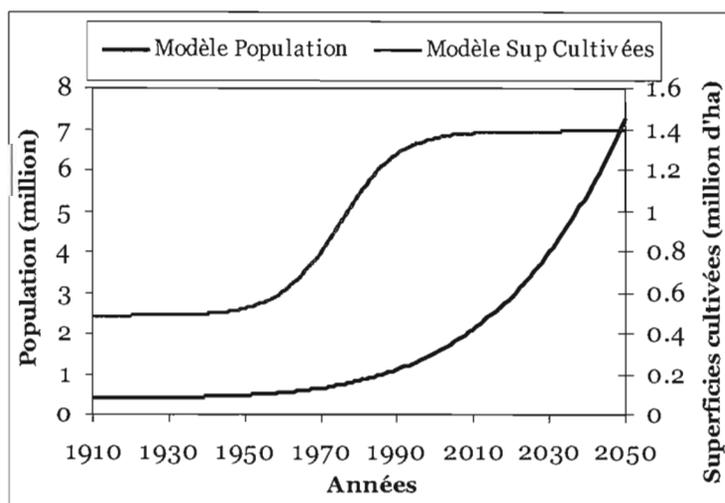


Figure VII-17 : Modélisation de l'évolution de la population et des superficies cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen à partir d'une courbe logistique

VII.6 Mise en équation des variations des indicateurs

VII.6.1 Équation d'état du bassin

Un des principaux résultats du chapitre V a été la définition de quatre types d'état de surface représentant des indicateurs d'évolution du bassin sous l'effet conjoint de l'homme et du climat. Une classification de la surface du bassin suivant ces quatre classes d'état de surface a été réalisée au chapitre VI. Ainsi, toute surface élémentaire prise sur le bassin appartient nécessairement à l'un des ces quatre types d'état de surface.

Soient $S_{Vég}$, S_{Cult} , S_{Sn} et S_{Pe} les surfaces occupées par la végétation, les cultures, les sols nus et les plans d'eau sur le bassin. Si S_{BV} est la surface totale du bassin versant, on peut écrire à tout instant :

$$S_{BV} = S_{Vég} + S_{Cult} + S_{Sn} + S_{Pe} \quad \text{éq. VII-13}$$

Cette équation est une équation d'état du bassin. Le passage d'un état à un autre se fera par transformation d'un type d'état de surface en un autre de telle sorte que l'équation d'état reste toujours vérifiée.

VII.6.2 Équations de variations des surface en végétation naturelle

Pendant un intervalle de temps ΔT donné, les variations des surfaces en végétation naturelle, sous l'action de l'homme et du climat, se font comme indiqué à la Figure VII-18.

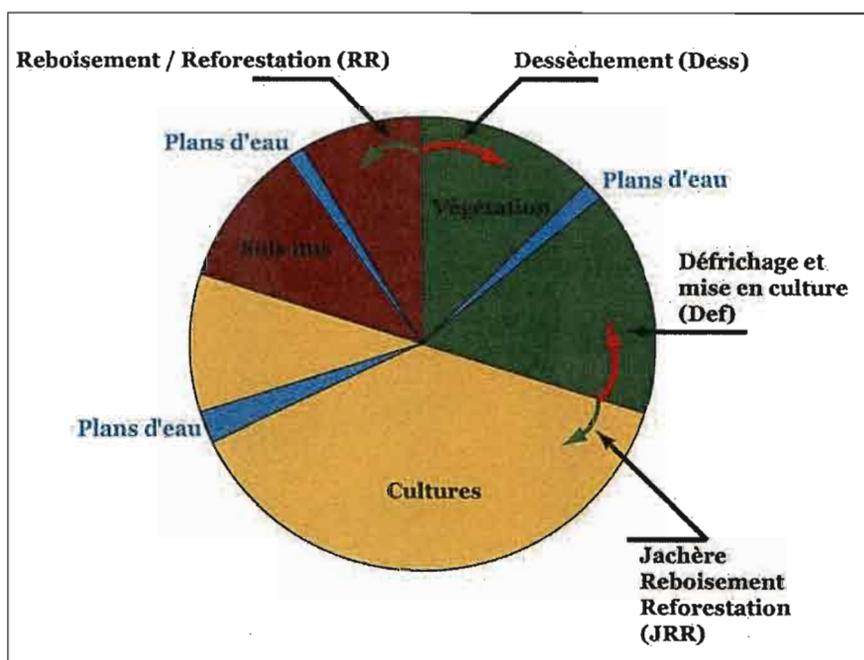


Figure VII-18 : Scénarii d'évolution des surfaces en végétation naturelle

Notons $\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_+$ le gain de surfaces en végétation naturelle pendant l'intervalle de temps

ΔT . Ce gain est constitué de deux composantes :

- Une composante JRR (Jachère Reboisement Reforestation) due à la pratique de la jachère et aux actions de reboisement et de reforestation ;
- Une seconde composante notée RR due aux actions de reboisement et de reforestation sur les surfaces de sols nus.

On aura donc :

$$\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_+ = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{JRR} + \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{RR} \quad \text{éq. VII-14}$$

De même, notons $\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_-$ les pertes en végétation naturelle pendant l'intervalle de temps

ΔT . Ces pertes sont dues :

- au dessèchement de la végétation par stress hydrique à cause des conditions climatiques défavorables ;
- au défrichage pour la mise en culture des terres en végétation naturelle. Le dessèchement sera noté « Dess » et défrichage « Def ».

Par convention, les pertes seront affectées du signe « moins ». $\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_-$ s'écrira donc :

$$\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_- = -\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Def} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Dess} \quad \text{éq. VII-15}$$

En faisant le bilan des pertes et des gains on obtient la variation de surface ne végétation naturelle pendant l'intervalle ΔT :

$$\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_- = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{JRR} + \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta ST}\right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Def} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta ST}\right)_{Dess} \quad \text{éq. VII-16}$$

VII.6.3 Équations de variation des surfaces cultivées

Faisons le même type de raisonnement avec les surfaces cultivées. La Figure VII-19 indique les différents effets anthropiques et climatiques susceptibles de faire varier les surfaces cultivées.

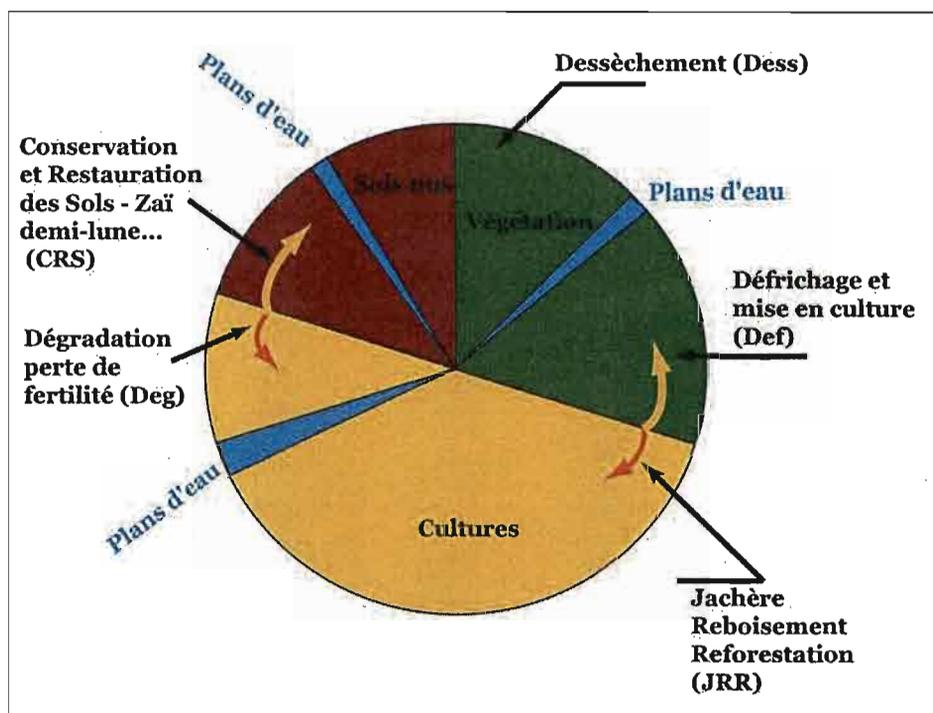


Figure VII-19 : Scénarii d'évolution des surfaces cultivées

Notons $\left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right)_+$ le gain de surfaces cultivées pendant l'intervalle de temps ΔT . Ce gain se fera d'une part aux dépends de la végétation naturelle par le défrichage et la mise en culture (Def), et, d'autre part, aux dépends des sols nus par la pratique des techniques de conservation et de restauration des sols (CRS) telles le Zaï, la demi lune etc.

$$\left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right)_+ = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Def} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{CRS} \quad \text{éq. VII-17}$$

Soit $\left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right)_-$ les pertes en surfaces cultivées. Ces pertes s'observeront d'une part lorsque des terres sont exploitées sans interruption sur une très longue période sans apports de fertilisants de ni de pratiques des techniques de conservation et de restauration des sols. Ces terres se dégradent progressivement (perte de fertilité, érosion, encroûtement ...), jusqu'à devenir des sols incultes et nus.

Les pertes de surfaces cultivées se feront également à travers la pratique de la jachère et des actions de reboisement et de reforestation. On peut donc écrire que :

$$\left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right)_{-} = -\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{JRR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{Deg} \quad \text{éq. VII-18}$$

On aura donc globalement :

$$\left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Def} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{CRS} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{JRR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{Deg} \quad \text{éq. VII-19}$$

VII.6.4 Équations de variation des sols nus

Pendant un intervalle de temps ΔT donné, les variations des sols nus, sous l'action de l'homme et du climat, se font comme indiqué à la Figure VII-20.

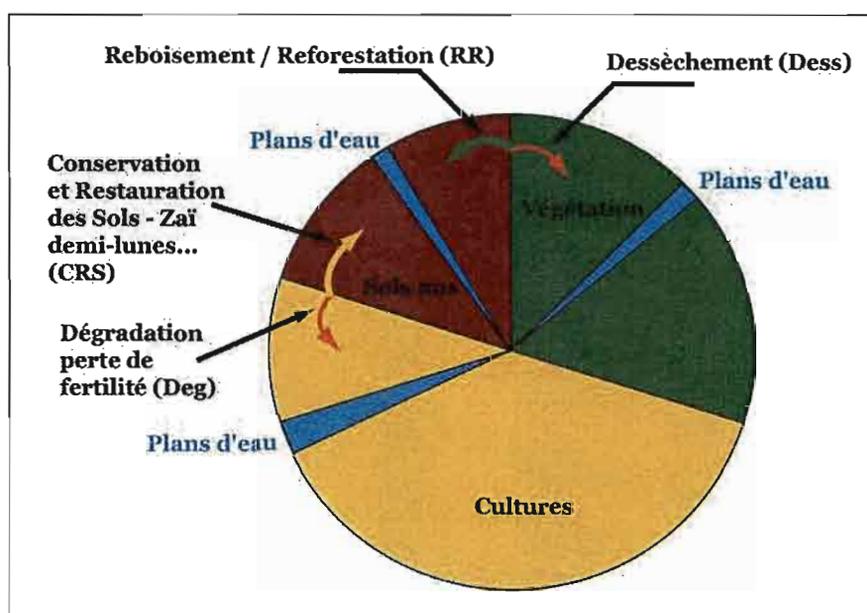


Figure VII-20 : Scénarii d'évolution des sols nus

L'augmentation des sols nus sera due :

- au dessèchement de la végétation par stress hydrique (Dess) ;
- à la dégradation par perte de fertilité et érosion des sols cultivées (Deg)

La diminution des sols nus sera due :

- aux actions de reboisement et de reforestation entreprises sur ces sols (RR) ;
- aux techniques de restauration et de conservation des sols (CRS)

Les équations des gains et des pertes s'écrivent :

$$\left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_+ = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Dess} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{Deg} \quad \text{éq. VII-20}$$

$$\left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_- = -\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{CRS} \quad \text{éq. VII-21}$$

D'où le bilan des variations s'écrit :

$$\left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Dess} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{Deg} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{CRS} \quad \text{éq. VII-22}$$

VII.6.5 Synthèse des équations

L'évolution réelle de la nature impose de considérer que les variations des trois indicateurs coexistent dans le même temps avec des intensités plus ou moins fortes qui font que l'une ou l'autre l'emportera lorsqu'on fait un bilan. On aura donc le système d'équations suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{JRR} + \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Def} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Dess} \quad (1) \\ \left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Def} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{CRS} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{JRR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{Deg} \quad (2) \\ \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{Dess} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{Deg} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right)_{CRS} \quad (3) \end{array} \right. \quad \text{éq. VII-23}$$

Dans les démarches de mise en équation des variations des indicateurs, nous avons implicitement considéré que les surfaces en eau ne variaient pas au cours du temps. Le système d'équations VII-23 n'est donc qu'une approximation de la dynamique réelle du bassin. En effet, lorsque l'on somme les équations (1), (2) et (3) du système d'équations VII-23, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right) + \left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right) + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right) = 0 \quad \text{éq. VII-24}$$

Or, l'équation d'état du bassin impose que :

$$\left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T}\right) + \left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T}\right) + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T}\right) + \left(\frac{\Delta S_{Pe}}{\Delta T}\right) = 0 \quad \text{éq. VII-25}$$

L'aménagement de l'espace en retenues d'eau se fait au gré des politiques gouvernementales en faveur de la mobilisation et de la maîtrise des ressources en eau et aussi à travers des financements isolés (ONG, etc.). Les variations des surfaces se feront donc suivant une fonction en escalier avec un pas de temps irrégulier.

Si à la date t_i , la surface totale des plans d'eau est p_i et qu'à une date ultérieure t_j il y a eu construction de barrages ou de retenues, la surface totale des plans passera de p_i à p_j par saut. La valeur $p_j - p_i$ du saut correspond à la surface totale des retenues d'eau construites entre t_i et t_j . Si par contre il n'y a pas eu de construction de nouvelles retenues d'eau, la surface totale des plans d'eau restera inchangée (Figure VII-21).

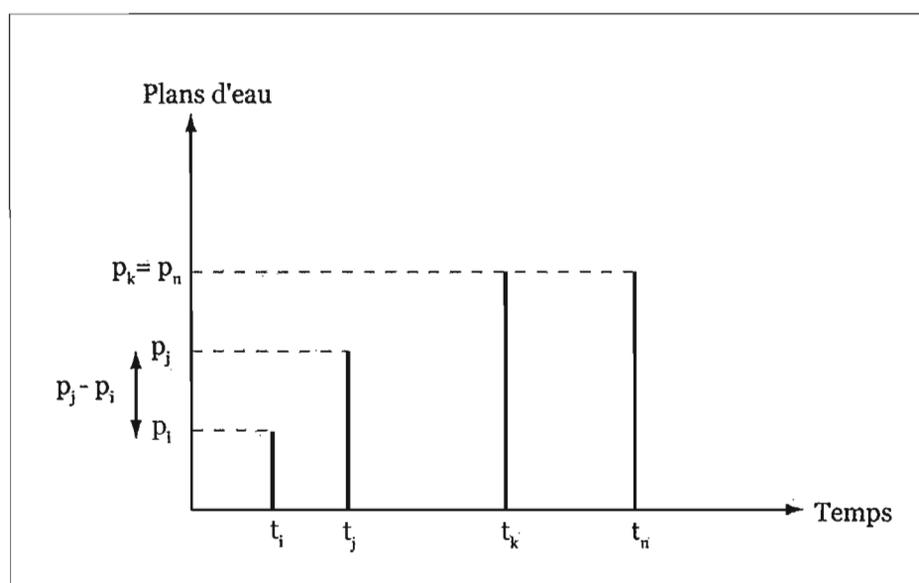


Figure VII-21 : Scénarii d'évolution des plans d'eau

Un recensement des retenues d'eau avec leurs dates de mise en eau, leurs positions géographiques et leurs superficies est donc indispensable pour définir l'évolution en escalier des plans d'eau.

Pour tenir compte des surfaces en eau, nous ajouterons au système d'équations VII-23 une quatrième équation « tautologique » afin d'assurer la validité de l'équation d'état du bassin puisqu'on n'a pas de modèle d'évolution. Le système d'équations traduisant la dynamique d'évolution des indicateurs sera donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{JRR} + \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{Def} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{Dess} \quad (1) \\ \left(\frac{\Delta S_{Cult}}{\Delta T} \right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{Def} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T} \right)_{CRS} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{JRR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T} \right)_{Deg} \quad (2) \\ \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T} \right) = \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{Dess} + \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T} \right)_{Deg} - \left(\frac{\Delta S_{Vg}}{\Delta T} \right)_{RR} - \left(\frac{\Delta S_{Sn}}{\Delta T} \right)_{CRS} \quad (3) \\ \left(\frac{\Delta S_{Pe}}{\Delta T} \right) = \left(\frac{\Delta S_{Pe}}{\Delta T} \right) \quad (4) \end{array} \right. \quad \text{éq. VII-26}$$

VII.7 Modèle d'évolution des surfaces en végétation naturelle

VII.7.1 Définition du modèle et hypothèse sur les conditions initiales

Tout comme pour les superficies cultivées, l'évolution annuelle des surfaces en végétation naturelle peut être estimée à partir d'une fonction antilogistique du type :

$$S_{Veg}(t) = S_{Veg-initial} - \frac{S_{Veg-initial} - S_{Veg-finale}}{1 + e^{-r(t-t_0)}} \quad \text{éq. VII-27}$$

La surface totale occupée par les cultures sur le bassin en 1910 est estimée à 0.49 million d'ha d'après le modèle d'évolution des superficies cultivées précédemment calibré. Il reste donc 1.51 millions d'hectares sur les 2 millions d'hectares que compte le bassin. Ce chiffre correspond à la somme des superficies occupées par la végétation, les sols nus et les plans d'eau. On considère qu'en 1910, le bassin se trouve dans un état d'anthropisation faible, constitué en grande partie de végétation naturelle. Nous estimons arbitrairement que la

superficie totale occupée par la végétation représente, à cette époque, 95% des 1.51 millions d'hectares restants, soit 1.43 million d'ha de végétation naturelle en 1910.

La valeur finale est donnée par les résultats des traitements d'image effectués au chapitre VI, soit 0.3 million d'hectare.

VII.7.2 Résultats du calibrage du modèle

Les résultats du calibrage du modèle sont donnés au Tableau VII-10. La Figure VII-22 donne l'estimation de l'évolution des superficies cultivées sur le bassin.

Tableau VII-10 : Résultats du calage du modèle logistique pour les superficies en végétation naturelle sur le Bassin du Nakambé à Wayen

| | Valeur initiale (10 ⁶ ha) | Valeur finale (10 ⁶ ha) | <i>r</i> | <i>t</i> ₀ | Somme carré écarts |
|----------------------|--|--|----------|-----------------------|--------------------------|
| Végétation naturelle | 1.5 | 0.3 | 0.159 | 1976 | 0.008 |

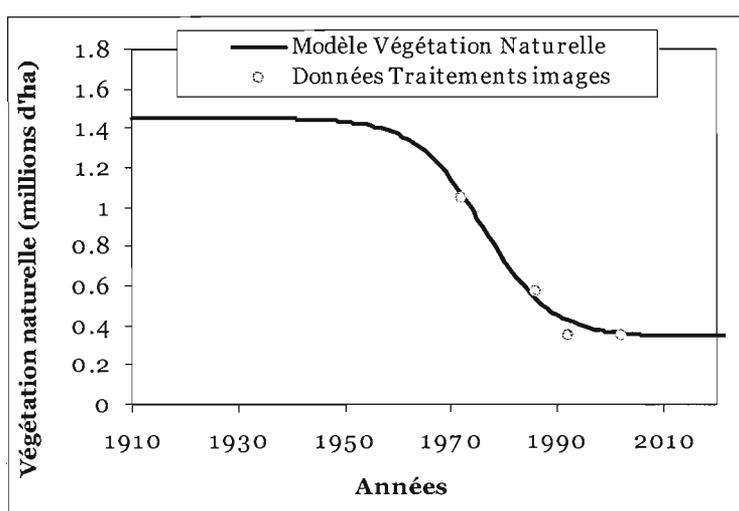


Figure VII-22 : Estimation de l'évolution des superficies en végétation naturelle sur le bassin du Nakambé à Wayen à l'aide d'un modèle de population

D'après le modèle, en 1976, la moitié des surfaces en végétation naturelle avait déjà disparue de la surface du bassin.

VII.8 Modèle d'évolution des sols nus et des plans d'eau

VII.8.1 Évolution de la somme « sols nus + plans d'eau »

Les modèles d'évolution des surfaces en cultivées et des surfaces en végétation naturelle ayant été définis et calibrés à l'échelle du bassin versant, il est aisé d'estimer la somme $(S_{Sn} + S_{Pe})$ à partir de l'équation d'état du bassin.

$$(S_{Sn} + S_{Pe}) = S_{BV} - (S_{Vg} + S_{Cult}) \quad \text{éq. VII-28}$$

Le modèle d'évolution de $(S_{Sn} + S_{Pe})$ est donné à la Figure VII-23.

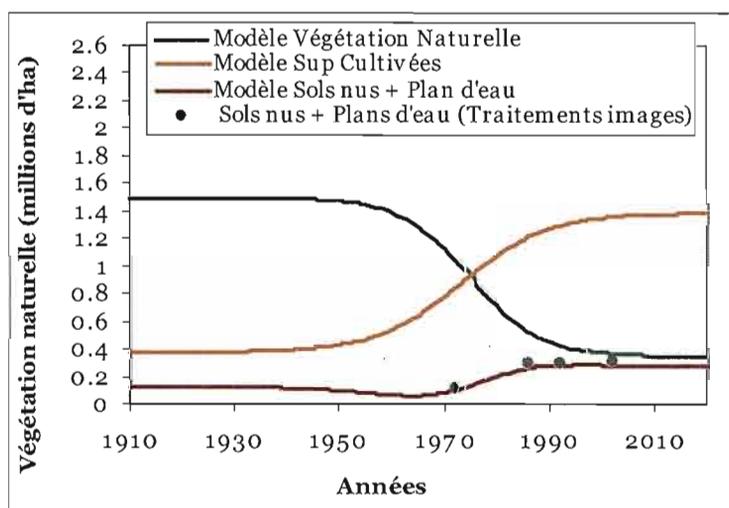


Figure VII-23 : Modèle d'évolution de la somme "sols nus + plans d'eau" à partir de l'équation d'état du bassin et des modèles de végétation et de culture

VII.8.2 Détermination de l'évolution des plans d'eau sur le bassin

Au Burkina Faso, le Programme National de Gestion de l'Information sur le Milieu (PNGIM), chargé d'améliorer la pertinence, la qualité et la disponibilité des informations sur l'environnement, a mis au point, en 1999, une Base de Données des Localités du Burkina (BDLB), avec une composante spatiale. Cette base de données a recensé 1457 barrages et retenues d'eau recensés sur l'ensemble du territoire avec entre autres leurs coordonnées géographiques, leurs dates de création et leurs superficies. Nous avons extrait de BDLB

l'ensemble des retenues d'eau du bassin du Nakambé à Wayen. On en dénombre 269 (Figure VII-25).

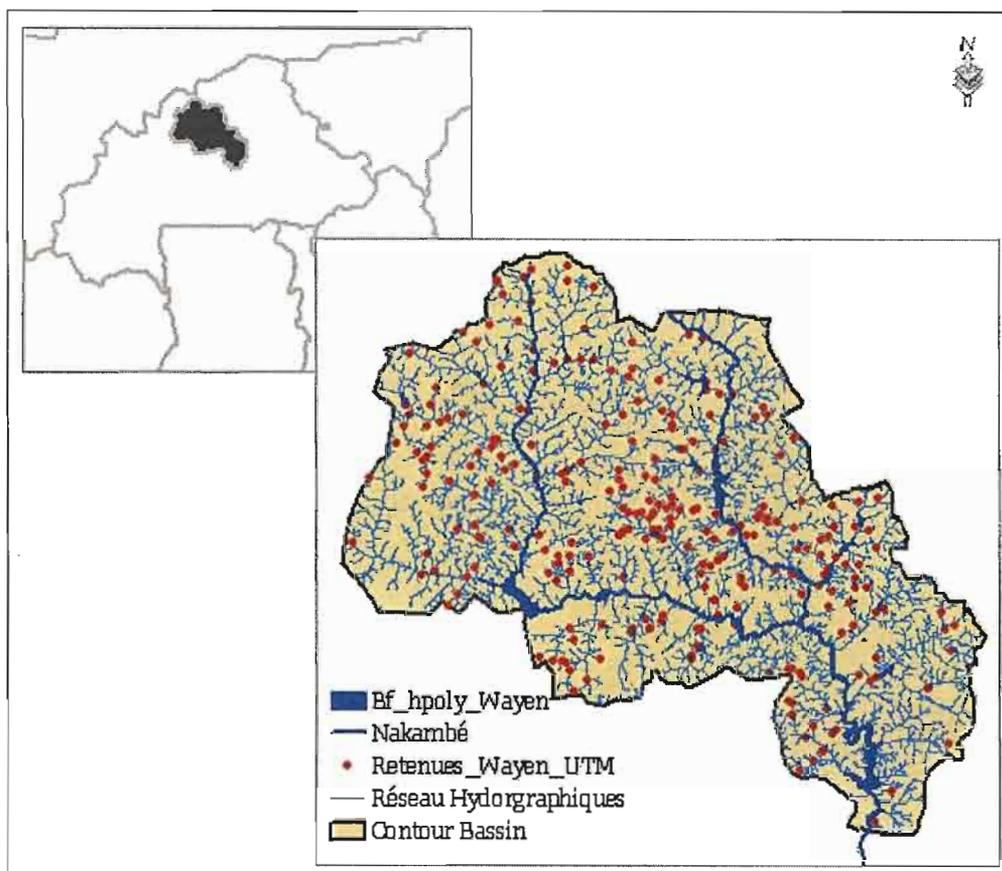


Figure VII-24 : Barrages et retenues d'eau sur le bassin du Nakambé à Wayen (d'après la base de données BDLB du PNGIM-1999)

De ces 269 retenues d'eau, seules celles ayant leurs dates de création et leurs superficies ont été gardées. Les résultats des traitements d'images ont ensuite été intégrés à ces données de manière à avoir un résultat homogène. La Figure VII-24 montre l'évolution de la surface totale occupée par les plans d'eau sur le bassin entre 1944 et 2002.

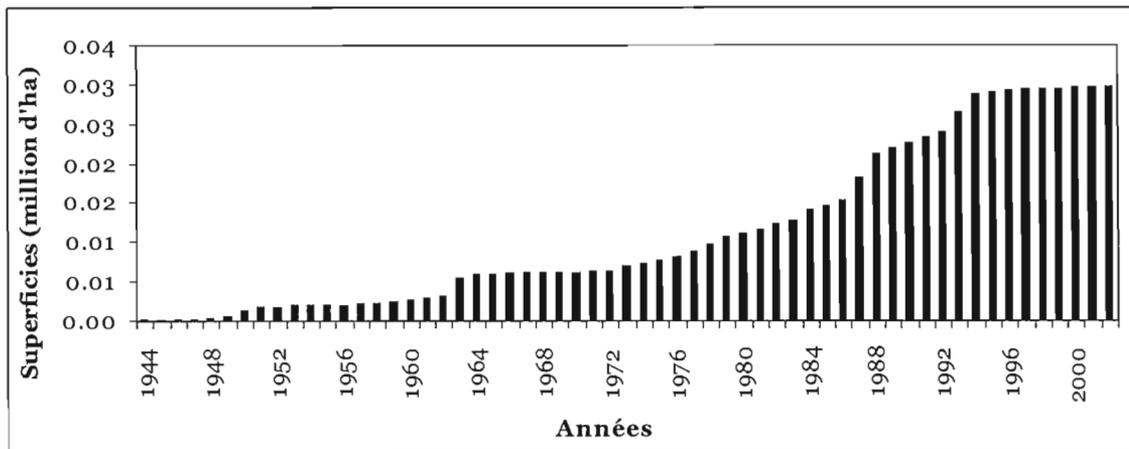


Figure VII-25 : Évolution de la superficie occupée par les plans d'eau sur le bassin du Nakambé à Wayen de 1944 à 2002

VII.8.3 Détermination de l'évolution des sols nus sur le bassin

L'évolution des sols nus sur le bassin se fait par simple soustraction entre la somme ($S_{Sn} + S_{Pe}$) et la surface occupée par les plans d'eau (Figure VII-27 et Figure VII-27). Plus on a d'information sur les dates d'apparition des barrages et retenues d'eau sur le bassin, plus les estimations sont « précises »

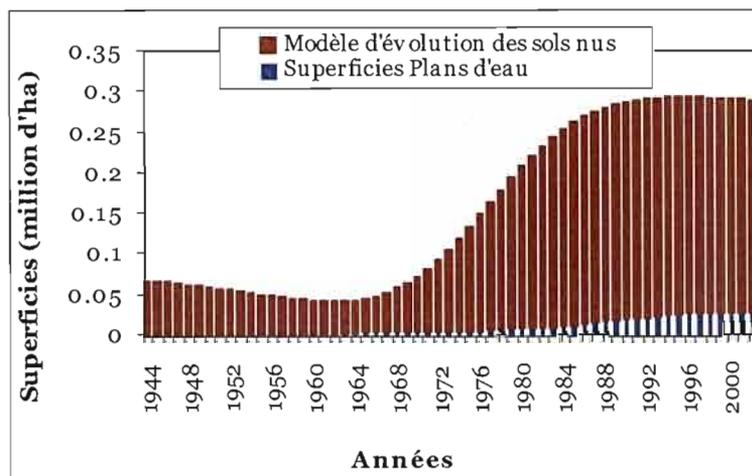


Figure VII-26 : Contributions relatives des plans d'eau et des sols nus au modèle $S_{Sn} + S_{Pe}$

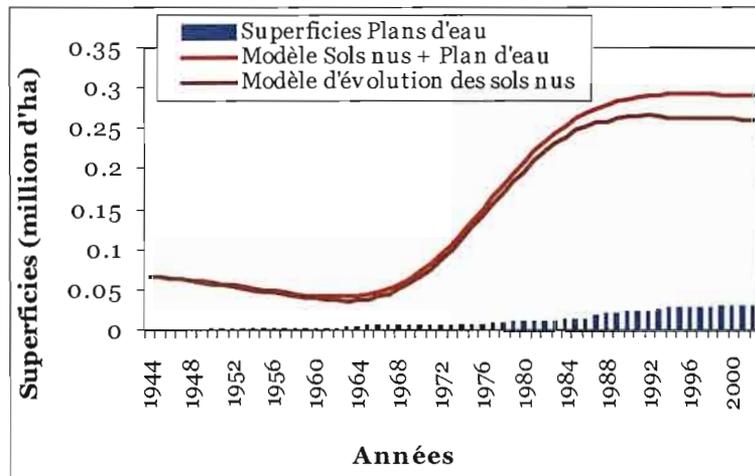


Figure VII-27 : Modèle d'évolution des sols nus sur le bassin du Nakambé à Wayen entre 1940 et 2002

VII.9 Synthèse des résultats

La Figure VII-28 donne une synthèse des dynamiques d'évolution de la population et des quatre indicateurs sur le bassin du Nakambé. Cette synthèse ne concerne que la période 1944-2002 car les données sur les superficies des plans d'eau ne sont disponibles que pour cette période. Nous présentons au Tableau VII-11 l'ensemble des valeurs annuelles obtenues.

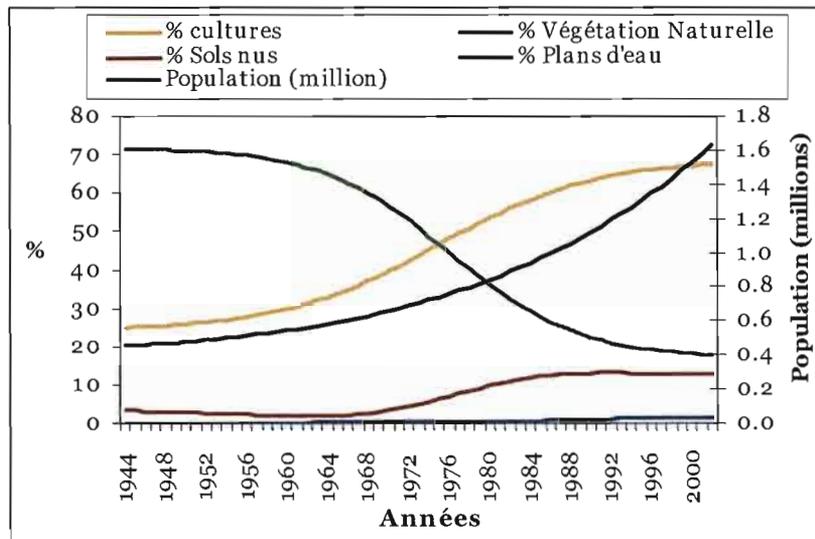


Figure VII-28 : Estimations de l'évolution des quatre indicateurs et de la population de 1944 à 2002 sur le bassin du Nakambé à Wayen

Tableau VII-11 : Évolution quinquennale de la population et des pourcentages de cultures, de végétation naturelle, de sols nus et de plans d'eau sur le bassin du Nakambé à Wayen

| Date | Population (million) | % cultures | % Végétation | % Sols nus | % Plans d'eau | Date | Population (million) | % cultures | % Végétation | % Sols nus | % Plans d'eau |
|------|----------------------|------------|--------------|------------|---------------|------|----------------------|------------|--------------|------------|---------------|
| 1944 | 0.45 | 25.01 | 71.67 | 3.31 | 0.01 | 1975 | 0.74 | 46.62 | 46.71 | 6.29 | 0.38 |
| 1945 | 0.46 | 25.12 | 71.61 | 3.26 | 0.01 | 1976 | 0.76 | 48.06 | 44.53 | 7.00 | 0.41 |
| 1946 | 0.46 | 25.25 | 71.54 | 3.20 | 0.01 | 1977 | 0.78 | 49.49 | 42.35 | 7.71 | 0.45 |
| 1947 | 0.47 | 25.39 | 71.46 | 3.13 | 0.02 | 1978 | 0.80 | 50.89 | 40.20 | 8.42 | 0.49 |
| 1948 | 0.47 | 25.55 | 71.37 | 3.06 | 0.02 | 1979 | 0.82 | 52.26 | 38.10 | 9.11 | 0.53 |
| 1949 | 0.47 | 25.72 | 71.26 | 2.98 | 0.03 | 1980 | 0.84 | 53.59 | 36.08 | 9.78 | 0.56 |
| 1950 | 0.48 | 25.93 | 71.14 | 2.87 | 0.07 | 1981 | 0.86 | 54.87 | 34.15 | 10.40 | 0.58 |
| 1951 | 0.48 | 26.15 | 70.99 | 2.76 | 0.09 | 1982 | 0.89 | 56.08 | 32.33 | 10.98 | 0.61 |
| 1952 | 0.49 | 26.41 | 70.82 | 2.68 | 0.09 | 1983 | 0.91 | 57.23 | 30.64 | 11.48 | 0.64 |
| 1953 | 0.49 | 26.70 | 70.62 | 2.58 | 0.10 | 1984 | 0.94 | 58.32 | 29.08 | 11.90 | 0.70 |
| 1954 | 0.50 | 27.02 | 70.39 | 2.49 | 0.10 | 1985 | 0.97 | 59.33 | 27.65 | 12.28 | 0.73 |
| 1955 | 0.51 | 27.38 | 70.12 | 2.40 | 0.10 | 1986 | 1.00 | 60.28 | 26.36 | 12.60 | 0.76 |
| 1956 | 0.51 | 27.78 | 69.81 | 2.30 | 0.11 | 1987 | 1.03 | 61.15 | 25.20 | 12.75 | 0.91 |
| 1957 | 0.52 | 28.23 | 69.45 | 2.21 | 0.11 | 1988 | 1.06 | 61.95 | 24.15 | 12.84 | 1.06 |
| 1958 | 0.53 | 28.72 | 69.04 | 2.13 | 0.11 | 1989 | 1.09 | 62.68 | 23.23 | 13.00 | 1.09 |
| 1959 | 0.54 | 29.27 | 68.56 | 2.04 | 0.12 | 1990 | 1.12 | 63.35 | 22.41 | 13.11 | 1.12 |
| 1960 | 0.54 | 29.88 | 68.01 | 1.98 | 0.13 | 1991 | 1.16 | 63.96 | 21.69 | 13.19 | 1.16 |
| 1961 | 0.55 | 30.55 | 67.38 | 1.93 | 0.14 | 1992 | 1.19 | 64.51 | 21.06 | 13.24 | 1.19 |
| 1962 | 0.56 | 31.29 | 66.66 | 1.90 | 0.15 | 1993 | 1.23 | 65.01 | 20.51 | 13.17 | 1.31 |
| 1963 | 0.57 | 32.09 | 65.84 | 1.80 | 0.27 | 1994 | 1.27 | 65.46 | 20.03 | 13.08 | 1.44 |
| 1964 | 0.58 | 32.96 | 64.91 | 1.83 | 0.29 | 1995 | 1.31 | 65.86 | 19.61 | 13.08 | 1.45 |
| 1965 | 0.59 | 33.90 | 63.87 | 1.93 | 0.30 | 1996 | 1.35 | 66.22 | 19.25 | 13.07 | 1.46 |
| 1966 | 0.61 | 34.92 | 62.71 | 2.07 | 0.30 | 1997 | 1.39 | 66.54 | 18.94 | 13.06 | 1.46 |
| 1967 | 0.62 | 36.00 | 61.41 | 2.28 | 0.31 | 1998 | 1.44 | 66.83 | 18.67 | 13.03 | 1.46 |
| 1968 | 0.63 | 37.15 | 59.99 | 2.55 | 0.31 | 1999 | 1.48 | 67.08 | 18.44 | 13.01 | 1.47 |
| 1969 | 0.64 | 38.37 | 58.43 | 2.89 | 0.31 | 2000 | 1.53 | 67.31 | 18.25 | 12.97 | 1.47 |
| 1970 | 0.66 | 39.65 | 56.73 | 3.31 | 0.31 | 2001 | 1.58 | 67.51 | 18.08 | 12.94 | 1.48 |
| 1971 | 0.67 | 40.97 | 54.92 | 3.79 | 0.31 | 2002 | 1.63 | 67.69 | 17.93 | 12.90 | 1.48 |
| 1972 | 0.69 | 42.34 | 52.99 | 4.34 | 0.32 | | | | | | |
| 1973 | 0.70 | 43.75 | 50.97 | 4.93 | 0.35 | | | | | | |
| 1974 | 0.72 | 45.18 | 48.87 | 5.59 | 0.37 | | | | | | |

VII.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé un modèle de population basé sur une fonction logistique pour estimer l'évolution de la population d'abord à l'échelle du Burkina Faso. Les projections de ce modèle ont ensuite été comparées à celles de la division des Nations Unies pour la population et aux projections de l'Institut National de la Statistique et de la Démographie du Burkina (INSD). Des projections comparables ont été constatées et nous ont confortés dans l'idée d'appliquer ce type de modèle pour caractériser la dynamique démographique sur le bassin du Nakambé à Wayen. Les résultats ont montré que la croissance démographique sur le bassin commencera à baisser en 2010, c'est-à-dire quasiment à la même date que sur l'ensemble du pays. Du fait d'une très lente baisse du taux de natalité sur le bassin, la croissance de la population reste assez élevée.

Un formalisme mathématique a également été mis au point pour traduire les évolutions relatives des quatre indicateurs sur le bassin. Les équations des variations de chaque indicateur par rapport aux autres ont été construites sur la base des pratiques agro-pastorales et des réactions d'adaptation des populations face aux nouvelles conditions climatiques et à la détérioration des conditions socio-économiques du fait de la pénurie monétaire généralisée que connaissent les États de la région sahélienne d'Afrique de l'Ouest.

La relation population - superficies cultivées sur le bassin également été mise en évidence dans ce chapitre. Elle a permis de conclure à une évolution de type logistique pour les superficies cultivées et la végétation. Deux modèles logistiques ont ainsi été calibrés pour traduire l'évolution annuelle de ces deux indicateurs à l'échelle du bassin. Il est apparu qu'en 1975-1976, la moitié du potentiel de terres cultivables sur le bassin aurait déjà été utilisé et qu'à la même époque la végétation avait elle aussi diminué de moitié.

L'évolution annuelle des sols nus sur le bassin a été estimée en se basant :

- sur le modèle d'évolution de la somme « sols nus – plans d'eau » sur le bassin à partir de l'équation d'état du bassin et des modèles d'évolution des surfaces cultivées et de la végétation ;
- sur le recensement de l'ensemble des retenues et barrages construits sur le bassin sur la période 1944-2002.

Nous avons donc pu mettre au point un outil permettant de caractériser la dynamique d'évolution des indicateurs entre les dates de prise de vue des images en tenant compte de la dynamique démographique et des pratiques culturelles des populations vivant sur le bassin. Même si les résultats obtenus dans ce chapitre traduisent de façon globale les interactions population–ressources au niveau du bassin, les résultats chiffrés auxquels nous avons abouti sont à prendre avec beaucoup de lucidité et de prudence du fait des insuffisances dues :

- aux erreurs dans les traitements d'images (chapitre VI) ;
- aux erreurs intrinsèques aux données des différents recensements que nous avons utilisés et aussi aux erreurs dues à l'estimation de la population sur le bassin à partir de la méthode des densités (chapitre II) ;
- au fait que le modèle de population ne prend pas en compte les phénomènes d'immigration et d'émigration au niveau du bassin ;
- aux différentes approximations que nous avons du faire par manque de données ;

PARTIE **III**

**VERS UNE MODELISATION HYDROLOGIQUE PRENANT EN
COMPTE L'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE : CAS DU
NAKAMBE A WAYEN**

C HAPITRE VIII

T RANSCRIPTION DE L'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE DANS LA WHC DU MODELE GR2M

L'objectif ultime de notre travail est d'améliorer les performances du modèle hydrologique GR2M à travers la prise en compte de la variabilité environnementale dans ce modèle. Après avoir identifié les facteurs prépondérants de l'évolution du milieu sahélien au chapitre V, quatre indicateurs de pression anthropique et/ou climatique ont été définis. Ce sont les proportions de surfaces en végétation naturelle, en cultures, en sols nus et en plans d'eau. Sur cette base, nous avons pu dresser, au chapitre VI, des cartes d'occupation du sol sur un bassin versant sahélien : celui du Nakambé à Wayen (Burkina Faso). Ces cartes d'occupation du sol nous ont donné l'état du bassin à des dates bien précises (1972, 1986, 1992 et 2002), sans que l'on puisse dire comment le milieu avait évolué entre ces dates. La réflexion menée au chapitre VII sur les relations entre la dynamique démographique et l'occupation du sol, a permis d'apporter une réponse à cette question. En effet, par le biais d'un modèle de population basé sur la fonction logistique, un scénario d'évolution des indicateurs a été mis au point. Ce modèle logistique a permis d'estimer annuellement les valeurs des indicateurs sur la période 1972-2002.

A ce stade de notre travail, nous avons une quantité suffisante de données et de résultats nous permettant d'entreprendre la réflexion sur la prise en compte de la dynamique du milieu sahélien dans GR2M. Dans ce huitième chapitre, nous présentons une démarche de transcription de l'évolution des états de surface dans la capacité de rétention en eau des sols. Des données annuelles de WHC sont ainsi générées pour le cas du bassin du Nakambé à Wayen. Elles prennent en compte la dynamique d'évolution des états de surface sur le bassin et sont parfaitement intégrables dans le modèle.

VIII.1 La WHC : interface modèle hydrologique - états de surface

Le milieu naturel peut être considéré comme un système constitué d'états de surface juxtaposés, associés ou interdépendants. On entend ici par état de surface, tout ensemble homogène, constitué du couvert végétal, du type de sol et de l'organisation pédologique superficielle (croûte). Il est acquis qu'en milieu sahélien, la répartition des pluies entre infiltration et écoulement est sous le contrôle quasi exclusif de cette donnée (Collinet et Valentin, 1979; Chevalier et Valentin, 1984; Casenave et Valentin, 1991, 1992). Dans ces régions, la variabilité hydrologique des bassins versants est directement liée à la dynamique des états de surface. C'est une donnée essentielle dans la démarche de modélisation que nous entreprenons, car une des caractéristiques du modèle hydrologique que nous utilisons est le réservoir sol. Son niveau maximum est assimilé à la capacité de rétention en eau du sol (WHC). La WHC des sols est fonction de plusieurs paramètres pédologiques dont, la nature du sol, sa porosité, sa granulométrie... La profondeur racinaire et le type de couverture végétale jouent également un rôle dans la détermination de la WHC. Ces différents paramètres peuvent varier énormément selon les conditions climatiques (pluviosité, ETP,...) et aussi en fonction des activités anthropiques (travail du sol, défrichage de la végétation,...). Ce lien entre les paramètres descriptifs des états de surface et la WHC est particulièrement intéressant car des indices de production de ruissellement sont reliés à chaque type d'état de surface (Tableau VIII-1).

Tableau VIII-1 : Tableau des coefficients de ruissellement au Nord et au Sud du Burkina Faso (d'après Fournier et al., 2000; et Yacouba et al., 2002)

| Indicateur d'état de surface | Coefficient de ruissellement (%) | |
|------------------------------|----------------------------------|-----|
| | Nord | Sud |
| Végétation naturelle | 17 | 13 |
| Culture | 24 | 20 |
| Sols nus | 54 | 50 |
| Plan d'eau / urbain | 100 | 100 |

Ainsi, pour un bassin versant donné, la connaissance des proportions de chaque type d'état de surface permettra d'évaluer l'aptitude globale du bassin au ruissellement, et donc à l'infiltration. Toute modification des proportions des différents types d'états de surface se traduira par une modification de l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration. De cette façon, il nous sera possible de transcrire l'évolution des états de surface dans la WHC des sols.

VIII.2 Échelle temporelle d'évolution du milieu et pas de temps de GR2M

Nous avons considéré au chapitre VII que la surface totale du bassin est, à tout moment, la somme des proportions des quatre types d'états de surface que nous avons définis. Entre les dates T_0 et T , un type donné d'état de surface restera le même ou se transformera entièrement ou partiellement en un autre type d'état de surface. Globalement, le bassin évoluera d'un état « initial » à un état « final » comme indiqué à la Figure VIII-1.

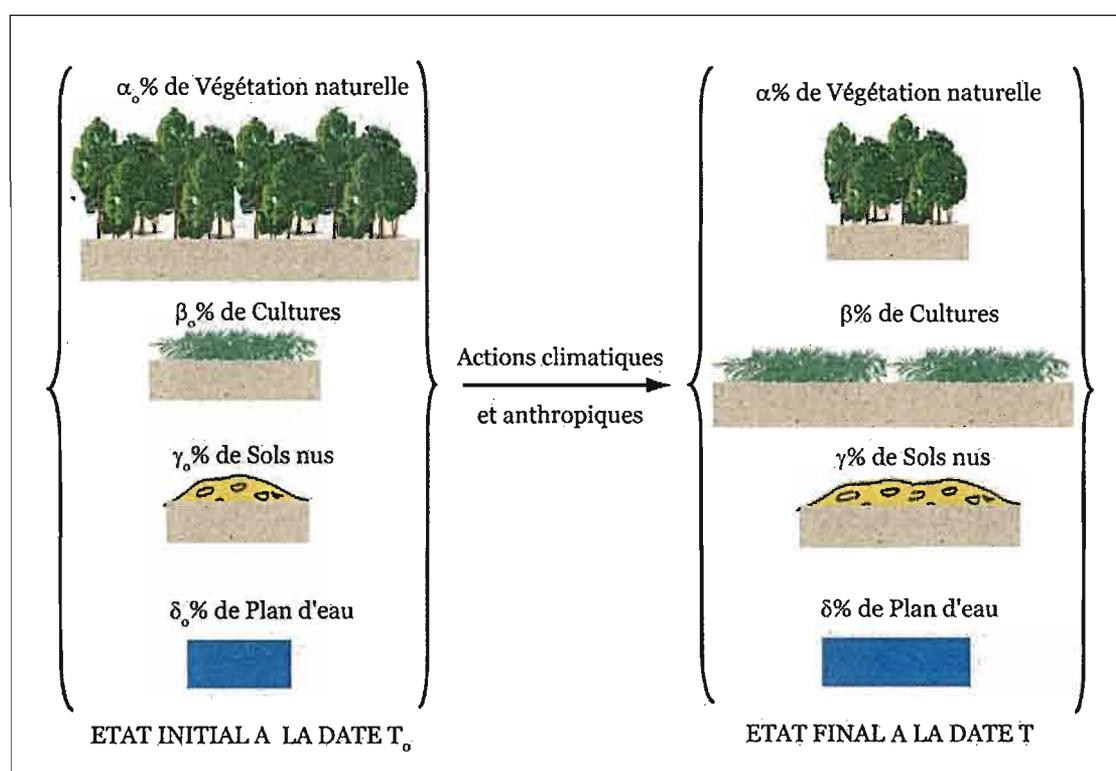


Figure VIII-1 : Modification des proportions des états de surface entre deux dates T_0 et T sous l'effet de l'homme et du climat

Nous avons montré au chapitre VI que ces modifications d'état de surface pouvaient être surveillées et évaluées efficacement à l'aide de données de télédétection. Cependant, les disponibilités en images ne permettent pas toujours cette surveillance à un pas de temps relativement fin et régulier. Or la modélisation que nous cherchons à mettre en œuvre nous l'impose : le pas de temps du modèle est le mois. Il est évident que ce pas de temps a peu de signification à l'échelle de la dynamique du milieu mais, un compromis peut être trouvé entre les deux échelles de temps. En effet, l'année hydrologique coïncide avec la saison culturale dans les régions que nous cherchons à modéliser. Or, d'une année hydrologique à l'autre, le milieu peut subir des modifications significatives du fait des feux de brousse, des

défrichements d'espaces en végétation naturelle pour la mise en culture, etc. En considérant qu'au cours de l'année hydrologique la WHC reste constante pour chaque type d'état de surface, l'échelle annuelle est un bon compromis entre le pas de temps du modèle et la vitesse d'évolution du milieu au Sahel.

VIII.3 Modulation de la WHC

VIII.3.1 Hypothèse d'un « état initial fictif » du milieu

Nous avons montré précédemment (Figure VIII-1), qu'entre deux dates T_0 et T , le milieu évolue d'un état composé de $\alpha_0\%$ de végétation naturelle, $\beta_0\%$ de cultures, $\gamma_0\%$ de sols nus et dégradés, et $\delta_0\%$ de plans d'eau, vers un état composé de chacun des quatre types d'état de surface avec respectivement les proportions $\alpha\%$, $\beta\%$, $\gamma\%$ et $\delta\%$.

Appelons « état zéro » un état fictif où le milieu serait complètement naturel (au sens d'absence totale de pression due à l'homme, et avec des conditions climatiques « normales »). Ce milieu naturel fictif serait en majorité constitué de végétation naturelle (les trois autres indicateurs existeraient dans des proportions que l'on peut négliger). Le schéma d'évolution du milieu sera donc comme indiqué dans la Figure VIII-2 :

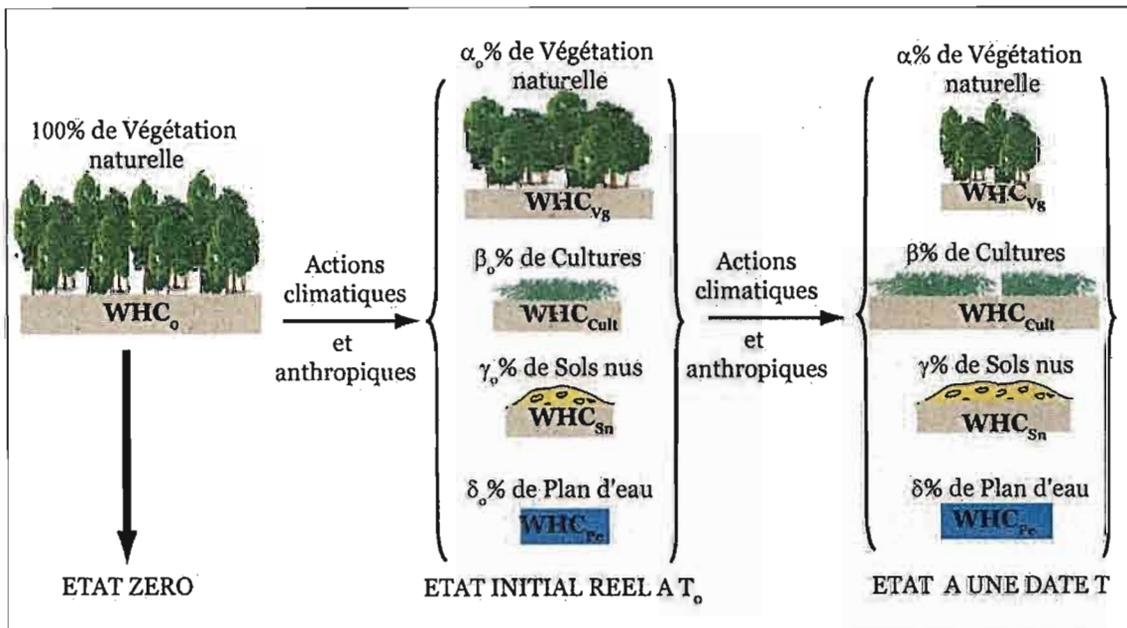


Figure VIII-2 : Mode de transformation du milieu avec l'hypothèse d'un état fictif constitué à 100% de végétation naturelle

VIII.3.2 Modulation de la WHC de l'état zéro à l'état initial T_0

Sous l'effet conjoint de l'homme et du climat, on passe d'un état constitué à 100% de végétation naturelle à un état où :

- α_0 % de la surface du bassin reste en végétation naturelle,
- β_0 % de la surface du bassin a été défriché et mis en culture,
- γ_0 % de la surface du bassin s'est dégradé et est devenu du sol nu,
- δ_0 % de la surface du bassin a été aménagé en retenues d'eau.

Ces quatre proportions vérifient la condition :

$$\alpha_0 \% + \beta_0 \% + \gamma_0 \% + \delta_0 \% = 100\% \quad \text{éq. VIII-1}$$

Notons $(KrVg, WHC_{Vg})$, (KrC, WHC_{Cult}) , $(KrSn, WHC_{Sn})$, et $(KrPe, WHC_{Pe})$, les couples de valeurs représentant respectivement les coefficients de ruissellement et les capacités de rétention en eau des sols en végétation naturelle, des sols cultivés, des sols dégradés et des plans d'eau.

Une particularité hydrologique du milieu sahélien est la prédominance du mécanisme d'écoulement hortonien (Puech, 1993). Selon Hoton (1933), une partie de la pluie s'infiltré dans le sol et une autre ruisselle en surface. Le ruissellement de surface est dû à la saturation du sol, du fait de l'excès d'intensité de la pluie par rapport à la capacité d'infiltration des sols. Dans cette représentation de la transformation pluie-débit, chaque parcelle du bassin versant contribue au débit de la rivière en « produisant » un ruissellement de surface qui est fonction de sa capacité d'infiltration et de l'intensité de la pluie. On peut donc faire l'hypothèse suivante :

Toute variation de coefficient de ruissellement dans un sens et dans une proportion donnée, due à la transformation de l'un quelconque des quatre types d'états de surface en un autre, se traduit par une variation en sens inverse de la capacité de rétention en eau et dans la même proportion.

Cette hypothèse nous permet d'écrire, pour les différentes transformations ci-dessus citées, les équations suivantes :

- α_0 % de la surface du bassin est resté en végétation naturelle, la WHC de cette portion du bassin ne change pas. On aura :

$$(KrVg, WHC_{vg}) \Rightarrow (KrVg, WHC_{vg}) \quad \text{éq. VIII-2}$$

- β_0 % de la surface du bassin a été défriché et mis en culture. Pour cette portion du bassin, on passe d'un état caractérisé par le couple $(KrVg, WHC_{vg})$ à un état caractérisé par (KrC, WHC_{cult}) . Le coefficient de ruissellement passe de $KrVg$ à KrC . On peut écrire que :

$$KrC = \frac{KrC}{KrVg} \times KrVg \quad \text{éq. VIII-3}$$

Tout se passe comme si le coefficient de ruissellement initial, $KrVg$, avait été multiplié par le rapport $\frac{KrC}{KrVg}$. Il s'en suit donc, d'après l'hypothèse précédente, que la WHC initiale, WHC_{vg} , est multipliée par l'inverse du rapport précédent. On aura donc :

$$WHC_{cult} = \frac{KrVg}{KrC} WHC_{vg} \quad \text{éq. VIII-4}$$

- γ_0 % de la surface s'est dégradé et est devenu du sol nu. Pour cette portion du bassin, on est passé d'un état caractérisé par le couple $(KrVg, WHC_{vg})$ à un état caractérisé par $(KrSn, WHC_{sn})$. De même que précédemment, on aura :

$$WHC_{sn} = \frac{KrVg}{KrSn} WHC_{vg} \quad \text{éq. VIII-5}$$

- δ_0 % de la surface du bassin sera constitué de plans d'eau. Pour cette portion du bassin, on passe du couple $(KrVg, WHC_{vg})$ au couple $(KrPe, WHC_{pe})$ avec :

$$WHC_{pe} = \frac{KrVg}{KrPe} WHC_{vg} \quad \text{éq. VIII-6}$$

En tenant compte des proportions, on peut écrire que globalement, le bassin est passé d'un état caractérisé par le couple $(KrVg, WHC_{Vg})$ à un état dont la WHC est une combinaison linéaire des différentes capacités de rétention en eau qui sont apparues sur le bassin. D'où l'expression suivante :

$$WHC(T_0) = \left[\alpha_0\% + \beta_0\% \frac{KrVg}{KrC} + \gamma_0\% \frac{KrVg}{KrSn} + \delta_0\% \frac{KrVg}{KrPe} \right] WHC_{Vg} \quad \text{éq. VIII-7}$$

La Figure VIII-3 résume les différentes façons de moduler la WHC lorsque, sous l'action de l'homme et du climat, de la végétation naturelle est transformée en culture, sols nus et plans d'eau.

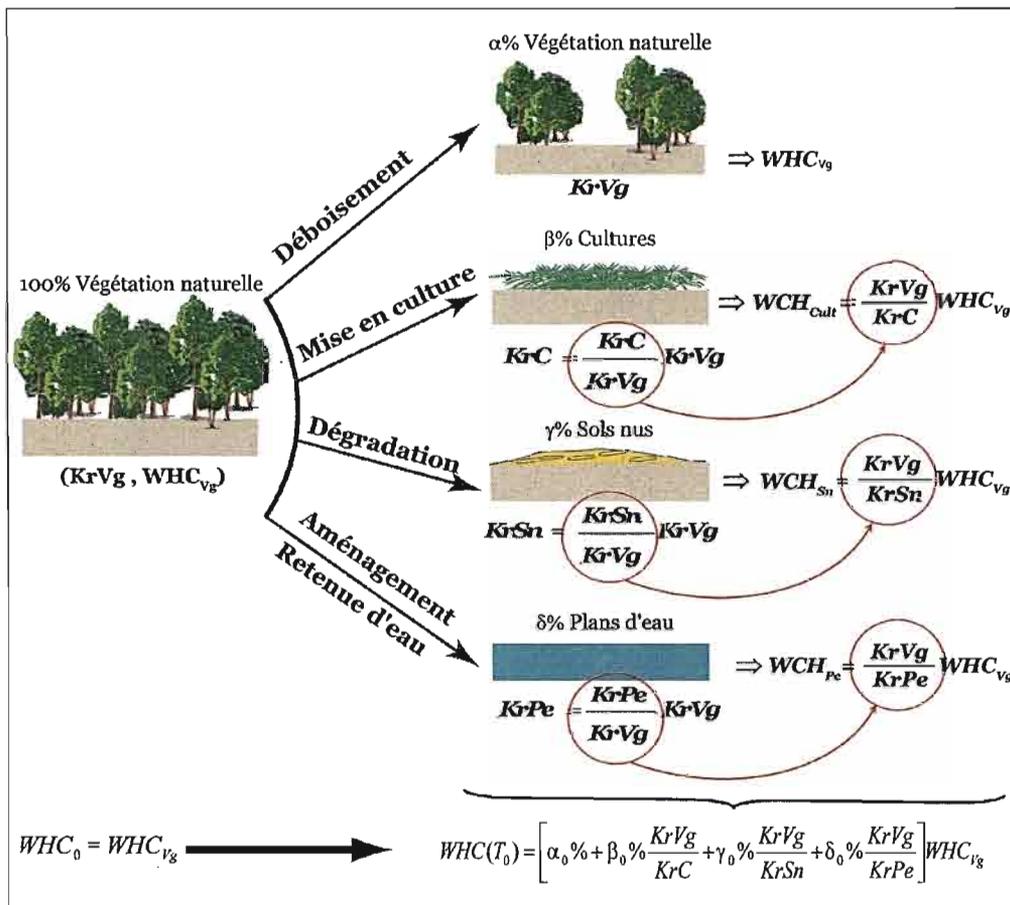


Figure VIII-3 : Modulation de la WHC pour un milieu qui, initialement en végétation naturelle, évoluerait vers un état anthropisé constitué des 4 types d'états de surface.

VIII.3.3 Modulation de la WHC de l'état initial T_0 à un état ultérieur T

Entre deux dates T_0 et T , le milieu évolue d'un état composé de $\alpha_0\%$ de végétation naturelle, $\beta_0\%$ de cultures, $\gamma_0\%$ de sols nus, et $\delta_0\%$ de plans d'eau, vers un état composé de chacun des quatre types d'état de surface avec respectivement les proportions $\alpha\%$, $\beta\%$, $\gamma\%$ et $\delta\%$.

La capacité de rétention globale étant une combinaison linéaire des capacités de rétention des différents types d'états de surface. On aura donc aux dates T_0 et T :

$$WHC(T_0) = \alpha_0\% \cdot WHC_{Vg} + \beta_0\% \cdot WHC_{Cult} + \gamma_0\% \cdot WHC_{Sn} + \delta_0\% \cdot WHC_{Pe} \quad \text{éq. VIII-8}$$

$$WHC(T) = \alpha\% \cdot WHC_{Vg} + \beta\% \cdot WHC_{Cult} + \gamma\% \cdot WHC_{Sn} + \delta\% \cdot WHC_{Pe} \quad \text{éq. VIII-9}$$

Si on pose que :

- $\alpha\% = \alpha_0\% + \Delta\alpha$
- $\beta\% = \beta_0\% + \Delta\beta$
- $\gamma\% = \gamma_0\% + \Delta\gamma$
- $\delta\% = \delta_0\% + \Delta\delta$

Où $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$ et $\Delta\delta$ sont des entiers relatifs compris entre -1 et 1, et représentent respectivement les variations (en pourcentage) de végétation naturelle, de cultures, de sols nus et de plans d'eau entre les date T_0 et T . Ces entiers relatifs sont tels que :

$$(\alpha_0\% + \Delta\alpha) + (\beta_0\% + \Delta\beta) + (\gamma_0\% + \Delta\gamma) + (\delta_0\% + \Delta\delta) = 100\%$$

Comme $\alpha_0\% + \beta_0\% + \gamma_0\% + \delta_0\% = 100\%$, il faut nécessairement que :

$$(\Delta\alpha + \Delta\beta + \Delta\gamma + \Delta\delta) = 0 \quad \text{éq. VIII-10}$$

Cette dernière équation traduit le fait que toute augmentation de proportion d'un type d'état de surface se traduit :

- soit par une diminution de l'un ou l'autre des différents types d'états de surface dans la même proportion,
- soit par une diminution simultanée de plusieurs types d'état de surface de sorte que la somme des diminutions soit égale à l'augmentation précédente.

On aura donc finalement pour la WHC à la date T :

$$WHC(T) = WHC(T_0) + (\Delta\alpha \cdot WHC_{Vg} + \Delta\beta \cdot WHC_{Cult} + \Delta\gamma \cdot WHC_{Sn} + \Delta\delta \cdot WHC_{Pe}) \quad \text{éq. VIII-11}$$

Posons : $(\Delta\alpha \cdot WHC_{Vg} + \Delta\beta \cdot WHC_{Cult} + \Delta\gamma \cdot WHC_{Sn} + \Delta\delta \cdot WHC_{Pe}) = \varepsilon \cdot WHC(T_0)$

avec $-1 \leq \varepsilon \leq \frac{WHC_{Vg} + WHC_{Cult} + WHC_{Sn} + WHC_{Pe}}{WHC(T_0)} - 1$

L'équation VIII-11 s'écrira donc :

$$WHC(T) = (1 + \varepsilon) \cdot WHC(T_0) \quad \text{éq. VIII-12}$$

La Figure VIII-4 donne une synthèse de ce mode de transformation.

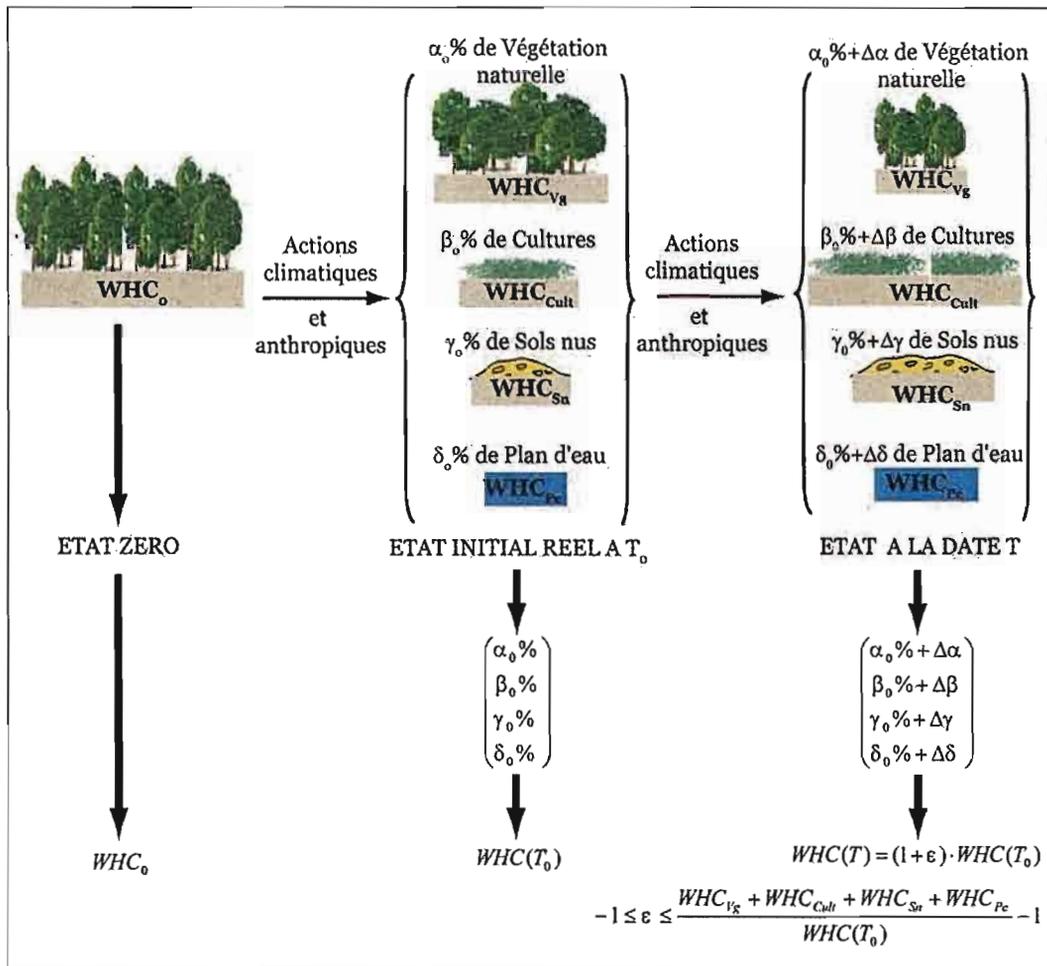


Figure VIII-4 : Modulation de la WHC pour un milieu passant d'un état initial anthropisé vers un autre état anthropisé avec des proportions différentes pour les 4 types d'états de surface.

VIII.4 Application au cas du Nakambé à Wayen

VIII.4.1 Données WHC de la carte des sols de la FAO

Rappelons que nous disposons de données WHC par maille d'un demi-degré carré sur le bassin du Nakambé à Wayen (Tableau VIII-2).

Tableau VIII-2 : Valeurs des WHC de la FAO pour chaque maille du bassin du Nakambé à Wayen

| YG | XG | Surface totale (km ²) | Surface dans le bassin (km ²) | WHC max (mm) | WHC moy (mm) | WHC min (mm) | WHC Saxton (mm) |
|---------------------------|-------|-----------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 14.25 | -2.25 | 2999 | 86 | 165.05 | 136.56 | 115.05 | 82.65 |
| 14.25 | -1.75 | 2999 | 49 | 183.24 | 156.57 | 133.24 | 89.47 |
| 13.75 | -2.75 | 3005 | 791 | 112.00 | 90.00 | 70.00 | 56.00 |
| 13.75 | -2.25 | 3005 | 29 | 127.55 | 103.67 | 83.41 | 65.39 |
| 13.75 | -1.75 | 3005 | 2291 | 160.43 | 133.60 | 112.25 | 84.21 |
| 13.75 | -1.25 | 3005 | 2482 | 154.56 | 126.24 | 105.28 | 81.81 |
| 13.25 | -2.75 | 3012 | 2601 | 80.74 | 61.67 | 42.65 | 66.75 |
| 13.25 | -2.25 | 3012 | 474 | 99.68 | 78.86 | 59.25 | 60.21 |
| 13.25 | -1.75 | 3012 | 2858 | 130.30 | 107.60 | 86.56 | 74.11 |
| 13.25 | -1.25 | 3012 | 2996 | 152.80 | 129.22 | 106.98 | 86.90 |
| 13.25 | -0.75 | 3012 | 264 | 166.03 | 142.72 | 119.42 | 89.94 |
| 12.75 | -2.25 | 3018 | 154 | 105.19 | 87.87 | 69.71 | 54.40 |
| 12.75 | -1.75 | 3018 | 1243 | 83.05 | 64.18 | 45.22 | 65.94 |
| 12.75 | -1.25 | 3018 | 2293 | 149.02 | 126.63 | 105.04 | 88.20 |
| 12.75 | -0.75 | 3018 | 1232 | 144.04 | 123.01 | 101.57 | 86.27 |
| 12.25 | -1.25 | 3024 | 198 | 138.51 | 116.75 | 96.37 | 98.75 |
| 12.25 | -0.75 | 3024 | 117 | 173.54 | 149.88 | 127.13 | 103.57 |
| WHC du bassin (mm) | | | | 133 | 110 | 89 | 78 |

Ces valeurs ont été calculées à partir de la carte des sols de établie par la FAO (Fao-Unesco, 1974-1981). Les WHC déduites de la carte des sols de la FAO constituent une source d'information de référence donnant des capacités de rétention en eau à l'échelle mondiale. Ces données reflètent l'état du milieu à une date que nous ne pouvons pas déterminer avec précision. En effet, les premières cartes des sols publiées par la FAO datent de 1973. Ces cartes ont par la suite été numérisées, et publiées, d'abord en 1992 sur disquettes, puis, en 1994, sur CD. Les données et mesures ayant servi à l'établissement des premières cartes dateraient donc de quelques années avant leur date de publication (1973).

D'autre part, un des seuls travaux de cartographie des types de sol à l'échelle du continent africain, et, datant d'avant 1973, est la carte des sols d'Afrique de la Commission de Coopération Technique d'Afrique (C.C.T.A., 1963), publiée en 1963. Dans l'hypothèse où cette carte aurait été utilisée comme source d'information dans l'établissement des premières cartes des sols de la FAO, cela situerait les sources d'informations utilisées par la FAO avant 1963. Une hypothèse simple est de considérer que les données de la FAO correspondent à l'état du bassin en 1963.

Les résultats obtenus au chapitre VII nous ont permis d'avoir les estimations des états de surface sur le bassin du Nakambé qui remontent à 1944. L'état du bassin en 1944 correspond à l'état le moins anthropisé que nous avons pu estimer à partir des données disponibles et des modèles d'estimations mis au point. L'année 1944 sera retenue comme date T_0 et l'état du bassin à cette date sera considéré comme « état initial réel », succédant à ce que nous avons appelé « état fictif zéro ». Nous avons donc trois états de référence du bassin :

- « l'état fictif zéro », est assimilé à un milieu constitué à 100% de végétation naturelle, et dont la capacité de rétention en eau est WHC_0 ,
- l'état du bassin en 1944, que nous appellerons état T_0 , correspondant à un minimum d'anthropisation et à des conditions climatiques « normales ». Sa capacité de rétention en eau est notée WHC_{1944} ,
- l'état FAO, correspondant à l'état du bassin en 1963. La WHC correspondante sera notée WHC_{FAO} .

VIII.4.2 Calcul de la WHC du bassin de 1963 à 2002

Nous avons considéré que les données sol de la FAO correspondent à l'état du bassin en 1963. C'est un état anthropisé dont les proportions des quatre indicateurs sont :

- pourcentage de végétation naturelle : $\alpha_{1963} = 65.84\%$,
- pourcentage de cultures : $\beta_{1963} = 32.09\%$,
- pourcentage de sols nus : $\gamma_{1963} = 1.80\%$,
- pourcentage de plans d'eau : $\delta_{1963} = 0.27\%$.

Les équations précédentes permettent de calculer la WHC du bassin à toute date ultérieure. Nous donnons ici un exemple de calcul pour le cas de l'année 1972.

VIII.4.2.1 Exemple de calcul : détermination de la WHC en 1972 à partir de celle de 1963

La composition du bassin en 1972 est comme suit :

- végétation naturelle : $\alpha_{1972} = 52\%$,
- cultures : $\beta_{1972} = 43.2\%$,
- sols nus : $\gamma_{1972} = 4.5\%$,
- plans d'eau : $\delta_{1972} = 0.3\%$

Les variations d'état de surface entre 1963 et 1972 sont donc :

- $\Delta\alpha = \alpha_{1972} - \alpha_{1963} = -13.84\%$
- $\Delta\beta = \beta_{1972} - \beta_{1963} = +11.11\%$
- $\Delta\gamma = \gamma_{1972} - \gamma_{1963} = +2.7\%$
- $\Delta\delta = \delta_{1972} - \delta_{1963} = +0.03\%$

On constate que 13.84% de la végétation naturelle a été transformé en culture (11.11%), en sols nus (2.7%) et en plan d'eau (0.03%). La variation de la WHC initiale D'après les équations VIII-11 et VIII-12, la WHC en 1972 s'écrit comme suit :

$$WHC_{1972} = \left[1 - \left(\frac{11.11}{100} \times \frac{KrVg}{KrC} + \frac{2.7}{100} \times \frac{KrVg}{KrSn} + \frac{0.03}{100} \times \frac{KrVg}{KrPe} \right) \right] \times WHC_{1963}$$

Les valeurs évolutives de WHC peuvent être calculées en utilisant les valeurs expérimentales de coefficient de ruissellement de Fournier *et al.*, (2000) ou de Yacouba *et al.*, (2002). On obtient, selon les valeurs de coefficients de coefficients de ruissellement utilisées le tableau suivant :

Tableau VIII-3 : WHC de 1972 en fonction de celle de 1963 et du jeu de coefficients de ruissellement utilisé

| Coefficient Ruissellement | WHC en 1972 |
|--|---|
| Yacouba <i>et al</i> (2002) | $WHC_{1972} = \left[1 - \left(\frac{11.11}{100} \times \frac{17}{24} + \frac{2.7}{100} \times \frac{17}{54} + \frac{0.03}{100} \times \frac{17}{100} \right) \right] \times WHC_{1963} = 0.913 \times WHC_{1963}$ |
| Fournier <i>et al.</i> (2000) | $WHC_{1972} = \left[1 - \left(\frac{11.11}{100} \times \frac{13}{20} + \frac{2.7}{100} \times \frac{13}{50} + \frac{0.03}{100} \times \frac{13}{100} \right) \right] \times WHC_{1963} = 0.921 \times WHC_{1963}$ |

Le Tableau VIII-4 donne les valeurs de la WHC du bassin en 1972 selon le jeu de coefficients de ruissellement utilisé.

Tableau VIII-4 : Valeurs de la WHC du bassin du Nakambé à Wayen en fonction du jeu de coefficients de ruissellement utilisé

| | WHC FAOmax (mm) | WHC FAOmoy (mm) | WHC FAOmin (mm) | WHC FAOsaxton (mm) |
|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| WHC en 1963 | 133 | 110 | 89 | 78 |
| WHC en 1972 Coef. Ruis. Yacouba et al., (2002) | 121.4 | 100.4 | 81.4 | 69.9 |
| WHC en 1972 Coef. Ruis. Fournier et al., (2000) | 122.5 | 101.3 | 82.1 | 70.5 |

La surface du bassin la somme des contributions de 17 mailles ayant chacune une valeur de WHC (Tableau VIII-2). Pour avoir les valeurs de WHC de chaque maille en 1972, nous considérerons que chaque maille contribue à la WHC totale du bassin proportionnellement à la surface qu'elle occupe. Le Tableau VIII-5 (respectivement Tableau VIII-6) présente les valeurs de WHC pour chaque maille du bassin pour les coefficients de ruissellement de Yacouba et al. (2002) (respectivement de Fournier et al. (2000)).

Tableau VIII-5 : Valeurs de la WHC en 1972 pour chaque maille du bassin. Cas des coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| | | WHC en 1972 | | | | | | | |
|---------------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| YG | XG | WHC FAOmax (mm) | Contribution à la WHC du bassin | WHC FAOmoy (mm) | Contribution à la WHC du bassin | WHC FAOmin (mm) | Contribution à la WHC du bassin | WHC FAOsaxon (mm) | Contribution à la WHC du bassin |
| 14.25 | -2.25 | 150.6 | 0.6 | 124.6 | 0.5 | 105.0 | 0.4 | 75.4 | 0.3 |
| 14.25 | -1.75 | 168.8 | 0.4 | 144.2 | 0.3 | 122.7 | 0.3 | 82.4 | 0.2 |
| 13.75 | -2.75 | 103.2 | 0.1 | 82.9 | 0.1 | 64.5 | 0.1 | 51.6 | 0.1 |
| 13.75 | -2.25 | 116.4 | 13.2 | 94.6 | 10.8 | 76.1 | 8.7 | 59.7 | 6.8 |
| 13.75 | -1.75 | 146.4 | 18.0 | 121.9 | 15.0 | 102.4 | 12.6 | 76.8 | 9.5 |
| 13.75 | -1.25 | 141.1 | 5.5 | 115.2 | 4.5 | 96.1 | 3.8 | 74.7 | 2.9 |
| 13.25 | -2.75 | 74.0 | 1.7 | 56.5 | 1.3 | 39.1 | 0.9 | 61.2 | 1.4 |
| 13.25 | -2.25 | 91.0 | 12.9 | 72.0 | 10.2 | 54.1 | 7.7 | 54.9 | 7.8 |
| 13.25 | -1.75 | 118.9 | 17.7 | 98.2 | 14.6 | 79.0 | 11.7 | 67.6 | 10.1 |
| 13.25 | -1.25 | 139.4 | 18.0 | 117.9 | 15.2 | 97.6 | 12.6 | 79.3 | 10.2 |
| 13.25 | -0.75 | 151.5 | 2.0 | 130.3 | 1.7 | 109.0 | 1.4 | 82.1 | 1.1 |
| 12.75 | -2.25 | 96.8 | 0.7 | 80.9 | 0.6 | 64.2 | 0.5 | 50.1 | 0.4 |
| 12.75 | -1.75 | 76.3 | 4.7 | 58.9 | 3.6 | 41.5 | 2.6 | 60.6 | 3.7 |
| 12.75 | -1.25 | 136.0 | 15.5 | 115.6 | 13.1 | 95.9 | 10.9 | 80.5 | 9.2 |
| 12.75 | -0.75 | 131.4 | 8.0 | 112.3 | 6.9 | 92.7 | 5.7 | 78.7 | 4.8 |
| 12.25 | -1.25 | 126.6 | 1.2 | 106.7 | 1.1 | 88.1 | 0.9 | 90.2 | 0.9 |
| 12.25 | -0.75 | 159.6 | 0.9 | 137.9 | 0.8 | 116.9 | 0.7 | 95.3 | 0.6 |
| WHC du bassin (mm) | | | 121.4 | | 100.4 | | 81.4 | | 69.9 |

Tableau VIII-6 : Valeurs de la WHC en 1972 pour chaque maille du bassin. Cas des coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

| YG | XG | WHC en 1972 | | | | | | | |
|---------------------------|-------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| | | WHC FAOmax (mm) | Contribution à la WHC du bassin | WHC FAOmoy (mm) | Contribution à la WHC du bassin | WHC FAOmin (mm) | Contribution à la WHC du bassin | WHC FAOsaxon (mm) | Contribution à la WHC du bassin |
| 14.25 | -2.25 | 152.0 | 0.6 | 125.7 | 0.5 | 105.9 | 0.5 | 76.1 | 0.3 |
| 14.25 | -1.75 | 170.0 | 0.4 | 145.2 | 0.4 | 123.6 | 0.3 | 83.0 | 0.2 |
| 13.75 | -2.75 | 103.9 | 0.1 | 83.5 | 0.1 | 64.9 | 0.1 | 51.9 | 0.1 |
| 13.75 | -2.25 | 117.4 | 13.3 | 95.4 | 10.8 | 76.8 | 8.7 | 60.2 | 6.8 |
| 13.75 | -1.75 | 147.7 | 18.2 | 123.0 | 15.1 | 103.3 | 12.7 | 77.5 | 9.5 |
| 13.75 | -1.25 | 142.3 | 5.6 | 116.2 | 4.6 | 96.9 | 3.8 | 75.3 | 3.0 |
| 13.25 | -2.75 | 74.6 | 1.8 | 57.0 | 1.3 | 39.4 | 0.9 | 61.7 | 1.5 |
| 13.25 | -2.25 | 91.8 | 13.0 | 72.6 | 10.3 | 54.5 | 7.7 | 55.4 | 7.9 |
| 13.25 | -1.75 | 120.0 | 17.8 | 99.1 | 14.7 | 79.7 | 11.8 | 68.2 | 10.1 |
| 13.25 | -1.25 | 140.7 | 18.1 | 118.9 | 15.3 | 98.5 | 12.7 | 80.0 | 10.3 |
| 13.25 | -0.75 | 152.8 | 2.0 | 131.4 | 1.7 | 109.9 | 1.4 | 82.8 | 1.1 |
| 12.75 | -2.25 | 97.5 | 0.7 | 81.5 | 0.6 | 64.6 | 0.5 | 50.4 | 0.4 |
| 12.75 | -1.75 | 76.9 | 4.7 | 59.4 | 3.7 | 41.9 | 2.6 | 61.0 | 3.8 |
| 12.75 | -1.25 | 137.2 | 15.6 | 116.6 | 13.3 | 96.7 | 11.0 | 81.2 | 9.2 |
| 12.75 | -0.75 | 132.6 | 8.1 | 113.2 | 6.9 | 93.5 | 5.7 | 79.4 | 4.9 |
| 12.25 | -1.25 | 127.6 | 1.3 | 107.6 | 1.1 | 88.8 | 0.9 | 91.0 | 0.9 |
| 12.25 | -0.75 | 160.8 | 0.9 | 138.9 | 0.8 | 117.8 | 0.7 | 96.0 | 0.6 |
| WHC du bassin (mm) | | | 122.4 | | 101.3 | | 82.1 | | 70.5 |

VIII.4.2.2 WHC évolutive entre 1963 et 2002

De la même manière que dans l'exemple précédent, on peut calculer la WHC du bassin pour les années 1964 à 2002. La Figure VIII-5 présente quatre modes d'évolution de la WHC.

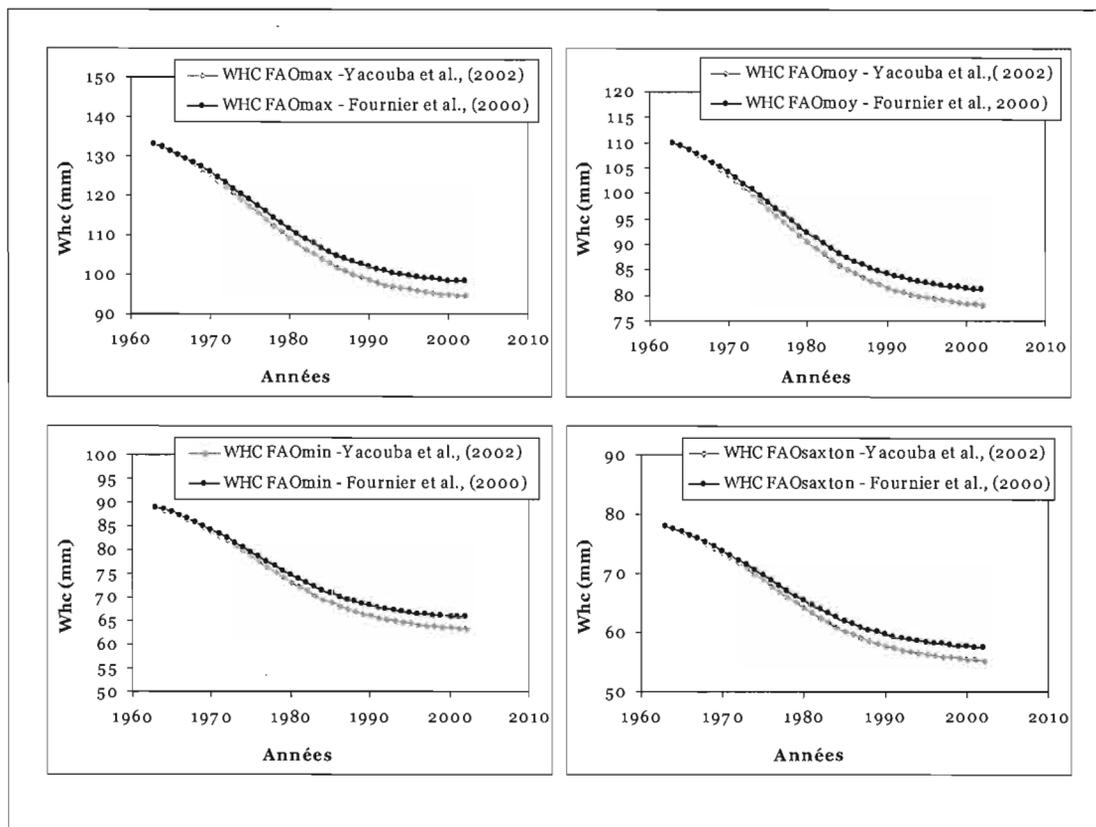


Figure VIII-5 : Évolution logistique de la WHC entre 1963 et 2002 sur le bassin du Nakambé à Wayen

VIII.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous poursuivions deux objectifs :

- Transcrire l'évolution des indicateurs d'évolution du milieu dans la capacité de rétention en eau du sol,
- Générer des valeurs de WHC qui reflètent la dynamique d'évolution du milieu et intégrables dans GR2M.

A partir de l'hypothèse d'un état « fictif zéro », assimilé à un milieu naturel sans actions anthropiques, dans des conditions climatiques normales, et constitué à 100% de végétation naturelle, un schéma synthétique d'évolution du milieu, sous l'effet conjoint de l'homme et du climat, a été proposé.

La prédominance du mécanisme hortonien en milieu sahélien nous a également permis de poser l'hypothèse fondamentale suivante : *Toute variation de coefficient de ruissellement dans un sens et dans une proportion donnée, due à la transformation de l'un quelconque des quatre types d'états de surface en un autre, se traduit par une variation en sens inverse de la capacité de rétention en eau et dans la même proportion.*

Sur la base de cette hypothèse et du schéma d'évolution du milieu, les équations traduisant les modifications de la WHC ont été déterminées.

Ces expressions théoriques ont par la suite été appliquées au cas du bassin du Nakambé à Wayen pour lequel nous disposons de données WHC de référence, issues de la carte des sols de la FAO. Ces données de référence reflètent l'état du milieu à une date que nous avons supposé égale à l'année 1963. Ces informations ont été utilisées pour calculer les valeurs évolutives de WHC à l'échelle du bassin et pour chaque maille d'un demi-degré carré.

C H A P I T R E IX

PERFORMANCES DE GR2M AVEC DES DONNEES EVOLUTIVES DE WHC : CAS DU BASSIN DU NAKAMBE A WAYEN

L'objectif de la réflexion que nous avons menée tout au long de ce travail est de contribuer à améliorer les performances de GR2M dans le contexte sahélien pour une meilleure estimation des ressources en eau de la région. Classiquement, GR2M ne prend pas en compte la dynamique du milieu. Les simulations sont faites en considérant, de façon implicite, que les caractéristiques hydrologiques des bassins sont stables dans le temps. Cela n'est pas vrai pour les régions sahéliennes qui ont connu de profondes modifications environnementales notamment au niveau des états de surface. Afin de mieux prendre en compte la variabilité de l'environnement dans le modèle, nous nous sommes attachés, dans les précédents chapitres, à décrire, analyser et modéliser les modifications du milieu qui ont un impact sur les états de surface et, au final, sur les capacités d'infiltration et de ruissellement des sols. Nous avons proposé une méthodologie permettant de moduler la hauteur maximale du réservoir sol du modèle en fonction de la dynamique des états de surface. Cette hauteur maximale a été assimilée à la capacité de rétention en eau des sols (WHC). Des données évolutives de WHC ont ainsi été produites pour le cas particulier du bassin du Nakambé à Wayen. Elles intègrent la dynamique d'évolution du milieu sur ce bassin et sont intégrables dans le modèle.

L'objectif de ce dernier chapitre est d'évaluer et analyser les performances du modèle avec ces nouvelles données. Il s'agira également, d'une part, de comparer les nouvelles performances du modèle à celles du cas classique où la WHC reste constante et, d'autre part, à celles du cas où la WHC évolue linéairement. Ce type d'évolution a été utilisé dans une récente étude (Mahé *et al.*, 2005) et avait montré des améliorations dans les performances du modèle. Malgré la différence dans la prise en compte des types d'états de surface (3 types contre 4 dans notre étude), une comparaison des résultats nous a semblé intéressante à faire.

IX.1 Protocole et périodes de calage-validations

IX.1.1 Choix des périodes de calage-validations

La rupture climatique au Sahel ayant introduit une hétérogénéité dans les séries de données climatiques, et aussi une modification du fonctionnement hydrologique des bassins versants, le choix des périodes de calage devient primordial pour la spécification des paramètres du modèle. Nous avons donc choisi plusieurs périodes de calage correspondant à des périodes de caractéristiques climatiques différentes les unes des autres. Les périodes retenues sont présentées au Tableau IX-1. Les trois premières lignes de ce tableau nous permettent de réaliser des calage-validations croisés. Ces périodes ont été utilisées lors de la recherche d'optimums pour la WHC au chapitre IV. La dernière période de calage est la plus longue (20 ans). Cette période a été choisie afin de donner au modèle une série de données de calage représentative d'une plus grande diversité de réponses du bassin et intégrant également une grande variabilité de conditions climatiques.

Tableau IX-1 : Périodes de calage-validations retenues

| Périodes de calage | Périodes de validation |
|--------------------|-----------------------------------|
| 1965-1972 | 1973-1986 ; 1987-1995 ; 1973-1995 |
| 1973-1986 | 1965-1972 ; 1987-1995 |
| 1987-1995 | 1965-1972 ; 1973-1986 ; 1965-1986 |
| 1965-1975 | 1976-1995 |
| 1965-1985 | 1986-1995 |

IX.1.2 Protocole de calage-validation

Rappelons qu'au chapitre VIII, nous avons généré 8 types différents de données sol évoluant suivant un modèle logistique de population. Ces données seront appelées « WHC logistique ». Nous disposons également de 8 types différents de WHC évoluant linéairement entre les dates des images (« WHC Linéaire »). En plus du fichier de données WHC fixes, on a un total de 17 types différents de données WHC pour la réalisation des tests de performance dans ce chapitre (Figure IX-1).

Des études récentes (Ardoin, 2004; Mahé *et al.*, 2005) ont montré que les données de pluie CRU donnaient de meilleurs résultats de modélisation avec GR2M que celles de la banque de données SIEREM (pluie IRD). Nous choisirons donc de n'utiliser que la grille de pluie CRU dans ce chapitre. Le nombre de jeux différents de données d'entrée du modèle est donc 1 x 1 x

17 = 17. Combinés aux 10 périodes de calage-validation du Tableau IX-1, on obtient 17 x 10 = 170 tests de calage-validation pour l'évaluation et l'analyse comparée des performances du modèle.

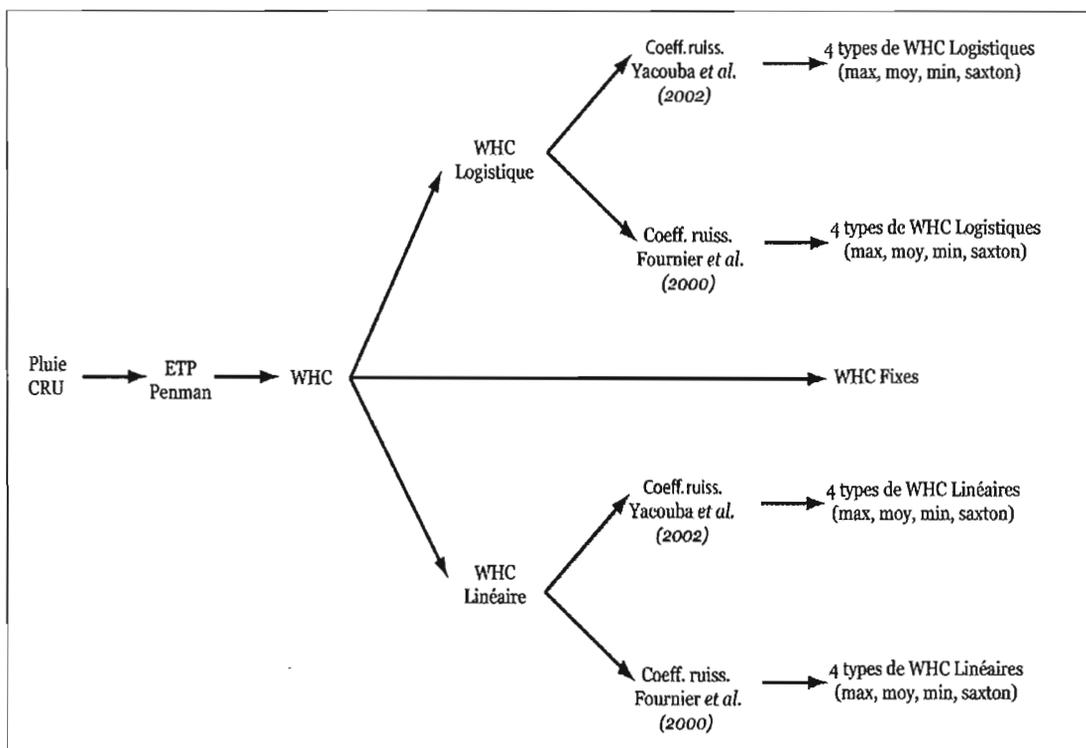


Figure IX-1 : Dix sept jeux de données pour l'évaluation des performances de GR2M avec des données évolutives et fixes de WHC

IX.2 Résultats des performances de GR2M avec les WHC logistiques

Pour une période de calage donnée, on a 8, 16 ou 24 validations différentes selon le nombre de périodes de validation disponibles (1, 2 ou 3). Les deux tableaux (Tableau IX-2 et Tableau IX-3) présentent les résultats obtenus. La Figure IX-2 donne une synthèse des NASH de calage en fonction des NASH de validation. Ces graphiques montrent des performances contrastées en fonction du choix de la période de calage. Le calage du modèle est globalement correct sur l'ensemble des périodes retenues. On obtient des NASH forts intéressants en validation en fonction de la période de calage et du type de WHC choisi. Nous analysons les résultats pour chaque série de tests dans les sections suivantes.

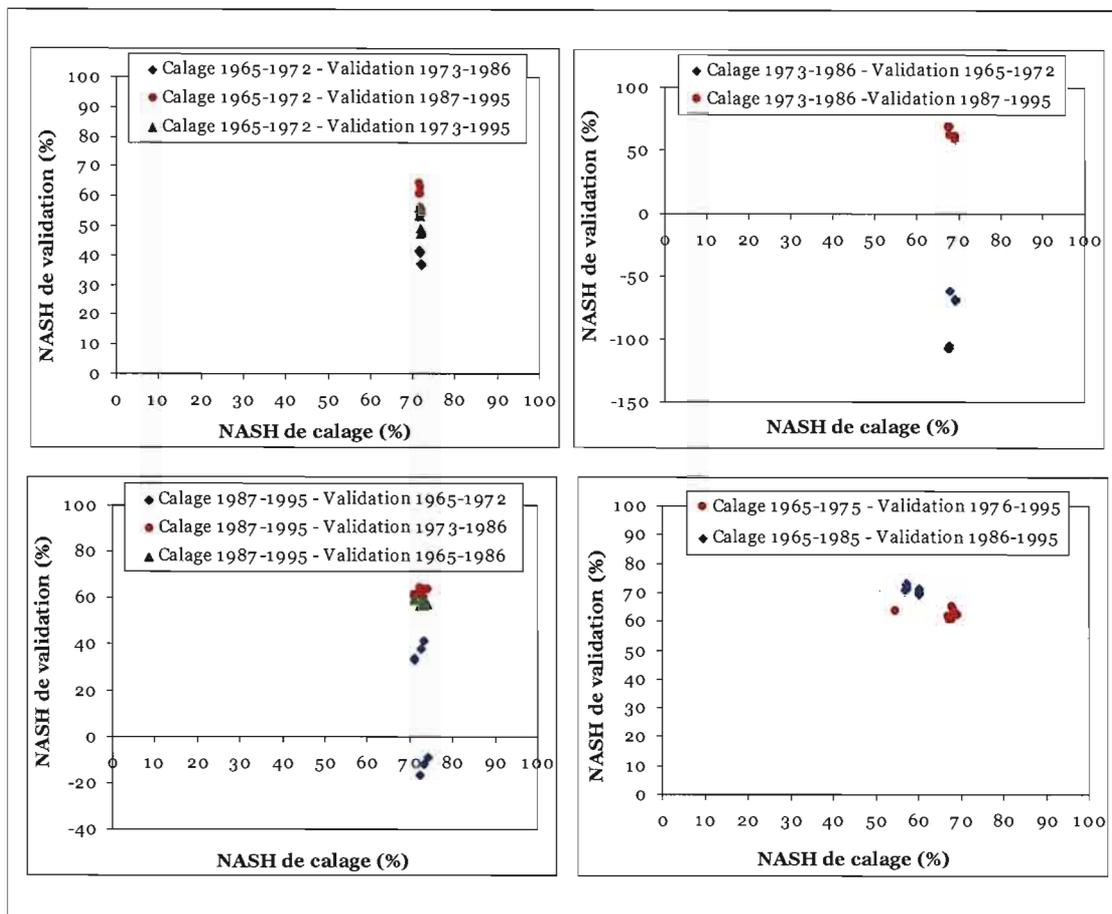


Figure IX-2 : Résultats des performances de GR2M avec des WHC logistiques. NASH de calage en fonction du NASH de validation pour les 10 périodes de calage-validations

Tableau IX-2 : Performances de GR2M sur le Nakambé à Wayen. Cas de l'évolution logistique de la WHC. Calage-validation croisés

| Coefficients de ruissellement | Type de WHC | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|-------------------------------|----------------|------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.215 | 0.76 | 72 | 37.1 | 56 | 49 |
| | Whc Fao moy | 0.195 | 0.748 | 72.1 | 37.1 | 55 | 48.4 |
| | Whc Fao min | 0.175 | 0.731 | 72 | 37 | 53.5 | 47.4 |
| | Whc Fao saxton | 0.167 | 0.734 | 72.2 | 36.5 | 53.8 | 47.5 |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.214 | 0.76 | 71.6 | 41.7 | 64.3 | 55.9 |
| | Whc Fao moy | 0.194 | 0.747 | 71.8 | 41.4 | 62.8 | 54.8 |
| | Whc Fao min | 0.174 | 0.73 | 71.7 | 41.1 | 60.7 | 53.4 |
| | Whc Fao saxton | 0.166 | 0.732 | 71.9 | 40.6 | 60.7 | 53.3 |
| Coefficients de ruissellement | Type de WHC | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation | NASH Validation | |
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1987-1995 | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.331 | 0.815 | 67.6 | -106.9 | 67.9 | |
| | Whc Fao moy | 0.305 | 0.789 | 67.6 | -106.9 | 67.8 | |
| | Whc Fao min | 0.277 | 0.759 | 67.7 | -105.2 | 67.5 | |
| | Whc Fao saxton | 0.266 | 0.754 | 67.3 | -106.7 | 67.5 | |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.319 | 0.799 | 68.9 | -68.6 | 58.2 | |
| | Whc Fao moy | 0.293 | 0.774 | 68.9 | -69 | 59 | |
| | Whc Fao min | 0.267 | 0.743 | 68.9 | -68.2 | 60 | |
| | Whc Fao saxton | 0.254 | 0.738 | 67.9 | -62 | 60.8 | |
| Coefficients de ruissellement | Type de WHC | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.305 | 0.714 | 74.2 | -8.7 | 63.5 | 57 |
| | Whc Fao moy | 0.281 | 0.695 | 73.4 | -11.6 | 63.8 | 56.9 |
| | Whc Fao min | 0.256 | 0.674 | 72.2 | -16.3 | 64.4 | 56.9 |
| | Whc Fao saxton | 0.246 | 0.667 | 72.3 | -16.8 | 63.8 | 56.4 |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.274 | 0.694 | 73.4 | 41.2 | 60.2 | 59.1 |
| | Whc Fao moy | 0.253 | 0.675 | 72.5 | 37.9 | 60.7 | 59.2 |
| | Whc Fao min | 0.231 | 0.658 | 71.1 | 34 | 61.6 | 59.5 |
| | Whc Fao saxton | 0.221 | 0.649 | 71.1 | 33.4 | 61 | 58.9 |

Tableau IX-3 : Performances de GR2M sur le Nakambé à Wayen. Cas de l'évolution logistique de la WHC. Calage sur les périodes 1965-1975 ; 1965-1985 et validations sur 1976-1995 ; 1986-1995

| Mode d'évolution | Coefficients de ruissellement | Type de WHC | Calage 1965-1975 | | | NASH Validation 1976-1995 |
|----------------------|-------------------------------|----------------|------------------|-------|----------|---------------------------|
| | | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Evolution Logistique | Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.288 | 1 | 54.7 | 63.2 |
| | | Whc Fao moy | 0.231 | 0.885 | 66.7 | 61.7 |
| | | Whc Fao min | 0.208 | 0.861 | 67.1 | 60.6 |
| | | Whc Fao saxton | 0.199 | 0.862 | 67.5 | 60.4 |
| | Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.251 | 0.901 | 67.5 | 64.7 |
| | | Whc Fao moy | 0.228 | 0.883 | 68 | 63.8 |
| | | Whc Fao min | 0.206 | 0.861 | 68.4 | 62.6 |
| | | Whc Fao saxton | 0.197 | 0.861 | 68.8 | 62.1 |
| | | | | | | |
| Mode d'évolution | Coefficients de ruissellement | Type de WHC | Calage 1965-1985 | | | NASH Validation 1986-1995 |
| | | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Evolution Logistique | Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.284 | 0.824 | 57.1 | 72.6 |
| | | Whc Fao moy | 0.26 | 0.802 | 57.2 | 71.8 |
| | | Whc Fao min | 0.235 | 0.774 | 57.3 | 70.7 |
| | | Whc Fao saxton | 0.225 | 0.773 | 56.9 | 70.6 |
| | Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.279 | 0.812 | 60 | 70.7 |
| | | Whc Fao moy | 0.255 | 0.791 | 60 | 70.1 |
| | | Whc Fao min | 0.232 | 0.762 | 60 | 69.4 |
| | | Whc Fao saxton | 0.222 | 0.758 | 60 | 69.1 |

IX.2.1 Résultats du calage 1965-1972 et des validations sur les périodes 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995

Les résultats du Tableau IX-2 montrent que quelque soit le type de WHC utilisé, le calage du modèle sur 1965-1972 donne d'assez bons résultats. Les NASH obtenus sont de l'ordre de 72%. Les meilleures validations sont obtenues avec la WHC FAOmax qui donne respectivement pour les périodes 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995 des NASH de 41.7%, 64.3% et 55.9%. Les hydrogrammes de simulation et les débits moyens mensuels observés et simulés de ces cas sont présentés ci-après.

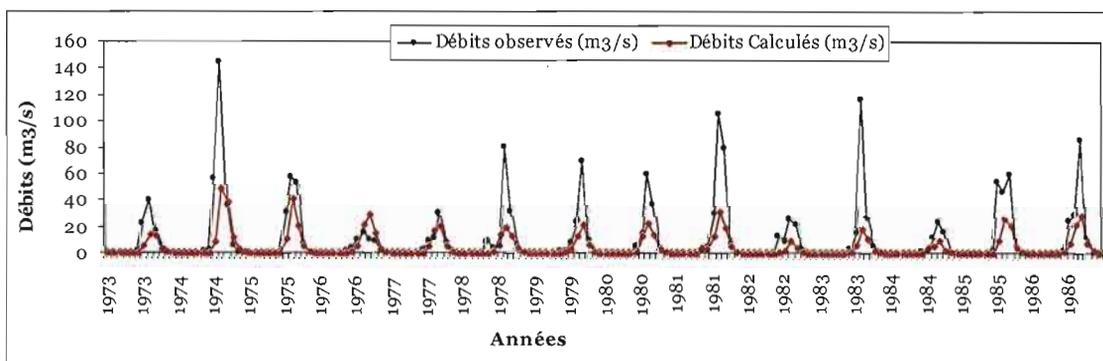


Figure IX-3 : Hydrogramme de simulation pour la période 1973-1986 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972

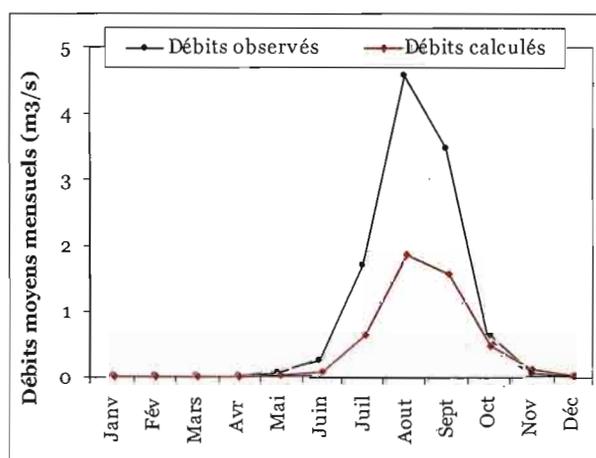


Figure IX-4 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1973-1986 Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972

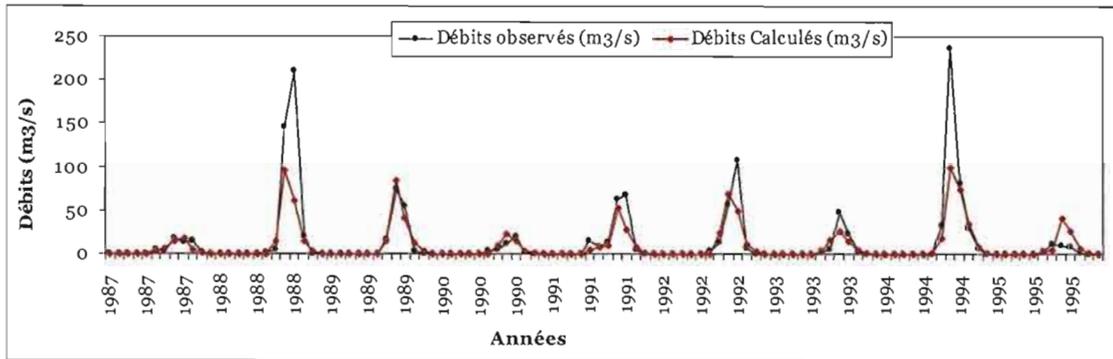


Figure IX-5 : Hydrogramme de simulation pour la période 1987-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972

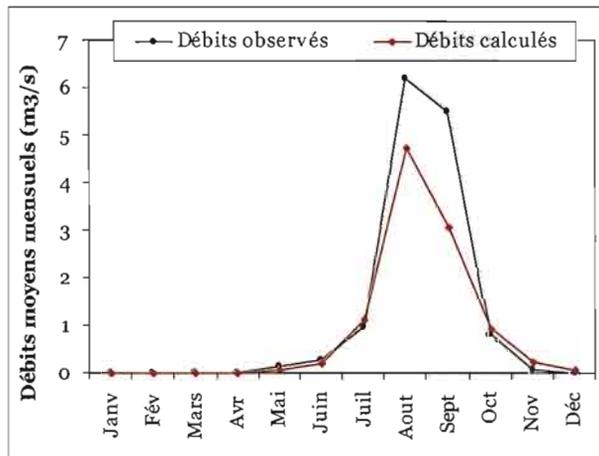


Figure IX-6 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1987-1995. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972

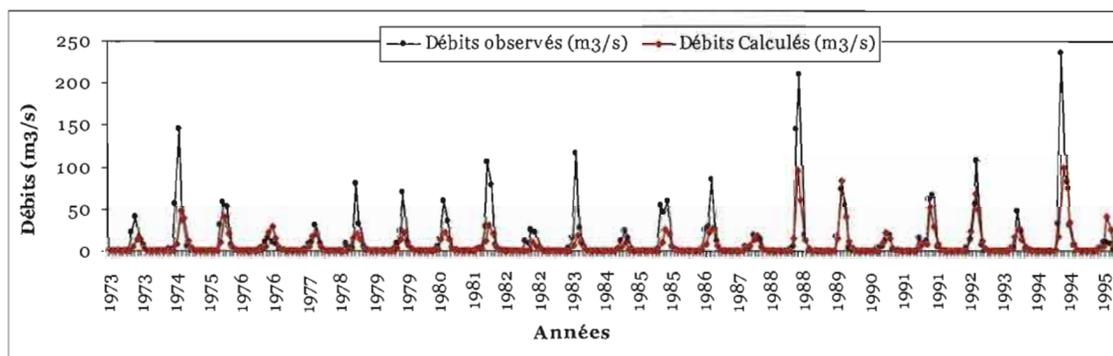


Figure IX-7 : Hydrogramme de simulation pour la période 1973-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972

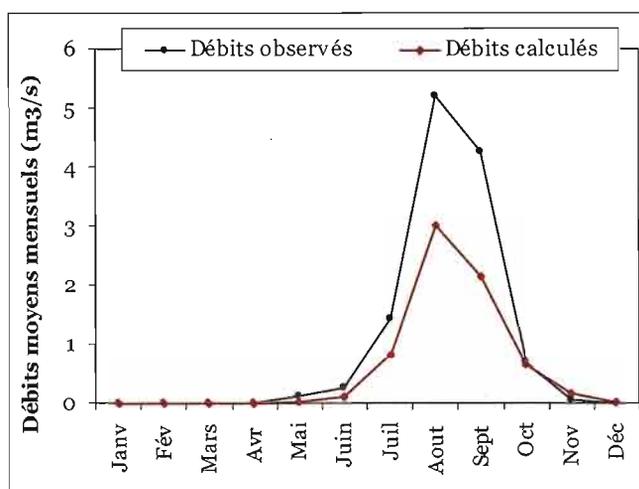


Figure IX-8 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1973-1995. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1972

On peut retenir pour cette première série de calage-validations que :

- le calage du modèle est satisfaisant (NASH autour de 72%),
- la forme des hydrogrammes observés est correctement reproduite par le modèle,
- les dates des pics de crue sont respectées,
- les débits maximums sont sous estimés

IX.2.2 Résultats du calage 1973-1986 et des validations sur les périodes 1965-1972 et 1987-1995

Les résultats pour cette seconde série de calage-validation (Tableau IX-2) montrent que l'on n'arrive pas à valider le modèle sur la période 1965-1972 avec les paramètres de calage issus de la période 1973-1986. Les NASH obtenus sont tous négatifs malgré des résultats de calage relativement satisfaisants (autour de 68%). Contrairement à la période précédente, la validation du modèle sur 1987-1995 donne une performance maximale de 67.9% avec WHC FAOmax. Nous présentons pour ce cas l'hydrogramme de simulation et les débits moyens mensuels observés et calculés.

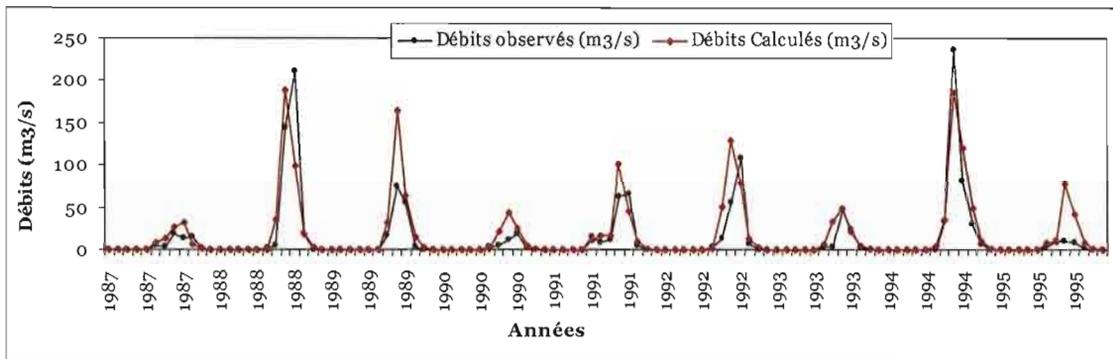


Figure IX-9 : Hydrogramme de simulation pour la période 1987-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1973-1986

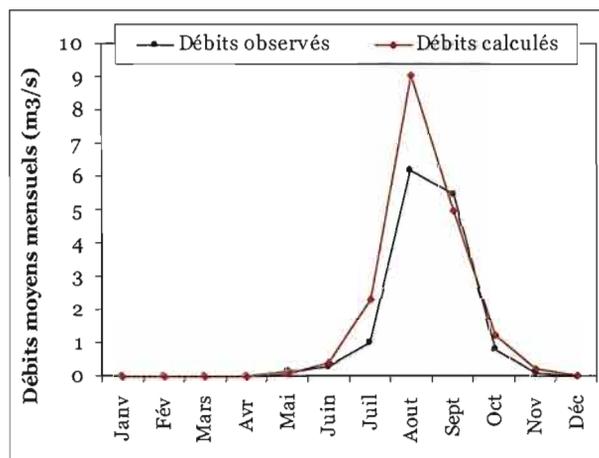


Figure IX-10 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1987-1995. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1973-1986

Pour cette seconde série de tests, nous retiendrons que :

- contrairement à la période 1987-1995, on n'arrive pas à valider le modèle sur la période 1965-1972 avec des paramètres de calage issus de la période 1973-1986,
- pour la période 1987-1995, la forme des hydrogrammes est correcte, les dates des pics sont respectées, mais les débits moyens mensuels sont surestimés.

IX.2.3 Résultats du calage 1987-1995 et des validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986

Le calage du modèle sur la période 1987-1995 est satisfaisant (critère de NASH supérieur à 72% dans la plupart des cas). Les NASH de validation vont de -16.8% à 64.4% sur les trois périodes, tous types de WHC confondus. On obtient 41.2%, 64.4% et 59.5% respectivement pour les périodes 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986 dans les meilleurs cas. Les hydrogrammes de simulation et les débits moyens mensuels observés et simulés pour la meilleure performance de chaque période de validation sont présentés ci-après.

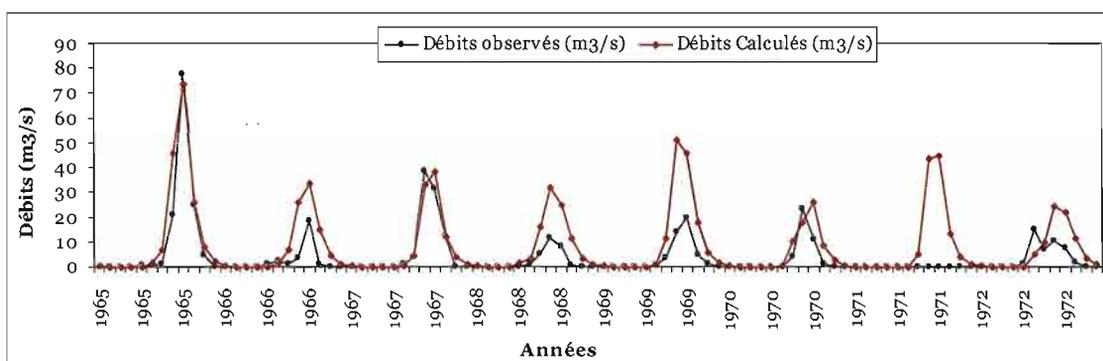


Figure IX-11 : Hydrogramme de simulation pour la période 1965-1972 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995

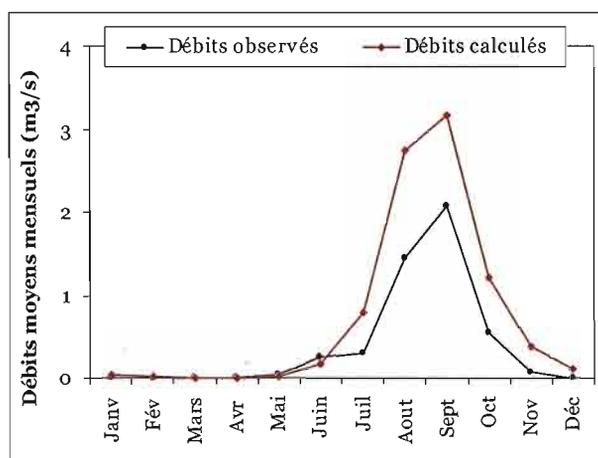


Figure IX-12 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1965-1972. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995

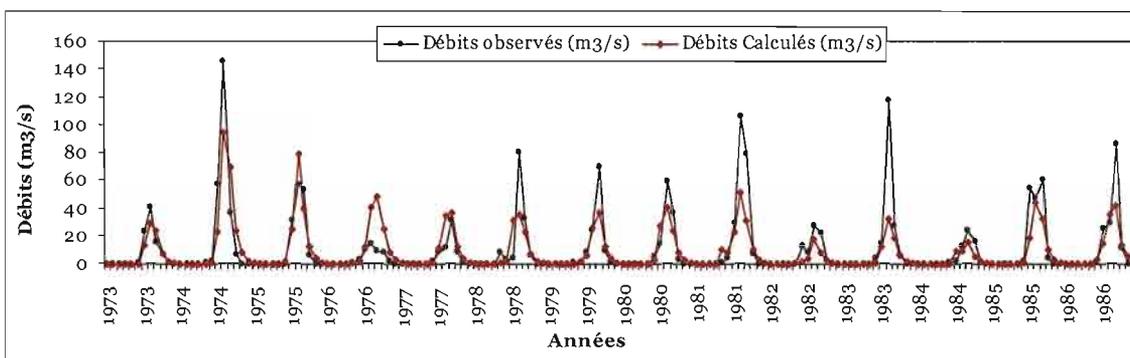


Figure IX-13 : Hydrogramme de simulation pour la période 1973-1986 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995

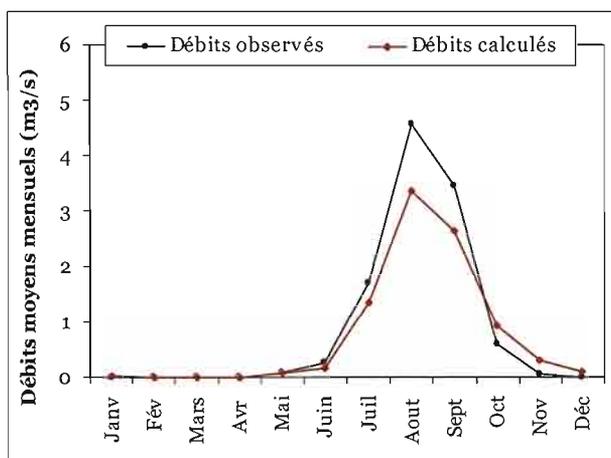


Figure IX-14 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1973-1986. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995

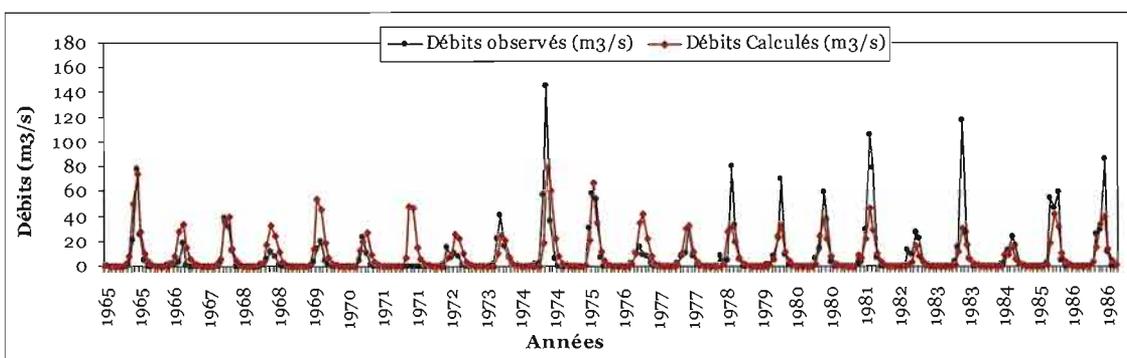


Figure IX-15 : Hydrogramme de simulation pour la période 1965-1986 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995

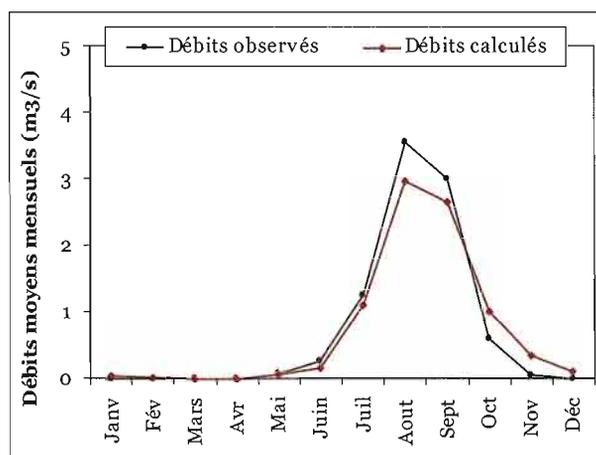


Figure IX-16 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1965-1986. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1987-1995

En conclusion pour cette seconde série de tests, on retient que :

- la validation est médiocre sur la période 1965-1972 avec les paramètres de calages de la période 1987-1995. On note une surestimation des débits,
- on obtient, pour les deux autres périodes de validation (1973-1986 et 1965-1986) une bonne reproduction de la forme de l'hydrogramme moyen mensuel. La date du maximum de crue est respectée mais sa valeur est sous-estimée par le modèle.

IX.2.4 Calage 1965-1975 et validation 1976-1995

En plus des calage-validations croisés des séries de tests précédents, nous avons calé le modèle sur la période 1965-1975, puis validé sur la période 1976-1995. Ces périodes sont celles de Mahé *et al.*, (2005). Ce dernier test (Tableau IX-3), donnent 67.5% en calage et 64.7% en validation pour le meilleur cas. Ces résultats sont obtenus avec WHC FAOmax. Les NASH de calage vont de 55.7% à 68.8% contre 60.4% à 64.7% pour la validation.

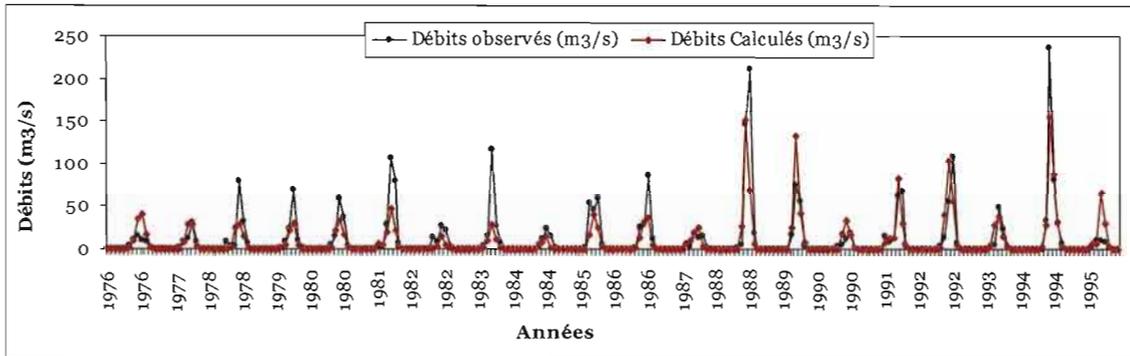


Figure IX-17 : Hydrogramme de simulation pour la période 1976-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1975

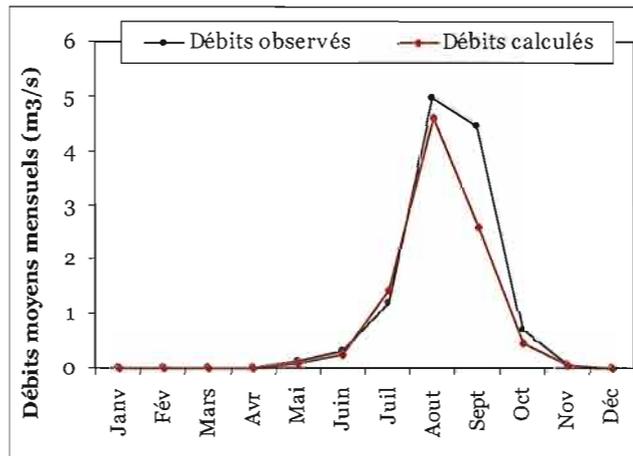


Figure IX-18 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1976-1995. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1975

La reproduction de l'hydrogramme moyen mensuel est satisfaisante malgré une légère sous-estimation du maximum de crue.

IX.2.5 Calage 1965-1985 et validation 1986-1995

Il ressort des résultats du dernier test de calage-validation de GR2M sur le bassin du Nakambé à Wayen (Tableau IX-3) que les critères de NASH en calage sont compris entre 57 et 60% contre 69 et 73% en validation sur la période 1986-1995. L'hydrogramme de simulation et les débits moyens mensuels observés et calculés sont présentés ci-après pour la meilleure performance.

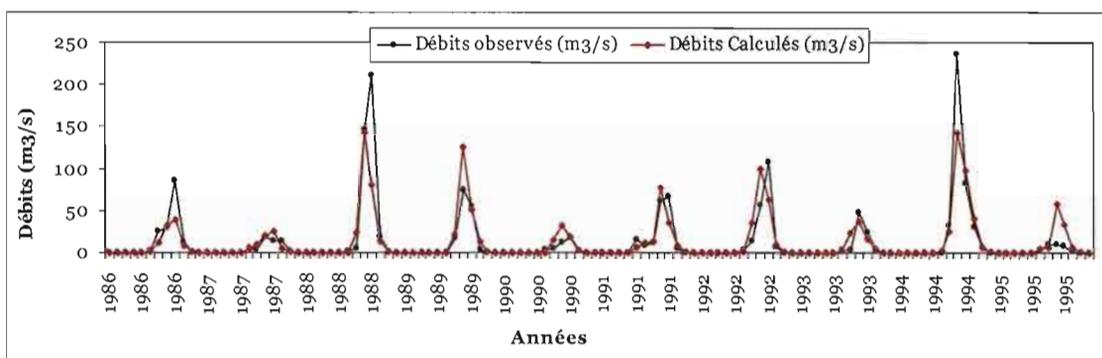


Figure IX-19 : Hydrogramme de simulation pour la période 1986-1995 sur le bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1985

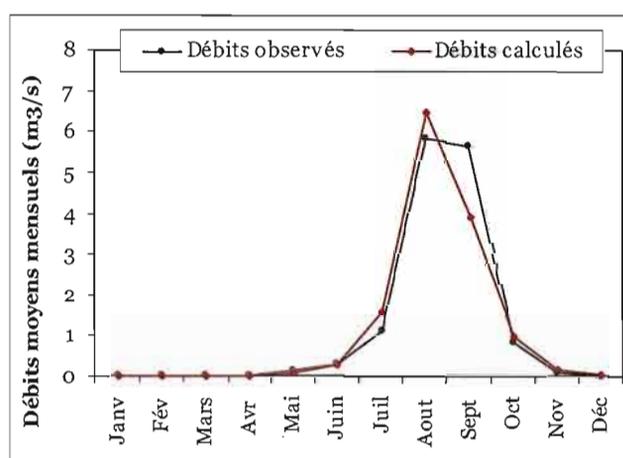


Figure IX-20 : Débits moyens mensuels observés et simulés sur la période 1976-1995. Bassin du Nakambé à Wayen. Paramètres de validation issus du calage 1965-1985

Comme dans le cas précédent, la reproduction de l'hydrogramme moyen mensuel est satisfaisante malgré une légère surestimation du maximum de crue.

IX.2.6 Synthèse des performances avec les WHC évolutives

La Figure IX-21 donne une synthèse des performances de GR2M avec les données de WHC évoluant suivant un modèle logistique de population. Les critères de NASH obtenus en calage sont compris entre 55 et 74% avec une moyenne de 67%. Près de la moitié des calages ont un NASH supérieur à 70%. La moyenne des NASH obtenus en validation est de 57% avec un maximum de 73%.

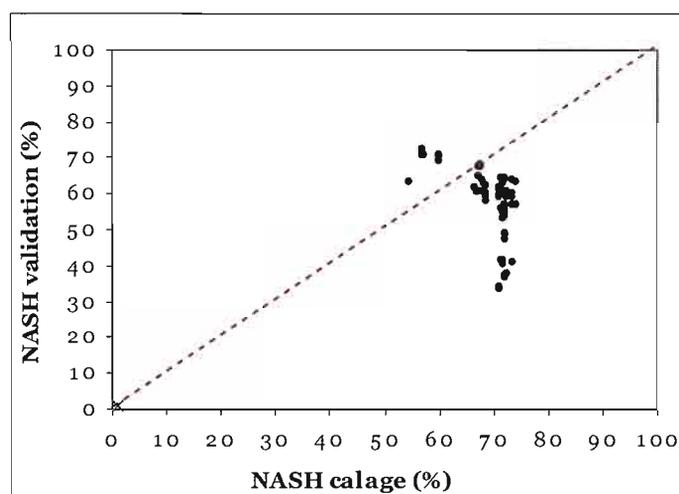


Figure IX-21 : NASH de calage en fonction du NASH de validation pour l'ensemble des tests réalisés.

L'analyse des hydrogrammes de simulation obtenus montre que :

- la forme des hydrogrammes est bien reproduite,
- les dates des pics de crues sont bien respectées,
- une sous estimation récurrente des débits de crue.

IX.3 WHC fixe Vs WHC logistique : comparaison des performances dans GR2M

IX.3.1 Calage 1965-1972 et validations sur 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995

Le Tableau IX-4 présente les gains (ou pertes) de points de NASH entre les performances du modèle pour les WHC fixes et logistiques.

On aboutit à des NASH équivalents en calage dans les deux cas avec de légères pertes de points de NASH (-1 point environ) pour les WHC évolutives. Des améliorations significatives en validation pour chacune des trois périodes testées sont obtenues. On augmente les critères de NASH de 10 à 30 points avec les WHC logistiques.

La Figure IX-23 donne les débits moyens mensuels observés et calculés pour chacune des trois périodes de validation dans les deux cas (WHC fixe et WHC logistique). On observe une nette amélioration dans la reconstitution des débits observés lorsque la WHC évolue dans le temps même si les débits sont sous estimés par le modèle.

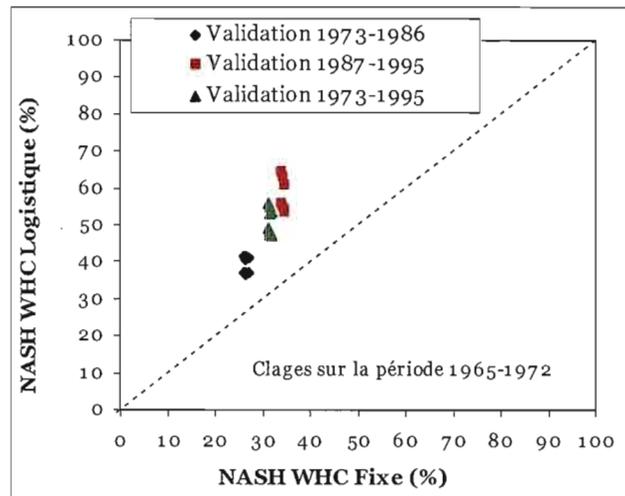


Figure IX-22 : NASH WHC Logistique en fonction du NASH WHC Fixe pour les 3 périodes de validation associées à la période de calage 1965-1972.

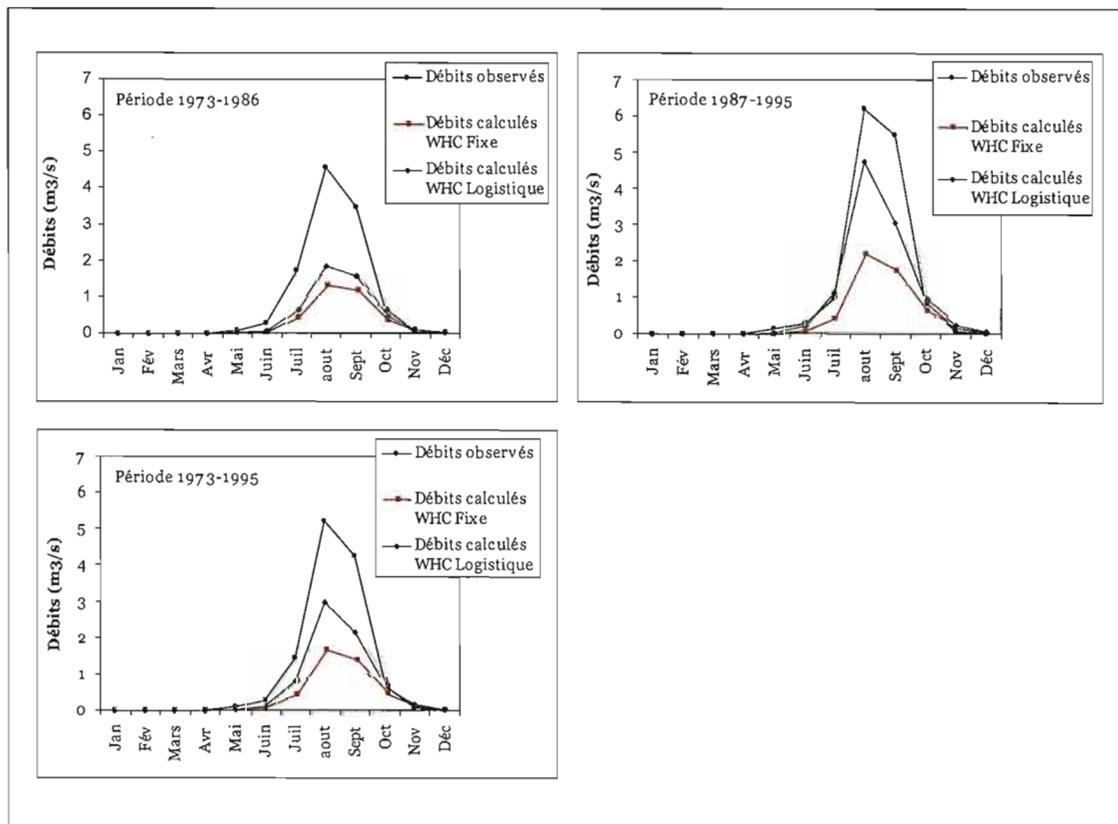


Figure IX-23 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 3 périodes de validation avec des WHC fixes et logistiques

Tableau IX-4 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives (évolution logistique).

Calage sur 1965-1972 et validations sur 1973-1986, 1987-1995 et 1973-1995

| Type de WHC | | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|---|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Whc Fao max | Fixe | 0.219 | 0.758 | 73.0 | 26.2 | 33.8 | 31.1 |
| | Logistique | 0.215 | 0.760 | 72.0 | 37.1 | 56.0 | 49.0 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -1.0 | 10.9 | 22.2 | 17.9 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.199 | 0.747 | 73.0 | 26.5 | 34.2 | 31.5 |
| | Logistique | 0.195 | 0.748 | 72.1 | 37.1 | 55.0 | 48.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -0.9 | 10.6 | 20.8 | 16.9 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.178 | 0.730 | 72.9 | 27.0 | 34.5 | 31.8 |
| | Logistique | 0.175 | 0.731 | 72.0 | 37.0 | 53.5 | 47.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -0.9 | 10.0 | 19.0 | 15.6 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.170 | 0.732 | 73.0 | 26.4 | 34.6 | 31.7 |
| | Logistique | 0.167 | 0.734 | 72.2 | 36.5 | 53.8 | 47.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -0.8 | 10.1 | 19.2 | 15.8 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|---|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Whc Fao max | Fixe | 0.219 | 0.758 | 72.970 | 26.150 | 33.812 | 31.121 |
| | Logistique | 0.214 | 0.760 | 71.600 | 41.700 | 64.300 | 55.900 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -1.4 | 15.5 | 30.5 | 24.8 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.199 | 0.747 | 73.039 | 26.538 | 34.237 | 31.530 |
| | Logistique | 0.194 | 0.747 | 71.800 | 41.400 | 62.800 | 54.800 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -1.2 | 14.9 | 28.6 | 23.3 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.178 | 0.730 | 72.900 | 26.979 | 34.480 | 31.848 |
| | Logistique | 0.174 | 0.730 | 71.700 | 41.100 | 60.700 | 53.400 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -1.2 | 14.1 | 26.2 | 21.6 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.170 | 0.732 | 73.003 | 26.386 | 34.553 | 31.670 |
| | Logistique | 0.166 | 0.732 | 71.900 | 40.600 | 60.700 | 53.300 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe - Gain de NASH | | | | -1.1 | 14.2 | 26.1 | 21.6 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

IX.3.2 Calage 1973-1986 et validations sur 1965-1972 et 1987-1995

Au Tableau IX-5 sont rassemblés les gains et pertes de points de NASH entre les deux cas. On obtient un meilleur calage du modèle lorsque la WHC évolue dans le temps. Les gains de NASH vont de 3 à 5 points. Malgré les forts écarts entre les NASH sur la période 1965-1972, on n'arrive pas à valider le modèle en utilisant des données évolutives de WHC. Pour la période 1973-1995, les meilleures performances sont obtenues avec la WHC fixe. Les écarts vont de 6 à 15 points de NASH.

Les débits moyens mensuels observés et simulés sur chacune des deux périodes et pour les deux types de WHC sont présentés à la Figure IX-24. La reconstitution des débits moyens mensuels est médiocre sur les deux périodes avec la WHC évolutive. Elle l'est également sur la période 1965-1972 avec la WHC fixe contrairement à la période 1987-1995 pour laquelle la reconstitution est moins mauvaise (toujours avec les WHC fixes).

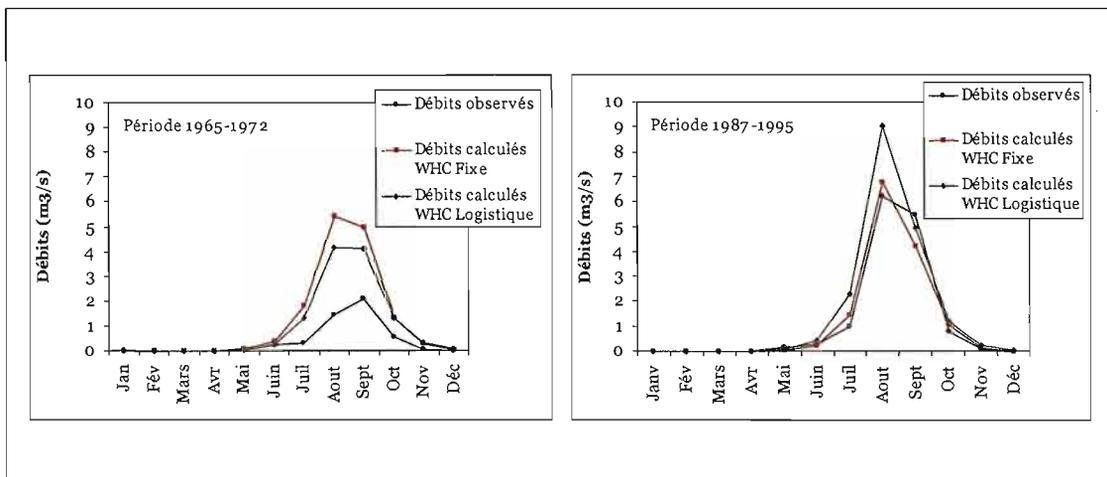


Figure IX-24 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 2 périodes de validation avec des WHC fixes et évolutives.

Tableau IX-5 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives (évolution logistique).

Calage sur 1973-1986 et validations sur 1965-1972, 1987-1995

| Type de WHC | | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1987-1995 |
| Whc Fao max | Fixe | 0.364 | 0.855 | 63.7 | -231.1 | 74.2 |
| | Logistique | 0.331 | 0.815 | 67.6 | -106.9 | 67.9 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 3.9 | 124.2 | -6.3 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.334 | 0.828 | 63.9 | -226.6 | 73.9 |
| | Logistique | 0.305 | 0.789 | 67.6 | -106.9 | 67.8 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 3.7 | 119.7 | -6.1 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.303 | 0.799 | 64.3 | -219.5 | 73.2 |
| | Logistique | 0.277 | 0.759 | 67.7 | -105.2 | 67.5 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 3.4 | 114.3 | -5.7 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.290 | 0.794 | 63.8 | -219.8 | 73.6 |
| | Logistique | 0.266 | 0.754 | 67.3 | -106.7 | 67.5 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 3.5 | 113.1 | -6.1 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1987-1995 |
| Whc Fao max | Fixe | 0.364 | 0.855 | 63.7 | -231.1 | 74.2 |
| | Logistique | 0.319 | 0.799 | 68.9 | -68.6 | 58.2 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 5.2 | 162.5 | -16.0 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.334 | 0.828 | 63.9 | -226.6 | 73.9 |
| | Logistique | 0.293 | 0.774 | 68.9 | -69.0 | 59.0 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 5.0 | 157.6 | -14.9 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.303 | 0.799 | 64.3 | -219.5 | 73.2 |
| | Logistique | 0.267 | 0.743 | 68.9 | -68.2 | 60.0 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 4.6 | 151.3 | -13.2 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.290 | 0.794 | 63.8 | -219.8 | 73.6 |
| | Logistique | 0.254 | 0.738 | 67.9 | -62.0 | 60.8 |
| Whc Logistique Vs Whc FixeGain de NASH | | | | 4.1 | 157.8 | -12.8 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

IX.3.3 Calage 1987-1995 et validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1995

Les performances en calage sur la période 1987-1995 sont quasiment les mêmes que celle que soit la WHC utilisée. On note toutefois des écarts dans les valeurs de NASH (de 1 à 3 points) en faveur des WHC fixes.

L'utilisation de données évolutives de WHC sur la période 1965-1972 permet de passer d'une situation où les critères de NASH sont inférieurs à zéro (jusqu'à -291% avec la WHC fixe) à des valeurs de NASH qui atteignent 41%. Même si dans l'absolu ce niveau de NASH reste insuffisant, le gain est très significatif au regard des résultats obtenus avec la WHC fixe.

Le gain en point de NASH est également important sur la période 1965-1986 avec la WHC logistique. En effet, on double les valeurs du critère de NASH lorsqu'on utilise des WHC évoluant suivant un modèle logistique de population.

Les performances sont relativement équivalentes sur la période 1973-1986 avec les deux types de données sol.

Les résultats sont présentés au Tableau IX-6 et une synthèse est donnée à la Figure IX-25. La Figure IX-26 donne une comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 3 périodes de validation avec les deux types de WHC.

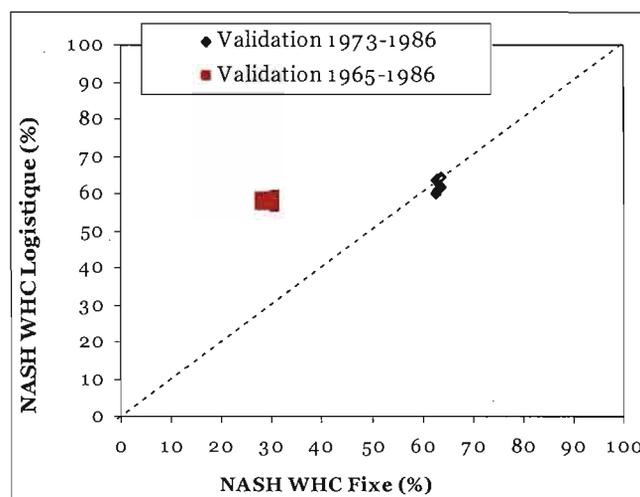


Figure IX-25 : NASH WHC Logistique en fonction du NASH WHC Fixe pour 2 périodes de validation associées à la période de calage 1987-1995.

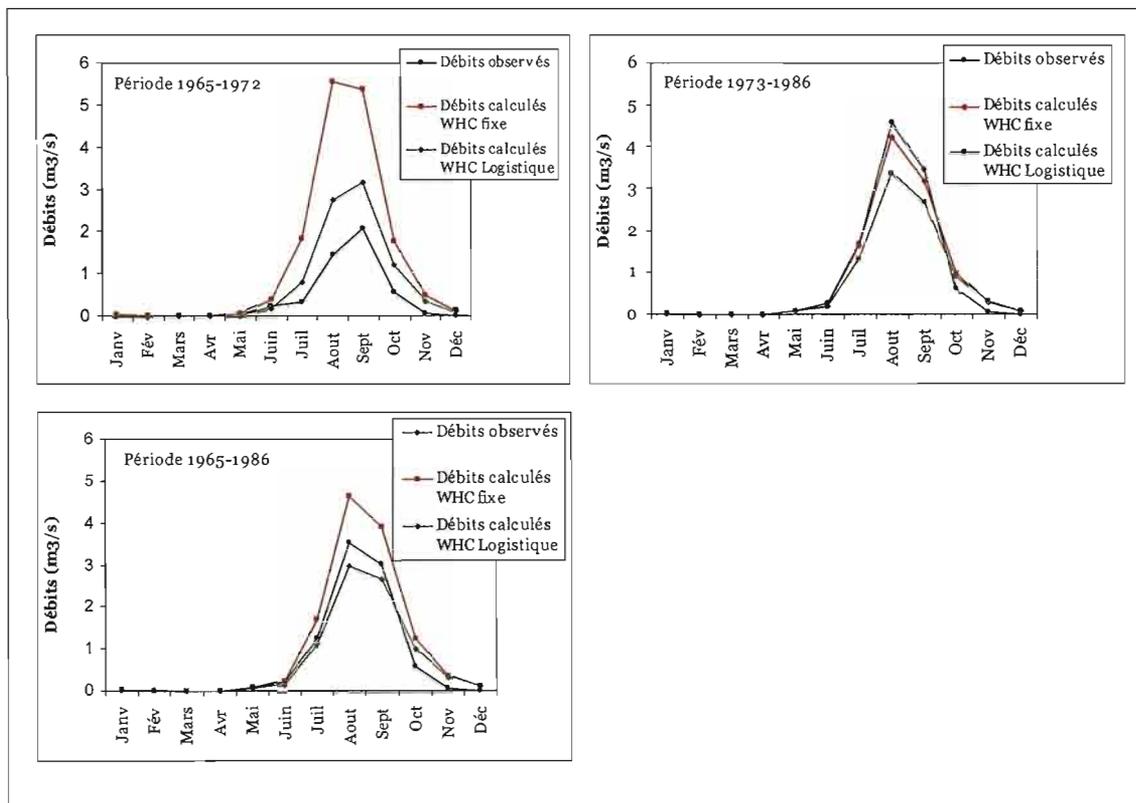


Figure IX-26 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur les 3 périodes de validation avec des WHC fixes et évolutives

Tableau IX-6 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et logistiques.
Calage sur 1987-1995 et validations sur 1965-1972, 1973-1986 et 1965-1986

| Type de WHC | | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 |
| Whc Fao max | Fixe | 0.386 | 0.758 | 75.3 | -291.5 | 62.8 | 27.7 |
| | Logistique | 0.305 | 0.714 | 74.2 | -8.7 | 63.5 | 57.0 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -1.1 | 282.8 | 0.7 | 29.3 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.354 | 0.738 | 74.8 | -281.0 | 63.1 | 29.0 |
| | Logistique | 0.281 | 0.695 | 73.4 | -11.6 | 63.8 | 56.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -1.4 | 269.4 | 0.7 | 27.9 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.321 | 0.716 | 74.0 | -270.1 | 63.5 | 30.5 |
| | Logistique | 0.256 | 0.674 | 72.2 | -16.3 | 64.4 | 56.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -1.8 | 253.8 | 0.9 | 26.4 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.307 | 0.711 | 74.3 | -266.0 | 63.1 | 30.5 |
| | Logistique | 0.246 | 0.667 | 72.3 | -16.8 | 63.8 | 56.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -2.0 | 249.2 | 0.7 | 25.9 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 |
| Whc Fao max | Fixe | 0.386 | 0.758 | 75.3 | -291.5 | 62.8 | 27.7 |
| | Logistique | 0.274 | 0.694 | 73.4 | 41.2 | 60.2 | 59.1 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -1.9 | 332.7 | -2.6 | 31.4 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.354 | 0.738 | 74.8 | -281.0 | 63.1 | 29.0 |
| | Logistique | 0.253 | 0.675 | 72.5 | 37.9 | 60.7 | 59.2 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -2.3 | 318.9 | -2.4 | 30.2 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.321 | 0.716 | 74.0 | -270.1 | 63.5 | 30.5 |
| | Logistique | 0.231 | 0.658 | 71.1 | 34.0 | 61.6 | 59.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -2.9 | 304.1 | -1.9 | 29.0 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.307 | 0.711 | 74.3 | -266.0 | 63.1 | 30.5 |
| | Logistique | 0.221 | 0.649 | 71.1 | 33.4 | 61.0 | 58.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Fixe Gain de NASH | | | | -3.2 | 299.4 | -2.1 | 28.4 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

IX.3.4 Calage 1965-1975 et validation sur 1976-1995 : WHC fixe Vs WHC logistique

Les résultats de ce test de calage validation sont présentés au Tableau IX-7. Les performances du modèle sont nettement améliorées en calage (de +4 à +6 points) et en validation (de +12 à +17 points) lorsqu'on utilise des données évolutives de WHC. Les NASH de calage varient entre 62 et 68% contre 60 et 65 % pour les validations.

On a une meilleure reproduction des débits moyens mensuels comparativement au cas où la WHC reste fixe (Figure IX-27).

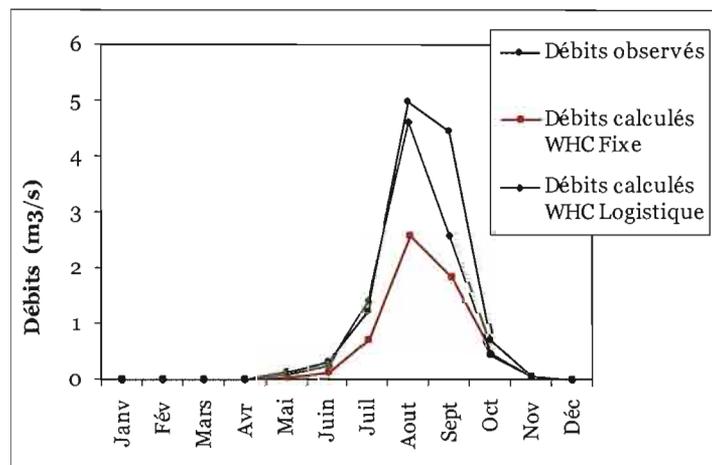


Figure IX-27 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur la période 1976-1995 avec des WHC fixes et évolutives

Tableau IX-7 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives. Calage sur 1965-1975 et validation sur 1976-1995

| Type de WHC | | Calage 1965-1975 | | | NASH Validation 1976-1995 |
|--|------------|------------------|-------|-------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Fixe | 0.262 | 0.902 | 61.6 | 47.6 |
| | Logistique | 0.288 | 1.000 | 54.7 | 63.2 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | -6.9 | 15.6 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.238 | 0.884 | 62.4 | 47.8 |
| | Logistique | 0.231 | 0.885 | 66.7 | 61.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 4.3 | 13.9 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.214 | 0.862 | 63.1 | 48.0 |
| | Logistique | 0.208 | 0.861 | 67.1 | 60.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 4.0 | 12.6 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.205 | 0.864 | 63.3 | 48.0 |
| | Logistique | 0.199 | 0.862 | 67.5 | 60.4 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 4.2 | 12.4 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1975 | | | NASH Validation 1976-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Fixe | 0.262 | 0.902 | 61.6 | 47.6 |
| | Logistique | 0.251 | 0.901 | 67.5 | 64.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 5.9 | 17.1 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.238 | 0.884 | 62.4 | 47.8 |
| | Logistique | 0.228 | 0.883 | 68.0 | 63.8 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 5.6 | 16.0 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.214 | 0.862 | 63.1 | 48.0 |
| | Logistique | 0.206 | 0.861 | 68.4 | 62.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 5.3 | 14.6 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.205 | 0.864 | 63.3 | 48.0 |
| | Logistique | 0.197 | 0.861 | 68.8 | 62.1 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 5.5 | 14.1 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

IX.3.5 Calage 1965-1985 et validation sur 1986-1995 : WHC fixe Vs WHC logistique

Les résultats des ce dernier test de calage-validation sont donnés au Tableau IX-8. Des gains significatifs en points de NASH en calage comme en validation sont observés (de + 7 à +11 points de NASH). Les NASH de calage sont compris entre 50 et 60% contre 69 et 73% en validation.

On a une meilleure reproduction des débits moyens mensuels comparé au cas où la WHC reste fixe (Figure IX-28).

Tableau IX-8 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC fixes et évolutives. Calage sur 1965-1985 et validation sur 1986-1995

| Type de WHC | | Calage 1965-1985 | | | NASH Validation 1986-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Fixe | 0.295 | 0.847 | 48.9 | 61.8 |
| | Logistique | 0.284 | 0.824 | 57.1 | 72.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 8.2 | 10.8 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.270 | 0.825 | 49.3 | 62.0 |
| | Logistique | 0.260 | 0.802 | 57.2 | 71.8 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 7.9 | 9.8 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.244 | 0.799 | 49.9 | 61.9 |
| | Logistique | 0.235 | 0.774 | 57.3 | 70.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 7.4 | 8.8 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.233 | 0.800 | 49.5 | 62.1 |
| | Logistique | 0.225 | 0.773 | 56.9 | 70.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 7.4 | 8.5 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1985 | | | NASH Validation 1986-1995 |
|--|------------|------------------|-------|-------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Fixe | 0.295 | 0.847 | 48.9 | 61.8 |
| | Logistique | 0.279 | 0.812 | 60.0 | 70.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 11.1 | 8.9 |
| Whc Fao moy | Fixe | 0.270 | 0.825 | 49.3 | 62.0 |
| | Logistique | 0.255 | 0.791 | 60.0 | 70.1 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 10.7 | 8.1 |
| Whc Fao min | Fixe | 0.244 | 0.799 | 49.9 | 61.9 |
| | Logistique | 0.232 | 0.762 | 60.0 | 69.4 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 10.1 | 7.5 |
| Whc Fao saxton | Fixe | 0.233 | 0.800 | 49.5 | 62.1 |
| | Logistique | 0.222 | 0.758 | 60.0 | 69.1 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Fixe | | | | 10.5 | 7.0 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

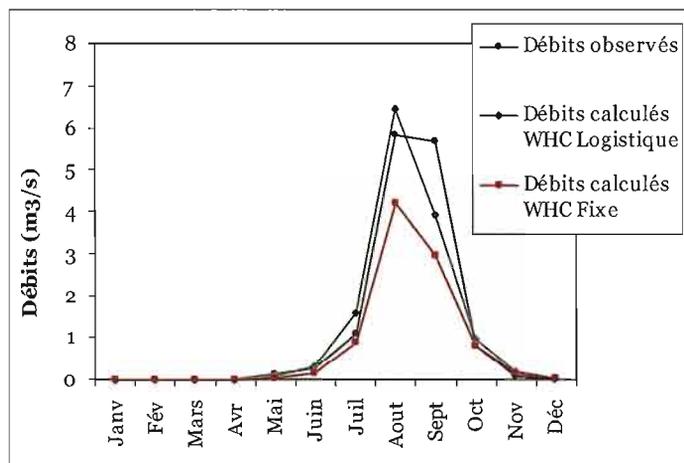


Figure IX-28 : Comparaison des débits moyens mensuels observés et calculés sur la période 1986-1995 avec des WHC fixes et évolutives

IX.4 WHC linéaire Vs WHC logistique : comparaison des performances dans GR2M

La Figure IX-29 montre que les performances du modèle en validation avec la WHC évoluant suivant un modèle logistique de population sont globalement meilleures qu'avec la WHC évoluant linéairement. On arrive à des augmentations de 19 points de NASH dans certains cas. Les résultats des calages sont plus ou moins équivalents avec quelques différences dans les valeurs de NASH pour la période 1965-1985. On obtient, en effet, pour cette période des améliorations du critère de NASH allant de 3 à 7 points.

Les résultats sont rassemblés dans les Tableau IX-10 à Tableau IX-13.

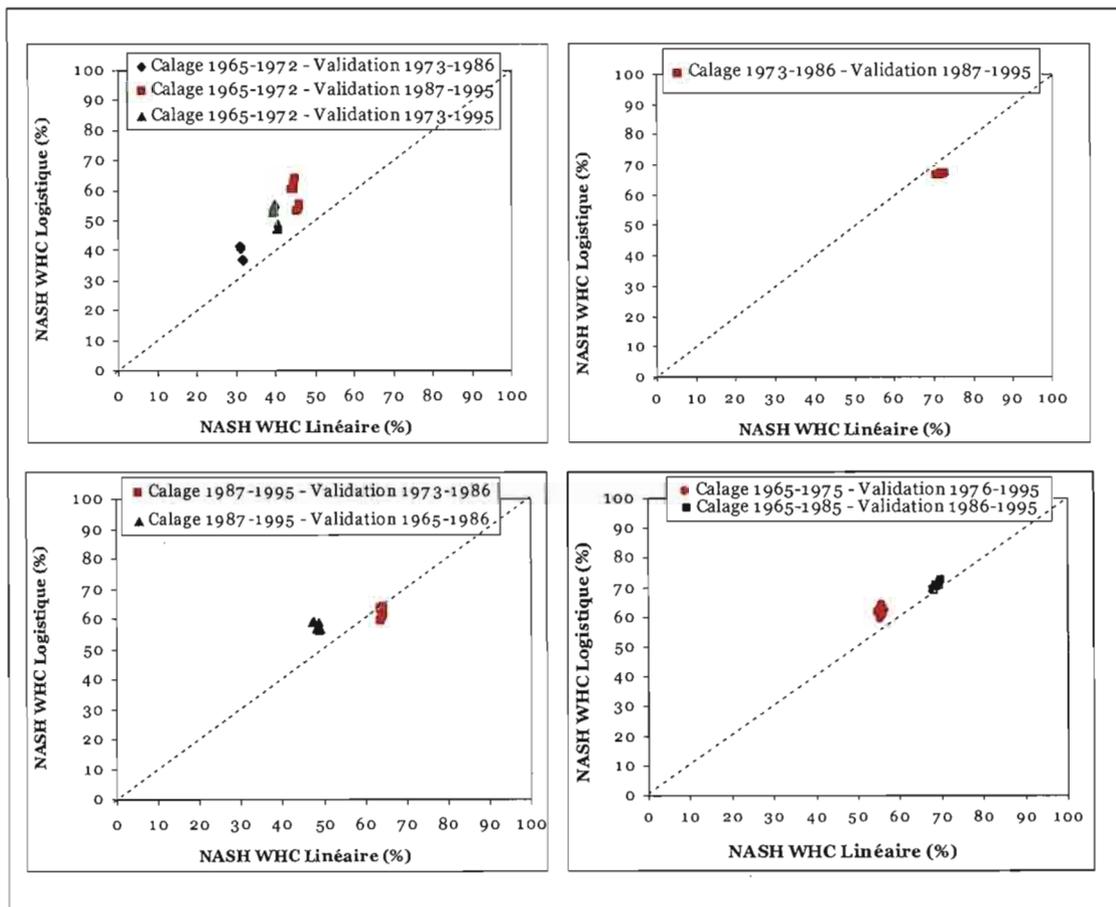


Figure IX-29 : NASH WHC Logistique en fonction du NASH WHC Linéaire pour l'ensemble des tests de calage-validations retenues.

Tableau IX-9 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques.

Calage sur 1965-1972 et validations sur 1973-1986 ; 1987-1995 et 1973-1995

| Type de WHC | | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.215 | 0.760 | 72.0 | 31.5 | 46.0 | 40.7 |
| | Logistique | 0.215 | 0.760 | 72.0 | 37.1 | 56.0 | 49.0 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 0.0 | 5.6 | 10.0 | 8.3 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.195 | 0.747 | 72.2 | 31.7 | 46.1 | 40.8 |
| | Logistique | 0.195 | 0.748 | 72.1 | 37.1 | 55.0 | 48.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.1 | 5.4 | 8.9 | 7.6 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.173 | 0.729 | 72.1 | 31.9 | 45.4 | 40.5 |
| | Logistique | 0.175 | 0.731 | 72.0 | 37.0 | 53.5 | 47.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.1 | 5.1 | 8.1 | 6.9 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.165 | 0.731 | 72.1 | 31.7 | 45.8 | 40.7 |
| | Logistique | 0.167 | 0.734 | 72.2 | 36.5 | 53.8 | 47.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 0.1 | 4.8 | 8.0 | 6.8 |

Les WHC sont calculées avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.215 | 0.760 | 72.1 | 31.0 | 45.0 | 40.0 |
| | Logistique | 0.214 | 0.760 | 71.6 | 41.7 | 64.3 | 55.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.5 | 10.7 | 19.3 | 15.9 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.195 | 0.746 | 72.3 | 31.1 | 44.8 | 39.8 |
| | Logistique | 0.194 | 0.747 | 71.8 | 41.4 | 62.8 | 54.8 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.5 | 10.3 | 18.0 | 15.0 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.175 | 0.731 | 72.2 | 31.3 | 44.2 | 39.6 |
| | Logistique | 0.174 | 0.730 | 71.7 | 41.1 | 60.7 | 53.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.5 | 9.8 | 16.5 | 13.8 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.166 | 0.732 | 72.1 | 31.2 | 44.7 | 39.8 |
| | Logistique | 0.166 | 0.732 | 71.9 | 40.6 | 60.7 | 53.3 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.2 | 9.4 | 16.0 | 13.5 |

Les WHC sont calculées avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

Tableau IX-10 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques.
Calage sur 1973-1986 et validations sur 1965-1972 et 1987-1995

| Type de WHC | | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation 1965-1972 | NASH Validation 1987-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | | |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.343 | 0.833 | 65.5 | -160.4 | 72.7 |
| | Logistique | 0.331 | 0.815 | 67.6 | -106.9 | 67.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 2.1 | 53.5 | -4.8 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.315 | 0.809 | 65.6 | -159.1 | 72.0 |
| | Logistique | 0.305 | 0.789 | 67.6 | -106.9 | 67.8 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 2.0 | 52.2 | -4.2 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.287 | 0.778 | 65.9 | -155.6 | 71.2 |
| | Logistique | 0.277 | 0.759 | 67.7 | -105.2 | 67.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 1.8 | 50.4 | -3.7 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.273 | 0.770 | 65.4 | -151.6 | 71.5 |
| | Logistique | 0.266 | 0.754 | 67.3 | -106.7 | 67.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 1.9 | 44.9 | -4.0 |

Les WHC sont calculées avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation 1965-1972 | NASH Validation 1987-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | | |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.345 | 0.836 | 65.3 | -168.1 | 72.9 |
| | Logistique | 0.331 | 0.815 | 67.6 | -106.9 | 67.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 2.3 | 61.2 | -5.0 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.317 | 0.809 | 65.5 | -165.5 | 72.5 |
| | Logistique | 0.305 | 0.789 | 67.6 | -106.9 | 67.8 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 2.1 | 58.6 | -4.7 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.287 | 0.779 | 65.6 | -155.1 | 71.8 |
| | Logistique | 0.277 | 0.759 | 67.7 | -105.2 | 67.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 2.1 | 49.9 | -4.3 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.274 | 0.769 | 65.2 | -153.2 | 72.0 |
| | Logistique | 0.266 | 0.754 | 67.3 | -106.7 | 67.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | 2.1 | 46.5 | -4.5 |

Les WHC sont calculées avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

Tableau IX-11 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques.
Calage sur 1987-1995 et validations sur 1965-1972 ; 1973-1986 et 1965-1995

| Type de WHC | | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.336 | 0.735 | 74.700 | -98.9 | 64.1 | 48.3 |
| | Logistique | 0.305 | 0.714 | 74.200 | -8.7 | 63.5 | 57.0 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.5 | 90.2 | -0.6 | 8.7 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.308 | 0.713 | 74.000 | -95.2 | 64.2 | 48.8 |
| | Logistique | 0.281 | 0.695 | 73.400 | -11.6 | 63.8 | 56.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.6 | 83.6 | -0.4 | 8.1 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.280 | 0.692 | 73.000 | -95.7 | 64.6 | 49.1 |
| | Logistique | 0.256 | 0.674 | 72.200 | -16.3 | 64.4 | 56.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.8 | 79.4 | -0.2 | 7.8 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.267 | 0.685 | 73.200 | -93.9 | 64.1 | 48.8 |
| | Logistique | 0.246 | 0.667 | 72.300 | -16.8 | 63.8 | 56.4 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -0.9 | 77.1 | -0.3 | 7.6 |

Les WHC sont calculées avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|--|------------|------------------|-------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.340 | 0.735 | 74.700 | -110.1 | 64.1 | 47.2 |
| | Logistique | 0.274 | 0.694 | 73.400 | 41.2 | 60.2 | 59.1 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -1.3 | 151.3 | -3.9 | 11.9 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.308 | 0.713 | 74.000 | -95.2 | 64.2 | 48.8 |
| | Logistique | 0.253 | 0.675 | 72.500 | 37.9 | 60.7 | 59.2 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -1.5 | 133.1 | -3.5 | 10.4 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.284 | 0.695 | 73.100 | -110.0 | 64.7 | 47.7 |
| | Logistique | 0.231 | 0.658 | 71.100 | 34.0 | 61.6 | 59.5 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -2.0 | 144.0 | -3.1 | 11.8 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.270 | 0.688 | 73.300 | -107.9 | 64.2 | 47.5 |
| | Logistique | 0.221 | 0.649 | 71.100 | 33.4 | 61.0 | 58.9 |
| Whc Logistique Vs Whc Linéaire - Gain de NASH | | | | -2.2 | 141.3 | -3.2 | 11.4 |

Les WHC sont calculées avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

Tableau IX-12 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques. Calage sur 1965-1975 et validation sur 1976-1995

| Type de WHC | | Calage 1965-1975 | | | NASH Validation 1976-1995 |
|--|------------|------------------|-------|-------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.254 | 0.901 | 64.4 | 56.7 |
| | Logistique | 0.288 | 1.000 | 54.7 | 63.2 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | -9.7 | 6.5 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.232 | 0.884 | 65.0 | 56.4 |
| | Logistique | 0.231 | 0.885 | 66.7 | 61.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 1.7 | 5.3 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.209 | 0.860 | 65.6 | 55.8 |
| | Logistique | 0.208 | 0.861 | 67.1 | 60.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 1.5 | 4.8 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.198 | 0.863 | 66.2 | 55.8 |
| | Logistique | 0.199 | 0.862 | 67.5 | 60.4 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 1.3 | 4.6 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1975 | | | NASH Validation 1976-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.255 | 0.902 | 64.1 | 56.0 |
| | Logistique | 0.251 | 0.901 | 67.5 | 64.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 3.4 | 8.7 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.231 | 0.856 | 64.7 | 55.6 |
| | Logistique | 0.228 | 0.883 | 68.0 | 63.8 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 3.3 | 8.2 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.209 | 0.861 | 65.3 | 55.1 |
| | Logistique | 0.206 | 0.861 | 68.4 | 62.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 3.1 | 7.5 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.199 | 0.863 | 66.0 | 55.1 |
| | Logistique | 0.197 | 0.861 | 68.8 | 62.1 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 2.8 | 7.0 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

Tableau IX-13 : Performances comparées de GR2M sur le Nakambé à Wayen avec des WHC linéaires et logistiques. Calage sur 1965-1985 et validation sur 1986-1995

| Type de WHC | | Calage 1965-1985 | | | NASH Validation 1986-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.286 | 0.834 | 53.0 | 69.8 |
| | Logistique | 0.284 | 0.824 | 57.1 | 72.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 4.1 | 2.8 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.262 | 0.814 | 53.3 | 69.3 |
| | Logistique | 0.260 | 0.802 | 57.2 | 71.8 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 3.9 | 2.5 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.237 | 0.787 | 53.6 | 68.4 |
| | Logistique | 0.235 | 0.774 | 57.3 | 70.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 3.7 | 2.3 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.226 | 0.784 | 53.5 | 68.5 |
| | Logistique | 0.225 | 0.773 | 56.9 | 70.6 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 3.4 | 2.1 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002)

| Type de WHC | | Calage 1965-1985 | | | NASH Validation 1986-1995 |
|--|------------|------------------|-------|------------|------------------------------|
| | | X1 | X2 | NASH (%) | |
| Whc Fao max | Linéaire | 0.287 | 0.837 | 52.6 | 69.3 |
| | Logistique | 0.279 | 0.812 | 60.0 | 70.7 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 7.4 | 1.4 |
| Whc Fao moy | Linéaire | 0.263 | 0.814 | 52.9 | 68.7 |
| | Logistique | 0.255 | 0.791 | 60.0 | 70.1 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 7.1 | 1.4 |
| Whc Fao min | Linéaire | 0.238 | 0.789 | 53.2 | 67.9 |
| | Logistique | 0.232 | 0.762 | 60.0 | 69.4 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 6.8 | 1.5 |
| Whc Fao saxton | Linéaire | 0.226 | 0.786 | 53.1 | 68.0 |
| | Logistique | 0.222 | 0.758 | 60.0 | 69.1 |
| Gain de NASH - Whc Logistique Vs Whc Linéaire | | | | 6.9 | 1.1 |

Évolution logistique des WHC avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000)

IX.5 Conclusion

Nous poursuivions deux objectifs dans ce chapitre. Le premier était d'évaluer les performances de GR2M avec les nouvelles données sol évoluant suivant un modèle de population. Notre second objectif était de comparer les nouvelles performances du modèle avec celles obtenues lorsque la WHC reste fixe et lorsqu'elle évolue linéairement pendant la durée des simulations.

Les résultats ont montré que l'utilisation des WHC logistiques dans GR2M conduit à des performances très satisfaisantes comparées aux cas où la WHC reste fixe ou évolue linéairement. On obtient en moyenne 67% de NASH en calage et 57% en validation. Il faut toutefois noter que dans un nombre non négligeable de cas, les performances sont bien meilleures que ces moyennes. On a en effet près de la moitié des NASH de calage qui sont au-delà de 70%. On obtient des valeurs de NASH du même ordre de grandeur en validation sur la période 1986-1995 avec des paramètres issus du calage sur la période 1965-1985. Ce dernier cas correspond à la meilleure simulation. La longueur de sa période de calage (20 ans) permet au modèle de « scanner » un plus grand nombre de situations hydroclimatiques lors du calage. Cela permet ensuite une meilleure reproduction des débits observés.

Trois points sont à retenir quant aux hydrogrammes de simulation obtenus :

- la forme des hydrogrammes est bien reproduite,
- les dates des pics de crues sont bien respectées,
- les débits de crue sont en général sous-estimés par le modèle. En particulier celui de septembre que le modèle n'arrive quasiment pas à calculer contrairement à la crue du mois d'août qui est relativement bien simulée (exemple Figure IX-27 et Figure IX-28).

Ces résultats, représentent des améliorations très significatives au regard de ceux classiquement obtenus avec la WHC fixe ou évoluant linéairement dans le temps. En effet, l'analyse comparative des performances a montré que l'utilisation dans GR2M de données WHC évoluant suivant un modèle logistique de population conduit à des gains de performances très nets. On double même le NASH de validation dans plusieurs cas.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

A l'origine de ce travail il y a une problématique hydrologique majeure et des préoccupations de développement des régions sahéliennes qui sont soumises, depuis les années 1970, à de profondes modifications environnementales sous les effets conjugués de l'homme et du climat. A travers la thématique générale de l'impact des interrelations Climat – Homme - Environnement sur les états de surface et la modélisation hydrologique dans cette région, nous avons cherché à répondre à la *question de la prise en compte la dynamique du milieu sahélien dans un modèle hydrologique tel que GR2M*. Nous avons donc pour objectif de *contribuer à améliorer notre aptitude à simuler par modèle le fonctionnement des bassins versants au Sahel pour une meilleure évaluation, prédiction et gestion des ressources en eau de cette région au cours du 21^{ème} siècle*.

Pour répondre à la problématique posée, nous avons organisé notre réflexion autour de quatre thématiques spécifiques.

Comment GR2M prend en compte conceptuellement le comportement hydrologique des sols au Sahel ?

Cette question nous a d'abord amené à évaluer l'efficacité du modèle dans le contexte sahélien. Cinq bassins, que nous avons considérés comme représentatifs des conditions hydroclimatiques de la zone sahélienne ont été retenus à cet effet. Ce sont 4 bassins de rive droite du fleuve Niger (Alcongui, Diongoré, Tera et Koriziena), et un bassin de la Volta : celui du Nakambé à Wayen.

La rupture climatique au Sahel ayant introduit une hétérogénéité dans les séries de données hydroclimatiques, et aussi une modification du fonctionnement hydrologique des bassins versants, des périodes de calage-validations ont été choisies de manière à ce qu'elles soient :

- homogènes au sens que l'on peut présumer qu'il n'y a pas de ruptures au sein des séries de pluie et de débit,
- ou au contraire, inclure l'année 1970 que nous avons retenue comme année de la rupture climatique au Sahel.

Les résultats de cette évaluation ont mis en évidence trois éléments fondamentaux du comportement de GR2M sur les bassins testés :

- *un calage relativement moyen avec des critères de NASH voisins voire relativement supérieurs à 50%,*
- *une validation non satisfaisante caractérisée par des critères de NASH généralement inférieurs à 50% avec assez souvent des NASH négatifs,*
- *des écarts importants de entre les modules observés et calculés sur les différentes périodes de validation.*

Pour tenter de comprendre et d'expliquer cette contre-performance, nous nous sommes intéressés à la fonction de production du modèle à travers une analyse de son fonctionnement. Nous avons en particulier essayé de caractériser l'évolution du taux de remplissage du réservoir sol du modèle au début de chaque pas de temps en utilisant les données sol extraites de la carte des sols de la FAO. Les résultats ont montré, pour l'ensemble des bassins testés, que le taux de remplissage du réservoir sol au début des pas de temps est très faible. Les valeurs sont comprises entre 0% et 2% avec des maximums inférieurs 25% quelque soit la période de validation choisie.

Nous sommes donc demandés s'il était possible de trouver une taille optimale de réservoir de façon à apporter des améliorations dans les performances du modèle. Cette première tentative d'amélioration des performances du modèle par ajustement de la taille du réservoir nous a permis de nous rendre compte que :

- *l'utilisation des données sol de la FAO donne de mauvais résultats de validation sur les bassins testés,*
- *il est possible d'ajuster des hauteurs de réservoir qui permettent d'obtenir des valeurs de NASH bien supérieures, même si dans l'absolu, ces NASH restent en deçà des performances du modèle dans d'autres contextes hydroclimatiques (milieux méditerranéens et tropicaux humides),*
- *tous les essais montrent que sur la période de travail (1965 – 1995), les valeurs de WHC ne peuvent être gardées constantes et qu'elles doivent diminuer.*

Une des particularités hydrologiques majeures des milieux sahéliens est la prépondérance des états de surface dans les processus de genèse des écoulements. Or, durant les trois décennies passées, les régions sahéliennes ont connu de profondes modifications environnementales en particulier au niveau des états de surface. Au regard de ces résultats fondamentaux et des améliorations des performances du modèle par ajustement numérique de la taille du réservoir sol, il nous a semblé indispensable un rapprochement l'évolution des états de surface et la taille du réservoir sol de GR2M. Il nous revenait donc de tenter de répondre à la question suivante :

Comment prendre en compte l'évolution des états de surface dans GR2M ?

Afin d'apporter des éléments des réponses à la problématique posée, nous avons organisé notre réflexion en deux étapes.

Nous nous sommes d'abord attaché, à décrire, analyser et modéliser les modifications du milieu qui ont un impact sur les états de surface et, au final, sur les capacités d'infiltration et de ruissellement des sols en milieu sahélien. Nous avons en particulier analysé les facteurs conditionnels de la dynamique du milieu au Sahel ainsi que les pratiques agropastorales usuelles de la région. Cette analyse nous a permis de *dresser un schéma d'évolution du milieu à travers 5 modes de transformation possibles*. Nous en avons déduit *4 types d'états de surface qui nous ont servi d'indicateurs de la pression anthropique et/ou climatique dans la zone étudiée*. Ces indicateurs sont :

- *les surfaces en végétation naturelle (jachères y compris),*
- *les surfaces cultivées,*
- *les sols nus (sols complètement dégradés et dénudés),*
- *les plans d'eau (barrages et autres retenues d'eau).*

Sur la base d'images d'archive des satellites Landsat, nous avons par la suite entrepris de caractériser la dynamique des états de surface à travers les quatre indicateurs précédemment définis. Cette caractérisation n'a pu se faire que pour le bassin du Nakambé à Wayen, pour lequel nous disposions d'images de bonnes qualités, couvrant tout le bassin et datant de différentes époques : 1972, 1986, 1992 et 2002.

Une première méthode de caractérisation en 6 étapes nous a permis de nous rendre compte de *la nécessité d'une bonne connaissance du terrain pour arriver à discriminer de façon satisfaisante les indicateurs d'états de surface que nous avons retenus*. Nous avons, en effet, *mis en évidence de fortes confusions entre les surfaces de sols nus et les surfaces cultivées*. Ces confusions ont principalement été liées au milieu sahélien lui-même qui a la particularité d'être relativement homogène avec une végétation très peu couvrante. Ces caractéristiques

font que l'effet du sol devient dominant dans les signatures spectrales des pixels, entraînant les fortes confusions observées.

Pour contourner cette difficulté et améliorer le rendu des traitements d'images, nous avons opté pour une démarche combinant une approche objet (segmentation multispectrale) et une approche basée sur la Photo Interprétation Assistée par Ordinateur (PIAO). Cette méthode nous a semblé plus appropriée au regard du contexte environnemental de la zone étudiée et des données à notre disposition. A partir de quatre « clichés » du bassin (1972, 1986, 1992 et 2002), nous avons *pu mettre en évidence l'évolution globale des indicateurs de la pression anthropique et climatique sur du bassin du Nakambé à Wayen pour une période de 30 ans (1972 à 2002)*. Ce résultat est fondamental pour nous car il forme une des assises de la démarche que nous développons pour répondre à la question du « *comment prendre en compte l'évolution du milieu dans un modèle hydrologique tel que GR2M ?* » Les quatre cartes thématiques de la Figure 1 résument les résultats obtenus. L'analyse que l'on en a faite sur le bassin du Nakambé à Wayen a abouti à :

- *une forte dégradation des états de surface entre 1972-2002.*
- *cette dégradation s'est principalement déroulée entre 1972 et 1992, période pendant laquelle on a :*
 - *une diminution du couvert végétal. On passe de 52% de la surface du bassin en végétation naturelle en 1972 à 17% en 1992, soit une diminution de 67% en 20 ans !*
 - *une augmentation des surfaces cultivées. De 43% de surface cultivées en 1972, on est passé à 68% durant la même période,*
 - *un triplement des surfaces de sols dégradés (de 4.5% à 13%).*
 - *de 65 km² en 1972, la surface occupée par les plans d'eau est passée à 240 km² en 1992.*
- *la période allant de 1992 à 2002 est marquée par une faible évolution des états de surface.*

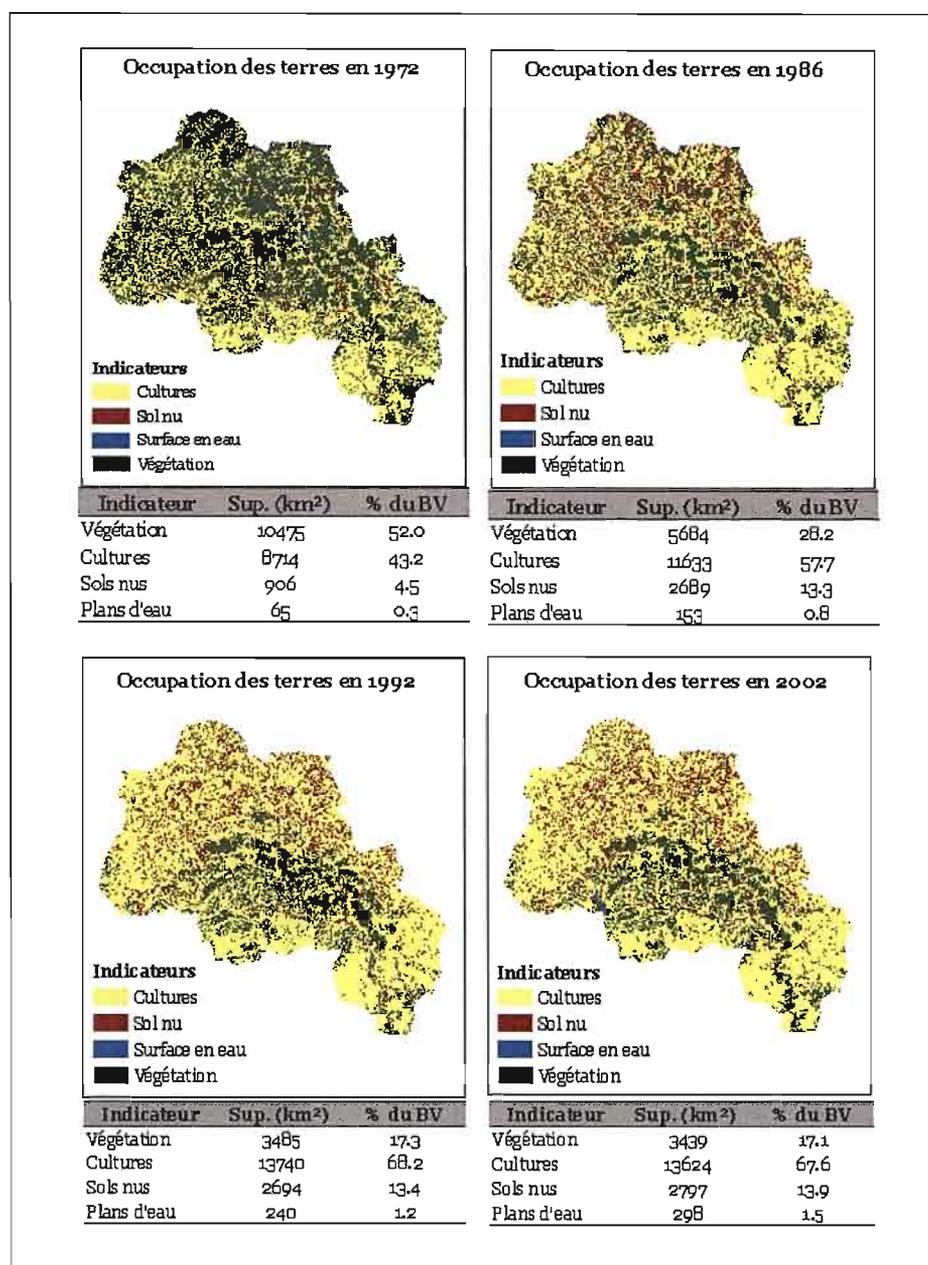


Figure 1 : Quatre clichés du bassin du Nakambé à Wayen caractérisant l'évolution des états de surface entre 1972 et 2002.

Si ces résultats nous permettent de se faire une idée de l'évolution globale des états de surface sur le bassin durant la période 1972-2002, nous ne sommes pas capables, partant de là, de définir leurs évolutions au fil des ans. Pour résoudre ce problème, nous avons, à partir de données démographiques et de statistiques agricoles, mis en évidence une liaison statistique en l'évolution annuelle de la population et celle des superficies cultivées sur le bassin. Un modèle de population basée sur la théorie de la transition et la fonction logistique d'abord été calibré et validé à l'échelle nationale du Burkina Faso, puis à l'échelle du bassin. Ce modèle

d'évolution logistique de la population du bassin abouti aux perspectives démographiques suivantes :

- *la croissance démographique commencera à baisser sur le bassin en 2010,*
- *le taux de natalité est élevé et baisse très lentement ce qui a pour conséquence de maintenir une croissance démographique relativement élevée,*
- *la population du bassin à l'horizon 2050 est estimée à 7.3 million d'habitants et environ 24 millions de personnes vivront sur le bassin du Nakambé à Wayen en 2100 !*

La relation population-superficies cultivées précédemment mise en évidence nous a ensuite permis d'estimer l'évolution annuelle des surfaces cultivées sur le bassin connaissant celle de la population. Les évolutions annuelles de la végétation naturelle et des sols nus ont été déduites de celles des surfaces cultivées. La Base de Données des Localités du Burkina (BDLB) nous a permis de caractériser l'évolution de la surface totale occupée par les plans d'eau sur le bassin entre 1944 et 2002.

Le second et dernier volet de la réflexion sur la prise en compte de la dynamique du milieu dans GR2M a consisté à transcrire l'évolution des états de surface dans la « données sol » du modèle. Pour ce faire, des indices de production de ruissellement (coefficients de ruissellement) ont été associés à chacune des quatre indicateurs de pression anthropique et/ou climatique. La prédominance du mécanisme d'écoulement hortonien en milieu sahélien nous a amené à poser l'hypothèse suivante :

Toute variation de coefficient de ruissellement dans un sens et dans une proportion donne, due à la transformation de l'un quelconque des quatre types d'états de surface en un autre, se traduit par une variation en sens inverse de la capacité de rétention en eau et dans la même proportion.

Sur la base de cette hypothèse, des équations permettant de moduler la taille du réservoir sol du modèle ont été développées et appliquées au cas du bassin du Nakambé à Wayen. Les nouvelles données sol ainsi générées (Figure 2), suivent un modèle logistique qui prend en compte la dynamique du milieu et l'évolution de la population sur le bassin. Elles sont parfaitement intégrables dans le modèle.

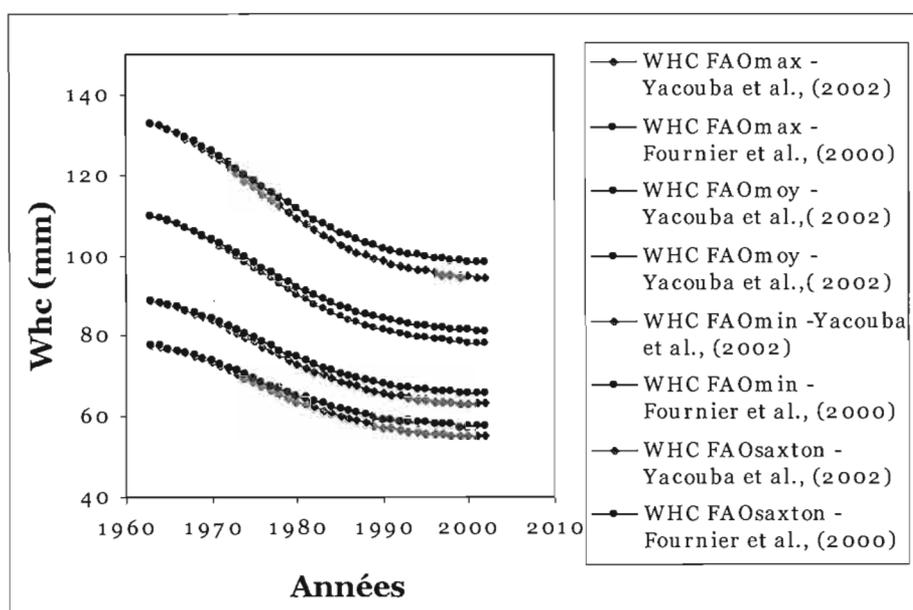


Figure 2 : Évolution de la WHC suivant un modèle logistique de population sur le bassin du Nakambé à Wayen de 1963 à 2002

Quelles sont les performances de GR2M avec les données évolutives de WHC ?

Les nouvelles données de WHC générées ont permis de tester les performances du modèle GR2M sur le bassin du Nakambé à Wayen. Comparativement au cas où la WHC reste constante ou évolue linéairement pendant la durée des simulations, le modèle donne des résultats très satisfaisants avec les WHC logistiques.

- près de la moitié des NASH de calage sont supérieurs à 70%,
- on double même le NASH de validation dans plusieurs cas,
- on obtient 73% de NASH en validation sur la période 1986-1995 avec des paramètres issus du calage sur la période 1965-1985. Ce dernier cas correspond à la meilleure simulation. C'est sans doute du au fait que de la longueur de sa période de calage (20 ans) qui intègre une plus grande diversité de conditions hydroclimatiques.
- la forme des hydrogrammes est bien reproduite,
- les débits de crue sont en général sous-estimés,

Vers où doit-on orienter les recherches ?

Il est primordial de préciser que ce travail revêt un caractère fortement exploratoire. De ce fait, plusieurs points devraient être approfondis afin de permettre une meilleure prise en compte de la dynamique du milieu dans les modèles hydrologiques.

- *Quelle est la représentativité de cette démarche à l'échelle du Sahel ouest africain ?*

Notre étude ne s'est intéressée, dans sa première partie, qu'à 5 bassins sahéliens pour ensuite ne se focaliser que sur le cas particulier du bassin du Nakambé à Wayen, quant à la démarche globale de la prise en compte des états de surface dans le modèle. Une étude menée sur d'autres bassins devrait donc permettre de donner à nos conclusions un caractère plus général et dépourvu de tous les biais liés à la particularité du bassin.

D'autre part, nous nous sommes intéressés au seul cas du modèle GR2M. L'utilisation, en plus de GR2M, de modèles tels que Water Balance Model, Yates, ... reconnus pour leur robustesse et nécessitant des données d'entrée peu nombreuses et assez facilement disponibles dans la zone étudiée rendrait à la démarche un caractère encore plus général.

- *Les données d'indice de production de ruissellement sont-elles représentatives de l'échelle spatiale de notre modélisation ?*

Un des éléments fondamentaux de la démarche que nous avons développée dans ce travail a été d'associer à chaque type d'état de surface un indice de production de ruissellement. Ces coefficients de ruissellement sont mesurés à de petite échelle et ont été pris en compte dans le modèle. Cela pose le problème bien connu du transfert d'échelle en hydrologie. Des expériences comme celles menées sur le bassin de Tougou (petit bassin versant de 36 km² situé dans la partie supérieure du bassin du Nakambé à Wayen) dans le cadre du programme AMMA devraient permettre de mieux caractériser les ratios pluie-écoulement sur les différents types d'états de surface à différentes échelles.

- *Les données sol de la FAO limitent-elles les performances du modèle ?*

Les données de la FAO donnent comme hauteur maximale du réservoir sol la valeur 133 mm. Nous avons supposé que cette valeur correspondait au niveau minimum d'anthropisation du milieu que nous avons situé à « avant 1963 ». Les tests entrepris au chapitre IV nous ont montré qu'en fonction de la période de calage, le modèle ne donnait de meilleurs NASH de validation pour des valeurs de WHC supérieures à 133 mm pour la période 1965-1972.

Comment peut-on réduire l'écart cet écart entre les données que la FAO propose et celles que le modèle demande afin d'obtenir de bons Nash ?

Une comparaison des résultats avec des données sol directement mesurées sur le terrain pourrait apporter un éclairage à cette question. Des mesures d'humidité du sol pour différents types d'états de surface sont en cours sur le bassin de Tougou. Les résultats de ces mesures pourraient être utilisés comme première approche.

– *Nécessité d'une meilleure connaissance du milieu ?*

Les traitements d'image que nous avons effectués dans le cadre de ce travail nous ont montré la difficulté qu'il y a à discriminer les 4 classes d'occupation du sol qui nous ont intéressés dans ce travail. Les erreurs liées à ces traitements ont une influence certaine sur la caractérisation du milieu à des fins hydrologiques. Des traitements complémentaires devraient permettre d'affiner encore plus ces résultats afin de permettre une meilleure caractérisation des états de surface.

D'autre part, nous avons considéré que la surface du bassin n'était composée que de 4 types différents d'états de surface. Le milieu naturel présente une plus grande diversité et, on peut envisager de travailler sur un plus grand nombre de classes afin d'avoir une représentation plus réaliste du milieu.

– *Les questions démographiques en hydrologie*

Une des originalités de notre travail réside dans l'utilisation de données démographique en hydrologie. Le modèle démographique que nous avons utilisé donne des tendances à plus ou moins long terme mais il est difficile, dans la zone d'étude, de prendre en compte des déterminants de la dynamique démographique tels que les phénomènes migratoires dus :

- aux conflits qui ne préviennent pas et qui peuvent profondément modifier les sociétés et leur environnement,
- aux déplacements de populations pour des raisons diverses (exode rural, recherche de terres plus propices à l'agriculture, ...)

La difficulté est essentiellement liée au manque de données. Les résultats obtenus dans ce travail doivent donc être approfondis pour une meilleure prise en compte des questions démographiques en hydrologie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adefolalu D. O., (1986). Further aspects of sahelian drought as evident from rainfall regime of Nigeria. *Arch. Meteorol. Gophys. Bioclimatol.*, **Ser. B 36**: 277-295.
- Albergel J. (1987). Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface - Application aux petits bassins du Burkina Faso. In: *The influence of Climate Change Variability on the Hydrologic Regime and Water Ressources*. AISH Publ. **168**. Vancouver. 355-365.
- Albergel J., Ribstein P. et Valentin C. (1986). L'infiltration: quels facteurs explicatifs? Analyse des résultats acquis sur 48 parcelles soumises à des simulations de pluie au Burkina Faso. In: *Journées hydrologiques de à l'ORSTOM*. Montpellier. 25-48.
- Albergel J. et Thébé B., (1986). Pluie naturelle - pluie simulée. Quelle différence sur le ruissellement. ORSTOM Montpellier.
- Albergel J. et Valentin C. (1991). "Sahélisation" d'un petit bassin versant: Boulsa-Koghner au centre du Burkina Faso. In: *Dégradation des Paysages en Afrique de l'Ouest*. Richard J.F. (éd). Presse Universitaire de Dakar. Dakar, 21-26 novembre 1988. 119-133.
- Ardoin S., (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, Montpellier, 437 pp.
- Ardoin S., Lubes-Niel H., Servat E., Dezetter A., Boyer J. F., Mahé G. et Paturel J. E. (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 90. In: *Conf. Int. Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides*. Servat E., Najem W., Leduc C. et Ahmed S. (éds). IAHS Red Books. **no 278**. Montpellier, France, 2003. 223-228.

- Arizpe L., Stone M. P. et Major D. C. (Editors), (1994). Population and environment: rethinking the debate. Boulder Westview Press.
- Arnell N. W. et Reynards N. S., (1996). The effect climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, **183**: 397-424.
- Arora V. K., (2002). The use of aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology*, **265**: 164-177.
- Artzrouni M., (1986). Une nouvelle famille de courbe de croissance: application à la transition démographique. *Population (French Edition)*, **41^{ème} année, N°3 (May - June 1986)**: 497-509.
- Atlas Jeune Afrique, (1993). *Atlas du Burkina Faso*. Les Atlas Jeune Afrique.
- Aubreville A., (1949). *Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale*. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales. Paris, 351 pp.
- Audry P. et Rossetti C., (1962). *Observations sur les sols et la végétation en Mauritanie du Sud-Est et sur la bordure adjacente du Mali (1959 et 1961)*. Prospection écologique. Etudes en Afrique Occidentale. Projet du fond spécial des Nations-Unies relatif au criquet pèlerin. FAO. Rome, 267 pp.
- Beran N. A. et Rodier J. A., (1987). Aspects hydrologiques des sécheresses: contribution au programme hydrologique international. Rapport préparé par un comité mixte UNESCO/OMM., Paris, France. 172 pp.
- Berne A., Guy D., Creutin J.-D. et Obled C., (2004). Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology*, **299**: 166-179.
- Bernus E., Marchal J. Y. et Poncet Y., (1993). Le Sahel oublié. *Revue Tiers Monde*, **34(134)**.
- Bilsborrow R. E., (1987). Population pressures and agricultural development in developing countries: a conceptual framework and recent evidence. *World Development*, **15(2)**: 183-203.
- Birot Y. et Galabert I. (1967). L'amélioration des rendements en agriculture par l'aménagement antiérosif et les techniques culturales dans l'Ader Douthi-Magia Niger. In: *Colloque Fertilité des sols tropicaux*. Tananarive. 1316-1331.
- Blaikie P. et Brookfield H., (1987). *Land degradation and society*. Routledge, London and New York, 296 pp.
- Bocquier G., (1971). Genèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique. Thèse es Sciences Naturelles. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364 pp.
- Boisseau S., Locatelli B. et Weber J. (1999). Population and environment relationship: a U-shaped curve hypothesis. In: *Jardin planétaire*. Chambéry, mars 1999.
- Boserup E., (1965). *Conditions of agricultural growth*. Aldine, New York.

- Boserup E., (1970). *Evolution agraire et pression démographique*. Flammarion, Paris.
- Boserup E., (1981). *Population and technological change*. University of Chicago Press, Chicago.
- Bougere J., (1979). L'état de dégradation des formations sableuses du Sahel Voltaïque ou l'urgence d'une intervention. *Trav. de l'Inst. de Géogr. de Reims.*, **314**: 91-101.
- Bourcier De Carbon P. (1997). De la "Révolution" démographique à la " Transition" démographique: les avatars de la pensée de Landry à l'aune des concepteurs du paradigme de la " Transition démographique". In: *Adolphe Landry: économiste, démographe et législateur*. Corte (Corse), 3-6 septembre 1997.
- Bourgeois-Pichat J., (1987). Commentaires sur l'étude de M. Bourcier de Carbon intitulée " Niveau de vie et fluctuations démographiques. Contribution à l'analyse de la baisse séculaire de la fécondité et des interactions entre populations: Vers une théorie socio-économique de l'implosion démographique de l'après transition " Texte du 23 Avril 1987., Paris.
- Boyer J. F., Dieulin C., Rouche N., Cres A., Servat É., Paturel J. E. et Mahé G. (2006). SIEREM: an environmental information system for water resources. In: *Fifth FRIEND World Conference: Climate Variability and Change - Hydrological Impacts*. Demuth S., Gustard A., Planos E., Scatena F. et Servat E. (éds). Havana, Cuba, Novembre 2006. 19-25.
- Bronstert A., Niehoff D. et Burger G., (2002). Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes*, **16**(2): 509-529.
- Brown L., (1990). *L'état de la planète. Nouveaux Horizons*. Worldwatch Institute. Paris.
- Brunet-Moret Y., Chaperon P., Lamagat J. P. et Molinier M. (Editors), (1986). Monographie hydrologique du fleuve Niger. Coll. Monographies Hydrologiques de l'ORSTOM, n° 8.
- C.C.T.A., (1963). Carte des sols d'Afrique. Carte en sept feuilles au 1/5 000 000.
- Caloz R. et Collet C., (2001). *Précis de télédétection: Traitements numériques d'images de télédétection*, **Vol 3**. AUF et Presse universitaire du Québec. 386 pp.
- Cantillon R., (1755). *Essai sur la nature du commerce en général*.
- Canty M. J., Nielsen A. A. et Schmidt M., (2004). Automatic radiometric normalization of multitemporal satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, **91**(3-4): 441-451.
- Carbonnel J.-P. et Hubert P., (1992). Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne: remise en cause de la stationnarité des séries. In: Le Floch E., Grouzis M., Cornet A. et Bille J.-C. (Editors). In: *L'aridité: une contrainte au développement*. 37-51.
- Casenave A., (1982). Le minisimulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes de l'interprétation des mesures. In: *Cah. ORSTOM Série Hydrologie*. 207-227.

- Casenave A. et Valentin C., (1988). *Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration*. CEE / ORSTOM, multigr. Paris, 202 pp.
- Casenave A. et Valentin C. (1991). Influence des états de surface sur l'infiltration en zone sahélienne. In: *Niamey Worksop on Soil Water Balance in Soudano-Sahelian Zone*. IAHS Publ. n°199. Niamey. 99-108.
- Casenave A. et Valentin C., (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of west Africa. *Journal of Hydrology*, **130**(1-4): 231-249.
- Chandrasekhar S., (1960). *Radiative transfert*. Dover. New York.
- Chesnais J. C. (1987). La théorie originelle de la transition démographique: validité et limite du modèle. In: *Journées démographiques de l'ORSTOM*. ORSTOM. Paris, 23-25 Septembre 1985. 7-21.
- Chevalier P. et Valentin C., (1984). Influence des micro-organisations pelliculaires superficielles sur l'infiltrabilité d'un type de sol sahélien. In: Orstom (Editor). In: *Journée du groupe français d'humidimétrie neutronique*, Montpellier.
- Cleaver K. et Schreiber G., (1994). *Reversing the the spiral: the population, agriculture and environment nexus in sub-saharan Africa*. World Bank (Directions in Development series). Washington.
- Collinet J. et Lafforgue A., (1979). *Mesures de ruissellement et d'érosion sous pluies simulées pour quelque types de sols de Haute Volta*. ORSTOM. Abidjan, 129 pp.
- Collinet J. et Valentin C., (1979). Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamisme superficielle: nouvelles perspectives, applications agronomiques. *Cah. ORSTOM, sér. pédologie*, **17**(4): 283-328.
- Coppin P. R. et Bauer M. E., (1994). Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **32**(4): 918-927.
- Courel M. F., (1984). Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse d'Etat. Université Paris I, 407 pp.
- Dieulin C., (2005). Calcul des capacités en eau des sols (WHC) à partir de la carte des sols de la FAOC, Laboratoire Hydrosociences, Montpellier. pp.
- Dolman A. J., Gash J. H. C., Goutorbe J.-P., Kerr Y. H., Lebel T., Prince S. D. et Stricker J. N. M., (1997). The role of the land surface in Sahelian climate: HAPEX-Sahel results and future research needs. *Journal of Hydrology*, **188-189**: 1067-1079.
- Drabo I., Ilboudo F., Quesnel A., Tallet B. et Marchal J. Y., (2002). Dynamique des populations, disponibilités en terres et adaptation des régimes fonciers: le cas du Burkina Faso, Institut National des Sciences de la société (INSS) Institut National des Statistique et de la Démographie (INSD). pp.

- Dray A., (2001). Prise en compte de l'évolution de l'occupation du sol dans la modélisation des écoulements du Nakambé à Wayen (Burkina Faso). Mémoire de DEA. ENSA.
- Dupâquier J., (1997). *L'espérance de vie sans incapacités*. Presse Universitaire de France. Paris.
- Edijatno, (1987). Amélioration des modèles simples de transformation pluie-débit au pas de temps journalier sur des petits bassins versants. Mémoire de DEA. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg.
- Edijatno, (1991). Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier. Thèse de doctorat. Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strasbourg, 635 pp.
- Emberger L., (1971). *Tavaux de botanique etn d'écologie*. Masson et Cie. Paris, 520 pp.
- Escadafal R., (1981). Une méthode nouvelle de description de la surface du sol dans les régions arides. *Sols*, **5**: 21-27.
- Euler L., (1760). Recherches générales sur la mortalité et la multiplication. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles Lettres*, **16**: 144-164.
- Falloux F., (1992). *Agriculture, population et environnement: leurs inter-relations en Afrique.*, Paris.
- Fao-Unesco, (1974-1981). CD-ROM: Soil Map of The World. UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- Floret C., Le Floc'h E. et Pontanier R., (1992). Perturbations anthropiques et aridification en zone présahélienne. In: Le Floc'h E., Grouzis M., Cornet A. et Bille J.-C. (Editors). In: *L'aridité: une contrainte au développement*. 449-463.
- Floret C. et Pontanier R., (1984). Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot.*, **131**(2/3/4): 265-275.
- Fournier J., Serpantier G., Delhoume J.-P. et Gathelier R., (2000). Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina: Application à l'aménagement des versants. In: Floret C. et Pontanier R. (Editors). In: *La jachère en Afrique tropicale: Rôle, Aménagements, Alternatives*. 179-188.
- Fuller D. O. et Ottke C., (2002). Land cover, rainfall and land-surface albedo in west Africa. *Climatic Change*, **54**(1): 181-204.
- Galea G., (1972). Modèles déterministes des relations pluie-débit sur le bassin d'Orgeval, Université Montpellier 2. pp.
- Gavaud M., (1968). Les sols bien drainés sur matériau sableu au Niger. Essai systématique régoinale. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, **VI**(3/4): 271-307.
- Gavaud M., (1971). Première tentative d'inventaire des principales toposéquences en zone tropicale à longue saison sèche. *Bull. Liaison*, **n°2**(Thème B): 11-12.

- Geny P., Waechter P. et Yatchinovsky A., (1992). *Environnement et développement rural: Guide de la gestion des ressources naturelles*. Frisson-Roche, 418 pp.
- Girard S., (2002). Mode opératoire: Logiciel de modélisation hydrologique spatialisée mensuelle sur l'Afrique, IRD, Ouagadougou (Burkina Faso). pp.
- Giri J., (1983). *Le Sahel demain. Catastrophe ou renaissance?* Editions Karthala, Paris, 323 pp.
- Grésillon J. M., (1994). Contribution à l'étude de la formation des écoulements de crues sur petits bassins versants. Approches numériques et expérimentales à différentes échelles. Document présenté pour obtenir le diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Guillobez S., (1985). Milieux naturels du Burkina Faso. Institut de Recherche Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières - Service Pédologie Cartographie.
- Haan J. F., Hovenier J. W., Kokke J. M. M. et Stokkom H. T. C., (1991). Removal of atmospheric influences on satellite-borne imagery: a radiative transfert approach. *Remote Sensing of Environment*, **37**: 1-21.
- Harrison P., (1991). *Une Afrique verte*. Paris: Wageningen; Karthala: CTA. 448 pp.
- Henry P., Dinguirard M. C. et Meygret A., (1996). *Synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT*. CNES. Toulouse, France.
- Hewlett J. D., (1961). Watershed management. In: *Annual Repport 1961*. USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville (NC, USA). 61-66.
- Hillion A., (1986). *Les théories mathématiques des populations*. Que sais-je? n°2258. Presses Universitaires de France, Paris, 127 pp.
- Horton R. E., (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, **14**: 446-460.
- Huguenin R. L., Karaska M. A., Blaricom D. V. et Jensen J. R., (1997). Subpixel classification of bald cypress and tupolo gum from Thematic Mapper imagery. *Remote Sensing of Environment*, **63**: 717-725.
- Hulme M., (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. *Global Environmental Change*, **11**: 19-29.
- Jensen J. R., (1986). *Digital imagery processing*. Englewood Cliffs, Prentis-Hall. 379 pp.
- Kabore D. et Reij C. (2003). The emergence and spread of an improved traditional soil and water conservation practice in Burkina Faso. In: *Successes in African Agriculture*. Pretoria, South Africa, 1 au 3 décembre 2003.
- Karambiri H., (2003). Crue et érosion hydrique au Sahel: étude et modélisation des flux d'eau et de matière sur un petit bassin versant pastoral au Nord du Burkina Faso. Thèse Doctorat. Paris VI, 341 pp.

- Khodja H., Lubes-Niel H., Sabatier R., Masson J. M., Servat E. et Paturol J. E., (1998). Analyse spatio-temporelle de données pluviométriques en Afrique de l'Ouest. Recherche d'une rupture en moyenne. Une alternative intéressante: les tests de permutation. *Revue de statistique appliquée*, **XLVI**(1): 95-110.
- L'hôte Y., Dubreuil P. et Lericque J. (1995). Carte des types de climats "en Afrique Noire à l'ouest du Congo". Rappels, et extension aux régimes hydrologiques. In: *L'hydrologie tropicale: Géoscience et outil pour le développement*. IAHS Publ. **238**. Paris. 55-65.
- L'hôte Y., Dubreuil P. et Lericque J. (1996). Carte des types de climats en "Afrique Noire à l'ouest du Congo". Rappels et extension aux régimes hydrologiques. In: *L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement*. IAHS Publ. n° **238**. Actes de la conférence de Paris, mai 1995. 55-65.
- L'hôte Y., Mahé G. et Somé B., (2003). The 1990's rainfall in the Sahel: the third driest decade since the beginning of the century. Reply to discussion. *Hydrological Sciences Journal*, **48**(3): 493-496.
- L'hôte Y., Mahé G., Some B. et Triboulet J. P., (2002). Analysis of a Sahelian annual rainfall index updated from 1896 to 2000. The drought still goes on. *Hydrological Sciences Journal*, **47**(4): 563-572.
- Landry A., (1909). *Les trois théories principales de la population*. Scientia. Paris.
- Landry A., (1933). Méthodes nouvelles pour étudier le mouvement de la population. *Scientia*, **Vol 30**.
- Landry A., (1934). *La révolution démographique. Etudes et essais sur les problèmes de la population*. Sirey. Paris, 231 pp.
- Landry A., Bunle H., Depoid P., Huber M. et Sauvy A., (1949). *Traité de démographie*. Payot. Paris.
- Laraque A., Mahé G., Orange D. et Marieu B., (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during th XX th century. *Journal of Hydrology*, **245**(1-4): 104-117.
- Le Borgne J. (1990). La dégradation actuelle du climat en Afrique, entre Sahara et équateur. In: *La dégradation des paysages en Afrique de l'Ouest. Points de vue et perspectives de recherches*. Richard J.P. (éd). Université Cheik Anta Diop, Dakar, Sénégal. 17-36.
- Lebel T. (1991). Le transfert d'échelle en hydrologie: concept ou confusions? In: *Seminfor 4: Quatrième Séminaire Informatique de l'ORSTOM*. Mullon C. (éd). Brest. 147-156.
- Legesse D., Vallet C. C. et Gasse F., (2003). Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa; case study south central Ethiopia. *Journal of Hydrology*, **275**(1-2): 67-85.
- Leisinger K. M. et Schmitt K., (1994). *Survivre au Sahel: Un défi pour l'écologie et la politique de développement*.

- Leprun J.-C., (1978). Compte rendu de fin d'études sur les sols et leur susceptibilité à l'érosion, les terres de crues salées, les formations de "brousse tigré" dans le Gourma., ORSTOM / DGRST, Paris. 45 pp.
- Leprun J.-C., (1979). Etude de l'évolution d'un système d'exploitation sahélien au Mali. Volet pédologique. Rapport de campagne 1979, ORSTOM / DGRST, Paris. 27 pp.
- Leprun J.-C., Molinier M., Cadier E., Fotius G., Galindo O., De Souza Ramos F. et De Souza H., (1995). Les sécheresses de la région nord-est du Brésil et leurs conséquences. *Sécheresse*, **6**(1): 23-33.
- Liang S., Fallah-Adl H., Kaluri S., Jaja J., Kaufman Y. J. et Townshend J. R. G., (1997). An operational atmospheric correction algorithm for Landsat Thematic Mapper imagery over the land. *Journal of Geographic Research*, **102**(17): 173-186.
- Lorup J. K., Refsgaard J. C. et Mazvimavi D., (1998). Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modelling; case studies from Zimbabwe. *Journal of Hydrology*, **205**(3-4): 147-163.
- Lotka A., (1939). *Théorie analytique des associations biologiques. Deuxième partie: Analyse démographique avec applications particulière à l'espèce humaine*. Hermann et Cie. Paris.
- Mahe G., Dray A., Paturel J. E., Cres A., Kone F., Manga M., Cres F. N., Djoukam J., Maïga A. H., Ouedraogo M., Conway D. et Servat E. (2002). Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambé river in Burkina. In: *FRIEND 2002 Regional Hydrology: Bridging the gap between research and practice*. Van L. et Demuth S. (éds). IAHS-pub. **274**. Cape Town - South Africa. 69-76.
- Mahé G., L'hôte Y., Olivry J. C. et Wotling G., (1999). Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa - 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, **46**(2): 211-226.
- Mahé G., L'hôte Y., Olivry J. C. et Wotling G., (2001). Tendances et discontinuité dans les séries de pluie régionales en Afrique de l'Ouest et Centrale: 1951-1989. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **42**(2): 211-226.
- Mahé G., Leduc C., Amani A., Paturel J. E., Girard S., Servat É. et Dezetter A. (2003). Augmentation récente du ruissellement de surface en zone soudano-sahélienne et impacts sur les ressources en eau. In: *Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides*. AISH Pub. **278**. Montpellier. 215-222.
- Mahé G. et Olivry J. C., (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, **6**(1): 109-117.
- Mahé G., Paturel J. E., Servat É., Conway D. et Dezetter A., (2005). The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambé river, Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, **300**: 33-43.

- Maklouf Z., (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat. Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- Maklouf Z. et Michel C., (1994). A two parameter monthly water balance model for french watersheds. *Journal of Hydrology*, **162**: 299-318.
- Maklouf Z., (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat. Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- Malthus T. R., (1803). *An essay ont the principle of population or a view of its past and present effects on human happiness*.
- Marchal J. Y., (1977). Système agraire et évolution de l'occupation de l'espace au Yatenga (Haute Volta). In: *Cahiers ORSTOM*. Série Sciences Humaines. ORSTOM, Paris. 141-149.
- Marchal J. Y., (1983). La dynamique d'un espace rural soudano-sahélien. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Paris 1 (Panthéon-Sorbonne), 908 pp.
- Marchal J. Y., (1984). L'espace des techniciens et celui des paysans: histoire d'un périmètre anti-érosif en Haute Volta. In: *Maitrise de l'espace agraire et développement en Afrique tropicale*. ORSTOM, Paris. 245-252.
- Marchal J. Y., (1984). Lorsque l'outil ne compte plus: techniques agraires et entités sociales au Yatenga. In: *Cahiers ORSTOM*. Série Sciences Humaines. ORSTOM, Paris. 461-469.
- Mathieu P., (1998). Population, pauvreté et dégradation de l'environnement en Afrique: fatale attraction ou liaison hasardeuse? *Nature Sciences Sociétés*, **27**(3): 27-34.
- Meigs P., (1952). World distribution of arid and semi-arid homo-climates. *Rev. Res. on Arid Zone Hydr.*: 203-210.
- Michel C., (1983). Que peut-on faire en hydrologie avec un modèle à un paramètre. *La Houille Blanche*, **1**: 39-44.
- Midows D. H., Midows D. L., Randers J. et Behrens W. W., (1972). *The limits to growth*. Universe Books. New York.
- Monod T., (1973). *Les déserts*. Horizons de France, Paris, 247 pp.
- Nash J. E. et Sutcliffe J. V., (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principle. *Journal of Hydrology*, **10**: 282-290.
- New M., Hulme M. et Jones P., (1999). Representing twentieth century space-time climate variability. Part I: developpement of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, **12**(3): 829-856.
- New M., Hulme M. et Jones P., (2000). Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: developpement of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate*, **13**(13): 2217-2238.

- Nicholson S. E., (2000). Land surface processes and Sahel climate. *Reviews of Geophysics*, **38**(1): 117-139.
- Nicholson S. E., Some B. et Kone B., (1999). An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *Journal of Climate*, **13**(14): 2628-2640.
- Niculescu B., (1996). *La transdisciplinarité: Manifeste*. Coll. "Transdisciplinarité". Edition du Rocher, Paris.
- Niehoff D., Fritsch U. et Bronstert A., (2002). Land-use impacts on storm-runoff generation: scenarios of land-use change and simulation of hydrological response in a meso-scale catchment in SW-Germany. *Journal of Hydrology*, **267**(1-2): 80-93.
- Notestein F. W., (1944). Problems of policy in relation to areas of heavy population pressure. *Milbank Memorial Fund Quarterly*, **22**(n°4).
- Notestein F. W., (1945). Population: the long view. In: Scultz E. (Editor). In: *Food for the world*. University of Chicago Press. 36-57.
- Olivry J. C., (1994). De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. *Dossier de la Revue de Géographie Alpine*, n° **12**: 101-108.
- Olivry J. C., Bricquet J. P., Bamba F. et Diarra M. (1993). Le régime hydrologique du Niger Supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In: *Grands bassins fluviaux périallantiques: Congo, Niger, Amazone*. Boulegue J. et Olivry J.C. (éds). Paris, 22-24 novembre 1993. 251-266.
- Olivry J. C., Bricquet J. P. et Mahe G. (1998). Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. Servat E., Hughes D., Fritsch J.M. et Hulme M. (éds). AISH Publ. **252**. Abidjan. 189-197.
- Ouedraogo M., (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. Doctoral. Université de Montpellier II, Montpellier (France), 257 pp.
- Paturel J. E., Servat E. et Delattre M. O., (1998). Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **43**(6): 937-946.
- Pell M. C., McMahon T. A., Finalyson B. L. et Watson F. G. R., (2002). Implications of the relationship between catchment vegetation type and the variability of annual runoff. *Hydrological processes*, **16**: 2995-3002.
- Penman H. L., (1956). Evaporation: an introduction survey. *J. Agric. Sci*, **1**: 9-29.

- Penman H. L., (1963). Vegetation and hydrology. Technical Communication N°53, Commonwealth Bureau of Soils, Farnham Royal, Bucks (UK). 124 pp.
- Pouyaud B., (1987). Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques, ORSTOM, Montpellier (France). 21 pp.
- Puech C., (1993). Détermination des états de surface par télédétection pour favoriser les écoulements des petits bassins versants. Thèse d'état. Université Joseph-Fourrier, Grenoble I, 214 pp.
- Quesnel A., (1994). Transition démographique, transformations des systèmes d'exploitation agricole et environnement. *Comptes rendus de l'académie de l'agriculture de France*, **80**(8): 123-132.
- Quetelet A., (1835). *Sur l'homme et le développement de ses facultés, essai de la physique sociale*, **Vol 1 et 2 (1^{ère} édition de la *Physique sociale*)**. Bruxelles.
- Raynaud C., (1997). *Sahels. Diversité et dynamiques des relations société-nature*. Karthala-GRID, Paris, 430 pp.
- Raynolds C. A., Jackson T. J. et Rawls W. J. (1999). Estimating available water content by linking the FAO Soil Map of the World with Global Soil Profile Databases and Pedo-Transfer functions. In: *AGU 1999 Spring Conference*. Boston, May 31 - June 4.
- Rodier J., (1964). Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. ORSTOM, Paris.
- Roose E. (1989). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale. In: *Proceeding of an international workshop on Soil, Crop and Water Management systems for Rainfed Agriculture in Sudano-Sahelian Zone*. Patancheru Ind (éd). Niamey, Niger, 11 - 16 janvier 1987.
- Ruas J.-F. et Benoit-Cattin M., (1991). Modélisation technico-démographique des futurs alimentaires du Burkina Faso. *Les Cahiers de la Recherche Développement*, **n°29**.
- Sauvy A., (1952-1954). *théorie générale de la population. Vol 1: Economie et population. 1952; Vol 2: Biologie sociale. 1954*. Presse Universitaire de France. Paris.
- Schott J. R., Salvaggio C. et Volchok W. J., (1988). Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sensing of Environment*, **26**: 1-16.
- Schroeder T. A., Cohen W. B., Song C., Canty M. J. et Yang Z., (2006). Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*, **103**: 16-26.
- Séguis L., Cappelaere B., Peugeot C., Leduc C. et Milesi G. (2003). Influence de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin versant sahélien. In: *Hydrology of mediterranean and semiarids regions*. Servat E., Najem W., Leduc C.

- et Shakeel A. (éds). AISH-IAHS Publication. **278**. Montpellier, France, April 1-4 2003. 429-434.
- Sene S. et Ozer P., (2002). Evolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bull. Soc. Géogr. de Liège*, **42**: 27-33.
- Servat E., Paturel J. E., Lubes-Niel H., Kouame B. et Travaglio M., (1997). De la diminution des écoulements en Afrique de l'Ouest et centrale. *Sciences de la terre et des planètes*, **325**: 679-682.
- Sircoulon J., (1974). Les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'Ouest sahélienne. Rapport n° 2, SIES. 44 pp.
- Sircoulon J., (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20ème siècle. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, **Vol. XIII**(n° 2): 75-174.
- Song C., Woodcock C. E., Seto K. C., Lenney M. P. et Macomber S. A., (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects. *Remote Sensing of Environment*, **75**: 230-244.
- Spanner M. A., Pierce L. L., Peterson D. L. et Running S. W., (1990). Remote sensing of temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory vegetation and back ground reflectance. *Remote Sensing of Environment*, **21**: 373-387.
- Stebbing E. P., (1935). The encroaching Sahara: the threat to the West African colonies. *Geographical Journal*, **85**: 506-524.
- Stebbing E. P., (1938). The man-made desert in Africa: erosion and drought. *Journal of the Royal African Society*(3-40).
- Tabsoba D., Bobee B., Lebarbe L. et Elguero E., (2002). Quelques caractéristiques événementielles des régimes pluviométriques ponctuels ouest-africain au cours de deux périodes climatologiques contrastées (1951-1970 et 1971-19990). *Sécheresse*, **13**(2): 95-104.
- Tanré D., (1986). *Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*. Laboratoire d'optimique atmosphérique, Université des sciences et techniques de Lille. Lille, 320 pp.
- Taylor C. M., Lambin E. F., Stehenné N., Harding R. J. et Essery R. L. H., (2002). The influence of land use change on climate in the Sahel. *Journal of Climate*, **15**(24): 3615-3629.
- Thiombiano L., (2000). Etude de l'importance des facteurs édaphiques et pédopaysagiques dans le développement de la désertification en zone sahélienne du Burkina Faso. Thèse d'Etat. Université de Cocody, Abidjan, 327 pp.

- Tiffen M., Mortimore M. et Gichuki F., (1994). *More people, less erosion: environmental recovery in kenya*. Wylie and sons. London.
- Toupet C., (1992). *Le Sahel*. Editions NATHAN, 192 pp.
- Unesco, (1971). *Tectonique de l'Afrique*. Paris, 602 + cartes pp.
- Valentin C., (1981). Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez-Niger). Dynamique et conséquence sur l'économie en eau. Thèse 3^{ème} cycle. Université Paris VII, Paris, 259 pp.
- Verhulst P.-F., (1838). Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. *Correspondance mathématique et physique*, **Tome X**: 113-121.
- Vermote E. F., Tanre D., Deuze J. L., Herman M. et Morecrette J. J., (1997). *Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S), 6S User's Guide Version 2, Code 923*. NSAS Goddard Space Flight Center. Green-belt, MD.
- Vlaar J. C. J., (1992). *Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel*. Rapport d'une étude effectuée dans le cadre d'une collaboration entre le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), Ouagadaougou Burkina Faso, et l'Université Agronomique Wageningen (UAW). Wageningen, Les Pays Bas.
- Vogelmann J. E., Helder D., Morfitt R., Choate M. J., Merchant J. W. et Bulley H., (2001). Effects of Landsat 5 Thematic Mapper and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus radiometric and geometric corrections on landscape characterization. *Remote Sensing of Environment*, **78**(55-70).
- Yacouba H., Da D. E. C., Yonkeu S., Zombre P. et Soule M. (2002). Caractérisation du ruissellement et de l'érosion hydrique dans le bassin supérieur du Nakambé (Burkina Faso). In: *5^{ème} Conférence Inter-Régionale sur l'environnement et l'Eau - Envirowater 2002*. Ouagdouhou. 318-325.
- Yates D. N., (1997). Approaches to continental scale runoff for integrated assesement model. *Journal of Hydrology*, **201**: 289-310.

ANNEXES

**ANNEXES I : ORGANISATIONS ADMINISTRATIVES DU BURKINA FASO ET
DU BASSIN DU NAKAMBE À WAYEN DE 1960 A 1996****Découpage administratif du Burkina Faso et du bassin du Nakambé aux
Recensements Généraux de la Population de 1960, 1975, 1985 et 1996*****Enquête démographique de 1960***

Une enquête démographique par sondage a été réalisée sur l'ensemble du Burkina Faso d'octobre 1960 à mars 1961, à l'exception des villes de Ouagadougou et Bobo-Dioulasso (Insee-Ssm, 1970a; 1970b). Le recensement et l'étude de ces deux villes ont fait l'objet d'une autre enquête dont les résultats ont complété ceux de 1960-1961 (Insee-Ssm, 1962; , 1964). Le pays était organisé administrativement en 39 cercles dont 13 étaient partiellement ou totalement inclus dans le bassin du Nakambé (Figure 1).

Nous avons également trouvé une carte administrative du pays avec un découpage par strates géo-ethniques (Figure 2). Cette carte revêt une grande importance car elle montre qu'en 1960-1961 le bassin du Nakambé était principalement composé de l'ethnie des mossis connus pour leurs pratiques agricoles extensives. C'est une information qui sera prise en compte dans l'analyse des interrelations entre pratiques agro-pastorales, population et dégradation du milieu. Ces aspects seront abordés et discutés au chapitre V.

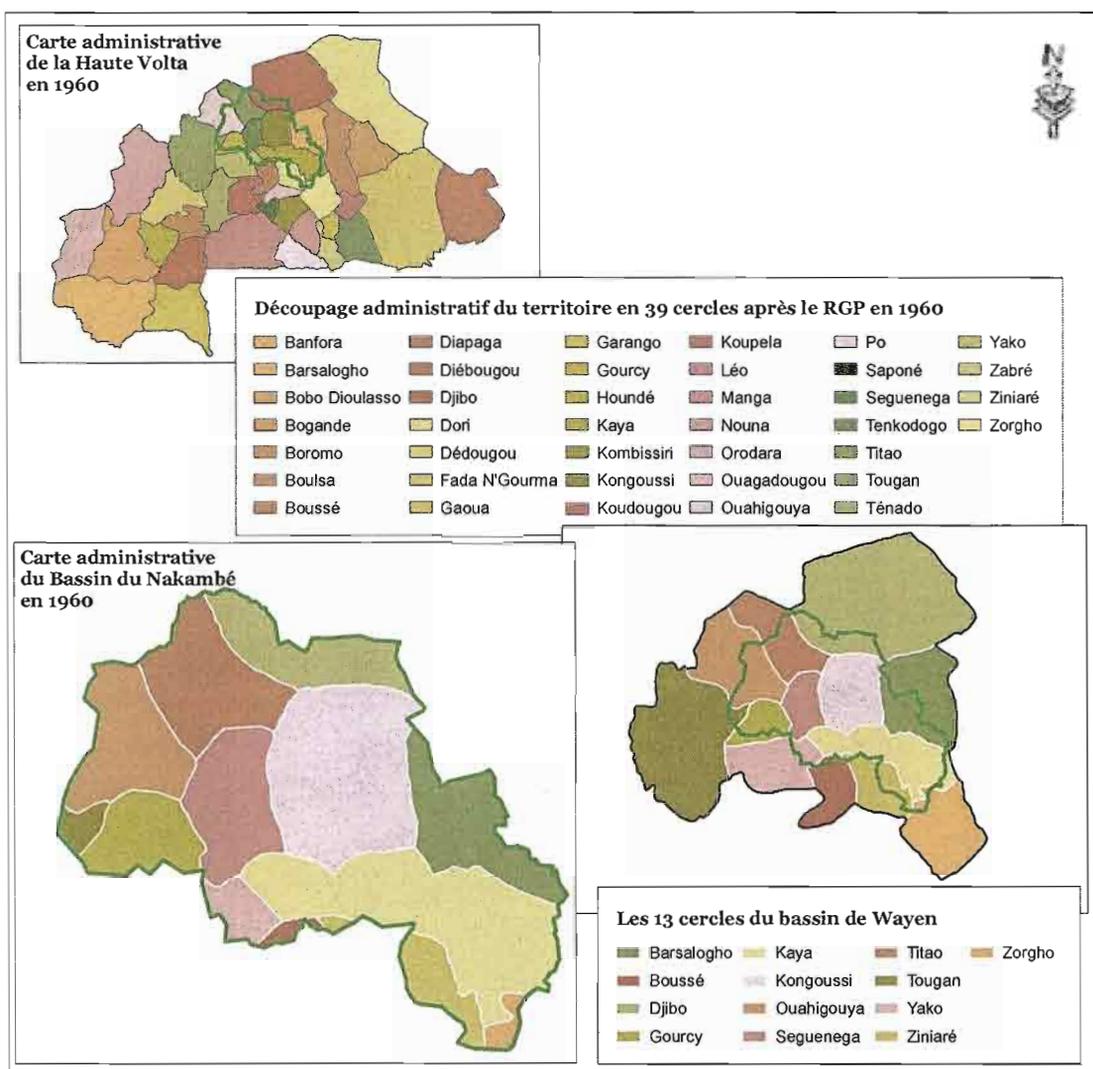


Figure 1 : Découpage administratif du Burkina Faso (ex-Haute-Volta) après l'enquête démographique de 1960

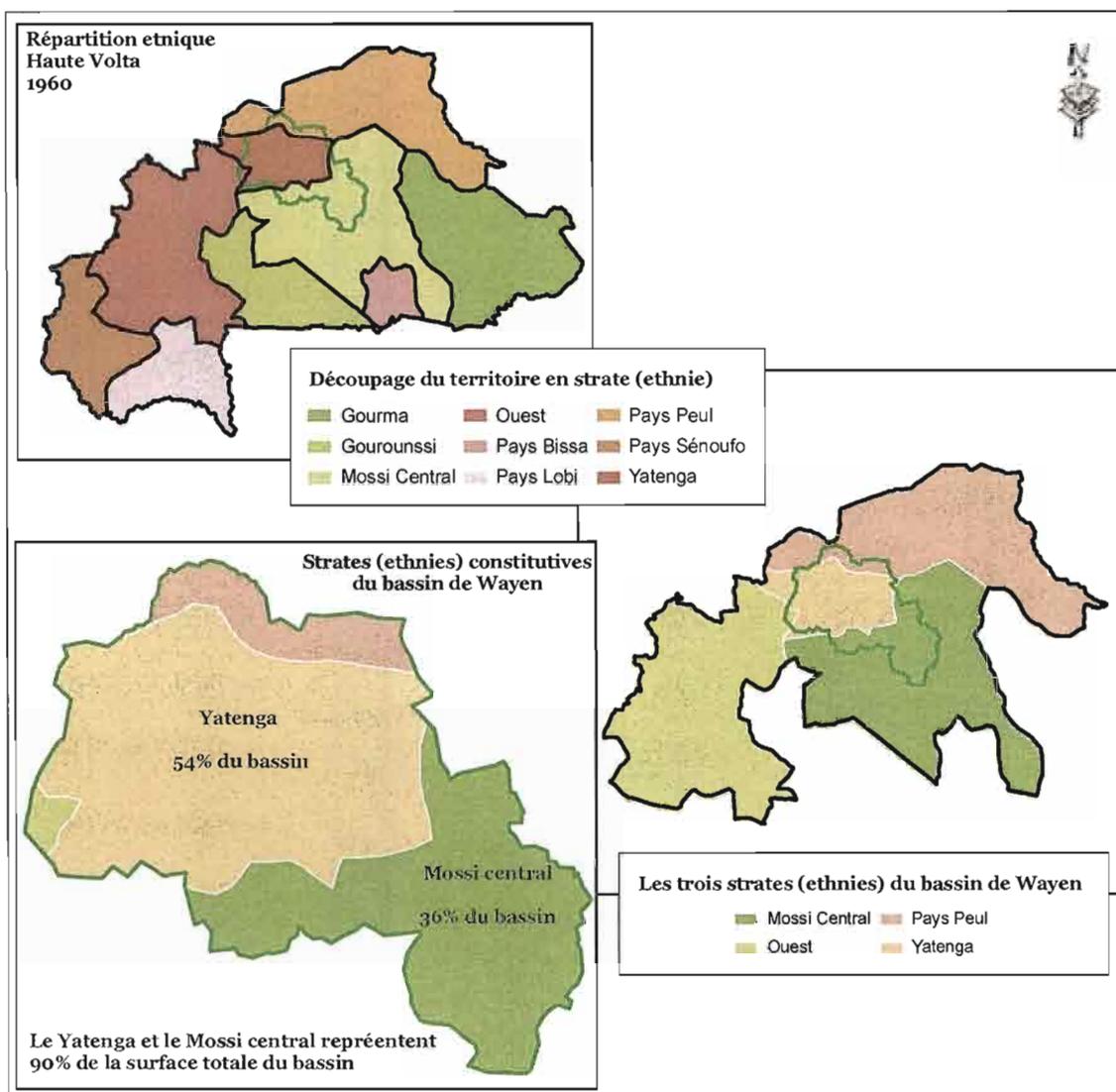


Figure 2 : Organisation du territoire du Burkina Faso (ex-Haute-Volta) et du bassin du Nakambé par strates géo ethniques après l'enquête démographique de 1960-1961.

Recensement Général de la Population de 1975

Après le second Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) en 1975, le pays a été divisé en 10 départements dont 6 constituaient le bassin (Figure 3). Les départements du Nord, et du Centre-Nord constituent plus de 80% du territoire du bassin.

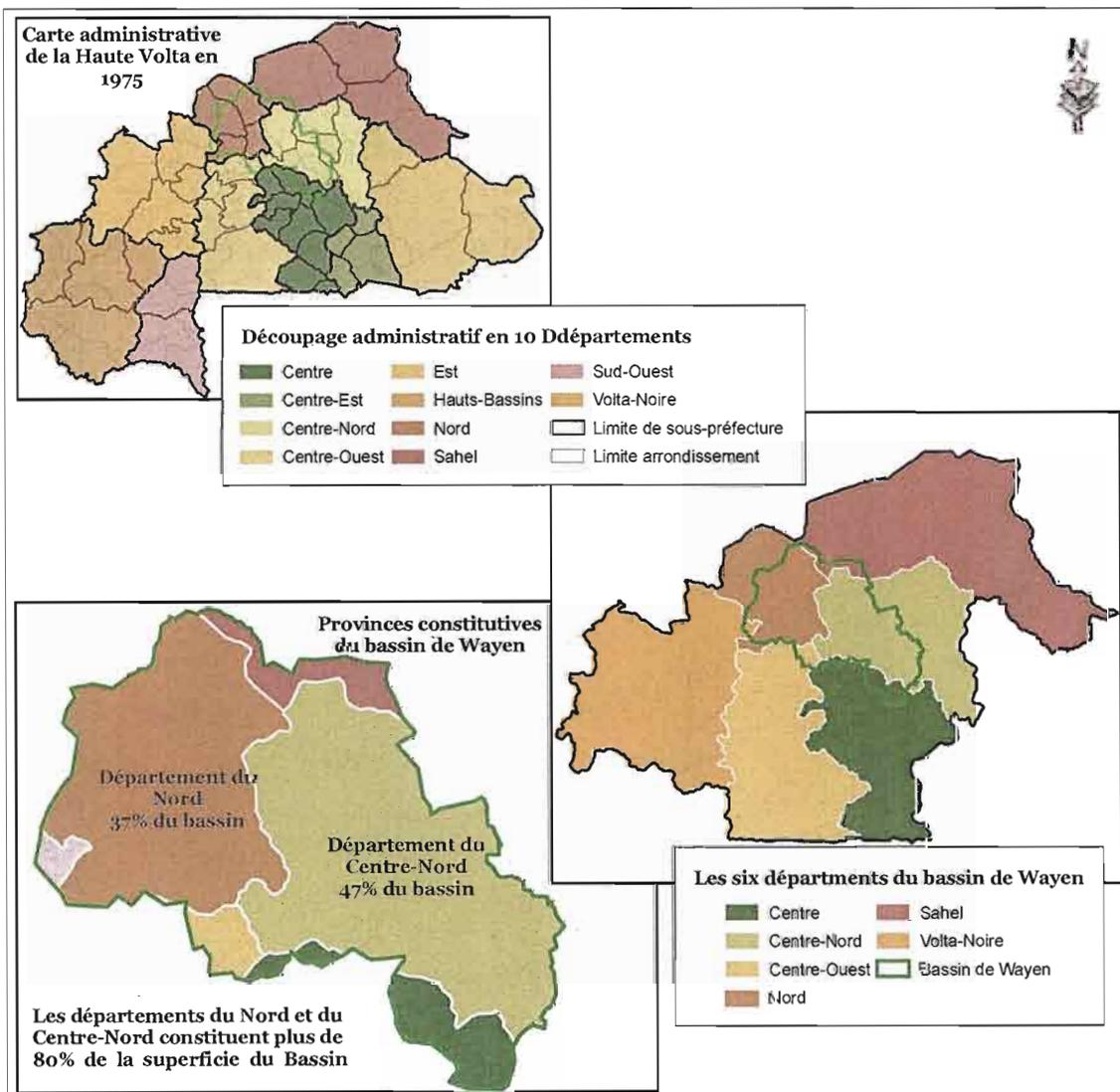


Figure 3 : Organisation du territoire du Burkina Faso (ex-Haute-Volta) et du bassin du Nakambé par strates géo ethniques après l'enquête démographique de 1960-1961.

Organisation du pays et du bassin au recensement de 1985

Le découpage administratif du bassin après le recensement de 1985 est donné à la Figure 4. On a un morcellement plus important du bassin comparativement à 1975. Neuf provinces se partagent la superficie totale du bassin dont trois représentent à eux seul 80% du territoire du bassin. Ce sont les provinces du Bam, du Yatenga et de Sanematenga occupant respectivement 20%, 36% et 23% de la surface du bassin.

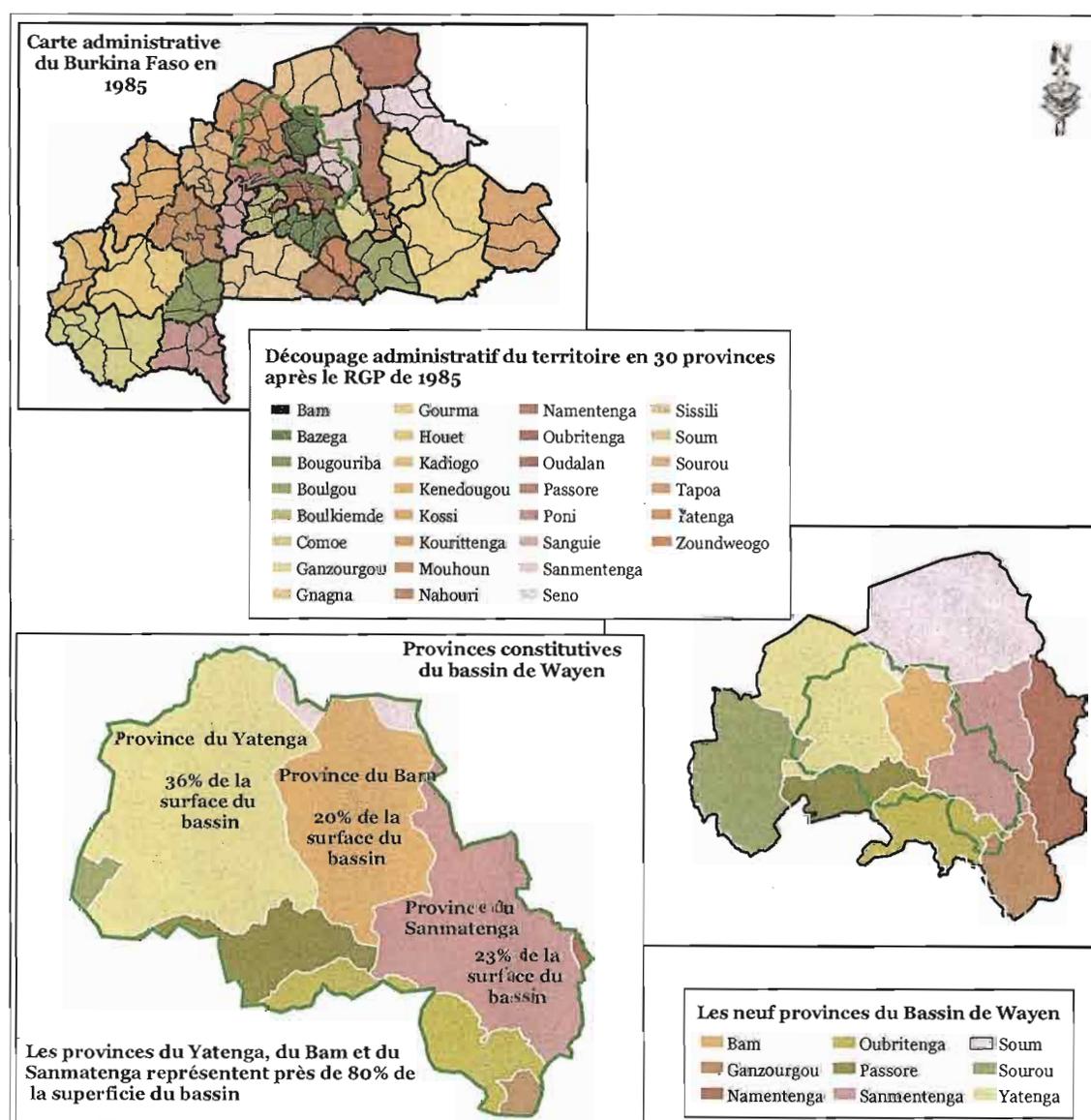


Figure 4 : Carte administrative du Burkina Faso et du bassin du Nakambé en 1985.

Organisation administrative au recensement de 1996

Après le recensement de 1996, le bassin du Nakambé à Wayen, était composé de 12 provinces totalement ou partiellement compris dans le bassin Figure 5. Les provinces du Loroum (10%), du Yatenga (18%), du Bam (20%) et du Sanmatenga (23%) représentent 70% de la superficie totale du bassin.

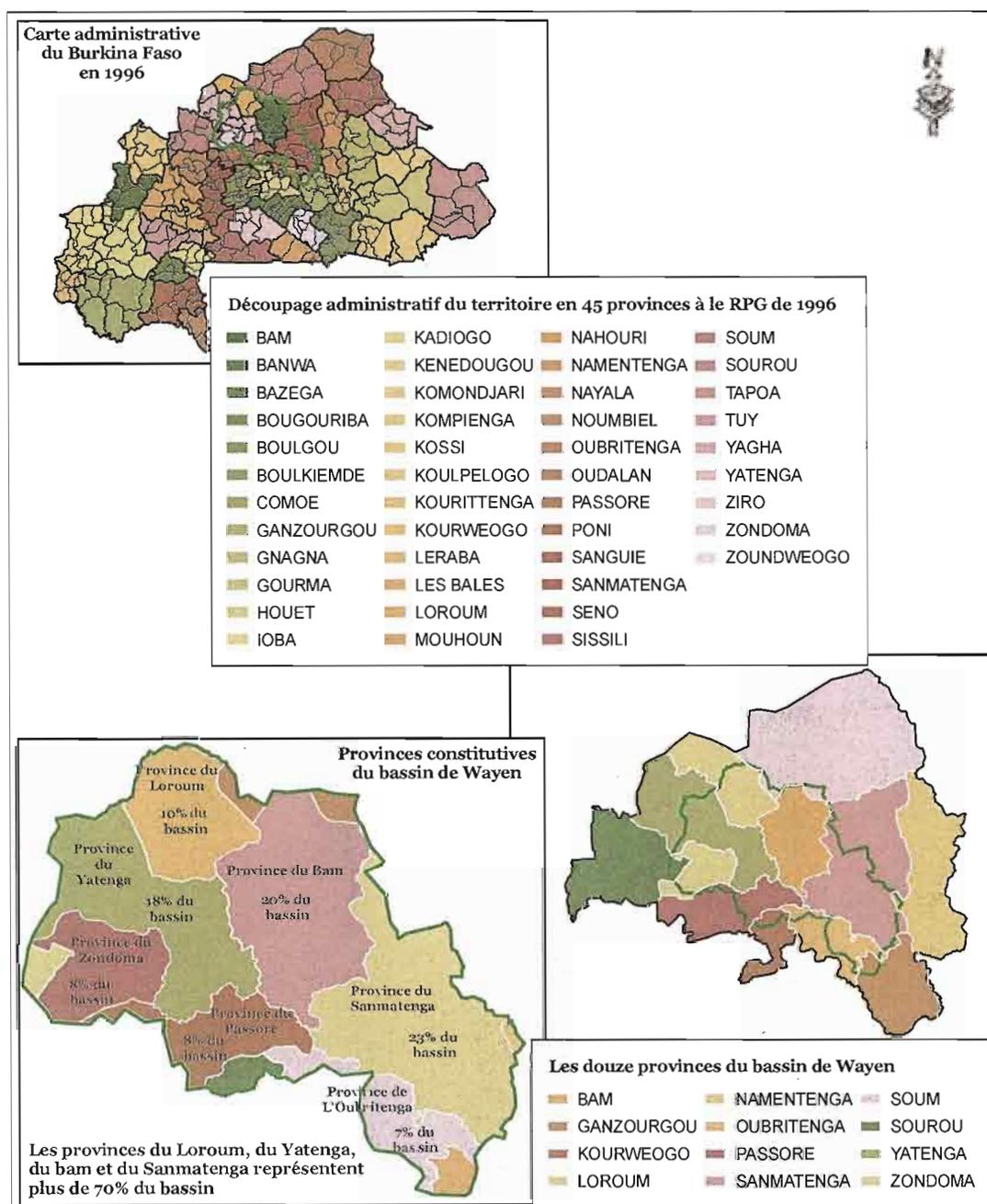


Figure 5 : Organisation administrative du Burkina Faso et du bassin du Nakambé à Wayen après le recensement de 1996

**ANNEXES II : DONNEES DEMOGRAPHIQUES DU BURKINA FASO ET DU
BASSIN DU NAKAMBE A WAYEN DE 1960 A 1996.**

Estimation de la population sur le bassin du Nakambé à Wayen

Tableau 1 : Estimation de la population du bassin versant en 1960 à partir des densités de population par strate géo-ethniques

| Strates Géo ethniques | Superficie (km²) | Population | Densité (hb/km²) | Superficie dans le bassin (km²) | % strate dans le bassin | Pop. strate sur le bassin |
|--|--|-------------------|--|---|--|--------------------------------------|
| Pays Peul | 40600 | 246000 | 6.10 | 1620.9 | 8.0 | 9887 |
| Yatenga | 11800 | 539000 | 45.50 | 10978.5 | 54.4 | 499521 |
| Mossi Central | 51700 | 1670000 | 32.00 | 7300.8 | 36.2 | 233627 |
| Ouest | 48600 | 740000 | 15.00 | 282.6 | 1.4 | 4239 |
| Population totale du bassin en 1960 | | | | | | 747 274 |

Tableau 2 : Estimation de la population du bassin versant en 1975 à partir des densités de population par département

| Département | Sup (km²) | Pop. | Densité (hb/km²) | Superficie dans le bassin (km²) | % Dépt. dans le bassin | Pop. Dépt. vivant sur le bassin |
|--|---------------------------------|-------------|--|---|---------------------------------------|--|
| Centre | 21969.9 | 944706 | 43 | 1403.2 | 7 | 55341 |
| Centre-Nord | 21579.7 | 632285 | 29.3 | 9527.5 | 47 | 367390 |
| Centre-Ouest | 26298.7 | 788962 | 30 | 560.2 | 3 | 21810 |
| Nord | 12301.4 | 530192 | 43.1 | 7524.7 | 37 | 388651 |
| Sahel | 36883.2 | 354079 | 9.6 | 925.3 | 5 | 9419 |
| Volta-Noire | 33112.5 | 635760 | 19.2 | 241.85 | 1 | 5385 |
| Population totale du bassin en 1975 | | | | | | 847 996 |

Tableau 3 : Estimation de la population du bassin versant en 1985 à partir des densités de population par province

| Provinces | Aire totale Prov. (km ²) | Pop. Totale Prov. | Densité Prov. (hbts/km ²) | Aire Prov. dans le bassin (km ²) | % Prov. dans le bassin | Pop. Prov. vivant sur le bassin |
|--|--------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
| Bam | 4057.15 | 162575 | 40.5 | 4057.15 | 20.10 | 162575 |
| Ganzourgou | 4087 | 195652 | 47.9 | 238.003 | 1.18 | 5577 |
| Namentenga | 7755 | 198890 | 25.6 | 63.717 | 0.32 | 3008 |
| Oubritenga | 4693 | 304265 | 64.8 | 1699.159 | 8.42 | 91017 |
| Passore | 4078 | 223830 | 54.9 | 1530.071 | 7.58 | 65081 |
| Sanmatenga | 9213 | 367724 | 39.9 | 4712.283 | 23.35 | 246082 |
| Soum | 13350 | 186812 | 14 | 434.997 | 2.16 | 3678 |
| Sourou | 9487 | 268108 | 28.3 | 252.429 | 1.25 | 11008 |
| Yatenga | 12292 | 536578 | 43.7 | 7194.983 | 35.65 | 406881 |
| Population totale du bassin en 1985 | | | | | | 994 907 |

Tableau 4 : Estimation de la population du bassin versant en 1996 à partir des densités de population par province

| Provinces | Aire totale Prov. (km ²) | Pop. Totale Prov. | Densité Prov. (hbts/km ²) | Aire Prov. dans le bassin (km ²) | % Prov. dans le bassin | Pop. Prov. vivant sur le bassin |
|--|--------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|
| Bam | 4083.996 | 211551 | 51.8 | 4008.878 | 19.86 | 211551 |
| Ganzourgou | 4177.577 | 256921 | 61.5 | 279.906 | 1.39 | 11847 |
| Kourwéogo | 1588.102 | 117996 | 74.3 | 316.369 | 1.57 | 21938 |
| Loroum | 3591.581 | 111339 | 31 | 1996.815 | 9.89 | 69152 |
| Namentenga | 6463.887 | 252738 | 39.1 | 66.257 | 0.33 | 2615 |
| Oubritenga | 2777.986 | 197237 | 71 | 1433.716 | 7.1 | 93018 |
| Passoré | 3867.198 | 271864 | 70.3 | 1520.975 | 7.54 | 84898 |
| Sanmatenga | 9280.64 | 464032 | 50 | 4693.148 | 23.25 | 280752 |
| Soum | 12221.884 | 252993 | 20.7 | 383.206 | 1.9 | 9132 |
| Sourou | 5764.893 | 188512 | 32.7 | 249.125 | 1.23 | 20459 |
| Yatenga | 6989.984 | 444563 | 63.6 | 3541.049 | 17.54 | 300090 |
| Zonoma | 1758.32 | 127654 | 72.6 | 1693.341 | 8.39 | 116833 |
| Population totale du bassin en 1996 | | | | | | 1 222 286 |

Données de Natalité et de mortalité

Tableau 5 : Estimations de la natalité et de la mortalité sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1960 à partir des données des données du recensement de 1960

| Strates géo-ethniques | Total km ² | Population Totale | Densité | BV km ² | % BV | Population du bassin | Taux Nat (‰) | Taux Mort (‰) |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|---------|--------------------|------|----------------------|--------------|---------------|
| Pays Peul | 40600 | 246000 | 6.10 | 1620.9 | 8.0 | 9887 | ? | ? |
| Yatenga | 11800 | 539000 | 45.50 | 10978.5 | 54.4 | 499521 | ? | ? |
| Mossi Central | 51700 | 1670000 | 32.00 | 7300.8 | 36.2 | 233627 | ? | ? |
| Ouest | 48600 | 740000 | 15.00 | 282.6 | 1.4 | 4239 | ? | ? |
| | | | | | | 747274 | ? | ? |

Tableau 6 : Estimations de la natalité et de la mortalité sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1985 à partir des données départementales du recensement de 1975

| Départements | Total km ² | Total Pop | Densité | BV km ² | % BV | Population Ds BV | Taux Nat (‰) | Taux Mort (‰) |
|-------------------------------|-----------------------|-----------|---------|--------------------|------|------------------|-----------------|---------------|
| Département du Centre | 21969.9 | 944706 | 43 | 1403.2 | 7 | 55341 | 50.1 | ? |
| Département du Centre-Nord | 21579.7 | 632285 | 29.3 | 9527.5 | 47 | 367390 | 37.7 | ? |
| Département du Centre-Ouest | 26298.7 | 788962 | 30 | 560.2 | 3 | 21810 | 40.6 | ? |
| Département du Nord | 12301.4 | 530192 | 43.1 | 7524.7 | 37 | 388651 | 41.5 | ? |
| Département du Sahel | 36883.2 | 354079 | 9.6 | 925.3 | 5 | 9419 | 37.8 | ? |
| Département de la Volta-Noire | 33112.5 | 635760 | 19.2 | 241.85 | 1 | 5385 | 47.2 | ? |
| | | | | | | 847996 | 40.19897 | ? |
| | | | | | | | 42.5 | ? |

Tableau 7 : Estimations de la natalité et de la mortalité sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1985 à partir des données des provinciales du recensement de 1985

| Provinces | Total km ² | Total Pop | Densité | BV km ² | % BV | Population Ds BV | Taux Nat (‰) | Taux Mort (‰) |
|-------------------|-----------------------|-----------|---------|--------------------|-------|------------------|---------------|----------------|
| Bam | 4057.15 | 162575 | 40.5 | 4057.15 | 20.10 | 162575 | 46.276 | 17.15 |
| Ganzourgou | 4087 | 195652 | 47.9 | 238.003 | 1.18 | 5577 | 50.261 | 19.3725 |
| Namentenga | 7755 | 198890 | 25.6 | 63.717 | 0.32 | 3008 | 47.322 | 18.2 |
| Oubritenga | 4693 | 304265 | 64.8 | 1699.159 | 8.42 | 91017 | 51.583 | 19.3725 |
| Passore | 4078 | 223830 | 54.9 | 1530.071 | 7.58 | 65081 | 47.578 | 17.3775 |
| Sanmatenga | 9213 | 367724 | 39.9 | 4712.283 | 23.35 | 246082 | 48.894 | 18.4275 |
| Soum | 13350 | 186812 | 14 | 434.997 | 2.16 | 3678 | 47.829 | 17.6225 |
| Sourou | 9487 | 268108 | 28.3 | 252.429 | 1.25 | 11008 | 45.089 | 17.0275 |
| Yatenga | 12292 | 536578 | 43.7 | 7194.983 | 35.65 | 406881 | 46.606 | 20.5275 |
| | | | | | | 994907 | 41.4 | 18.9 |
| | | | | | | | 47.9 | 18.3 |

Tableau 8 : Estimations de la natalité et de la mortalité sur le bassin du Nakambé à Wayen en 1996 à partir des données des provinciales du recensement de 1996

| Provinces | Total km ² | Total Pop | Densité | BV km ² | % BV | Population Ds BV | Taux Nat (‰) | Taux Mort (‰) |
|-------------------|-----------------------|-----------|---------|--------------------|--------------|------------------|--------------|---------------|
| Bam | 4083.996 | 211551 | 51.8 | 4008.878 | 19.86 | 211551 | 44.4 | 14.4 |
| Ganzourgou | 4177.577 | 256921 | 61.5 | 279.906 | 1.39 | 11847 | 46.6 | 12.7 |
| KOURWEOGO | 1588.102 | 117996 | 74.3 | 316.369 | 1.57 | 21938 | 47.8 | 19.7 |
| Loroum | 3591.581 | 111339 | 31 | 1996.815 | 9.89 | 69152 | 49.5 | 17 |
| Namentenga | 6463.887 | 252738 | 39.1 | 66.257 | 0.33 | 2615 | 53.6 | 13.5 |
| Oubritenga | 2777.986 | 197237 | 71 | 1433.716 | 7.1 | 93018 | 47.9 | 14.6 |
| Passore | 3867.198 | 271864 | 70.3 | 1520.975 | 7.54 | 84898 | 47 | 16 |
| Sanmatenga | 9280.64 | 464032 | 50 | 4693.148 | 23.25 | 280752 | 48.7 | 15.3 |
| Soum | 12221.884 | 252993 | 20.7 | 383.206 | 1.9 | 9132 | 47.4 | 11 |
| Sourou | 5764.893 | 188512 | 32.7 | 249.125 | 1.23 | 20459 | 47.2 | 14.4 |
| Yatenga | 6989.984 | 444563 | 63.6 | 3541.049 | 17.54 | 300090 | 46.7 | 18 |
| Zonoma | 1758.32 | 127654 | 72.6 | 1693.341 | 8.39 | 116833 | 47 | 19 |
| | | | | | | 1222286 | 47.2 | 16.0 |
| | | | | | | | 47.8 | 15.5 |

ANNEXES III : CARACTERISTIQUES DES BASSINS D'ETUDE

1. Le Gorouol à la station d'Alcongui

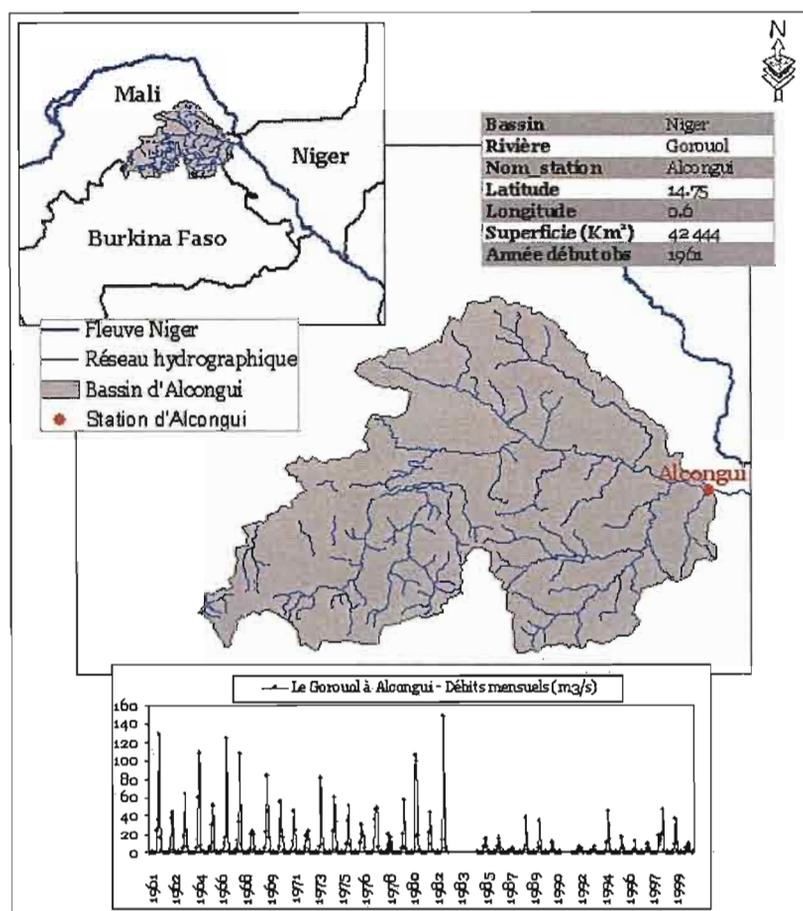
Localisation et caractéristiques hydrologiques

Figure 6 : Le bassin du Gorouol à Alcongui. Localisation et caractéristiques hydrologiques

Résultats des tests de détection de rupture dans la série des débits d'Alcongui

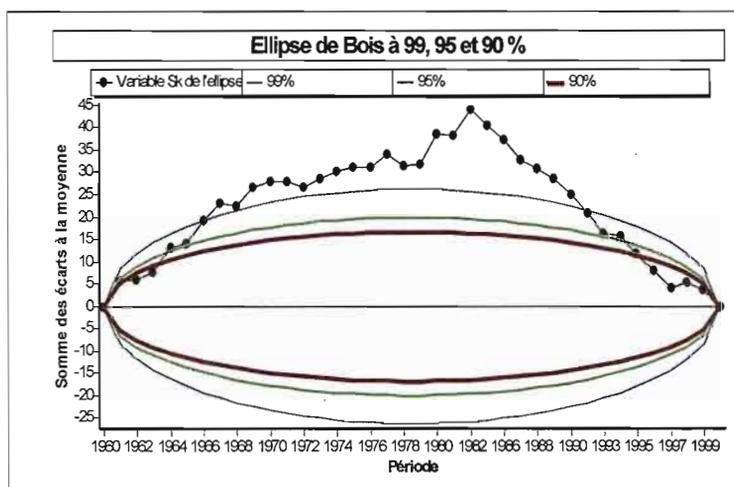


Figure 7 : Ellipses de contrôle à 90, 95 et 99% - Variable U de Buishand

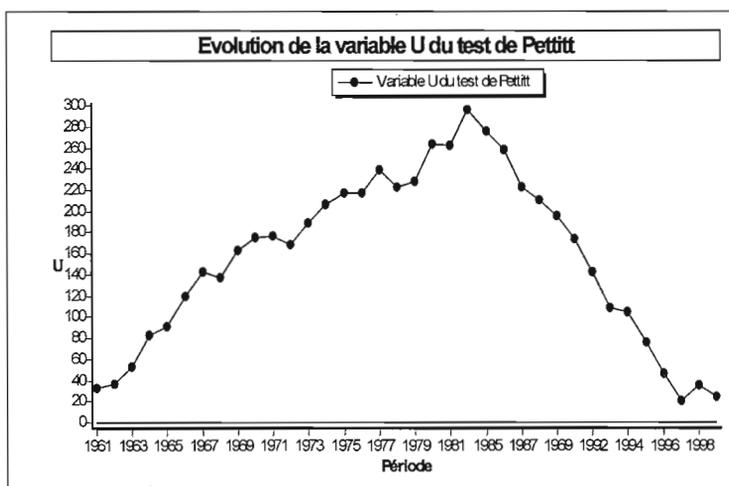


Figure 8 : Évolution de la variable U du test de Pettitt

2. Le Goroubi à la station de Diongoré

Localisation et caractéristiques hydrologiques

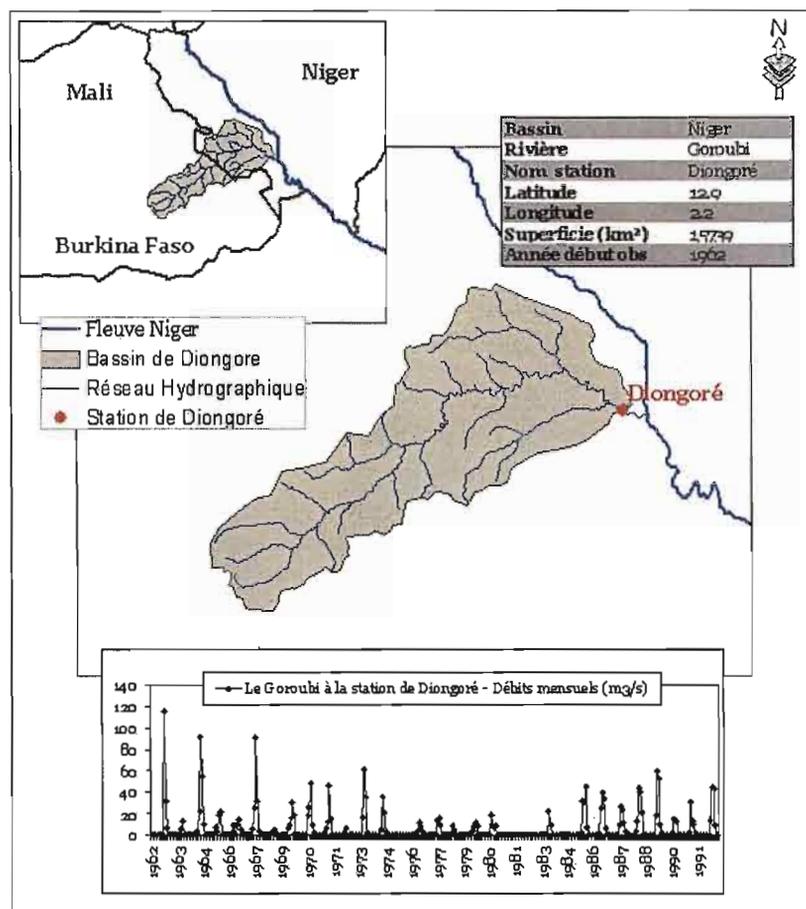


Figure 9 : Le bassin du Goroubi à Diongoré. Localisation et caractéristiques hydrologiques

Résultats des tests de détection de rupture dans la série des débits de Diongoré

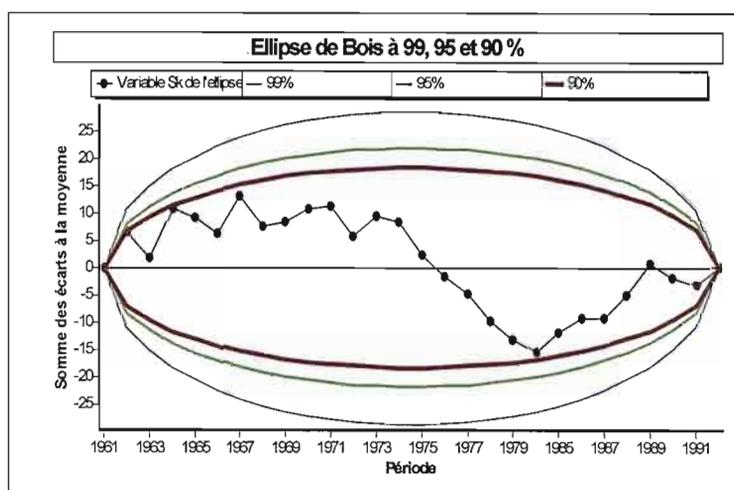


Figure 10 : Ellipses de contrôle à 90, 95 et 99% - Variable U de Buishand

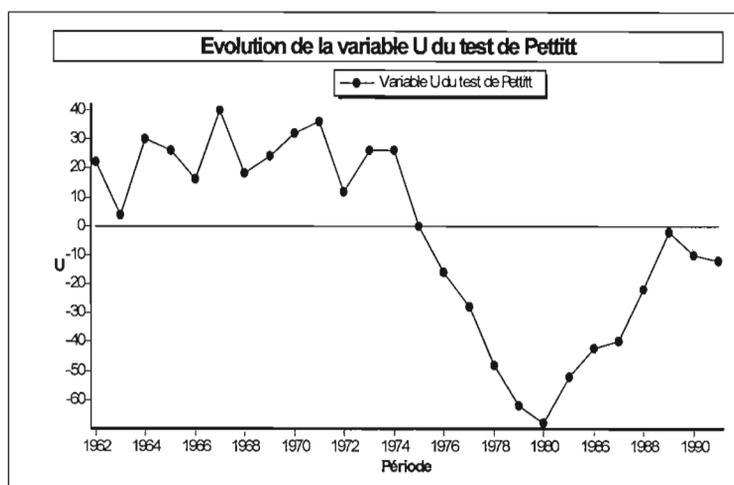


Figure 11 : Évolution de la variable U du test de Pettitt

3. Le Gorouol à la station de Koriziena

Localisation et caractéristiques hydrologiques

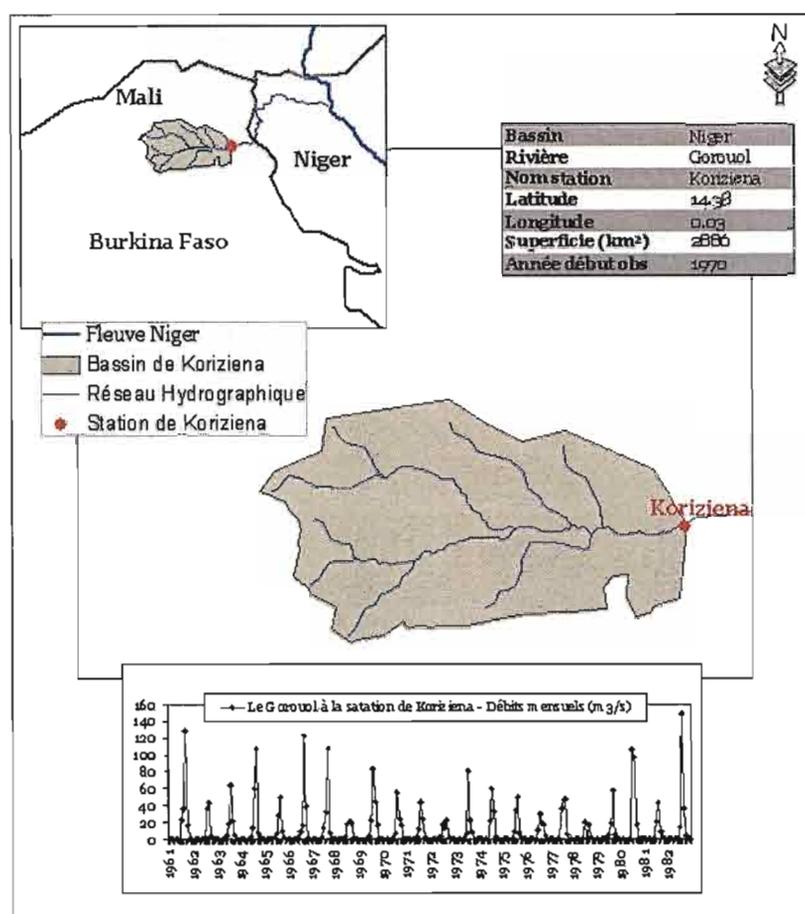


Figure 12 : Le bassin du Gorouol à Koriziena. Localisation et caractéristiques hydrologiques

Résultats des tests de détection de rupture dans la série des débits de Koriziena

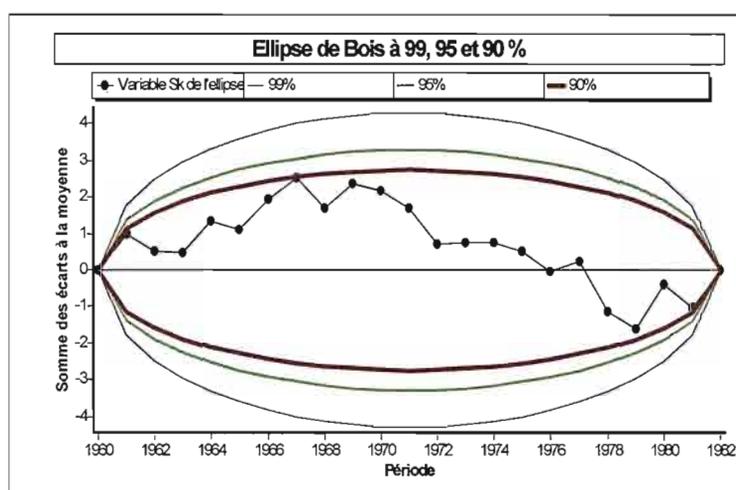


Figure 13 : Ellipses de contrôle à 90, 95 et 99% - Variable U de Buishand

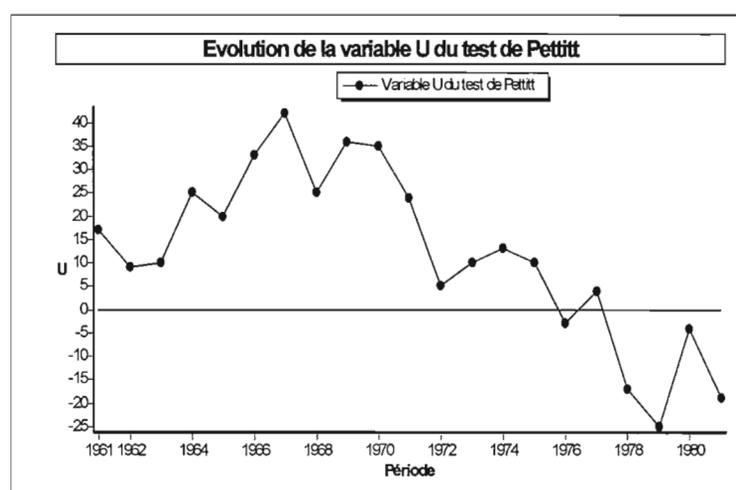


Figure 14 : Évolution de la variable U du test de Pettitt

4. Le Dargol à la Station de Tera

Localisation et caractéristiques hydrologiques

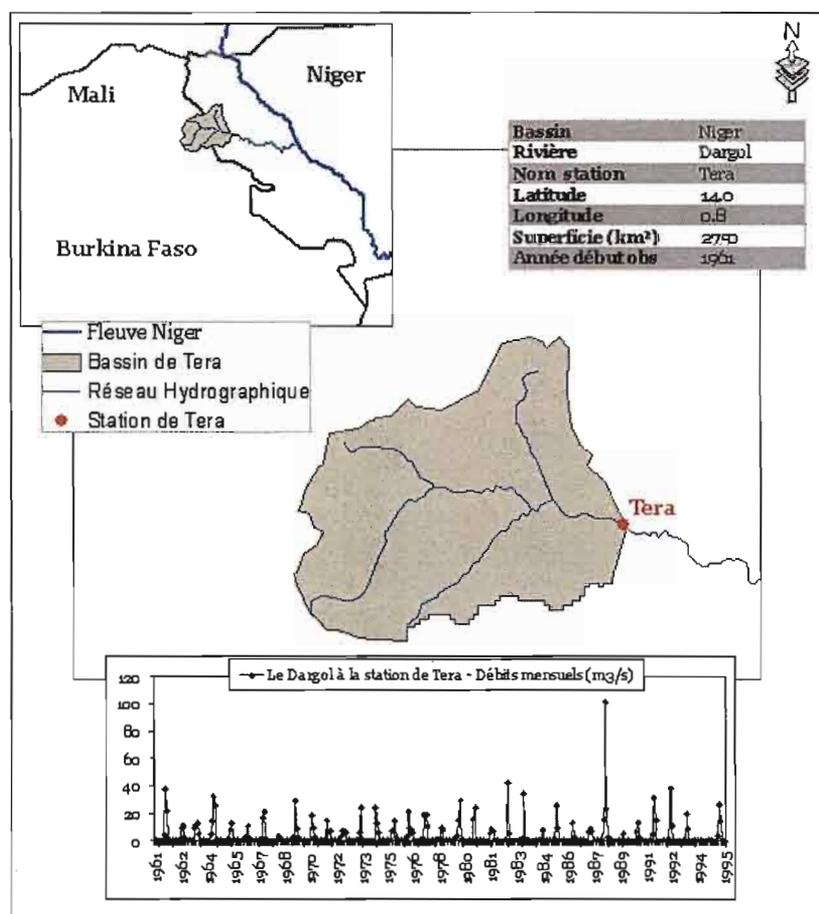


Figure 15 : Le bassin du Dargol à Tera. Localisation et caractéristiques hydrologiques

Résultats des tests de détection de rupture dans la série des débits de Tera

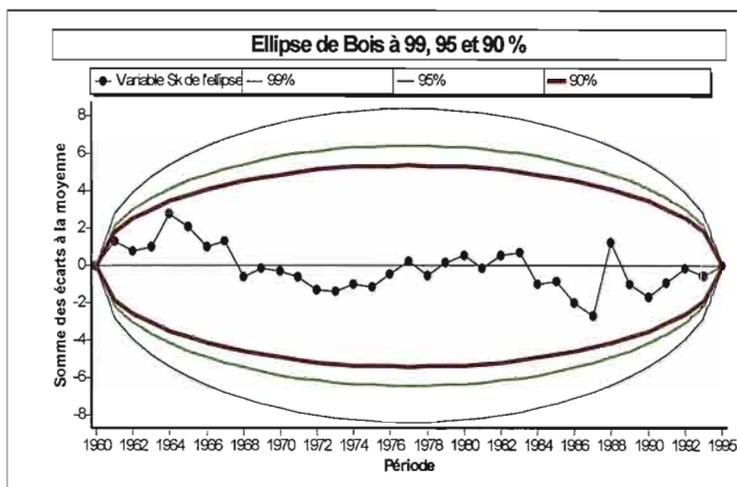


Figure 16 : Ellipses de contrôle à 90, 95 et 99% - Variable U de Buishand.

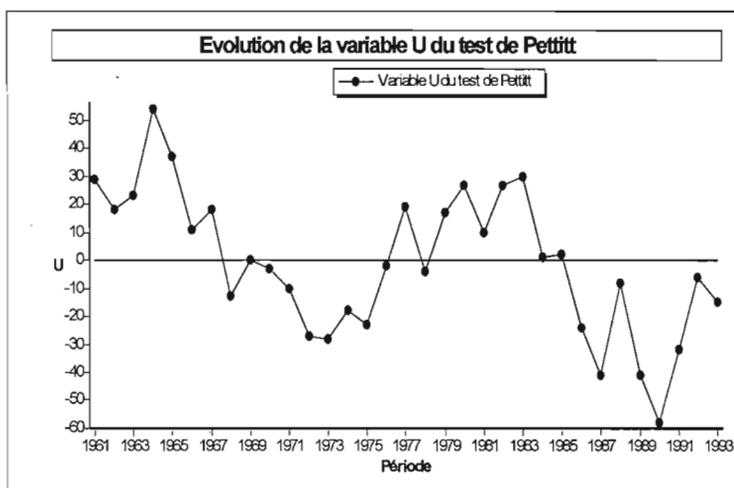


Figure 17 : Évolution de la variable U du test de Pettitt

5. Le Nakambé à la station de Wayen

Localisation et caractéristiques hydrologiques

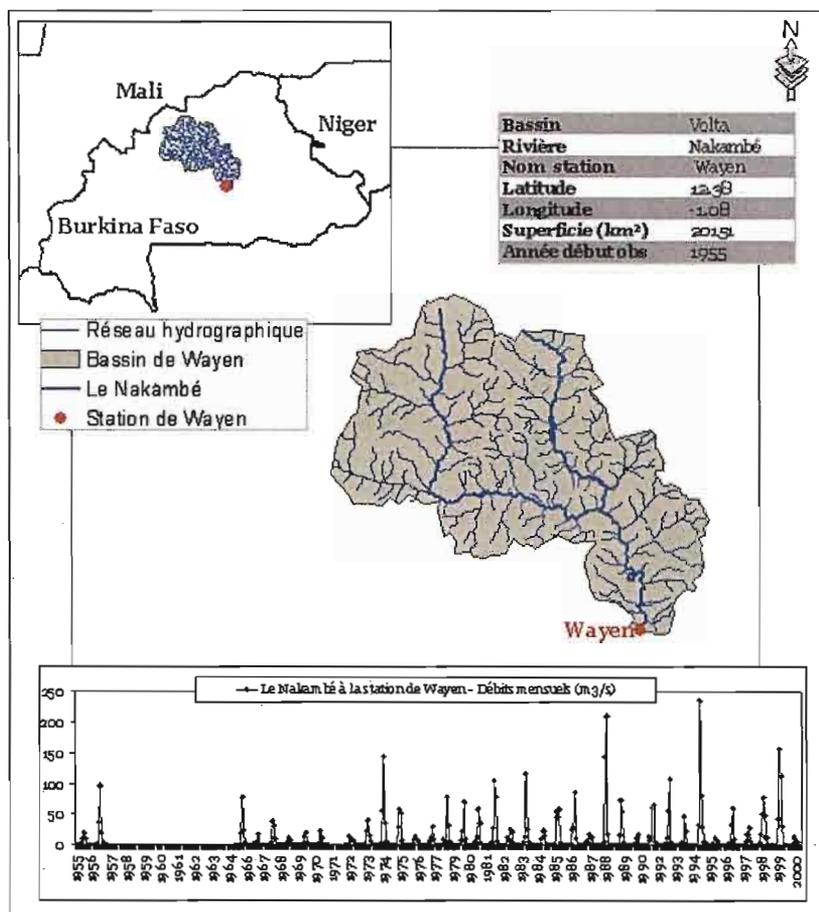


Figure 18: Le bassin du Nakambé à Wayen. Localisation et caractéristiques hydrologiques

Résultats des tests de détection de rupture dans la série des débits de Wayen

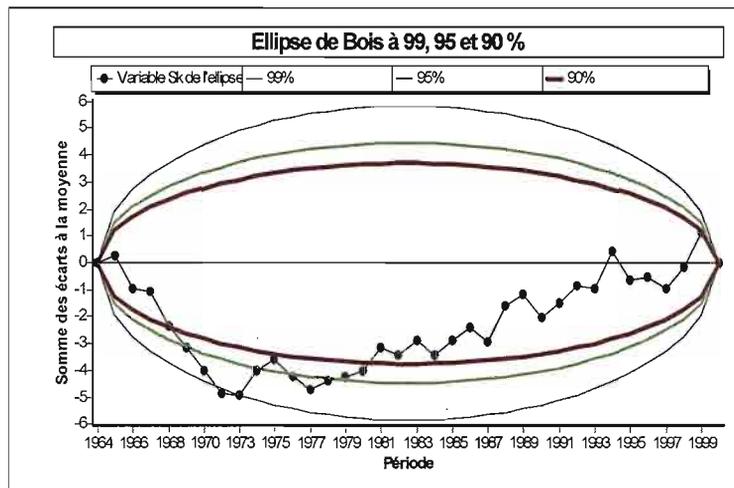


Figure 19 : Ellipses de contrôle à 90, 95 et 99% - Variable U de Buishand

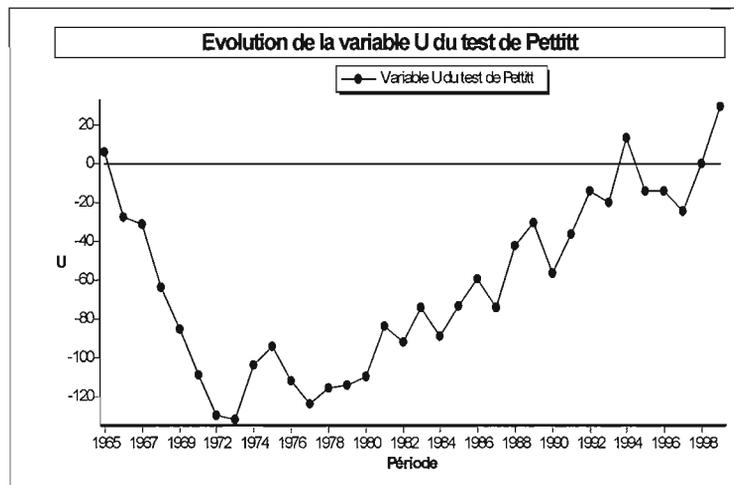


Figure 20 : Évolution de la variable U du test de Pettitt

ANNEXES IV : DONNÉES DES STATISTIQUES AGRICOLES

Tableau 9 : Superficies totales cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen de 1985 à 1995.

(Source : Direction de la Statistiques Agricoles du Burkina Faso)

| Provinces | Superficie totale Province (km ²) | Superficie Province dans le bassin (km ²) | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 |
|---|---|---|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Bam | 4057.2 | 4057.15 | 75008 | 108996 | 56824 | 77052 | 65945 | 44500 | 60600 | 69975 | 60933 | 71615 | 54593 |
| Ganzourgou | 4087 | 238.003 | 60912 | 63310 | - | 79415 | 86959 | 81500 | 80000 | 114402 | 62455 | 67369 | 80464 |
| Namentenga | 7755 | 63.717 | 33167 | 51032 | 78551 | 72085 | 108439 | 110063 | 83200 | 82200 | 98407 | 105838 | 98857 |
| Oubritinga | 4693 | 1699.159 | 112191 | 117093 | 112680 | 127228 | 139380 | 132600 | 120800 | 100807 | 107575 | 111945 | 111516 |
| Passore | 4078 | 1530.071 | 110264 | - | 118863 | 107088 | 90700 | 68200 | 81600 | 94895 | 76195 | 72158 | 58237 |
| Sanmatinga | 9213 | 4712.283 | 151911 | 167798 | 174396 | 169935 | 169470 | 125800 | 80500 | 97219 | 138355 | 169700 | 133840 |
| Soum | 13350 | 434.997 | 92634 | 75771 | 102040 | 52346 | 78568 | 75000 | 96200 | 95423 | 103949 | 122149 | 89070 |
| Sourou | 9487 | 252.429 | 63683 | 87140 | 96540 | 102638 | 114298 | 106461 | 64300 | 108200 | 117791 | 117738 | 120891 |
| Yatenga | 12292 | 7194.983 | 121943 | 179529 | 175626 | 193247 | 223686 | 162100 | 206600 | 193735 | 187178 | 186865 | 153072 |
| Superficies totales cultivées sur le Nakambé à Wayen | | | 314610 | 351196 | 340759 | 372983 | 379609 | 288253 | 307247 | 318530 | 319766 | 347303 | 286492 |

Tableau 10 : Superficies totales cultivées sur le bassin du Nakambé à Wayen de 1996 à 2001.

(Source : Direction de la Statistiques Agricoles du Burkina Faso)

| Provinces | Superficie totale Province (km ²) | Superficie Province dans le bassin (km ²) | Superficie Province dans le bassin | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 |
|--|---|---|--|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Bam | 4083.996 | 4008.878 | 0.98 | 45003 | 58585 | 62278 | 58373 | 44460 | 63096.084 |
| Ganzourgou | 4178 | 279.906 | 0.07 | 72878 | 92874 | 100376 | 91487 | 77134.75 | 100743.43 |
| Kourweogo | 1588 | 316.369 | 0.20 | | | | | | 45253.25 |
| Lorum | 3592 | 1996.815 | 0.56 | | | | | | 55891.17 |
| Namentenga | 6464 | 66.257 | 0.01 | | | | | | |
| Oubritinga | 2778 | 1433.716 | 0.52 | 124312 | 127803 | 135404 | 131030 | 110441 | 74428.196 |
| Passore | 3867 | 1520.975 | 0.39 | 76922 | 63943 | 84401 | 79225 | 59854 | 94802.276 |
| Sanmatinga | 9281 | 4693.148 | 0.51 | 122042 | 127496 | 140654 | 134763.75 | 111727 | 133541.62 |
| Soum | 12222 | 383.206 | 0.03 | 103946 | 104926 | 114470 | 100337 | 100262 | 152935.83 |
| Sourou | 5765 | 249.125 | 0.04 | 119619 | 130642 | 143924 | 115734 | 125287 | 78632.754 |
| Yatenga | 6989.984 | 3541.049 | 0.51 | 165473 | 160937 | 202641 | 205612.15 | 193967.65 | 154855.02 |
| Zandoma | 1758.32 | 1693.341 | 0.96 | | | | | | 27208.368 |
| Superficie totale cultivée sur le Nakambé à Wayen | | | | 297439.94 | 309776.17 | 354526.82 | 342670.08 | 292668.74 | 364847.53 |

ANNEXES V : RESULTATS DES PERFORMANCES DE GR2M SUR 5 BASSINS REPRESENTATIFS DES CONDITIONS D'ECOULEMENT AU SAHEL.

1. Performances de GR2M sur le bassin du Gorouol à Alcongui

Résultats avec la grille pluie du CRU

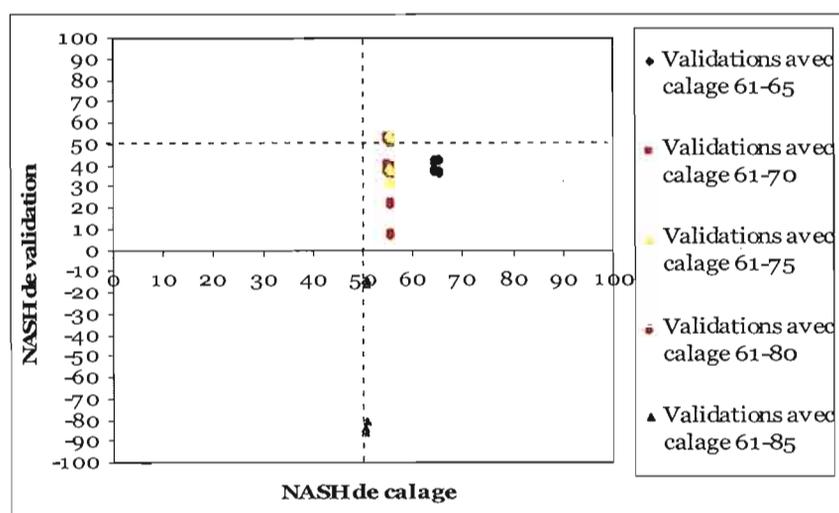


Figure 21: NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibration. Station d'Alcongui. Cas de la grille pluie du CRU

Tableau 11 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station d'Alcongui. Cas de la grille pluie du CRU

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal61-65 | 0.372 | 0.507 | 65.41 | Val66-70 | 5 | 42.09 |
| | | | | Val66-75 | 10 | 43.01 |
| | | | | Val66-80 | 15 | 42.47 |
| | | | | Val66-85 | 20 | 36.28 |
| | | | | Val66-90 | 25 | 37.60 |
| | | | | Val66-95 | 30 | 36.64 |
| Cal61-70 | 0.300 | 0.497 | 54.86 | Val71-75 | 5 | 53.97 |
| | | | | Val71-80 | 10 | 52.72 |
| | | | | Val71-85 | 15 | 41.15 |
| | | | | Val71-90 | 20 | 41.39 |
| | | | | Val71-95 | 25 | 37.87 |
| Cal61-75 | 0.410 | 0.535 | 55.78 | Val76-80 | 5 | 52.84 |
| | | | | Val76-85 | 10 | 37.84 |
| | | | | Val76-90 | 15 | 37.85 |
| | | | | Val76-95 | 20 | 31.70 |
| Cal61-80 | 0.351 | 0.555 | 55.84 | Val81-85 | 5 | 23.30 |
| | | | | Val81-90 | 10 | 22.13 |
| | | | | Val81-95 | 15 | 8.81 |
| Cal61-85 | 0.316 | 0.553 | 50.57 | Val86-90 | 5 | -16.04 |
| | | | | Val86-95 | 10 | -80.25 |
| Cal61-90 | 0.307 | 0.569 | 50.31 | Val91-95 | 5 | -126.70 |

Résultats avec la grille pluie SIEREM

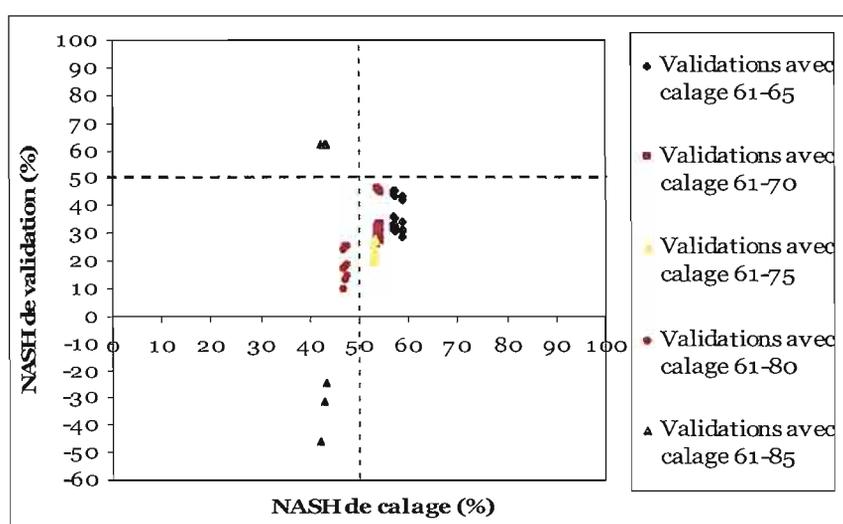


Figure 22: NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibration – Station d'Alcongui. Cas de la grille pluie SIEREM.

Tableau 12 NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage. Station d'Alcongui. Cas de la grille pluie SIEREM

| Période calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|----------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal61-65 | 0.033 | 0.548 | 58.66 | Val66-70 | 5 | 43.84 |
| | | | | Val66-75 | 10 | 42.38 |
| | | | | Val66-80 | 15 | 34.30 |
| | | | | Val66-85 | 20 | 29.06 |
| | | | | Val66-90 | 25 | 31.16 |
| | | | | Val66-95 | 30 | 30.57 |
| Cal61-70 | 0.046 | 0.581 | 54.25 | Val71-75 | 5 | 45.06 |
| | | | | Val71-80 | 10 | 33.64 |
| | | | | Val71-85 | 15 | 27.63 |
| | | | | Val71-90 | 20 | 30.52 |
| | | | | Val71-95 | 25 | 28.16 |
| Cal61-75 | 0.047 | 0.599 | 53.31 | Val76-80 | 5 | 28.36 |
| | | | | Val76-85 | 10 | 23.55 |
| | | | | Val76-90 | 15 | 27.67 |
| | | | | Val76-95 | 20 | 23.64 |
| Cal61-80 | 0.048 | 0.622 | 47.86 | Val81-85 | 5 | 18.66 |
| | | | | Val81-90 | 10 | 25.65 |
| | | | | Val81-95 | 15 | 14.68 |
| Cal61-85 | 0.049 | 0.637 | 43.22 | Val86-90 | 5 | 62.48 |
| | | | | Val86-95 | 10 | -24.56 |
| Cal61-90 | 0.048 | 0.645 | 44.65 | Val91-95 | 5 | -123.56 |

Hydrogrammes de simulation sur la période 1971-1995 (calage sur 1961-1970)

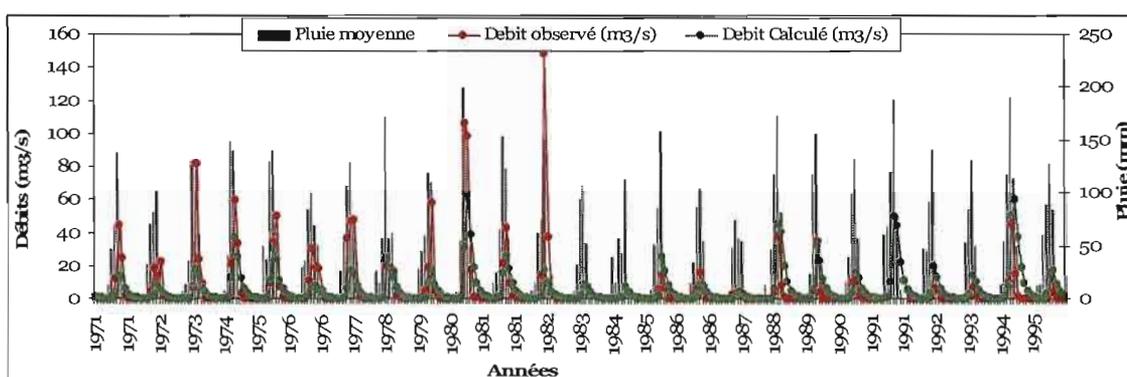


Figure 23 : Hydrogramme de simulation des débits à la station d'Alcongui (Pluie CRU). Période 1971-1995 (calage sur 1961-1970)

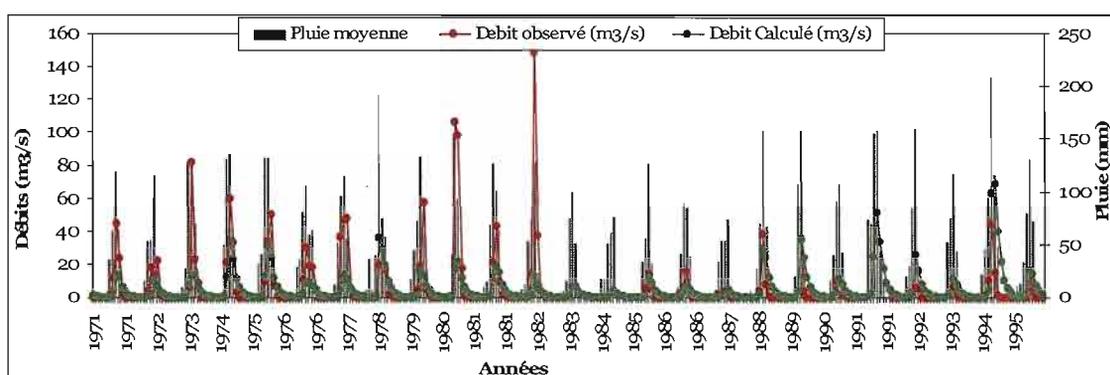


Figure 24 : Hydrogramme de simulation des débits à la station d'Alcongui (Pluie SIEREM).
Période 1971-1995 (calage sur 1961-1970)

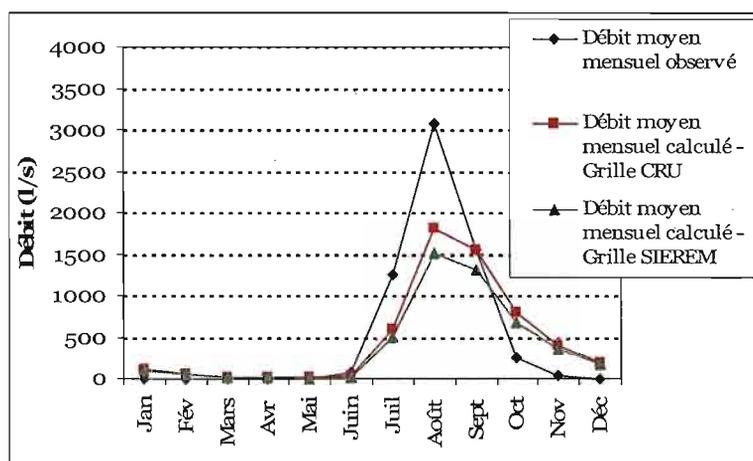


Figure 25 : Débits moyens mensuels observés et calculés à la station d'Alcongui sur la période 1971-1995. Calage sur la période 1961-1970.

2. Performances de GR2M pour le Gorouol à Koriziena

Résultats avec la grille de pluie du CRU

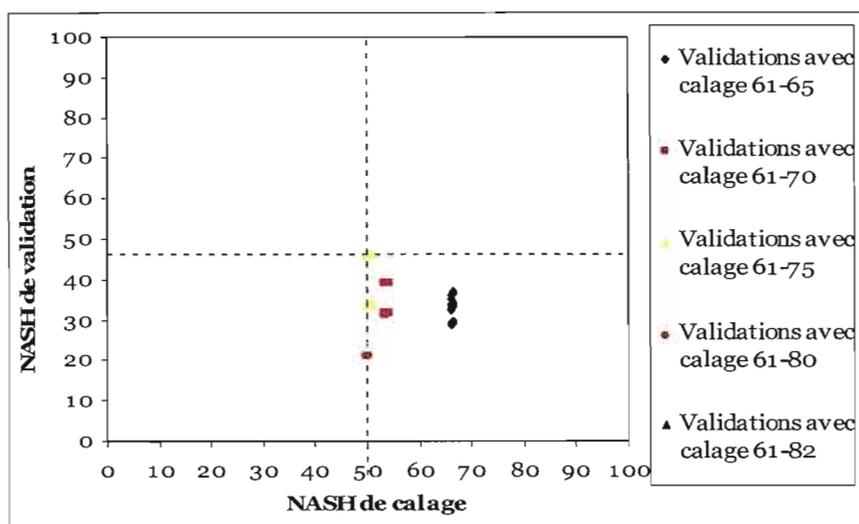


Figure 26 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibration. Station de Koriziena. Cas de la grille pluie du CRU.

Tableau 13 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Koriziena. Cas de la grille pluie du CRU

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal61-65 | 1.000 | 0.455 | 56.77 | Val66-70 | 5 | 30.87 |
| | | | | Val66-75 | 10 | 31.88 |
| | | | | Val66-80 | 15 | 37.47 |
| | | | | Val66-82 | 20 | 34.12 |
| Cal61-70 | 1.000 | 0.492 | 44.28 | Val71-75 | 5 | 34.30 |
| | | | | Val71-80 | 10 | 45.12 |
| | | | | Val71-82 | 15 | 38.06 |
| Cal61-75 | 1.000 | 0.511 | 42.91 | Val76-80 | 5 | 52.64 |
| | | | | Val76-82 | 10 | 40.23 |
| Cal61-80 | 1.000 | 0.556 | 45.53 | Val81-82 | 2 | 27.10 |

Résultats avec la grille de pluie du SIEREM

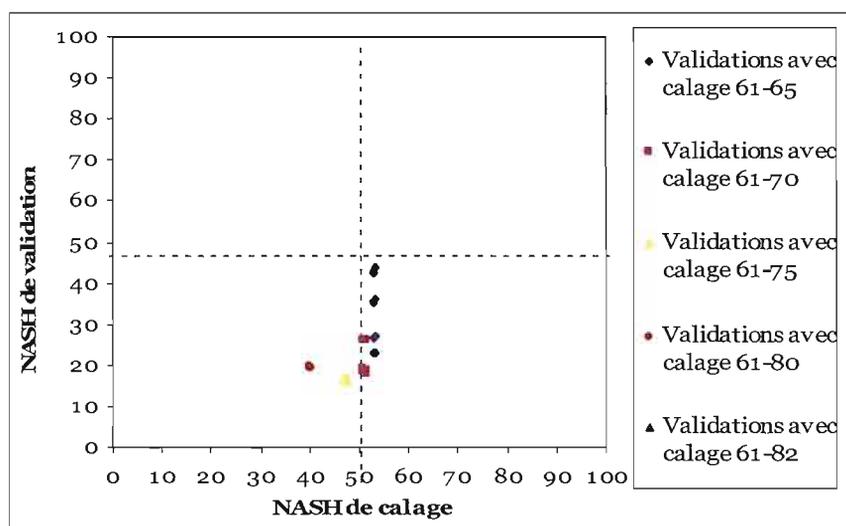


Figure 27 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibrarion. Stationde Koriziena. Cas de la grille pluie du SIEREM.

Tableau 14 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Stationde Koriziena. Cas de la grille pluie du SIEREM

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal61-65 | 1.000 | 0.469 | 44.67 | Val66-70 | 5 | 29.73 |
| | | | | Val66-75 | 10 | 27.83 |
| | | | | Val66-80 | 15 | 24.56 |
| | | | | Val66-82 | 20 | 22.89 |
| Cal61-70 | 1.000 | 0.529 | 37.87 | Val71-75 | 5 | 24.03 |
| | | | | Val71-80 | 10 | 21.42 |
| | | | | Val71-82 | 15 | 20.89 |
| Cal61-75 | 1.000 | 0.548 | 35.86 | Val76-80 | 5 | 20.00 |
| | | | | Val76-82 | 10 | 20.14 |
| Cal61-80 | 1.000 | 0.565 | 32.22 | Val81-82 | 2 | 20.73 |

Hydrogrammes de simulation sur la période 1971-1982 (calage sur 1961-1970)

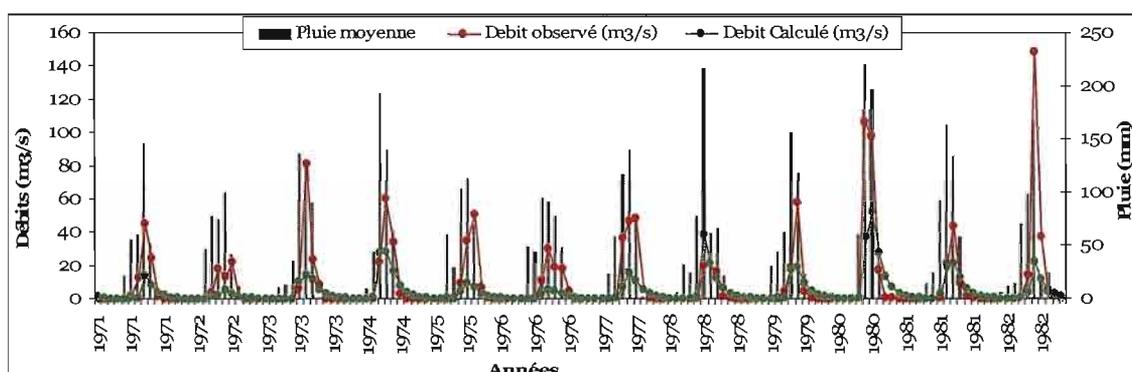


Figure 28 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Korzienna (Pluie CRU). Période 1971-1982 (calage sur 1961-1970).

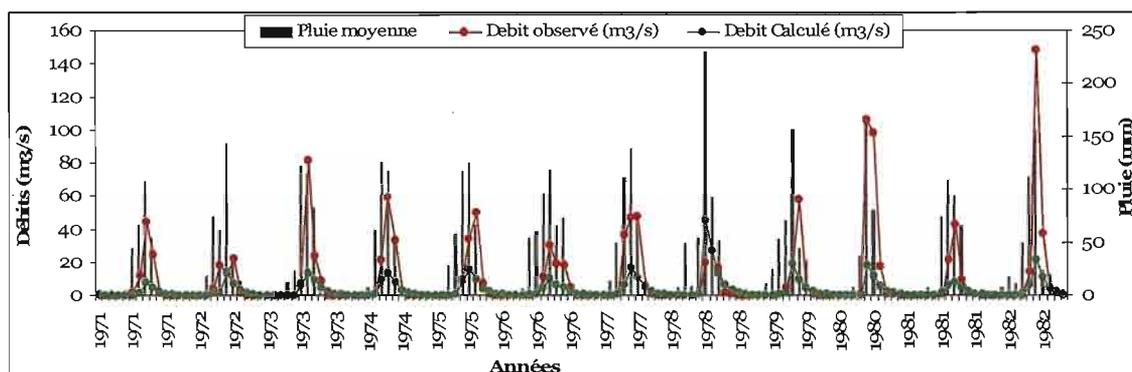


Figure 29 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Korzienna (Pluie SIEREM). Période 1971-1982 (calage sur 1961-1970).

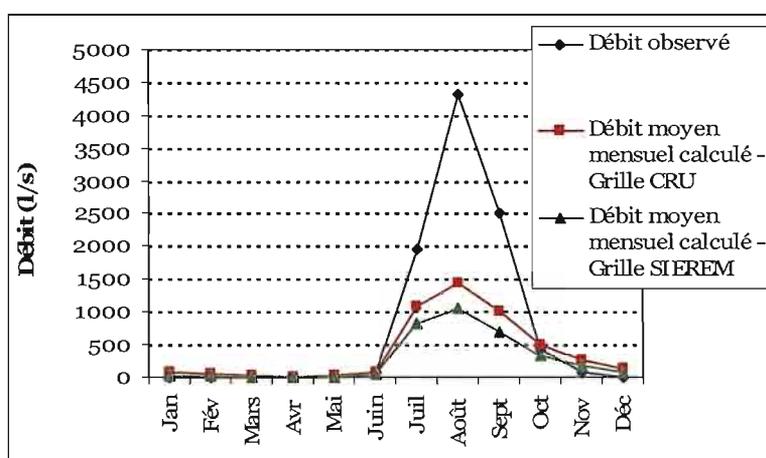


Figure 30 : Débits moyens mensuels observés et calculés à la station de Korzienna sur la période 1971-1982. Calage sur la période 1961-1970.

3. Performances de GR2M pour le bassin du Dargol à Tera

Résultats avec la grille de pluie du CRU

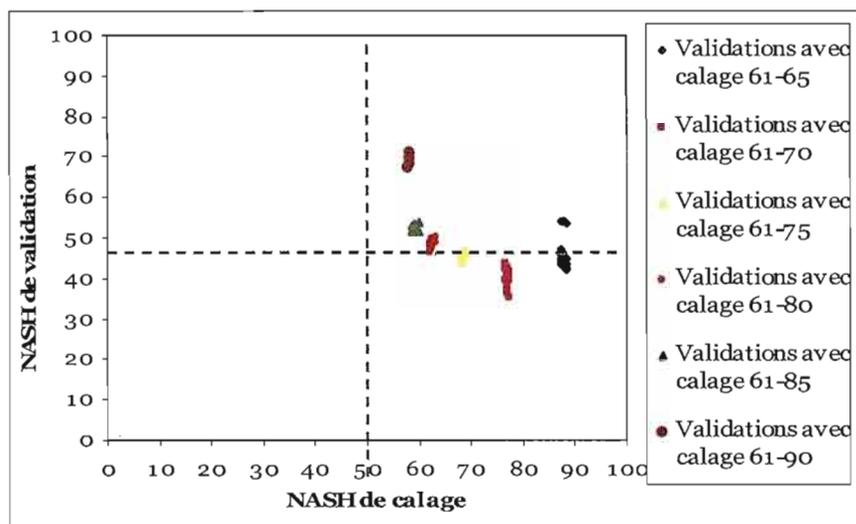


Figure 31 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibrarion. Station de de Tera. Cas de la grille pluie du CRU

Tableau 15 NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Tera. Cas de la grille pluie du CRU

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal61-65 | 0.727 | 0.674 | 88.30 | Val66-70 | 5 | 53.86 |
| | | | | Val66-75 | 10 | 45.01 |
| | | | | Val66-80 | 15 | 43.78 |
| | | | | Val66-85 | 20 | 42.68 |
| | | | | Val66-90 | 25 | 42.30 |
| | | | | Val66-95 | 30 | 42.58 |
| Cal61-70 | 0.727 | 0.687 | 77.11 | Val71-75 | 5 | 35.58 |
| | | | | Val71-80 | 10 | 39.85 |
| | | | | Val71-85 | 15 | 40.53 |
| | | | | Val71-90 | 20 | 41.71 |
| | | | | Val71-95 | 25 | 42.20 |
| Cal61-75 | 0.603 | 0.661 | 68.78 | Val76-80 | 5 | 46.71 |
| | | | | Val76-85 | 10 | 46.84 |
| | | | | Val76-90 | 15 | 46.22 |
| | | | | Val76-95 | 20 | 47.40 |
| Cal61-80 | 0.668 | 0.689 | 62.74 | Val81-85 | 5 | 48.37 |
| | | | | Val81-90 | 10 | 48.81 |
| | | | | Val81-95 | 15 | 49.58 |
| Cal61-85 | 0.637 | 0.690 | 60.02 | Val86-90 | 5 | 51.92 |
| | | | | Val86-95 | 10 | 54.15 |
| Cal61-90 | 0.682 | 0.745 | 58.55 | Val91-95 | 5 | 71.30 |

Résultats avec la grille de pluie du SIEREM

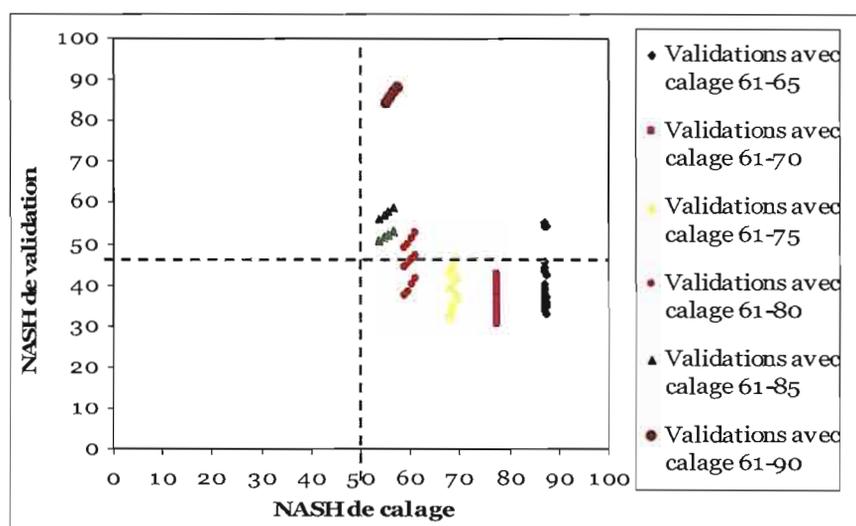


Figure 32: NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibrarion. Station de de Tera. Cas de la grille pluie du SIEREM

Tableau 16 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Tera. Cas de la grille pluie du SIEREM

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal61-65 | 0.718 | 0.651 | 87.36 | Val66-70 | 5 | 54.07 |
| | | | | Val66-75 | 10 | 42.34 |
| | | | | Val66-80 | 15 | 35.57 |
| | | | | Val66-85 | 20 | 32.88 |
| | | | | Val66-90 | 25 | 34.66 |
| | | | | Val66-95 | 30 | 37.25 |
| Cal61-70 | 0.602 | 0.631 | 77.19 | Val71-75 | 5 | 38.75 |
| | | | | Val71-80 | 10 | 35.70 |
| | | | | Val71-85 | 15 | 35.32 |
| | | | | Val71-90 | 20 | 38.78 |
| | | | | Val71-95 | 25 | 42.54 |
| Cal61-75 | 0.629 | 0.631 | 69.02 | Val76-80 | 5 | 37.18 |
| | | | | Val76-85 | 10 | 37.85 |
| | | | | Val76-90 | 15 | 42.18 |
| | | | | Val76-95 | 20 | 46.49 |
| Cal61-80 | 0.665 | 0.621 | 61.15 | Val81-85 | 5 | 41.75 |
| | | | | Val81-90 | 10 | 47.18 |
| | | | | Val81-95 | 15 | 52.32 |
| Cal61-85 | 0.687 | 0.641 | 56.71 | Val86-90 | 5 | 52.78 |
| | | | | Val86-95 | 10 | 58.96 |
| Cal61-90 | 0.742 | 0.697 | 57.49 | Val91-95 | 5 | 87.97 |

Hydrogrammes de simulation sur la période 1971-1995 (calage sur 1961-1970)

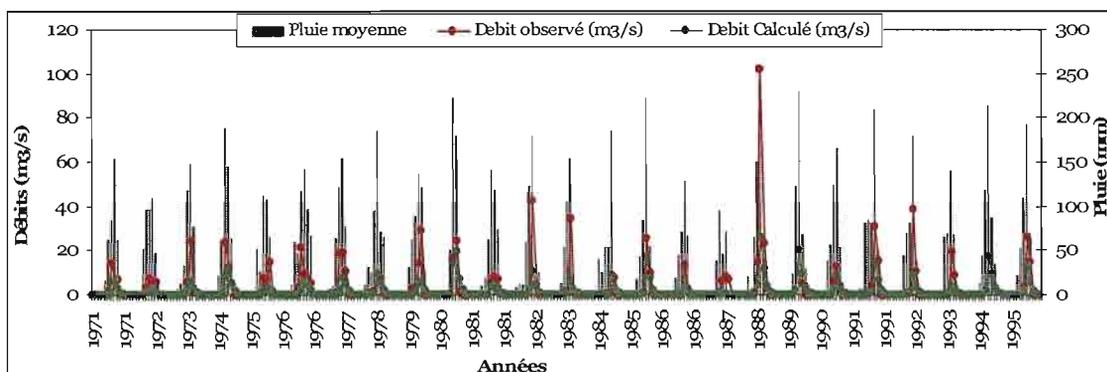


Figure 33 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Tera (Pluie CRU).
Période 1971-1995 (calage sur 1961-1970).

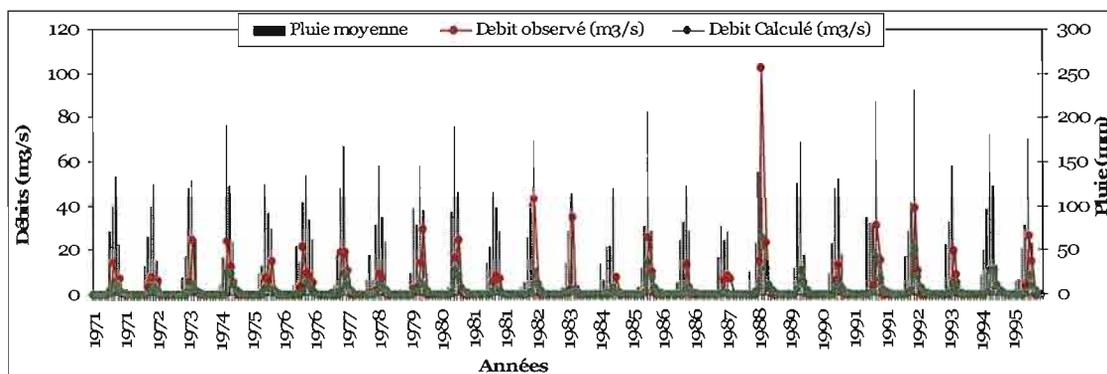


Figure 34 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Tera (Pluie SIEREM).
Période 1971-1995 (calage sur 1961-1970).

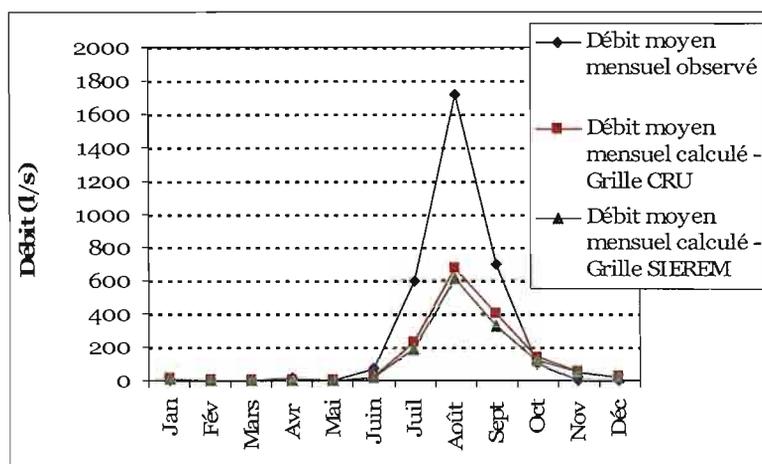


Figure 35 : Débits moyens mensuels observés et calculés à la station de Tera sur la période 1971-1995. Calage sur la période 1961-1970.

4. Performances de GR2M pour le bassin du Goroubi à Diongoré

Résultats avec la grille de pluie du CRU

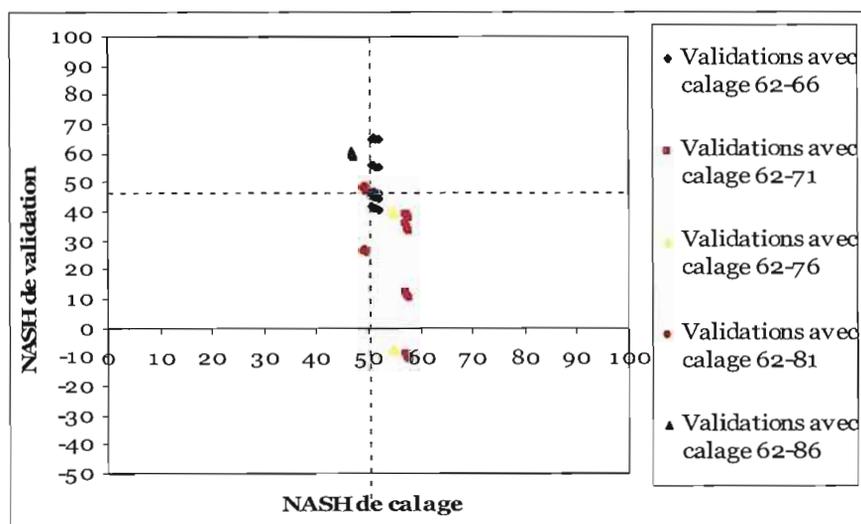


Figure 36 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibration. Station de Diongoré. Cas de la grille pluie du CRU

Tableau 17 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Diongoré. Cas de la grille pluie du CRU

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal62-66 | 0.265 | 0.494 | 52.20 | Val67-71 | 5 | 64.86 |
| | | | | Val67-76 | 10 | 55.04 |
| | | | | Val67-81 | 15 | 44.75 |
| | | | | Val67-86 | 20 | 40.86 |
| | | | | Val67-92 | 25 | 46.38 |
| Cal62-71 | 0.277 | 0.529 | 58.19 | Val72-76 | 5 | 33.43 |
| | | | | Val72-81 | 10 | -10.48 |
| | | | | Val72-86 | 15 | 10.82 |
| | | | | Val72-92 | 20 | 38.04 |
| Cal62-76 | 0.275 | 0.558 | 55.35 | Val77-81 | 5 | -258.74 |
| | | | | Val77-86 | 10 | -7.54 |
| | | | | Val77-92 | 15 | 39.64 |
| Cal62-81 | 0.255 | 0.557 | 49.85 | Val82-86 | 5 | 26.15 |
| | | | | Val82-92 | 10 | 47.71 |
| Cal62-86 | 0.260 | 0.564 | 47.20 | Val87-92 | 5 | 59.33 |

Résultats avec la grille de pluie du SIEREM

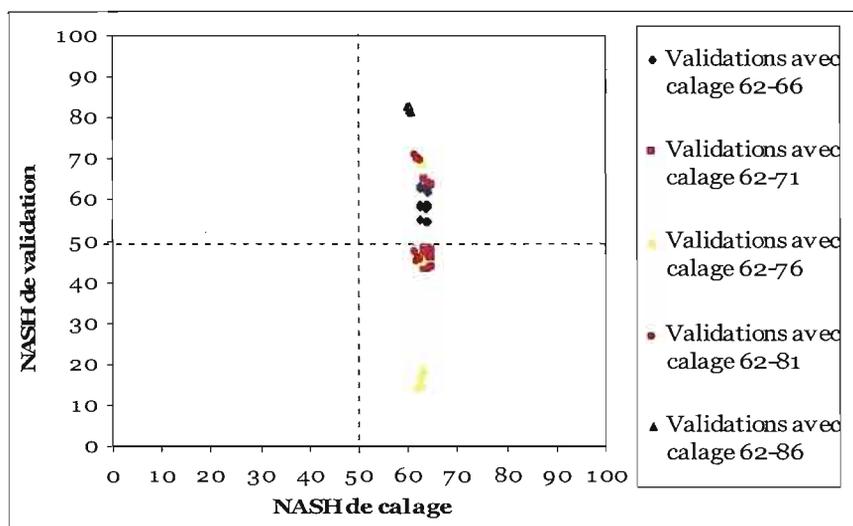


Figure 37 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibrarion. Station de Diongoré. Cas de la grille pluie du SIEREM.

Tableau 18 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Diongoré. Cas de la grille pluie du SIEREM

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal62-66 | 0.265 | 0.494 | 52.20 | Val67-71 | 5 | 64.86 |
| | | | | Val67-76 | 10 | 55.04 |
| | | | | Val67-81 | 15 | 44.75 |
| | | | | Val67-86 | 20 | 40.86 |
| | | | | Val67-92 | 25 | 46.38 |
| Cal62-71 | 0.277 | 0.529 | 58.19 | Val72-76 | 5 | 33.43 |
| | | | | Val72-81 | 10 | -10.48 |
| | | | | Val72-86 | 15 | 10.82 |
| | | | | Val72-92 | 20 | 38.04 |
| Cal62-76 | 0.275 | 0.558 | 55.35 | Val77-81 | 5 | -258.74 |
| | | | | Val77-86 | 10 | -7.54 |
| | | | | Val77-92 | 15 | 39.64 |
| Cal62-81 | 0.255 | 0.557 | 49.85 | Val82-86 | 5 | 26.15 |
| | | | | Val82-92 | 10 | 47.71 |
| Cal62-86 | 0.260 | 0.564 | 47.20 | Val87-92 | 5 | 59.33 |

Hydrogrammes de simulation sur la période 1972-1992 (calage sur 1962-1971)

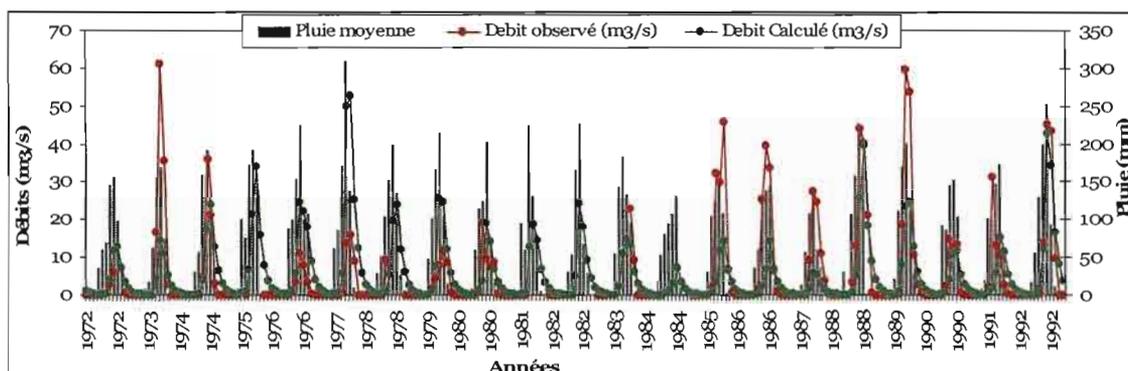


Figure 38 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Diongoré (Pluie CRU).
Période 1972-1992 (calage sur 1962-1970).

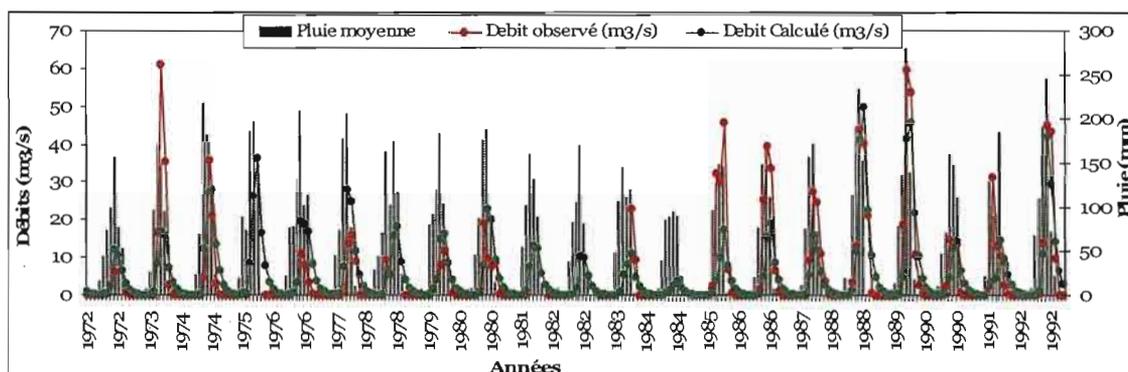


Figure 39 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Diongoré (Pluie SIEREM). Période 1972-1992 (calage sur 1962-1970).

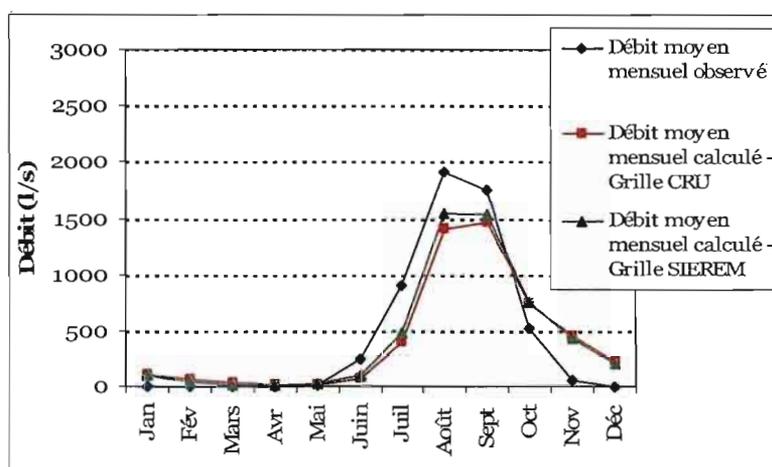


Figure 40 : Débits moyens mensuels observés et calculés à la station de Tera sur la période 1971-1995. Calage sur la période 1961-1970.

5. Performances de GR2M pour le bassin du Nakambé à Wayen

Résultats avec la grille de pluie du CRU

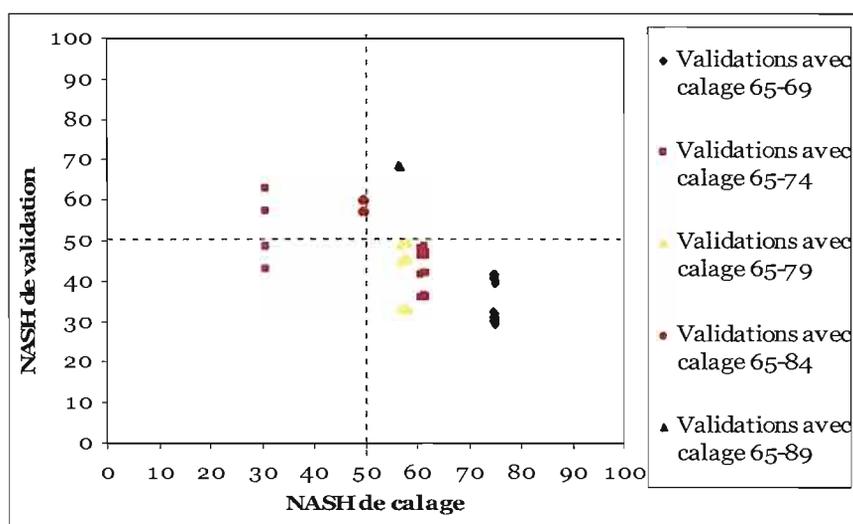


Figure 41 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibration. Station de Wayen. Cas de la grille pluie du CRU

Tableau 19 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Wayen. Cas de la grille pluie du CRU

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal65-69 | 0.222 | 0.735 | 75.15 | Val70-74 | 5 | 40.16 |
| | | | | Val70-79 | 10 | 39.23 |
| | | | | Val70-84 | 15 | 29.44 |
| | | | | Val70-89 | 20 | 30.47 |
| | | | | Val70-95 | 25 | 31.93 |
| Cal65-74 | 0.229 | 0.979 | 60.65 | Val75-79 | 5 | 48.00 |
| | | | | Val75-84 | 10 | 36.43 |
| | | | | Val75-89 | 15 | 41.86 |
| | | | | Val75-94 | 20 | 46.12 |
| Cal65-79 | 0.240 | 0.805 | 50.32 | Val80-84 | 5 | 33.66 |
| | | | | Val80-89 | 10 | 45.41 |
| | | | | Val80-90 | 15 | 49.64 |
| Cal65-84 | 0.240 | 0.805 | 50.32 | Val85-85 | 5 | 57.10 |
| | | | | Val85-90 | 10 | 59.68 |
| Cal65-89 | 0.272 | 0.718 | 56.67 | Val90-95 | 5 | 68.31 |

Résultats avec la grille de pluie du SIEREM

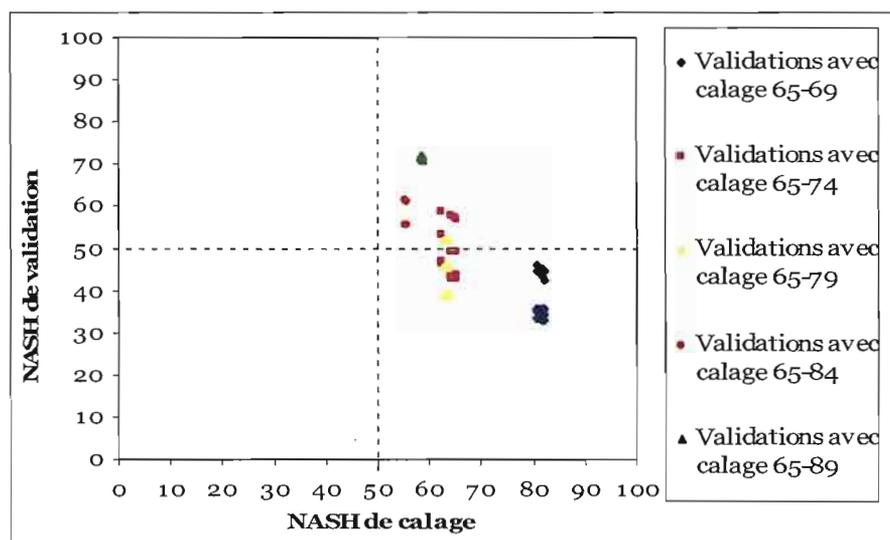


Figure 42 : NASH de validation en fonction du NASH de calage pour différentes périodes de calibrarion. Station de Wayen. Cas de la grille pluie du SIEREM.

Tableau 20 : NASH de validation du modèle pour les meilleurs paramètres de calibration sur différentes périodes de calage – Station de Wayen. Cas de la grille pluie du SIEREM

| Période de calage | X1 | X2 | Meilleur NASH Calage | Période de validation | Longueur (année) | NASH Validation |
|-------------------|-------|-------|----------------------|-----------------------|------------------|-----------------|
| Cal65-69 | 0.230 | 0.723 | 82.37 | Val70-74 | 5 | 42.73 |
| | | | | Val70-79 | 10 | 44.76 |
| | | | | Val70-84 | 15 | 34.38 |
| | | | | Val70-89 | 20 | 32.81 |
| | | | | Val70-95 | 25 | 35.55 |
| Cal65-74 | 0.203 | 0.931 | 65.58 | Val75-79 | 5 | 57.15 |
| | | | | Val75-84 | 10 | 43.04 |
| | | | | Val75-89 | 15 | 43.91 |
| | | | | Val75-94 | 20 | 49.21 |
| Cal65-79 | 0.216 | 0.805 | 63.87 | Val80-84 | 5 | 39.16 |
| | | | | Val80-89 | 10 | 46.18 |
| | | | | Val80-90 | 15 | 51.96 |
| Cal65-84 | 0.236 | 0.765 | 55.99 | Val85-85 | 5 | 55.76 |
| | | | | Val85-90 | 10 | 60.95 |
| Cal65-89 | 0.266 | 0.686 | 58.72 | Val90-95 | 5 | 70.95 |

Hydrogrammes de simulation sur la période 1970-1995 (calage sur 1965-1969)

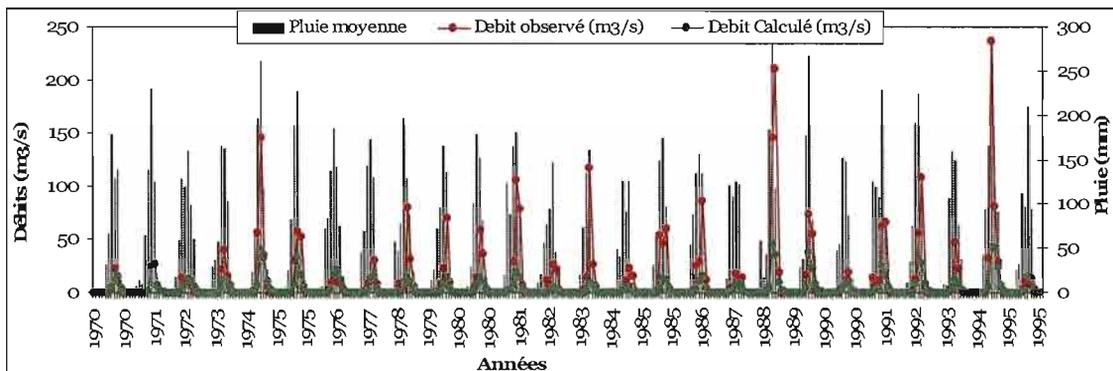


Figure 43 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Wayen (Pluie CRU).
Période 1970-1995 (calage sur 1965-1969).

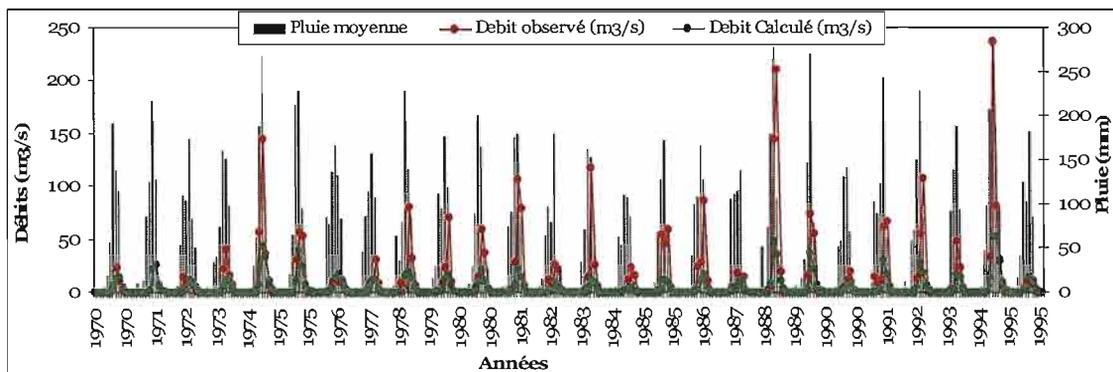


Figure 44 : Hydrogramme de simulation des débits à la station de Wayen (Pluie SIEREM).
Période 1970-1995 (calage sur 1965-1969).

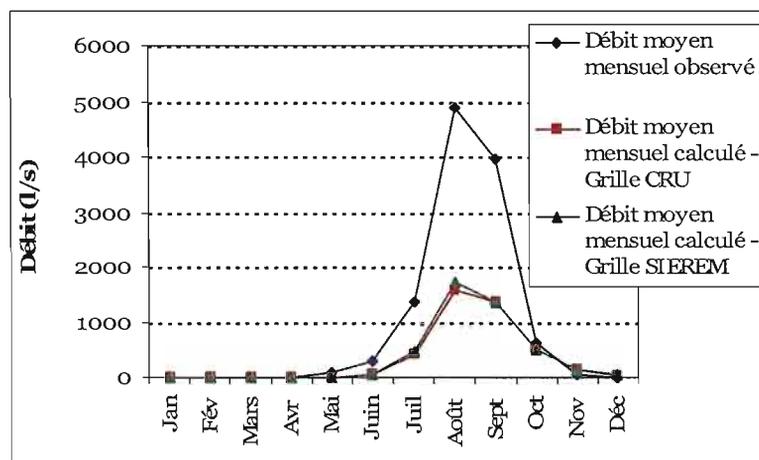


Figure 45 : Débits moyens mensuels observés et calculés à la station de Wayen sur la période 1970-1995. Calage sur la période 1965-1969.

ANNEXES VI : CALCULS DE LA WHC AUX DATES DES IMAGES

1. Hypothèse 1 : les données FAO datent de 1963

Dans cette hypothèse, nous considérons que les données sol de la FAO datent de 1963. Ne disposant d'aucune information quant aux états de surface existants sur le bassin à cette date, nous considérerons que l'état d'anthropisation du bassin en 1963 est assimilable à l'état fictif zéro. Cette approximation nous permet d'avoir pour 1963 les pourcentages suivants :

- végétation naturelle : $\alpha_{1963} = 100\%$
- cultures : $\beta_{1963} = 0\%$,
- sols nus : $\gamma_{1963} = 0\%$
- plans d'eau : $\delta_{1963} = 0\%$

Notons WHC_{1963} la capacité de rétention en eau du sol pour le bassin en 1963. Le Tableau 21 donne les valeurs de la WHC du bassin et de ses mailles du bassin. Ces valeurs sont donc considérées comme datant de 1963.

Tableau 21 : Valeurs des WHC de la FAO pour chaque maille du Nakambé à Wayen.

| YG | XG | WHC max (mm) | WHC moy (mm) | WHC min (mm) | WHC Saxton (mm) |
|---------------------------|-------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| 14.25 | -2.25 | 165.05 | 136.56 | 115.05 | 82.65 |
| 14.25 | -1.75 | 183.24 | 156.57 | 133.24 | 89.47 |
| 13.75 | -2.75 | 112.00 | 90.00 | 70.00 | 56.00 |
| 13.75 | -2.25 | 127.55 | 103.67 | 83.41 | 65.39 |
| 13.75 | -1.75 | 160.43 | 133.60 | 112.25 | 84.21 |
| 13.75 | -1.25 | 154.56 | 126.24 | 105.28 | 81.81 |
| 13.25 | -2.75 | 80.74 | 61.67 | 42.65 | 66.75 |
| 13.25 | -2.25 | 99.68 | 78.86 | 59.25 | 60.21 |
| 13.25 | -1.75 | 130.30 | 107.60 | 86.56 | 74.11 |
| 13.25 | -1.25 | 152.80 | 129.22 | 106.98 | 86.90 |
| 13.25 | -0.75 | 166.03 | 142.72 | 119.42 | 89.94 |
| 12.75 | -2.25 | 105.19 | 87.87 | 69.71 | 54.40 |
| 12.75 | -1.75 | 83.05 | 64.18 | 45.22 | 65.94 |
| 12.75 | -1.25 | 149.02 | 126.63 | 105.04 | 88.20 |
| 12.75 | -0.75 | 144.04 | 123.01 | 101.57 | 86.27 |
| 12.25 | -1.25 | 138.51 | 116.75 | 96.37 | 98.75 |
| 12.25 | -0.75 | 173.54 | 149.88 | 127.13 | 103.57 |
| WHC du bassin (mm) | | 133 | 110 | 89 | 78 |

- **Calcul de la WHC du bassin en 1972**

En 1972, nous avons les pourcentages suivants :

- végétation naturelle : $\alpha_{1972} = 52\%$
- cultures : $\beta_{1972} = 43.2\%$,
- sols nus : $\gamma_{1972} = 4.5\%$
- plans d'eau : $\delta_{1972} = 0.3\%$

Cette nouvelle répartition des états de surface sur le bassin traduit le fait qu'au total, 48% de la végétation naturelle qui existait sur le bassin en 1963 a été transformé en cultures (42.3%), en sols nus (4.5%) et en plans d'eau (0.3%).

Ces modifications se traduisent sur la WHC du bassin de la manière suivante :

- 52% de la surface du bassin est resté en végétation naturelle, la contribution de cette portion à la WHC totale du bassin sera : $\frac{52}{100}WHC_{1963}$
- 42% de la surface du bassin a été défriché et mis en culture. Pour cette portion du bassin, on passe d'un état caractérisé par le couple $(KrVg, WHC_{1963})$ à un état caractérisé par (KrC, WHC_{Cult}) . Le coefficient de ruissellement passe de $KrVg$ à KrC . La WHC est donc modulée par le rapport $\frac{KrVg}{KrC}$. La contribution de cette portion à la WHC du bassin sera :

$$WHC_{Cult} = \frac{42}{100} \frac{KrVg}{KrC} WHC_{1963}.$$

- 4.5% de la surface s'est dégradé et est devenu du sol nu. Pour cette portion du bassin, on est passé d'un état caractérisé par le couple $(KrVg, WHC_{1963})$ à un état caractérisé par $(KrSn, WHC_{Sn})$. De même que précédemment, on aura :

$$WHC_{sn} = \frac{4.5}{100} \frac{KrVg}{KrSn} WHC_{1963}$$

- 0.3% de la surface du bassin est constitué de plans d'eau. Pour cette portion du bassin, on passe du couple $(KrVg, WHC_{1963})$ au couple $(KrPe, WHC_{pe})$ avec :

$$WHC_{pe} = \frac{0.3}{100} \frac{KrVg}{KrPe} WHC_{1963}$$

La somme des contributions donne la WHC du bassin en 1972 :

$$WHC_{1972} = \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{KrVg}{KrC} + \frac{4.5}{100} \frac{KrVg}{KrSn} + \frac{0.3}{100} \frac{KrVg}{KrPe} \right] WHC_{1963}$$

Le Tableau 21 montre que la WHC du bassin peut prendre 4 valeurs possibles : 133, 110, 89 et 78 mm. Chaque maille du bassin contribue la WHC totale du bassin proportionnellement à la surface qu'elle occupe. WHC_{1972} peut donc prendre les valeurs suivantes :

$$WHC_{1972} = 133 \cdot \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{KrVg}{KrC} + \frac{4.5}{100} \frac{KrVg}{KrSn} + \frac{0.3}{100} \frac{KrVg}{KrPe} \right]$$

$$WHC_{1972} = 110 \cdot \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{KrVg}{KrC} + \frac{4.5}{100} \frac{KrVg}{KrSn} + \frac{0.3}{100} \frac{KrVg}{KrPe} \right]$$

$$WHC_{1972} = 89 \cdot \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{KrVg}{KrC} + \frac{4.5}{100} \frac{KrVg}{KrSn} + \frac{0.3}{100} \frac{KrVg}{KrPe} \right]$$

$$WHC_{1972} = 78 \cdot \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{KrVg}{KrC} + \frac{4.5}{100} \frac{KrVg}{KrSn} + \frac{0.3}{100} \frac{KrVg}{KrPe} \right]$$

En utilisant les coefficients de ruissellement de Yacouba *et al.*, (2002) on aura :

$$WHC_{1972} = \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{17}{24} + \frac{4.5}{100} \frac{17}{54} + \frac{0.3}{100} \frac{17}{1} \right] WHC_{1963} = 0.84 \cdot WHC_{1963}$$

D'où le tableau des valeurs suivantes :

Tableau 22 : Valeurs de la WHC du bassin en 1972 avec les coefficients de ruissellement de Yacouba et al., (2002). La date supposée de l'état FAO est 1963

| | |
|------------------------------|--|
| WHC FAOmax en 1972 | $WHC_{1972} = 0.84 \cdot 133 = 112$ mm |
| WHC FAOmoy en 1972 | $WHC_{1972} = 0.84 \cdot 110 = 92$ mm |
| WHC FAOmin en 1972 | $WHC_{1972} = 0.84 \cdot 89 = 75$ mm |
| WHC FAOsaxton en 1972 | $WHC_{1972} = 0.84 \cdot 78 = 66$ mm |

En utilisant les coefficients de ruissellement de Fournier *et al.*, (2002) on aura :

$$WHC_{1972} = \left[\frac{52}{100} + \frac{43.2}{100} \frac{13}{20} + \frac{4.5}{100} \frac{13}{50} + \frac{0.3}{100} \frac{13}{1} \right] WHC_{1963} = 0.81 \cdot WHC_{1963}$$

Tableau 23 : Valeurs de la WHC du bassin en 1972 avec les coefficients de ruissellement de Fournier et al., (2000). La date supposée de l'état FAO est 1963

| | |
|------------------------------|--|
| WHC FAOmax en 1972 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 133 = 108$ mm |
| WHC FAOmoy en 1972 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 110 = 89$ mm |
| WHC FAOmin en 1972 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 89 = 72$ mm |
| WHC FAOsaxton en 1972 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 78 = 63$ mm |

- **Calcul de la WHC du bassin en 1986, 1992 et 2002**

De la même manière que précédemment, on calcule la WHC du bassin en 1986, 1992 et 2002.

| | |
|------------------------------|--|
| WHC FAOmax en 1986 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 133 = 108 \text{ mm}$ |
| WHC FAOmoy en 1986 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 110 = 89 \text{ mm}$ |
| WHC FAOmin en 1986 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 89 = 72 \text{ mm}$ |
| WHC FAOsaxton en 1986 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 78 = 63 \text{ mm}$ |

| | |
|------------------------------|--|
| WHC FAOmax en 1992 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 133 = 108 \text{ mm}$ |
| WHC FAOmoy en 1992 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 110 = 89 \text{ mm}$ |
| WHC FAOmin en 1992 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 89 = 72 \text{ mm}$ |
| WHC FAOsaxton en 1992 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 78 = 63 \text{ mm}$ |

| | |
|------------------------------|--|
| WHC FAOmax en 2002 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 133 = 108 \text{ mm}$ |
| WHC FAOmoy en 2002 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 110 = 89 \text{ mm}$ |
| WHC FAOmin en 2002 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 89 = 72 \text{ mm}$ |
| WHC FAOsaxton en 2002 | $WHC_{1972} = 0.81 \cdot 78 = 63 \text{ mm}$ |

**ANNEXES VII : RESULTATS DES PERFORMANCES DE GR2M AVEC DES
DONNEES FIXES ET EVOLUTIVES DE WHC**

1. Performances de GR2M en calage validation avec des WHC fixes

Tableau 24 : Performances de GR2M en calage-validation pour différentes périodes sur le bassin du Nakambé à Wayen. Cas des WHC fixes

| Type de WHC | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation 1973-1986 | NASH Validation 1987-1995 | NASH Validation 1973-1995 |
|---------------|------------------|-------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | X1 | X2 | NASH (%) | | | |
| WHC Faomax | 0.219 | 0.758 | 73.0 | 26.2 | 33.8 | 31.1 |
| WHC Faomoy | 0.199 | 0.747 | 73.0 | 26.5 | 34.2 | 31.5 |
| WHC Faomin | 0.178 | 0.730 | 72.9 | 27.0 | 34.5 | 31.8 |
| WHC FaoSaxton | 0.170 | 0.732 | 73.0 | 26.4 | 34.6 | 31.7 |

| Type de WHC | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation 1965-1972 | NASH Validation 1987-1995 |
|---------------|------------------|-------|----------|------------------------------|------------------------------|
| | X1 | X2 | NASH (%) | | |
| WHC Faomax | 0.364 | 0.855 | 63.7 | -231.1 | 74.2 |
| WHC Faomoy | 0.334 | 0.828 | 63.9 | -226.6 | 73.9 |
| WHC Faomin | 0.303 | 0.799 | 64.3 | -219.5 | 73.2 |
| WHC FaoSaxton | 0.290 | 0.794 | 63.8 | -219.8 | 73.6 |

| Type de WHC | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation 1965-1972 | NASH Validation 1973-1986 | NASH Validation 1965-1986 |
|---------------|------------------|-------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | X1 | X2 | NASH (%) | | | |
| WHC Faomax | 0.386 | 0.758 | 75.3 | -291.5 | 62.8 | 27.7 |
| WHC Faomoy | 0.354 | 0.738 | 74.8 | -281.0 | 63.1 | 29.0 |
| WHC Faomin | 0.321 | 0.716 | 74.0 | -270.1 | 63.5 | 30.5 |
| WHC FaoSaxton | 0.307 | 0.711 | 74.3 | -266.0 | 63.1 | 30.5 |

Hydrogrammes de simulation

Performances de GR2M en calage validation avec des WHC évoluant linéairement

| Coefficients de ruissellement | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation | |
|-------------------------------|------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.21 | 0.759 | 71.2 | 32.9 | 45.3 | 40.8 |
| | Whc Fao moy | 0.191 | 0.746 | 71.3 | 33.2 | 45.3 | 40.9 |
| | Whc Fao min | 0.171 | 0.73 | 71.3 | 33.3 | 45.6 | 40.5 |
| | Whc Fao saxton | 0.163 | 0.733 | 71.5 | 32.8 | 44.9 | 40.9 |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.209 | 0.76 | 70.8 | 24.5 | 47.8 | 43 |
| | Whc Fao moy | 0.189 | 0.747 | 71 | 34.2 | 47.1 | 42.4 |
| | Whc Fao min | 0.17 | 0.73 | 71 | 34.6 | 46.6 | 42.3 |
| | Whc Fao saxton | 0.162 | 0.732 | 71.2 | 34.1 | 46.8 | 42.2 |
| Coefficients de ruissellement | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation | NASH Validation | | |
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1987-1995 | | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.312 | 0.827 | 65.3 | -69.5 | 73.6 | |
| | Whc Fao moy | 0.305 | 0.799 | 65.5 | -134.8 | 72.9 | |
| | Whc Fao min | 0.278 | 0.77 | 65.7 | -135.7 | 71.9 | |
| | Whc Fao saxton | 0.266 | 0.766 | 65.2 | -134.9 | 72.1 | |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.326 | 0.821 | 65.6 | -122.4 | 72.9 | |
| | Whc Fao moy | 0.3 | 0.795 | 65.7 | -121.8 | 73.2 | |
| | Whc Fao min | 0.273 | 0.766 | 65.9 | -120.9 | 71.5 | |
| | Whc Fao saxton | 0.262 | 0.758 | 65.5 | -121.9 | 71.6 | |
| Coefficients de ruissellement | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation | |
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.332 | 0.729 | 74.6 | -104.2 | 64.4 | 48.1 |
| | Whc Fao moy | 0.306 | 0.709 | 74 | -106.4 | 64.7 | 48 |
| | Whc Fao min | 0.278 | 0.689 | 72.9 | -105.8 | 65 | 48.4 |
| | Whc Fao saxton | 0.266 | 0.683 | 73.1 | -104 | 64.5 | 48.2 |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.323 | 0.724 | 74.4 | -81.2 | 64.5 | 50.5 |
| | Whc Fao moy | 0.297 | 0.704 | 73.8 | -81.1 | 64.7 | 50.6 |
| | Whc Fao min | 0.271 | 0.684 | 72.7 | -85.1 | 65.1 | 50.6 |
| | Whc Fao saxton | 0.259 | 0.677 | 72.9 | -82 | 64.5 | 50.4 |

Hydrogrammes de simulation

Performances de GR2M en calage validation pour une évolution logistique des WHC

| Coefficients de ruissellement | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation | |
|-------------------------------|------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|------|
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.216 | 0.758 | 72.3 | 29.9 | 41.3 | 37.2 |
| | Whc Fao moy | 0.216 | 0.758 | 72.3 | 38.9 | 50.1 | 46 |
| | Whc Fao min | 0.196 | 0.745 | 72.4 | 30.2 | 32.8 | 28.8 |
| | Whc Fao saxton | 0.167 | 0.729 | 72.4 | 29.9 | 41.2 | 37.1 |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.216 | 0.758 | 72.3 | 30.7 | 42.6 | 38.3 |
| | Whc Fao moy | 0.196 | 0.746 | 72.3 | 30.9 | 42.6 | 38.4 |
| | Whc Fao min | 0.175 | 0.728 | 72.2 | 31.1 | 42.1 | 38.2 |
| | Whc Fao saxton | 0.167 | 0.73 | 72.2 | 30.5 | 42.3 | 38 |
| Coefficients de ruissellement | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation | NASH Validation | | |
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1987-1995 | | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.349 | 0.838 | 65 | -177.3 | 73.9 | |
| | Whc Fao moy | 0.321 | 0.812 | 65.2 | -176.4 | 73.3 | |
| | Whc Fao min | 0.349 | 0.838 | 65 | -177.3 | 73.9 | |
| | Whc Fao saxton | 0.279 | 0.777 | 65 | -172.7 | 72.7 | |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.347 | 0.836 | 65.3 | -169.5 | 73.7 | |
| | Whc Fao moy | 0.319 | 0.809 | 65.4 | -166.2 | 73.2 | |
| | Whc Fao min | 0.29 | 0.779 | 65.6 | -166.6 | 72.3 | |
| | Whc Fao saxton | 0.278 | 0.774 | 65.2 | -167.7 | 72.5 | |
| Coefficients de ruissellement | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation | |
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 | |
| Yacouba et al. (2002) | Whc Fao max | 0.354 | 0.741 | 74.9 | -157.4 | 64.4 | 42.6 |
| | Whc Fao moy | 0.325 | 0.721 | 74.3 | -155 | 64.6 | 43.1 |
| | Whc Fao min | 0.354 | 0.741 | 74.9 | -157.4 | 64.4 | 42.7 |
| | Whc Fao saxton | 0.283 | 0.695 | 73.5 | -155.7 | 64.4 | 42.9 |
| Fournier et al. (2000) | Whc Fao max | 0.35 | 0.739 | 74.8 | -142.6 | 64.5 | 44.3 |
| | Whc Fao moy | 0.321 | 0.718 | 74.2 | -138.9 | 64.7 | 44.8 |
| | Whc Fao min | 0.292 | 0.696 | 73.2 | -140.8 | 65 | 44.9 |
| | Whc Fao saxton | 0.279 | 0.691 | 73.4 | -137.2 | 64.5 | 44.8 |

Hydrogrammes de simulation

**Performances de GR2M en calage validation pour une évolution en escalier des
WHC**

| | Calage 1965-1972 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
|-------------------------|------------------|-------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1973-1986 | 1987-1995 | 1973-1995 |
| Whc Fao max | 0.219 | 0.759 | 73 | 58.1 | 60.8 | 59.9 |
| Whc Fao moy | 0.218 | 0.756 | 73 | 58 | 60.5 | 59.7 |
| Whc Fao min | 0.216 | 0.75 | 73 | 58 | 60.2 | 59.5 |
| Whc Fao saxton | 0.22 | 0.76 | 73.1 | 58 | 61.3 | 60.3 |
| Calage 1973-1986 | | | | | | |
| | Calage 1973-1986 | | | NASH Validation | NASH Validation | |
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1987-1995 | |
| Whc Fao max | 0.26 | 0.764 | 64.3 | 57.2 | 71.4 | |
| Whc Fao moy | 0.26 | 0.76 | 64.5 | 56.6 | 71.3 | |
| Whc Fao min | 0.258 | 0.755 | 64.5 | 56.3 | 71 | |
| Whc Fao saxton | 0.26 | 0.762 | 64 | 57.9 | 71.7 | |
| Calage 1987-1995 | | | | | | |
| | Calage 1987-1995 | | | NASH Validation | NASH Validation | NASH Validation |
| | X1 | X2 | NASH (%) | 1965-1972 | 1973-1986 | 1965-1986 |
| Whc Fao max | 0.293 | 0.699 | 73.7 | 24.4 | 61.1 | 58.1 |
| Whc Fao moy | 0.292 | 0.699 | 73.5 | 24.3 | 61.2 | 58.2 |
| Whc Fao min | 0.29 | 0.694 | 73.2 | 23.8 | 61.2 | 58.2 |
| Whc Fao saxton | 0.292 | 0.701 | 73.9 | 26.4 | 61 | 58.3 |

ARTICLES ET POSTERS

Méthodologie et application d'une démarche de modélisation hydrologique prenant en compte l'évolution des états de surface en milieu sahélien d'Afrique de l'ouest.

PIERRE DIELLO¹, JEAN-EMMANUEL PATUREL¹, GIL MAHE¹,
BRUNO BARBIER², HAROUNA KARAMBIRI³, ERIC SERVAT¹

¹ UMR HydroSciences – MSE, Place Eugène Bataillon, F-34095 Montpellier cedex 5, France

Corresponding author: Pierre.diello@msem.univ-montp2.fr

² CIRAD, Avenue du Président Kennedy, 01 BP 596 Ouagadougou 01 Burkina Faso

³ EIER-ETASHER, 03 BP 7023, Ouagadougou 03, Burkina Faso

Résumé Les études menées depuis une vingtaine d'années montrent que l'effet conjoint du changement climatique et des activités humaines sur les états de surface est à l'origine d'un paradoxe hydrologique observé depuis les années 1970 sur les bassins versants sahéliens. En effet, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie de cette région, les coefficients d'écoulement ont très fortement augmenté, entraînant des écoulements plus importants qu'auparavant. Ces modifications de la relation pluie-débit nécessitent de nouvelles approches permettant de prendre en compte conjointement la variabilité climatique et la dimension anthropique dans la modélisation hydrologique de ces bassins. Une méthodologie est présentée et des résultats préliminaires sont discutés.

Mots clés activités anthropiques; Burkina Faso; états de surface; fonction logistique; modélisation démographique; modélisation hydrologique; Sahel; variabilité climatique; variabilité hydrologique

Using land use/land cover evolution in an hydrological modelling approach in west African Sahel

Abstract The hydrological studies undertaken during the last twenty years have shown an hydrological paradox observed since the year 1970 on the Sahelian river basins. This false statement is due to the combined effect of climate changes and human activities on land-cover. Runoff coefficients have increased, inducing more important flows than in the earlier years despite a reduction in rainfall. These modifications to the rainfall–runoff relationship require new approaches that make it possible to take into account both the climatic variability and the human dimension in hydrological modelling of these basins. A method is presented and preliminary results are analysed and discussed.

Key words human activities; Burkina Faso; Sahel; land cover; logistic function; demographic modelling; hydrological modelling, climatic variability; hydrological variability

INTRODUCTION

Les études hydrologiques menées depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest ont montré que les coefficients d'écoulement ont fortement augmenté sur certains hydrosystèmes du Sahel, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale. Ces nouvelles conditions de ruissellement apparaissent plus favorables dans les zones caractérisées par une diminution du couvert végétal, une extension des surfaces cultivées et des surfaces dégradées (Pouyaud, 1987; Albergel & Valentin, 1991; Mahe *et al.*, 2003; Seguis *et al.*, 2003). Dans ces régions, les états de surface représentent les facteurs prépondérants des phénomènes d'infiltration et de ruissellement. Une voie vers l'amélioration de notre aptitude à simuler par modèle le fonctionnement hydrologique de ces hydrosystèmes est donc de pouvoir prendre en compte la dynamique du milieu dans les modèles. De nombreux modèles de simulation hydrologique existent, mais peu d'entre elles prennent en compte la dynamique d'évolution du milieu. Les modèles conceptuels à réservoirs tels que GR2M, WBM, et, Yates (Makhlouf, 1994; Yates, 1997; Conway & Jones, 1999), ne font pas exception. Cependant, ils intègrent comme paramètre ou variable d'entrée une donnée caractérisant la hauteur maximale d'un réservoir "sol". C'est cette dernière donnée qui nous intéresse plus particulièrement car des indicateurs de pression anthropique et/ou climatique peuvent servir de base à la transcription de la dynamique du milieu sur ce paramètre ou cette variable.

MODELES HYDROLOGIQUES ET ETATS DE SURFACE EN MILIEU SAHELIN

L'une des grandes difficultés qui se posent à l'hydrologie est la caractérisation et la modélisation

du comportement hydrologique du sol. En effet, la redistribution des précipitations sur un bassin versant met en jeu trois principales sources d'énergie (Ambroise, 1999) :

- une énergie liée à un potentiel, contrôlant la dynamique de l'écoulement au sein du bassin ;
- une énergie d'origine « atmosphérique » (radiation, advection), contrôlant les phénomènes d'évaporation et de transpiration ;
- Une énergie de rétention hydrique (capillarité, adsorption), qui régit les variations temporelle de stock.

Chacune de ces trois formes d'énergies contrôlent plus particulièrement l'une des grandes composantes du bilan hydrique, et, à tout instant, la compétition entre ces trois sources d'énergie dépend fortement de l'état hydrique du sol. Cette donnée fondamentale en hydrologie, est, en milieu sahélien, sous le contrôle quasi exclusif des états de surface (Casenave & Valentin, 1992). D'autre part, Puech (1993) a montré que dans ces régions, le mécanisme prépondérant de formation des débits est celui du ruissellement de surface par saturation du sol (processus hortonnien, Horton, 1933). Une intégration de la dynamique d'évolution des états de surface dans les modèles hydrologiques pourrait donc améliorer les résultats de simulation. Le modèle GR2M, que nous utiliserons dans le cadre de ce travail, comporte un réservoir "sol" dont la hauteur maximale est assimilée à la capacité de rétention en eau du sol (WHC: Water Holding Capacity). Classiquement, les données de WHC sont fixées pour chaque unité de terrain et pour toute la durée des simulations. Cette démarche ne permet pas une prise en compte la dynamique d'évolution du milieu. La méthodologie qui est présentée ici est un essai vers une prise en compte conjointe des composantes anthropique et climatique de l'évolution du milieu dans le modèle GR2M.

MODES DE TRANSFORMATION DU MILIEU ET INDICATEURS DE PRESSION ANTHROPIQUE ET/OU CLIMATIQUE AU SAHEL

Assurer une certaine "sécurité alimentaire" dans un contexte de baisse globale de la pluviométrie, de manque de terres arables, et de pauvreté sévère, est une question de survie pour les populations sahéliennes d'Afrique de l'Ouest. Ce contexte, que l'on pourrait qualifier de "climato-socio-économique", a engendré de profondes mutations dans les pratiques culturelles et agropastorales des populations concernées. De nos jours, les terres encore arables sont, pour la plupart, exploitées sans interruption (pas de jachère). Les terres, qui, jadis, étaient considérées comme marginales, sont colonisées en faisant appel à de nouvelles pratiques de conservation et de restauration des sols (zaï, demi-lune, cordons pierreux, ...). Les derniers espaces encore en végétation sont défrichés et transformés en champs. Les politiques gouvernementales ont également favorisé la construction de nombreuses retenues d'eau à caractère agro-pastoral, dans le but de mobiliser et rendre disponible un maximum d'eau pour les populations et le bétail (le cas du Burkina Faso est très révélateur de cette politique).

L'analyse de ces pratiques dans le contexte hydroclimatique actuel permet, globalement, de dégager quatre modes de transformation possible du milieu:

- *La dégradation des sols*: qui intègre le dessèchement du couvert végétal avec encroûtement et dénudation des sols sous l'effet conjugué des actions de l'homme et du climat;
- *La mise en culture*: défrichage de la végétation et transformation en champs;
- *La restauration des sols*: qui comprend la récupération des terres dégradées à l'aide de pratiques telles que le zaï, les demi-lunes, le reboisement ou encore la mise en jachère;
- *Les aménagements du territoire* : barrages, routes...

De ces pratiques, nous déduisons quatre types d'état de surface:

1. les sols en végétation naturelle (jachères y compris) ;
2. les sols cultivés ;
3. les sols nus (dégradés et encroûtés, routes...) ;
4. les plans d'eau (barrages et autres retenues d'eau).

Pour une unité de surface donnée (bassin versant, maille élémentaire), les proportions de ces états de surface et leurs évolutions dans le temps seront prises d'une part comme indicateurs de pression anthropique et/ou climatique et, d'autre part, comme unité de comportement hydrologique.

Plusieurs études et méthodes (Birost & Galabert, 1967; Roose, 1989; Puech, 1993; Fournier *et al.*, 2000), permettent, en effet, d’associer à chaque type d’état de surface un indice de production de ruissellement. Dans le cas de cette étude, nous associerons un coefficient de ruissellement à chaque type d’état de surface (**Tableau 1**).

Tableau 1: Coefficients d’écoulement pour chaque type d’état de surface (Fournier *et al.*, 2000)

| Type d’état de surface | Végétation naturelle | Culture | Sol nu | Plan d’eau |
|----------------------------------|----------------------|---------|--------|------------|
| Coefficient de ruissellement (%) | 13 | 20 | 50 | 100 |

CARACTERISATION DE L’EVOLUTION DES INDICATEURS

Le traitement des images satellites combinées avec les données des statistiques agricoles permet de dresser, à des dates bien précises, des cartes d’occupation du sol. Cependant, l’intervalle de temps entre deux images satellites successives étant aléatoire, il faut trouver un modèle suffisamment fiable permettant de caractériser l’évolution des indicateurs entre deux dates. Deux modèles d’évolution sont retenus à partir des deux hypothèses ci-après :

Hypothèse simpliste d’une évolution linéaire des indicateurs: On considère que les proportions de chaque type d’état de surface évoluent linéairement entre deux périodes. Si $S_{T_{initial}}(ES_i)$ est la surface occupée par l’état de surface ES_i à la date $T_{initial}$, et $S_{T_{final}}(ES_i)$ la surface occupée par ce même état de surface à la date T_{final} , on peut écrire, si n est le nombre d’années entre $T_{initial}$ et T_{final} , que:

$$\begin{cases} S_{T_{initial}+j}(ES_i) = S_{T_{initial}}(ES_i) + jr \\ r = \frac{S_{T_{final}} - S_{T_{initial}}}{n} \\ j \in [1, n] \end{cases} \quad \text{Équation (1)}$$

L’équation 1 permet ainsi de calculer les données annuelles des proportions de chaque type d’état de surface sur la période d’étude.

Hypothèse d’une évolution plus “réaliste”: On peut concevoir que pour un bassin versant donné, la surface S_{cult} , occupée par les cultures ne peut dépasser une certaine valeur maximale $S_{max_{cult}}$ (on ne peut mettre en culture plus de terres qu’il n’y en a!). De même, la surface S_{vg} occupée par la végétation naturelle ne descendra pas en dessous d’un certain seuil (on ne va tout de même pas tout défricher! il y a toujours des aires protégées: forêts classées et autres...). Pour ces deux indicateurs, la variation de superficie entre deux dates, peut être considérée comme proportionnelle à la différence $S_{seuil} - S$ où S_{seuil} est un maximum ou un minimum et S la valeur actuelle de l’indicateur. La différence $S_{seuil} - S$ s’interprète comme la “place libre” dans le milieu que chaque type d’état de surface pourrait occuper au cours de son évolution dans le temps sous l’action de l’homme et du climat. On peut donc écrire que:

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} = k(S_{seuil} - S) \quad \text{Équation (2)}$$

En normalisant par $x = \frac{S}{S_{seuil}}$ et en posant $r = kS_{seuil}$, on obtient $\frac{dx}{dt} = rx(1-x) = f(x)$. La

solution de cette équation différentielle s’écrit: $x(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}}$ Équation (3)

$f(x)$ est connu sous le nom de fonction logistique. Ce type de fonction, que l’on retrouve en dynamique de la population (Delmas, 2004), correspond au mécanisme naturel de croissance ou de décroissance d’une variable, freinée par le niveau de sa valeur (x) et par la résultante d’autres paramètres que l’on considère comme constantes. Dans notre cas, ces paramètres peuvent être

déterminés à l'aide de séries annuelles de statistiques agricoles et de données de population. L'utilisation des données de population se justifie par le fait qu'en Afrique de l'ouest, et particulièrement en milieu sahélien, l'accroissement de la population est un facteur induisant des variations de surface cultivées et de surfaces en végétation naturelle. La surface totale du bassin étant la somme des superficies des quatre indicateurs, on déduit par différence l'évolution des surfaces nues, connaissant celle des surfaces cultivées, des surfaces en végétation naturelle et des plans d'eau.

MODULATION DE LA WHC EN FONCTION DE L'EVOLUTION DES ETATS DE SURFACE

On fait l'hypothèse que: toute variation de coefficient de ruissellement dans un sens, due au passage de l'un quelconque des quatre types d'états de surface à un autre, se traduit par une même variation, en sens contraire, de la capacité de rétention en eau. La Fig. 1 montre les différentes façons de moduler la WHC pour le cas d'une modification de la végétation naturelle en sols cultivés, sols nus et plans d'eau.

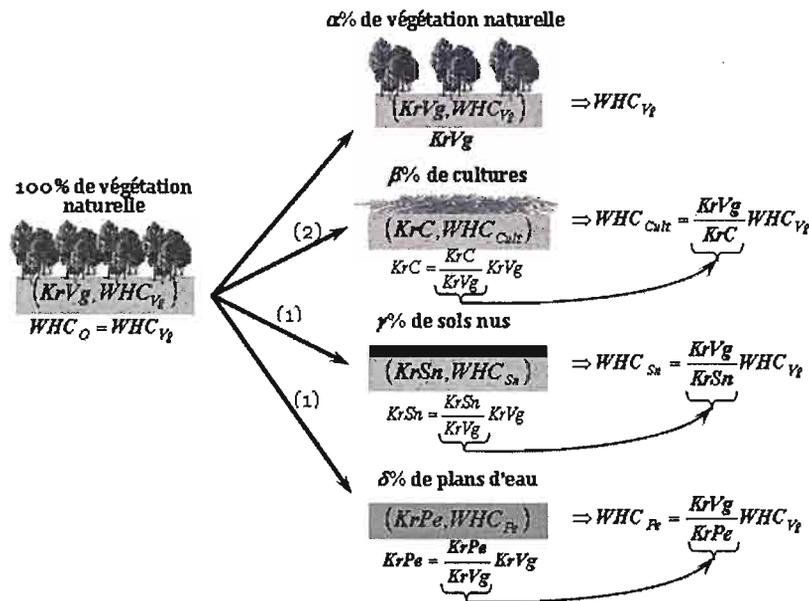


Fig. 1 Modulation de la WHC pour le cas d'une évolution d'un état de végétation naturelle vers un état anthropisé constitué des 4 types d'états de surface. [(1): Dégradation anthropique et/ou climatique] (2) Mise en culture]. La WHC est modulée en fonction du type de transformation

Soit WHC_{Vg} la WHC d'une surface $S_{Vg}(T_0)$ en végétation naturelle à la date T_0 . A la date T , elle sera:

$$WHC = \alpha\%WHC_{Vg} + \beta\%WHC_{Cult} + \gamma\%WHC_{Sn} + \delta\%WHC_{Pe} \quad \text{Équation (4)}$$

Soit en fonction de WHC_{Vg} :

$$WHC = \left[\alpha\% + \beta\% \frac{KrVg}{KrC} + \gamma\% \frac{KrVg}{KrSn} + \delta\% \frac{KrVg}{KrPe} \right] WHC_{Vg} \quad \text{Équation (5)}$$

Où les proportions α , β , γ , et δ sont déterminées dans chaque cas à l'aide des modèles dévolution des états de surface.

On peut mener le même raisonnement pour les autres types d'états de surface et aboutir aux mêmes types d'équations.

PREMIERS RESULTATS D'APPLICATION

Les résultats que nous présentons ici concernent trois bassins versants emboîtés du fleuve Nakambé (Volta Blanche) au Burkina Faso (**Fig. 2**)

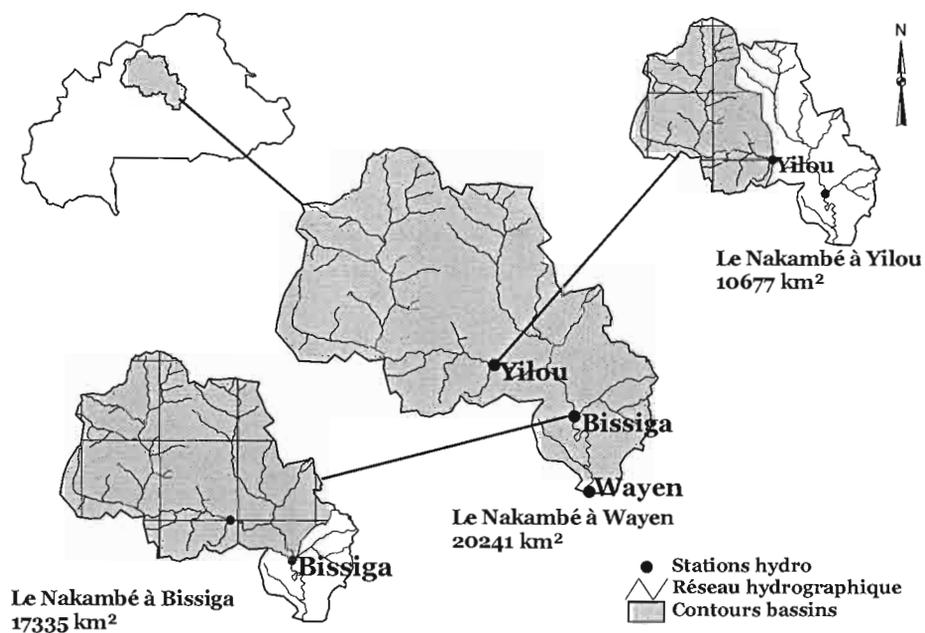


Fig. 2 Bassins tests du fleuve Nakambé au Burkina Faso.

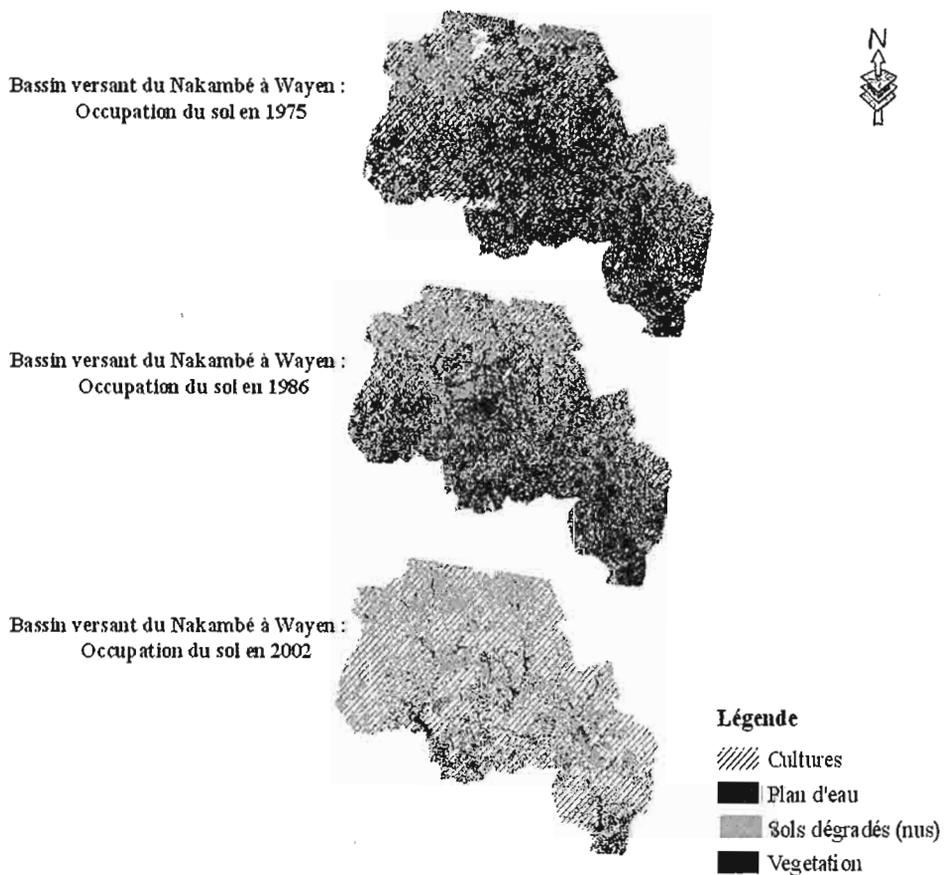


Fig. 3 Occupation du sol sur le bassin versant du Nakambé à Wayen en 1975, 1986 et 2002. On observe une

forte diminution du couvert végétale au profit des surfaces cultivées et des sols nus entre 1975 et 2002.

Les données de télédétection utilisées pour cette application sont des images LANDSAT acquises en 1975, 1986 et 2002. Les résultats des différents traitements permettent de déduire les proportions de chaque classe d'états de surface en 1975, 1986 et 2002 (Fig. 3).

Les paramètres de la fonction logistique ont été déterminés à partir des données de recensements généraux de la population (RGP) et des séries de statistiques agricoles sur les bassins étudiés. La Fig. 4.a donne l'évolution de la population sur le bassin à l'aide du modèle démographique. De ce modèle a été déduit l'évolution des surfaces cultivées et des surfaces en végétation naturelle (Fig. 4.b).

Les données de pluie et d'ETP Penman utilisées dans ce travail proviennent d'une part de l'Unité de Recherche en Climatologie de l'Université d'East Anglia (CRU), et, d'autre part, de la base de données SIEREM (Système d'Information Environnementale sur les ressources en Eau et leur Modélisation) de l'UMR HydroSciences Montpellier. Ces sont des données mensuelles spatialisées au demi-degré carré.

Les résultats des simulations (Tableau 2) montrent que, comparé au cas où la WHC reste constante dans le temps, les performances du modèle sont quasiment identiques. En effet, sur l'ensemble des trois bassins testés, les gains de performances en calage sont faibles: +3 points pour Bissiga, +0.7 points pour Yilou et +2.2 points pour Wayen. En dehors de la station de Wayen (+ 5.7 et +9.6 points selon la source de données pluie), aucune amélioration en validation n'est observée sur les autres bassins.

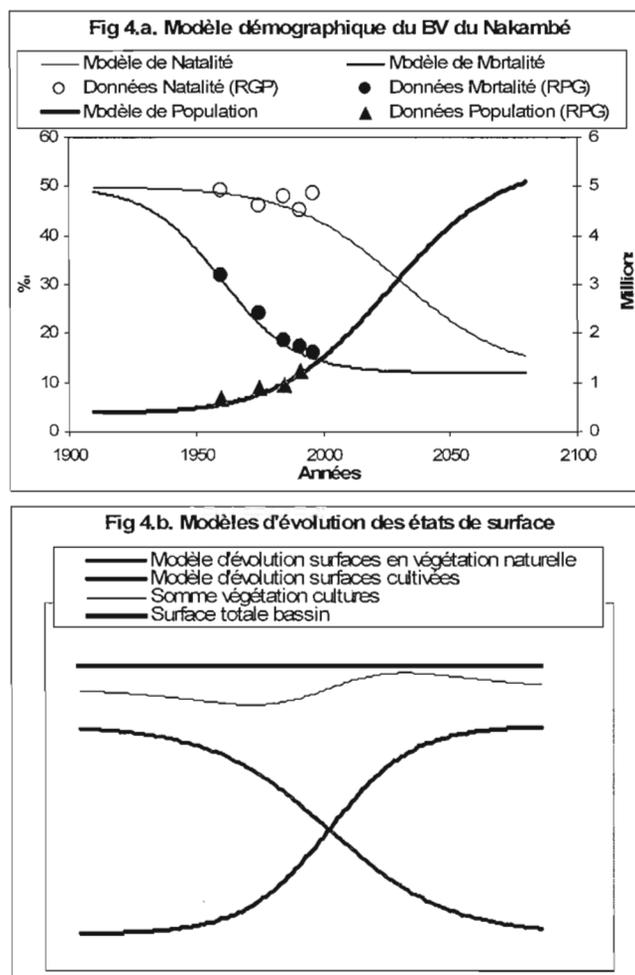


Fig. 4 Modélisation de la dynamique de la population et des états de surfaces sur le bassin versant du Nakambé à Wayen à partir d'une fonction logistique.

Tableau 2 Résultats préliminaires pour trois bassins versants du Nakambé au Burkina Faso.

| Bassins testés | | WHC Fixe | | WHC évolutif | |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | Pluie IRD ETP Penman | Pluie CRU ETP Penman | Pluie IRD ETP Penman | Pluie CRU ETP Penman |
| Bissiga | Calage 1976–1988 | NASH= 54.5 | NASH= 48.6 | NASH= 57.2 | NASH= 51.6 |
| | Validation 1989–1995 | NASH= 63.3 | NASH= 60.5 | NASH= 44.7 | NASH= 41 |
| Yilou | Calage 1973–1979 | NASH= 75.4 | NASH= 75.6 | NASH= 76.1 | NASH= 75.8 |
| | Validation 1980–1982 | NASH= 85.5 | NASH= 83.7 | NASH= 83.8 | NASH= 82.7 |
| Wayen | Calage 1975–1985 | NASH=61.1 | NASH=57.7 | NASH= 63.3 | NASH= 59.9 |
| | Validation 1986–1995 | NASH= 49.6 | NASH= 40 | NASH= 55.3 | NASH= 49.6 |

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ces résultats ne concernent que trois bassins et ne permettent pas d'évaluer la méthodologie qui a été exposée dans ce travail. En dehors des problèmes sur la fiabilité des données, de la non unicité des solutions liée au processus d'optimisation des paramètres, de l'influence de la longueur des périodes de calage et de validation, on peut se poser la question de la sensibilité des modèles à la variable (ou au paramètre) WHC. Des réflexions sont en cours dans le cadre d'une thèse. Toutefois, il semble nécessaire qu'à l'avenir les modèles puissent prendre en compte dans leur conceptualisation une évolution de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIQUES

- Albergel J. & Valentin C. (1991). "Sahéliisation" d'un petit bassin versant: Boulsa-Koghnere au centre du Burkina Faso. In: Dégénération des Paysages en Afrique de l'Ouest (ed. by Richard, J.F.) (Editor)(Dakar, 21-26 novembre 1988). Presse Universitaire de Dakar. 119-133.
- Ambroise B., (1999). La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant: Processus, facteurs, modèles. H.G.A, 200 pp.
- Biro Y. & Galabert I. (1967). L'amélioration des rendements en agriculture par l'aménagement antiérosif et les techniques culturales dans l'Ader Doutchi-Magia Niger. In: Colloque Fertilité des sols tropicaux (ed. by (Tananarive. 1316-1331.
- Casenave A. & Valentin C., (1992). A runoff capability classification system based on surface features criteria in semi-arid areas of west Africa. *Journal of Hydrology*, **130**(1-4): 231-249.
- Conway D. & Jones P. D., (1999). Assessing the impact of future climatic change on the water resource and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina., Climatic Research Unit. University of East Anglia, UK.
- Delmas B., (2004). Dossier "démographie mathématique": Pierre-François Verhulst et la loi logistique de la population. *Mathematics and Social Sciences*, n°167: 51-81.
- Fournier J., Serpantier G., Delhoume J.-P. & Gathelier R., (2000). Rôle des jachères sur les écoulements de surface et l'érosion en zone soudanienne du Burkina: Application à l'aménagement des versants. In: Floret, C. et Pontanier, R. (Editors), La jachère en Afrique tropicale: Rôle, Aménagements, Alternatives, pp. 179-188.
- Horton R. E., (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union*, **14**: 446-460.
- Mahe G., Leduc C., Amani A., Paturel J. E., Girard S., Servat E. & Dezetter A. (2003). Augmentation récente du ruissellement de surface en zone soudano-sahélienne et impacts sur les ressources en eau. In: Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides (ed. by (Montpellier, AISH Pub. 278, 215-222.
- Makhlouf Z., (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat Thesis, Université Paris-Sud, 413 pp.
- Pouyaud B., (1987). Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques, ORSTOM, Montpellier (France).
- Puech C., (1993). Détermination des états de surface par télédétection pour favoriser les écoulements des petits bassins versants. Thèse d'état Thesis, Université Joseph-Fourrier, Grenoble I, 214 pp.
- Roose E. (1989). Gestion conservatoire des eaux et de la fertilité des sols dans les paysages soudano-sahéliens de l'Afrique Occidentale. In: Proceeding of an international workshop on Soil, Crop and Water Management systems for Rainfed Agriculture in Sudan-Sahelian Zone (ed. by Patancheru Ind) (Editor)(Niamey, Niger, 11 - 16 janvier 1987).
- Seguis L., Cappelaere B., Peugeot C., Leduc C. & Milesi G. (2003). Influence de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin versant sahélien. In: Hydrology of mediterranean and semiarids regions (ed. by Servat, E., Najem, W., Leduc, C. et Shakeel, A.) (Montpellier, France, April 1-4 2003). AISH-IAHS Publication. 278, 429-434.
- Yates D. N., (1997). Approches to continental scale runoff for integrated assessments models. *Journal of Hydrology*, **201**: 289-310.

Relations indices de végétation–pluie au Burkina Faso: cas du bassin versant du Nakambé

PIERRE DIELO¹, GIL MAHE²,
JEAN-EMMANUEL PATUREL², ALAIN DEZETTER²,
FRANÇOIS DELCLAUX², ERIC SERVAT² &
FREDERIC OUATTARA³

¹ Institut de Recherche pour le Développement, 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso
bonadiel@yahoo.com

² Hydrosociences Montpellier, case MSE, Université de Montpellier 2,
F-34095 Montpellier Cedex 5, France

³ Directeur de la Météorologie Nationale, 01 BP 576 Ouagadougou, Burkina Faso

Résumé Ce travail s'inscrit dans la problématique de l'utilisation des données issues de la télédétection (NDVI/NOAA-AVHRR) pour le suivi de la variabilité climatique des régions sahéliennes d'Afrique de l'Ouest. Les indices de végétation sont largement utilisés dans les recherches en hydrologie, en climatologie et sur les changements climatiques globaux. Les relations entre les NDVI et les paramètres climatiques ne sont pas encore parfaitement établies et font l'objet de nombreuses études. Celle-ci s'intéresse à la relation entre les NDVI et la pluie au pas de temps décadaire sur le bassin versant du Nakambé au Burkina Faso en climat soudano-sahélien sur la période 1982–1999. Une forte corrélation dans l'évolution annuelle des deux variables a été mise en évidence. L'analyse statistique montre une liaison significative entre le NDVI et le cumul pluviométrique avec des coefficients de détermination supérieurs à 0.80. Ces valeurs vont de 0.91 à 0.96 lorsque les deux variables sont rapportées à l'échelle spatiale du demi-degré carré. On montre également que le NDVI est un bon indicateur pour la détermination des décades de début et de fin de la saison pluvieuse en comparaison avec les méthodes classiques de détermination couramment utilisées dans la zone d'étude.

Mots clés Burkina Faso; indices de végétation; NDVI-AVHRR; pluie; saison des pluies; variabilité climatique

Relationship between rainfall and vegetation indexes in Burkina Faso: a case study of the Nakambé basin

Abstract This work deals with the problem of the use of remote sensing data derived from NOAA/AVHRR observations for monitoring the West African Sahel climatic variability. NDVI is widely used in hydrological and climatological research, and in the study of global climatic changes. The relationships between NDVI and climatic parameters are not well established yet and are the focus of many studies. The relationships between NDVI and rainfall were studied at a 10-day time step in the Nakambe River basin in Burkina Faso in the Sahelo-Sudanian area over the years 1982–1999. Good correlations were found in the annual evolution of these two variables. The statistical analysis shows a significant relationship between NDVI and the sum of the annual rainfall with determination coefficients greater than 0.80. At the spatial scale of $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, the determination coefficient ranges from 0.91 to 0.96. It was also found that the NDVI is a good indicator of the determination of the beginning and the end of the rainy season. It gives reasonably good results in comparison with the other methods commonly used in the study region.

Key words Burkina Faso; vegetation indices; NDVI-AVHRR; rainfall; rainy season; climatic variability

INTRODUCTION

La pluviométrie est le principal facteur limitant de l'écologie des milieux arides et semi-arides. En Afrique de l'Ouest, ces régions se caractérisent par une très grande

variabilité spatiale et temporelle des pluies et connaissent depuis les années 1970 une baisse importante des totaux pluviométriques annuels (Paturel *et al.*, 1998; Taupin *et al.*, 1998; Mahé *et al.*, 1999; Nicholson *et al.*, 1999; Ardoin *et al.*, 2003). La faiblesse des quantités précipitées annuellement et leur mauvaise répartition dans le temps et dans l'espace contribuent considérablement à la fragilisation de l'environnement de ces écosystèmes. Dans ces milieux, l'évolution de la végétation naturelle et les rendements des cultures sont fortement dépendants de la disponibilité en eau au cours de l'année. Le suivi régulier de la pluviométrie est donc indispensable pour la mise en place de dispositifs efficaces de prévision et de gestion des ressources en eau. Cependant, le caractère ponctuel des mesures aux postes pluviométriques, les nombreuses lacunes dans les séries d'observations et la faible densité des réseaux (de 1 à 5 postes pour 10 000 km²) ne permettent pas de caractériser avec précision les régimes pluviométriques ou d'obtenir des estimations fiables de la pluie moyenne sur des surfaces relativement grandes (Taupin, 2003). Une démarche vers la résolution de ces difficultés est le recours aux satellites d'observation de la terre. Ces derniers ne permettent pas une mesure directe la pluie (Guillot, 1995) mais ont l'avantage de pouvoir fournir des données continues dans l'espace, régulières dans le temps et aisément disponibles. Une hypothèse est que l'activité photosynthétique de la végétation pourrait contribuer à estimer les précipitations (Tucker & Choudhury, 1987). Or, les données d'indice de végétation, en particulier les NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), caractérisent bien cette activité au niveau des plantes et représentent de bons indicateurs pour le suivi de l'état du couvert végétal (Tucker & Gatlin, 1984; Justice *et al.*, 1986; Batista *et al.*, 1997; Schmidt & Karnieli, 2000; Maselli & Rembold, 2002; Weiss *et al.*, 2004). Ce type de données pourrait donc aider à l'amélioration de la connaissance des systèmes pluvieux, surtout dans les zones arides et semi-arides où la réponse de la végétation à la pluie est systématique (Scanlon *et al.*, 2002). Cette méthode indirecte d'estimation de la pluie à l'aide des données NDVI nécessite néanmoins de pouvoir expliciter les relations entre les deux paramètres. Ces dernières ne sont pas encore parfaitement établies et ont fait l'objet de nombreuses études (Hielkema *et al.*, 1986; Kerr *et al.*, 1989; Malo & Nicholson, 1989; Eklundh, 1998; Richard & Pocard, 1998; Wang *et al.*, 2001, 2003). Cette étude s'intéresse à la même problématique au pas de temps de la décennie. De plus, elle explore l'adéquation entre l'information à caractère spatial qu'est le NDVI et celle à caractère ponctuel que représente la pluie. Les données d'indice de végétation sont ensuite utilisées pour déterminer les dates de début et de fin de saison pluvieuse dans la zone étudiée.

CADRE D'ETUDE

Le cadre géographique de l'étude est le bassin versant du fleuve Nakambé (Volta Blanche) au Burkina Faso. Sa superficie à sa sortie du Territoire Burkinabé est de 41 407 km² avec une altitude moyenne de 270 m (Fig. 1). Deux types de climats co-existent sur le bassin:

- un climat de type sahélien au nord avec des précipitations annuelles inférieures à 600 mm, réparties de juin à septembre. Les températures moyennes maximales journalières sont de 43°C en avril contre 14°C pour les minimales en janvier.

L'évaporation annuelle sur eau libre y est de 4800 mm.

- du centre au sud du bassin on trouve un climat de type soudano-sahélien avec des précipitations annuelles comprises entre 600 et 900 mm, de mai à septembre. Les températures moyennes maximales journalières sont supérieures à 30°C et les minimales inférieures à 15°C. L'évaporation annuelle est de 2600 mm sur eau libre.

Le couvert végétal dans le nord du bassin du Nakambé est dans un état de dégradation avancé. On observe sur le bassin un fort déséquilibre entre la capacité de charge des écosystèmes naturels et leur intensité d'utilisation (Hien *et al.*, 1996).

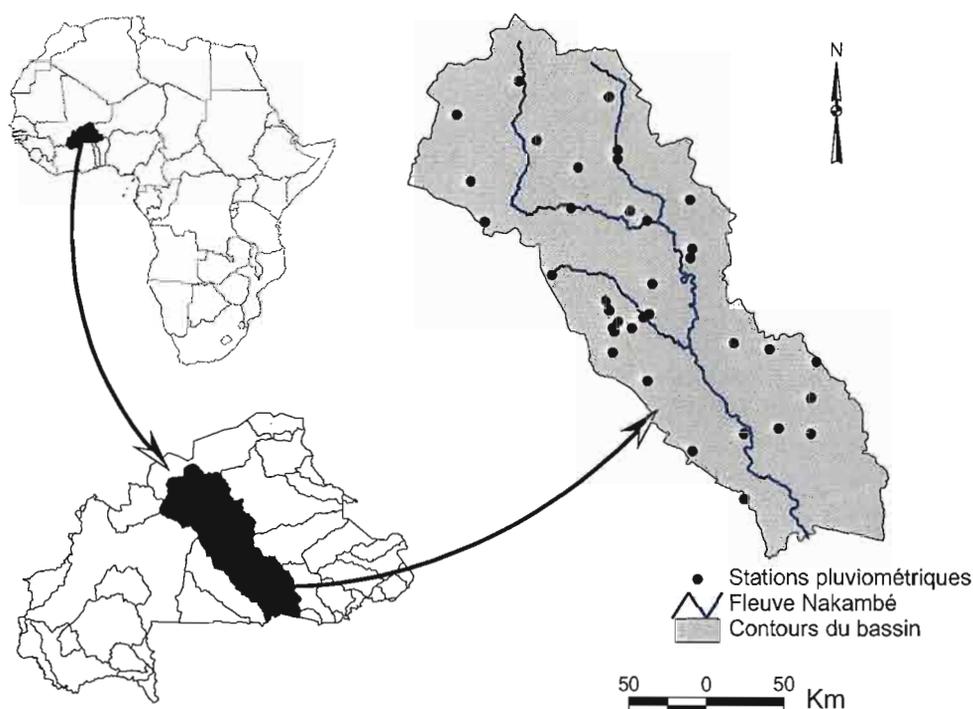


Fig. 1 Bassin versant du Nakambé.

LES DONNEES

Deux types de données ont été utilisés: les données pluie et les données NDVI. Les données pluie sont issues des 36 stations pluviométriques sélectionnées sur le bassin. Elles proviennent de la banque de données de la Météorologie Nationale du Burkina Faso et couvrent la période 1982–1999.

Les données NDVI, sont fournies par la NOAA et sont disponibles sur son site (<http://www.ngdc.noaa.gov>). Les données sont transmises en temps réel par le satellite NOAA au format HRPT (*High Resolution Picture Transmission*) via le capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*). La chaîne de traitement pour produire les données NDVI est réalisée par l'outil Pathfinder développé par la NOAA et l'IGBP (*International Geosphere–Biosphere Programme*). Les indices de végétation sont calculés à partir des données GAC (*Global Area Coverage*) obtenues par ré-

échantillonnage des données transmises en temps réel et en pleine résolution par le satellite (taille du pixel au nadir: 1.1 km). Seulement une ligne de scan sur trois est utilisée et sur cette ligne les quatre premiers pixels de chaque groupe de cinq sont pris en compte pour le calcul d'une moyenne qui est ensuite attribuée à l'ensemble des 15 pixels. On recrée ainsi une image d'une résolution d'environ 4 km dont une partie de l'information (11 pixels sur 15) a disparu. Ces données GAC subissent par la suite un nouveau ré-échantillonnage dit temporel qui consiste à retenir la valeur maximale du NDVI pour chaque décade et sur chaque ensemble de quatre pixels GAC: c'est la technique du *Maximum Value Composite* (MVC). Un pixel NDVI correspond donc à une surface d'environ 64 km², à laquelle on affecte une valeur mesurée réellement sur une surface de 4 km² environ!

METHODOLOGIE

Organisation des données

Le problème de l'adéquation entre une information à caractère très localisé (la pluviométrie mesurée en un point) et une autre à caractère spatialisé (le NDVI mesuré sur une surface unitaire de 8 × 8 km²) nous a amenés à aborder le problème de deux façons différentes:

- (a) Nous avons considéré le fait que l'information pluviométrique n'a un caractère représentatif qu'autour du pluviomètre. Ainsi, des "aires d'influence" régulières carrées, de différentes dimensions—8 × 8 km², 16 × 16 km² et 24 × 24 km²—ont été définies autour de chaque station pluviométrique du bassin. A ces aires, sont attribuées, pour chaque décade, trois valeurs de NDVI: la valeur minimale, moyenne et maximale de l'ensemble des pixels qui y sont contenus totalement ou partiellement. Les pixels partiellement contenus dans une maille sont considérés comme faisant partie de la maille.
- (b) Le bassin a ensuite été découpé en mailles régulières de 0.5 degré carré, correspondant approximativement à une surface de 50 × 50 km² (Fig. 2). La pluie a été interpolée par krigeage sur chacune des mailles. De la même manière que précédemment, nous avons attribué à ces mailles les valeurs minimale, moyenne et maximale des pixels de NDVI qui y sont contenus totalement ou partiellement.

Des séries concomitantes de pluie et d'indice NDVI au pas de temps décadaire ont ainsi été réalisées.

Variations temporelles du NDVI et de la pluie

Une méthode graphique a été utilisée pour étudier les variations temporelles des indices de végétation et de la pluie sur le bassin. Pour chaque année de la série de données, nous reportons sur un même graphique, en abscisse les décades, en ordonnée les valeurs de pluie décadaire (ou cumulée), et en ordonnée secondaire les valeurs de NDVI (valeurs minimale, moyenne et maximale). Une telle représentation permet une étude comparative de l'évolution des deux paramètres aux échelles annuelle et inter-annuelle.

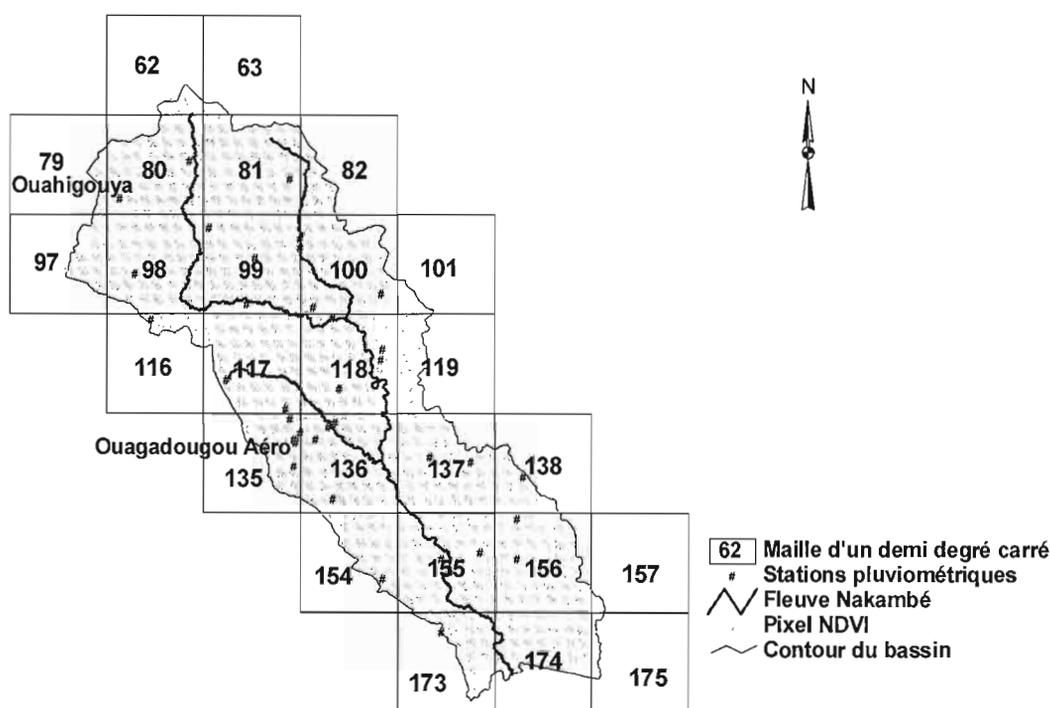


Fig. 2 Découpage du bassin du Nakambé en mailles d'un demi-degré carré et numérotage des mailles.

Corrélation statistique entre le NDVI et la pluie

Seules les données pluie et NDVI des décades 12 à 30 (de mai à octobre) ont été prises en compte. Ce choix se justifie par le fait qu'avant la décade 12 de l'année, les rares pluies enregistrées sur la zone d'étude ne sont pas véritablement celles de la saison pluvieuse. Elles sont communément appelées "pluies des mangues" et ne permettent pas au couvert végétal de reverdir. A titre indicatif, sur la période d'étude, la moyenne du cumul pluviométrique des décades 1 à 11 est de 13 mm dans la partie nord du bassin (soit environ 1 mm par décade) et 32 mm au sud (soit 3 mm par décade).

Après la décade 30, il n'y a pratiquement plus de pluie sur le bassin (on enregistre en moyenne une hauteur totale de moins de 1 mm sur le bassin).

Cependant, le calcul des cumuls pluviométriques pour chaque année commence à partir de la décade 12 à laquelle on affecte le total pluviométrique enregistré depuis le début de l'année. On respecte ainsi la valeur du total annuel de pluie dans les calculs statistiques.

Les données des 36 stations pluviométriques du bassin ont été réparties en deux groupes selon leur appartenance à l'une des deux bandes climatiques de la région étudiée (13 stations en zone sahélienne et 23 en zone soudano-sahélienne). Les corrélations statistiques suivantes ont été étudiées séparément dans chaque région climatique:

- (a) corrélation entre les NDVI, mesurés sur les différentes aires d'influence des stations pluviométriques, et la pluie cumulée en ces stations pour une décade donnée; et

- (b) corrélation entre les NDVI, moyennés par demi-degré carré, et la pluie spatialisée à la même résolution.

Détermination des dates de début et de fin de saison pluvieuse à l'aide des données d'indice de végétation

Pour tenter de caractériser la saison des pluies à l'aide des données d'indices de végétation, nous faisons l'hypothèse que l'activité chlorophyllienne des plantes s'accroît pendant toute la durée de la saison, ce qui se traduit par une augmentation des valeurs d'indice de végétation. On a un maximum d'activité au cœur de la saison pluvieuse, puis, les valeurs d'indice de végétation diminuent progressivement dès la fin de l'hivernage, et sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que la saison sèche s'installe. Ainsi, pour chaque station pluviométrique du bassin, on relève parallèlement sur les courbes d'évolution du NDVI et de la pluie cumulée:

- (a) la valeur d'indice de végétation à partir de laquelle on a une croissance continue du NDVI sur au moins trois décades successives ($NDVI_{seuil}$), la décade et le cumul de pluie qui correspondent à ce seuil (la décade correspondante au $NDVI_{seuil}$ est assimilée à la décade de début de la saison pluvieuse); et
- (b) le maximum de NDVI atteint ($NDVI_{max}$), la décade et le cumul pluviométrique correspondants (la décade correspondante au $NDVI_{max}$ est assimilée à la décade de fin de la saison pluvieuse).

Les décades du $NDVI_{seuil}$ et du $NDVI_{max}$ sont comparées aux décades de démarrage et de fin de la saison des pluies obtenues à partir de trois méthodes de détermination couramment utilisées au Sahel à savoir: la méthode graphique (Cres, 2003); les méthodes INERA-ICRISAT et ATLAS citées par Diallo (2001).

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Similitude d'évolution entre le NDVI et la pluie

L'examen général des courbes des Figs 3–6 montre qu'au cours de l'année, l'évolution du NDVI suit une courbe en cloche avec une variabilité plus ou moins marquée selon les années. Cette variabilité peut être liée:

- aux facteurs météorologiques et agropédologiques du milieu qui sont déterminants dans le cycle de croissance des plantes et donc de la variation de l'intensité de l'activité chlorophyllienne mesurée par le NDVI;
- au rythme et à la distribution des pluies au cours de l'année. En effet, en zone sahélienne et soudano-sahélienne, la pluie est le principal facteur limitant pour les plantes. La végétation reverdit systématiquement à chaque regain d'activité de la mousson avec des pluies à fort pouvoir d'humectation du sol. Inversement, l'état de la végétation se dégrade rapidement pendant les périodes sans pluies. Ce sont ces variations dans le régime des pluies qui sont reproduites par le NDVI. Plus le régime est irrégulier au cours de l'année, plus l'évolution des indices de végétation est irrégulière. C'est le cas des années 1983, 1987, 1991 et 1995 comparées à l'année 1996 (Figs 3 et 4).

NDVI-pluie décadaire station de Ouahigouya zone carrée de 24 km x 24 km période 1982-1999

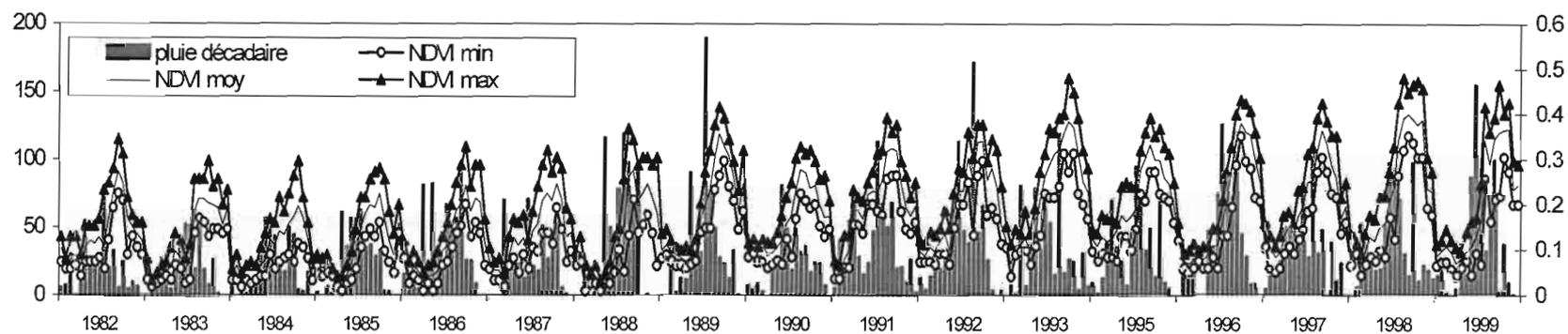


Fig. 3 Evolution interannuelle du NDVI et de la pluie décadaire pour la station de Ouahigouya.

NDVI-pluie cumulée Station de Ouahigouya Zone carrée de 24 km x 24 km période 1982-1999

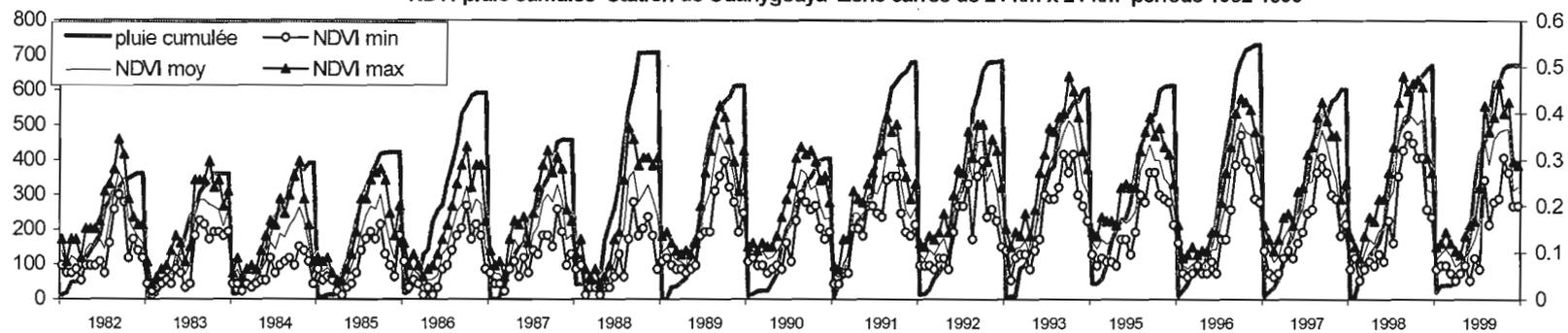


Fig. 4 Evolution interannuelle du NDVI et de la pluie cumulée pour la station de Ouahigouya.

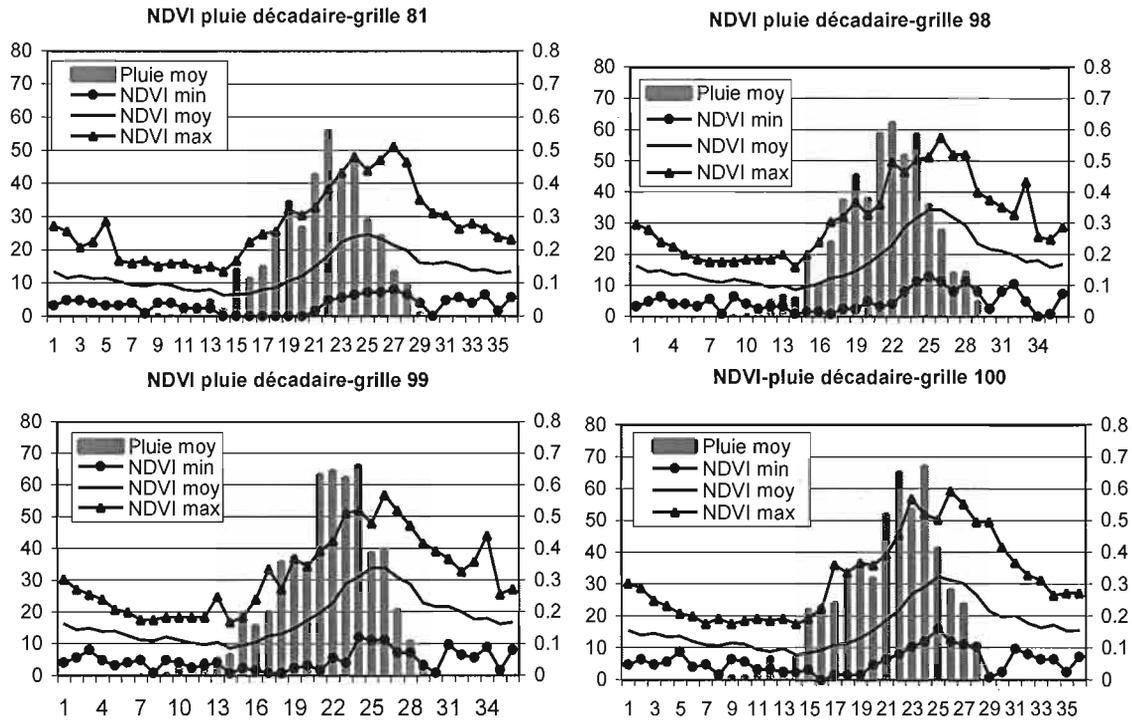


Fig. 5 Evolution moyenne inter-annuelle du NDVI et de la pluie spatialisée sur quatre mailles du secteur sahélien du bassin sur la période 1982-1999 (voir Fig. 2 pour les grilles).

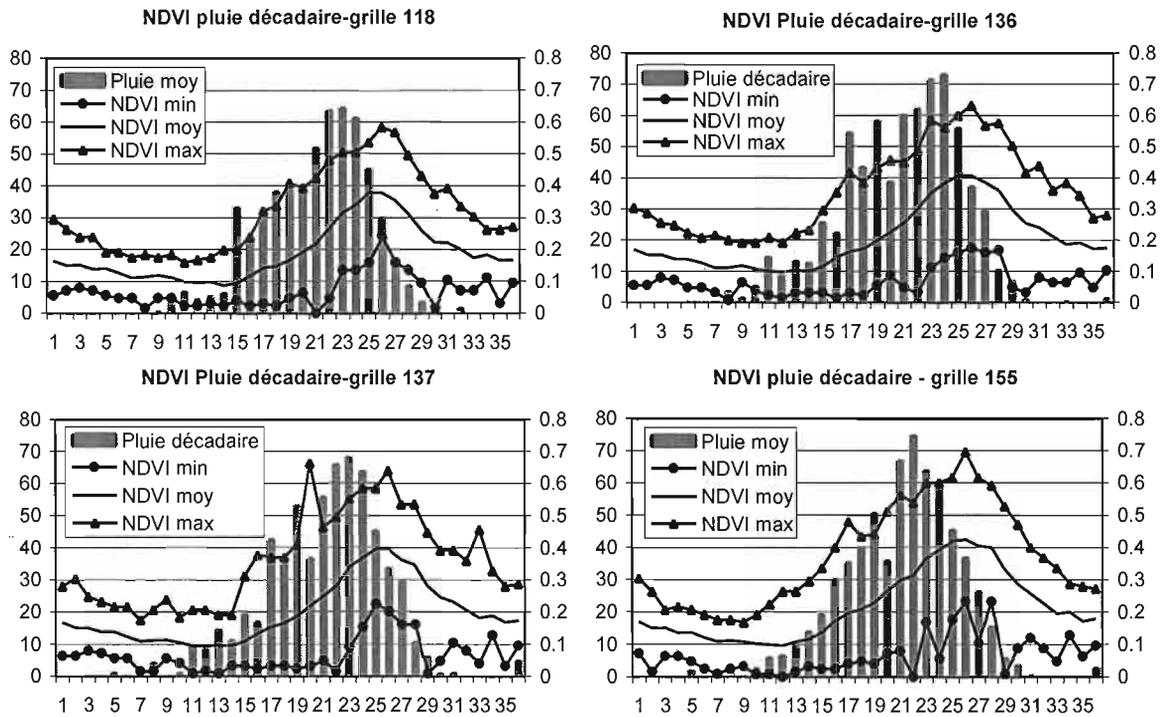


Fig. 6 Evolution moyenne inter-annuelle du NDVI et de la pluie spatialisée sur quatre mailles du secteur soudano-sahélien du bassin sur la période 1982-1999 (voir Fig. 2 pour les grilles).

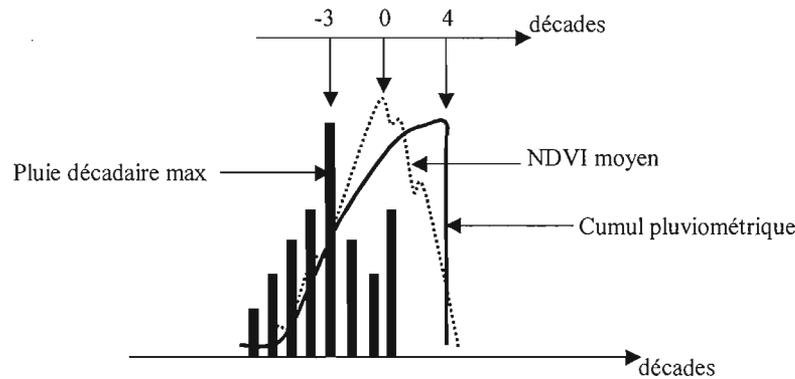


Fig. 7 Evolution comparée du NDVI et de la pluie à l'échelle annuelle.

On note également que les NDVI moyens ne dépassent jamais 0.5, traduisant la faible densité de la végétation sur le bassin.

L'étude comparative de l'évolution du NDVI et de la pluie montre une similitude marquée dans l'évolution annuelle des deux paramètres. Le NDVI moyen atteint son pic trois décades au plus après la décade du maximum de pluie décadaire et quatre décades au plus avant le cumul maximum de pluie (Fig. 7). Le premier décalage (trois décades) peut s'expliquer par le fait qu'après la décade du maximum de pluie décadaire, la Réserve Utile (RU) du sol est maximale ce qui assure des conditions d'humidité optimales pour les végétaux, d'où une intensification des phénomènes biochimiques d'assimilation, synonymes d'une forte activité chlorophyllienne. Cette activité de la chlorophylle des plantes est soutenue par les pluies enregistrées au cours des décades suivantes. Ainsi, au bout de quelques semaines l'indice foliaire du couvert végétal (m^2 de feuille par m^2 de sol) augmente considérablement et atteint son maximum. Cette biomasse verte qui s'est complètement établie durant cette période participe à la réponse du NDVI qui atteint un maximum.

Les décades qui suivent celle du maximum de NDVI sont en général moins pluvieuses et la fréquence des événements pluvieux est faible. L'activité chlorophyllienne baisse et le NDVI aussi. On tend alors vers la fin de la saison des pluies. Cette période s'étend sur quatre décades au maximum.

L'étude de la liaison statistique entre le NDVI et la pluie cumulée révèle que les deux paramètres s'ajustent mieux avec un polynôme de degré 3 qu'avec un polynôme de degré 1 (ajustement linéaire). L'ajustement par un polynôme de degré 3 des nuages de points formés par les deux paramètres montre les trois phases de l'évolution annuelle du NDVI en fonction de la pluie. Une phase de démarrage, caractérisée par une croissance lente des indices de végétation, correspond à la période d'installation de la saison humide. Une seconde phase de croissance survient après l'installation de la saison pluvieuse. Elle correspond à la période de forte activité photosynthétique des végétaux. Au cours de cette phase, la croissance du NDVI est rapide et linéaire si ne surviennent pas de longues périodes sèches au cœur de la saison des pluies. La troisième phase est celle du maximum-déclin où le NDVI atteint un maximum d'évolution puis décroît rapidement, marquant ainsi la fin de la saison pluvieuse. Cette évolution en trois phases est mise en évidence aux stations synoptiques de Ouahigouya (représentative de la zone sahélienne du bassin avec $R^2 = 0.94$; Fig. 8(a)) et de

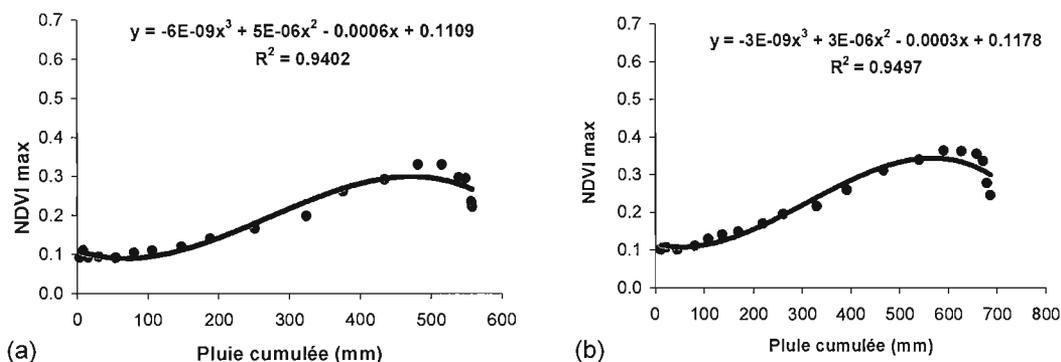


Fig. 8 NDVI–pluie cumulée: ajustement polynomial de degré 3. Cas des stations synoptique (a) de Ouahigouya, et (b) de Ouagadougou aéroport.

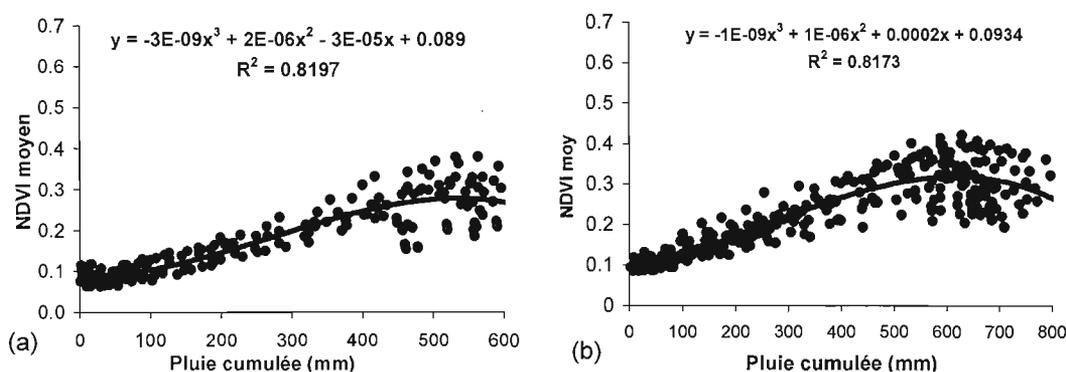


Fig. 9 NDVI–pluie cumulée: ajustement polynomial de degré 3 pour chaque zone climatique du bassin. (a) zone sahélienne, et (b) zone soudano-sahélienne.

Ouagadougou aéroport (représentative des conditions climatiques de la zone soudano-sahélienne avec $R^2 = 0.95$; Fig. 8(b)). La Fig. 9 donne une vue d'ensemble de l'évolution dans les deux bandes climatiques du bassin.

Liaison statistique entre le NDVI et la pluie mesurée aux postes pluviométriques

Le coefficient de détermination entre les indices de végétation et le cumul pluviométrique est en moyenne de 0.82 sur l'ensemble des deux zones étudiées (Tableau 1). Il n'y a pas de discrimination dans les valeurs de R^2 en fonction de la zone climatique considérée.

De même, les valeurs des coefficients ne varient pas de façon significative quand on augmente l'aire d'influence autour des pluviomètres. Ce dernier résultat traduit le fait que plus d'information NDVI n'améliore pas la relation NDVI–pluie. En effet, lorsque la surface définie autour des pluviomètres passe de 8 km × 8 km à 16 km × 16 km, puis à 24 km × 24 km, de plus en plus de pixels sont pris en compte dans la relation impliquant un apport plus important en information NDVI sans amélioration des coefficients de détermination. Deux hypothèses peuvent être émises:

Tableau 1 Coefficients de détermination entre NDVI mesurés dans les aires d'influence du poste pluviométrique et la pluie cumulée à ce poste.

| | | Aire d'influence autour des pluviomètres | | |
|-------------------------|--------------------------|--|----------------|----------------|
| | | 8 km × 8 km | 16 km × 16 km | 24 km × 24 km |
| Zone sahélienne | NDVI moyen-pluie cumulée | $R^2_p = 0.82$ | $R^2_p = 0.82$ | $R^2_p = 0.82$ |
| | | $R^2_l = 0.61$ | $R^2_l = 0.61$ | $R^2_l = 0.62$ |
| | NDVI max-pluie cumulée | $R^2_p = 0.81$ | $R^2_p = 0.82$ | $R^2_p = 0.82$ |
| | | $R^2_l = 0.61$ | $R^2_l = 0.61$ | $R^2_l = 0.61$ |
| Zone soudano-sahélienne | NDVI moyen-pluie cumulée | $R^2_p = 0.82$ | $R^2_p = 0.82$ | $R^2_p = 0.83$ |
| | | $R^2_l = 0.62$ | $R^2_l = 0.62$ | $R^2_l = 0.60$ |
| | NDVI max-pluie cumulée | $R^2_p = 0.84$ | $R^2_p = 0.83$ | $R^2_p = 0.82$ |
| | | $R^2_l = 0.60$ | $R^2_l = 0.62$ | $R^2_l = 0.60$ |

R^2_p = coefficient de détermination polynomial.

R^2_l = coefficient de détermination linéaire.

Premièrement, on considère que lorsque la saison pluvieuse est complètement installée, la taille des événements pluvieux est suffisamment grande et couvre entièrement les surfaces définies autour des pluviomètres. De ce fait, l'état du couvert végétal est quasiment le même sur toutes les surfaces, ce qui donne une réponse du NDVI sensiblement identique sur les différentes aires définies autour des pluviomètres.

La seconde hypothèse est de considérer que de façon intrinsèque, le NDVI ne peut expliquer qu'une certaine part de l'information pluviométrique, ce qui traduirait un phénomène de saturation du NDVI vis-à-vis de la pluie.

Liaison statistique entre le NDVI et la pluie spatialisée cumulée

Les valeurs de pluie considérées ici sont celles des pluies décadaires spatialisées au demi-degré carré. Comparativement aux résultats obtenus précédemment, on note une nette amélioration des différents coefficients de détermination pour chaque demi-degré carré (Fig. 10). Les coefficients de détermination sont compris entre 0.91 et 0.96 avec une moyenne de 0.93 pour l'ensemble du bassin. Les valeurs de R^2 sont sensiblement les mêmes quelle que soit la zone climatique considérée.

L'amélioration des résultats peut être liée au fait que pour chaque demi-degré carré, la pluie est définie à l'aide de l'information recueillie sur plusieurs postes (interpolation par krigeage). Cette contribution des différents pluviomètres apporte probablement une certaine amélioration dans l'estimation de la pluie. De même, sur le même demi-degré carré, l'indice de végétation est calculé avec un nombre plus important de pixels, ce qui affine l'information fournie par le NDVI sur le même demi-degré carré. On crée ainsi une certaine adéquation entre les deux sources d'informations qui améliore la relation entre le NDVI et la pluie.

Détermination de la décade de démarrage de la saison des pluies à l'aide des NDVI

Dans la zone sahélienne du bassin, le NDVI, le modèle graphique et le modèle ATLAS situent en moyenne le démarrage de la saison hivernale, à une décade près, en début

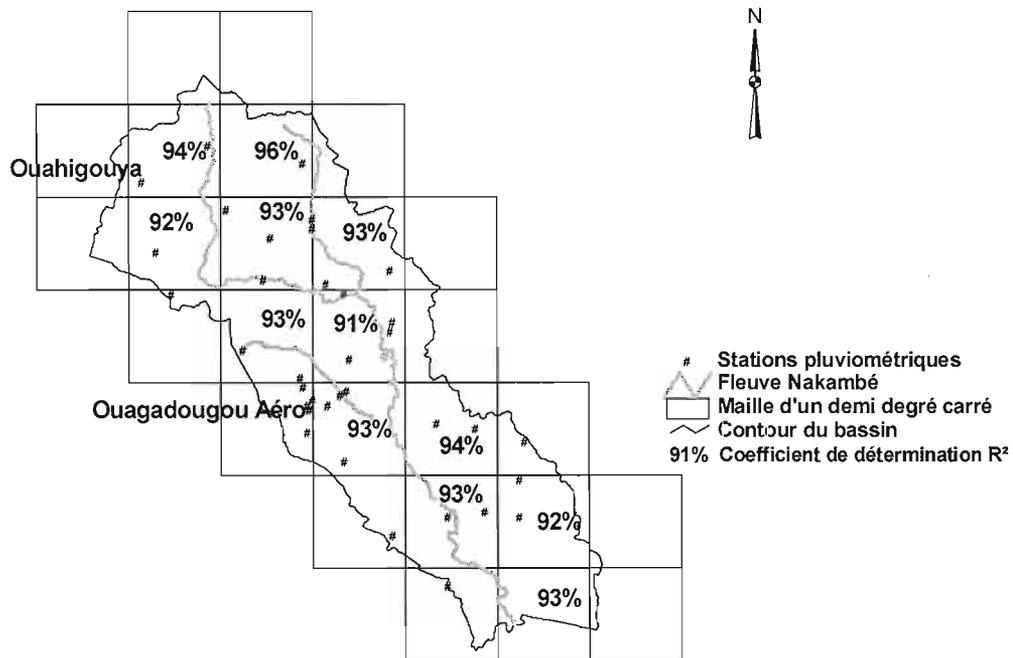


Fig. 10 Coefficients de détermination par maille d'un demi-degré carré pour les valeurs spatialisées de NDVI et de pluie.

Tableau 2 Décades moyennes de début de la saison des pluies selon différents modèles.

| | Nombre de stations | Modèle NDVI | Modèle graphique | Modèle INERA-ICRISAT 1994 | Modèle ATLAS (Morel, 1992) |
|-------------------------|--------------------|--|---|--|----------------------------|
| Zone sahélienne | 13 | $m = 16$ $\sigma = 2$ $C_v = 12.5\%$ | $m = 15$ $\sigma = 1$ $C_v = 6.7\%$ | $m = 18$ $\sigma = 3$ $C_v = 16.7\%$ | 16–17 |
| Zone soudano-sahélienne | 23 | $m = 15$ $\sigma = 2$ $C_v = 13.3\%$ | $m = 15$ $\sigma = 1$ $C_v = 6.7\%$ | $m = 17$ $\sigma = 3$ $C_v = 17.6\%$ | 15–16 |

m = décade moyenne; σ = écart type; C_v = coefficient de variation.

juin, et le modèle INERA-ICRISAT en fin juin (Tableau 2). Ces résultats, bien que très proches, ne doivent pas occulter les fortes dispersions observées autour des décades moyennes que donne individuellement chaque méthode (6.7% pour le modèle graphique, 12.5% pour le NDVI, 16.7% pour le modèle INERA-ICRISAT). Dans la zone soudano-sahélienne du bassin, hormis le modèle INERA-ICRISAT qui situe le démarrage de la saison des pluies en début juin, les trois autres méthodes donnent fin mai. Les dispersions autour de ces moyennes sont également fortes (modèle graphique: 6.7%, NDVI: 13.3%, modèle INERA-ICRISAT: 17.6%).

Les écarts entre les résultats sont à lier au fait que chaque méthode de détermination a ses propres critères pour la définition de la décade de démarrage (ou de fin) de la saison des pluies. La méthode NDVI par exemple, intègre en plus du paramètre pluie, d'autres facteurs comme la température, l'humidité, le vent, le type de sol, l'hydrographie, la géologie, la végétation, l'occupation des sols, les aménagements... Le modèle INERA-ICRISAT est basé sur des observations faites sur

la croissance du mil au centre sahélien de l'ICRISAT. Le mil et la végétation naturelle n'ont pas le même cycle de croissance dans le temps.

Quant aux fortes dispersions autour des décades moyennes, elles sont en accord avec le fait que l'installation de la saison des pluies dans la région est progressive et peut durer deux à trois mois selon les années.

Détermination de la décade de fin de saison pluvieuse à l'aide des NDVI

On observe avec le NDVI, que la fin de la saison des pluies dans la zone sahélienne du bassin survient en moyenne en mi-septembre (décade 26) avec une dispersion de 7.7% autour de cette valeur. Les trois autres méthodes de détermination la situent en fin septembre–début octobre (décades 27–28) avec des dispersions de 3.6% pour le modèle graphique, 7.1% pour le modèle INERA-ICRISAT (Tableau 3). Dans la zone soudano-sahélienne, les décades 28 et 29 marquent la fin de la saison des pluies pour les modèles NDVI, graphique et INERA-ICRISAT avec des dispersions de 7.1, 3.4 et 7.1% respectivement. Enfin, avec le modèle ATLAS, la saison des pluies prend fin entre fin octobre et début novembre (décades 30–31).

Contrairement aux résultats obtenus précédemment sur le début de la saison des pluies, les dispersions autour des décades moyennes de fin de saison pluvieuse sont relativement faibles, du fait que sur l'ensemble de la zone d'étude le passage de la saison des pluies à la saison sèche est rapide et dure généralement de 15 jours à un mois.

Tableau 3 Décades moyennes de fin de la saison des pluies selon différents modèles.

| | Nombre de stations | Modèle NDVI | Modèle graphique | Modèle INERA-ICRISAT 1994 | Modèle ATLAS (Morel, 1992) |
|-------------------------|--------------------|---|---|---|----------------------------|
| Zone sahélienne | 13 | $m = 26$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.7\%$ | $m = 28$ $\sigma = 1$ $C_v = 3.6\%$ | $m = 28$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.1\%$ | 26–28 |
| Zone soudano-sahélienne | 23 | $m = 28$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.1\%$ | $m = 29$ $\sigma = 1$ $C_v = 3.4\%$ | $m = 28$ $\sigma = 2$ $C_v = 7.1\%$ | 29–31 |

m = décade moyenne; σ = écart type; C_v = coefficient de variation.

CONCLUSION

Une similitude marquée dans l'évolution annuelle du NDVI et de la pluie a bien été mise en évidence dans cette étude. Le NDVI s'est révélé être corrélé au cumul pluviométrique avec des coefficients de détermination compris entre 0.81 et 0.84. On obtient un meilleur ajustement lorsque la pluie et le NDVI sont spatialisés au demi-degré carré ($0.91 \leq R^2 \leq 0.96$), ce qui traduit une meilleure adéquation des deux paramètres lorsqu'ils sont rapportés à la même échelle spatiale. L'étude a montré que le NDVI est un bon indicateur de début et de fin de saison des pluies. Les résultats obtenus à l'aide des données d'indices de végétation sont en accord avec ceux obtenus par les méthodes classiques de détermination des décades de début et de fin de saison pluvieuse dans la zone étudiée.

Il convient cependant de noter que les données NDVI utilisées dans cette étude sont des données GAC sur lesquelles la technique du *Maximum Value Composite* (MVC) a été appliquée, ce qui rapporte les valeurs de NDVI à des surfaces de 8 km × 8 km. Cette résolution ne permet pas de prendre en compte certaines caractéristiques locales du milieu étudié qui pourraient être déterminantes dans la réponse du NDVI (Foody, 2003). Par ailleurs, l'activité photosynthétique des végétaux ne dépend pas uniquement de la pluie. D'autres paramètres climatiques comme la température, le vent et l'humidité ou géographiques comme le sol, l'hydrographie, la géologie et les activités humaines interviennent dans la réponse du NDVI (Farrar *et al.*, 1994). La prise en compte de ces variables pourrait améliorer les résultats obtenus (Cihlar *et al.*, 1991; Narasimha Rao *et al.*, 1993; Nicholson & Farrar, 1994; Kumar *et al.*, 2002; Foody, 2003).

Les résultats de cette étude ouvrent la voie à des perspectives d'utilisation des données de pluie mensuelles obtenues à partir des NDVI sur le bassin versant du Nakambé pour la modélisation hydrologique mensuelle au pas d'espace du demi-degré carré.

Remerciements Nous remercions le SCAC (Service de Coopération et d'Action Culturelle) de l'ambassade de France à Ouagadougou, l'UNESCO dans le cadre du programme Friend-AOC, le laboratoire Hydrosociétés de Montpellier (programme VAHYNE) pour le soutien financier qui a permis la réalisation de cette étude. Nos remerciements vont également à la Direction de la Météorologie Nationale du Burkina Faso pour les données pluie dont nous avons bénéficié pour les besoins de ce travail.

REFERENCES

- Ardoin, S., Lubès-Niel, H., Servat, E., Dezetter, A., Boyer, J. F., Mahé, G. & Paturel, J. E. (2003) Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest: caractérisation de la situation de la décennie 90. In: *Hydrology in the Mediterranean and Semiarid Regions* (ed. by E. Servat, W. Najem, C. Leduc & S. Ahmed) (Proc. Montpellier Conf., April 2003), 223–228. IAHS Publ. 278, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Batista, G. T., Shimabukuro, Y. E. & Lawrence, W. T. (1997) The long-term monitoring of vegetation cover in the Amazonian region of northern Brazil using NOAA-AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* **18**(15), 3195–3210.
- Cihlar, J., St-Laurent, L. & Dyer, J. A. (1991) Relationship between the Normalized Difference Vegetation Index and ecological variables. *Int. J. Remote Sens.* **35**, 279–298.
- Cres, A. (2003) Une méthode non paramétrique de détermination des dates de début et de fin de saison des pluies. Application à l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Note interne IRD.
- Diallo, M. A. (2001) Paramètres agrométéorologiques de la saison agricole pluvieuse, Centre Régional AGRHYMET, Programme Majeur Information Alerte Précoce et Prévision des Productions Agricoles (AP3A).
- Eklundh, L. (1998) Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in east Africa at 10-day and monthly time scale. *Int. J. Remote Sens.* **19**, 563–568.
- Farrar, T. J., Nicholson, S. E. & Lare, A. R. (1994) The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sens. Environ.* **50**(2), 121–133.
- Foody, G. M. (2003) Geographical weighting as a further refinement to regression modelling: an example focused on the NDVI–rainfall relationship. *Remote Sens. Environ.* **88**(3), 283–293.
- Guillot, B. (1995) Satellite et précipitations. Contraintes techniques et physiques, analyse de quelques méthodes, problèmes de recherche et de validation. *Veille Clim. Satell.* **55**, 27–58.
- Hielkema, J. U., Price, S. D. & Astel, W. L. (1986) Rainfall and vegetation monitoring in the Savannah Zone of Democratic Republic of Sudan using the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. *Int. J. Remote Sens.* **7**(11), 1499–1513.
- Hien, F., Compaore, J. A. & Coulibaly-Some, O. (1996) La dynamique de la dégradation des sols dans le bassin du Nakambé: une étude diachronique dans le secteur des forêts classées de Bissiga-Nakambé au Burkina Faso. In: *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et Systèmes d'Informations Géographiques* (ed. par R. Escadafal, M. A. Mulders & L. Thiombiano) (Symp. Int. AISS), **9**, 523–530.
- Justice, C. O., Holben, B. N. & Gwynne, M. D. (1986) Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* **7**(11), 1453–1474.

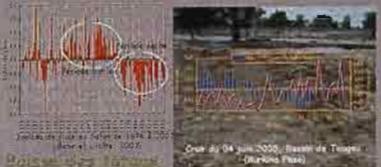
- Kerr, Y. H., Imbernon, J., Dedieu, G., Hauteceur, O., Lagouarde, J. P. & Seguin, B. (1989) NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *Int. J. Remote Sens.* **10**(4 & 5), 847–854.
- Kumar, L., Rietkerk, M., Van Langevelde, F., Van De Koppel, J., Van Andel, J., Hearne, J., De Ridder, N., Stroosnijder, L., Skidmore, A. K. & Prins, H. H. T. (2002) Relationship between vegetation growth rates at the onset of the wet season and soil type in the Sahel of Burkina Faso: implications for resource utilisation at large scales. *Ecol. Modelling* **149**(1–2), 143–152.
- Mahé, G., L'Hôte, Y., Olivry, J. C. & Wotling, G. (1999) Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa: 1951–1989. *Hydrol. Sci. J.* **46**(2), 211–226.
- Malo, A. R. & Nicholson, S. E. (1989) A study of rainfall and vegetation dynamics in the African Sahel using NDVI. *J. Arid Environ.* **19**, 1–24.
- Maselli, F. & Rembold, F. (2002) Integration of LAC and GAC NDVI data to improve vegetation monitoring in semi-arid environments. *Int. J. Remote Sens.* **23**(12), 2475–2488.
- Morel, R. (1992) Atlas agrométéorologique des pays de la zone du CILSS. Programme AGHYMET. Imprimerie Ecole Issa Béri, Niamey.
- Narasimha Rao, P. V., Venkataratnam, L., Krishna Rao, P. V., Ramana, K. V. & Singarao, M. N. (1993) Relation between root zone soil moisture and normalized difference vegetation index. *Int. J. Remote Sens.* **14**(3), 441–449.
- Nicholson, S. E. & Farrar, T. J. (1994) The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sens. Environ.* **50**(2), 107–120.
- Nicholson, S. E., Some, B. & Kone, B. (1999) An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. *J. Climate* **13**(14), 2628–2640.
- Paturel, J. E., Servat, E. & Delattre, M. O. (1998) Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrol. Sci. J.* **43**(6), 937–946.
- Richard, Y. & Pocard, I. (1998) A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *Int. J. Remote Sens.* **19**(15), 2907–2920.
- Scanlon, T. M., Albertson, J. D., Caylor, K. K. & Williams, C. A. (2002) Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savannah ecosystem. *Remote Sensing of Environment*. **82**(2/3), 376–388.
- Schmidt, H. & Karnieli, A. (2000) Remote sensing of the seasonal variability of vegetation in semi-arid environment. *J. Arid Environ.* **45**(1), 43–59.
- Taupin, J. D. (2003) Précision de l'estimation des précipitations au Sahel selon la densité du réseau d'observation pluviométrique. *C. R. Geosci.* **335**, 215–225.
- Taupin, J. D., Amani, A. & Lebel, T. (1998) Variabilité spatiale des pluies au Sahel: Une question d'échelles. 1. Approche expérimentale. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (ed. by E. Servat, D. Hughes, J. M. Fritsch & M. Hulme) (Proc. Abidjan Conf., Côte d'Ivoire, novembre 1998), 143–151. IAHS Publ. 252, IAHS Press, Wallingford, UK.
- Tucker, C. J. & Choudhury, B. J. (1987) Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sens. Environ.* **23**, 243–251.
- Tucker, C. J. & Gatlin, J. A. (1984) Monitoring vegetation in the Nile Delta with NOAA-6 and NOAA-7 AVHRR Imagery. *Photogramm. Engng Remote Sens.* **50**(1), 53–61.
- Wang, J., Price, K. P. & Rich, P. M. (2001) Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in central great plains. *Int. J. Remote Sens.* **22**(18), 3827–3844.
- Wang, J., Rich, P. M. & Price, K. P. (2003) Temporal response of NDVI to precipitation and temperature in central Great Plains, USA. *Int. J. Remote Sens.* **24**(11), 2345–2364.
- Weiss, J. L., Gutzler, D. S., Coonrod, J. E. A. & Dahm, C. N. (2004) Long-term vegetation monitoring with NDVI in a diverse semi-arid setting, central New Mexico, USA. *J. Arid Environ.* **58**(2), 249–272.

Reçu le 23 juillet 2003; accepté le 7 décembre 2004

Pierre DIEILLO: 2ie - pierre.diello@2ie-edu.org
 Jean Emmanuel PATUREL, Gil MAHE, Eric SERVAT: UMR 5569 HydroSciences Montpellier

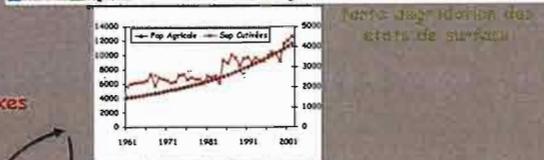
Le Sahel :

un contexte climatique ...



Précipitations pluviométriques
 Forte diminution des précipitations depuis 1970

un milieu qui évolue ...



Forte dégradation des états de surface
 augmentation des surfaces cultivées et forte pression démographique

des interactions multiples et complexes

Des adaptations ...

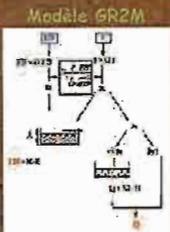
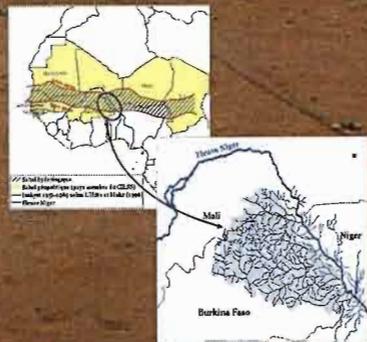
Adoption de nouvelles pratiques culturales et restauration des sols



un équilibre climat homme milieu mis à mal

- Population au Burkina Faso en 2000 : # 32 millions (2000 : # 12 millions)
- Dans le plateau central du Burkina Faso, l'espace cultivé est constitué de 50 à 75% de terres sensibles à l'érosion
- Rendements agricoles restent encore faibles
- Comblement des retenues d'eau
- Faible taux de régénération du milieu

une difficulté à reproduire les débits aux exutoires des bassins ...



Résultats insatisfaisants...

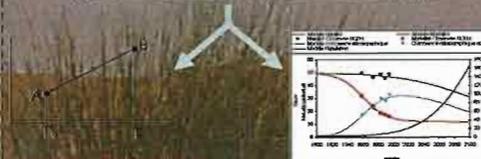
| Bassin versants | Collège GR2M NASH (%) |
|----------------------|-----------------------|
| Alcoingui | 50.26 |
| Nakambé à Bissiga | 54.53 |
| Tepoa au Campement W | 29.69 |
| Gorobi à Diagoné | 50.34 |
| Dalbel | 45.73 |
| Sirba à Garbé Kourou | 38.8 |
| Dargol à Kakassi | 45.7 |
| Gonqou à Korizénié | 43.42 |
| Dyemongou à Tamou | 38.72 |
| Dargol à Terra | 59.4 |
| Nakambé à Wayen | 70.92 |

une problématique hydrologique fondamentale

Comment intégrer dans un modèle conceptuel tel que GR2M, la particularité hydrologique du contexte sahélien: le caractère prépondérant des états de surface dans la production du ruissellement ?

Vers une démarche de modélisation qui prend en compte l'évolution du milieu

1. Caractérisation de l'évolution des états de surface à l'aide d'indicateurs (% de végétation, de sol en culture et de sol nu) et scénarii d'évolution

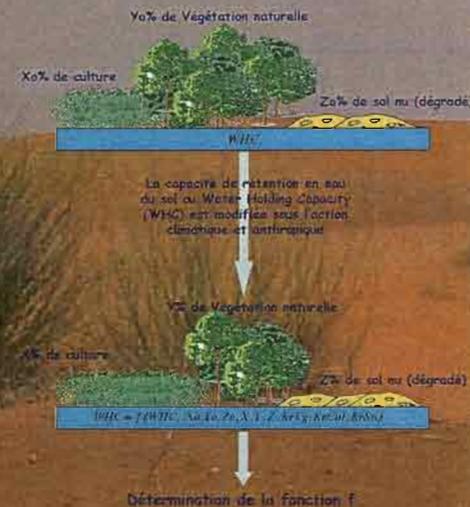


Evolution de l'occupation des terres
 Les indicateurs de pression de ruissellement (K_r) sont liés à l'occupation des terres
 L'impact de l'occupation des terres sur le ruissellement est modélisé à l'aide de coefficients de ruissellement (K_r)

| Indicateurs de pression anthropique et/ou climatique | Indice de production de ruissellement (%) | |
|--|---|-----|
| | Nord | Sud |
| Végétation naturelle (KrVg) | 18 | 13 |
| Cultures (KrC) | 25 | 20 |
| Sols nus (KrSn) | 55 | 50 |
| Plan d'eau (KrPe) | 100 | 100 |

2. Lier ces indicateurs à une variable caractérisant le sol dans modèles hydrologique

Hypothèse: L'augmentation (respectivement la diminution) des coefficients d'écoulement dans une proportion donnée se traduit par une diminution (respectivement une augmentation) de la capacité de rétention en eau du sol dans la même proportion



Données annuelles des WHC intégrables dans les modèles

Application à des bassins



Quelques résultats...

- Bassin versant du Nakambé à Wayen (modèle GR2M) des améliorations significatives
 +20 % en calibration
 +26% en validation
- Bassin du Nakambé à Yilou



Interrelations Climat – Homme – Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique

RESUME

Les modèles mathématiques en hydrologie sont d'indispensables outils de prévision et de gestion, même si, de façon générale, leur utilisation à des fins opérationnelles reste encore limitée. Arriver à des modèles scientifiquement fondés, relativement simples, robustes, et capables de produire, à des échelles d'espace et de temps données, des résultats de simulations satisfaisants, est un des challenges majeurs des recherches en hydrologie, en particulier dans les régions où la question de l'eau est une véritable contrainte pour le développement. Notre intérêt se porte sur le modèle GR2M (développé au CEMAGREF) dans le contexte sahélien. Les études menées depuis une vingtaine d'années montrent que l'effet conjoint du changement climatique et des activités humaines sur les états de surface est à l'origine du « paradoxe hydrologique » observé depuis les années 1970 sur certains bassins versants de cette région. Les coefficients d'écoulement ont, en effet, très fortement augmenté, entraînant des écoulements plus importants qu'auparavant, en dépit d'une diminution marquée de la pluviométrie régionale. Ces modifications de la relation pluie-débit nécessitent de nouvelles approches permettant de prendre en compte conjointement la variabilité climatique et la dimension anthropique dans la modélisation hydrologique de ces bassins. Cette étude a pour objectif d'intégrer dans le modèle hydrologique GR2M une composante environnementale et humaine par le biais de la WHC (Water Holding Capacity) des sols. Cette donnée, prise comme interface entre le modèle hydrologique et les états de surface, est assimilée à la hauteur maximale du réservoir sol de GR2M. Quatre indicateurs de pression anthropique et climatique sont définis : il s'agit des pourcentages de surfaces en végétation naturelle, en culture, en sols nus, et en plans d'eau. Ces indicateurs sont caractérisés à partir d'images satellites LANDSAT acquises en 1972, 1986, 1992 et 2002 pour le cas particulier du bassin du Nakambé à Wayen. A partir d'une base de données de statistiques agricoles et démographiques, un modèle de population, basé sur une fonction logistique est calibré et validé sur le bassin. L'évolution annuelle des indicateurs sur le bassin en est ensuite déduite. Une méthodologie de transcription de la dynamique des indicateurs est développée. Elle permet de produire des données annuelles de WHC intégrant à la fois l'évolution du milieu et la croissance de la population sur le bassin. Comparés aux résultats des simulations pour des WHC fixes dans le temps, l'utilisation de données évolutives de capacité en eau du sol apporte des améliorations très significatives dans les performances du modèle.

Mots clés : Variabilité hydrologique, Variabilité climatique, activités anthropiques, état de surface, modélisation hydrologique, modélisation démographique, Burkina Faso, Sahel

Climate Human and environment relationship in the sahelian part of Burkina Faso : impacts on land use land cover and hydrological modelling

ABSTRACT

Numerical models in hydrology are indispensable prediction tools for water management. One of the most challenging tasks in hydrology is to find simple and robust models, able to satisfactorily simulate river regimes for specific space and time scales. This is particularly true in regions where water related studies are key issues for development. The model used in this study is GR2M (developed at CEMAGREF), and the study area is the Sahel. Studies have shown that the combined effect of climate change and anthropogenic activities on land-cover is responsible for the Sahelian « hydrological paradox », observed since the beginning of the 1970s over several river basins in the Sahel. Indeed, runoff coefficients have strongly increased, leading to greater runoff than before the 1970s, although the regional rainfall have deeply decreased in the meantime. The related modifications of the rainfall-runoff relationships need to be studied according to new approaches, which should include in some way in the hydrological model parameters linked to the climatic variability as well as the anthropogenic activities. This study has for main goal to integrate in the hydrological model GR2M both climatic/environmental and anthropogenic components, via the WHC (Water Holding Capacity) of soils. The WHC constitutes the interface between the model and the land-cover, and is taken as the maximum height of the soil water reservoir of the GR2M model. Four indexes of anthropogenic and climatic pressure are defined i.e. : surfaces of natural vegetation (including fallows), bare soils, cultures and open water. These indexes are characterized from LANDSAT images taken in 1972, 1986, 1992 and 2002, which cover the surface of the Nakambe basin at the Wayen gauging station. A population model, based on a logistic function, is calibrated and validated for the basin area from statistic data of agriculture and demography. It is used to build the annual evolution of WHC over the basin between the dates of the LANDSAT images, according to a specific methodology of transcription of land-cover change into WHC change, via runoff coefficient data given by the literature. Thus "time-varying" WHC data series are build, which take into account climatic variability, environmental change and population growth. The results are compared to runs of the same model with a WHC "fixed" in time, which is commonly used up to now due to lack of land-cover and population change data series. Using the "time-varying" WHC data series significantly increases the model performances (NASH criteria) and its ability to correctly reproduce the river regime

DISCIPLINE : Mécanique, génie mécanique, génie civil

Key words

Hydrological variability, climatic variability, human activities, land cover, hydrological modelling, demography, Burkina Faso, Sahel

Laboratoire HydroSciences Montpellier
300 Avenue du Professeur Emile Jean Brau 3400 Montpellier