

MODELISATION SEMI-SPATIALISEE DES RESSOURCES EN EAU DU FLEUVE NIGER A KOULIKORO. PRISE EN COMPTE DES VARIABILITES SPATIO-TEMPORELLES.

Alain DEZETTER¹, Jean-Emmanuel PATUREL¹, Denis RUELLAND²,
Sandra ARDOIN-BARDIN², Luc FERRY³, Gil MAHE²,
Claudine DIEULIN², Eric SERVAT².

¹ UMR HydroSciences Montpellier, IRD, BP 2528, BAMAKO, MALI, Alain.Dezetter@ird.fr

² UMR HydroSciences Montpellier, Maison des Sciences de l'Eau, Université Montpellier II, Case
Courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5 - France

³ UMR G-EAU, IRD, BP 2528, BAMAKO, MALI

Mots-clés : Modélisation pluie débit, pluies spatialisées, METEOSAT seconde génération, états de surface, ressources en eau

I.- INTRODUCTION

Le changement climatique et son influence sur l'environnement et la société est au cœur des préoccupations politiques et scientifiques actuelles. Pour des régions déjà fragilisées telles que l'Afrique de l'Ouest, la question est vitale. Le programme VAHYNE a montré (Ardoin-Bardin, 2004) la possibilité de simuler l'évolution des ressources en eau en Afrique de l'Ouest et Centrale pour le XXIème siècle à l'aide de modèles pluie débit simples et robustes et à partir des prévisions faites par des Modèles de Circulation Générale (MCG) de l'atmosphère. Les modèles pluie débit utilisés dans ce cadre ont montré une grande sensibilité à la donnée pluie et à une donnée caractéristique des états de surface assimilable à une capacité en eau du sol.

Les données de pluie utilisées proviennent des réseaux nationaux d'observation et ont été interpolées sous forme de grilles mensuelles au 1/2 degré carré : les grilles du CRU (Climatic Research Unit, New et al 1999, Michell et al 2005) ont été principalement utilisées. Les données de sol ont, quand à elles, été tirées de la carte FAO des sols et sont fixes dans le temps (FAO, 1981).

La rupture avérée dans les séries pluviométriques d'Afrique de l'Ouest depuis les années 1970, a eu des effets parfois contradictoires. En effet, la baisse pluviométrique a entraîné généralement une baisse des écoulements (-16 % de pluie, -70 % d'écoulement, pour le Bani à Douna), mais aussi parfois une augmentation des écoulements (Nakambé à Wayen : -20 % de pluie, + 108 % du coefficient d'écoulement) (Mahé et al, 2005). Pierre Diello (2007) a montré que la prise en compte d'une évolution temporelle des états de surface permettait d'améliorer sensiblement la simulation des écoulements des cours d'eau sahéliens.

L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer la modélisation des ressources en eau du Niger supérieur (Niger à Koulikoro) en intégrant la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface du bassin versant.

Plusieurs aspects complémentaires seront abordés à cette fin. Dans un premier temps, après une modélisation « classique » du bassin versant, une étude de la sensibilité spatiale du modèle aux différentes entrées a été réalisée. Dans un deuxième temps, une méthodologie a été mise au point pour générer une cartographie de l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol du bassin versant à l'aide d'images Landsat. Dans un troisième temps, l'aspect de la variabilité spatiale de la pluie a été abordé à l'aide des données Météosat disponibles pour les années 2004 et 2005. Enfin, quelques essais de modélisation pour le futur ont été réalisés à l'aide des données HadcM3 de l'IPCC 2001, dans l'attente de la disponibilité des données IPCC 2007.

II.- MATERIELS ET METHODES

Le bassin versant du Niger à Koulikoro :

Le bassin versant de Koulikoro correspond à la partie amont du haut fleuve Niger (Fig. 1) et occupe une superficie de 120 343 km², entre 7°00' et 12°00' W et 8°30' et 13°00' N. Il se situe à cheval sur 3 pays d'Afrique de l'Ouest : le Mali dans sa partie septentrionale (30 %), la Côte d'Ivoire dans sa partie orientale (5 %) et enfin la Guinée pour le restant du bassin versant (65 %). L'altitude varie de 1479 m à 265 m à l'exutoire du bassin.

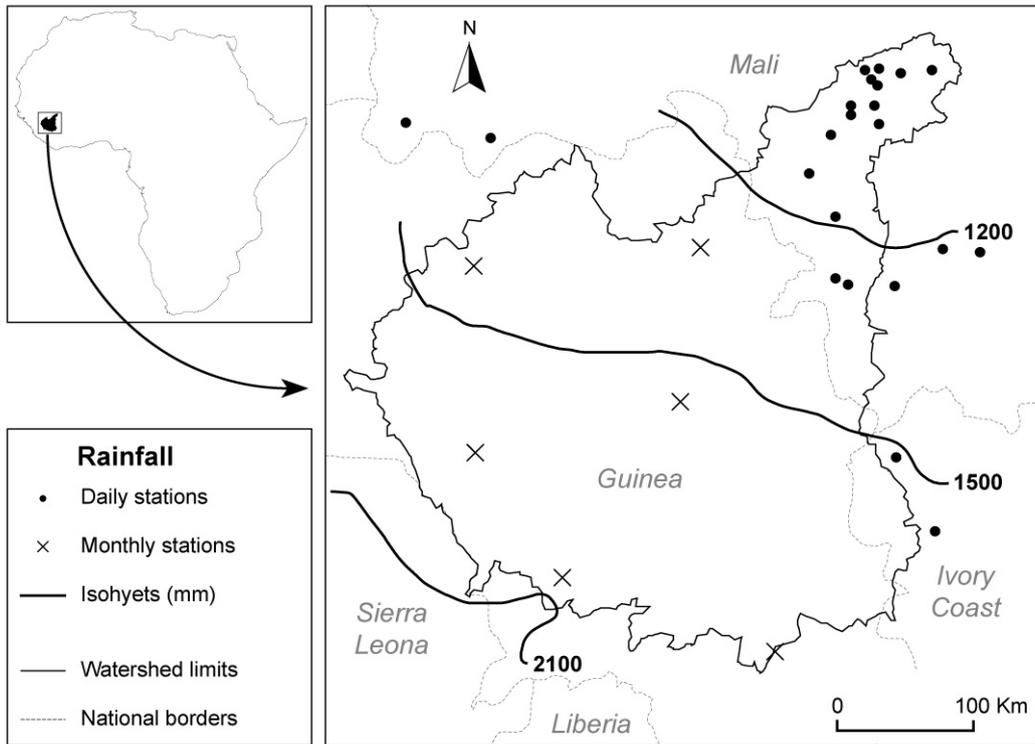


Figure 1 : Le bassin versant du Niger à Koulikoro. (Ruelland et al., in press)

L'analyse hydro-climatique (Ruelland et al., in press) à partir des données pluviométriques des stations réparties sur la zone d'étude (<http://www.hydrosociences.fr/sierem>) fait apparaître trois zones climatiques distinctes, selon un gradient nord-sud (Fig. 1) :

- une zone soudano-sahélienne ($P < 1200$ mm), caractérisée par une seule saison des pluies de juin à septembre et une absence totale de précipitations entre novembre et avril ;
- une zone soudanienne ($1200 < P < 1500$ mm), caractérisée par une saison des pluies qui s'allonge au fur et à mesure que l'on se rapproche du Tropique (mai à octobre, avec un maximum centré sur juillet-août) ;
- une zone soudano-guinéenne ($P > 1500$ mm), caractérisée par des précipitations présentes presque toute l'année, mais plus abondantes de mars à octobre, avec un maximum sur août-septembre.

L'étude des précipitations interannuelles sur la période 1919-1999 témoigne d'une tendance à un déclin progressif des précipitations sur le bassin. Les 3 zones climatiques présentent des périodes synchrones de diminution (dans les années 40) ou d'augmentation des précipitations et une rupture climatique autour de 1970, qui correspond à l'installation de la sécheresse observée en Afrique de l'Ouest et Centrale (Servat et al., 1998). La période 1970-2000 est donc globalement marquée par une baisse des précipitations, notamment en 1983-1984 où les pluies sont les plus faibles. A partir de 1990, la tendance déficitaire semble s'inverser et des années plus humides sont observées (1994 et 1999) sans toutefois atteindre les valeurs observées avant 1970 (L'Hôte et al, 2003).

Nous disposons de données de débits pour 15 sous-bassins du bassin versant du Niger à Koulikoro, pour des périodes variables. Le tableau 1 regroupe l'ensemble des caractéristiques de ces sous-bassins, pour la période 1971-1990, période d'observations communes pour la majorité des sous-bassins.

Bassin	Superficie (km ²)	période	Module (m ³ /s)
Banankoro	73285	1971-1990	703
Baranama	6593	1973-1990	87
Baro	13080	1971-1990	222
Dialakoro	70424	1971-1980	853
Faranah	3171	1971-1990	38
Gouala	33003	1971-1978	416
Iradougou	1820	1971-1990	15
Kankan	10047	1971-1990	156
Kerouane	1420	1973-1990	40
KissidougouNiandan	1397	1971-1990	38
Kouroussa	17165	1971-1990	197
Mandiana	21905	1971-1990	217
Ouaran	19730	1971-1985	115
Siguiri	69751	1971-1990	945
Tinkisso	6551	1971-1990	61
Koulikoro	120343	1971-1990	1022
Koulikoro	120343	1951-1970	1711
Koulikoro	120343	1951-1990	1366

Tableau 1 : Caractéristiques du bassin de Koulikoro et de ses sous-bassins.

On note la forte diminution du module (40%) à Koulikoro entre la période 51-70 et la période 71-90, qui correspond à une baisse importante de la pluviométrie sur la zone.

Afin de relativiser ces variations, nous avons reporté dans le tableau 2, les modules par périodes de 10 ans, de l'origine de la station de Koulikoro à nos jours.

Années	1907-1916	1917-1926	1927-1936	1937-1946	1947-1956	1957-1966	1967-1976	1977-1986	1987-1996	1997-2006
Module (m ³ /s)	1284	1577	1778	1243	1693	1609	1452	973	877	1065
Variation relative / décennie précédente		+23%	+13%	-30%	+36%	-5%	-10%	-33%	-10%	+21%

Tableau 2 : Modules de la station de Koulikoro par périodes de 10 ans, de l'origine à nos jours.

Même si la période récente semble plus favorable, on note bien 4 décennies consécutives de baisse du module pour un cumul de -58 %.

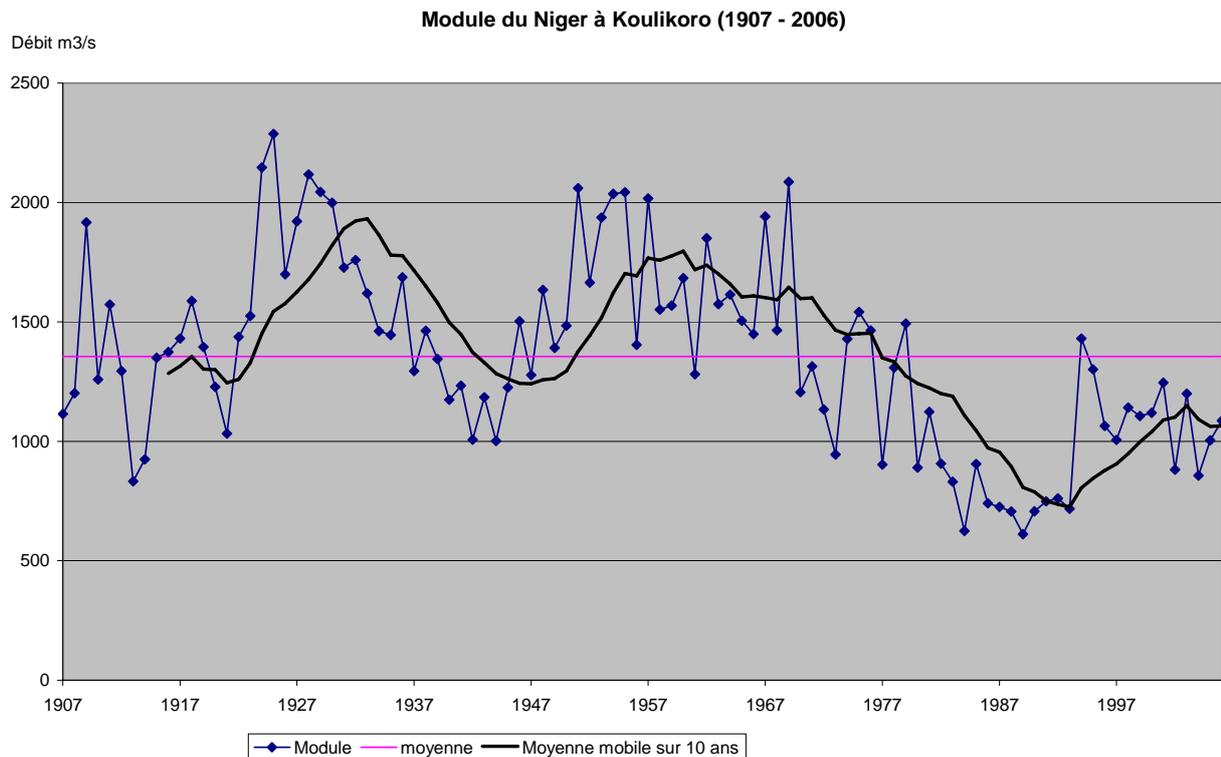


Figure 2 : Module du Niger à Koulikoro et moyenne mobile sur 10 ans – période 1907 - 2006

La figure 2 représente le module du Niger à Koulikoro, pour toute la série d'observations (1907 à nos jours). La courbe continue représente la moyenne mobile sur 10 ans et le trait horizontal, la moyenne de toute la série (1355 m³/s). Les quatre dernières décennies déficitaires sont bien visibles sur ce graphique mais le débit actuel n'a pas encore atteint la moyenne de toute la série. Le tableau 2 et la figure 2 montrent bien le fait qu'une certaine reprise de l'hydraulicité est ressentie sur le terrain, mais permet également de relativiser cette reprise et de la replacer dans le contexte historique.

Le modèle GR2M :

Nous utilisons une version semi-spatialisée du modèle GR2M du CEMAGREF (Makhlouf, 1994) mise au point à HydroSciences Montpellier. Cette version utilise comme unité spatiale une maille d'1/2 degré carré. Les données d'entrée spatialisées sont l'ETP et la pluie mensuelle ainsi que la capacité de rétention en eau du sol (WHC) issue de la carte FAO des sols (Fig. 4). Les paramètres de calage, X1 et X2, sont déterminés pour l'ensemble du bassin versant. La figure 3 présente le schéma conceptuel du modèle GR2M utilisé.

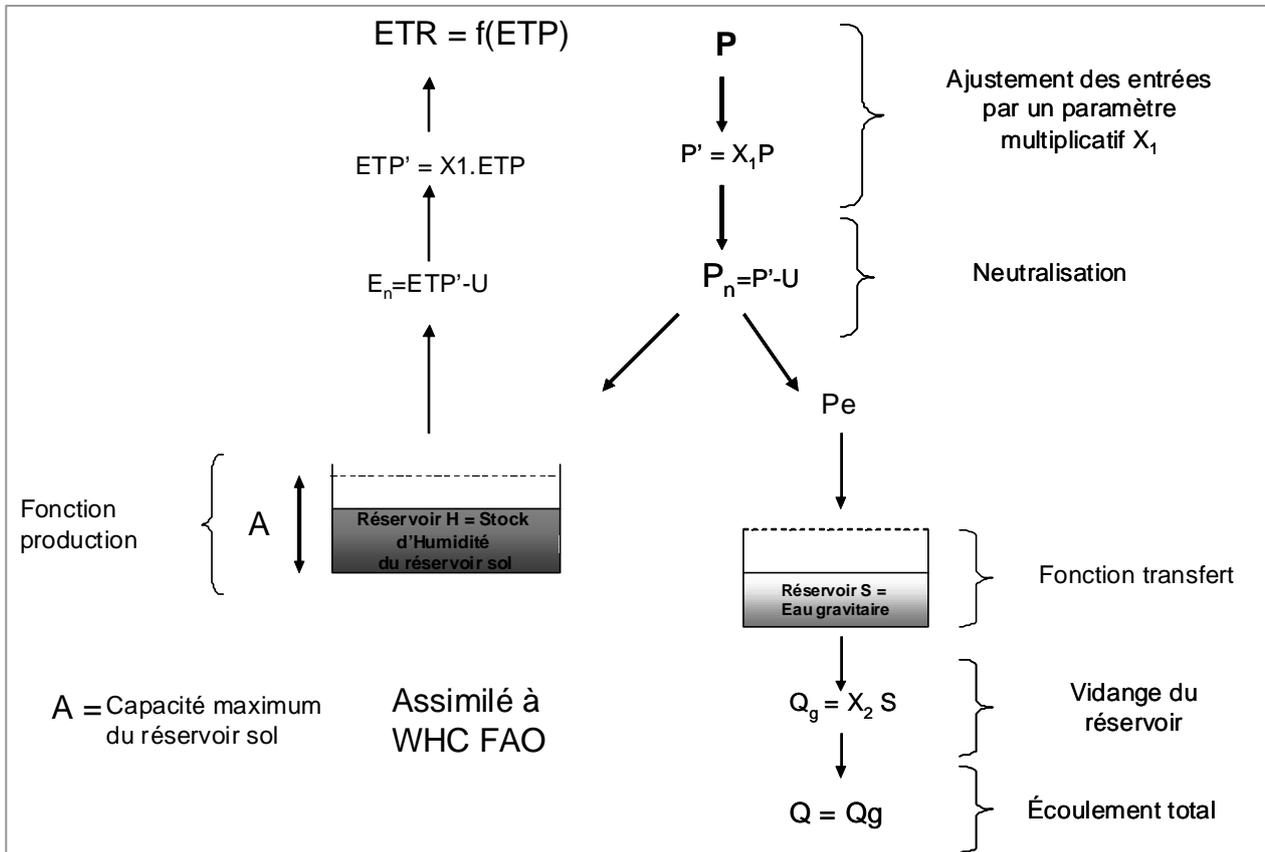


Figure 3 : Schéma conceptuel de la version de GR2M utilisée.

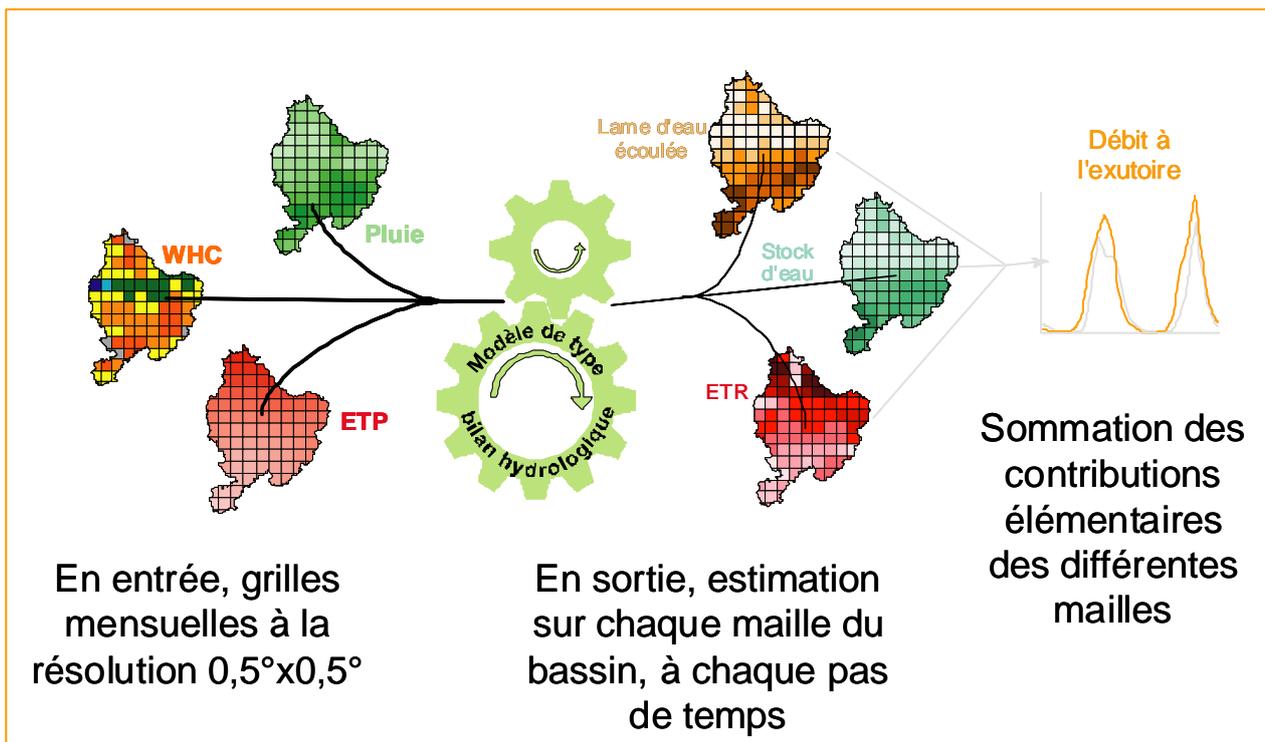


Figure 4 : Fonctionnement de la version semi-spatialisée (Ardoin-Bardin, 2004)

Analyse de la sensibilité du modèle à la répartition spatiale des données d'entrée :

Nous avons étudié la sensibilité à la répartition spatiale des données d'entrée suivantes : WHC, Pluie et ETP, ces deux dernières étant aussi variables dans le temps.

La sensibilité de la version globale aux données d'entrées a déjà été étudiée (Paturel *et al*, 1994). Il en ressort une hiérarchie de sensibilité décrite comme suit : (du plus sensible au moins sensible) Pluie, WHC, puis ETP, l'ETP étant peu, voire pas sensible du tout.

L'objet, ici, est d'étudier une sensibilité rarement analysée, la sensibilité à la répartition spatiale. Un protocole de test particulier a donc été mis au point, nous le décrivons ci-après.

Protocole concernant les pluies et les ETP.

Pour chaque bassin concerné, on tire au hasard 1000 grilles de pluie (ou ETP) selon la méthode suivante :

- Pour chaque mois, la pluie moyenne mensuelle sur le bassin est conservée, seule la répartition spatiale change.
- Un tirage aléatoire est réalisé pour chaque demi-degré et pour chaque mois sur la période considérée. Pour cela, on détermine le minimum et le maximum de pluie pour le demi-degré et le mois considérés et une valeur est tirée au hasard entre ce minimum et ce maximum. Les valeurs obtenues sont ensuite pondérées pour respecter la pluie moyenne mensuelle sur le bassin.

Protocole concernant la WHC :

La WHC ne constitue pas une valeur temporelle, elle est uniquement spatiale, contrairement à la pluie et l'ETP. Pour la WHC, on utilise la valeur minimale et la valeur maximale du bassin concerné, et on réalise un tirage aléatoire de 1000 grilles entre ces valeurs min et max. La WHC moyenne du bassin versant est également respectée en pondérant les valeurs aléatoires obtenues.

Le fait que pluie et ETP aient une représentation spatio-temporelle alors que la WHC n'est représentée que spatialement, a amené à considérer deux protocoles différents de génération de grilles aléatoires. Ceci a des conséquences sur l'étendue des variations obtenues et donc sur l'analyse de la sensibilité, présentée plus loin. Nous étions obligés, pour respecter la saisonnalité (qui engendre un signal d'entrée fort) de la pluie et de l'ETP, de considérer un tirage aléatoire mois par mois. C'est une des raisons de la moins forte amplitude de variation des grilles de pluie et d'ETP générées, comparativement aux grilles de WHC.

Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol :

Afin d'essayer de relier les changements d'occupation du sol et de rendre évolutive dans le temps la valeur WHC, une cartographie temporelle était nécessaire. Pour ce faire, une méthode de traitement diachronique de données Landsat couvrant la période 1970-2000 a été mise au point (Ruelland et al., in press). Le jeu de données multi-temporelles considéré dans cette étude comprend une trentaine d'images Landsat acquises entre 1973 et 2002 à partir des capteurs MSS, TM et ETM+. Ces images couvrent 3 époques centrées autour des années 1975, 1985 et 2000. Elles proviennent de la banque de scènes Landsat mises à disposition gratuitement par la NASA auprès de la communauté scientifique mondiale. L'hétérogénéité des dates et des résolutions spatiales ou spectrales liée aux images ainsi que l'échelle d'analyse ont amené à privilégier une méthode de classification simple. Des prétraitements ont été appliqués de manière à réduire les variations entre les images. Des indices de végétation (NDVI) ont ensuite été calculés avant d'être seuillés selon une typologie commune de couverts végétaux. Ces seuils ont été optimisés par des calculs récursifs automatisés de matrices de confusion avec des parcelles de contrôle (issues de relevés de terrain). Les résultats montrent certaines limites de précision, mais permettent d'estimer les changements à une échelle d'espace et de temps peu classique. Les évolutions se caractérisent par une tendance modérée à la déforestation et au défrichement au profit des sols nus à peu végétalisés et des savanes arbustives. Les couvertures spatiales produites ont été associées à une carte FAO des sols en vue d'assimiler les changements d'états de surface dans la modélisation hydrologique du fleuve Niger.

Pluies Météosat :

Dans le cadre du GDR « MSG ATR », et en collaboration avec le groupe Precipamma, une méthodologie de détermination des pluies à l'aide du satellite Météosat seconde génération, combiné aux données TRMM, est actuellement testée et mise en place. Les images sont à la résolution spatiale de 3 km et temporelle de 15 minutes. Le GDR fournit des données prétraitées sous la forme d'intensité potentielle de pluie et de probabilité de présence de pluie. Afin d'en faire des données d'entrées compatibles avec la modélisation utilisée, des programmes de traitement ont été élaborés afin d'obtenir des données au pas d'espace du demi-degré carré et au pas de temps mensuel. En fonction des données disponibles, un travail de comparaison a été mené sur (1) l'année 2004 : entre juin et septembre inclus et (2) l'année 2005 : entre juin et août inclus

Pour cela, nous avons élaboré 2 types de grilles au ½ degré carré et au pas de temps mensuel : (1) des grilles de pluie obtenues par la méthode du krigeage simple utilisant les données de pluie au sol rassemblées auprès des services gestionnaires des réseaux pluviométriques et (2) des grilles de pluie élaborées par agrégation, spatiale et temporelle, des données MSG

Simulations pour le futur (IPCC TAR 2001) :

Les Modèles de Circulation Générale (GCMs) sont les seuls outils disponibles pour les scientifiques pour simuler et évaluer les impacts potentiels du changement climatique. Cependant les GCMs développés pour le 3e rapport de l'IPCC TAR 2001 ne sont pas vraiment capables de reproduire correctement les climats observés : les prédictions de pluie associées sont peu fiables dans leur répartition spatiale et saisonnière, en particulier pour les zones de mousson. D'autres problèmes relatifs à l'utilisation des GCMs peuvent être soulevés : leur résolution n'est pas adaptée à celle de la modélisation hydrologique, ou encore les différences entre les GCMs sont très marquées. Malgré cela, les sorties du modèle climatique HadCM3 (scénario SRES A2) ont été utilisées pour mettre au point des scénarios climatiques sous forme de grilles de pluie et d'ETP pour le futur au demi-degré carré sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale (Ardoin-Bardin, 2004). Deux méthodes d'extraction de tendance et de désagrégation ont été mises au point, conduisant à deux grilles différentes. La première méthode est basée sur les anomalies extraites des séries du modèle climatique (appelée scénario Anomalies et notée *sc_ano*), la seconde utilise des variations aux différents horizons de 30 ans définis par l'IPCC (2020, 2050, 2080) (appelée scénario Horizons et notée *sc_horiz*). Ces deux grilles de pluie et d'ETP seront donc utilisées pour tenter d'aborder la délicate question des ressources en eau sur le futur, en attendant de disposer des résultats de l'IPCC AR4 2007.

III.- RESULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats de la modélisation « classique » :

On entend par modélisation « classique » l'utilisation de la version semi-spatialisée du modèle GR2M mise au point, en utilisant les grilles de pluie et d'ETP du CRU et avec une valeur de WHC fixe dans le temps donnée par la carte FAO.

Le tableau 3 présente les résultats de cette modélisation pour la période 1911-1990, par périodes de 10 ans. Les cinq premières lignes présentent les résultats des calages par périodes de 10 ans, viennent ensuite les validations croisées : on applique chaque jeu de paramètres calés pour une période de 10 ans à toutes les autres périodes, la valeur de Nash ainsi obtenue figure dans ce tableau (8 dernières lignes). Les trois dernières colonnes du tableau présentent la moyenne des critères de Nash de validation pour chaque jeu de paramètres et en tenant compte ou non d'un découpage de la période (toute la période 1911-1990, avant 1950 et après 1950). Dans toutes les colonnes du tableau la valeur en gras représente la valeur maximale de la colonne et la valeur en italique souligné la valeur minimale.

Les valeurs de critère de Nash de calage sont plutôt bonnes (de 80.8 à 91.3), il en va de même pour le Nash de validation, à quelques exceptions près. Ces exceptions concernent deux périodes bien particulières, la période 1911-1920 et la période 1981-1990. Ces deux périodes ont en commun le fait de contenir des années exceptionnellement sèches (1913, 1983, 1984). Ces années exceptionnelles sont plus difficilement reproductibles par le modèle calé sur des périodes au comportement proche de la moyenne. On remarque par ailleurs que le jeu de paramètres qui valide le mieux sur la période 1911-1920 est celui de 1981-1990 et inversement. Il est probable que des fonctionnements différents du bassin versant ont lieu durant ces périodes et qu'ils n'ont pas cours sur des périodes plus humides. Le modèle ne peut donc pas reproduire des fonctionnements qui ne se produisent pas dans la période de calage.

Un des buts de cette modélisation est de choisir le jeu de paramètres qui représente au mieux le fonctionnement du bassin versant, afin notamment de l'utiliser pour avoir des indications sur les débits dans le futur à partir de scénarios climatiques. Les trois dernières colonnes du tableau 3 permettent de choisir ce jeu de paramètres et amènent également quelques commentaires. En effet, le fait d'avoir une très longue série d'observations de débits pour cette station, permet de relativiser les calages et d'en tirer également des conséquences pour les sous-bassins versants qui n'ont pas de série aussi longue.

Pour toute la période (1911-1990), les paramètres calés sur la période 1941-1950 représentent, en moyenne, le mieux l'ensemble de la série. Pour la période 1951-1990, il s'agit également des mêmes paramètres et pour la période 1911-1950, il s'agit des paramètres calés sur la période 1971-1980. Les valeurs de Nash moyen de validation sont proches (respectivement 83.5, 84.5, 83.1), il n'y a pas de différence notable si on choisit ces jeux de paramètres. Il est par contre singulier d'observer qu'aussi bien pour la période 1911-1950 que pour la période 1951-1990, ce sont des jeux de paramètres calés sur des années externes aux périodes considérées qui représentent le mieux l'ensemble de la série (respectivement 1971-1980 et 1941-1950).

Cependant, il est intéressant de noter que les périodes de calage dont les paramètres conviennent le mieux, sont des périodes on l'on rencontre à la fois des années déficitaires et des années excédentaires, de manière plus ou moins équilibrée, mais pas d'années exceptionnelles. Les jeux de paramètres retenus afin de simuler les débits pour le futur sont donc les jeux calés sur les périodes 1941-1950 et 1971-1980.

Période de calage	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	Moyenne des Nash de Validation par période		
X1 calé	0.5217871	0.7301203	0.6204751	0.5769069	0.6864899	0.6686361	0.6195726	0.4842803			
X2 calé	0.4460421	0.4443754	0.4521440	0.4646929	0.4351400	0.4600255	0.4632891	0.4735941			
Nash Calage	80.8	89.1	89.9	88.0	91.3	89.3	89.9	88.0			
Corrélation Mensuelle	0.901	0.952	0.955	0.945	0.963	0.954	0.957	0.942	11-90	51-90	11-50
Nash Valid. (p 11-20)		71.1	83.5	85.3	77.7	77.6	83.1	86.7	80.7	81.3	80.0
Nash Valid. (p 21-30)	<u>42.8</u>		82.7	<u>73.3</u>	90.0	87.7	83.2	<u>19.8</u>	<u>68.5</u>	<u>70.2</u>	<u>66.3</u>
Nash Valid. (p 31-40)	71.9	84.4		86.9	89.3	87.9	89.9	67.5	82.5	83.7	81.0
Nash Valid. (p 41-50)	77.4	80.1	88.9		85.9	85.1	88.8	78.1	83.5	84.5	82.1
Nash Valid. (p 51-60)	58.3	88.2	87.6	81.2		89.1	87.8	44.3	76.6	73.7	78.8
Nash Valid. (p 61-70)	60.3	87.8	88.2	82.3	91.1		88.5	48.2	78.0	75.9	79.6
Nash Valid. (p 71-80)	71.2	84.6	89.9	86.7	89.4	88.1		66.6	82.3	81.4	83.1
Nash Valid. (p 81-90)	79.9	<u>65.5</u>	<u>79.2</u>	82.4	<u>72.0</u>	<u>72.7</u>	<u>78.9</u>		75.8	74.5	76.7

Tableau 3 : Résultats de calage et de validations croisées par périodes de 10 ans pour la station de Koulikoro.
(Valeur max de la colonne en **gras**, valeur min en *italique souligné*)

Analyse de la sensibilité spatiale :

En appliquant le protocole d'étude décrit précédemment au bassin versant de Koulikoro et à tous ses sous-bassins, nous avons pu étudier la sensibilité à la répartition spatiale des données d'entrée de la version semi-spatialisée du modèle GR2M utilisé. Un des premiers résultats, qui confirme d'autres résultats obtenus pour ce modèle et cette zone géographique et climatique, est que le modèle n'est pas sensible à la donnée d'entrée ETP, que ce soit à sa répartition spatiale ou à sa valeur relative.

S'agissant des 2 autres données, Pluie et WHC, le tableau 4 donne les variations relatives de Nash et des paramètres X1 et X2 lors de l'application du protocole d'analyse.

Variation relative	X1	X2	Nash
WHC	1.89%	1.91%	1.44%
Pluie	18.29%	13.55%	13.32%

Tableau 4 : Variation relative des paramètres calés X1 et X2, et du Nash en fonction de la répartition spatiale

La hiérarchie de sensibilité est la suivante : (du plus sensible au moins sensible) Pluie puis WHC. Ces valeurs représentent la valeur moyenne pour l'ensemble des sous-bassins testés. On rappelle que ces tests sont faits à valeur moyenne globale constante, seule la répartition spatiale change. On peut donc en conclure que la version semi-spatialisée du modèle GR2M utilisée est bien sensible à la répartition spatiale des 2 données d'entrée sur lesquelles s'est concentré le projet : la pluie et l'occupation du sol.

Cartographie de l'évolution de l'occupation du sol :

Les matrices de confusion confrontant les 3 classifications finales à l'ensemble des parcelles de contrôle montrent des précisions globales respectives de 75.6 %, 72.4 % et 78.4 % pour les périodes 1975, 1985 et 2000 (Ruelland et al., in press). Ces résultats indiquent une assez bonne concordance entre les classifications et les milieux observés sur le terrain.

L'analyse de l'évolution des milieux depuis les années 1970 montre des changements modérés (Fig. 5). Au niveau global sur le bassin, les surfaces en eau ont doublé entre 1975 et 1985 du fait notamment de la mise en place de barrages hydro-électriques à l'est du bassin au début des années 80. Les surfaces de sols nus (y compris urbain) à faiblement végétalisés (y compris cultures) semblent avoir connu une augmentation entre 1985 et 2000 en passant de 8.5 % des surfaces à près de 10 %, tandis que, dans le même temps, les surfaces en forêts seraient passées de 48.5 à 44 % de la zone d'étude. La proportion de savanes arbustives semble avoir progressé régulièrement entre les trois périodes (de 18.8 % à 21.2 %). La proportion de savanes arborées a été globalement maintenue. Les taux de changements semblent avoir été plus rapides entre 1985 et 2000, qu'entre 1975 et 1985, même si les confusions plus importantes constatées au niveau de la classification de 1985 ne permettent pas de l'affirmer avec certitude

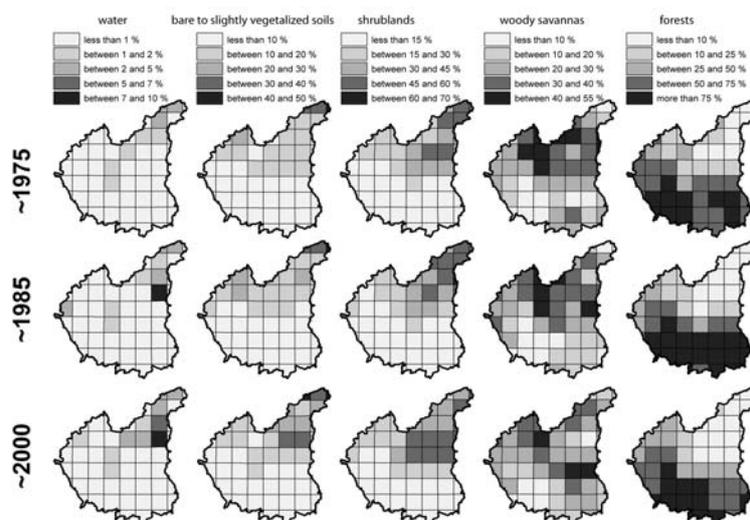


Figure 5 : Cartes au 1/2 degré carré de l'occupation du sol pour les 3 périodes considérées (Ruelland et al., in press)

Intégration de l'occupation du sol dans la modélisation, « WHC évolutive » :

En utilisant la procédure appliquée avec succès dans le cas du bassin versant du Nakambé (Mahe *et al*, 2005), nous avons produit des fichiers de WHC « évolutive » (variable dans le temps) à partir des cartographies obtenues précédemment par télédétection. Le tableau 5 donne les résultats de ces calculs.

Occupation du sol (%)	1975	1985	2000
Eau	0.4 %	0.8 %	0.9 %
Sols nus	2.8 %	2.8 %	3.6 %
Surfaces cultivées	21.13 %	20.98 %	22.88 %
Végétation naturelle	75.68 %	75.43 %	72.63 %
WHC évolutive déduite (rappel WHC FAO = 182)	176.5 mm	175.8 mm	174.7 mm

Tableau 5 : WHC évolutives déduites de l'occupation du sol à l'aide des coefficients d'écoulement

Le tableau 6 regroupe les Nash de calage et de validation pour l'intégration des WHC évolutives dans la modélisation en comparaison des valeurs fixes. On ne note aucune amélioration lors de cette intégration.

	param. X1	param. X2	Nash Calage (%) 1975-1988	Nash Validation (%) 1989-1995
WHC fixe	0.567	0.461	86.28	78.58
WHC évolutive	0.563	0.459	86.14	78.43

Tableau 6 : Paramètres X1, X2 et valeurs de Nash pour le Niger à Koulikoro – WHC fixe et évolutive

Pluies Météosat et intégration dans le modèle :

Comparaison des grilles de pluie

Les données en notre possession sont insuffisantes (quelques mois sur 2 ans) et couvrent un espace bien particulier qui est la zone soudano-guinéenne. Les remarques faites ci-dessous sont donc difficilement généralisables.

La dynamique spatiale des grilles MSG semble suivre la dynamique spatiale des grilles SOL (grilles construites à partir des stations de mesure au sol) tout en étant moins lissée, mais globalement, les valeurs des grilles MSG sont inférieures aux grilles SOL. Cependant l'écart entre les deux se réduit, au fur et à mesure que les totaux respectifs de pluie augmentent (vers le sud du bassin). La dynamique temporelle globale du bassin n'est pas respectée pour les pluies MSG : ce ne sont pas les mois d'août et septembre les plus pluvieux, ce n'est pas le cas non plus de la dynamique temporelle, maille par maille.

Utilisation de l'information MSG dans la modélisation semi-spatialisée

Les jeux de données SOL et MSG ont été constitués sur la période 1995-2005. Ces 2 jeux sont identiques sauf sur la période 2004-2005 (années disponibles MSG). Les résultats sont reportés dans le tableau 7. On constate une moins bonne performance en calage avec les pluies MSG. Ceci est probablement dû à la forte différence d'estimation de la pluie (2274 mm pour 2004-2005 avec MSG contre 3002 mm à partir des postes au sol) et aussi à une répartition temporelle différente, décalée par rapport aux débits.

Période/données	SOL 2004-2005	MSG 2004-2005	SOL 1995-2005	MSG 1995-2005
Nash	87.957	79.365	87.137	84.434
X1	0.4851	0.7468	0.5335	0.5565
X2	0.4509	0.4706	0.4550	0.4544
Pluie totale sur la période (mm)	3002	2274	16262	15534

Tableau 7 : modélisation intégrant les données MSG

Simulations pour le futur :

A l'aide des grilles élaborées à partir des résultats de l'IPCC TAR 2001 (et dans l'attente des scénarios de l'IPCC AR4 2007) et des jeux de paramètres choisis précédemment (paramètres 41-50 et paramètres 71-80) des simulations de débits pour la période 2004-2095 ont été effectuées. On dispose donc de deux grilles de pluies et d'ETP (scénarios anomalies (noté sc_ano) et horizons (noté sc_horiz)), et de deux jeux de paramètres possibles. Les courbes de débits annuels simulés sont représentées sur la figure 6. L'allure générale est similaire pour les simulations avec le même scénario de pluie et des paramètres différents. Cependant sur l'ensemble des courbes, on peut parfois avoir un écart important sur certaines années. Afin d'en tirer des tendances générales, les courbes d'indices de débits ont été tracées (Figures 7 et 8). L'indice représente un écart à la moyenne globale de la série. S'il est négatif, c'est une année déficitaire, s'il est positif on a une année excédentaire.

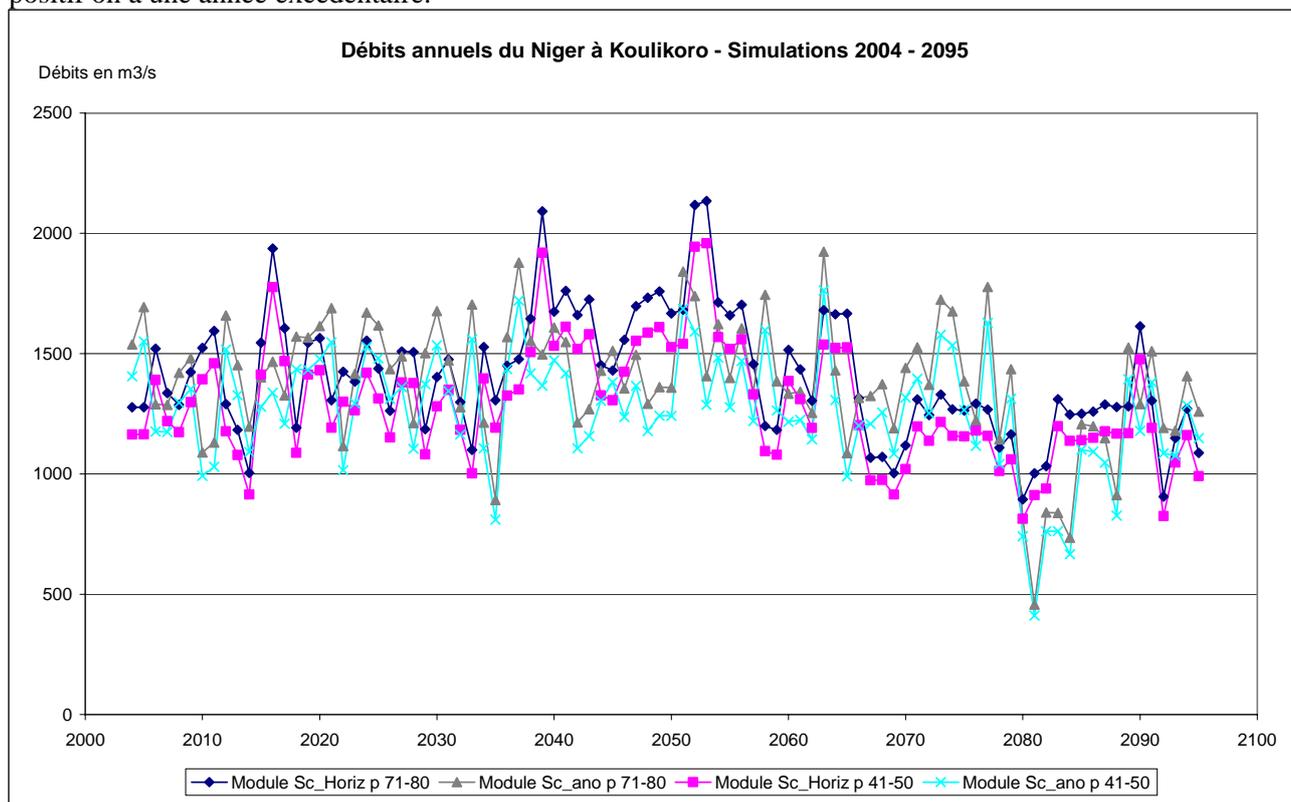


Figure 6 : Débits annuels du Niger à Koulikoro selon les différents scénarios

Les moyennes des débits simulés sur le long terme sont les suivantes :

- Sc_ano paramètres 41-50, 1258 m³/s ;
- Sc_Horiz paramètres 41-50, 1288 m³/s ;
- Sc_ano paramètres 71-80, 1378 m³/s ;
- Sc_Horiz paramètres 71-80 1410 m³/s.

A titre de comparaison, on peut rappeler que la moyenne sur la série 1907-2006 de ce débit est de 1355 m³/s alors que la dernière décennie (1997-2006) a une moyenne de 1065 m³/s.

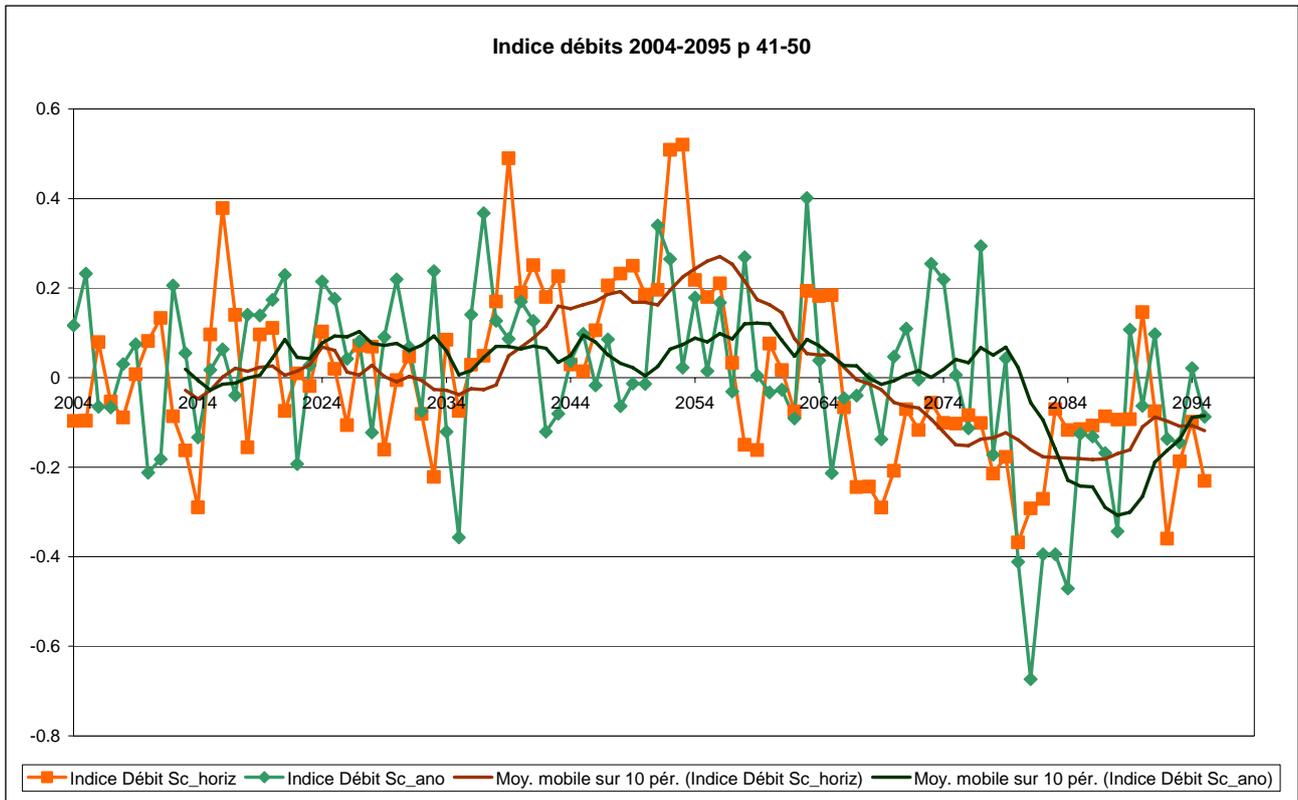


Figure 7 : Indices de débits simulés à l'aide des paramètres calés sur la période 1941-1950

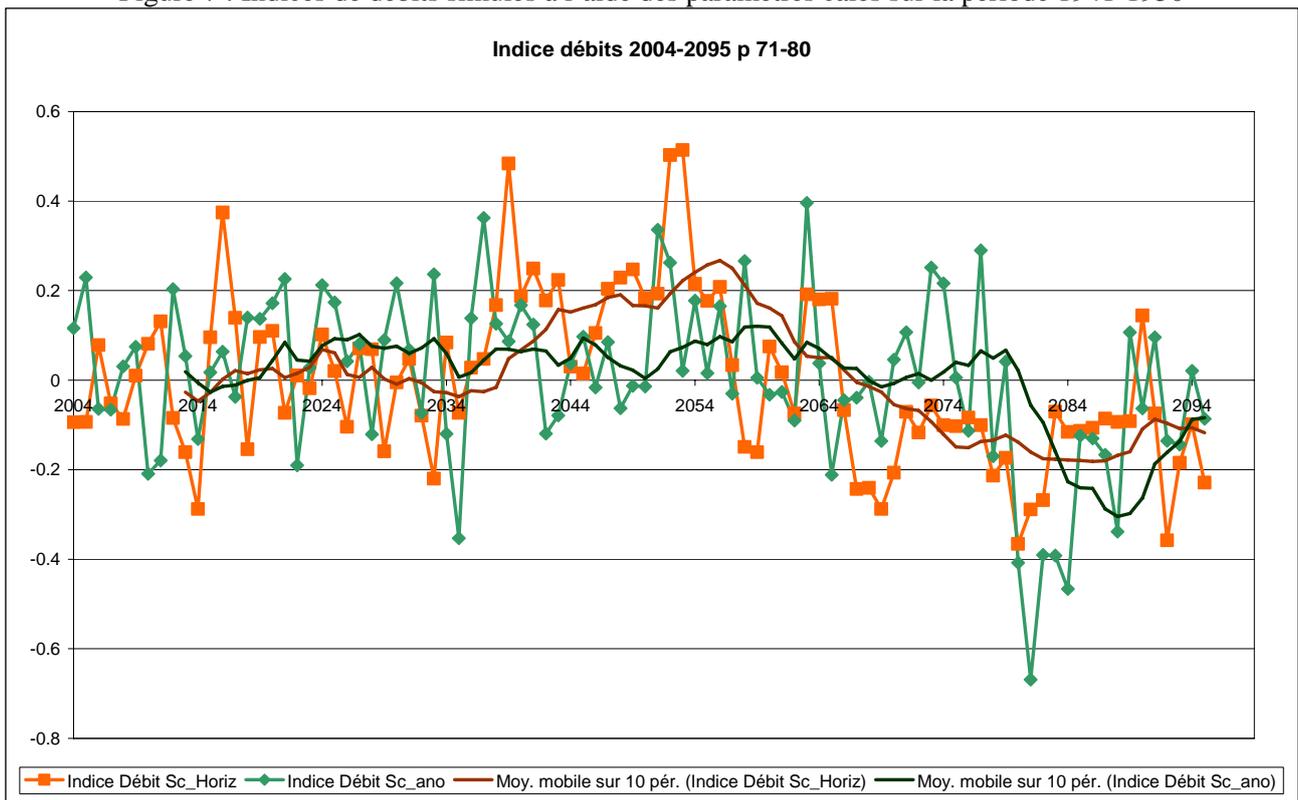


Figure 8 : Indices de débits simulés à l'aide des paramètres calés sur la période 1971-1980

Les tendances générales des deux jeux de paramètres sont les mêmes, les résultats des deux scénarios sont quelque peu différents, mais globalement, la tendance à long terme par période de 30 ans est la suivante : horizon 2020, période autour de la normale, horizon 2050, période plutôt excédentaire, horizon 2080, période plutôt déficitaire. Cette analyse correspond au comportement de certains bassins étudiés par S. Ardoin-Bardin (2004) situés dans la même zone. Il faut bien évidemment manipuler ces tendances avec précautions. Les différents modèles de climat produisent tous des tendances différentes, et il s'agit ici des résultats spécifiques au modèle HadCM3 scénario A2.

IV.- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet d'intégration de la variabilité spatio-temporelle des pluies et des états de surface dans la modélisation a permis d'explorer les limites des différents outils disponibles tant au niveau des modèles eux-mêmes qu'au niveau de l'estimation de l'occupation du sol par télédétection ou de l'estimation de la pluie par MSG. En effet, dans un contexte africain, où peu de données sont disponibles, ce projet a permis d'utiliser le maximum de l'information disponible et de mettre au point des méthodologies transposables à d'autres bassins africains. L'outil de modélisation utilisé est sensible à la répartition spatiale des entrées pluies et WHC. Une méthodologie originale de traitement des données Landsat pour des grands bassins versants a été mise au point (Ruelland et al, in press). L'intégration de cette information dans les modèles demande à être encore améliorée. Enfin, même si les valeurs produites par le satellite MSG sont encore éloignées de la réalité, l'utilisation de versions améliorées de ces données sera possible avec les outils mis au point et est prometteuse.

Le modèle est calé et validé pour ce bassin versant et pourra être utilisé pour des simulations pour le futur à l'aide de grilles issues de l'IPCC AR4 2007. Un premier aperçu a pu être donné à l'aide des grilles issues de l'IPCC TAR 2001.

Parmi les perspectives ouvertes par ce projet, les méthodologies mises au point ici seront appliquées et développées dans le cadre d'un projet ANR VMC (Vulnérabilité : Milieux et Climat) RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme) sur le bassin versant du Bani, affluent du fleuve Niger, de 130 000 km² essentiellement situé au Mali et en Côte d'Ivoire.

V.- REFERENCES

Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II.

Diello P., 2007. Interrelations Climat - Homme - Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat en Sciences de l'Eau. Université Montpellier II.

L'Hôte, Y., Mahé, G., Somé, B. & Triboulet, J.-P. (2003) Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrol. Sci. J.*47(4), 563–572.

Mahé G., Paturel J. E., Servat E., Conway D., Dezetter A., 2005. The Impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, Vol. 300, issues 1-4, pp. 33-43.

Makhlouf, Z. et Michel, C., 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162, 299-318.

Mitchell T. D., Jones P. D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, pp 693–712.

New M., Hulme M., Jones P., 1999. Representing twentieth century space-time climate variability. Part I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology. *Journal of Climate*, 12, 829-856.

Paturel J-E., Servat E., Vassiliadis A., 1994. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model, *Journal of Hydrology*, 168, pp 111-125.

Ruelland D., Dezetter A., Puech C., Ardoin-Bardin S., 2007. Long-term monitoring of land cover changes based on Landsat imagery to improve hydrological modelling in West Africa, *International Journal of Remote Sensing*, in press.