

# IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU EN ZONE TROPICALE HUMIDE : CAS DU BASSIN VERSANT DU BANDAMA EN CÔTE D'IVOIRE

B. T. A. GOULA, V. J. KOUASSI et I. SAVANE

Laboratoire Géosciences et Environnement, UFR Sciences et Gestion de l'Environnement, Université d'Abobo-Adjamé,  
02 BP 801 Abidjan 02, E-Mail: goulaba@hotmail.com

## RESUME

Les modèles de circulation générale GFD3 et UK89 ont été choisis parmi six modèles (GFD3, UK89, CCCM, GISS, GF01 et CLIM) avec le modèle hydrologique (WATBAL) pour étudier les impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant du Bandama. Les simulations prédisent en l'an 2075 une hausse de la température plus importante en zone de savane au nord de 2,75 °C et 4,1 °C selon GFD3 et UK89. Les zones pré-forestières et de savane arborée connaîtront une augmentation moindre de la température d'environ 2,28 °C (GFD3) et 3,02 °C (UK89). La pluviométrie connaîtra une variation relative dans les deux zones. Selon le modèle GFD3, la zone pré-forestière et de savane observera une baisse pluviométrique de 1,33 % et celle des savanes (forêt claire), une baisse de 1,36 %. Le modèle UK89 prédit une hausse des précipitations de 8,4 % pour la zone pré-forestière et de savane. Pour la zone de savane, la hausse sera faible (0,56 %). Les simulations du modèle WATBAL prédisent une baisse des ressources en eau (21 % à 22 %) sur le sous bassin versant à Marabadiassa.

**Mots clés :** Changement climatique, hydrologie, modélisation, zone tropicale, Côte d'Ivoire

## ABSTRACT

*IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON WATER RESSOURCES IN HUMID TROPICAL ZONE :  
CASE STUDY OF THE BANDAMA WATERSHED IN CÔTE D'IVOIRE*

*General Circulation Models GFD3 and UK89 was selected among six models (GFD3, UK89, CCCM, GISS, GF01 and CLIM) with hydrological model (WATBAL) to study the impacts of the climate change on water resources of Bandama watershed. The simulations predict a rise of temperature more important in savanna zone in the north with 2.75 °C and 4.1 °C according to GFD3 and UK89 in the year 2075. The meadow forest and raised savanna zones will experiment the least increase in the temperature of about 2.28 °C (GFD3) and 3.02 °C (UK89). Rainfall will vary relatively in the two zones. According to the GFD3 model, the meadow forest and the savanna will observe a decrease in rainfall of 1.33 % and the one of the savannas (pachy-forest), a decrease of 1.36 %. The UK89 model predicted a rise in precipitation of 8.4 % for the meadow forest meadow and savanna zones. For the latter, the rise will be small (0.56 %). The simulations of the WATBAL model predicted a decrease in water resources (21 to 22 %) in the Marabadiassa sub-basin.*

**Key words :** Climate change, hydrology, modelling, tropical zone, Côte d'Ivoire.

## INTRODUCTION

L'atmosphère a connu un réchauffement au cours des 140 dernières années, et depuis les années 1980, la tendance au réchauffement s'est accélérée (Anonyme 1, 1993).

En 1988, face à la dégradation de l'environnement, le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat), a tenté d'évaluer les informations

scientifiques, techniques et socio-économiques pertinentes pour comprendre les bases scientifiques du risque du changement climatique anthropique, ses impacts possibles et les options d'adaptation et d'atténuation. Ce groupe indique dans son rapport (Houghton *et al.*, 2001) que la température moyenne à la surface de la terre s'est élevée de 0,6 °C depuis 1861, époque où on a commencé à enregistrer des observations fiables. Le projet ACACIA (Action Concertée du Programme Environnement de la Commission des Communautés Européennes) signale qu'en Europe, la température moyenne annuelle s'est élevée d'environ 0,8 °C au cours du 20<sup>e</sup> siècle, la dernière décennie (1990 - 1999) étant la plus chaude, à la fois annuellement et en hiver (Parry, 2001). Dans ce sens, les travaux de Gasse (2000) cité par Legesse *et al.* (2004) ont contribué à la connaissance de l'histoire du changement hydrologique depuis l'ère glaciaire et a indiqué la modification survenue dans le siècle passé.

Tous les spécialistes s'accordent à reconnaître, que les activités humaines en sont responsables ; et les impacts du changement climatique sont une réalité quotidienne (IPCC, 2001), en particulier, les opérateurs des services de l'eau et de l'assainissement (Water UK, 2004).

Au cours de ces dernières années, de nombreux scientifiques dont Leavesley *et al.* (1992) et Leavesley (1994) ont présenté quelques aspects des impacts du changement climatique sur les ressources en eau par la modélisation. Au Canada, les travaux de Morin et Slivitzky (1992), Ouarda *et al.* (1999), et Cheng *et al.* (2003) ont permis de mieux évaluer les effets escomptés. Au niveau de l'Europe, les mêmes objectifs ont été atteints, avec un exemple d'étude comparative de la réponse des bassins en Suisse et en Belgique (Gellen et Schädler, 1997). Enfin, il vient d'être constaté une régression de la banquise au niveau de l'Antarctique de 20 % en 30 ans et un réchauffement deux fois plus vite qu'ailleurs.

En Afrique sub-saharienne, la part des travaux scientifiques reste faible. Toutefois, on peut

signaler les travaux de Calder *et al.* (1995), Gasse (2000), Burlando *et al.* (2002) cités par Legesse *et al.* (2004) qui a particulièrement mené une étude plus affinée en Ethiopie.

En Afrique de l'ouest, il a été observé d'une part, une baisse de la pluviométrie et des débits moyens de l'ordre de 10 % en zones humides et sub-humides et de 30 % au sahel d'une part. D'autre part, il a été remarqué un rétrécissement des zones humides, une dégradation de la qualité des eaux, une baisse des écoulements, une élévation de la température avec apparition des végétaux envahissants suite à une eutrophisation croissante, un déficit du remplissage des retenues (cas de Ouagadougou) et des inondations récurrentes, etc.

En Côte d'Ivoire, les effets du changement climatique ont été étudiés à travers un vaste programme dont une des composantes porte sur les ressources en eau. C'est donc dans ce cadre, qu'a été réalisée l'étude portant sur les impacts de ce phénomène sur les ressources en eau du bassin versant du Bandama à la station de Marabadiassa en amont du lac de Kossou.

## MATERIEL ET METHODES

### MATERIEL

#### Milieu d'étude

Le Bandama, composé de trois principaux affluents (le Bandama Blanc, le Bandama rouge ou la Marahoué, et le N'zi), a une longueur de 1050 km (Figure 1). Son bassin couvre une superficie totale de 97 000 km<sup>2</sup> et comporte deux barrages hydro-électriques (Kossou et Taabo). La savane au Nord (climat tropical de transition ou soudanien), la zone pré-forestière ou la savane arborée (climat équatorial de transition atténué) au Centre, et la forêt dense au Sud (climat équatorial de transition) constituent les différents types de végétation.

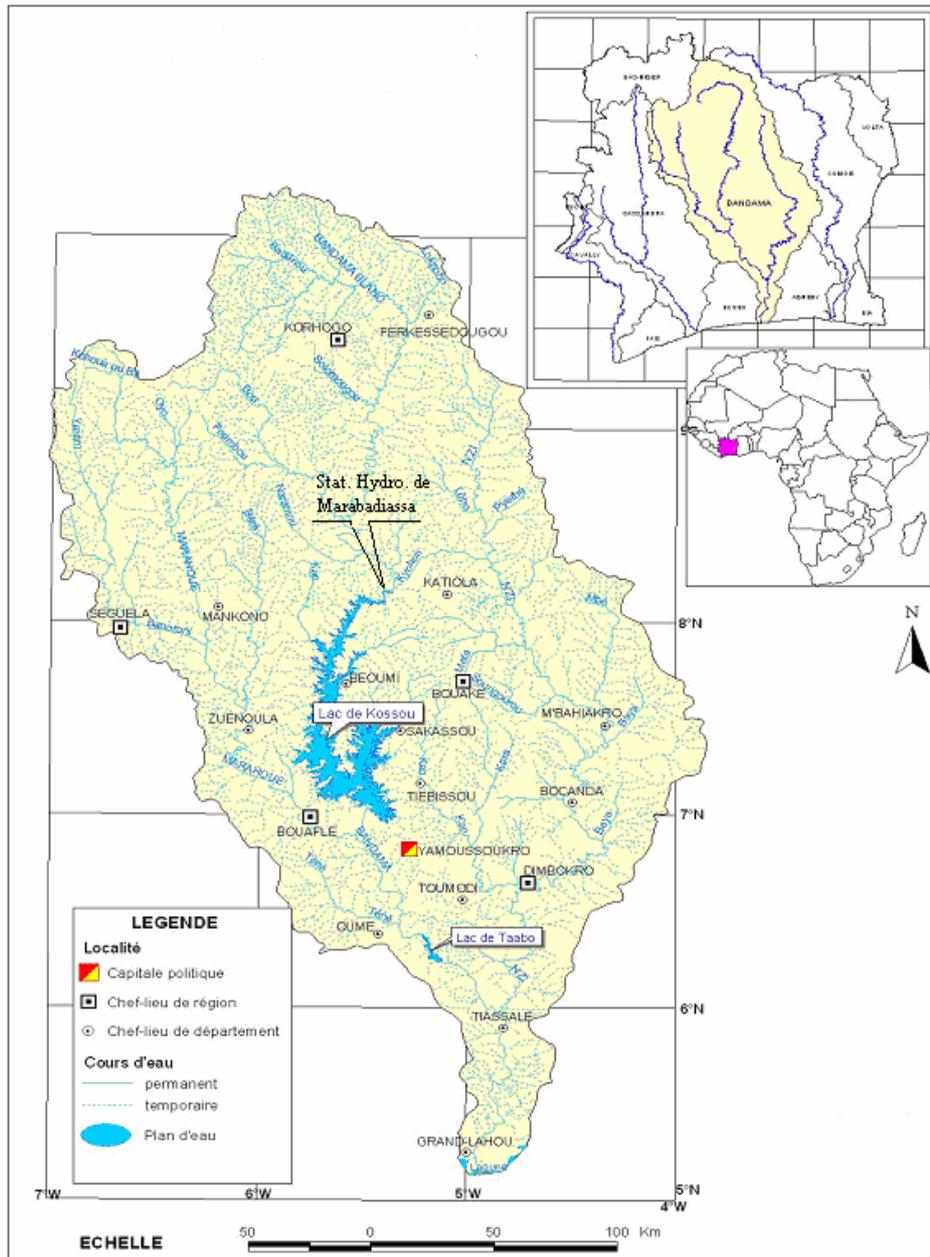


Figure 1 : Situation de la zone d'étude.

Localization of study area.

**Sources de données**

Les données mensuelles collectées sont celles indispensables aux modèles utilisés. Ainsi, celles relatives à la température, la précipitation ont été obtenues auprès de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Le Centre dénommé «National Center for Atmospheric Research (NCAR)» aux USA a établi une banque de données dont les paramètres sont la

température, la précipitation et l'insolation à partir des modèles climatiques pour servir de base aux études d'impacts économiques et sociales du changement climatique. Ces dernières sont disponibles dans l'hypothèse de 1xCO<sub>2</sub> et celle du doublement de la quantité actuelle du CO<sub>2</sub> (2xCO<sub>2</sub>).

Les modèles de circulation générale ont été calibrés avec des relevés de différentes stations climatologiques à travers le monde, sur la période 1951 à 1980. Ainsi, les données

provenant de la SODEXAM sont comprises dans cet intervalle uniquement pour les villes de la zone d'étude. Les débits à la station de Marabadiassa sont ceux de 1980 à 1988.

## METHODES

### Modèles de circulation générale (MCG)

Au cours de ces dernières années, de nombreuses études ont été effectuées pour évaluer les incidences climatiques d'une modification de l'équilibre radiatif de l'atmosphère produite par un accroissement de l'effet de serre. Les modèles ont constitué les principaux moyens d'étude. Cariolle (2002) a présenté les différents modèles numériques de climat et leur stratégie d'utilisation en vue d'obtenir des scénarios d'évolution du climat consécutifs à l'augmentation des gaz à effet de serre.

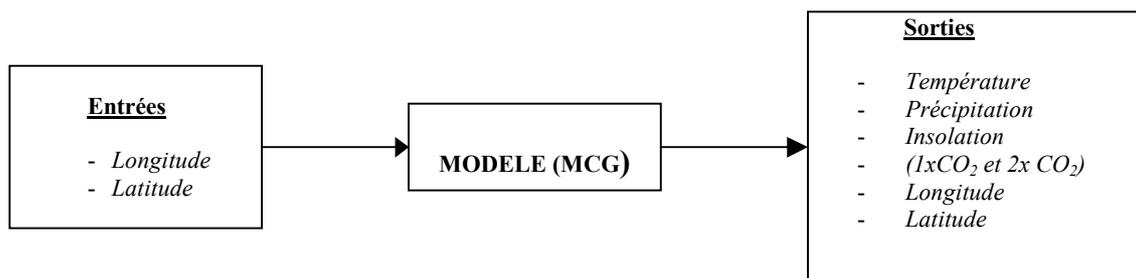
Les modèles mathématiques sont déduits de l'application des lois physiques régissant le système climatique aux paramètres atmosphériques comme la température, la pression, le vent, l'humidité, etc. Ces modèles sont de complexité variable : les modèles climatiques les plus complexes ont une résolution spatiale de quelques centaines, voire quelques dizaines de kilomètres carrés. Ce découpage de l'espace en cellules élémentaires entre lesquelles s'effectuent les échanges de

matière et d'énergie conduit à admettre l'uniformité des variables climatiques.

Afin de mieux tenir compte des transferts de chaleur entre les différents composants du système climatique, les modèles décrivant l'évolution du climat à long terme sont couplés aux systèmes océaniques. Les MCG prennent en compte la structure tridimensionnelle et la dynamique de l'atmosphère. Le fonctionnement des modèles de circulation générale est similaire au modèle de type «boîte noire», c'est-à-dire celui pour lequel on dispose d'une ou plusieurs entrées (les intrants) et d'une ou plusieurs sorties (les extrants). De plus, ces modèles dépendent tous d'un ensemble de paramètres qu'il convient d'ajuster à l'aide d'observation de la température et de la précipitation.

Dans la présente étude, les modèles de circulation générale utilisés, sont ceux mis à disposition par l'US Country Studies Program (US - CSP), à savoir : GISS (Goddard Institute for Space Sciences), GFDL (les versions GF01 et GFD3), (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory), CCCM (Canadian Climate Center Model), CLIM et UK89 (United Kingdom Meteorological Office).

Ces modèles de circulation générale permettent d'observer les variations des paramètres climatiques que sont la température, la précipitation, l'insolation et ceci dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (Figure 2).



**Figure 2** : Schéma de Fonctionnement relatif aux paramètres à l'entrée et à la sortie des modèles de circulation générale.

*Functioning scheme related to input and output parameters of general circulation models.*

En outre, le modèle permet de savoir, pour une ville du bassin versant, la température mensuelle sur une année dans l'hypothèse de  $1xCO_2$  et celle au niveau de la même ville dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration du  $CO_2$  dans l'atmosphère en l'an 2075. Ceci est valable pour les paramètres de précipitation et d'insolation pour qui les modèles de circulation générale fournissent le ratio qui est égal au rapport  $(2xCO_2)/(1xCO_2)$ .

Dans le cas du bassin versant du Bandama, les MCG ont été appliqués à 11 villes qui sont Bouaké, Dimbokro, Bouaflé, Korhogo, Mankono, Bocanda, Tiassalé, Tortiya, M'Bahiakro, Séguéla et Boundiali (Figure 1). Ces villes ont été choisies de manière à couvrir l'ensemble du bassin versant d'une part et d'autre part en tenant compte des stations météorologiques de la SODEXAM qui s'y trouvent.

Par ailleurs, la sélection des modèles qui traduisent mieux le changement climatique dans le bassin versant du Bandama, s'est faite au moyen des coefficients de corrélation inter postes déterminés à l'aide des résultats fournis par les MCG (précipitation, température) et les observations de la SODEXAM au niveau des villes de Korhogo (savane), Bouaké (savane arborée) et Dimbokro (pré-forestier), d'une part. D'autre part, la grille d'application des différents modèles (longitude et latitude) a permis de détecter ceux qui couvrent la zone d'étude.

### Modèle hydrologique WATBAL

WATBAL est un modèle mathématique qui permet d'établir le bilan hydrologique d'un bassin versant. La principale composante de

WATBAL est celle du bilan hydrique qui utilise les fonctions continues pour décrire les mouvements de l'eau à l'entrée et à la sortie du bassin. Cette composante est fonction de la précipitation, de l'évaporation, de la capacité de stockage du sol et du débit. L'évaporation est fonction de trois paramètres : l'évapotranspiration potentielle (ETP), la capacité de stockage relatif (z) et le temps (t).

Signalons que l'évapotranspiration potentielle est la valeur climatique du pouvoir évaporant d'une surface comportant ou non de la végétation. L'évapotranspiration potentielle utilisée dans le modèle WATBAL a été considérée selon l'approche radiative de Priestly-Taylor. Cette approche a la particularité de dépendre uniquement de trois paramètres climatiques : la température, l'humidité relative et l'ensoleillement. La figure 3 présente le schéma de fonctionnement du modèle WATBAL.

Par ailleurs, le modèle WATBAL ne prend pas en compte le fonctionnement des ouvrages hydrauliques. L'estimation de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau se fait donc sur le sous-bassin versant limité à la station de Marabadiassa (Figure 1). Cette évaluation se réalise en trois étapes suivantes : la calibration (1980 - 1985), la validation (1986 - 1988) et la simulation (1980 - 1988) pour apprécier cet impact. Les deux premières étapes sont appliquées essentiellement au sous-bassin versant limité à Marabadiassa tandis qu'au niveau de la troisième étape, le bassin versant du Bandama a été scindé en deux secteurs pour cette analyse. Il s'agit des secteurs de savane arborée et pré forestier (Bouaké et Dimbokro), et le secteur des savanes (Korhogo).

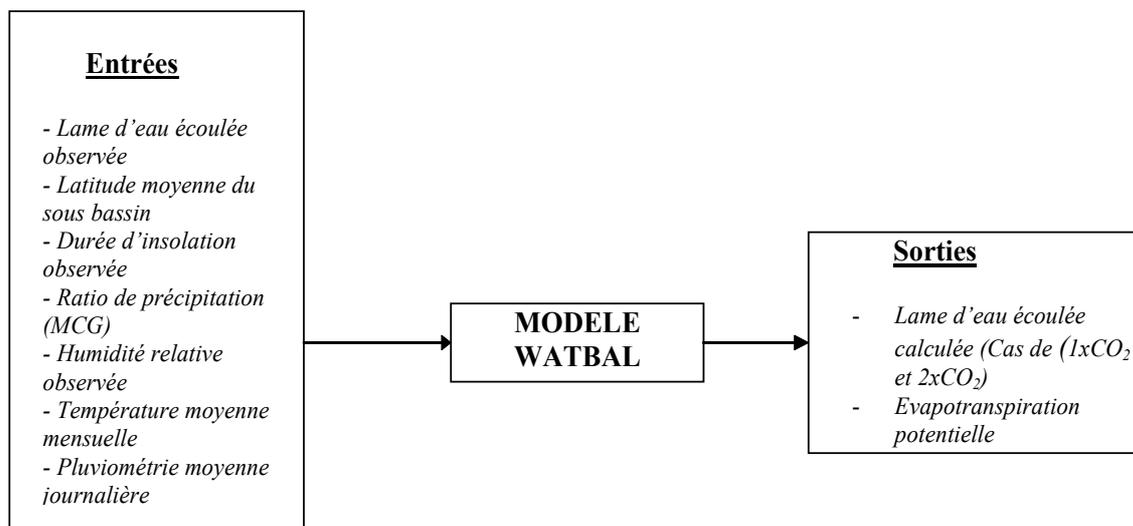


Figure 3 : Données d'entrée et de sortie du modèle WATBAL.

*Input and output data of the WATBAL model.*

## RESULTATS ET DISCUSSION

### IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA TEMPERATURE

La comparaison des coefficients de corrélations entre les observations (précipitation, température) de la SODEXAM et les résultats fournis par les MCG pour les trois villes (Korhogo, Bouaké et Dimbokro), indique que sur l'ensemble des modèles utilisés, seuls UK89 et GFD3 décrivent mieux le changement climatique dans le bassin versant du Bandama (Tableau 1).

Ainsi, les résultats obtenus (Tableau 2) permettent de noter un accroissement de la température moyenne mensuelle pour le secteur pré-forestier (Dimbokro) de l'ordre de 3 °C (UK89) et de 2,28 °C (GFD3). Ces écarts sont nettement plus prononcés pendant la grande saison sèche qui s'étend de décembre à mars (Figure 4).

Pour les secteurs de savane (Korhogo) et savane arborée (Bouaké), l'accroissement de

la température moyenne mensuelle est de 4,1 °C selon UK89 alors que le modèle GFD3 prévoit une hausse de 2,75 °C.

Dans les deux cas, ces écarts sont importants durant la grande saison sèche mais plus accentués dans le centre et le nord. De plus, à la lumière des résultats fournis par de nombreux modèles informatiques, le Groupe Inter-gouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) projette que la hausse des températures moyennes au cours du prochain siècle devrait se situer entre 1,4 et 5,8 °C (MC Carthy *et al.*, 2001). De même, selon Planton et André (2001), tous les modèles convergent vers un même scénario : une augmentation de la température moyenne comprise entre 1,5 et 6 °C. Cela confirme bien les résultats obtenus sur le bassin versant du Bandama. Les températures maximales avoisineraient 31,4 °C selon UK89 en secteur savane arborée et pré forestier, et, 34,6 °C dans la zone de savane.

Il faut noter, que la période de saison sèche correspond au temps des feux de brousse, qui pourraient favoriser l'émission d'importantes quantités de gaz à effet de serre (Figure 5).

**Tableau 1** : Coefficients de corrélation entre les valeurs calculées par les modèles et celles observées par la SODEXAM.

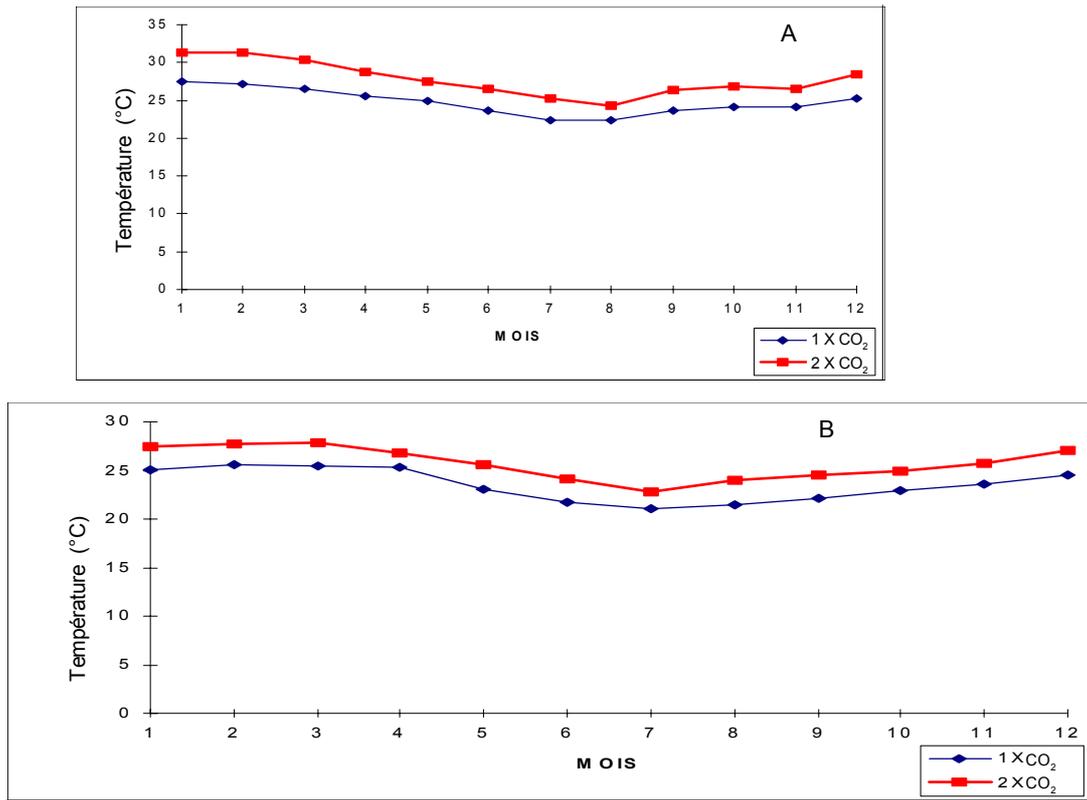
*Correlation coefficients between model data and those observed from SODEXAM.*

Paramètres climatiques	Coefficients de corrélation pour les différents modèles			Modèles retenus
	UK89	GFD3	GISS	
Température	0,93	0,69	0,34	UK89
Précipitations	0,67	0,87	0,24	GFD3

**Tableau 2** : Variation de la température moyenne mensuelle dans l'hypothèse 2xCO<sub>2</sub> selon les modèles GFD3 et UK89 dans les secteurs phyto-géographiques en l'an 2075.

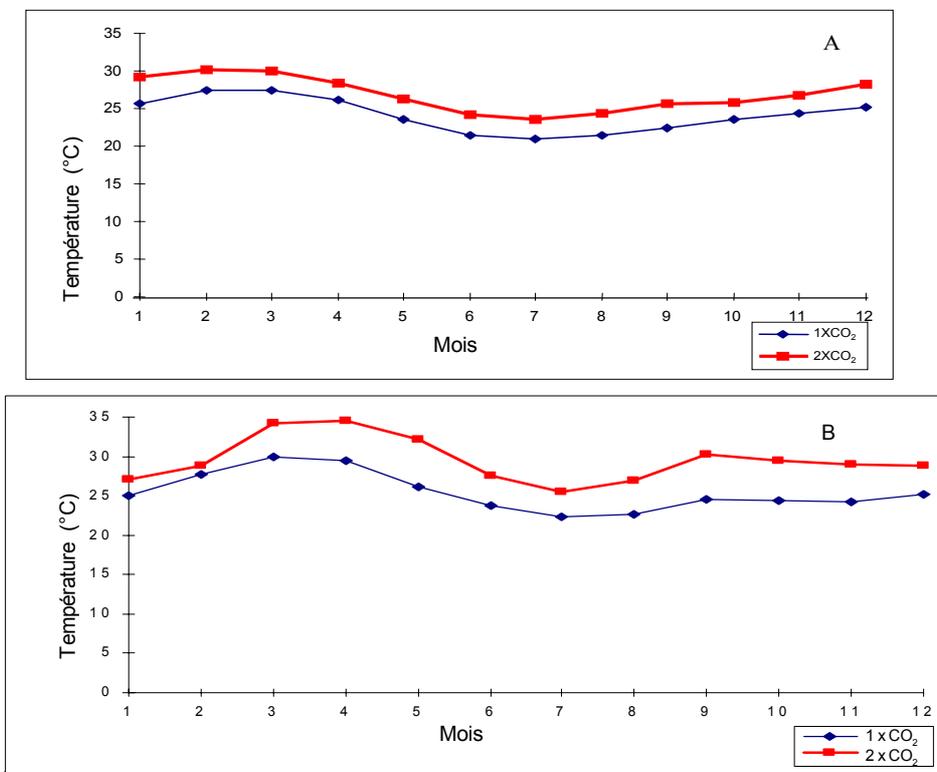
*Variation of mean monthly temperature for 2xCO<sub>2</sub> in phyto-geographic sectors according to GFD3 and UK89 models in the year 2075.*

Modèle	ZONES			
	Savane arborée – Pré forestière (Bouaké – Dimbokro)		Savane (Korhogo)	
	GFD3	UK89	GFD3	UK89
Accroissement de la température moyenne (°C)	2,28	3,025	2,75	4,1
Température maximale (°C)	27,9	31,4	30,1	34,6
Température minimale (°C)	23,5	24,3	23,5	25,5



**Figure 4 :** Variation de la température mensuelle pour 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub> au niveau du secteur pré-forestier du bassin versant du Bandama selon les modèles GFD3 (A) et UK89 (B).

*Variation of monthly temperatures for 1xCO<sub>2</sub> and 2xCO<sub>2</sub> of pre-forestry sector of the Bandama watershed with GFD3 (A) and UK89 (B) models.*



**Figure 5 :** Variation de la température mensuelle pour 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub> au niveau des savanes du bassin versant du Bandama selon les modèles GFD3 (A) et UK89 (B).

*Variation of monthly temperatures for 1xCO<sub>2</sub> and 2xCO<sub>2</sub> of savana sector on Bandama watershed according GFD3 (A) and UK89 (B) models.*

De façon globale, les valeurs fournies par le MCG UK89 restent supérieures à celles de GFD3, d'une part. D'autre part, il est observé que ces zones connaîtront une élévation de température à l'image des autres parties de la terre par comparaison aux différentes études dont celle de Mann *et al.* (1999) en ce qui concerne l'hémisphère Nord. Le projet ACACIA (Parry, 2001) indique que les températures annuelles sur l'Europe augmentent à un taux compris entre 0,1 °C/décennie et 0,4 °C/décennie. Ce réchauffement du climat futur est plus important sur l'Europe du Sud (Espagne, Italie, Grèce) que celle du Nord.

Des températures plus élevées comme celles indiquées dans les deux zones d'étude peuvent mener à une évapotranspiration accrue et à une diminution de la recharge des nappes souterraines. Il y aura une combinaison de sécheresses extrêmes et d'inondations rapides (flash floods). Ceci mène déjà à la désertification et à un stress extrême des ressources (Water UK, 2004). L'accroissement du déboisement entraînant la réduction des forêts pourrait ainsi favoriser cette élévation de la température. Ainsi,

sous des scénarios de climats plus chauds et plus secs, la qualité des sols va se détériorer dans la plupart des régions de la zone conduisant à une dégradation de la qualité des eaux du fait de l'importance des matières en suspension.

#### IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PLUVIOMETRIE.

Le modèle climatique GFD3 prévoit une baisse de la pluviométrie annuelle de l'ordre de 1,3 % aussi bien pour le secteur pré-forestier que pour le secteur des savanes et forêts claires. Par contre, selon le modèle UK89, c'est un accroissement de la pluviométrie annuelle qui est observé. Celui-ci est de 8,4 % pour le secteur savane arborée et pré-forestier et de 0,6 % pour le secteur des savanes. Toutefois, la pluviométrie pour les deux secteurs sera marquée par une irrégularité des hauteurs de pluie tombée. Ainsi, les deux modèles ne prévoient pas les mêmes tendances (Tableau 3) alors qu'il est prévu une baisse de la pluviométrie de 10 % en zone tropicale humide de l'Afrique Occidentale.

**Tableau 3** : Variation relative annuelle de la pluviométrie selon les zones phyto-géographiques selon les modèles GFD3 et UK89 .

*Relative Variation of annual rainfall for 2xCO<sub>2</sub> in phyto-geographic sectors according to GFD3 and UK89 models in year 2075.*

Modèle	ZONES			
	Savane arborée - Pré forestière (Bouaké -Dimbokro)		Savane (Korhogo)	
	GFD3	UK89	GFD3	UK89
P1 (mm/an)	1451,9	1493,1	1454,3	601,2
P2 (mm/an)	1432,6	1618,7	1431,5	604,6
Variation relative (%)	-1,33	8,4	-1,36	0,56

(P1 et P2 représentent respectivement les pluies annuelles dans les hypothèses de 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub> (2075)).  
(P1 and P2 represents respectively annual rainfalls for 1xCO<sub>2</sub> et 2xCO<sub>2</sub> (2075)).

Compte tenu de cette différence de tendance, il paraît alors difficile de tirer des conclusions claires sur la pluviométrie montrant ainsi l'incertitude qui demeure sur le nombre, la fréquence des pluies extrêmes et leur contribution aux pluies annuelles. En effet, de nombreux auteurs prévoient une augmentation du nombre d'épisodes intenses de pluie et de neige pour la plupart des zones terrestres (Mc Leman *et al.* (2003) ; Water UK (2004)). De plus, le milieu de la recherche sur le changement climatique prédit que la fréquence, l'intensité et l'étendue de ces phénomènes (sécheresse sur les régions continentales et violentes tempêtes cycloniques) vont probablement augmenter, ce

qui y accroîtra d'autant l'exposition des populations dans les années à venir. En fait, l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) a indiqué le 2 juillet 2003 dans un communiqué de presse sur son site ([www.wmo.ch](http://www.wmo.ch)) que, ces dernières années, le nombre de phénomènes météorologiques extrêmes observés avait augmenté à l'échelle planétaire. Par conséquent, les probabilités de migrations consécutives à des phénomènes météorologiques extrêmes, à des sécheresses et au changement climatique sont à la hausse.

Au niveau de l'Europe, la configuration générale du changement futur dans la quantité de précipitation annuelle présente une

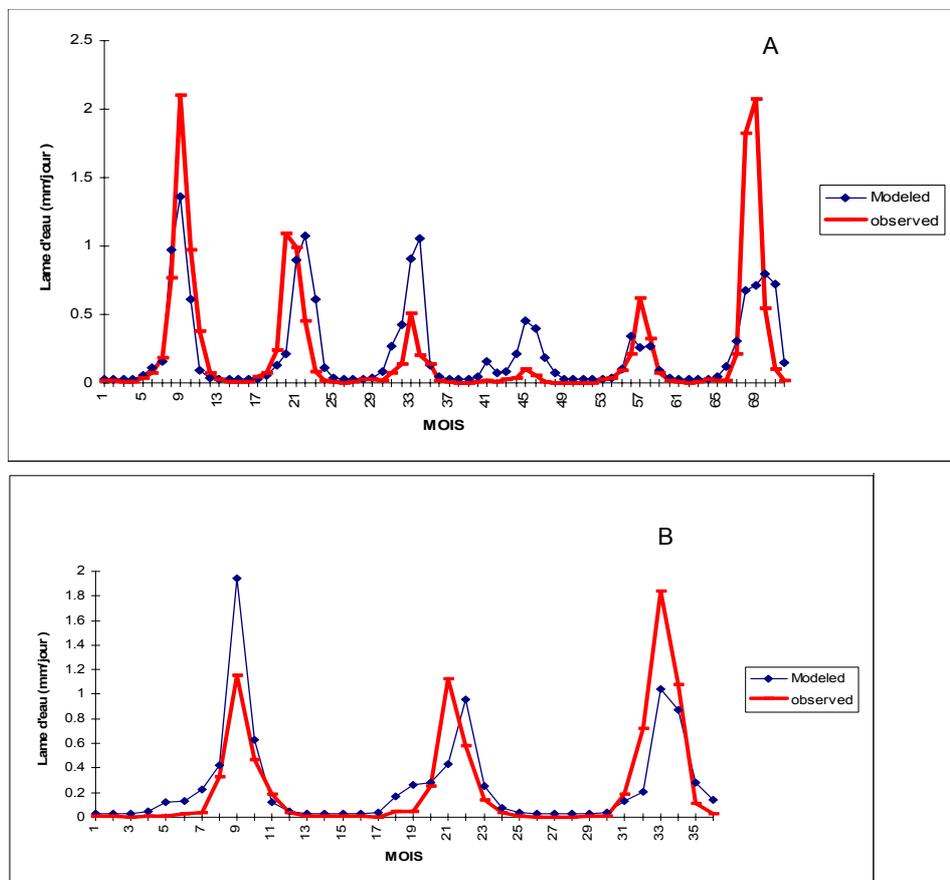
augmentation étalée sur l'Europe du Nord (entre +1 et +2 % par décennie), une diminution plutôt faible sur l'Europe du Sud (maximum -1 % par décennie), et des changements peu importants ou pas clairement établis sur l'Europe centrale. La plus grande partie de l'Europe devient plus humide en hiver (entre +1 et +4 % par décennie). En été, il y a un fort gradient dans le changement entre Europe du Nord (humidification de +2 % par décennie) et Europe du Sud (assèchement jusqu'à -5 % par décennie). La palette «inter-modèles» des résultats sur les changements saisonniers de précipitations présente de fréquentes différences de signe entre différents modèles de climat.

La justification de cette modification pluviométrique, tant au niveau du type que de la quantité, réside dans le fait que parmi les incertitudes scientifiques majeures qui demeurent, figure la perturbation des nuages et celle des cycles biogéochimiques et de la biosphère dont les rétro-actions sur le système climatique doivent être approfondies. Tout ceci conduit à améliorer les MCG utilisés dans le cadre de notre étude.

## IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU

Les résultats relatifs à la température et à la précipitation des MCG sélectionnés (UK89 et GFD3) sont utilisés pour estimer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau du sous bassin versant dont l'exutoire est Marabadiassa. Cette estimation a comporté trois étapes sur une période totale de 9 ans (1980 - 1988) : la calibration (1980 - 1985), la validation (1986 - 1988) et la simulation.

Lors de la calibration, à partir des valeurs mesurées, les paramètres (la capacité de stockage maximum ( $S_{max}$ ), l'erreur,) dont dépend le modèle sont déterminés. Cette étape est concluante lorsque la différence entre la lame d'eau calculée par le modèle et celle observée est très faible (0 - 5 mm/j) (Figure 6A). La validation (Figure 6B) permet de confirmer les paramètres retenus lors de la calibration. Enfin, sur la base des paramètres retenus après la validation, la simulation a consisté à faire des prédictions sur l'état des ressources en eau du sous bassin dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration de  $CO_2$ .



**Figure 6** : Courbe de calage (A) et de validation (B) du modèle WATBAL.

*Curves of calibration (A) and validation (B) of the WATBAL model.*

Le modèle de gestion des ressources en eau le WATBAL appliqué au sous-bassin versant du Bandama a montré que dans le cas d'un changement climatique, il sera observé une baisse du volume d'eau moyen annuel écoulé à l'exutoire du sous bassin ; cette baisse sera de l'ordre de 21 %. En effet, les résultats de simulation selon GFD3 indiquent, que les volumes d'eau moyens à Marabadiassa pour  $1xCO_2$  et  $2xCO_2$  sont respectivement de 1,805 milliards de  $m^3$  et 1,407 milliards de  $m^3$ . Ce qui correspond à une prévision à la baisse de 22 %. En ce qui concerne le modèle UK89, les volumes d'eau écoulés à l'exutoire sont de 1,805 milliards de  $m^3$  pour  $1x CO_2$  et 1,435 milliards de  $m^3$  pour  $2xCO_2$ , soit une baisse de 21 %.

Les résultats de l'étude montrent, que l'impact du changement climatique sur le volume d'eau moyen annuel écoulé à l'exutoire est plus marqué dans le cas où le MCG prédit une baisse de la pluviométrie (GFD3) et moins marqué dans le cas d'une prédiction de l'augmentation de la pluviométrie (UK89). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que le réchauffement des basses couches de l'atmosphère se traduira, notamment, par une accélération du cycle hydrologique, caractérisé par les transferts d'eau entre la mer et la terre dans le cas du sous bassin versant du Bandama. Outre les températures et les précipitations, le réchauffement du bassin versant va modifier le régime des vents et de la couverture nuageuse, qui tous ont à leur tour une influence sur l'évaporation et donc le ruissellement.

Comparativement aux résultats de la sous-région avec une prévision de baisse des écoulements sur les principaux cours d'eau de l'ordre de 40 à 60 %, le sous bassin versant du Bandama paraît relativement moins affecté.

De façon générale, la plupart des modèles prédisent une situation qui ferait accroître des pressions, actuelles et futures sur les ressources en eau et leur gestion partout dans le monde. Ces pressions étant probablement exacerbées par le changement climatique (en partie parce que l'effet du changement est incertain), le risque d'inondation augmentera vraisemblablement en général, et le risque de sécheresse est prévu augmenter particulièrement en zone subsaharienne. Le changement climatique

accentuera sans doute les différences entre le Nord et le Sud en matière de ressources en eau (Water UK, 2004).

Au delà de cet aspect, il faut noter que le sous bassin versant comporte de nombreux petits sous bassins qui ne peuvent pas être pris en compte dans le fonctionnement du modèle hydrologique WATBAL. Ce qui aurait pu permettre de réduire encore davantage les écoulements eu égard aux stockages dans les retenues. L'utilisation d'un modèle prenant en compte ces ouvrages et les usages de l'eau de façon générale, s'avère nécessaire pour mieux évaluer ces impacts.

## CONCLUSION

La prise de conscience des problèmes environnementaux et particulièrement des problèmes relatifs aux changements climatiques, a eu pour effet, le désir pour l'humanité de bâtir une société viable. C'est dans cet élan qu'un certain nombre de projets ont été entrepris en faveur du changement climatique. Notre étude fait partie intégrante de l'un de ces projets à savoir celui relatif aux émissions et puits des gaz à effet de serre en Côte d'Ivoire. Cette étude a été effectuée à partir des modèles climatiques de circulation générale couplés au modèle hydrologique WATBAL. Le cadre d'application de ces modèles a été le bassin versant du Bandama. Les résultats de cette étude montrent, que la température de l'air va connaître une augmentation dans tout le bassin. La précipitation quant à elle connaîtra une variation selon les zones phytogéographiques. Il est à noter que le volume d'eau moyen annuel qui s'écoule du sous-bassin versant du Bandama va être réduit de 21 % dans l'hypothèse d'un doublement de la concentration du  $CO_2$  dans l'atmosphère.

Ces résultats montrent, que malgré le débat controversé existant autour du changement climatique, les conséquences potentielles méritent une attention particulière. Les événements extrêmes telles que les sécheresses et les inondations devraient devenir les effets dominants des changements climatiques sur les ressources en eau.

Pour mieux quantifier l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de la Côte d'Ivoire, nous proposons d'étendre cette étude à tous les bassins versants de la Côte d'Ivoire.

## REFERENCES

- Cariolle (D.). 1999. La régionalisation des scénarios d'évolution climatique : vers les études d'impacts. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 328 (4) : 249 - 259.
- Cheng (Z.), (S. E.) Grasky and (K. G.) Osadetz. 2004. Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, Southern Manitoba, Canada. *Journal of Hydrology* 290 : 43 - 62.
- Anonyme 1. 1993. Une question de degrés : l'ABC du réchauffement de la planète. Collection Eco-civisme, Envi-ronnement Canada, Ottawa (Ontario), 106 p.
- Gellens (D.) and (B.) Shädler. 1997. Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat. *Revue des Sciences de l'Eau* 3 : 395 - 414.
- Houghton (J. T.), (Y.) Ding, (D. J.) Griggs, (M.) Nouguer, (P. J.) Van Der Linden, (X.) Da, (K.) Maskell and (C. A.) Johnson. 2001. Climate change 2001 : The Scientific Basis, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève.
- IPCC. 2001. Climate change 2001: The scientific basis. The third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change. Cambridge University Press, New York.
- Leavesley (G. H.), (M. D.) Branson and (L. E.) Hay. 1992. Using coupled atmospheric and hydrologic models to investigate the effects of climate change in mountainous regions. America Water Resources Association Annual Conference and Symposium, Managing Water Resources During Global Change, Reno, Nevada : 691 - 700.
- Leavesley (G. H.). 1994. Modelling the effects of climate change on water resources : A review. *Climatic Change* 28 : 159 - 177.
- Legesse (D.), (C. V.) Coulomb and (F.) Gasse. 2003. Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa: Case study Southern Central Ethiopia. *Journal of Hydrology* 275 : 67 - 85.
- Mann (M. E.), (R. C.) Bradley and (M. K.) Hughes. 1999. Northern hemisphere temperature during the past millennium : inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters* 26( 6) : 759 - 762.
- Mc Carthy (J. J.), (O. F.) Canziani, (N. A.) Leary, (D. J.) Dokken and (K. S.) White. 2001. Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, section 14.1.2.1.5.
- Mc Leman (R.) and (B.) Smit. 2003. Changement climatique, migration et sécurité. Publication du Service Canadien du Renseignement de Sécurité.
- Morin (G.) and (M.) Slivitzky. 1992. Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie. *Revue des Sciences de l'Eau* 5 : 179 - 195.
- Ouarda (T. B. M. J.), (P. F.) Rasmussen, (J. F.) Cantin, (B.) Bobee, (R.) Laurence, (V. D.) Hoang and (G.) Barabe. 1999. Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques de la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 12(2) : 425 - 448.
- Parry (M.). 2001. Le changement climatique en Europe : Rapport sur les effets potentiels et les adaptations : Résumé et Conclusion du projet ACACIA : Conférence sur Le climat futur : Causes et effets d'un changement annoncé. Conférence de la Société Météorologique de France, Toulouse (France).
- Planton (S.) and (J. C.) André. 2001 Le climat futur : Causes et effets d'un changement annoncé. Conférence de la Société Météorologique de France, Toulouse (France).
- Water UK. 2004. Le changement climatique et ses défis pour les opérateurs de services d'eau et d'assainissement. Publication en ligne du 29/10/2004 sur site [www.water.org.uk](http://www.water.org.uk) (Grande Bretagne)