

IMPACTS DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES SUR LE REGIME DES ECOULEMENTS DU FLEUVE SANAGA AU CAMEROUN, PROSPECTIVES POUR LE XXI^{EME} SIECLE

Daniel SIGHOMNOU, Luc SIGHA NKAMDJOU, Gaston LIENOU

Centre de Recherches Hydrologiques, BP 4110 Yaoundé, Cameroun

danielsighomnou@yahoo.fr

Alain DEZETTER, Gil MAHE, Eric Servat, Jean Emmanuel PATUREL, Jean-Claude OLIVRY

Institut de Recherche pour le Développement, Montpellier, France

Félix TCHOUA, Georges Emmanuel EKODECK

Département des sciences de la terre, Université de Yaoundé I, Yaoundé, Cameroun

RESUME

Les performances de deux modèles hydrologiques (GR2M et Yates) ont été analysées en utilisant les données d'observation du bassin versant de la Sanaga à Edéa. La meilleure reconstitution des débits est obtenue avec le modèle GR2M qui est alors utilisé pour simuler les futurs écoulements du fleuve à Edéa. Deux jeux de données construits à partir des données brutes du modèle climatique HadCM3 sont utilisés. Par rapport à la période 1971-2000, les deux scénarii prévoient une augmentation de précipitations moyennes annuelles sur le bassin pouvant atteindre +7,4 % dans le courant du XXI^{ème} siècle et dans le même temps une augmentation graduelle de l'évapotranspiration moyenne annuelle qui atteint 30% vers 2100. Par rapport à la même période de référence, les écoulements varient entre +4 et -20% (+18 à -93 mm/an en terme de lame écoulée sur le bassin) suivant le scénario. Si l'on se réfère aux débits non régulés de la période 1943-1969 par ailleurs reconnue pour son caractère humide dans la région, les deux scénarii testés montrent qu'une période comparable ne sera jamais retrouvée durant tout le XXI^{ème} siècle. Ils prévoient des débits annuels globalement inférieurs (-10 à -32%) tout au long de ce siècle, soit -52 à -162 mm/an en terme de lame écoulée. La planification des usages futurs des ressources en eau du bassin de la Sanaga devrait tenir compte de cette situation.

Mots clefs : changement climatique, modélisation hydrologique, GR2M, Cameroun, Sanaga, scénario climatique

INTRODUCTION

En raison de ses répercussions sur le milieu naturel et le développement socio-économique, les questions de variabilité climatique et leurs implications sur les ressources en eau sont placées depuis quelques temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde. Prévoir et caractériser l'impact de ces fluctuations sur les disponibilités en eau dans l'espace et dans le temps deviennent alors indispensables pour proposer des solutions adaptées aux projets de développement et à une gestion durable de l'environnement. De ce point de vue, les ressources en eau du bassin versant du fleuve Sanaga jouent un rôle très important sur le plan de l'économie du Cameroun. La Sanaga draine à elle toute seule le quart des ressources en eau du pays, produit maintenant près de 90% de l'énergie hydroélectrique du pays et dispose encore d'un important potentiel énergétique non exploité. Les autres usages de ses ressources vont des besoins *in situ* du milieu naturel, à l'agriculture irriguée et pluviale, l'eau potable, la navigation, l'industrie, la dilution d'effluents, les loisirs, etc.. Ces demandes sont différentes par leurs besoins en terme de degré de sensibilité aux variations, la saisonnalité des besoins, les exigences de qualité, etc. Dans ces conditions, il serait intéressant d'anticiper les impacts des fluctuations climatiques pour la planification et l'organisation des usages futurs.

Deux modèles de bilans hydrologiques (Yates et GR2M) calés et validés sur la base des observations de la période sans régulation (1943-1969) des écoulements de la Sanaga permettent une simulation fiable des écoulements de la période récente non jaugés et de se faire une idée de l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique dans le courant du XXI^{ème} siècle. Les prévisions de précipitations et d'évapotranspiration pour le XXI^{ème} siècle fournies par le modèle climatique HadCM3 sont utilisées pour des analyses prospectives. Des simulations à partir de deux jeux de données issus des prévisions de

ce modèle montrent une baisse croissante des écoulements moyens annuels par rapport à ceux de cette période connue pour son caractère humide dans la région.

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA SANAGA A EDEA, DONNEES ET METHODES

Avec un bassin versant dont la superficie est évaluée à 133 000 km², le fleuve Sanaga compte parmi les grands cours d'eau de l'Afrique tropicale et constitue le plus grand fleuve du Cameroun dont il couvre près du tiers de la superficie et draine près du quart (65 000 km³/an) des ressources en eau. Presque entièrement camerounais, son bassin versant s'étend entre les parallèles 3°30 et 7°30 et couvre ainsi des régions passant du climat équatorial (à 4 saisons et une pluviométrie comprise entre 1600 et 4000 mm), au climat tropical à 2 saisons et une pluviométrie comprise entre 1600 à 1400 mm (Fig. 1).

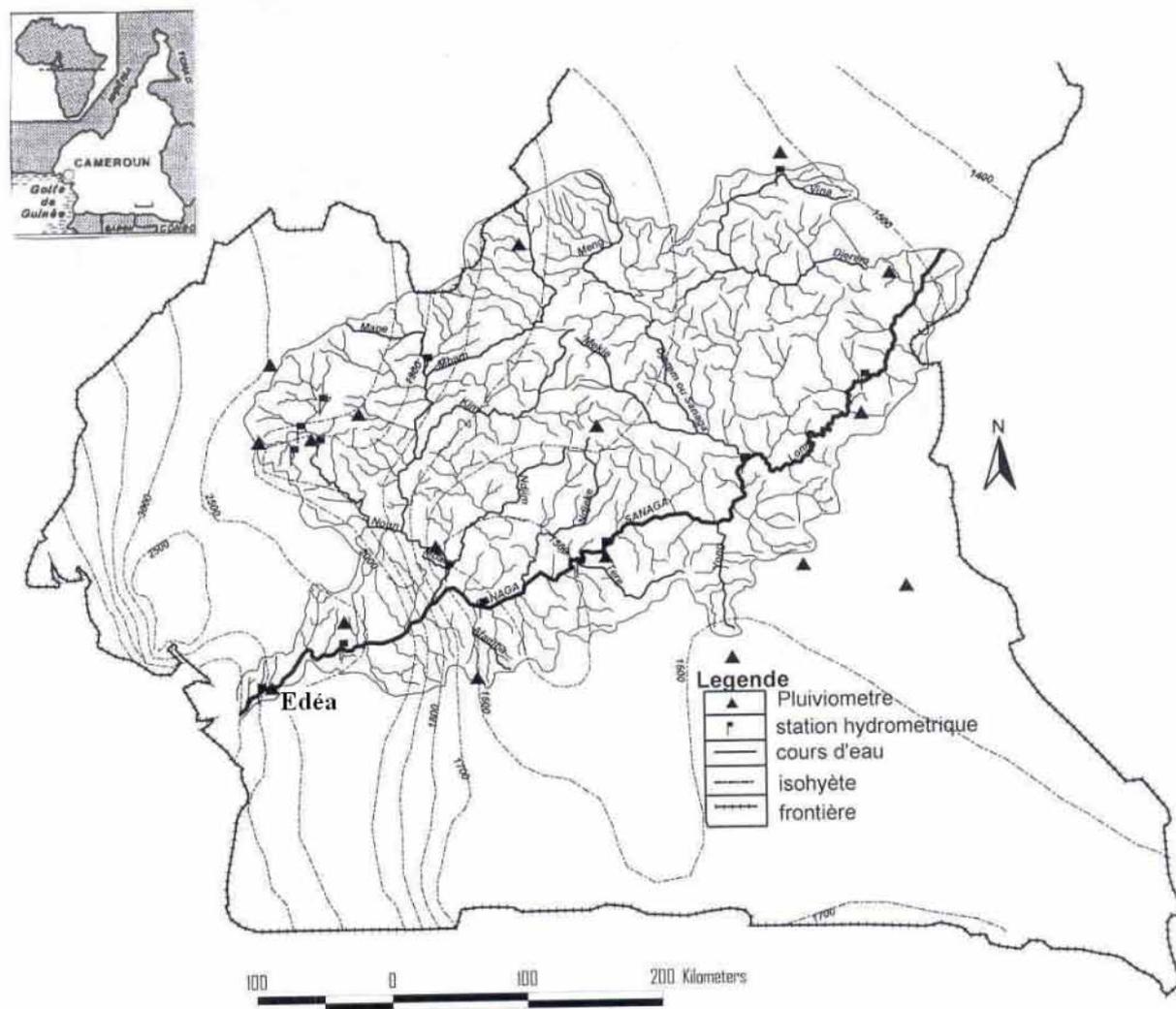


Fig. 1 : Bassin versant de la Sanaga à Edéa.

Les sols ferrallitiques qui occupent la quasi-totalité du bassin supportent une végétation qui passe de la savane arbustive (près des 2/3 du bassin versant) dans le Nord, à la forêt dense humide dans le Sud. La densité des populations y est tout aussi variée. Elle va des hauts plateaux de l'Ouest du pays où elle dépasse 200 habitants au km², aux régions presque vides de populations dans le centre du bassin (région de Yoko), en passant par les zones d'exploitations agro-industrielles (plantations de cannes à sucre) de la

région de Mbandjok. Les pôles de grandes activités socio-économiques sont quant à eux situés aux marges du bassin versant, notamment à Edéa du côté de l'exutoire. L'importance de ce fleuve sur le plan de l'économie du Cameroun est également considérable, puisqu'il dispose d'un potentiel énergétique extraordinaire et produit maintenant près de 90% de l'énergie hydroélectrique du pays.

Outre l'information hydropluviométrique, l'étude utilise des données d'évapotranspirations (ETP) et des données sur la capacité de rétention en eau des sols. Plus d'une vingtaine de stations hydrométriques ont été suivies sur la Sanaga, dont certaines depuis le début des années 1940. Ces observations, généralement de bonne qualité, se sont poursuivies régulièrement jusqu'au début des années 1980, mais elles sont arrêtées depuis près de deux décennies ou au mieux, se limitent à la seule période d'étiage à quelques stations jugées d'intérêt pour l'exploitation hydroélectrique. Trois barrages de retenue d'une capacité totale de 7 600 km³ sont actuellement en fonction sur son bassin, dont le premier depuis la fin des années 1960. Ils permettent la régulation du débit en vue d'une production énergétique efficiente, ce qui conduit à la modification du régime des écoulements naturels. Les observations hydrométriques utilisées dans l'étude sont celles de la station d'Edéa (un bassin versant de 131 500 km²) qui couvrent la période 1943-1983. Elles seront complétées jusqu'en 2000 par les données de simulation du modèle GR2M au moyen des données d'observation de précipitations et d'ETP déterminées par le Climatic Research Unit (CRU) à partir des données d'observation de températures. Si le suivi pluviométrique a commencé beaucoup plus tôt sur le bassin, les données d'observations utilisées dans l'étude (14 stations) se sont limitées à la période 1950-2000, par souci d'homogénéité des séries. Il en va de même pour les données d'observation de températures (une douzaine de postes) utilisées dans les calculs de l'ETP. Les données sur la capacité de rétention en eau des sols ont été tirées de la classification fournie par la FAO (Dunne and Willmott, 1996), suivant une méthodologie mise au point par le groupe *Vahyne* de l'IRD (Ouedraogo, 2001). Pour permettre de faire des comparaisons, des données d'ETP, de précipitations et de capacité en eau des sols issues du Climatic Research Unit ont été également utilisées.

LES MODELES PLUIE-DEBITS

La typologie des modèles mathématiques utilisés en hydrologie de nos jours est très variée. Les modèles distribués (ou maillés) et ceux dérivés de l'analyse des systèmes comptent parmi les plus évolués. Les modèles GR2M et de Yates utilisés dans notre étude appartiennent à ces deux groupes. Ils ont déjà été utilisés avec succès sur de nombreux bassins versants de la région tropicale africaine (Ouedraogo, 2001 ; Nkankam Kamga, 2001 ; Ardoïn, 2004 ; Sighomnou, 2004). Les performances des deux modèles sur le bassin versant de la Sanaga à Edéa sont satisfaisantes, avec un avantage pour GR2M. On se référera à Makhlof (1994) et Yates (1997) pour la description des modèles et leur schéma de fonctionnement qui peut se résumer comme suit : le bassin versant est discrétisé en unités spatiales (mailles d'un demi-degré carré, soit environ 55 x 55 km) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont vers l'aval. Les lames d'eau écoulées mensuelles en tout point de l'espace sont estimées à partir d'informations disponibles sur la région considérée. A partir de grilles de précipitations, d'évapotranspiration potentielle et de données liées au stockage de l'eau dans le sol, on simule par le modèle les variations de l'humidité du sol, de l'évapotranspiration réelle et de l'écoulement. Celles-ci sont calculées pour chaque maille, indépendamment les unes des autres, et chaque mois. L'écoulement total à l'exutoire de chacun des bassins est obtenu par sommation des contributions élémentaires pondérées des différentes mailles qui les constituent.

Pour permettre de faire des comparaisons, trois grilles mensuelles de pluies construites à partir de données pluviométriques de deux origines différentes ont été utilisées dans le modèle. Un premier échantillon est constitué des grilles de pluie mensuelle fournies par le Climatic Research Unit (CRU), alors que les deux autres sont obtenues à partir de l'ensemble des données d'observation des pluies ponctuelles enregistrées au niveau des 14 postes d'observation signalés plus haut. Une première grille établie par la méthode de spatialisation de l'information par le procédé de krigeage du logiciel Surfer et une deuxième créée à partir des mêmes données par la méthode d'interpolation de Thiessen. Les données d'ETP utilisées (fournies par le CRU) sont constituées par quatre séries de grilles mensuelles générées à partir d'observations climatologiques de la région : une première grille de valeurs d'ETP est calculée par la méthode de Penman (1956), une deuxième déterminée par la méthode décrite par Shuttleworth (1994), une troisième par la méthode décrite par Thom et Oliver (1977), alors que la quatrième grille de données est générée par la FAO (Food and Agriculture Organization). Quatre séries de grilles mensuelles de données sur la capacité de rétention en eau du sol ont été testées. Trois d'entre elles ont été construites à

partir de la carte des sols diffusée par la FAO alors que la quatrième est fournie par le CRU. En s'appuyant sur la granulométrie du sol, le couvert végétal, les valeurs de la profondeur racinaire et les valeurs limites de succion, la FAO définit sept classes de capacité en eau classées de A à F, auxquelles elle s'ajoute une dernière classe correspondant aux "Zones Humides" ou *Wetlands*. Chaque classe de sols comprend des valeurs minimales et maximales de capacité en eau. A partir de ces valeurs, trois grilles ont été construites en utilisant respectivement les valeurs minimales, moyennes et maximales de la capacité en eau des sols. Une quatrième grille est obtenue à partir d'un procédé qui utilise la fonction de pédo-transfert décrite par Reynolds *et al.* (1999) pour modifier la capacité en eau des sols fournie par la FAO.

Performances des modèles et validation des résultats

Les modèles ont été calés et validés sur la base des observations de la période sans régulation (1943-1969) des écoulements de la Sanaga. Les valeurs du critère de Nash obtenues avec les meilleures combinaisons de données en phase de validation des modèles sont de 88% (contre 93% en phase de calage) pour le modèle GR2M contre 62% pour le modèle de Yates. Les performances du GR2M sont par conséquent meilleures sur notre bassin. La Fig. 2 en présente une illustration graphique.

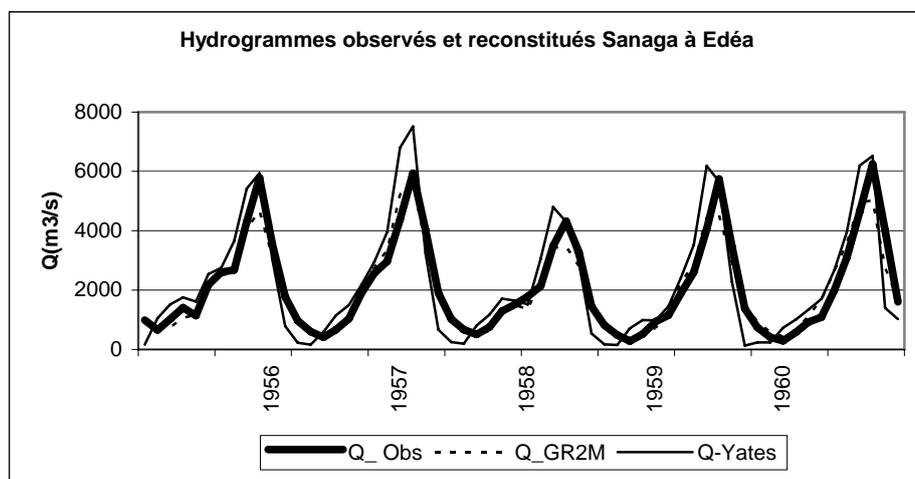


Fig. 2: Comparaison des débits observés et simulés par les deux modèles.

Les grilles de pluies calculées par la méthode du krigeage et celle de Thiessen donnent des résultats comparables pour les deux modèles, avec un léger avantage pour la méthode du krigeage. Pour les données d'ETP par contre, bien que les différences entre les résultats obtenus par les différentes méthodes signalées plus haut soient assez importantes (jusqu'à 60%), la comparaison des résultats obtenus par le modèle GR2M avec les quatre grilles d'ETP montre des différences peu significatives. Le modèle de Yates semble par contre plus sensible aux données d'ETP, mais reconstitue moins bien les écoulements sur le bassin. Pour ce qui concerne les données relatives à la capacité en eau des sols, les grilles construites à partir des valeurs de la capacité de rétention maximale en eau du sol conduisent aux meilleurs résultats sur notre bassin. Des efforts sont cependant encore à réaliser pour une meilleure estimation des paramètres de nos deux modèles dont l'ETP et la capacité en eau des sols en particulier. Toutefois, si de nombreux aspects de la question restent à documenter, les conclusions de nombreux travaux sur le sujet sont globalement encourageantes.

En effet, en dépit de leurs insuffisances, parallèlement aux efforts maintenus en vue de l'amélioration de leurs performances, les modèles hydrologiques sont de plus en plus utilisés de nos jours. En particulier, l'actualité des questions de changement climatique et l'importance de la prévision de leurs effets sur les ressources en eau conduisent à s'intéresser à leurs impacts sur le régime des écoulements de même que sur leurs relations avec les activités socio-économiques. La comparaison entre les débits observés à Edéa et ceux reconstitués au moyen du modèle GR2M, qui permet la meilleure reconstitution des hydrogrammes des écoulements, montre des différences (entre 2 à 10%, soit 6% en moyenne) qui sont voisines de la marge d'erreur sur la mesure. La robustesse de ce modèle est confirmée par des résultats similaires enregistrés sur d'autres bassins versants de la région tropicale africaine. Nous l'utiliserons par conséquent pour estimer les flux hydriques du XXI^{ème} siècle sur la Sanaga à Edéa. Cette estimation sera

réalisée sur la base des informations fournies par des modèles climatiques. Avant d'aborder cet aspect de l'étude, nous analyserons brièvement l'impact des fluctuations climatiques récentes sur les écoulements de la Sanaga.

IMPACT DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES RECENTES SUR LES ECOULEMENTS DE LA SANAGA.

L'étude de la variabilité des écoulements se limitera à l'analyse des modules. Les données analysées sont constituées des observations des débits naturels de la Sanaga de la période 1943-1969 et des débits simulés au moyen du modèle GR2M à partir des données d'observation de précipitations et d'ETP de la période 1970-2000. Ces derniers sont, considérés comme suffisamment représentatifs des écoulements (annuels) naturels de cette période pour permettre de se faire une idée de l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique du fleuve. La Fig. 3 montre l'évolution des modules observés et reconstitués de la période 1943-2000.

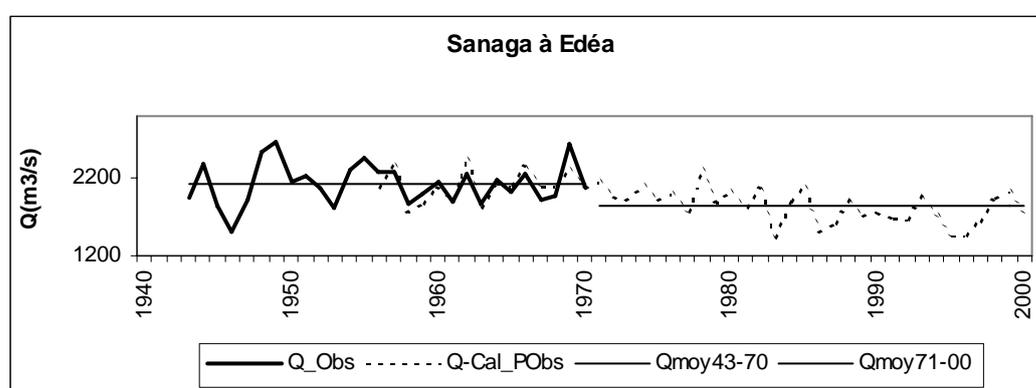


Fig. 3: Variations des écoulements de la Sanaga à Edéa depuis 1943.

Comme la majeure partie des cours d'eau du pays, après deux décennies (1950 et 1960) relativement humides, on note une baisse des modules à partir du début de la décennie 1970. La baisse est de plus en plus marquée à partir de la décennie 1980 et se poursuit jusqu'à la fin du siècle en dépit de quelques années humides. La comparaison des écoulements des périodes d'avant et après 1970 montre une diminution du module de la Sanaga de l'ordre de 15% après cette date. Cette valeur est voisine du déficit moyen (-14%) enregistré sur les cours d'eau de la région Sud du Cameroun (Sighomnou, 2004).

PROSPECTIVES DES ECOULEMENTS DE LA SANAGA POUR LE XXI^{EME} SIECLE

Il est indispensable de disposer des informations sur les prévisions des modèles climatiques relatives aux données d'entrée des modèles hydrologiques pour les analyses prospectives des écoulements de la Sanaga. Si les prévisions des précipitations et d'ETP sont fournies par ces modèles, aucune information n'est disponible sur la capacité en eau des sols. Dans ces conditions, et bien que cela soit assez restrictif, nous avons fait l'hypothèse de la conservation de la capacité de rétention en eau des sols dans une situation voisine de leur état actuel, au cours du XXI^{eme} siècle. D'autre part, des différences très importantes existent entre les données de prévision de précipitations et d'ETP fournies par les modèles climatiques. Il conviendrait d'en tenir compte dans l'interprétation des résultats.

Les modèles de prévision climatique

En se basant sur la compréhension actuelle des processus qui régissent le système solaire, de nombreuses représentations mathématiques simplifiées du système climatique de la terre ont été proposées. Il s'agit de Modèles de la Circulation Générale (MCG) qui permettent de simuler les réactions du système climatique

et prévoient son évolution future. Les meilleurs résultats sont obtenus de nos jours avec les Modèles Couplés Atmosphère-Océans. Ces modèles utilisent des scénarios de l'évolution future des agents de forçage (tels les gaz à effet de serre et les aérosols), pour établir un ensemble de projections décrivant ce qui pourrait se produire à l'avenir en matière de changement climatique. Selon les résultats d'analyses reconnues d'une grande fiabilité, depuis le début de l'ère industrielle, l'effet de serre naturel est renforcé par diverses émissions d'origine humaine, ce qui contribue à accentuer le réchauffement de la surface de la terre. Le troisième rapport (IPCC, 2001) d'évaluation de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), sert de référence de nos jours pour les changements observés et les projections pour l'évolution future du système climatique. On y retrouvera plus de détails sur ces modèles. Bien que leurs performances soient encore peu satisfaisantes, ces derniers sont les seuls moyens utilisés de nos jours pour évaluer l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau et partant, sur les ressources en eau. Les performances de quatre modèles climatiques (HadCM3, CSIRO-Mk2, ECHAM4/OPYC3 et NCAR-PCM) parmi ceux recommandés par l'IPCC, sont classées parmi les meilleures dans notre région d'étude (Arnell *et al.*, 1999 ; Hulme *et al.*, 2000 ; Mkankam Kamga, 2000). En raison de la disponibilité des données simulées sur la période 1950-2099 qui inclue la période observée (1950-2000) sur notre bassin, le modèle HadCM3 a été retenu dans le cas de notre étude. Les données analysées sont celles basées sur le scénario d'émission A2 (variations des températures comprises entre 1,5 et 4,5°C d'ici la fin du siècle), qui considère un XXI^{ème} siècle où aucune mesure concertée mondiale n'est prise pour enrayer l'augmentation des gaz à effet de serre. Ce modèle comme tous les autres, ne reproduit cependant pas correctement les observations de la période instrumentée, notamment celles des précipitations : volumes annuels précipités, leur variabilité interannuelle et la dynamique des saisons. En général, les observations sont surestimées ou sous-estimées en fonction des modèles et du scénario d'émission utilisés. Deux procédés de construction de grilles de précipitations et d'ETP proposés par Ardoin-Bardin (2004) permettent cependant d'obtenir des valeurs réalistes qui respectent la dynamique de répartition mensuelle des deux paramètres. En utilisant les informations disponibles sur les trois dernières décennies (1970-2000) comme données de référence, le premier procédé génère des séries de données qui prennent en compte les prévisions du modèle climatique pour chaque mois donné et les écarts (ou Anomalies) entre ces prévisions par rapport à la valeur moyenne calculée sur la période de référence (Scénario A). Le second procédé prend en compte les variations à trois horizons définis par l'IPCC (2020, 2050 et 2080) et calcule les taux de variation des précipitations et d'ETP mensuelles par rapport aux informations disponibles sur la période 1970-2000 également retenue comme référence (Scénario B). Les deux jeux de données de précipitations et d'ETP ainsi créés sont utilisés pour la simulation des écoulements sur notre bassin. Les détails sur le procédé de construction des grilles de données des différents paramètres sont décrits dans la référence citée ci-dessus. Il convient cependant de rester conscient des limites et des incertitudes qui restent à lever sur les prévisions des modèles climatiques. Pour estimer la fiabilité des prévisions du modèle pour notre région d'étude, nous avons fait une comparaison entre les résultats de simulations du climat passé et actuel avec les observations sur le bassin de la Sanaga. Les prévisions du scénario A, utilisé dans notre étude, sur la période 1956-2099 qui inclut la période d'observation ont été utilisées. La Fig. 4 montre une comparaison entre les hydrogrammes observés et ceux reconstitués à partir des données observées et celles prévues par le modèle climatique pour une même période.

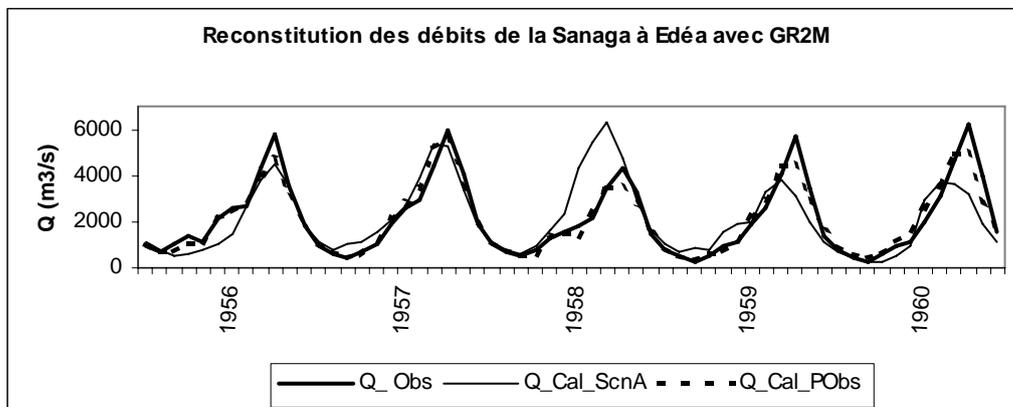


Fig. 4: Comparaison débits observés (Q_{Obs}) et reconstitués à partir des pluies observées ($Q_{\text{cal_PObs}}$) et celles prévues par le scénario A ($Q_{\text{cal_ScnA}}$) pour la même période.

La différence entre les hydrogrammes observés et ceux reconstitués à l'aide des grilles d'ETP et de précipitations prévues par le modèle climatique peut être très importante, mais dans l'ensemble, les hydrogrammes simulés conservent l'allure générale des observations (coefficient de corrélation mensuelle de 61%). D'autre part, si des incertitudes très importantes peuvent subsister entre des informations relatives à des faibles pas de temps, les modèles de prévision donnent une idée acceptable des tendances générales de l'évolution des écoulements sur des durées suffisamment grandes pour intégrer les fluctuations naturelles des débits. Ces résultats constituent par conséquent une hypothèse valable de travail qu'il conviendrait d'affiner à mesure que les modèles climatiques vont s'améliorer.

SYNTHESE DES RESULTATS

Le tableau 1 présente, suivant divers horizons, les taux de variation des précipitations, de l'ETP et des écoulements de la Sanaga à Edéa d'après les prévisions des deux grilles de données testées, alors que la Fig. 5 présente leur évolution dans le temps.

Tab. 1 : Variation (%) des paramètres du bilan hydrologique de la Sanaga à Edéa par rapport à la période 1971-2000 suivant deux scénarii.

	Horizon 2020		Horizon 2050		Horizon 2080		Horizon 2095	
	Scen_A	Scen_B	Scen_A	Scen_B	Scen_A	Scen_B	Scen_A	Scen_B
Précipitations	+3,2	+0,4	+1,5	+1,8	+0,8	+4,8	+3,4	+7,4
ETP	+5,0	+6,3	+11	+10	+21	+21	+33	+26
Écoulements	+3,8	+0,9	-4,3	-0,5	-15	-1,4	-20	+1,1

On note dans l'ensemble que les données issues des deux modes de construction sont différentes entre elles. Après une période 2000-2050 où les précipitations moyennes sur le bassin restent globalement comparables à celles de la période récente (1971-2000), une légère reprise s'amorce pour atteindre un maximum de l'ordre de +7% vers la fin du XXI^{ème} siècle pour le scénario B. L'ETP moyenne annuelle croît par contre graduellement, suivant l'ensemble des scénarii, pour atteindre un maximum de +26 à +33% suivant le cas vers la fin du siècle. Par rapport à la même période de référence, les écoulements varient entre +4 et -20% (soit +18 à -93 mm/an en terme de lame écoulée sur le bassin) suivant le scénario.

En raison de la régulation des débits de la Sanaga à partir de 1970, les variations des écoulements ont été également calculées par rapport à la période 1943-1969 connue dans la région pour son caractère humide. Les deux scénarios testés prévoient des écoulements plus faibles (-10 à -32%, soit -52 à -162 mm/an en terme de lame écoulée) que ceux de cette période tout au long du XXI^{ème} siècle.

Les observations des différents paramètres ainsi que les prévisions fournies par un des deux scénarii pour la période actuelle sont également présentées dans la figure à titre de comparaison. Il en ressort que des différences importantes peuvent exister entre les prévisions et les observations.

Impacts sur l'utilisation des ressources en eau.

La planification des usages des ressources en eau de ce bassin au cours du XXI^{ème} siècle devrait tenir compte de ces principales conclusions. Les eaux de la Sanaga sont utilisées de nos jours principalement pour l'hydroélectricité. Les autres principaux usages de la ressource vont de la demande *in situ* du milieu naturel, à l'agriculture irriguée et pluviale. Le développement de l'agriculture devrait tenir particulièrement compte d'une pluviosité qui devrait rester globalement proche de celle de la période récente pour une évapotranspiration plus importante.

De ce point de vue et en raison de son impact positif sur le rendement agricole, il est fort envisageable que le potentiel important des terres irrigables disponibles sur le bassin soit mis à profit dans un proche avenir. Des études montrent (Sharma, 2003) qu'un accroissement de la température de 3°C conduit à une augmentation de l'ordre de 26% des besoins en eau d'irrigation, en raison de l'accroissement de

l'évapotranspiration. La demande en eau pour le secteur agricole devrait en conséquence être beaucoup plus importante, de même que celle du milieu naturel.

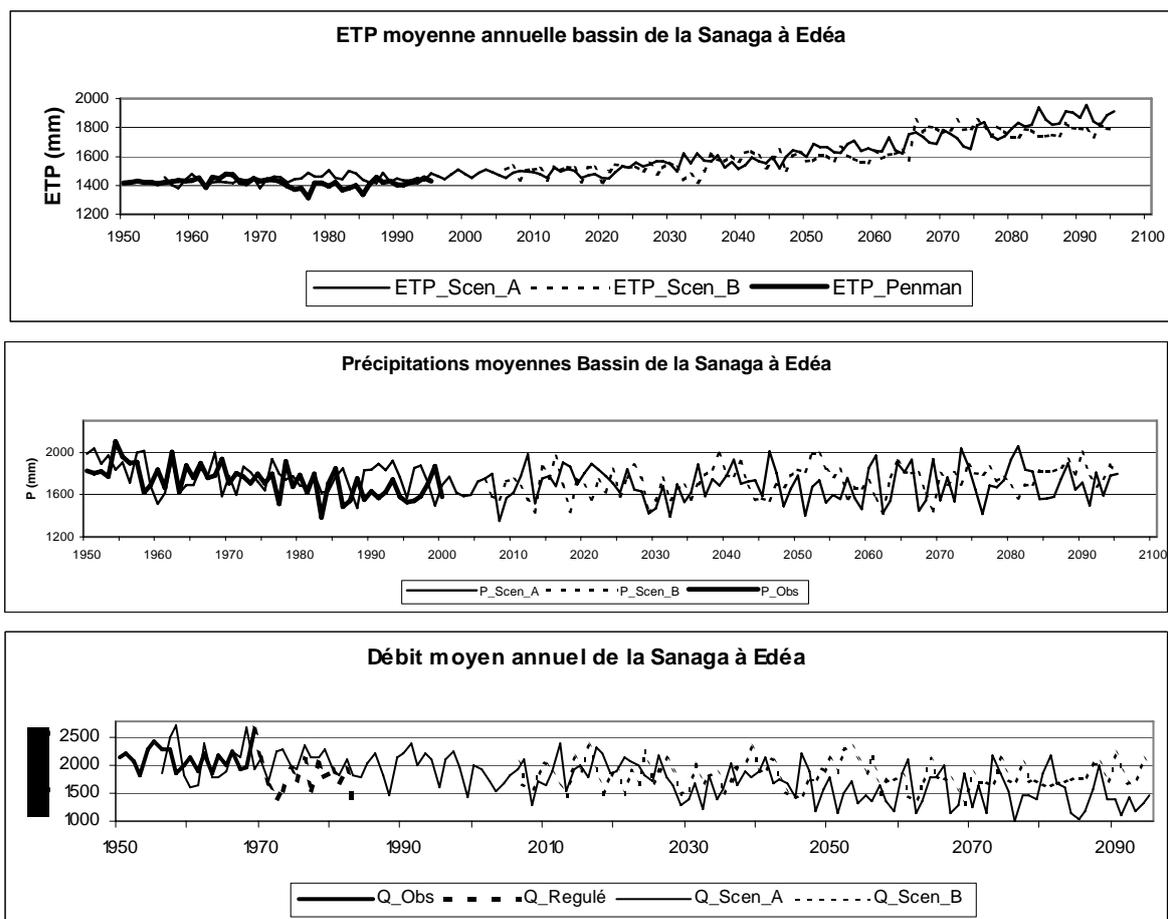


Fig. 5: Evolution des paramètres du bilan hydrologique de la Sanaga suivant les scenarii en regard des valeurs observées, de haut en bas : ETP (mm), Pluie (mm), débit (m^3s^{-1}).

Cette situation devrait contribuer à accroître la baisse des écoulements. Il conviendrait d'en tenir compte dans l'exploitation des aménagements en cours et en projet sur la Sanaga. La variété des processus en œuvre dans les modèles climatiques, dans les bassins ainsi que dans leur agrégation temporelle et spatiale est cependant telle que les conclusions peuvent différer profondément d'un modèle à l'autre et d'un bassin à un autre. En particulier, les conclusions dépendent fortement des "images du futur possible" que proposent les scenarii climatiques. Nos analyses permettent cependant de se faire une idée des prévisions en terme de moyenne et de fréquence de distribution des variables climatiques et hydrologiques étudiées sur notre bassin.

CONCLUSION

Après une analyse des performances de deux modèles hydrologiques (GR2M et Yates) sur le bassin de la Sanaga à Edéa, la meilleure reconstitution des débits est obtenue avec le modèle GR2M. En s'appuyant sur les résultats de simulation de ce modèle, deux jeux de données construits à partir des données brutes du modèle climatique HadCM3 sont utilisés pour évaluer l'impact des changements climatiques futurs sur l'évolution des ressources en eau de la Sanaga. Par rapport à la période 1971-2000 les deux scenarii utilisés prévoient des variations de précipitations moyennes annuelles sur le bassin qui vont de 0 à +7,4 % dans le courant du XXI^{ème} siècle. Contrairement aux précipitations, l'évapotranspiration moyenne annuelle augmente graduellement pour atteindre un taux d'accroissement de plus de 30% vers 2100. Par rapport à la même période de référence, les écoulements varient entre +4 et -20% (+18 à -93 mm/an)

suivant le scénario. Si l'on se réfère aux débits non régulés de la période 1943-1969 par ailleurs reconnue pour son caractère humide dans la région, les deux scénarii testés montrent qu'une période comparable ne sera jamais retrouvée durant tout le XXI^{ème} siècle. Ils prévoient des débits annuels globalement inférieurs (-10 à -32%) tout au long du XXI^{ème} siècle, soit -52 à -162 mm/an en terme de lame écoulée sur le bassin. La planification des usages futurs des ressources en eau du bassin de la Sanaga devrait tenir compte de cette situation.

REFERENCES

- Ardoin-Bardin, S. (2004) *Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne*. Thèse de doct. Univ. Montpellier II, France. 440 p.
- Arnell, N.W. (1999) Climate change and global water resources. *Global Environment Change*, 9, S31-S49.
- Arnell, N.W., Reynard, N.S. (1996) The effect of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *J. Hydrol.*, 183 397-424.
- Dunne, K.A. and Willmott, C.J. (1996) Global distribution of plan-extractable water capacity of soil. *J. Climatol.*, 16, 841-859.
- Hulme, M., Wigley, T.M.L., Barrow, E.M., Raper, S.C.B., Centella, A., Smith, S., Chipansky, A.C. (2000) *Using a Climate Scenario Generator for Vulnerability and Adaptation Assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook*. Climatic Research Unit, Norwich, UK, 52 p.
- IPCC (2001b) *Climate Change 2001 : Impacts, adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. (Ed. by McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S.) Cambridge University Press, UK, 1032 p.
- Makhlouf, Z. (1994) *Compléments sur le modèle Scen-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres*. Thèse de doctorat, Université Paris - Sud, France, 413 p.
- Mkankam Kanga, F. (2001) Impact of greenhouse gas induced climate change on the runoff of the upper Benue River (Cameroon). *J. Hydrol.*, 252, 145-156.
- Mkankam Kanga, F. (2000) Validation of general circulation climate models and projections of temperature and rainfall change in Cameroon and some of its neighbouring areas. *Theor. Appl. Climatol.*, 67, 97-107.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models. Part I : a discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 282-290.
- Olivry, J.C. (1986) *Fleuves et rivières du Cameroun*. Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM, n° 9, 733 p.
- 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*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, France, 257 p.
- Penman, H. L. (1956) Evaporation : An introduction survey. *Netherlands J. Agri. Sci.*, 1, 9-29.
- Reynold, C.A., Jackson, T.J., Rawls, W.J. (1999) Estimating available water content by linking the FAO soil map of the World with Global Soil Profile Data bases and pedo-transfer Functions. *Proceedings of the AGU 1999 Spring Conf.*, Boston, MA. May 31 -June 4, 1999.
- Sharma, U.C. (2003) Impact of population growth and climate change on the quantity and quality of water resources in the northeast of India. *IAHS Pub.* 281, 349-357.
- Sighomnou, D. (2004) *Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, Université de Yaoundé I, Cameroun, 290 p.
- Shuttleworth, W.J. (1994) Evaporation. In: *Handbook of Hydrology* (ed. by R. D. Maidment), Chapter 4, McGraw-Hill.
- Thom, A.S., Oliver, H.R. (1977) On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. *Q.J.R. Met. Soc.*, 193, 345-357.
- Yates, D.N. (1997) Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J. Hydrol.*, 201, 289-310.

Climatic and anthropogenic impacts on the variability of water resources

Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau

22-24 November / novembre 2005
Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier
Montpellier, France

Programme / Programme
Papers / Communications
List of Participants / Liste des participants



International Hydrological Programme

IHP

IHP-VI | Technical Documents in Hydrology | No. 80
IHP-VI | Documents Techniques en hydrologie | No. 80





United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization

Organisation
des Nations Unies
pour l'éducation,
la science et la culture



International Hydrological
Programme (IHP)

*Programme hydrologique
international (PHI)*

Climatic and anthropogenic impacts on the variability of water resources

Impacts climatiques et anthropiques sur la variabilité des ressources en eau

International seminar / *Séminaire international*

22-24 November / *novembre* 2005
Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier
Montpellier, France

Programme / *Programme*
Papers / *Communications*
List of Participants / *Liste des participants*

Published in 2007 by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France

Publié en 2007 par le Programme hydrologique international (PHI) de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO)
1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France

IHP-VI Technical Document in Hydrology N°80
IHP-VI Document technique en hydrologie N°80

UNESCO Working Series SC-2007/WS/8

© UNESCO/IHP 2007

The authors are responsible for the choice and presentation of the viewpoints and information contained in their articles, which in no way commit UNESCO. The designations employed and the presentation of data throughout this publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

Les auteurs sont responsables du choix et de la présentation des points de vue et informations figurant dans leurs articles, lesquels n'engagent en aucune façon l'UNESCO. Les désignations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant à leurs frontières ou limites.

**Edition prepared by the group of authors and finalized by
Gil Mahé, Scientific Editor**
***Edition préparée par l'ensemble des auteurs et finalisée par
Gil Mahé, Editeur scientifique***

Publications in the series 'IHP Technical Documents in Hydrology' are available from /
Les publications dans la série 'Documents techniques en hydrologie du PHI' sont disponibles auprès de:

IHP Secretariat | UNESCO | Division of Water Sciences
1 rue Miollis, 75732 Paris Cedex 15, France
Tel: +33 (0)1 45 68 40 01 | Fax: +33 (0)1 45 68 58 11
E-mail: ihp@unesco.org
<http://www.unesco.org/water/ihp>