

UNIVERSITE DE YAOUNDE 1  
FACULTE DES SCIENCES



UNIVERSITY OF YAOUNDE 1  
FACULTY OF SCIENCE

**DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE**  
*LABORATOIRE DES SCIENCES GEOTECHNIQUES ET HYDROTECHNIQUES*

**ANALYSE ET REDEFINITION DES REGIMES CLIMATIQUES ET  
HYDROLOGIQUES DU CAMEROUN : PERSPECTIVES  
D'EVOLUTION DES RESSOURCES EN EAU**

**Thèse présentée et soutenue publiquement  
Le 13 octobre 2004**

par

**Daniel SIGHOMNOU**

Matricule : 02T281

*Docteur 3<sup>e</sup> cycle*

**Pour obtenir le grade de**

**Docteur d'Etat ès-Sciences Naturelles**

*Option : Sciences de l'Eau*

**Devant le jury composé de :**

**M. Félix TCHOUA**, Professeur, Université de Yaoundé I

Président

**M. Georges Emmanuel EKODECK**, Professeur, Université de Yaoundé I

Rapporteur

**M. Eric SERVAT**, Directeur de Recherche, IRD, Montpellier

Examineur

**M. Jean-Claude OLIVRY**, Directeur de recherche Emérite, IRD, Montpellier

Examineur

**M. Emmanuel NAAH**, Maître de Recherche, UNESCO Nairobi

Examineur

**M. Jean Paul NZENTI**, Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Examineur

**Mme Véronique KAMGANG K. B.**, Maître de Conférences, Université de Yaoundé I

Examineur



## TABLE DES MATIERES

<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>7</b>
<b>RESUME</b> (français, anglais).....	<b>9</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> ... ..	<b>13</b>
<i>CONTEXTE SCIENTIFIQUE</i> .....	<b>14</b>
<i>OBJECTIFS</i> .....	<b>15</b>
<b>CHAPITRE I : LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE, LEURS CONSEQUENCES SUR L'ENVIRONNEMENT ET LES NORMES HYDROPLUVIOMETRIQUES</b>	
<b>1.1 – INTRODUCTION</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2 - CIRCULATION GENERALE ET FLUCTUATIONS CLIMATIQUES</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR</b> .....	<b>23</b>
<b>1.4 - EVOLUTION DES PRECIPITATIONS</b> .....	<b>26</b>
1.4.1 - Spécificités de la sécheresse récente .....	<b>27</b>
1.4.2 – Caractérisation de la variabilité des précipitations .....	<b>30</b>
1.4.3 – Eléments d’explication de la sécheresse récente .....	<b>33</b>
<b>1.5 - EVOLUTION DES ECOULEMENTS</b> .....	<b>36</b>
1.5.1 - Eléments explicatifs de la variabilité hydrologique .....	<b>41</b>
<b>1.6 - IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIO-ECONOMIQUES</b> .....	<b>42</b>
1.6.1 – Impacts environnementaux .....	<b>42</b>
1.6.2 – Impacts socio-économiques .....	<b>45</b>
<b>1.7 - NORMES EN HYDROLOGIE</b> .....	<b>46</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>48</b>
<b>CHAPITRE II : CARACTERISATION DES REGIMES HYDROCLIMATIQUES DU CAMEROUN</b>	
<b>2.1 – INTRODUCTION</b> .....	<b>52</b>
<b>2.2 - POPULATION ET INDICES ECONOMIQUES</b> .....	<b>52</b>

<b>2.3 - LE MILIEU NATUREL</b> .....	<b>53</b>
<b>2.3.1 – Orographie</b> .....	<b>54</b>
<b>2.3.2 – Géologie</b> .....	<b>56</b>
<b>2.3.3 - Les sols</b> .....	<b>59</b>
<b>2.3.4 - La végétation</b> .....	<b>60</b>
<b>2.4 - LES CLIMATS DU CAMEROUN</b> .....	<b>62</b>
2.4.1 – Les observations climatologiques .....	<b>64</b>
2.4.2 – Les différentes unités climatiques .....	<b>65</b>
2.4.3 – La température, l'évaporation et l'humidité .....	<b>68</b>
2.4.4 – Les précipitations .....	<b>74</b>
2.4.4.1 - Précipitations journalières .....	<b>77</b>
2.4.4.2 – Types et structure des averses .....	<b>78</b>
2.4.5 – Les apports en eau météoriques .....	<b>78</b>
<b>2.5 - LES REGIMES HYDROLOGIQUES</b> .....	<b>79</b>
2.5.1 – Les observations hydrométriques .....	<b>80</b>
2.5.2 – Les principaux résultats de l'hydrométrie .....	<b>82</b>
2.5.3 – Les ressources en eau de surface .....	<b>85</b>
<b>2.6 – LES EAUX SOUTERRAINES</b> .....	<b>86</b>
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>87</b>
<b>CHAPITRE III : MANIFESTATIONS DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE AU CAMEROUN</b>	
<b>3.1 – INTRODUCTION</b> .....	<b>90</b>
<b>3.2 - LES DONNEES DE L'ETUDE</b> .....	<b>90</b>
<b>3.2.1 – DONNEES DE TEMPERATURE</b> .....	<b>90</b>
<b>3.2.2 – DONNEES PLUVIOMETRIQUES</b> .....	<b>94</b>
<b>Qualité des données pluviométriques</b> .....	<b>98</b>
<b>3.2.3 - DONNEES HYDROMETRIQUES</b> .....	<b>100</b>
<b>3.3 - VARIABILITE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE AU CAMEROUN</b> .....	<b>103</b>
<b>3.3.1 – METHODES D'ETUDE DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES</b> .....	<b>103</b>
<b>3.3.2 – MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE AU CAMEROUN</b> .....	<b>107</b>

3.3.2.1 – VARIABILITE DE LA TEMPERATURE .....	107
3.3.2.2 – VARIABILITE DES PRECIPITATIONS .....	115
3.3.2.2.1 – VARIABILITE DES PLUIES ANNUELLES .....	115
3.3.2.2.1.1 – Homogénéité des séries et calcul des déficits .....	120
3.3.2.2.1.2 - Evolution de la pluviosité au Cameroun au cours du XX <sup>ème</sup> siècle .....	123
3.3.2.2.2 – VARIABILITE DES PLUIES MENSUELLES ET SAISONNIERES .....	125
3.3.2.2.3 – VARIABILITE DU NOMBRE ANNUEL DE JOURS DE PLUIE .....	130
3.3.2.2.3.1 : Variabilité du nombre annuel de jours de pluie .....	131
3.3.2.2.3.2 : Variabilité du nombre annuel de jours de fortes pluies .....	133
<b>CONCLUSION</b> .....	134
3.3.2.3 – VARIABILITE DES ECOULEMENTS .....	135
3.3.2.3.1 – VARIATIONS DES MODULES .....	135
3.3.2.3.1.1 - Homogénéité des séries et calcul des déficits .....	137
3.3.2.3.1.2 - Evolution des écoulements au Cameroun au cours de XX <sup>ème</sup> siècle .....	139
3.3.2.3.2 – VARIATIONS DES DEBITS CARACTERISTIQUES .....	141
<b>CONCLUSION</b> .....	145
 <b>CHAPITRE IV : EVOLUTION DES NORMES HYDROPLUVIOMETRIQUES</b>	
<b>4.1 – INTRODUCTION</b> .....	<b>148</b>
<b>4.2 – METHODOLOGIE</b> .....	<b>149</b>
<b>4.3 – ANALYSE DES PRECIPITATIONS</b> .....	<b>150</b>
4.3.2 – Comparaison des normales pluviométriques sur 30 ans .....	151
4.3.3 – Comparaison de la normale 1951-1980 aux autres normales .....	154
4.3.4 – Comparaison des normales sur 30 ans aux valeurs moyennes 1941-2000 .....	156
4.3.5- Analyse des événements de diverses récurrences .....	158
4.3.5.1 – Comparaison des périodes 1941-2000 et 1951-1980 .....	158
4.3.5.2 – Comparaison des périodes 1941-2000 et 1971-2000 .....	159
<b>4.4 – ANALYSE DES ECOULEMENTS</b> .....	<b>163</b>
4.4.1- Analyse des débits moyens annuels .....	163
4.4.2- Analyse des débits caractéristiques .....	168

<b>CONCLUSION</b> .....	<b>173</b>
<b>CHAPITRE V : IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DU CAMEROUN, PERSPECTIVES D'EVOLUTION</b>	
<b>5.1 – INTRODUCTION</b> .....	<b>177</b>
<b>5.2 – LES RESSOURCES EN EAU DU CAMEROUN ET LEUR EVOLUTION</b> .....	<b>178</b>
5.2.1 – Evolution des apports en eau météorique .....	179
5.2.2 – Evolution des écoulements de surface .....	182
<b>5.3 - MODELISATION EN HYDROMETEOROLOGIE, ETAT DE L'ART ET CONTRIBUTION A LA MAITRISE DES RESSOURCES EN EAU ...</b>	<b>184</b>
<b>5.3.1 - Description des modèles utilisés</b> .....	<b>185</b>
5.3.1.1 – Description du schéma d'application des modèles .....	187
<b>5.3.1.2 - Application sur quelques bassins versants du Cameroun</b> .....	<b>192</b>
5.3.1.2.1 - Présentation des bassins versants testés .....	192
5.3.1.2.2 - Données d'entrée des modèles .....	195
5.3.1.2.3 – Calibration des modèles .....	199
5.3.1.2.4 – Comparaison de la performance des modèles .....	201
<b>5.3.1.2.5 – Quantification des écarts aux observations et validation des résultats</b> .....	<b>205</b>
<b>5.4 - LIMITES DE LA MODELISATION</b> .....	<b>211</b>
<b>5.5 – INCIDENCES DE L'EVOLUTION DU CLIMAT SUR LES HYDROSYSTEMES</b> .....	<b>213</b>
<b>5.5.1- Généralités sur les études de l'évolution du climat</b> .....	<b>213</b>
5.5.2 – Prévisions sur le plan global .....	216
5.5.3 – Analyse comparative et choix de scénarios d'évolution du climat .....	220
5.5.4 – Simulation de l'évolution des bilans hydriques .....	223
5.5.4.1 – Evolution des précipitations .....	224
5.5.4.2 – Evolution de l'évapotranspiration potentielle .....	227
5.5.4.3 – Evolution des écoulements .....	231
5.5.5 – Evaluation des incertitudes sur les prévisions .....	239
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>245</b>

<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>249</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>257</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES .....</b>	<b>281</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>283</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>286</b>

## **AVANT-PROPOS**

Au lendemain de la présentation de mes travaux de thèse de Doctorat troisième cycle en 1986, je m'étais juré d'enchaîner immédiatement avec la préparation d'un Doctorat d'Etat que je me promettais de terminer au plus tard dans les cinq années suivantes. C'est ainsi que de nombreux projets de thèse ont été préparés, mais avant cette étude aucun n'a pu être réalisé pour des problèmes d'ordre budgétaire. En raison de ces nombreux échecs, j'avais fini par céder au découragement. Je me consolais alors en me disant : *“à l'impossible nul n'est tenu”*, ce n'est pas la volonté qui m'aura manqué... C'était compter sans le *“harcèlement”* permanent de certains frères et amis qui croient en moi et qui m'ont exhorté à persévérer. Je me dois ici, avant toute chose, de leur dire ma reconnaissance de m'avoir encouragé à persévérer face à la difficulté, tant il est vrai qu' *“il ne faut jamais désespérer”*.

Le projet qui a abouti à la réalisation de cette étude a été monté en collaboration avec des membres de l'équipe du programme VAHYNE de l'IRD, dont les travaux s'inscrivent dans le cadre des activités du projet FRIEND-AOC du Programme Hydrologique International de l'UNESCO. La réalisation de l'étude a bénéficié du soutien financier des nombreuses institutions dont en particulier, la Coopération Française, l'UNESCO et le Centre de Recherches Hydrologiques pour les travaux de terrain, le Département de Soutien et Formation de l'IRD pour le financement des différents séjours scientifiques qui ont permis de traiter les données et rédiger le mémoire au Laboratoire HydroSciences Montpellier en France. Que tous les acteurs qui ont contribué à ce résultat final trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Le bon aboutissement de cette étude tient pour beaucoup à l'enthousiasme, le dévouement, les solides connaissances scientifiques ainsi que la maîtrise des outils de travail de l'équipe au sein de laquelle j'ai eu le privilège de travailler au Laboratoire HydroSciences Montpellier. Je pense en premier à Eric Servat qui a bien voulu m'accueillir au sein de cette institution qu'il anime. La réalisation de l'étude doit beaucoup à sa contribution à plusieurs niveaux, de la recherche du financement indispensable au suivi des recherches entreprises. La réalisation scientifique et technique de l'étude doit beaucoup aux contributions multiformes de ses collaborateurs. Alain Dezetter s'est particulièrement investi dans le volet modélisation et la récupération des données de modèles climatiques ; Gil Mahé et Jean-Emmanuel Paturel dans la relecture des manuscrits, Jean-François Boyer dans la fourniture des données complémentaires dont j'avais besoin pour compléter celles de la banque de données du Centre de Recherche Hydrologique, Claudine Dieulin dans la constitution des grilles de données spatialisées, le tracé des contours de bassins versants et la réalisation des cartes. Le soutien du personnel de son secrétariat et de bien d'autres collègues, spécialistes et amis que je ne peux tous nommer ici m'ont été d'un grand apport pour l'atteinte des objectifs fixés. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma reconnaissance pour les échanges fructueux et amicaux qui ont ponctué mes différents séjours au sein de leur équipe.



Mes activités professionnelles se déroulent au sein du Centre de Recherches Hydrologiques de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières. Les responsables successifs de ces différentes structures n'ont cessé de montrer leur intérêt pour mes travaux depuis ma prise de service en 1980. Leur soutien sans faille ainsi que celui de mes collègues et collaborateurs m'ont beaucoup apporté dans le déroulement de ma carrière d'hydrologue. Les nombreuses études que nous avons réalisées ensemble sont autant de souvenirs qui ont profondément marqué ma vie. Qu'ils trouvent dans cette étude qui apporte son tribut scientifique à la connaissance de l'hydrologie du Cameroun, un motif supplémentaire de satisfaction d'avoir contribué au développement de leur pays.

Depuis mes études universitaires, les professeurs Georges Emmanuel Ekodeck et Félix Tchoua ont porté un intérêt particulier à ma personne et à mes travaux. Je leur dois de m'avoir soutenu et encouragé à me convertir dans la spécialité des Sciences de la Terre après mon DEUG en Biochimie. Ma gratitude leur est naturellement acquise car c'est à eux que je dois mon orientation vers l'hydrologie, cette discipline qui m'a conduit à ce travail. Ils ont bien voulu par la suite s'intéresser à mes travaux de recherche et accepter la supervision de cette étude. Je leur suis particulièrement reconnaissant. Puissent-ils trouver dans ce travail un motif de satisfaction d'avoir su placer très tôt leur confiance en moi.

J'ai eu l'insigne honneur de bénéficier des conseils et encouragements de Jean-Claude Olivry et Emmanuel Naah dont les travaux de pionnier sur l'hydrologie du Cameroun ont servi de base aux analyses menées dans cette étude. Ils ont également accepté de relire mon manuscrit. Je leur dis merci pour cette importante contribution.

Qu'il me soit également permis de souligner la participation collective de beaucoup d'autres personnes : collègues, collaborateurs, frères et amis, trop nombreux pour être cités ici. Je leur sais gré des contributions multiformes qu'ils m'ont régulièrement apportées dans mes travaux et tout particulièrement dans la réalisation de cette étude et je tiens à leur dire tous mes remerciements.

Je réserverais une mention spéciale à ma famille et à mes frères et sœurs qui ont toujours su être à mes côtés en toutes circonstances, partageant ainsi tous les moments agréables, mais également de doute et de détresse. Je pense tout particulièrement à mes enfants qui ont tant souffert de mes multiples déplacements et absences au foyer en raison de mes activités professionnelles. Qu'ils trouvent dans ce travail un élément de consolation. Puissent-ils s'en inspirer et faire mieux que moi demain.

*Ce travail, je vous le dédie à tous, amis, frères, épouses, filles et fils dont le précieux soutien a permis l'aboutissement.*

## **RESUME**

La présente étude se propose d'approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques à l'échelle du Cameroun, pays bien connu pour la forte diversité de son orographie, de sa biogéographie et de ses régimes climatiques. Les analyses des données hydroclimatiques disponibles des cinquante dernières années ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique et de la sécheresse observée depuis une trentaine d'années en particulier, caractérisée par une hausse des températures (+0,2°C en moyenne depuis le début des années 1970 et +0,4°C au cours de la dernière décennie, par rapport à 1961-1990), la baisse généralisée des précipitations (-10% à -20% suivant les régions) ainsi que des écoulements (-15 % à -35% suivant les régions), sur l'ensemble du territoire camerounais, par rapport à la période de référence 1941-1970. Cette baisse généralisée met en cause les limites des zones climatiques habituellement admises sur le territoire. La cartographie des normales de la période 1971-2000 montre un glissement des isohyètes vers le Sud du pays qui peut atteindre 250 km, par rapport à la période 1951-1980. En dépit de quelques années humides enregistrées au cours de la décennie 90, au début des années 2000 aucun indice précis ne permet d'augurer une fin prochaine du phénomène au Cameroun.

Les conséquences des fluctuations climatiques actuelles et celles à venir sur les ressources en eau du pays sont considérables. Le territoire du Cameroun reçoit en moyenne 842 km<sup>3</sup> de précipitations par an, soit un peu moins de 1,8 millions de m<sup>3</sup> au km<sup>2</sup>. Le volume total des écoulements superficiels moyens annuels est évalué à 265 km<sup>3</sup> pour l'ensemble du pays, soit environ 30% des apports météoriques. La comparaison du volume des écoulements annuels de la période humide d'avant 1970 à celui de la période sèche 1971-1990 montre une différence de 24% pour l'ensemble des cours d'eau étudiés, cette différence pouvant dépasser le double pour les cours d'eau du Nord.

La prévision de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau s'est appuyée sur les données de prévision de pluies et d'ETP du modèle climatique HadCM3. La simulation des écoulements mensuels à l'aide de modèles pluie-débit est appliquée sur 5 bassins versants répartis dans différentes régions du pays. Les données brutes du modèle HadCM3 conduisent à des résultats sans commune mesure avec la réalité. Cependant, deux scénarios construits à partir de ces données permettent de se faire une idée réaliste des

conséquences de l'évolution du climat sur les ressources en eau du pays au courant du XXI<sup>ème</sup> siècle. Par rapport à la période 1971-2000 les scénarios utilisés prévoient sur les bassins versants testés, des variations de précipitations moyennes annuelles qui vont de -13 à +14 % d'ici à la fin du siècle. L'évapotranspiration moyenne annuelle augmente graduellement pour atteindre un taux d'accroissement de 45% vers 2100 pour les bassins versants de la partie Sud du pays, contre seulement 14% pour ceux du Nord. Par rapport à 1971-1990, des débits moyens annuels globalement plus importants (+14 à +80%, soit 12 à 122 mm/an) sont prévus au cours du siècle pour les cours d'eau de la partie Nord du pays. Des hausses (+1 à + 33%, soit 4 à 120 mm/an) et des baisses (5 à 13%, soit 24 à 59 mm/an) des écoulements sont prévues pour les cours d'eau de la partie Sud. Dans l'ensemble les prévisions des débits annuels sont globalement inférieures aux écoulements de la période humide d'avant 1970 pour les cours d'eau du Sud, alors qu'elles peuvent être supérieures dans certains cas pour ceux du Nord.

En définitive, la variété des processus en œuvre dans les modèles climatiques ainsi que dans les différents bassins est telle que les conclusions peuvent différer profondément d'un bassin (et/ou d'un scénario) à un autre. En particulier, les conclusions dépendent fortement des "images du futur possible" que proposent les scénarios climatiques. Les résultats obtenus constituent cependant une hypothèse valable de travail qu'il conviendrait d'affiner à mesure que les performances des modèles climatiques vont s'améliorer.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSE AND REDEFINITION OF CLIMATIC AND HYDROLOGICAL REGIMES IN CAMEROON : EVOLUTION PROSPECTS FOR WATER RESOURCES**

Cameroon is well known for its diverse orography, biogeography and climatic regimes which have a marked time-space influence on its rainfall and hydrologic regimes. A detailed up to date knowledge of this temporal and spatial variability is required to better constrain these variables in line with the recent observed trends throughout the country.

This study which analyses available hydro-climatic data over the last fifty years indicates considerable climatic variability marked by the dryness observed in Cameroon during the last thirty years. It specifically shows a 0.2 °C temperature rise on the average over the period 1971-2000 relative to 1961-1990 and a 0.4 °C rise over the last decade as well as a generalized decrease in rainfall (10 to 20%) and flow rates of (15 to 35%) compared to the reference period (1941-1970). This general decrease has resulted in a modification of the hitherto admitted zonal climatic trends for Cameroon. For example, the normalised rainfall for 1971-2000 shows an overall southwards shift of the isohyets, sometimes over a distance of 250 km relative to the aforementioned reference period. And despite the runs of wet years in the early 90's, the 2000 records show no precise end of trend in Cameroon.

The consequences of the current and future climatic fluctuations on the country's water resources are enormous: Cameroon receives on average, 842 km<sup>3</sup> of rainfall per annum, that is a little less than 1.8 million m<sup>3</sup> per km<sup>2</sup> and 265 km<sup>3</sup> annual surface runoff , that is 30% of the meteoric inputs. This annual runoff volume for 1971-1990 is 24% less than that for the pre 1970 wet years for all rivers studied in the forest zone and more than double for rivers in the northern part of the country.

Using predicted rainfall data and as well as ETP data of the climatic model HadCM3, an evaluation of the impact of climatic change on the country's water resources was attempted. Simulated monthly runoff was obtained using data generated from rainfall-runoff flow models applied to five drainage basins representing five different regions. Raw data from the HadCM3 model produced rather unrealistic results. However, two scenarios built from this data produced some realistic results regarding the country's water resources as well as the consequences of the current climatic evolution projected over the 21<sup>st</sup> century. Relative to the

period 1971-2000, the two scenarios predict for the tested basins, mean annual rainfall variations of -13 to 14 % and an increase in mean annual ETP of 45 % by the year 2100 for basins in the forest zone compared to 14 % for basins in the north. However, the mean annual flow rate trend (1971-1990) indicates an overall increase of 14 to 80 % (i.e. 12 to 122 mm/yr) for rivers in the north. In the south, an increase of 1 to 33 % (i.e. 4 to 120 mm/yr) as well as a decrease 5 to 13 % (i.e. 27 to 59 mm/yr) is envisaged.

Finally, the variety of the intervening processes in the climatic models as well as the diversity of the various river basins are such that the conclusions can either greatly differ from one basin to the other or from one scenario to the other. The conclusions strongly depend on the envisaged “possible future picture” proposed by the climatic scenarios. Our results do however constitute a valid working assumption that needs to be improved subsequent to improvements in the climatic models.

## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION

### *CONTEXTE SCIENTIFIQUE*

En raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel, les questions de changements et de variabilité climatiques sont placées depuis quelques temps au centre des préoccupations des scientifiques et des décideurs politiques dans le monde. Le cycle de l'eau étant l'une des composantes majeures du climat, les implications de ces changements sur les ressources en eau sont importantes. Caractériser et prévoir la variabilité de ces ressources dans l'espace et dans le temps deviennent alors indispensables pour proposer des solutions adaptées aux projets de développement.

Les conséquences de la variabilité des ressources en eau sur les activités humaines ont appelé l'attention de nombreux scientifiques et organisations dans le monde, sur la nécessité de reconsidérer les acquis antérieurs. Outre leur volonté de mieux comprendre le phénomène, l'un des premiers objectifs affichés est d'évaluer l'impact de ces changements sur les ressources en eau. Plusieurs études ont déjà été réalisées à des échelles continentales, régionales ou sous régionales. (Hulme, 1994 ; Van Dam, 1999 ; New *et al.*, 2000). Les études de la variabilité récente du climat bénéficient par ailleurs d'une dynamique forte sur le plan international autour des programmes CLIVAR (CLimate VARIability and predictability) et IPCC (International Panel on Climate Change). A l'échelle du continent africain, d'importantes études ont également été menées, tant sur le plan des fluctuations climatiques récentes (Bigot, *et al.*, 1998 ; Briquet *et al.*, 1997 ; 1999 ; Mahé *et al.*, 1999 & 2001 ; Mason, 2001 ; Nicholson, 2000 ; Olivry *et al.*, 1998 ; Ouedraogo, 2001 ; Paturel *et al.*, 1997 ; Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1998 & 2002 ; Servat *et al.*, 1999 ; Sircoulon, 1992) qu'au niveau paléoenvironnemental (Maley, 1981 ; Servat-Vildary, 1978 ; Street et Grove, 1979 ; Nicholson, 1980 ; Dubief, 1953 ; Roset, 1987 ; Bell, 1971 ; Evans, 1994 ; Rognon, 1989 ; Olivry et Chastanet, 1986). Ces études ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique, notamment la sécheresse observée depuis une trentaine d'années dans la sous région de l'Afrique tropicale. A l'échelle du Cameroun, si les déficits de pluie sont bien établis au Nord, les effets de la variabilité climatique sont moins visibles au Sud, où les ressources sont encore importantes dans l'absolu (Sigha-Nkamdjou *et al.*, 1998). Ceux-ci peuvent toutefois se révéler désastreux sur l'équilibre des écosystèmes et compromettre les activités humaines (Sigha-Nkamdjou *et al.*, 2002).

## OBJECTIFS

Devant la masse importante de travaux déjà réalisés sur le sujet dans la sous région de l'Afrique Tropicale en général et sur l'Afrique Centrale en particulier, on peut se demander s'il est encore utile de consacrer une étude comme celle que nous proposons ci-après à un sujet aussi largement documenté. La variabilité climatique semble présenter un caractère fortement hétérogène dans l'espace (Paturel *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1999). Dans ces conditions, les études globales portant sur un nombre limité de postes d'observation peuvent contribuer à gommer les particularités régionales qui sont pourtant très importantes dans la stratégie de lutte contre les effets de la sécheresse. Aussi, la maîtrise des impacts des fluctuations climatiques sur les ressources en eau du Cameroun (pays soumis à une diversité climatique allant de l'équatorial au sahélien), requiert une analyse plus approfondie. Si la compréhension de la variabilité des régimes hydroclimatiques du Cameroun exige nécessairement le rappel des acquis cités plus haut, la présente étude se propose avant tout d'approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques à l'échelle du pays et d'apporter des éléments de réponse quant à l'implication de la variabilité climatique sur la disponibilité des ressources en eau dans les différentes zones climatiques du pays. En effet, le Cameroun présente une forte diversité orographique, biogéographique et de régimes climatiques, en raison de son extension en latitude, de sa localisation au contact des domaines climatiques ouest et centre-africains, et de sa situation au creux du Golfe de Guinée, important carrefour de transfert d'énergie entre le continent africain et l'Atlantique. A travers cette diversité de climats et de paysages, le pays offre en outre une grande opportunité pour une analyse comparative de la variabilité des ressources en eau en fonction des paysages climatiques, notamment suivant les grands axes nord-sud et de la côte vers l'intérieur du pays.

Sur un tout autre plan, la péjoration climatique ayant rendu obsolètes les études statistiques antérieures, les aménagements semblent ne plus répondre aux besoins de rentabilité escomptés. On cherchera alors à déterminer, dans les conditions climatiques actuelles, de nouveaux paramètres hydrologiques nécessaires pour réviser la rentabilité des aménagements antérieurs ou envisagés.

Les travaux d'Olivry (1986) sur les fleuves et rivières du Cameroun et ceux de Suchel (1987) ont jeté les bases de la climatologie et de la maîtrise des ressources en eau du pays. La présente étude se situera dans le contexte actuel, notamment la décennie 1980 reconnue



comme la plus déficitaire du siècle, en complétant les résultats déjà obtenus par ces auteurs pour la période d'avant 1980. Elle requiert par conséquent la mise à jour des données hydrologiques et pluviométriques des décennies 80 et 90. Ceci nécessitera un important travail de recouvrement de données. En effet, une importante masse de données hydropluviométriques a été acquise sur l'ensemble du pays depuis les 20 dernières années. Il sera donc nécessaire de reconstituer et d'homogénéiser ces données issues de sources diverses. Parallèlement à ces travaux de reconstitution et d'homogénéisation, l'ensemble des données collectées sera organisé et stocké dans une banque, contribution aux efforts entrepris par l'IRD et par les hydrologues de l'Afrique Centrale et de l'Afrique de l'Ouest dans le cadre du projet FRIEND AOC de l'UNESCO, pour la constitution d'une banque de données régionale indispensable pour la maîtrise des ressources en eau de la région. Outre la base de données, l'étude proprement dite s'articule autour de cinq axes principaux :

- Analyse et compréhension des aspects mondiaux de la variabilité et des changements climatiques et de leurs conséquences sur l'environnement ;
- Présentation des éléments de base de l'étude, telles qu'elles ressortent de la caractérisation des régimes hydroclimatiques du pays documentée par les travaux antérieurs ;
- Etude de l'impact de l'instabilité du climat sur les régimes hydropluviométriques du Cameroun : description et suivi de la variabilité hydrologique et climatique sur l'ensemble du territoire, caractérisation des ruptures éventuelles dans les séries chronologiques, comparaison avec d'autres régions d'Afrique ;
- Notion de "norme" des variables hydroclimatiques et étude des débits caractéristiques ;
- Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau du Cameroun, perspectives d'évolution.

**CHAPITRE I : LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN  
AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE,  
LEURS CONSEQUENCES SUR  
L'ENVIRONNEMENT ET LES NORMES  
HYDROPLUVIOMETRIQUES**

## 1.1 - INTRODUCTION

Le climat se définit comme l'ensemble des phénomènes (pression, température, humidité, précipitations, ensoleillement, vent, etc.), qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et de son évolution en un lieu donné. Mahé (1993) précise, citant lui-même Gibbs (1987), que le terme "climat" est utilisé pour indiquer la probabilité statistique d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région donnée pendant une certaine période. Il diffère en cela du terme "temps" utilisé pour indiquer l'état de l'atmosphère. La variabilité naturelle du climat se définit comme la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles de ses différentes caractéristiques par rapport aux moyennes temporelles de référence. Elle est suscitée par les fluctuations dans le temps de l'énergie émise par le soleil ou venant d'autres éléments du système climatique, le positionnement des masses d'air, les éruptions volcaniques, les changements dans la distribution des courants océaniques ou des températures à la surface des mers (TSM), dont l'une des expressions les plus importantes est connue sous le terme ENSO (*El Niño - Southern Oscillation*), etc.. Cette fluctuation fait référence à la variabilité inhérente à tout processus stochastique et implique alors l'hypothèse de stationnarité ; et suppose par conséquent l'absence de changements climatiques majeurs tels que ceux décrits par les paléontologues dans le passé à l'échelle des temps géologiques.

Au-delà de cette variabilité naturelle du climat, on note que depuis le début de l'ère industrielle, la température de la planète montre une tendance à la hausse qui n'est pas expliquée par les raisons évoquées plus haut. C'est ce qu'on a appelé "changement climatique", phénomène dû essentiellement à l'activité humaine qui augmente la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ), l'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ), etc.. Les principaux indicateurs de l'instabilité climatique sont la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre et les températures moyennes annuelles mondiales. Les variations des températures sont cependant plus faibles tant pour les régions équatoriales que pour les hautes latitudes. Dans ces conditions, la variabilité spatio-temporelle du climat tropical est principalement enregistrée sur les éléments du cycle de l'eau. Des études antérieures (Mitosek, 1992) indiquent que les variables les plus adaptées pour le suivi des modifications climatiques sont par ordre (les quatre premières étant prioritaires) :

- le débit des rivières,
- le niveau des lacs,
- les précipitations,
- la température de l'air,
- la température de l'eau,
- la date de rupture du couvert de glace,
- la durée saisonnière du couvert de glace,
- le niveau des eaux souterraines.

Kite et Harvey (1992) identifient aussi parmi ces variables, l'évaporation, la végétation, l'humidité du sol, la date d'occurrence des événements extrêmes et Lawford (1992) y ajoute les données concernant le transport des sédiments dans les rivières. On peut également y adjoindre les dates de début et de fin de la saison des pluies.

Ce chapitre qui traite des aspects de l'instabilité climatique s'intéressera essentiellement à la caractérisation des quatre variables prioritaires, mais auparavant nous verrons plus en détail les interactions entre la variation spatio-temporelle du climat et les courants océaniques d'une part, les différentes circulations en surface pour l'ensemble du globe d'autre part.

## **1.2 - CIRCULATION GENERALE ET FLUCTUATIONS CLIMATIQUES**

Les analyses des corrélations entre la circulation atmosphérique d'une part, et les champs de températures de surface des océans d'autre part, sont encore insuffisantes pour bien comprendre le déterminisme des fluctuations climatiques. Cependant, bien que le phénomène soit quelque peu en dehors de l'objet de l'étude, il nous a paru important d'y faire allusion pour permettre d'en saisir la portée, dans la mesure où il s'agit de facteurs ou de mécanismes de base qui déterminent en grande partie les fluctuations climatiques.

La répartition énergétique dans le système Terre-Océan-Atmosphère (TOA) divise schématiquement la planète en trois ensembles : une zone excédentaire en énergie entre 30°N et 30°S et deux zones déficitaires au-delà (Dhonneur, 1978). Des transferts d'énergie tendent à rétablir l'équilibre entre ces différentes zones (transfert essentiellement méridien) d'une part, et entre la surface terrestre excédentaire à laquelle sont associées les couches marines de

surface et l'atmosphère déficitaire (transferts verticaux) d'autre part. Les transferts entre la zone intertropicale excédentaire et les zones déficitaires des latitudes moyennes et polaires se font avec un décalage de un à deux mois par rapport aux mouvements apparents du soleil. Si l'essentiel de ces transferts est véhiculé par l'atmosphère, une partie se fait par les courants marins (fig. 1.1 a et b).

En effet, les flux d'énergie solaire reçus par les eaux des océans sous les latitudes tropicales provoquent le réchauffement des eaux de surface. Pour évacuer ces apports excessifs en énergie, les masses d'eau réchauffées se déplacent sous l'effet des vents vers les régions plus froides du Nord de l'Atlantique. C'est ainsi que les courants océaniques de surface s'organisent en charriant d'importantes quantités d'énergie. Parallèlement à ces courants de surface, il existe la circulation thermohaline. Les eaux froides et salées de l'Atlantique Nord, en raison de leur densité, plongent vers les fonds de l'océan et vont y circuler lentement, de l'Atlantique à l'océan Indien et au Pacifique, au cours d'un cycle évalué à environ un millier d'années. En fin de parcours, elles vont se réchauffer et remonter à la surface pour se mêler aux eaux plus chaudes qui circulent à l'étage supérieur. Ces différents mouvements forment un cycle qui influe sur quantité de paramètres climatiques et maintient la température du globe. Il est important de souligner que la différence entre les temps de réponse très longs au niveau des océans comparativement à ceux des continents, peuvent conduire à des anomalies climatiques prolongées.

Parmi les principales manifestations des fluctuations climatiques, on peut citer la sécheresse qui touche particulièrement les deux bandes tropicales de la planète, et notamment l'Afrique intertropicale. De nombreux travaux ont tenté d'établir des relations entre les fluctuations des précipitations et certains facteurs du climat dans cette sous-région. Les principaux paramètres étudiés sont : l'albédo du sol (Charney *et al.*, 1977), l'intensité du rayonnement solaire mesurée au sol (Courel *et al.*, 1984), la Température de Surface de la Mer (TSM), les vents en altitude, la nébulosité, la pression, la vapeur d'eau (Lamb, 1978 ; Fontaine, 1991 ; Fontaine & Bigot, 1991 ; Janicot, 1989 et 1990 ; Mahé, 1993), la position de la Zone de Convergence Inter-Tropicale – ZCIT - (Citeau *et al.*, 1988 et 1989). Mahé (1993), souligne que la complexité du phénomène est vite apparue et aucune relation systématique n'a été établie. Il précise par la suite que les corrélations entre valeurs moyennes des différents paramètres étudiés ne suffisent pas à expliquer les variations de pluie sur l'Afrique.

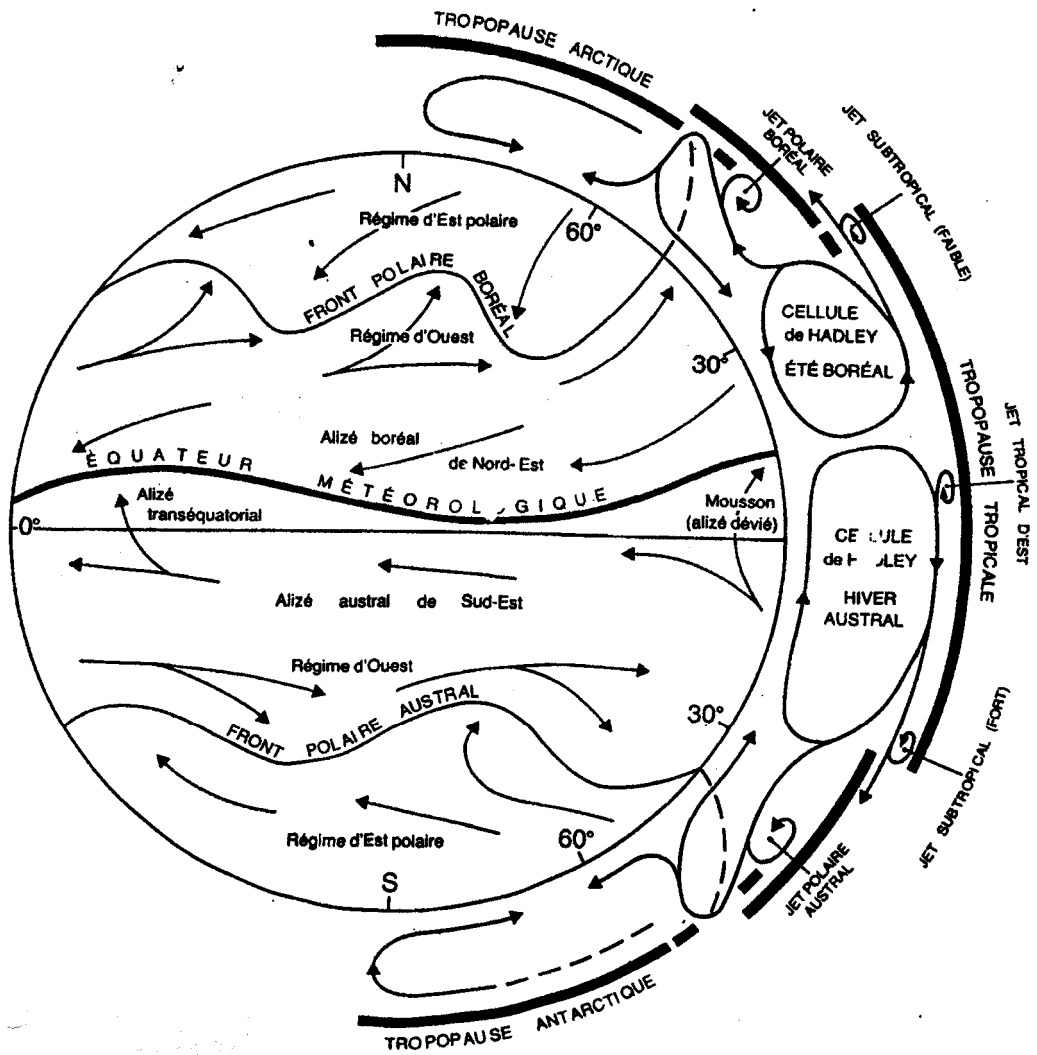


Figure 1.1 a : Schéma de circulation générale type PALMEN pour l'ensemble du globe, pendant l'hiver austral. Les différentes circulations en surface sont indiquées ainsi que les courants Jet et les tropopauses moyennes (Dhonneur, 1978)

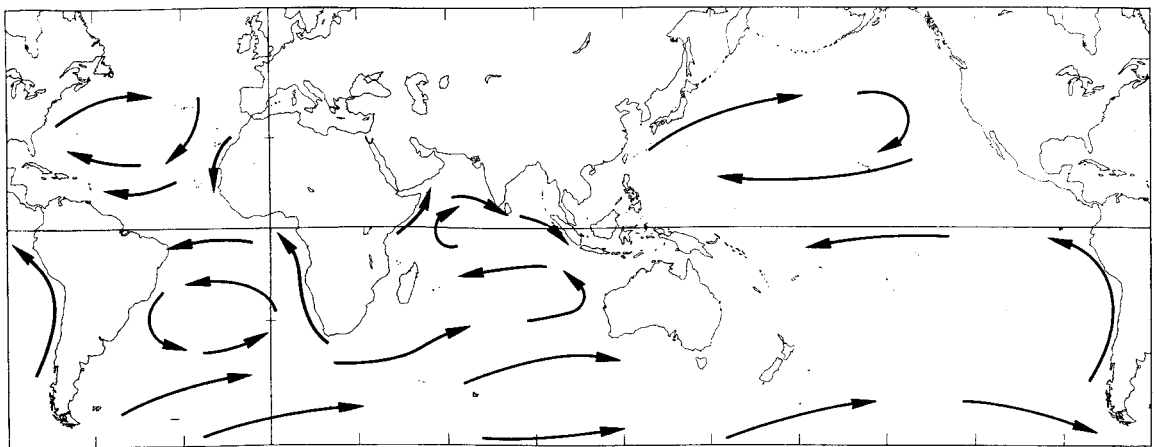


Figure 1.1 b : Principaux courants océaniques. Les différents courants sont plus ou moins marqués suivant les saisons et sont à l'origine de discontinuités assimilables à des fronts chauds ou froids qui jouent un grand rôle dans l'évolution des perturbations et des masses d'air (Dhonneur, 1978).

En attendant de revenir plus loin sur les corrélations entre la variabilité hydropluviométrique et celle de certains paramètres climatiques, quelques points particuliers méritent d'être soulignés dès ici : les événements ENSO, la Zone de Convergence Inter-Tropicale et l'influence des écosystèmes forestiers.

L'une des expressions les plus importantes des changements dans la distribution des températures de surface de l'eau des mers est connue sous le terme ENSO ou encore El Niño. On sait maintenant que le phénomène El Niño est déclenché par une modification (diminution ou renversement) des alizés qui soufflent d'est en ouest à la hauteur des régions équatoriales (Janicot, S, *et al.*, 1993 ; Fontaine, B. *et al.*, 1998, Sultan, B. *et al.*, 2001) . Les causes de cette modification sont encore mal connues, mais ses effets se font sentir à intervalles réguliers (il peut se passer 3 à 7 ans entre 2 événements *El Niño*) dans la partie sud de l'océan Pacifique. Il résulte de ce renversement des alizés une modification de la température de l'eau du Pacifique central qui lui-même est à l'origine de nombreux changements dans la circulation atmosphérique et océanique. Ces différents changements entraînent des perturbations importantes sur le climat au plan mondial : accroissement des précipitations et des températures plus douces à certains endroits, sécheresse inhabituelle et des vagues de chaleur exceptionnelles à d'autres. Les résultats des travaux réalisés dans le cadre du programme ICCARE de l'IRD (Servat *et al.*, 1999) indiquent cependant qu'il n'a pas été possible d'identifier une relation systématique à l'échelle annuelle entre les phénomènes ENSO et la succession des périodes sèches et humides observées en Afrique occidentale et centrale. Seule la concomitance entre l'ENSO observé en 1982-1983 et l'année particulièrement déficitaire enregistrée dans la région en 1983 est relevée.

La zone de convection commune aux circulations méridiennes entourant le globe est appelée Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) ou Equateur Météorologique (EM). C'est une zone de forte concentration de la vapeur d'eau (advection par les alizés et les circulations des moussons dans les basses couches) et de libération de chaleur latente par ascendance et condensation. Source principale de l'énergie qui gouverne la circulation atmosphérique, c'est le lieu où l'énergie reçue par l'atmosphère est maximale, et ses caractéristiques sont très liées aux conditions de surface. En liaison avec le mouvement apparent du soleil, cette zone subit une migration annuelle. Cette migration méridienne suit les lieux de températures maximales en fonction des saisons, avec un retard de quatre à six semaines sur le mouvement du soleil.

Les mouvements méridiens de la ZCIT subissent des fluctuations interannuelles qui jouent un rôle non négligeable sur le climat, notamment sur le régime des précipitations tropicales.

Au niveau des continents, le système forestier par sa forte propension à l'absorption de l'énergie solaire et par sa grande capacité d'évaporation joue le rôle d'un énorme convertisseur d'énergie. Les échanges d'énergie qu'il entretient avec l'atmosphère influencent les paramètres physiques des masses d'air de la couche limite de surface. Ce rôle est lié à trois caractéristiques principales (l'albédo très faible par rapport à celui d'un sol nu, l'évaporation dont le taux élevé est comparable à celui des océans et la longueur de rugosité), associant la variation de la hauteur des arbres à des processus turbulents favorables au déclenchement des précipitations. La contribution du système forestier sur le climat régional est par conséquent très importante, notamment sur le plan du recyclage des précipitations. Les autres facteurs climatiques qui ont été associés à la dynamique atmosphérique intertropicale sont : les variations en position et en intensité des centres de hautes pressions tels les anticyclones de Sainte Hélène et des Açores, au niveau de l'océan, les variations d'intensité de l'upwelling, les variations de vitesse des vents d'est d'altitude et de la vapeur d'eau, etc..

### **1.3 - EVOLUTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE DE L'AIR**

La terre reçoit l'énergie du soleil sous forme de rayonnement à ondes courtes. La majeure partie de cette énergie est absorbée et re-émise sous forme de rayons infrarouges. Certains de ces rayons s'échappent dans l'espace, mais la plupart sont emprisonnés par la vapeur d'eau et divers autres gaz, ce qui a pour effet de réchauffer la basse atmosphère et la surface de la terre. Cette dynamique constitue l'effet de serre naturel qui maintient la température et permet à la vie de se développer sur la terre. Les émissions résultant des activités humaines font augmenter considérablement la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre. Cette augmentation artificielle de la concentration des gaz à effet de serre (figure 1.2), contribue à accentuer le réchauffement de la surface de la terre. Ainsi, au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, les températures moyennes au niveau du sol ont augmenté de 0,6 °C (Jones *et al.*, 1999). L'essentiel du réchauffement s'est produit de 1910 à 1945, puis après 1976, comme on peut le constater sur la figure 1.3. Selon une déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2003, d'après les relevés des pays membres de l'OMM, dans l'hémisphère Nord les années 90 représentent la décennie la plus chaude et 1998 (+0,55°C en moyenne) l'année la plus chaude depuis le début des relevés en 1860. La température moyenne à la surface du globe en 2002 a



également dépassé de  $+0,48^{\circ}\text{C}$  la normale calculée sur la période de référence 1961-1990, ce qui place cette année au deuxième rang des années les plus chaudes. L'année 2003 se place quant à elle au troisième rang avec un accroissement moyen de l'ordre de  $+0,45^{\circ}\text{C}$ . Ces valeurs qui représentent la hausse moyenne sur l'ensemble de la planète masquent les augmentations plus importantes qui ont atteint  $5^{\circ}\text{C}$  dans certaines régions en 2003.

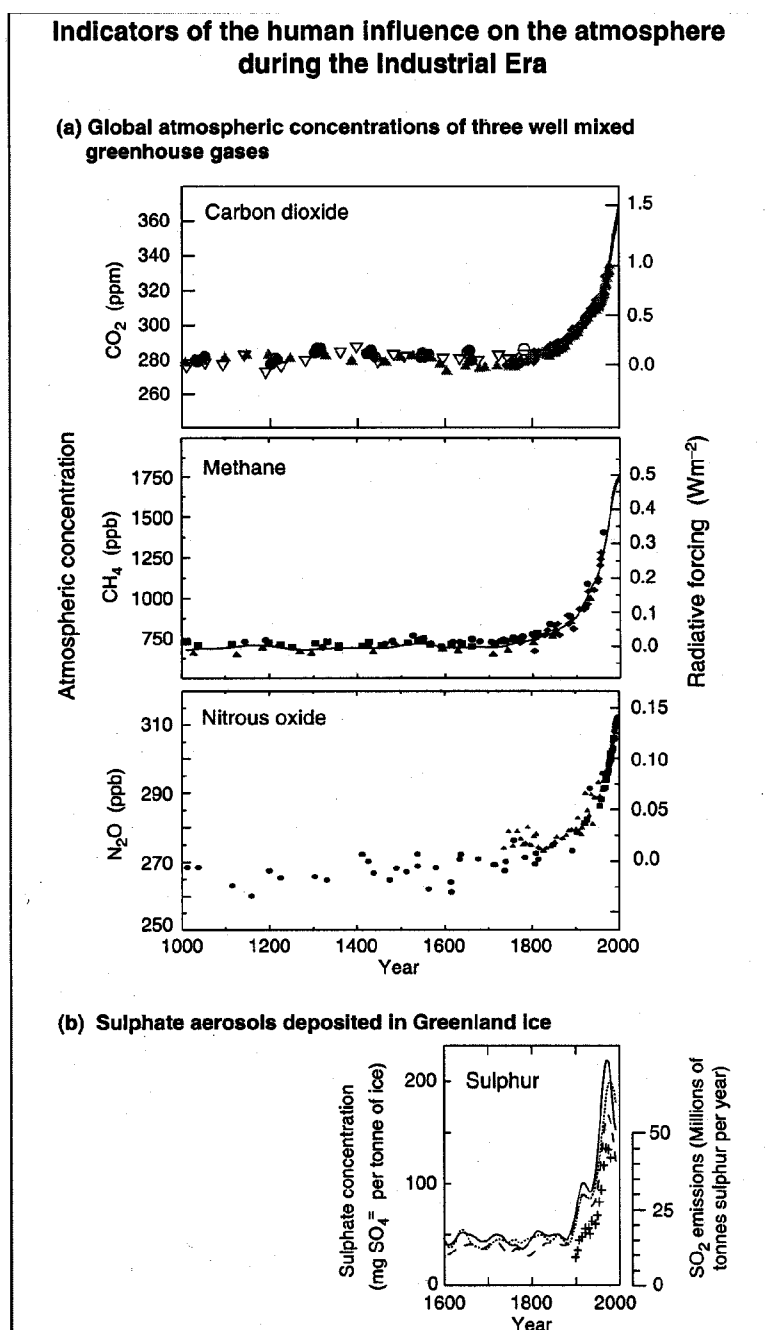
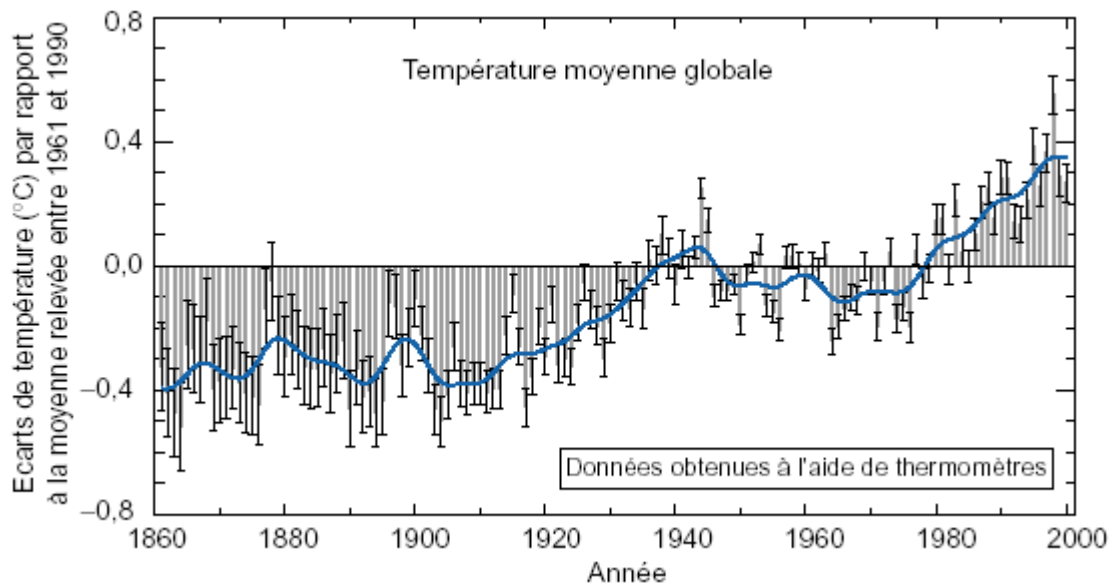


Fig. 1.2. : Variations de la composition chimique de l'air sous l'influence des émissions dues aux activités humaines. **a)** les concentrations en gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux) sont déduites de l'analyse de la composition chimique des bulles d'air piégées dans les glaces polaires. **b)** les concentrations en sulfates des glaces du Groenland depuis 1600 AD sont comparées aux émissions de gaz sulfureux (Duplessy, 2001)



**Fig. 1.3 : Evolution de la température moyenne de l'air depuis 1856. Les données issues du réseau météorologique mondial sont reportées comme écart à la moyenne des années 1961-1990 (IPCC, 2001a).**

De nombreuses études ont analysé les relations qualitatives entre les variations de température observées et les changements des systèmes naturels physiques ou biologiques. Les principaux changements intéressent les ressources en eau, la sécurité alimentaire, les écosystèmes terrestres, les océans et les zones côtières. Douglas, (1997) signale que des relevés de niveau de la mer au marégraphe indiquent une élévation du niveau de la mer de 10 à 20 cm au cours du siècle dernier, qui peut être associée en partie à l'accroissement thermique des océans. Les calculs montrent par ailleurs (Godefroy *et al.*, 2001) que l'eau contenue dans les calottes polaires provoquerait une hausse de 70 m du niveau de la mer si elle se transformait en liquide. Les résultats des travaux d'autres auteurs, Doherty *et al.*, (1999) et Hulme *et al.*, (1998) montrent qu'une augmentation des précipitations de 0,5 à 1% par décennie est observée pendant tout le XX<sup>e</sup> siècle dans les hautes et moyennes latitudes de l'hémisphère Nord. La situation sous les tropiques reste inchangée ou à la rigueur, une augmentation sensiblement plus faible. Parmi les autres manifestations notées par les climatologues, on peut citer l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes telles les fortes précipitations et sécheresses persistantes, le recul des glaciers de montagne, l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et de la persistance des phénomènes El Niño, une plus grande variabilité spatiale dans les régions tropicales (Duplessy, 2001).

## 1.4 - EVOLUTION DES PRECIPITATIONS

Les données de précipitations sont l'un des paramètres du climat dont la mesure est relativement aisée et de ce fait très répandue. Elles constituent par conséquent un indicateur de choix pour les études de la variabilité climatique. De nombreuses études montrent que les précipitations ont abondamment varié, aussi bien à l'échelle des temps géologiques que de nos jours. En Afrique en particulier, des études paléoenvironnementales combinant les analyses de pollen et des diatomées, la paléohydrologie, la reconstitution du niveau des lacs et des réseaux hydrologiques fossiles, la géomorphologie et la géochimie isotopique, ont été réalisées sur le sujet (Maley, 1981 ; Servant-Vildary, 1978 ; Street et Grove 1979 ; Nicholson, 1980 ; Dubief, 1953 ; Roset, 1987 ; Bell, 1971 ; Evans, 1994 ; Rognon, 1989 ; Olivry et Chastanet, 1986). Sur la base des résultats enregistrés, les différentes périodes suivantes ont été identifiées par Sircoulon *et al.*, (1999), repris par Van Dam, (1999) dans une étude réalisée pour le compte de l'UNESCO :

- 20.000-12.000 BP (*Before Present*). Période sèche, la température sur le continent étant estimée à 3-4° plus basse que de nos jours (les fleuves Sénégal, Niger et Nil ainsi que de nombreux lacs intérieurs seraient alors à sec) ;
- 12.000-7.500 BP. Accroissement des précipitations avec le maximum vers 9.000 BP. Les écoulements sont très abondants à travers toute l'Afrique. Les lacs Tchad et Victoria ont atteint leur niveau le plus haut. Les précipitations régulièrement réparties au fil des années étaient probablement 30% plus abondantes qu'au cours de la période 1930-60. Le Sahara et le Sahel seraient alors très peuplés. Températures favorables à un développement important du biotope avec une abondante végétation ;
- 7.500-2.500 BP. Après une période sèche entre 7.500 et 6.000 BP, s'installe une nouvelle période humide, mais moins marquée, entre 6.000 et 2.500 BP. Cette période est marquée par des fluctuations considérables du niveau des lacs sur l'ensemble du continent africain. Les températures étaient alors plus élevées que de nos jours ;
- 2.500-1000 BP. Le climat devient plus sec, la saison de pluies plus courte et l'évaporation plus importante ;

- 1.000-100 BP. Les investigations visant la connaissance de cette période incluent la tradition orale, la datation au radiocarbone, enquêtes historiques, rapports des explorateurs, etc. Il en ressort globalement ce qui suit : période du 7<sup>ème</sup> au 12<sup>ème</sup> siècle plus humide que l'actuelle, 13<sup>ème</sup> siècle période sèche, du 14<sup>ème</sup> au 16<sup>ème</sup> siècle climat plus humide, mais ponctuée par des sécheresses accentuées marquées par des famines (1420-60 et 1550) ; 17<sup>ème</sup> et 18<sup>ème</sup> siècle, le Sahara devient de plus en plus sec alors que la région tropicale enregistre plus de précipitations ; 19<sup>ème</sup> siècle maximum pluviométrique dans la deuxième moitié du siècle ;
- 100 BP à nos jours. Le suivi des précipitations commencé depuis la fin du 19<sup>ème</sup> du siècle présente (Lamb, 1985 ; Nicholson *et al.*, 1988) de nombreuses fluctuations avec notamment 2 périodes humides et 3 périodes sèches (autour de 1913, en 1940 et depuis la fin des années 1960).

#### **1.4.1 - Spécificités de la sécheresse récente**

La sécheresse récente qui a débuté en Afrique à la fin des années 1960 est toujours d'actualité. D'une intensité variable suivant les différentes régions, elle est particulièrement prononcée en Afrique de l'Ouest et Centrale, notamment dans la région soudano-sahélienne. De nombreux auteurs s'accordent pour affirmer que cet événement se distingue des précédents par trois caractéristiques : sa durée, son intensité et son extension (Sircoulon, 1990 ; Paturel *et al.*, 1995 ; Servat *et al.*, 1997). Dans le Sahel, les isohyètes 200-600 mm ont migré vers le sud sur plusieurs centaines de km (Albergel *et al.*, 1985), soit une diminution nette et généralisée des précipitations annuelles sur l'ensemble de la région. Selon Hulme (1992), la moyenne pluviométrique de la période 1961-90 est de 20 à 40% plus faible que celle de la période 1931-60. Après deux paroxysmes de sécheresse en 1972-73 et 1983-1984, un espoir de rémission est apporté par deux années humides récentes, 1994 et 1999, mais les derniers travaux de L'Hôte *et al.*, (2002) montrent que la séquence sèche n'est pas terminée en fin 2000. A titre d'illustration, le tableau 1.1 présente les précipitations moyennes enregistrées sur les principaux bassins versants de l'Afrique tropicale et équatoriale, alors que la figure 1.4 montre une représentation des indices (variables centrées réduites) pluviométrique interannuelle.

Tableau 1.1: Précipitations moyennes (mm/an) sur les principaux bassins versants de l'Afrique tropicale et équatoriale (Olivry *et al.* 1993)

Bassin	Surface (km <sup>2</sup> )	Période 1951-60	Période 1961-70	Période 1971-80	Période 1981-90	% différence 1981-90 - 1951-60/1981-90
Sénégal	218000	1071	985	843	766	-28
Niger	120000	1649	1527	1403	1315	-20
Gambie	42000	1365	1226	1049	991	-27
Sanaga	131200	1924	1867	1800	1722	-10
Oubangui	48800	1578	1573	1486	1515	-4
Ogooué	203000	1792	1839	1757	1776	-1
Congo	3500000	1511	1467	1466	1440	-5

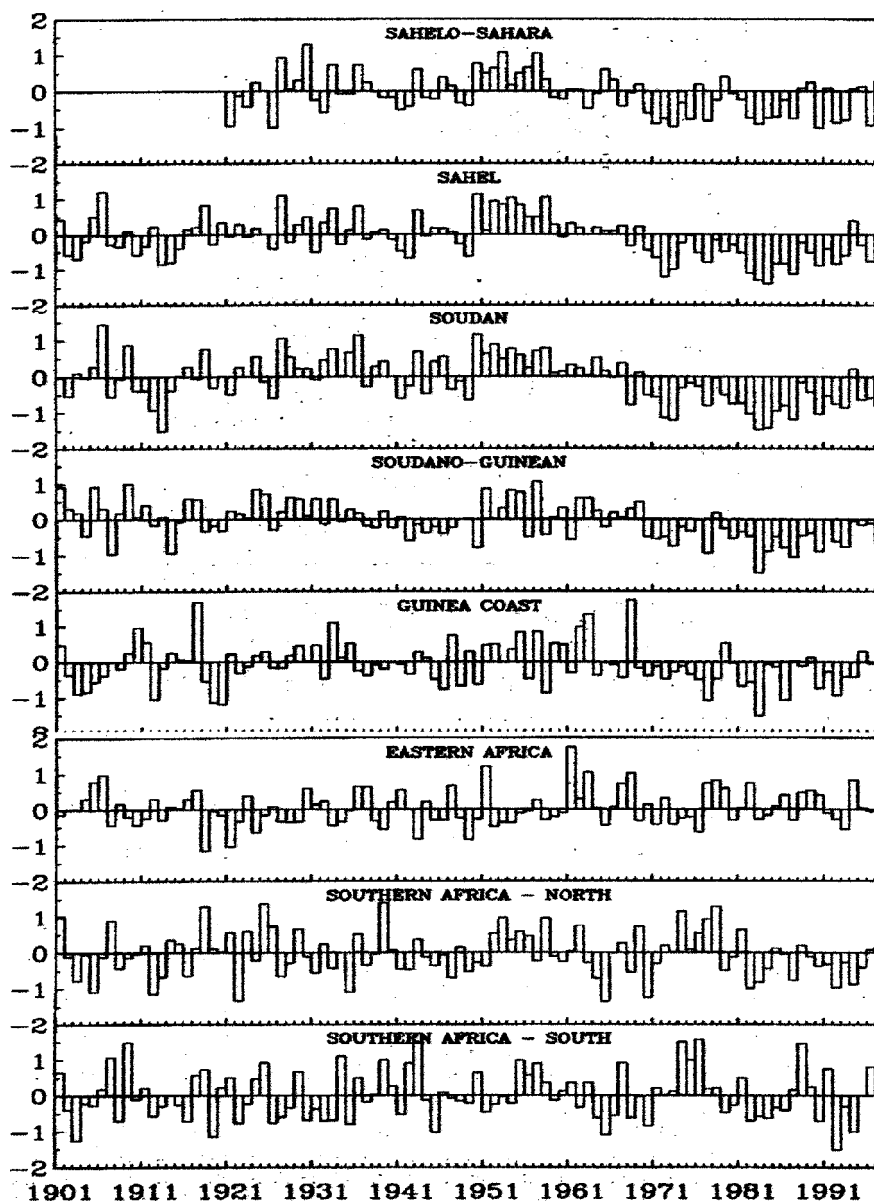


Fig. 1.4 : Indices pluviométriques interannuels des hauteurs de pluies annuelles par rapport à la période 1901-1990 ; (Nicholson, 1998).

Comme les données du tableau 1.1 le montrent, la baisse concerne aussi bien la région soudano-sahélienne que la région équatoriale, même si elle est moins sensible dans cette dernière. Cette observation est confirmée par la figure 1.4 qui souligne par ailleurs la différence entre l'Afrique australe et les régions de l'Afrique de l'ouest et du centre.

Dans le nord de l'Afrique, une étude d'Albergel *et al.* (2000) met en évidence une alternance des périodes excédentaires et déficitaires des précipitations en Tunisie. De 1875 à 1927, la tendance globale est à la sécheresse, la période 1928 à 1940 est plutôt humide alors que la période 1941 à 1948 connaît une nouvelle phase de sécheresse. La période 1950 à 1980 est globalement plus humide, bien que ponctuée par des années très sèches (1960-61, 1968-69), et il semblerait que depuis une phase sèche ait commencé. Dans le même ordre d'idée, une étude de Kingumbi *et al.* (2000) met en évidence une baisse significative (sans rupture de stationnarité des séries) des précipitations annuelles en Tunisie centrale, entre 1976 et 1989. En Algérie, les travaux de Meddi *et al.* (2003) montrent une baisse des précipitations pouvant dépasser 60% dans le nord-ouest du pays durant la décennie 1970-1980.

L'alternance des périodes excédentaires et déficitaires a été également mise en évidence en Europe, et notamment en région méditerranéenne. De nombreuses études soulignent l'existence de contrastes entre différentes sous-régions, mais les fluctuations les plus brutales et les plus significatives ont été observées autour des années 1940 et 1980 (Bidi *et al.*, 2000). Si les deux décennies sont déficitaires, la sécheresse de la décennie 1940 est beaucoup plus marquée. Les périodes les plus humides de la région du bassin méditerranéen sont 1913-1917, la fin des années 1960 et les années 1970.

Sur le plan mondial, selon le rapport du "*Intergovernmental Panel on Climate Change*" (IPCC) 2001, les tendances sont variables suivant les régions. Si dans l'ensemble on note une baisse des précipitations dans les régions tropicales et subtropicales des deux hémisphères de la planète, on observe plutôt un accroissement des précipitations au niveau des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord. En particulier, citant respectivement Karl & Knigh, (1998) et Osborn *et al.*, (2000), le rapport note que la fréquence des fortes pluies a beaucoup augmenté aux USA et au Royaume Uni. Au cours des décennies récentes, la proportion des pluies qui tombent sous forme de grosses averses est plus importante que celle de la période antérieure, dans les deux pays.

## 1.4.2 - Caractérisation de la variabilité des précipitations

Différentes techniques d'analyse peuvent être appliquées aux séries de données pour caractériser les fluctuations. La variabilité des précipitations est souvent abordée par des analyses statistiques qui visent principalement à détecter d'éventuelles séquences statistiquement différentes. Afin de supprimer le biais de la variabilité interne propre à chaque unité, les analyses portent souvent sur les valeurs centrées réduites qui mesurent un écart par rapport à une moyenne établie sur une longue période. Parmi les tests couramment utilisés, on peut citer ceux de Mann, Kruskal-Wallis, Worsley, Buishand, Fuller, Pettit, Hubert *et al.* ; les procédures de Lee et Heghinian qui reposent sur l'approche bayésienne, etc.. Nous reviendrons plus loin sur la présentation de ces différents outils.

De nombreuses études se sont penchées sur la question (Sircoulon, 1976 ; Albergel, 1987 ; Carbonnel *et al.*, 1992 ; Janicot *et al.*, 1993 ; Paturel *et al.*, 1996 ; Aka *et al.* 1996 ; Bigot *et al.*, 1998 ; Brou Yao *et al.*, 1998 ; Servat *et al.*, 1998 & 1999 ; Mahé *et al.* 2001 ; Ouedraogo, 2001) en Afrique tropicale. Les résultats soulignent l'existence d'une rupture dans les séries pluviométriques de la région. Selon Bigot *et al.*, 1998, quatre périodes charnières apparaissent dans les précipitations africaines entre 1951 et 1990 (Fig.1.5) :

- 1959 – 1961 est suivie d'une hausse générale des précipitations en Afrique subéquatoriale, de la Guinée à l'Afrique de l'est, et d'une baisse dans les domaines tropicaux,
- 1967 – 1971 s'accompagne d'une baisse très importante dans toute la bande sahélienne. Le changement intervient dès 1964-1966 dans le Sahel oriental et en 1969-1971 dans la partie occidentale,
- 1976-1978 marque l'intensification du déficit pluviométrique et le début d'une phase plus sèche en Afrique australe. En même temps, le Sahel oriental et l'Afrique de l'est connaissent une légère hausse de leurs précipitations,
- 1980-1981 est le dernier changement de tendance observé sur la période 1951-1990. Il correspond à une baisse généralisée des précipitations en Afrique subsaharienne.

Ces observations sont en phase avec les résultats des travaux du programme ICCARE de l'IRD (Servat *et al.*, 1998 & 1999), qui situent la plupart des ruptures entre la fin de la décennie 1960 et le début de la décennie 1970, dans la sous région de l'Afrique occidentale et centrale, y compris le Sahel.

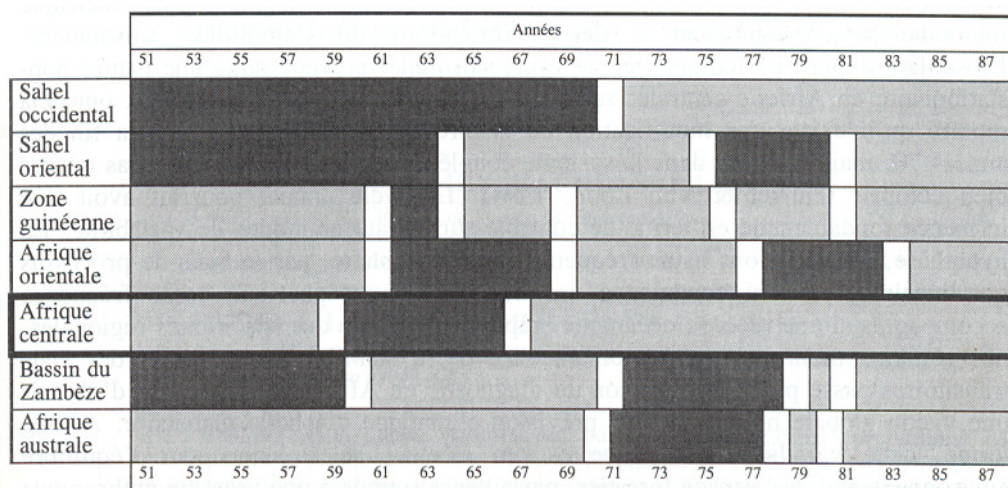


Figure 1.5 : Synthèse des principales discontinuités pluviométriques rencontrées dans sept régions africaines sur la période 1951- 1988. le gris clair/foncé indique une baisse/hausse des précipitations par rapport à la période précédente ; les années en blanc correspondent aux discontinuités (Bigot *et al.*, 1998)

Les déficits pluviométriques correspondant aux ruptures observées tournent autour de 20%, mais peuvent dépasser 25% sur la côte atlantique et dans le Nord. A titre d'exemple, le tableau 1.2 présente la moyenne des déficits enregistrés dans quelques pays de la région.

Tableau 1.2 : Déficit pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture (Servat *et al.*, 1999)

Pays	Déficit (%)	Période de rupture
Benin	19	1968-1970
Burkina Faso	22	1968-1971
Cameroun	16	1969-1971
Centrafrique	17	1968-1969
Côte d'Ivoire	21	1966-1971
Ghana	19	1968-1969
Guinée	20	1969-1970
Guinée Biseau	22	1967-1969
Liberia	25	(*)
Mali	23	1967-1970
Nigeria	19	1967-1970
Sénégal-Gambie	25	1967-1969
Sierra Leone	13	(*)
Tchad	20	1970-1971
Togo	16	1968-1970

(\*) : nombre de stations insuffisant pour définir la période de rupture la plus probable

La sécheresse récente se caractérise également par des changements dans le déroulement de la saison des pluies. Ces changements intéressent aussi bien la répartition temporelle des pluies



que les quantités précipitées à différentes échelles (Carbonnel *et al.*, 1992). Or on sait que, plus encore que la hauteur totale des précipitations, la répartition des pluies dans le temps est un facteur limitant d'une agriculture essentiellement pluviale et de l'élevage sur pâturage naturel qui caractérisent les pays de l'Afrique tropicale. Dans cette optique, afin de mieux caractériser les effets de la récession pluviométrique sur le milieu naturel et les activités socio-économiques, de nombreux auteurs se sont interrogés sur les manifestations de cette baisse des précipitations.

Une tentative de description de la forme de la saison pluvieuse s'est intéressée aux coefficients de forme des histogrammes décadaires des pluies. Aucune conclusion valable pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest n'a pu être obtenue. Morel (1986) a pu cependant montrer pour 10 stations Ouest-africaines qu'il existait, à l'échelle mensuelle, un net fléchissement des pluies d'août et, selon les stations, des pluies de juin et/ou de septembre. Travaillant sur la pluie de quelques bassins versants du Burkina Faso, Albergel (1987) montre que la probabilité d'occurrence des précipitations maximales à chaque poste d'observation pris individuellement, est équivalente dans les 2 périodes sèche et humide. Une analyse (Carbonnel *et al.*, 1992) des hauteurs des pluies journalières réparties en 3 groupes (P1 = pluies journalières inférieures à 20 mm ; P2 = pluies journalières comprises entre 20 et 40 mm et P3 = pluies journalières supérieures à 40 mm), montre que le passage de la phase humide, antérieure à 1968, à la phase sèche actuelle se fait par une diminution des pluies supérieures à 40 mm. Ces résultats sont corroborés par ceux de Lebel *et al.* (1996), qui montrent que l'abondance de la saison des pluies est surtout déterminée par la variation du nombre d'événements pluvieux. En d'autres termes, les fluctuations pluviométriques au Sahel sont essentiellement liées à un changement de la fréquence des systèmes convectifs plutôt qu'à un changement de leur intensité.

Dans le même ordre d'idée, les travaux du programme ICCARE de l'IRD (Servat *et al.*, 1999), qui intéressent particulièrement l'Afrique de l'Ouest et du Centre, ont abouti à un ensemble de conclusions dont les points essentiels sont les suivants :

- D'une manière générale, il apparaît que ce sont les zones à régime pluviométrique extrême (les plus arrosées et les plus arides) qui ont subi les modifications les plus importantes. Entre les deux extrêmes le phénomène est d'intensité plus nuancée mais il se traduit

généralement par une rupture survenue à la fin des années 1960 ou au début des années 1970.

- Durant les décennies 1950 et 1960, la zone à une saison de pluies s'est étendue progressivement vers le sud en direction du littoral et du Golfe de Guinée. En Côte d'Ivoire, au Togo et au Bénin, la limite de cette zone s'est déplacée vers le sud d'une centaine de kilomètres de la décennie 1950 à la décennie 1980.
- Dans les zones à une comme à deux saisons de pluies, l'analyse des dates de début et de fin de saison de pluie montre que l'une des deux, voire les deux, a une durée plus courte de nos jours (début tardif ou fin précoce des pluies). Dans les zones à une saison sèche, on assiste à un renforcement de la saison sèche qui se traduit par la disparition d'un certain nombre d'événements pluvieux habituellement enregistrés hors saison des pluies. Dans les zones à deux saisons sèches, la grande saison sèche a vu son cumul pluviométrique diminuer considérablement
- Le nombre annuel de jours de pluie a fortement diminué en Afrique de l'Ouest et de façon moindre en Afrique Centrale
- La baisse du cumul des pluies annuelles semble avoir uniformément affecté toutes les catégories de pluies journalières, des plus faibles aux plus fortes

En ce qui concerne la région de l'Afrique Centrale en particulier, les travaux de Bigot *et al.*, (1998) confirment les résultats du programme ICCARE et soulignent que la plus grande variabilité interannuelle en Afrique centrale atlantique s'observe pendant la saison sèche (janvier – février). Le passage à la grande saison sèche est également variable, tant dans son déroulement que dans son intensité pluviométrique. Etudiant la sécheresse récente sur les hautes terres de l'Ouest Cameroun, Tsalefac (1999) conclut qu'elle résulte davantage d'une mauvaise distribution des pluies dans l'année, plutôt que du total annuel précipité.

### **1.4.3 – Eléments d'explication de la sécheresse récente**

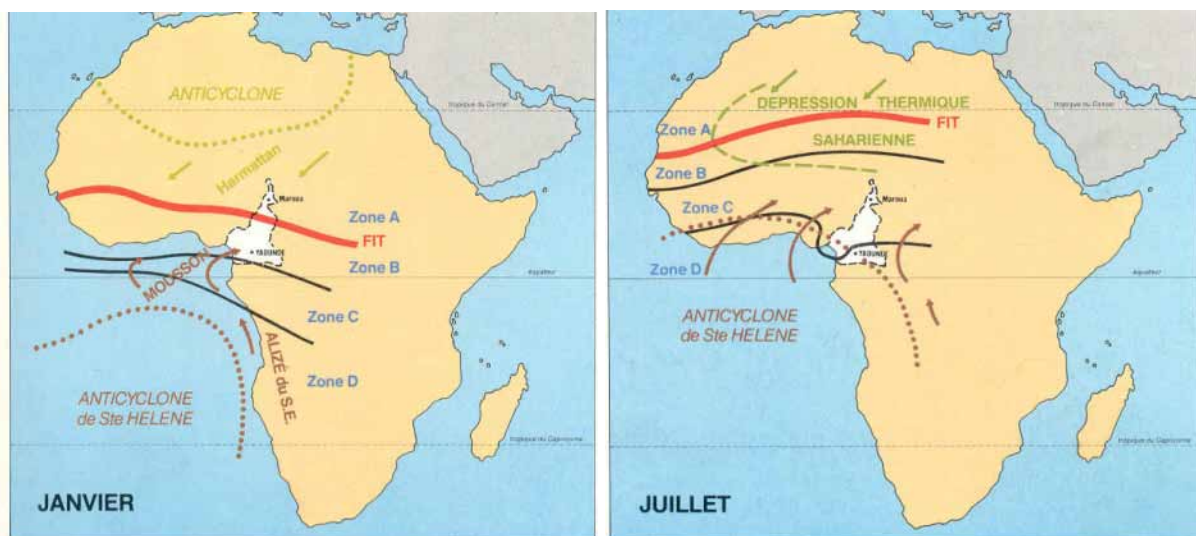
La particularité de la sécheresse récente a poussé de nombreux auteurs à s'interroger sur ses causes et sa signification (Hubert et Carbonnel, 1987 ; Nicholson, 1981). Charney avait déjà

suggéré en 1975 que la persistance de la sécheresse dans le Sahel pouvait être une conséquence du surpâturage. Cette dernière ayant réduit la végétation, il s'ensuit une hausse de l'albédo qui à son tour aggrave et prolonge la subsidence atmosphérique sur le Sahara qui conduit à la baisse de la pluviosité dans le Sahel. La baisse des précipitations influe en retour sur la végétation qui finira par disparaître à terme. Ce mécanisme n'a pas pu être confirmé par les modèles de simulations des climatologues. Des études réalisées en Côte d'Ivoire (Brou Yao *et al.*, 1998) soulignent également la coïncidence et la concomitance entre la baisse des précipitations et la déforestation suivie de la mise en culture dans le sud forestier.

Une étude de Janicot *et al.* (1993) montre que la région du golfe de Guinée est la source principale de vapeur d'eau, relayée par un recyclage important au Sud du Sahel et en Afrique centrale (Cadet et Houston, 1984). Les précipitations tombées sur les forêts de l'Afrique équatoriale sont en partie réintroduites dans l'atmosphère par évapotranspiration du couvert végétal (*recyclage*) pour précipiter plus au Nord. Dans ces conditions, toute modification du couvert végétal au Sud du Sahel peut avoir un impact significatif sur l'évolution dans le temps des précipitations sahéliennes. Monteny (1987) a montré que l'écosystème forestier qui borde le golfe de Guinée recycle environ 60 à 75% des pluies annuelles alors que les cultures annuelles avec jachère n'en recyclent qu'environ 45 à 55%. Kitoh *et al.* (1988) déterminent cependant par modélisation numérique que la disparition de la forêt renforce le gradient méridien de température, ce qui intensifie le flux de mousson et par voie de conséquence augmente les précipitations au Sahel. D'autres causes ont été évoquées : la réduction de l'humidité du sol, les changements de la température de surface des océans avoisinants (Sud & Molod, 1988 ; Rowell & Blondin, 1990 ; Lamb, 1978 ; Folland *et al.*, 1986 ; Palmer, 1986). Le phénomène est observé dans d'autres régions du monde. Dans le bassin versant de la Volga par exemple, Shiklomanov *et al.*, cités par Van Dam (1999), montre que l'augmentation des précipitations résulte d'un changement au niveau du mode de circulation atmosphérique, notamment la modification de la trajectoire des cyclones qui emportent l'humidité depuis l'Atlantique. Ce sujet assez complexe reste encore à approfondir.

D'autre part, bien que le climat qui règne sur l'Afrique tropicale soit sous la dépendance étroite de la circulation atmosphérique générale, il est également connu que la logique interne de la succession des types de temps au-dessus de cette région découle des propriétés et dispositions moyennes de deux "centres d'actions" que constituent l'anticyclone de Sainte Hélène au sud et celui des Açores ou de Libye au nord. En effet, la convergence des alizés

chargées d'humidité (Mousson ou alizés du S-W) et de celles très sèches provenant des continents (Harmattan ou Alizés du N-E) forme une zone de contact appelée FIT (Front Intertropical), qui se déplace au cours de l'année suivant une direction latitudinale. Les positions extrêmes du FIT sont (figure 1.6), en moyenne, le 20<sup>ème</sup> parallèle Nord (en juillet) et le 4<sup>ème</sup> parallèle Nord (en janvier). La physionomie particulière des années (qui se succèdent sans jamais se ressembler) est étroitement liée aux modifications de comportement des deux centres d'action.



**Figure 1.6 : Positions extrêmes du FIT en Afrique. Les zones A, B C et D correspondent aux zones de temps. A, zone sans pluie avec ciel clair où souffle l'Harmattan. B (environ 400 km de large), zone au ciel peu nuageux avec des orages isolés. C (1200 km de large), zone avec ciel couvert ou très nuageux où dominent pluies de mousson et lignes de grains ; D, zone de nuages stratiformes avec très peu de précipitations.**

Les différences entre les modes de circulation paraissent découler principalement de l'inégal dynamisme des hautes pressions subtropicales des deux hémisphères, ce qui revient en grande partie, à reconnaître le poids de l'influence polaire, dont dépend la vigueur de ces centres d'action (Suchel, 1987). L'anticyclone des Açores est-il, à l'échelle annuelle plus puissant que celui de Sainte Hélène, c'est l'ensemble de la zone de temps qui se trouve décalée vers le sud ; face à la Mousson anémiée, l'Harmattan tend à imposer sa loi. L'anticyclone de Sainte Hélène est-il plus fort, la Mousson, active et pénétrante, apporte la pluie jusqu'au cœur du continent, tandis que la subsidence australe impose une véritable saison sèche estivale sur les régions du Golfe de Guinée. Il arrive aussi que les deux ceintures de hautes pressions se

renforcent simultanément. Les précipitations sont alors excédentaires à l'intérieur d'une étroite bande médiane, mais déficitaires de part et d'autre, à cause du resserrement général des zones de temps. Des analyses de la dynamique atmosphérique au cours de la période de sécheresse récente, faites à partir des données de réanalyses montrent (Ardoin S., 2004) des téléconnexions statistiques suggérant l'existence de mécanismes atmosphériques qui se caractérisent par une variation de l'espace couvert par la mousson, associée à une position plus méridionale de la ZCIT. Ces résultats corroborent les analyses de Suchel (1987) et les conclusions de Tsalefac (1999), qui affirme que les deux alizés boréal et austral sont les facteurs principaux de la variabilité pluviométrique sur le territoire camerounais, nuancés par des facteurs géographiques.

En définitive, même si les causes sont encore peu précises, sur la base des études déjà menées, on commence à mieux comprendre certains éléments descriptifs de l'évolution actuelle du climat. Outre les ruptures observées dans les chroniques de données de précipitations, les autres manifestations de la détérioration climatique en Afrique tropicale sont : la mauvaise répartition des pluies dans l'espace et dans le temps ; les intensités très fortes et/ou très faibles à certaines périodes de l'année, le décalage du début des saisons, la nature des épisodes de pluies et notamment leur durée, la quantité de pluie tombée au cours d'une période. On peut alors s'interroger sur les incidences de ces différentes perturbations sur le régime des écoulements, qui comme on le sait, intègrent mieux les variations spatio-temporelles des facteurs météorologiques que les mesures ponctuelles de précipitations.

## **1.5 - EVOLUTION DES ECOULEMENTS**

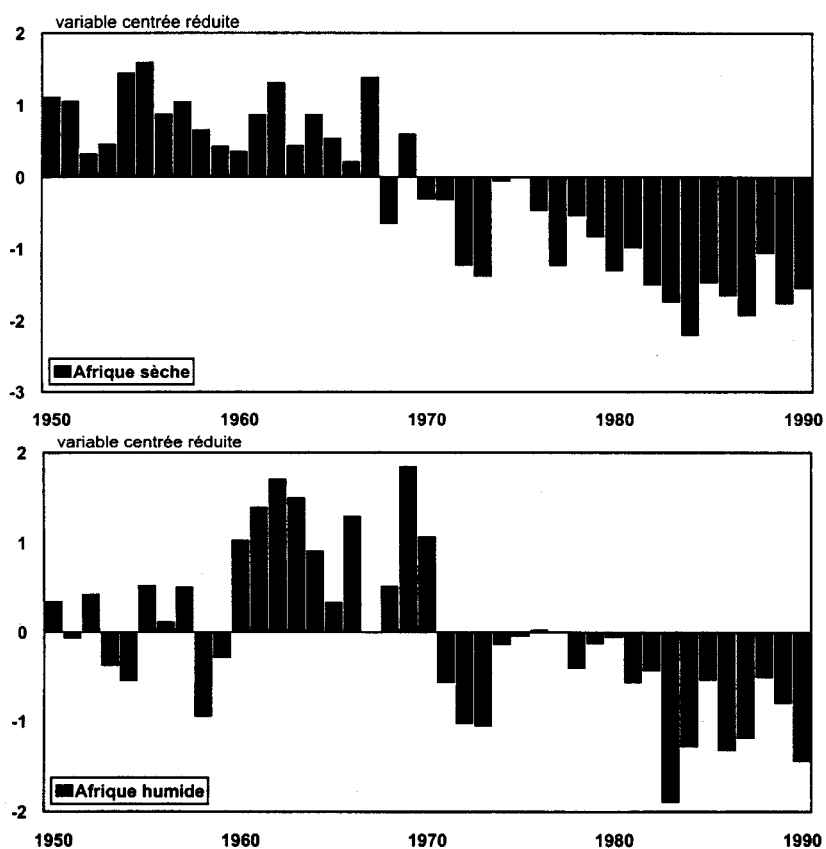
Le régime hydrologique des cours d'eau est directement influencé par celui des précipitations. Il subit de ce fait l'influence de la fluctuation des précipitations qui constituent à long terme la cause principale de leur variabilité (Kasperek & Novicky, 2002). Les autres causes des modifications du régime hydrologique des cours d'eau sont d'origine anthropique, mais leurs effets peuvent ne pas être perceptibles dans la plupart des cas du fait de l'ampleur des effets des modifications climatiques. Ces effets peuvent cependant être très importants, notamment dans les régions arides et semi-arides où des augmentations des écoulements ont pu être enregistrées (Albergel & Gioda, 1986 ; Albergel, 1987 ; Mahé et al., 2002) en dépit du déficit pluviométrique, comme nous le verrons plus loin.

Des expériences ont été menées dans les régions tempérées sur l'impact de la variabilité et le changement climatique sur le régime naturel des cours d'eau. Les principales conclusions montrent qu'ils ont une influence significative sur la répartition annuelle des débits des cours d'eau sans toutefois modifier considérablement le volume des écoulements.

En Afrique intertropicale, de nombreux travaux attestent des changements intervenus sur les cours d'eau de la région durant la sécheresse récente : changement des régimes, baisse sévère des débits, baisse accentuée des débits minimums d'étiage, étiages absolus plus fréquents en même temps que la raréfaction des ressources en eau (Sircoulon, 1976, 1987, 1990 ; Sutcliffe & Knott, 1987 ; Olivry et al., 1993 ; Mahé, 1993). Sircoulon (1990) montre par exemple que la production moyenne des principaux cours d'eau qui traversent le Sahel (Sénégal, Niger et Chari), qui était de  $136 \text{ km}^3$  par an jusqu'à 1969, est passée à  $79 \text{ km}^3$  pour la période 1970-88 (soit une baisse de 43%), avec seulement  $36 \text{ km}^3$  en 1984 (soit un déficit de 74%). Les fleuves de l'Afrique humide ont également subi une baisse (Mahé, 1993 ; Laraque & Olivry, 1996 ; Bricquet et al., 1997 ; Sigha Nkamdjou et al., 1998), mais avec un retard pouvant porter sur une dizaine d'années. Ce déphasage est la résultante du cumul des déficits pluviométriques répétés. Ainsi, le déficit des apports de l'Afrique centrale et du golfe de Guinée à l'océan Atlantique, au cours de la période 1981-1990, est évalué à  $365 \text{ km}^3$ , soit 32% des apports totaux, ce qui entraîne de nombreuses défaillances dans le fonctionnement des aménagements hydroélectriques, notamment en Côte d'Ivoire et au Cameroun. A titre d'exemple, le tableau 1.3 présente les valeurs de déficits des débits moyens annuels calculés sur quelques bassins versants de l'Afrique de l'Ouest et du centre alors que la figure 1.7 en présente une illustration graphique.

**Tableau 1.3 : Valeurs de déficits des débits moyens annuels calculés à certaines stations hydrométriques de part et d'autre de la date de rupture ; (Servat *et al.*, 1998)**

Pays	Nom station	Bassin versant	Rivière	Rupture	Déficit
Côte d'Ivoire	Mbasso	Comoe	Comoe	1971	-50%
Côte d'Ivoire	Aniassue-Pont	Comoe	Comoe	1971	-56%
Tchad	N'Djamena	Lac Tchad	Chari	1971	-51%
Tchad	Lai	Lac Tchad	Logone	1970	-39%
Bénin	Malanville	Niger	Niger	1970	-43%
Niger	Niamey	Niger	Niger	1970	-34%
Mali	Douna	Niger	Bani	1971	-70%
Guinée C.	Kankan	Niger	Milo	1979	-36%
Cameroun	Eséka	Nyong	Nyong	1971	-18%
Cameroun	Mbalmayo	Nyong	Nyong	Pas de rupture	Déficit réduit
Bénin	Sagon	Oueme	Oueme	1967	-42%
Bénin	Logozohe-Pont	Oueme	Klou	Pas de rupture	Déficit réduit
Côte d'Ivoire	Semien	Sassandra	Sassandra	1970	-36%
Sénégal	Bakel	Sénégal	Sénégal	1967	-50%
Mali	Oualia	Sénégal	Sénégal	1971	-66%
Burkina Faso	Dapola	Volta	Volta Noire	1971	-41%
Burkina Faso	Boromo	Volta	Volta Noire	1971	-46%
RCA	Bangui	Zaïre ou Congo	Oubangui	1970	-30%
Congo	Salo	Zaïre ou Congo	Sangha	1975	-22%
Cameroun	Doume	Zaïre ou Congo	Doume	Pas de rupture	Déficit réduit



**Figure 1.7 : Variation de l'hydraulicité depuis 1950 pour l'Afrique sèche (Chari, Niger et Sénégal) et l'Afrique humide (Oubangui et Sangha), (Bricquet *et al.*, 1997)**

Comme on peut le constater dans le tableau 1.3, sur la vingtaine de postes d'observation cités, seuls 3 présentent un faible déficit. A l'exception du résultat du Nyong à Eséka, tous les autres déficits sont supérieurs à 20% et peuvent atteindre 70%. Ces différences sont de loin supérieures à celles enregistrées au niveau des précipitations. On en déduit qu'elles sont amplifiées par les cours d'eau. Ceci tient au fait que les cours d'eau intègrent (Servat *et al.*, 1998) de nombreux paramètres influencés par la variabilité climatique, et notamment le développement de la végétation, le ruissellement, l'infiltration, la recharge des nappes, l'évaporation, etc..

La persistance de la baisse des écoulements a eu également un impact considérable sur les lacs et leur environnement dans la région ; l'exemple le plus spectaculaire étant celui du Lac Tchad. Sa superficie est passée de 23.500 km<sup>2</sup> (105 km<sup>3</sup> en volume) en 1962-63 (année où il a atteint son niveau le plus haut du siècle), à seulement 1.500 km<sup>2</sup> dans le courant des années 1980 (Pouyaud & Colombani, 1989).

Sur le plan mondial, le tableau 1.4 (IPCC, 2001), donne un aperçu de la situation des écoulements dans les principales régions du monde.



**Tableau 1.4 : Recent studies into trends in river flows ; (IPCC, 2001)**

Study Area	Data Set	Key Conclusions	Reference(s)
Sur le plan Global	- 161 gauges in 108 major world rivers, data to 1990	- Reducing trend in Sahel region but weak increasing trend in western Europe and North America ; increasing relative variability from year to year in several arid and semi-arid regions	- Yoshino (1999)
Russie - European Russia and western Siberia  - European former Soviet Union	- 80 major basins records from 60 to 110 years  - 196 small basins records up to 60 years	-Increase in winter, summer, and autumn runoff since mid-1970s ; decrease in spring flows  - Increase in winter, summer, and autumn runoff since mid-1970s ; decrease in spring flows	-Georgiyevsky <i>et al.</i> , (1995, 1996, 1997); Shiklomanov & Georgiyevsky (2001) -Georgiyevsky <i>et al.</i> , (1996)
Baltic Region - Scandinavia  - Baltic states		-Increase in winter, summer, and autumn runoff since mid-1970s ; decrease in spring flows - Increase in winter, summer, and autumn runoff since mid-1970s ; decrease in spring flows	-Bergstrom & Carlson (1993)  -Tarend (1998)
Cold Region - Yenesei, Siberia - Mackenzie, Canada	-Major river basin - Major river basin	-Little change in runoff or timing - Little change in runoff or timing	-Shiklomanov (1994) - Shiklomanov <i>et al.</i> , (2000)
North America - United States  - California  - Mississippi basin  - West-central Canada	-206 catchments  -Majors river basins  -Flood flows in major basins  -Churchill-Nelson river basin	-26 catchments with significant trends: half increasing and half decreasing -Increasing concentration of stream flow in winter as result of reduction in snow -Large and significant increases in flood magnitudes at many gauges  - Snowmelt peaks earlier ; decreasing runoff in south of region, increase in north	-Lins & Slack (1994)   -Dettinger & Cayan (1995) ; Gleick & Chalecki (1999) -Westmacott & Burn (1997)
South America - Colombia - Northwest Amazon - SE South America - Andes	-Majors river basins -Majors river basins -Majors river basins -Majors river basins	-Decrease since 1970s -Decrease since 1970s -Decrease since 1970s -Increase north of 40°S, decrease to the south	-Marengo (1995) -Marengo <i>et al.</i> , (1998) -Genta <i>et al.</i> , (1998) -Waylen <i>et al.</i> , (2000)
Europe - UK	-Flood flows in many basins	-No clear statistic trend	-Robson <i>et al.</i> , (1998)
Africa - Sahelian region	-Majors river basins	-Decrease since 1970s	-Sircoulon <i>et al.</i> , (1990)
Asia - Xinjiang region, China	- Majors river basins	-Spring runoff increase since 1980 from glacier melt	-Ye <i>et al.</i> , (1999)
Australia - Australia	-Major basins	-Decrease since mid-1970s	-Thomas & Bates (1997)

### 1.5.1 - Eléments explicatifs de la variabilité hydrologique

Des analyses plus approfondies qui prennent en compte les caractéristiques de formes des hydrogrammes et le tarissement permettent de souligner d'autres manifestations d'ordre qualitatif. Bricquet et al., (1997) montrent que sur le plan des hautes eaux, en régime équatorial, la baisse est plus sensible sur les crues de mai-juin que sur celles d'octobre-novembre. L'amointrissement de la crue de mai-juin est à rattacher à de mauvaises conditions pluviogènes du flux de mousson lors de la montée du FIT. Sur le plan des basses eaux, les étiages des cours d'eau sont systématiquement plus faibles, ce qui traduit un amenuisement croissant des réserves souterraines des bassins fluviaux. En zone soudano-sahélienne, le tarissement des cours d'eau s'est considérablement accéléré depuis les années 70, conduisant à une vidange rapide des nappes. Le tarissement des fleuves de la région tropicale humide montre, à un degré moindre, le même phénomène, alors que celui des fleuves de la région équatoriale est difficilement appréhendé en raison des perturbations des précipitations parasites

Olivry et al., (1993) soulignent que le régime hydrologique des fleuves d'Afrique intertropicale est également influencé par un effet résultant des déficits pluviométriques successifs. Ils font l'hypothèse que l'augmentation considérable du coefficient de tarissement dans la période sèche correspondrait essentiellement à une réduction de l'extension des aquifères et donc de la quantité d'eau dans les nappes. Par conséquent, l'augmentation de l'épaisseur de la tranche aérée du sol au-dessus de la surface piézométrique (résultat de la baisse constante du niveau piézométrique) ne permet pas alors une réalimentation facile des nappes. Les eaux d'infiltration sont piégées par la zone non saturée et seraient reprises par l'évaporation ou resteraient en attente des apports complémentaires des années suivantes, et ne finiront par aboutir à une recharge de la nappe qu'en cas de bonnes précipitations prolongées. La recharge de la nappe est donc dépendante d'un fonctionnement hydrogéologique pluriannuel. L'"effet mémoire" de la sécheresse aura par conséquent une influence prolongée sur les écoulements même après la reprise des précipitations, notamment dans la région soudano-sahélienne. C'est ainsi que, pour des précipitations de 15% supérieures à la moyenne de la période 1951-1989, sur le bassin versant du Niger à Koulikoro, en 1994 la crue a été tout simplement moyenne tant en pointe qu'en module (Bricquet et al., 1996). Le faible déficit pluviométrique que présente l'Afrique équatoriale ne permet pas d'observer ce phénomène (Sigha Nkamdjou et al., 1998).

Les autres manifestations de la baisse des écoulements sont la modification de la forme de l'hydrogramme et le décalage de la date du débit de pointe. Sircoulon (1990) montre que les hydrogrammes des principaux cours d'eau de la région tropicale africaine présentent plusieurs pointes en année sèche contre une pointe unique en années humides. Sur le Niger à Niamey, entre 1970 et 2000, la pointe de la crue est enregistrée environ deux mois plus tôt (Abou Amani & Nguetora, 2002), par rapport à la période d'avant 1969. Dans le même ordre d'idée, le niveau de la crue d'été a dépassé celui de la crue d'hiver quatre fois depuis 1984, alors que cela ne s'était jamais produit depuis le début des observations en 1923. Mahé et al., (2003) montrent que la relation pluie-écoulement de nombreux cours d'eau "sahélo-soudanien" d'Afrique de l'Ouest au nord de l'isohyète 700 mm est durablement modifiée, sans qu'il soit possible au stade actuel, de différencier les influences climatiques et anthropiques.

## **1.6 - IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIO-ECONOMIQUES**

L'importance de l'eau pour le développement social et toutes les formes de vie sur terre n'est plus à démontrer. Elle est essentielle pour l'alimentation, l'agriculture, l'industrie, l'assainissement, et pour de nombreux autres usages tels que l'hydroélectricité et la navigation. Les océans, les mers, les lacs et toutes les autres formes de réservoirs servent également d'habitat à une multitude d'êtres vivants. Il va de soi dans ces conditions qu'au-delà de l'alimentation en eau, tout changement qui intervient dans le fonctionnement des systèmes hydrologiques peut être désastreux pour l'environnement, l'économie et la société.

### **1.6.1 – Impacts environnementaux**

A la fois complexe et fragile, l'équilibre des écosystèmes dépend en grande partie de la dynamique hydroclimatique qui détermine la nature et le développement des espèces qui y vivent. La végétation naturelle est affectée par la variabilité pluviométrique dans sa composition floristique et dans sa structure, ainsi que dans l'adaptation morphologique et écophysologique des espèces qui la composent (Le Houérou, 1992). Ainsi, les progrès récents en paléoécologie permettent (Maley, 2001 ; Sultan et al., 2001) d'affirmer que les forêts denses tropicales ont subi de nombreuses modifications, en phase avec les variations du climat auxquelles elles apparaissent liées au sein d'une histoire de la dynamique végétale à l'échelle des ères géologiques. L'alternance des phases de glaciation et d'interglaciation se

traduit par une alternance de reculs et de reprises forestières sur l'ensemble de la zone tropicale. Le début de l'Holocène (vers 10.000 BP) coïncide avec la dernière phase d'extension maximale des forêts humides tropicales. Pour ce qui concerne l'Afrique centrale en particulier, la configuration des formations forestières actuelles résulte largement des perturbations et modifications de la végétation qui l'ont affectée depuis près de 3.000 ans. Maley (2001), montre qu'il existe des analogies entre ce qui pourrait se produire dans cette région au cours de la phase de réchauffement global, qui est prédite par les modèles climatiques, et ce qui y est arrivé vers 2500 BP suite à un réchauffement naturel.

Plus proche de nous, Pouyaud & Colombani (1989) soulignent l'impact considérable de la sécheresse récente sur les lacs et leur environnement, notamment le Lac Tchad. Selon Olivry et al. (1996), la végétation de l'hydrosystème du Lac Tchad est évolutive en fonction des variations du plan d'eau. Elle varie également selon qu'on s'adresse aux zones marécageuses, aux îles ou aux archipels. Avant la baisse considérable du niveau du lac, les principales espèces végétales rencontrées étaient les Phragmites, les *Cyperus papyrus*, les *Vossia*, les *Typha*, les *Potamogeton* et *Ceratophyllum*. Après la baisse du niveau du lac consécutive à la sécheresse récente, des changements importants de végétation sont intervenus. En 1976, l'essentiel de la végétation est constitué par le couple *Vossia* - *Aeschynomene*. Des observations similaires ont également été effectuées dans la plaine d'inondation du Logone dans le Nord Cameroun, à la suite de la baisse des inondations observée depuis les années 1970 (Naah, 1990 ; Olivry, 1986 ; Sighomnou et al., 1997, 1999, 2002a & b ). Des études de végétation (Scholte et al., 1997 & 2000 ) ont montré que certaines espèces végétales caractéristiques des zones inondées comme le *Vetiveria nigrita* et l'*Echinocloa pyramidalis*, plus riches en protéines et bien appréciées des animaux, ont été remplacées par d'autres espèces comme le *Sorghum arundinaceum* moins appréciées. Il s'agit là de changements qui interviennent dans la biodiversité et conduisent à la dégradation des pâturages. La dégradation de l'écosystème et de la biodiversité touche ainsi par voie de conséquence la faune domestique et sauvage dont l'alimentation et l'habitat naturel se trouvent perturbés. C'est le cas des poissons d'eau douce dont la productivité primaire a fortement baissé avec la diminution des surfaces inondées, lieu naturel de leur reproduction. Des changements comparables ont été également observés sur le bassin de la Kamadugu-Yobe (Oyebande, 2001), au Nigeria. D'autre part, la dégradation de la qualité des pâturages affaiblit leur pouvoir nutritif et provoque une recrudescence des maladies parasitaires responsables de la mauvaise santé et de la mortalité pour la faune sauvage et domestique (Scholte et al., 1997 ; Albergel et al., 2000).

Une étude réalisée dans le sud tunisien sur une période de 25 ans (Le Houérou, 1992), montre une corrélation entre les effectifs de petits ruminants et les précipitations (figure 1.8). L'impact de la variabilité des précipitations se fait surtout sentir sur les effectifs de jeunes. Un décalage d'un an est observé entre la variation importante des précipitations et la réponse des troupeaux. Des faits identiques ont été observés également au Sahel (Bernus, 1981), dans le nord Cameroun au niveau de la faune sauvage dans le parc de Waza (Scholte et al., 1997). Il semble, selon Le Houérou (1985), que le phénomène constitue une règle générale.

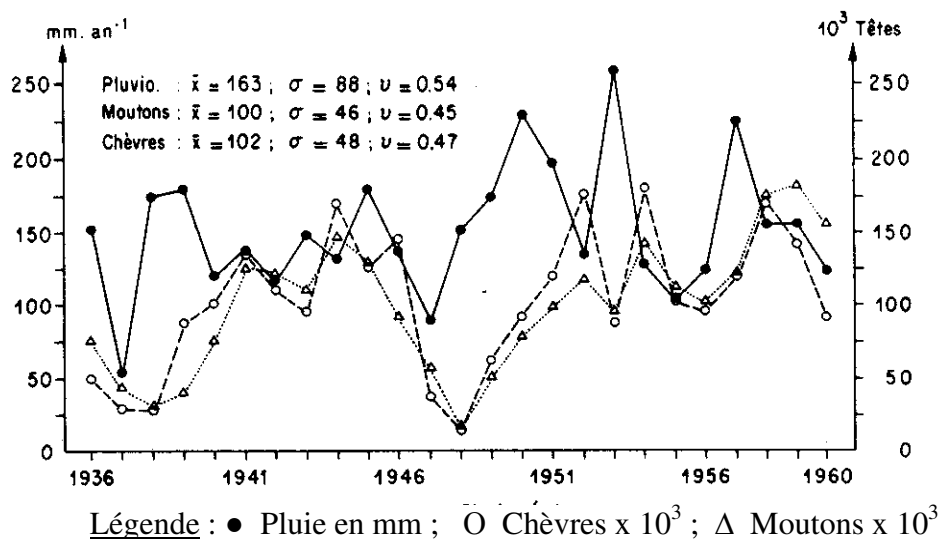


Fig. 1.8 : Relations entre le cumul des pluies annuelles et les effectifs des petits ruminants jeunes (âge inférieur à 12 mois) en Tunisie méridionale (Le Houérou, 1962)

Ainsi, la végétation naturelle est affectée par la variabilité pluviométrique. Il en va évidemment de même des cultures. Les plantes à cycle de développement court sont alors utilisées par l'homme pour faire face aux fluctuations climatiques. En définitive, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, les transformations qui interviennent dans des systèmes hydro-écologiques engendrent de nombreux bouleversements qui vont des modifications/destructions des sources d'alimentation à celui des habitats de la faune aquatique et terrestre.

A l'opposé de ce qui est observé au niveau du Lac Tchad, l'analyse des variations du niveau du lac Tanganyika sur la période 1932-1995 montre plutôt une augmentation brutale d'environ 3 m entre 1961 et 1964 (Bergonzini et al., 2002). Cette augmentation est synchronisée avec la crue centenaire de 1962 sur le fleuve Congo (Olivry, 1993), aux forts débits de nombreux affluents du Nil (Conway & Hulme, 1993) et aux hauts niveaux des lacs Kivu,

Turkana et Victoria (Street-Perrot & Harrison, 1985). Si les modifications des conditions de surface au niveau des bassins versants constituent un facteur non négligeable, cette augmentation est bien associée aux conditions pluviométriques favorables dans la région, comme on peut le constater sur le graphique de la région Afrique de l'Est de la figure 1.5.

Les autres principaux impacts environnementaux sont l'accentuation du phénomène de désertification, résultant des actions conjuguées de la baisse des précipitations et de la surexploitation des terres ; la vulnérabilité des écosystèmes côtiers consécutive à la remontée du niveau des eaux marines, etc..

### **1.6.2 – Impacts socio-économiques**

Pour assurer leur développement, les communautés au fil du temps se dotent des infrastructures nécessaires à leurs activités en s'adaptant au climat local. Les principales répercussions des modifications climatiques sur les populations concernent essentiellement l'alimentation en eau et en énergie, la sécurité alimentaire, la santé, etc.. Dans le cas de la plaine du Logone évoqué plus haut, d'importants bouleversements sociaux ont été enregistrés, allant du changement d'activité au déplacement des populations vers des régions plus hospitalières. Ainsi, des groupes d'anciens pêcheurs et éleveurs sont devenus agriculteurs, ce qui a favorisé la multiplication des conflits d'utilisation des ressources et plus généralement des terroirs. Une forte migration des populations a été également enregistrée, vers les villes et ailleurs vers des endroits où les conditions de vie sont plus propices (Sighomnou et al., 2000). Ailleurs au Cameroun et dans d'autres pays d'Afrique, la diminution de la productivité du travail paysan, fortement dépendante de la pluviosité, et le raccourcissement de la durée de submersion des zones marécageuses ont favorisé le développement des cultures de contre-saison dans les bas-fonds au détriment de la diversité biologique naturelle.

En Afrique de l'ouest et centrale en particulier, l'économie de nombreux pays dépend étroitement des ressources en eau : projets de développement, agriculture, hydroélectricité, alimentation en eau, infrastructures de protection, etc.. La conception des aménagements ne tient pas compte de la variabilité interannuelle (Fritsch et al., 1998), ce qui crée des situations de pénurie en période de sécheresse. C'est le cas du barrage de Kossou en Côte d'Ivoire. Construit pendant la période humide et inauguré au courant des années 1970, il n'a jamais atteint sa capacité nominale en raison de la persistance de la sécheresse (Paturel et al., 2003).

La persistance des déficits hydropluviométriques en Afrique tropicale a également conduit, dans certaines circonstances, à des changements sur les modes d'utilisation et de gestion des ressources en eau. C'est le cas des aménagements hydro-agricoles de la SEMRY (Société d'Expansion et de Modernisation de la Riziculture de Yagoua) réalisés en 1979 sur les rives du fleuve Logone dans le Nord Cameroun (Sighomnou et al., 1997 et 2000, Lienou et al., 2003). Intervenu à la suite de la baisse du régime des précipitations dans la région, le but visé par le projet était d'augmenter la production alimentaire en réduisant la dépendance de l'agriculture vis-à-vis des précipitations. Ailleurs au Burkina Faso, la baisse des écoulements de la période récente a conduit à la remise en cause d'un aménagement hydroélectrique projeté à Nombiel (Ouedraogo, 2001), les écoulements actuels étant incompatibles avec ceux à la base de sa conception.

Un autre point important à souligner concerne les conflits qui peuvent naître au niveau des bassins hydrographiques partagés. En effet, dans des situations d'intérêts parfois contradictoires, le problème de partage des ressources en eau peut être à l'origine de conflits comme cela a déjà été le cas dans certains pays africains. Une bonne connaissance des ressources et une coordination régionale sont alors indispensables pour une gestion efficace et compréhensible par tous.

## **1.7 - NORMES EN HYDROLOGIE**

Les projets d'aménagement sont en général dimensionnés sur la base de quantiles déterminés au moyen des analyses statistiques des séries de données, le choix du niveau de protection étant basé sur des analyses économiques du couple investissements-dommages. En statistique, s'il est généralement admis qu'une moyenne est d'autant plus proche de la réalité que la série à partir de laquelle elle a été déterminée est longue, on reconnaît par ailleurs qu'une chronique de 30 années d'observations est suffisante pour conduire à une moyenne convenable. C'est ainsi que les normales de l'OMM sont déterminées sur une période de 30 ans. Les observations hydroclimatiques ayant débuté au début des années 1950 dans la plupart des pays de l'Afrique de l'Ouest et du centre, la période de référence qui y est habituellement utilisée pour l'évaluation des risques en hydrologie correspond aux années 1951-1980.

En se basant sur la norme météorologique qui désigne une moyenne sur 30 ans et étant entendu qu'elle varie tous les 10 ans, la norme utilisée une année X devrait logiquement être calculée sur les 30 dernières années suivant la technique des moyennes mobiles. Dans ces conditions, la norme pluviométrique de l'année 2000 devrait être calculée sur la période 1971-2000. En raison de la sécheresse persistante des 30 dernières années, cette norme devrait être largement en deçà de celle de la période de référence (1951-1980) habituellement utilisée pour la plupart des cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest et centrale. Paturel et al., (2003) montrent qu'il en va de même si les moyennes sont déterminées en réunissant les données anciennes et celles de la période récente. Une analyse comparative des modules de trois cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest (Ouedraogo et al., 2002) montre que les différences peuvent être très importantes dans certains cas. Ainsi, un rapport de 2,5 a été observé entre la norme calculée sur la période 1971-2000 et celle calculée sur la période 1951-1980, sur le Bani à Douna. Pour l'ensemble des trois cours d'eau étudiés, le débit millennial calculé sur la période 1971-2000 est inférieur au débit décennal de la période 1951-1980.

D'autres études (Albergel, 1987; Mahé et al., 2002 et 2003, Leduc et al., 2001) ont montré que le déficit pluviométrique pendant la sécheresse récente est largement compensé par la modification des états de surface (augmentation des surfaces cultivées et des sols nus), dans le fonctionnement de bassins sahéliens. C'est ainsi que, paradoxalement, des accroissements de débit sont observés sur ces bassins en dépit des déficits enregistrés au niveau des précipitations.

Devant cette situation on peut se demander quelle attitude adopter pour le dimensionnement des ouvrages et l'évaluation des risques divers liés à l'eau ? Aucune solution définitive n'a été proposée jusque là. Todorov (1985) suggère l'établissement de nouvelles normales pluviométriques incluant toutes les années récentes, mais précise que la longueur de la période sur laquelle les normales seraient calculées devra dépendre de l'utilisation envisagée. Hubert et al., (1989) recommandent que les normes hydrologiques soient désormais établies sur la base des données récentes, éventuellement "grossies" de certaines phases similaires antérieures. Farmer (1986) affirme quant à lui qu'il y a un danger à utiliser les moyennes pluviométriques anciennes qui ne prennent pas en compte les fluctuations récentes, avec le risque de ne jamais atteindre les prévisions. Morel (1986) de son côté suggère deux séries de normes dont une pour chaque contexte, soit une norme de période sèche et une autre pour la période humide. Devant cette complexité de la question, vouloir répondre à la question posée



serait s'engager dans un débat qui n'est pas clos. Aussi, laisserons-nous à l'analyse de situations précises le soin d'apporter, dans le chapitre suivant, l'enseignement concret des faits. En nous référant pour l'instant, à la conclusion de Paturel et al. (2003) qui estiment que le problème de la révision des normes en hydro-pluviométrie revêt une très grande importance sur un plan pratique, nous disons avec ces derniers qu'il est difficile de proposer une solution unique et définitive.

## CONCLUSION

Les résultats des recherches dans de nombreux domaines ont montré que le climat de la planète a subi des fluctuations aussi bien à l'époque actuelle que par le passé. Les causes sont encore mal connues, mais quelques éléments explicatifs ont été suggérés : position latitudinale de la Zone de Convergence Intertropicale, convection plus faible, réduction de l'humidité du sol, variabilité des températures de surface des océans. Une simultanéité avec la déforestation dans certaines régions de l'Afrique humide (Brou Yao et al., 1998) a été également relevée. Les impacts de ces fluctuations sur les régimes hydroclimatiques sont différents selon que l'on s'adresse aux régions froides et tempérées ou aux régions tropicales sèches et humides.

Dans les régions froides et tempérées, le principal changement observé sur le régime hydrologique concerne davantage la répartition annuelle des écoulements que la moyenne annuelle. Plusieurs auteurs sont unanimes sur le fait que la plus grande augmentation de l'écoulement s'observe en hiver du fait de la hausse de température qui réduit la couverture neigeuse. Un accroissement de la fréquence et de l'intensité des orages a été également souligné.

Pour ce qui concerne les régions tropicales sèches et humides, notamment celles de l'Afrique, la principale conclusion que l'on peut tirer des études précédentes est que la sécheresse récente, qui a débuté à la fin des années 1960, continue au-delà de l'année 2000 malgré un espoir de rémission apporté au courant de la décennie 1990 par quelques années humides. La persistance remarquable de cet événement, constitue la principale différence avec les deux précédentes périodes sèches du 20<sup>ème</sup> siècle, en 1913 et en 1940. Sur la base des résultats déjà enregistrés on commence également à mieux comprendre certaines de ses manifestations. En

particulier, de nombreux auteurs s'accordent pour affirmer que la récente sécheresse constitue une séquence "anormale" en région sahélienne, vis à vis de la variabilité hydroclimatique à plus long terme. Si les déficits pluviométriques sont de l'ordre de 20 à 25% en moyenne, la baisse des écoulements est beaucoup plus importante. Elle est généralement au moins égale au double du déficit pluviométrique, soit 40 à 50% en moyenne, mais peut dépasser le triple notamment en régions arides et semi-arides.

Cependant, si pour les grands bassins, on note un amoindrissement général des valeurs de tous les paramètres hydrologiques, l'analyse des éléments du bilan hydrologique montre que le déficit pluviométrique n'a pas réduit les écoulements et encore moins les coefficients d'écoulement, pour les bassins situés dans les régions sahéliennes et semi-arides. Albergel (1987) et Mahé (2002) associent cette différence à une modification des états de surface qui conduit à une amélioration de la fonction de production. Les régimes hydrologiques du Cameroun subissent différemment les effets de cette sécheresse, en raison de la diversité de ses climats, de son orographie et de sa phytogéographie (Sigha Nkamdjou et al., 2002). Un déficit pluviométrique de l'ordre de 5% en moyenne est observé dans le domaine forestier du sud contre 10% pour les écoulements, mais ce déficit peut atteindre 50% dans la partie septentrionale du pays.

Au-delà du problème du manque d'eau dont les conséquences sur l'environnement et la qualité de vie en particulier ne sont plus à démontrer, la sécheresse pose de nombreux problèmes socio-économiques et constitue une contrainte au développement des pays affectés. En effet, la conception de la plupart des projets d'aménagement ne tient pas compte de la variabilité interannuelle des caractéristiques hydropluviométriques, ce qui crée des situations de pénurie en période de sécheresse. Cette situation, associée à la variabilité saisonnière, a poussé certains auteurs (Fritsch et al., 1998) à proposer la notion de "ressources régulières" définies, par exemple, comme celles qui sont assurées 90% de temps. Cette notion implique cependant des aménagements de bassin pour augmenter la part des ressources régulières, avec les conséquences bien connues comme la réduction de la recharge des nappes phréatiques lors de l'épandage des crues dans le lit majeur des fleuves, la réduction ou la suppression des grandes zones humides, etc..

Outre les causes du phénomène qui restent encore à élucider, deux points principaux restent à explorer : l'impact de la variabilité et des changements climatiques sur la recharge des eaux

souterraines et les effets des modifications induites par l'homme par rapport à ceux résultant des changements climatiques. Au moins sur le plan local, les effets de ces dernières devraient être plus importants que ceux du changement climatique. Un "effet mémoire" dans la production des aquifères des grands bassins versants a cependant été souligné (Olivry, 1993), en raison de la persistance de la sécheresse, d'où la faiblesse des écoulements même au cours des années caractérisées par une bonne hydraulicité comme ce fut le cas en 1994 et 1999.

Sur un plan pratique, les projets d'aménagement basés sur l'eau sont en général dimensionnés en s'appuyant sur des normes établies à partir des observations de terrain. En regard de tout ce qui précède, la non prise en compte des variations qui interviennent au niveau des facteurs du ruissellement sur le bassin d'une part, et d'autre part, des fluctuations des paramètres climatiques durant la vie des ouvrages peut conduire à des différences pouvant dépasser 50%. Il se pose alors la question de savoir quelle norme retenir en pareille circonstance. Les travaux antérieurs n'ont pas proposé de solution définitive. Les analyses de situations précises dans les chapitres suivants apporteront les enseignements concrets des faits et permettront assurément d'envisager une nouvelle approche de la question.

Dans cette optique, la présente étude vise à approfondir et compléter ce qui a déjà été fait sur l'ensemble du sujet à l'échelle du Cameroun, en vue de mieux prédire le futur en terme de moyenne et de fréquence de distribution de certaines variables caractéristiques de l'évolution des ressources en eau du pays. Avant d'aborder ces analyses, nous rappellerons d'abord dans le chapitre qui suit les grandes lignes des régimes hydroclimatiques du pays. Nous présenterons ensuite les données de l'étude dans le chapitre suivant avant de procéder à une analyse fine et complète de la variabilité pluviométrique et hydrologique sur l'ensemble du pays.

## **CHAPITRE II : CARACTERISATION DES REGIMES HYDROCLIMATIQUES DU CAMEROUN**

## **2.1 - INTRODUCTION**

Ce chapitre donne un aperçu général du milieu naturel du Cameroun, sa population, son économie ainsi que les grandes lignes de l'originalité de son climat et des ses régimes hydropluviométriques. On y décrit également l'historique des observations hydroclimatiques dans le pays et l'état de la situation actuelle. L'essentiel des informations de ce chapitre est emprunté aux travaux antérieurs relatifs aux régimes hydroclimatiques du Cameroun, notamment ceux d'Olivry (1986) et Suchel (1987).

## **2.2 - POPULATION ET ACTIVITES ECONOMIQUES**

Situé en Afrique Centrale, au fond du Golfe de Guinée (voir carte figure 2.1), le Cameroun couvre une superficie de 475000 Km<sup>2</sup>. Le dernier recensement des populations au Cameroun date de 1987. La population du pays a alors été évaluée à 10,5 millions d'habitants dont 49,2% d'hommes et 50,8 de femmes. Le taux de croissance prévisionnel entre 1980 et l'an 2000 était de 3,2%, ce qui ferait une population de près de 15 millions d'habitants en l'an 2000, selon les spécialistes. La densité moyenne est évaluée à 23,6 habitants au km<sup>2</sup>, mais elle peut varier suivant les régions, de 2 à 150 habitants au km<sup>2</sup> en 1990. La population urbaine est évaluée à 60% du total en 2001, regroupée dans 6 principales villes dont les plus peuplées sont Douala (capitale économique) et Yaoundé (capitale politique).

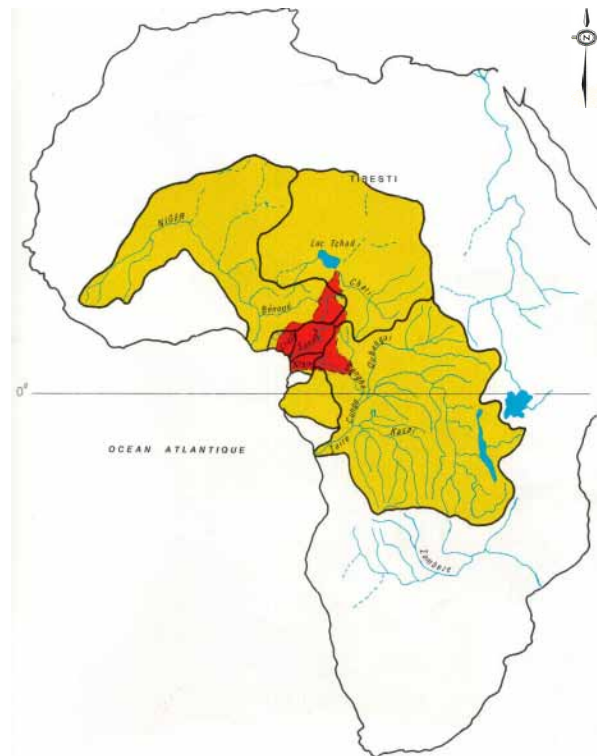
Selon une étude de la Banque Mondiale (1992), l'agriculture occupe environ 80% de la population active et génère plus de la moitié des recettes d'exportation. L'agriculture traditionnelle, essentiellement pluviale, couvre 90% des surfaces cultivées. Les principales cultures de rente sont : café, cacao, coton, thé, banane, canne à sucre, palmier à huile, caoutchouc et tabac. Les principales cultures vivrières sont : mil, riz, manioc, maïs, haricots, macabo, patate et banane plantin. Les ressources de l'élevage sont également importantes et contribuent à assurer l'autosuffisance alimentaire du pays. La pêche remplit également cette fonction, mais sa production ne couvre pas la totalité de la demande du pays. Les principales ressources naturelles sont le bois, les hydrocarbures et quelques autres ressources minières dont la bauxite, le calcaire et le fer.

Le secteur industriel a contribué à environ 31% du PIB du pays en 1988, dont 15% des industries extractives et du pétrole, 10% des industries manufacturées, 5% des bâtiments et travaux publics, 1% du secteur électricité, gaz et eau.

Le produit national brut (PNB) par habitant est faible. Il est évalué à 680 US\$/habitant/an en 1995, ce qui le place dans la classe 1 ( $PIB < 795 \text{ US\$/habitant/an}$ ) de la nomenclature de la banque mondiale.

### 2.3 - LE MILIEU NATUREL

Très étiré en latitude, le Cameroun couvre une longueur d'environ 1300 km sur son axe nord-sud, contre près de 900 km sur l'axe est-ouest. Il partage 4700 km de frontière avec 6 pays voisins (Nigeria, Tchad, Centrafrique, République du Congo, Gabon et Guinée Equatoriale) dont 1700 Km avec le seul Nigeria, et 400 km de côte sur l'océan Atlantique (figure 2.1). Son relief s'étage de 0 à 4095 m au sommet du Mont Cameroun. Du point de vue climatique, environ 4/5<sup>ème</sup> de la surface du pays appartiennent à la zone des climats humides, alors que les climats tropicaux de nuance sèche concernent le 1/5<sup>ème</sup> restant.



*Echelle 1: 85.000.000*

**Figure 2.1 : Le Cameroun en Afrique, ses relations avec les grands bassins du continent (Olivry, 1986)**

Le milieu naturel définit l'ensemble des caractéristiques physiques qui influencent sur l'existence des êtres vivants sur la terre. De ce point de vue, la diversité des paysages du Cameroun constitue l'une de ses principales originalités. Elle tient essentiellement à son allongement de l'équateur à la zone sahélienne ; son ouverture sur l'océan par le Golfe de Guinée, porte d'entrée du flux de mousson sur le continent africain ; sa situation à la charnière des domaines climatiques ouest et centre-africain et son orographie variée.

### 2.3.1 - Orographie

La particularité du relief camerounais tient pour partie aux régions montagneuses d'origine essentiellement volcanique, mais également aux contrastes imprimés par de vastes plaines et plateaux aux surfaces aplanies, constituant des gradins étagés à travers l'ensemble du pays. La figure 2.2 tirée de l'étude de J.-C. Olivry (1986) est une esquisse géomorphologique du Cameroun qui indique les principales unités.

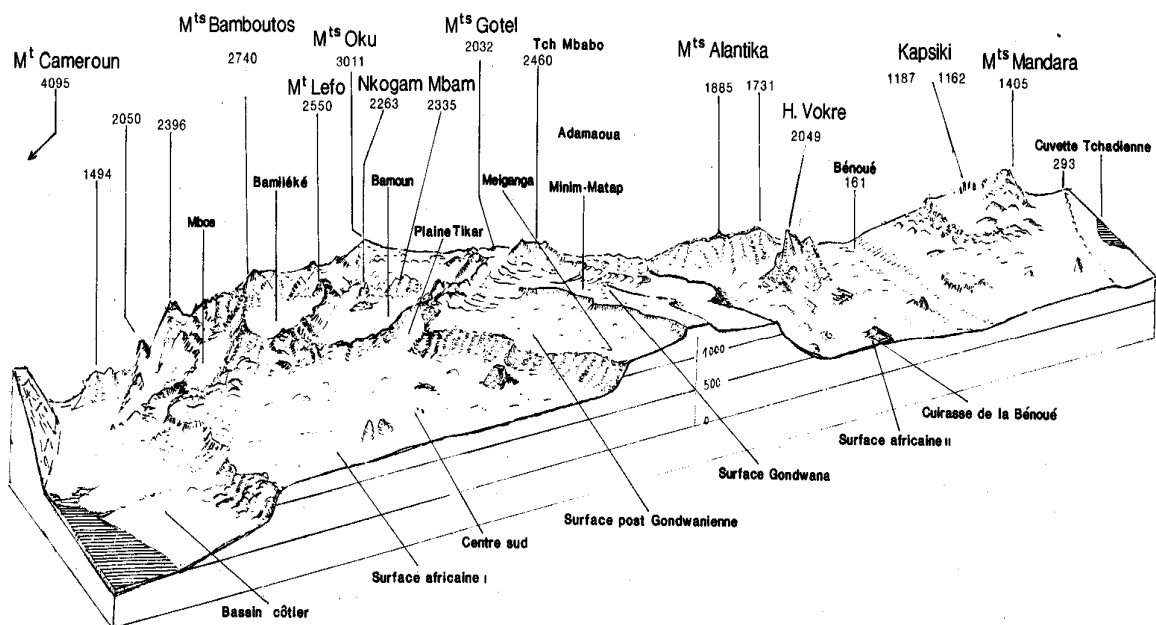


Figure 2.2 : Coupe géomorphologique schématique du Cameroun suivant un axe SSW-NNE (Olivry, 1986)

On y distingue les principales unités géomorphologiques suivantes :

- entre le Mont Cameroun à l'ouest et Campo vers l'Est, la plaine sédimentaire de la façade maritime épouse la courbure du Golfe de Guinée. A peine ondulée, celle-ci ne dépasse

généralement pas 200 m d'altitude. Couverte essentiellement de forêt dense, elle est traversée par le cours inférieur des principaux fleuves de la façade atlantique du pays ;

- le plateau sud camerounais (600 à 900 m) occupe la majeure partie du pays, avec un relief de collines et de bas-fonds marécageux. Débordant au sud sur le Gabon, elle s'étend au nord jusqu'aux contreforts de l'Adamaoua. Cette surface constitue par ailleurs une des constantes majeures de l'Afrique Centrale. Le passage du plateau à la plaine côtière s'effectue par une série de gradins étroits de structure complexe ;
- les hauts reliefs du Cameroun sont composés principalement du Mont Cameroun, de la Dorsale camerounaise, de l'Adamaoua et des massifs montagneux du Nord. Faisant suite au Mont Cameroun qui élève sa puissante masse volcanique jusqu'à plus de 4.000 m, la Dorsale camerounaise qui forme un arc de cercle de plus de 400 km est constituée d'une suite de massifs montagneux et de hauts plateaux. Le bloc compact de l'Adamaoua (principal château d'eau du pays), dont les altitudes sont comprises entre 1.000 et 1.500 m, prolonge la Dorsale vers l'est du pays et en Centrafrique. Les montagnes qui prolongent la Dorsale camerounaise vers le Nord au-delà de l'Adamaoua, selon la direction de la Ligne du Cameroun forment une série de massifs (dont les monts Alantika et Mandara plus au nord), de moindre altitude éparpillés à l'intérieur des basses terres du Nord ;
- les basses terres du nord de l'Adamaoua composées essentiellement de deux unités. La première est constituée par la plaine de la Bénoué qui s'épanouit en une large et profonde cuvette au pied de l'Adamaoua. La partie la plus basse est à environ 160 m d'altitude, soit nettement plus bas que la surface moyenne du Lac Tchad qui se situe autour de 280 m. La seconde unité est constituée par la grande Cuvette tchadienne qui constitue une immense dépression endoréique aux pentes très faibles. Elle est de ce fait caractérisée par de vastes zones inondées pendant plusieurs mois par les eaux de débordement des crues du Logone et du Chari.

Au-delà des principaux facteurs (latitude, situation par rapport à l'océan, centres d'action, flux, masse d'air, perturbation), qui commandent la mise en place du canevas climatique général, il est incontestable que ces principales unités géomorphologiques, sont en rapport étroit et impriment leurs marques sur les traits spécifiques du climat camerounais.



### 2.3.2 - Géologie

Plus de 90% du territoire camerounais est constitué des formations appartenant au socle précambrien. Les bassins sédimentaires forment des zones de subsidence relativement peu étendues, dans la région côtière (bassins de Douala et de Mamfé), le nord (bassin de la Bénoué), et le Sud du Tchad ; alors que les massifs volcaniques liés au magmatisme récent forment une chaîne qui s'étend de la côte atlantique jusqu'à l'Adamaoua où elle se divise en deux branches nord - sud et est - nord-est.

Les premières synthèses de la géologie du Cameroun proposent l'existence d'un socle archéen remobilisé (Complexe de base) sur lequel reposent les "Séries intermédiaires" et la "Formation du Dja" (Gazel, 1958 ; Bessoles, 1969). Des études récentes, en particulier celles de Soba (1989), Nzenti (1987 et 1994), Toteu (1990), Penaye *et al.* (1993) et Ngako (1999), Nzolang *et al.* (2003), donnent une nouvelle interprétation géologique de la stratigraphie du socle précambrien du Cameroun que nous résumons brièvement dans les lignes qui suivent. Une illustration des principales formations géologiques est présentée sur la figure 2. 3, tirée de Nzolang *et al.* (2003).

Un ensemble archéen (>2500 Ma) et un ensemble paléoprotérozoïque (>2100 Ma) regroupé sous l'appellation de "Complexe du Ntem" et correspondant à la partie camerounaise du Craton du Congo couvrent le Sud du pays. Ces ensembles sont composés essentiellement de tonalites, de trondjémites, de granites, de granulites et de roches vertes. Les principaux bassins versants intéressés par ces formations sont ceux du Dja à l'est et les fleuves côtiers à l'ouest (Ntem, Nyong, Lobé et Lokoundjé)

Le Craton du Congo délimite la bordure sud de la Chaîne Panafricaine (1000 - 500 Ma) qui couvre la quasi-totalité du reste du territoire camerounais. Les principales formations géologiques de cette partie du pays sont des micaschistes, des gneiss, des migmatites et des granites. Les groupes de Poli et du Lom y forment des entités affectés par un métamorphisme plus faible. Ces formations intéressent principalement les bassins versants de la Sanaga dans le Centre du pays, de la Kadéï à l'Est, de la Bénoué dans le Nord, les tributaires de la Bénoué inférieure et les fleuves côtiers à l'Ouest de la Sanaga.

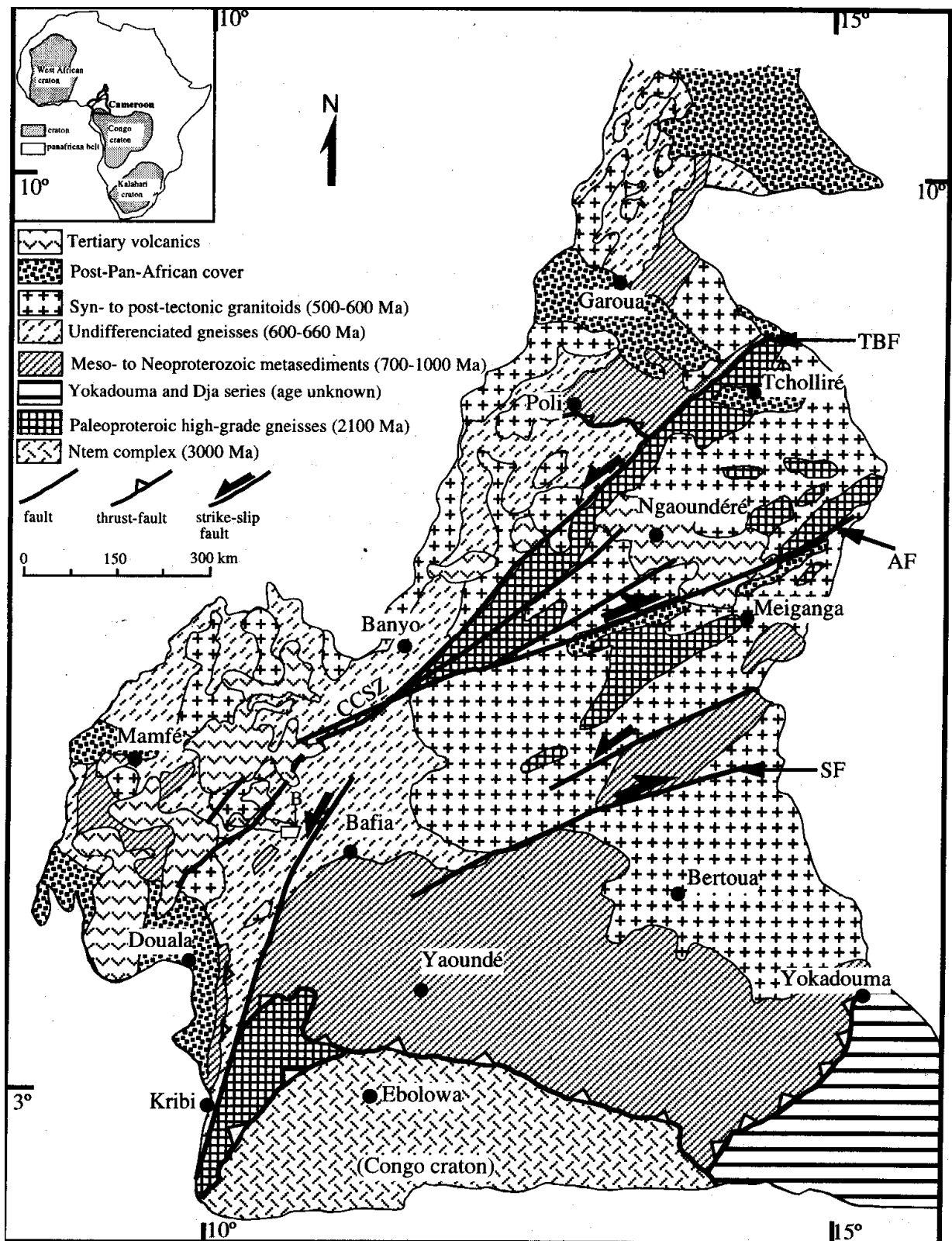


Figure 2.3 : Esquisse géologique du Cameroun d'après Nzolang *et al.* (2003), montrant les formations de la Chaîne panafricaine, avec le Complexe du Ntem (Craton du Congo) à sa limite sud et la couverture phanérozoïque tchadienne dans le Nord (bien que cela n'apparaisse pas intégralement sur cette carte, la couverture post-panafricaine de l'extrême-nord intéresse tout le bassin sédimentaire de la région du "Bec de canard" au lac Tchad).

La série de Mangbéi dont l'âge des dépôts volcano-sédimentaires est estimé à environ 490 Ma, marque la fin de l'évolution tectono-métamorphique panafricaine au Cameroun. Elle fait partie d'un ensemble régional dont les représentants se retrouvent près du Lac de Léré, près de Mangbéi et à Hoye près de Poli. On considère qu'après ces dépôts, l'ensemble du territoire est soumis aux processus de réajustement isostatique et d'érosion.

Les premières formations sédimentaires du Cameroun datent du Crétacé inférieur. Elles couvrent à peine 10% du territoire, mais réunissent plus de 70% des ressources en eau souterraine du pays, comme nous le verrons plus loin. Trois principaux bassins font partie de cet ensemble (Gazel, 1958, Bessoles, 1969, 1980) :

- Le bassin sédimentaire côtier situé en bordure du Golfe de Guinée couvre une superficie de 7.000 km<sup>2</sup>. Il correspond à une fosse subsidante formée à partir du Crétacé et s'approfondissant progressivement en direction de l'océan où il atteint des épaisseurs de 4.000 m à 40 km et 8.000 m plus au large. Les principales formations sont essentiellement des marnes et argiles noires ainsi que des sables gréseux. Du point de vue de l'hydrologie, le bassin sédimentaire côtier représente l'exutoire naturel des principaux cours d'eau de la façade atlantique du Cameroun : Ntem, Nyong, Sanaga, Wouri, Mungo et Cross-River.
- Le bassin de la Bénoué comprend des sédiments détritiques d'âge Crétacé et Quaternaire qui reposent directement sur le socle cristallin. Le Crétacé supérieur est constitué essentiellement de grès dont la puissance atteint 800 m à l'Ouest de Garoua. Le Crétacé inférieur débute avec des argiles consolidées, des grès à grain fin et des calcaires gréseux. Le quaternaire forme les terrasses en bordure des cours d'eau et les comblements argilo-sableux des zones inondables. Sur le plan hydrologique, ce bassin constitue le lit majeur de la Bénoué dont elle reçoit périodiquement les eaux de débordement, à l'instar de la plaine du fleuve Logone dans l'extrême-nord du pays.
- Le bassin de l'extrême-nord Cameroun fait partie de la cuvette tchadienne. Celle-ci constitue une zone d'épandage d'alluvions tertiaires, quaternaires et actuelles centrée sur le Lac Tchad. Les formations sont essentiellement de type sableux, argileux à argilo-sableux, gréseux, et gréso-calcaire. Le cours inférieur du fleuve Logone qui forme la frontière entre le Cameroun et le Tchad, constitue l'élément hydrographique

majeur de cette partie de la cuvette. En période de crue, l'écoulement du fleuve se fait à travers des vastes marécages localement appelés *Yaéré* (plaine périodiquement inondable). Ces derniers en assurent la décantation et retiennent la charge solide dont le total est estimé à près d'un million de tonnes en année moyenne (Gac, 1979). Outre les eaux du Logone, le *Yaéré* reçoit également du côté camerounais, les eaux d'une douzaine de Mayo (cours d'eau torrentiel) issus des monts Mandara.

Le plutonisme et le volcanisme récents du Cameroun suivent l'orientation des grandes failles panafricaines qui semblent contrôler leur localisation et leur évolution. Le plutonisme concerne une quarantaine de massifs (essentiellement des granites, mais aussi des syénites), alignés sur près de 1000 km, de l'Atlantique au Lac Tchad. Les massifs volcaniques forment un alignement qui définit la "Ligne du Cameroun" (ligne de direction N 30°). Le Mont Cameroun est le seul de ces massifs encore en activité et compte une centaine de cratères. Sa dernière éruption date de l'année 2000. Les autres principaux massifs volcaniques sont : ceux des monts Bambouto, du Manengouba, d'Oku, de Gotel, de l'Adamaoua, etc.. Les éruptions sur l'ensemble de la ligne sont essentiellement basaltiques et trachytiques. Outre le Noun et le Mbam, affluents de la Sanaga, les principaux bassins versants intéressés par ces formations sont d'une part, ceux du Wouri, du Mungo et de la Cross-River dans le Sud du pays, et d'autre part les hauts-bassins de la Bénoué, de la Vina et de la Mbéré dans le plateau de l'Adamaoua.

Telle est la constitution du sous-sol du pays dont la longue évolution géologique a donné naissance à différentes formations superficielles qui, en association avec les différents types de végétations qu'elles supportent, définissent des zones aux comportements hydrologiques différents.

### **2.3.3 - Les sols**

La répartition des sols est liée à celle du substratum, au milieu bioclimatique où il se forme, aux facteurs topographiques et à l'ancienneté de la pédogenèse. La ferrallitisation est de loin le processus pédogénétique le plus important au Cameroun. Il en découle que les sols les plus répandus sont de types ferrallitiques. Ils couvrent près des deux tiers du territoire et sont situés au sud du 8<sup>ème</sup> parallèle. De couleur essentiellement rouge et jaune, ils peuvent atteindre des épaisseurs supérieures à 15 m, notamment en régions forestières. Les sols ferrugineux tropicaux

qui ont subi une hydrolyse incomplète des minéraux, sont surtout localisés entre la falaise nord de l'Adamaoua et la latitude de Garoua. Ils se différencient des précédents par leur couleur rouge ou ocre très accusée. Le deuxième groupe de sols rencontrés au Cameroun est constitué des sols hydromorphes dont l'évolution est dominée par un engorgement d'eau. On les retrouve surtout dans le nord du pays, mais également dans certains paysages du sud, notamment au niveau de la mangrove littorale. Dans la cuvette du Lac Tchad, la présence d'argiles gonflantes les rend vertiques.

#### **2.3.4 - La végétation**

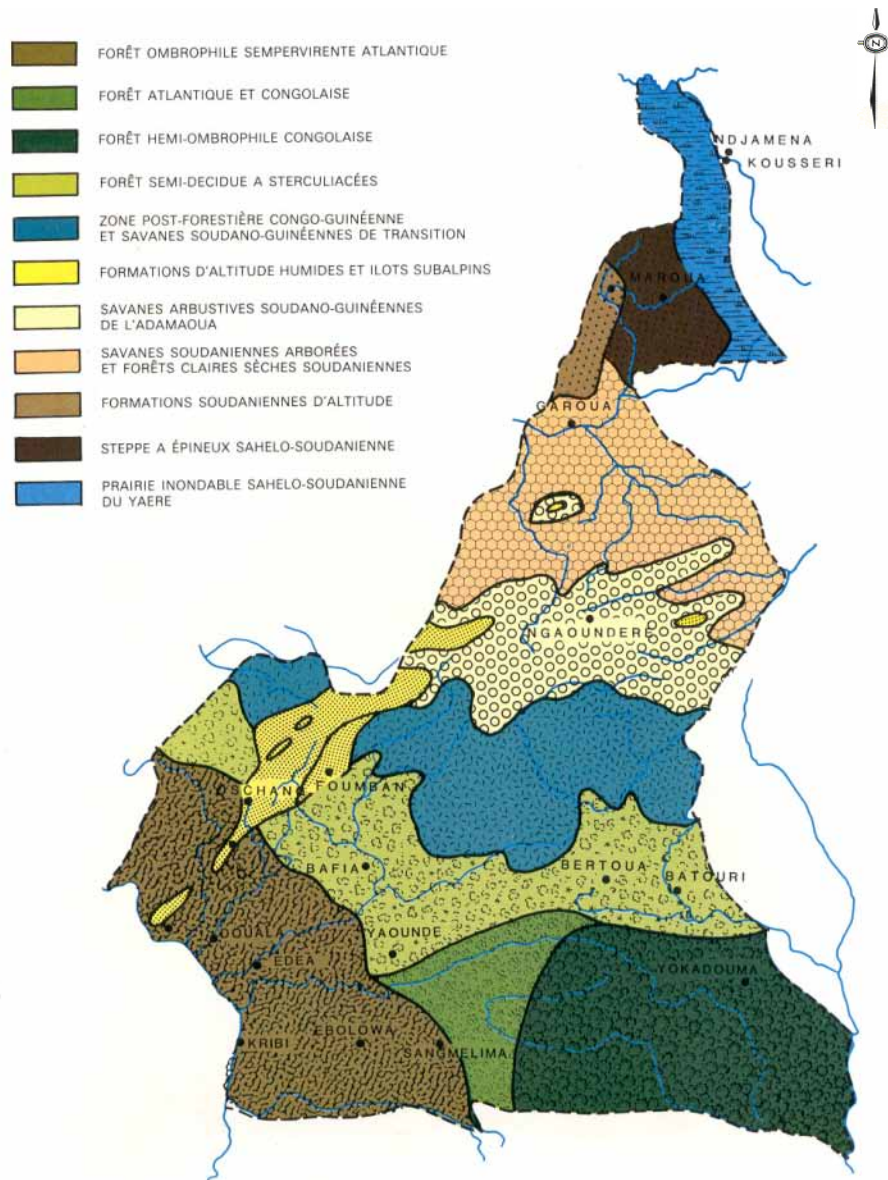
Avec le sol et le relief, la végétation constitue l'un des facteurs les plus importants du régime des cours d'eau. La végétation camerounaise est répartie selon une zonalité nord-sud en relation étroite avec le climat et le régime des précipitations (fig. 2.4) :

- forêt dense et humide dans le sud,
- savane dans le centre,
- steppe dans le nord.

A cette répartition il conviendrait d'ajouter les forêts et prairies de montagne.

La forêt dense et humide comprend plusieurs nuances en fonction des particularités des différentes situations. Sur les plaines sablonneuses des régions côtières se développe la forêt littorale avec localement une forêt de mangrove, en continuité avec la forêt atlantique toujours verte (sempervirente), située entre 200 et 800 m d'altitude. Plus en milieu continental se développe la forêt congolaise, pour des précipitations inférieures à 1800 mm. Certaines espèces perdent leurs feuilles pendant la saison sèche. Des plateaux de l'Ouest à Batouri et de Yaoundé aux premiers contreforts de l'Adamaoua se développe la forêt semi-décidue, en équilibre instable avec la savane périforestière. Les forêts d'altitude se développent à partir de 800 m d'altitude sur la façade atlantique et dès 1200 m plus au nord.

Les savanes périforestières forment le passage de la forêt aux savanes de l'Adamaoua. Les savanes de l'Adamaoua sont observées entre 900 et 1500 m. Ce sont des savanes arborées ou arbustives soudano-guinéenne. Au nord de l'Adamaoua on trouve les savanes boisées et forêts claires soudaniennes.



*Echelle 1 : 8.700.000*

**Figure 2.4 : Schéma phytogéographique du Cameroun (Olivry, 1986)**

Les steppes à épineux sahélo-soudaniens font leur apparition dès la plaine de Maroua, mais plus au nord on passe dans le domaine des prairies périodiquement inondées du Yaéré.

En raison de la pression démographique croissante dans le pays, le schéma zonal décrit ci-dessus est profondément dégradé par l'homme. Cette influence humaine s'exerce de manière variable d'un endroit à l'autre. Elle va de l'exploitation forestière au défrichage pour l'agriculture et les pâturages. Ces modifications apportées à l'occupation naturelle des sols contribuent à modifier le bilan hydrologique des cours d'eau, comme on le verra plus loin.

## 2.4 - LES CLIMATS DU CAMEROUN

Le climat constitue un facteur dominant des régimes hydrologiques et de la mise en place des paysages, et détermine les fonctions essentielles de la vie et de l'économie sociale. De par son extension entre l'équateur et la région sahélienne (une variation en latitude de 11°), le Cameroun rassemble la gamme quasi complète des climats zonaux Ouest-africains. A cet ensemble viennent s'ajouter des variétés qui lui sont propres, notamment d'authentiques climats de mousson à paroxysme pluvial puissant et prolongé, grâce auxquels le Cameroun détient le record de pluviosité du continent africain à Debundscha au pied du Mont Cameroun (Lefevre, 1967 ; Olivry, 1986 ; Suchel, 1987 ; Sighomnou *et al.*, 1993). Ces nuances climatiques sont dues essentiellement à l'influence maritime ainsi qu'à la vigueur et au contraste de son relief.

Le Cameroun subit une évolution climatique qui ne peut être isolée de l'évolution générale du climat africain et même mondial. Les causes et processus indicateurs de son évolution sont par conséquent les mêmes qui ont été décrits précédemment. Dans ces conditions, seules quelques grandes lignes de ses traits particuliers seront rappelées ici.

La zone intertropicale est caractérisée par une région équatoriale de basses pressions relatives encadrée par deux ceintures anticycloniques subtropicales nord et sud qui isolent pratiquement le monde intertropical des régions tempérées. Entre les deux zones de haute pression s'établit un flux d'Est soufflant vers la zone de basses pressions, matérialisé par les alizés. Les alizés des deux hémisphères convergent dans la région équatoriale, déterminant la Zone de Convergence Intertropicale qui a été décrite au chapitre précédent. La ZCIT est le siège de phénomènes d'ascendances plus ou moins généralisées. Elle subit un déplacement annuel en direction de l'hémisphère concerné par la saison d'été.

Le bilan énergétique est très élevé dans les zones anticycloniques subtropicales, entraînant une très forte évaporation, ce qui explique qu'à ces zones correspondent des régions arides et des déserts sur le continent. Les masses d'air provenant des alizés continentaux seront donc très sèches. L'opposition des influences océanique et continentale détermine dans le temps et dans l'espace la disposition de champs de températures qui commandent en partie les champs de pression.

Au sud de la ZCIT, l'anticyclone de Sainte-Hélène diffuse les alizés du sud-est. Centré en moyenne sur 28° sud – 10° ouest, il s'étend sur la cuvette congolaise qui prolonge l'influence océanique à l'intérieur du continent. Lorsque les alizés survolent les océans, ils entraînent vers la ZCIT une grande quantité de vapeur d'eau. Cet alizé chargé d'humidité prend le nom de mousson lorsqu'il franchit l'Equateur, et sa direction passe au sud-ouest par suite de la force de Coriolis.

Au nord de la ZCIT, l'anticyclone des Açores (ou égypto-libyen), distribue un flux d'alizé continental sec et chaud du nord-est, connu sous le nom d'Harmattan. La convergence entre mousson et harmattan détermine une étroite zone de contact appelée front intertropical ou FIT. Les mécanismes climatiques de la zone tropicale africaine sont largement influencés par le balancement nord-sud de ce front. Ce schéma (Figure 2.5) est conforme à celui proposé pour le Cameroun par Génieux (1958).

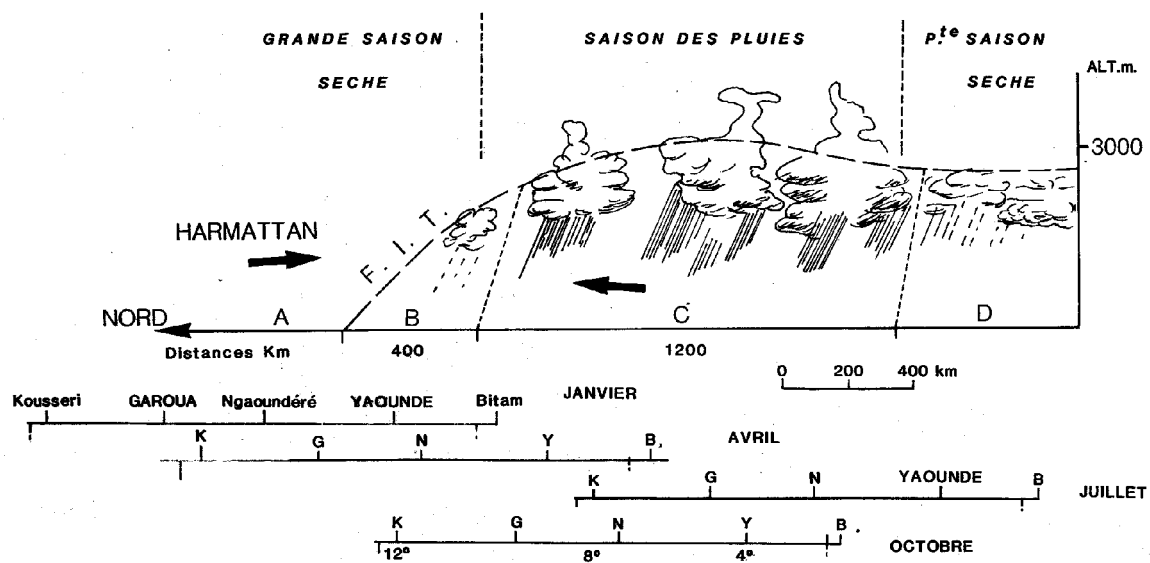


Figure 2.5 : Schéma simplifié des zones de temps pour différentes saisons au Cameroun (Olivry, 1986)

Dans son oscillation saisonnière, le FIT décrit quatre zones de temps qui déterminent les saisons. Ces zones sont du nord au sud :

- Zone A : immédiatement au nord du FIT. Zone de l'Harmattan, ciel clair ou peu nuageux par rares cirrus aux niveaux supérieurs ;



- Zone B : immédiatement au sud du FIT (400 km de largeur environ), ciel peu nuageux par cumulus peu développés en général ;
- Zone C : plus au sud (1200 km de largeur), ciel couvert ou très nuageux par gros cumulus ou cumulo-nimbus. C'est le domaine par excellence des orages et des lignes de grains ;
- Zone D : encore plus au sud. Nuages stratiformes. Pas ou très peu de précipitations.

Lorsqu'elles intéressent une région déterminée, les zones A et B correspondent à la grande saison sèche, la zone C à la saison des pluies et la zone D à la petite saison sèche.

#### **2.4.1 – Les observations climatologiques**

Le début des observations climatologiques au Cameroun remonte à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Les infrastructures de base mises en place dès l'époque de la colonisation allemande seront étoffées par l'administration française et britannique. En plus de la Direction nationale de la Météorologie (créée en 1961 et réorganisée en 1972) basée à Douala, le réseau compte 7 "stations principales" (Maroua Salak, Garoua, Ngaoundéré, Yoko, Koundja, Batouri et Yaoundé). Avant le début de la crise financière qui a frappé l'ensemble des services administratifs du pays, le réseau géré par la Météorologie nationale comprenait :

- 20 stations synoptiques,
- 21 stations agroclimatiques,
- 1 station agrométéorologique,
- 350 postes pluviométriques.

A la fin de la décennie 1990, moins de la moitié des postes assuraient la transmission régulière des données, en raison des problèmes économiques. Le nombre de postes régulièrement suivis a considérablement baissé ces dernières années en raison des difficultés financières. A ce chiffre viennent cependant s'ajouter quelques postes gérés par d'autres services publics et privés spécialisés.

Des annuaires climatologiques et pluviométriques étaient publiés régulièrement tous les ans jusqu'à la fin des années 1980, mais leur publication connaît quelques problèmes depuis lors

en raison des difficultés d'ordre pratique. Des efforts ont été entrepris ces dernières années à la Direction de la Météorologie, pour la mise en place d'un service qui assure la saisie régulière des données sur support informatique. L'accès aux données est désormais payant.

La mise à jour du fichier des précipitations journalières jusqu'en 1980 a été assurée par l'IRD et l'ex-CIEH. De nombreuses publications de synthèse ont été également réalisées. On peut citer particulièrement les travaux de Suchel (1987) sur les climats du Cameroun et ceux d'Olivry (1986) qui traitent des fleuves et rivières du Cameroun mais avec un important volet climatologique.

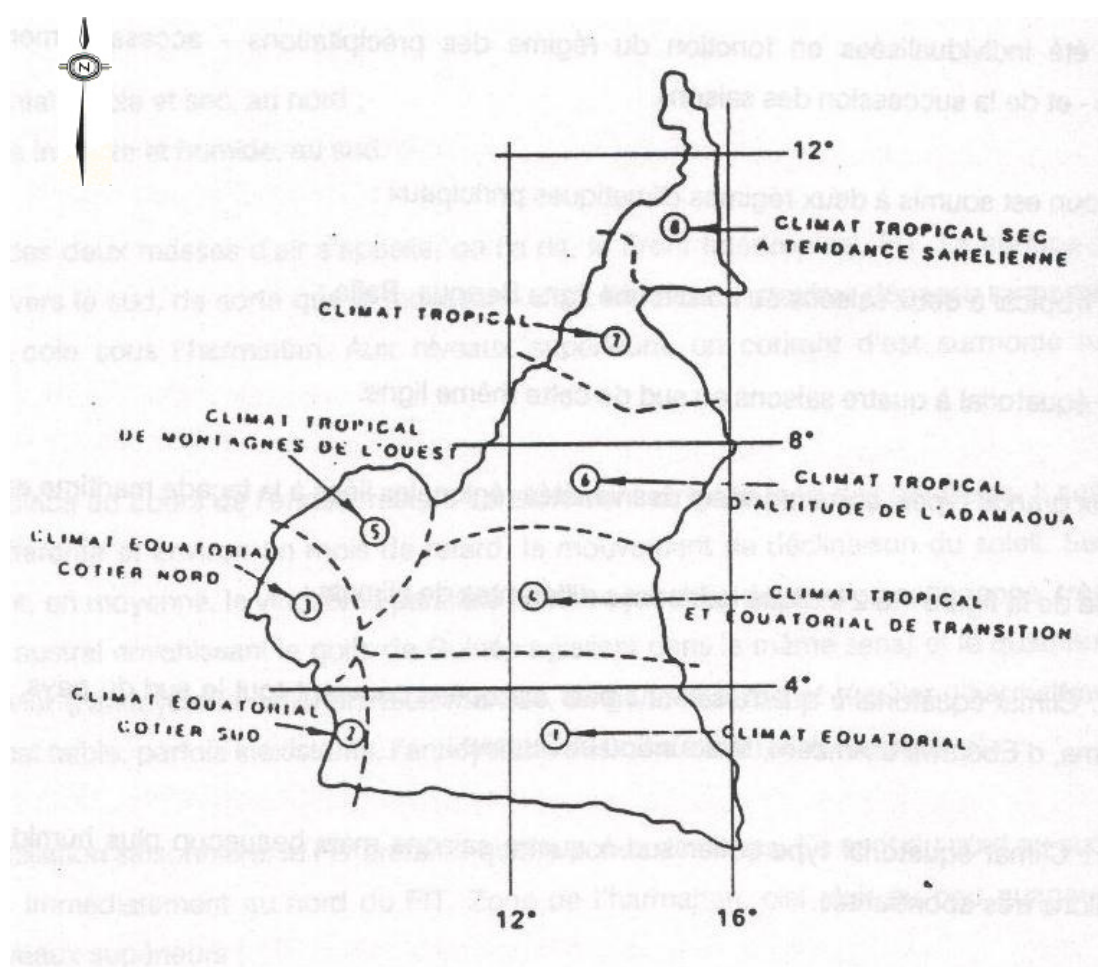
#### **2.4.2 – Les différentes unités climatiques**

En fonction du régime des précipitations, de la succession des saisons et accessoirement du régime thermique, le territoire camerounais a été divisé en différentes zones climatiques que l'on peut regrouper dans deux grandes classes séparées par une ligne qui correspond approximativement à la latitude 4°30 N : le climat tropical à deux saisons au nord de cette ligne et le climat équatorial à quatre saisons au sud. En tenant compte des nuances régionales imprimées par les principaux facteurs du climat soulignés plus haut, notamment le contraste du relief, la situation en latitude et par rapport à la mer, plusieurs schémas de régions climatiques ont été proposés. Un premier schéma préconisé par les climatologues distingue quatre régions climatiques conformes à celles décrites par Rodier (1964) pour l'Afrique tropicale :

- Climat équatorial à quatre saisons qui va du sud du pays jusqu'à Banyo et Garoua-Boulaï avec des précipitations qui varient entre 1500 et 2000 mm et des températures moyennes annuelles de l'ordre de 25°C ;
- Climat équatorial type camerounien avec mousson équatoriale, localisé sur la côte et les régions montagneuses de l'Ouest. Les précipitations plus abondantes varient entre 2000 et 10000 mm, les températures moyennes de 26° pour les régions basses et 21° en altitude ;
- Climat soudanien ou tropical de transition avec des précipitations comprises entre 900 et 1500 mm et des températures moyennes annuelles de 28°C. Il intéresse le Nord-Cameroun, de l'Adamaoua aux Monts Mandara ;

- Climat soudano-sahélien avec des précipitations qui varient de 900 à 400 mm et des températures moyennes annuelles de 28°C. Il intéresse l'extrême nord du pays.

Cette classification n'intègre pas parfaitement les nuances caractéristiques du climat camerounais. Olivry (1986) propose un autre schéma qui compte huit zones différentes de climats (Fig. 2.6). Les zones 1 à 3 du schéma précédent sont subdivisées en deux sous-zones chacune. Inspiré de Genieux (1958), ce deuxième schéma rend mieux compte des particularités du climat camerounais.



Echelle 1 :12.600.000

Figure 2.6 : Régions climatiques du Cameroun (Banque Mondiale, 1992)

Les caractéristiques principales des différentes régions climatiques sont les suivantes :

**Zone 1 :** Climat équatorial à 4 saisons bien marquées. Il couvre tout le sud du pays jusqu'aux environ de 4°30 N, région côtière non comprise.

**Zone 2 :** Climat équatorial type côtier sud à 4 saisons, mais beaucoup plus humide, par suite des précipitations très abondantes. Il couvre la frange côtière au sud de 4° N, jusqu'à la localité d'Edéa ;

En plus des deux périodes d'étiage (décembre – mars et juillet – août) et de hautes eaux (mars – juillet et septembre – novembre), les autres principales caractéristiques des zones 1 et 2 sont, un climat très peu contrasté et une forte humidité permanente.

**Zone 3 :** Climat équatorial type côtier nord à 2 saisons. Le terme équatorial est conservé pour traduire l'abondance des précipitations. De ce fait, certains climatologues l'ont plutôt appelée 'climat tropical fortement humide type côtier'. Elle intéresse la région côtière Nord et la partie sud-ouest du pays, entre 4° et 6° N ;

**Zone 4 :** Climat équatorial et tropical de transition. Elle intéresse la région comprise entre 4° et 6° N à l'ouest du 10<sup>e</sup> parallèle, de Bafia à Garoua-Boulai en passant par Yoko et Bertoua. Elle se différencie de la Zone 1 par une chute de la pluviosité qui est observée en juillet-août mais sans véritable petite saison sèche ;

**Zone 5 :** Climat tropical de montagne de l'ouest (de Dschang à Nkambe et Foumban) à 2 saisons. Elle intéresse la région entre 5° et 7° N, à l'ouest du 11<sup>e</sup> parallèle. Il s'agit d'un régime tropical très humide (3 mois de saison sèche), caractérisé par des températures nettement plus basses que dans le reste du pays et une influence océanique ;

**Zone 6 :** Climat tropical d'altitude de l'Adamaoua à 2 saisons, caractérisé par son régime thermique et des précipitations encore abondantes. Avec une saison sèche d'au moins 4 mois, elle intéresse l'ensemble du plateau de l'Adamaoua (entre 6° et 8° N), de Banyo à Ngaoundéré et Meiganga ;

La saison sèche est centrée sur la période de novembre à mars pour les zones 4 à 6. Les écoulements sont généralement pérennes mais l'étiage atteint souvent une valeur nulle au cours des années de faible pluviosité pour les cours d'eau de moindre importance. L'évaporation moyenne annuelle est de l'ordre de 2 m.

**Zone 7 :** Climat tropical du bassin de la Bénoué, marqué par des précipitations annuelles relativement abondantes (1500 à 900 mm) et une saison sèche de 6 mois. Elle couvre la région du bassin de la Bénoué, entre 8° et 10° N ;

**Zone 8 :** Climat tropical sec avec des précipitations qui varient de 900 à 400 mm (enregistrées essentiellement en juillet et août) et une saison sèche qui dure 7 mois. Elle concerne le nord de 10° N, de Maroua à Kousséri en passant par Yagoua et Kaélé.

Une des principales caractéristiques des zones 7 et 8 concerne la dégradation du réseau hydrographique. L'irrégularité interannuelle est très forte, et l'écoulement pérenne est une exception. L'évaporation moyenne annuelle est comprise entre 2,5 et 3 m.

Sur la base d'une étude détaillée des précipitations, Suchel (1972) met en évidence d'autres nuances climatiques à l'intérieur des huit zones ainsi décrites, mais si l'on s'en tient aux principales caractéristiques climatiques, la proposition faite par Olivry intègre suffisamment bien les nuances qui permettent d'identifier les différents régimes hydrologiques du pays.

Ce schéma qui découle des propriétés et dispositions moyennes des "centres d'actions" n'est pas figé, comme il a été souligné plus haut. Il en résulte des fluctuations des traits du climat d'une année à l'autre qui sont ressenties essentiellement au niveau des précipitations. Elles peuvent alors être plus ou moins abondantes, ou tout simplement réparties différemment dans l'année. Avant de revenir sur une analyse plus détaillée des différents régimes de précipitations et des types de pluies rencontrés au Cameroun, nous présenterons d'abord les autres principaux paramètres climatiques que sont la température, l'humidité et l'évaporation.

### **2.4.3 – La température, l'évaporation et l'humidité**

L'éventail des températures moyennes annuelles du Cameroun va de 18°C dans la région des Hauts Plateaux de l'Ouest du pays à plus de 28°C dans le Nord, soit une variation en latitude de plus de 10°C. La figure 2.7 montre la répartition des températures moyennes annuelles déterminées à partir des données non homogénéisées de la période 1955-2002 des principales stations d'observation du pays, alors que la figure 2.8 donne une idée de leur évolution au cours d'une année, suivant les différentes régions climatiques du pays. Il en ressort que les températures moyennes varient de 23 à 24°C dans le sud et le centre, mais peuvent atteindre

27°C dans la plaine côtière de Douala. Dans les régions montagneuses de la dorsale camerounaise, elles tombent cependant en dessous de 20°C. Dans le centre du pays elles sont en dessous de 22°C dans l'Adamaoua, mais au-delà vers le nord, la température de 25°C est toujours dépassée. Les températures moyennes maximales sont enregistrées dans la région de Kaélé, au Lac Tchad et dans la vallée de la Bénoué autour de Garoua. Les valeurs de températures remarquables enregistrées au niveau de quelques stations sont présentées dans le tableau 2.1 a.

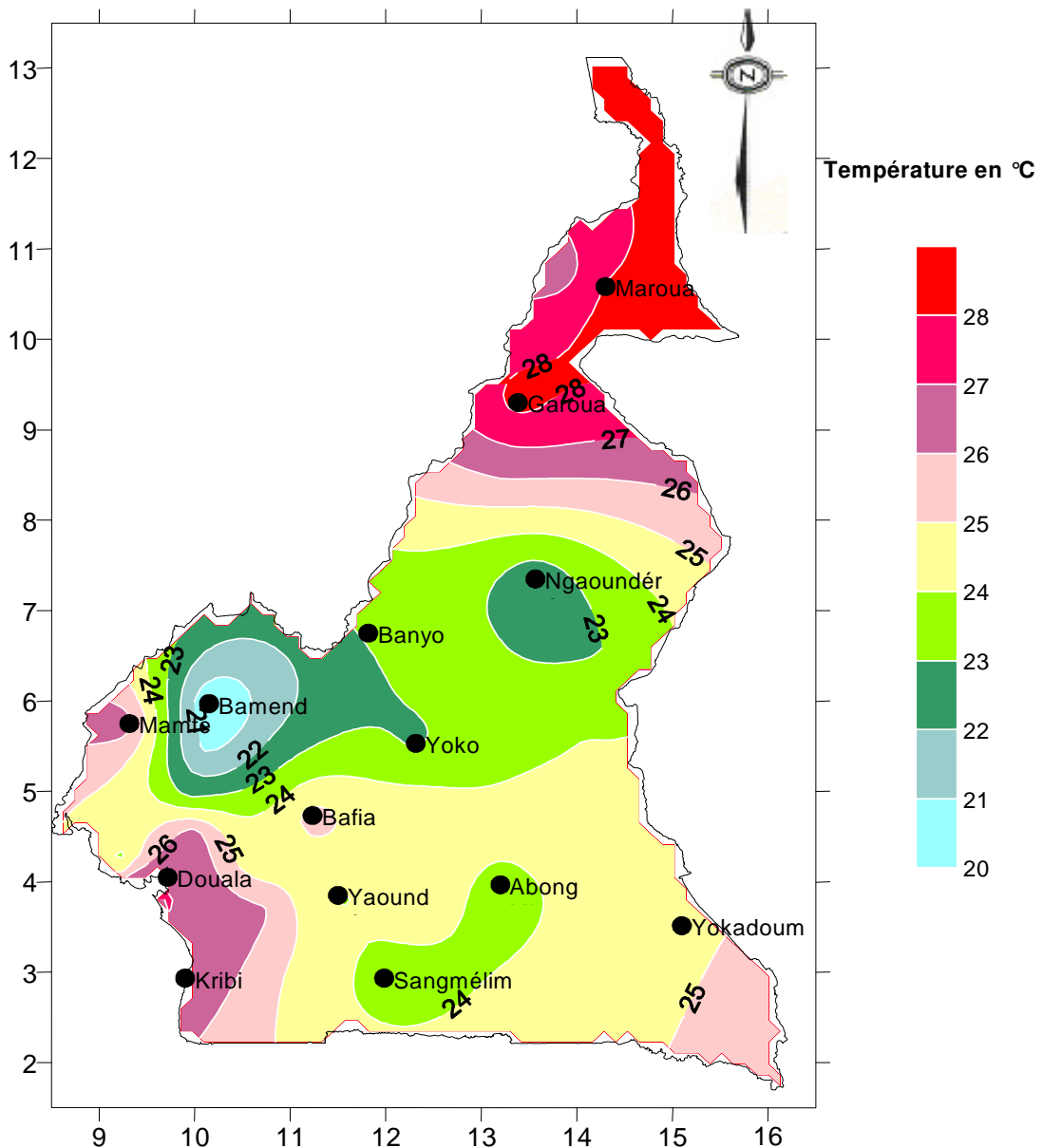


Figure 2.7 : Températures moyennes annuelles au Cameroun à partir des données non homogénéisées de la période 1955-2002

Les amplitudes diurnes moyennes annuelles sont de l'ordre de 6°C en bordure de mer. Elles dépassent 10°C au Nord-Est d'une ligne Bafoussam-Moloundou, puis augmentent avec la latitude pour atteindre 16°C au bord du Lac Tchad.

L'enrichissement en eau de l'atmosphère est dû, d'une part à l'évaporation directe à partir des plans d'eau ou du sol, d'autre part à la transpiration des végétaux. Cette consommation globale est couramment désignée sous le terme d'"évapotranspiration". Dans les conditions optimales, l'évapotranspiration tend vers une valeur limite connue sous le nom "évapotranspiration potentielle" ou ETP. Fonction des paramètres climatiques d'une région donnée, l'ETP donne des indications sur l'ampleur effective du transfert d'eau vers l'atmosphère. Sa détermination est cependant complexe et les observations courantes portent plus souvent sur l'évaporation. Des formules (Lemoine *et al.*, 1972) ont cependant été mises au point pour permettre de déterminer l'ETP à partir d'autres éléments du climat. Le dispositif de mesure le plus utilisé au Cameroun est l'évaporomètre Piche. Les résultats de mesures montrent une décroissance de l'ETP du Nord où le total annuel peut dépasser 2200 mm, vers le Sud où des valeurs inférieures à 1100 mm sont enregistrées dans certains secteurs. Quelques exemples de résultats sont présentés dans le tableau 2.1 b.

L'humidité atmosphérique est l'un des éléments clé de la climatologie en région tropicale (Suchel, 1987), du fait des relations d'interdépendance qui s'établissent à travers elle, entre les températures et les précipitations. L'humidité relative moyenne annuelle décroît suivant une zonalité latitudinale peu altérée, du sud vers le nord du pays. De plus de 85% en moyenne sur la côte elle passe à moins de 45% sur les bords du Lac Tchad. Les valeurs maximales sont généralement relevées autour de 6 h du matin, et les minima vers 12 h. Les amplitudes des variations mensuelles sont plus fortes dans le Nord (40% à Ngaoundéré) que dans le Sud (10% à la latitude 4°) qui bénéficie de la stabilisation assurée par le recyclage des régions forestières. Le tableau 2.1 b regroupe les résultats mesurés au niveau de quelques stations caractéristiques des différentes régions climatiques.

Les vents constituent également un paramètre climatique important. Le Cameroun est soumis à deux principaux vents dont un vent océanique du quadrant sud-ouest, vecteur du flux humide responsable des précipitations sur le pays. Le second compris dans le cadran nord-est c'est l'Harmattan bien connu de la partie nord du pays.

**Tableau 2. 1 a : Paramètres climatiques remarquables à quelques stations**

TEMPERATURES MENSUELLES EN ( °C )													
MOIS	Jv	Fv	Ms	Av	MAI	Jn	Jt	Ao	S	Oc	Nv	Dc	ANNEE
Région Climatique N°1 : Sangmelima													
Tx	29,0	30,2	30,1	29,6	28,8	27,6	26,6	26,7	27,7	27,7	28,1	28,1	28,4
Tn	19,1	19,6	19,5	19,4	19,4	19,2	19,0	18,9	19,0	19,0	19,1	19,0	19,2
Tm	24,0	24,9	24,8	24,5	24,1	23,4	22,8	22,8	23,3	23,3	23,6	23,6	23,8
Dm	9,9	10,6	10,6	10,2	9,4	8,5	7,6	7,8	8,7	8,7	9,1	9,2	9,2
Région Climatique N°2 : Kribi													
Tx	31,2	31,7	31,7	31,3	31,0	29,4	28,3	28,0	28,6	29,1	30,2	30,7	30,2
Tn	24,0	24,0	23,7	23,5	23,5	22,8	22,4	22,4	22,7	22,8	23,1	23,6	23,2
Tm	27,6	27,8	27,7	27,4	27,2	26,1	25,4	25,2	25,7	25,9	26,6	27,1	26,7
Dm	7,2	7,7	8,0	7,8	7,6	6,6	6,0	5,7	5,8	6,3	7,1	7,1	6,9
Région Climatique N°3 : Douala													
Tx	32,0	32,6	32,3	32,0	31,4	29,7	28,0	27,5	28,8	29,8	30,9	31,5	30,6
Tn	23,4	24,0	23,7	23,4	23,2	22,9	22,8	22,7	22,7	22,6	23,2	23,3	23,2
Tm	27,7	28,3	28,0	27,7	27,3	26,3	25,4	25,1	25,8	26,2	27,0	27,4	26,9
Dm	8,6	8,6	8,5	8,6	8,2	6,8	5,2	4,8	6,1	7,1	7,7	8,2	7,4
Région Climatique N°4 : Abong Mbang													
Tx	29,7	31,1	30,9	30,8	29,9	28,5	27,0	27,0	27,6	28,8	29,6	29,4	29,1
Tn	16,9	18,1	19,0	19,2	19,2	19,0	18,8	19,0	19,0	19,0	18,5	17,4	18,6
Tm	23,1	24,4	24,8	24,6	24,3	23,5	22,8	23,0	23,5	23,7	23,7	22,9	23,7
Dm	12,4	12,6	11,6	10,7	10,2	9,0	8,0	8,1	9,0	9,4	10,4	11,1	10,2
Région Climatique N°5 : Koundja													
Tx	29,3	30,7	29,9	28,1	27,0	26,0	25,0	25,2	25,4	26,1	27,6	28,6	27,4
Tn	14,5	15,7	17,4	17,4	17,0	16,4	16,4	16,2	16,0	16,3	15,3	14,2	16,1
Tm	21,9	23,2	23,7	22,7	22,0	21,2	20,7	20,7	20,7	21,2	21,4	21,4	21,8
Dm	14,7	15,1	12,6	10,7	10,0	9,6	8,7	8,9	9,4	9,8	12,3	14,4	11,4
Région Climatique N°6 : Ngaoundéré													
Tx	30,4	31,4	31,7	30,1	28,4	27,1	25,9	25,7	26,5	27,9	29,4	30,1	28,7
Tn	11,0	12,8	16,3	17,9	17,6	17,0	17,0	17,0	16,6	16,4	12,5	11,0	15,2
Tm	20,7	22,2	24,3	24,3	23,2	22,2	21,6	21,6	21,9	22,2	21,1	20,6	22,2
Dm	19,3	19,0	16,0	12,7	11,2	10,5	9,2	9,2	10,6	11,7	17,4	19,3	13,9
Région Climatique N°7 : Garoua													
Tx	34,0	36,9	39,8	39,4	36,3	33,0	31,0	30,5	31,3	33,6	35,9	34,6	34,7
Tn	17,6	20,5	24,8	26,7	25,1	23,2	22,6	22,2	22,1	22,4	19,3	17,4	22,0
Tm	25,8	28,7	32,3	33,0	30,7	28,1	26,8	26,3	26,7	28,0	27,6	26,0	28,3
Dm	16,4	16,4	14,9	12,7	11,2	9,8	8,4	8,3	9,3	11,2	16,6	17,2	12,7
Région Climatique N°8 : Maroua													
Tx	32,1	35,0	38,4	40,0	38,0	34,9	31,7	30,5	32,2	35,1	34,9	32,7	34,6
Tn	17,2	19,9	23,6	25,9	25,0	23,1	22,1	21,6	21,6	21,4	19,7	17,6	21,5
Tm	24,7	27,5	31,0	32,9	31,5	29,0	26,9	26,1	26,9	28,3	27,3	25,2	28,1
Dm	15,0	15,1	14,8	14,1	13,0	11,8	9,5	9,0	10,7	13,7	15,2	15,1	13,1
<b>Légende</b> : Tx = Température maxi. ; Tn = Température mini. ; Tm = Température moy. ; dm = écart diurne													



**Tableau 2. 1 b : Paramètres climatiques remarquables à quelques stations (suite)**

<b>HUMIDITE RELATIVE EN (%)</b>													
<b>MOIS</b>	<b>Jv</b>	<b>Fv</b>	<b>Ms</b>	<b>Av</b>	<b>MAI</b>	<b>Jn</b>	<b>Jt</b>	<b>Ao</b>	<b>S</b>	<b>Oc</b>	<b>Nv</b>	<b>Dc</b>	<b>ANNEE</b>
<b>Région Climatique N°1 : Yaoundé</b>													
Max	98	97	97	97	98	98	97	97	98	98	98	98	98
Min	61	59	63	67	70	73	75	75	73	72	67	65	68
<b>Région Climatique N°2 : Kribi</b>													
Max	95	94	94	95	94	94	92	93	95	96	95	95	94
Min	71	71	70	70	73	74	74	76	78	76	73	72	73
<b>Région Climatique N°3 : Douala</b>													
Max	97	96	96	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
Min	66	67	69	69	72	77	83	84	80	75	68	69	73
<b>Région Climatique N°4 : Batouri</b>													
Max	97	95	95	97	97	98	98	98	98	98	97	97	97
Min	57	55	61	66	68	73	76	76	71	71	64	60	67
<b>Région Climatique N°5 : Dschang</b>													
Max	91	92	93	94	93	95	98	98	97	95	94	87	94
Min	42	49	60	68	71	77	81	81	79	73	57	47	65
<b>Région Climatique N° 6 : Ngaoundéré</b>													
Max	55	55	72	90	95	96	98	98	98	97	84	66	84
Min	18	19	29	51	62	65	67	69	66	56	33	22	46
<b>Région Climatique N°7 : Garoua</b>													
Max	43	37	39	66	78	89	93	95	94	90	74	56	71
Min	18	14	17	34	48	66	68	69	68	54	29	21	42
<b>Région Climatique N°8 : Maroua</b>													
Max	34	27	23	47	67	91	90	94	95	82	50	40	62
Min	15	12	12	18	33	51	60	68	62	38	22	18	34
<b>EVAPORATION PICHE EN (mm)</b>													
<b>MOIS</b>	<b>Jv</b>	<b>Fv</b>	<b>Ms</b>	<b>Av</b>	<b>MAI</b>	<b>Jn</b>	<b>Jt</b>	<b>Ao</b>	<b>S</b>	<b>Oc</b>	<b>Nv</b>	<b>Dc</b>	<b>ANNEE</b>
<b>Région Climatique N°1 : Yaoundé</b>													
	77,5	85,7	86,3	68,3	61,3	52,2	53,1	55,6	51,4	50,3	55,2	65,4	762,3
<b>Région Climatique N°2 : Kribi</b>													
	57,3	60,8	65,3	56,1	52,9	54,7	57,4	51,7	39,7	40,1	50,6	55,2	641,8
<b>Région Climatique N°3 : Douala</b>													
	58,6	65,2	66,3	57,0	54,4	45,2	33,8	31,9	37,1	44,7	47,8	53,7	595,3
<b>Région Climatique N°4 : Batouri</b>													
	82,5	101,0	91,9	76,8	66,1	50,4	47,0	46,6	47,0	50,5	62,2	71,0	793,0
<b>Région Climatique N°5 : Dschang</b>													
	98,8	85,7	71,2	53,3	53,1	36,7	29,2	28,9	30,8	51,4	79,1	101,3	711,5
<b>Région Climatique N° 6 : Ngaoundéré</b>													
	307	304	268	131	87	63	58	59	59	93	191	279	1900
<b>Région Climatique N°7 : Garoua</b>													
	350	371	464	352	235	141	109	90	80	139	244	307	2882
<b>Région Climatique N°8 : Maroua</b>													
	466	541	628	510	394	213	136	89	92	230	383	436	4118

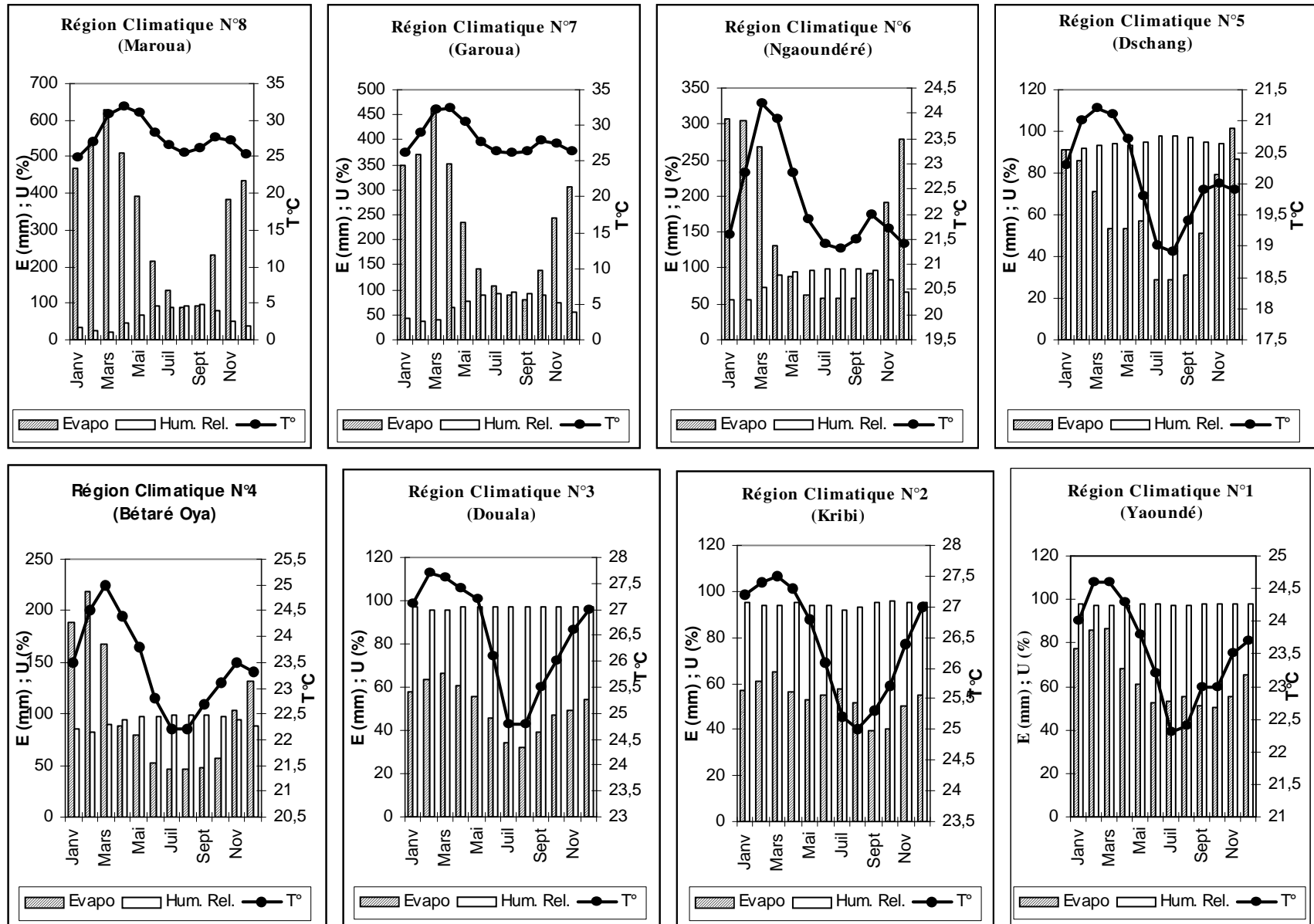


Figure 2. 8: Evaporation Piche, Humidité relative et Températures moyennes mensuelles des différentes régions climatiques du Cameroun

#### 2.4.4 – Les précipitations

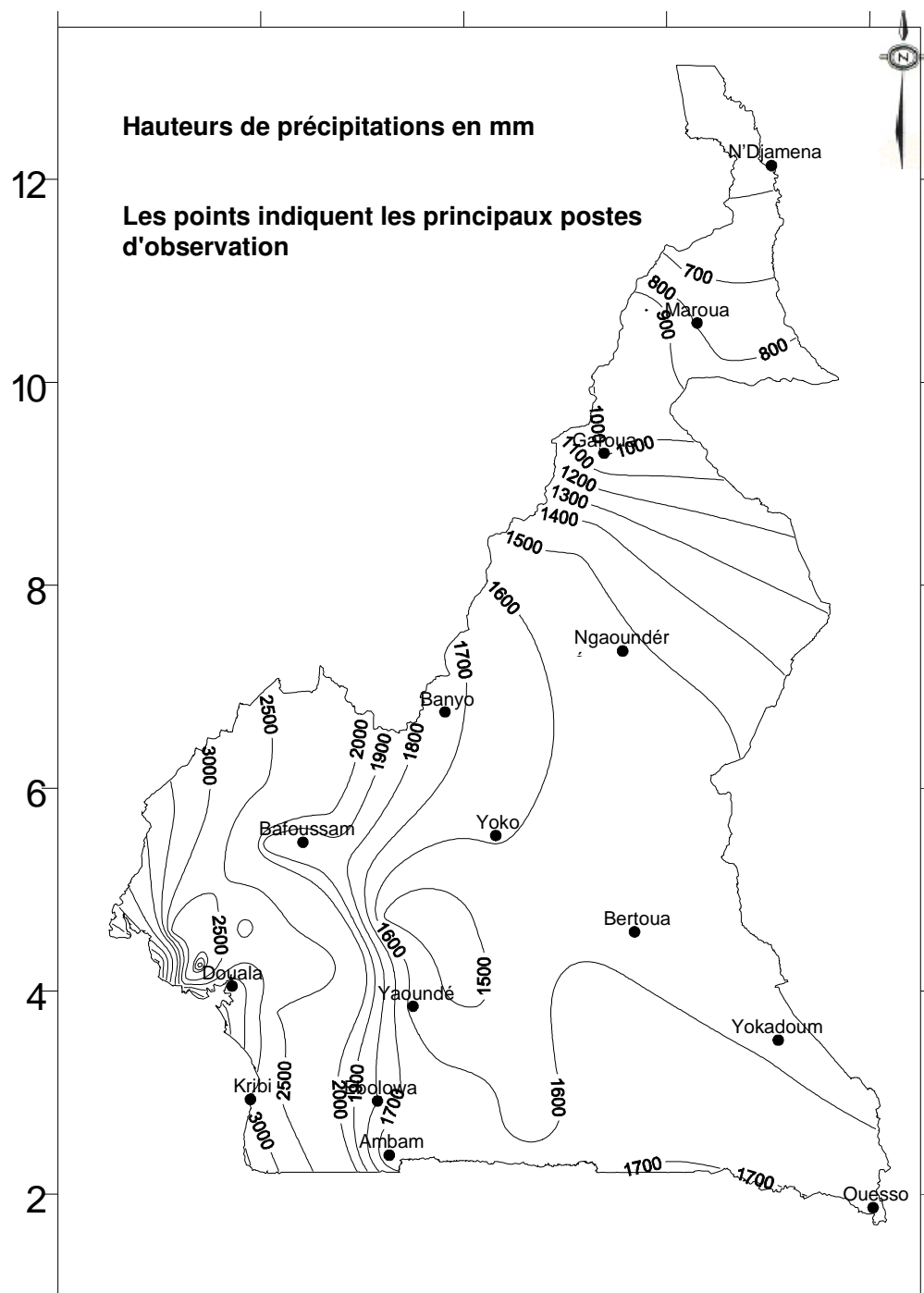
Comme nous l'avons souligné plus haut, en région tropicale les fluctuations climatiques sont ressenties essentiellement au niveau des précipitations. Elles constituent par conséquent un des éléments principaux de notre étude, d'autant que les séries disponibles sont plus longues et plus nombreuses que celles des autres paramètres climatiques.

En faisant abstraction des nuances introduites par l'orographie particulière du pays, on note dans l'ensemble que sur le territoire camerounais les précipitations diminuent à la fois du sud au nord, en fonction de la latitude, et de l'ouest vers l'est en fonction de la distance par rapport à la mer. Mais, si entre Kribi à l'Ouest et Yokadouma à l'Est la différence entre les précipitations moyennes annuelles va approximativement du simple au double, le rapport est plutôt de 1 à plus de 25 entre Makari sur le bord du Lac Tchad et Debundscha au pied du Mont Cameroun. La carte de la figure 2.9 établie à partir des données de notre étude en est une illustration, alors que la figure 2.10 présente les histogrammes représentatifs des principales régions climatiques définies plus haut. Il est indiqué pour chaque station, la valeur de la pluie moyenne ainsi que les quartiles supérieurs (Q1) et inférieurs (Q3).

Les principaux critères de différenciation des zones définies plus haut sont bien représentés par les variations saisonnières des précipitations figurant dans les histogrammes. Les différentes régions climatiques sont caractérisées par le profil de leur histogramme annuel, la situation du maximum des précipitations dans le cycle annuel et le nombre de mois secs (dans le sens défini par Gaussen, soit  $P < 2 \text{ t}^\circ$ ) dans l'année :

- Les histogrammes des régions climatiques 1 et 2 présentent bien le caractère particulier des régions équatoriales avec une petite saison sèche centrée sur le mois de juillet. La différence entre les deux régions tient essentiellement à la hauteur totale annuelle des précipitations.
- Les histogrammes des régions 3 à 8 présentent un seul maximum annuel, les différences tenant essentiellement à la hauteur totale des précipitations annuelles et au nombre de mois secs dans l'année. La région 3 n'indique pratiquement pas de saison sèche, puisque des précipitations relativement importantes sont enregistrées durant les 12 mois de l'année. L'histogramme de la station de Debundscha compte 7 mois de précipitations supérieures à 600 mm, soit pour chacun de ces mois une hauteur supérieure à celle qui

tombe en un an à Kousseri qui compte de son côté 7 mois secs dans l'année. Le nombre de mois secs passe à 6 dans la région de Garoua, 4 dans l'Adamaoua, 3 dans les régions climatiques 4 et 5. Par ailleurs, si les maxima de précipitations se situent en juillet-août dans le nord du pays, ils sont enregistrés plutôt aux mois de septembre et octobre dans le sud.



*Echelle 1 : 7.800.000*

Figure : 2.9 : Esquisse des isohyètes interannuelles du Cameroun à partir des données non homogénéisées de la période 1940-2001

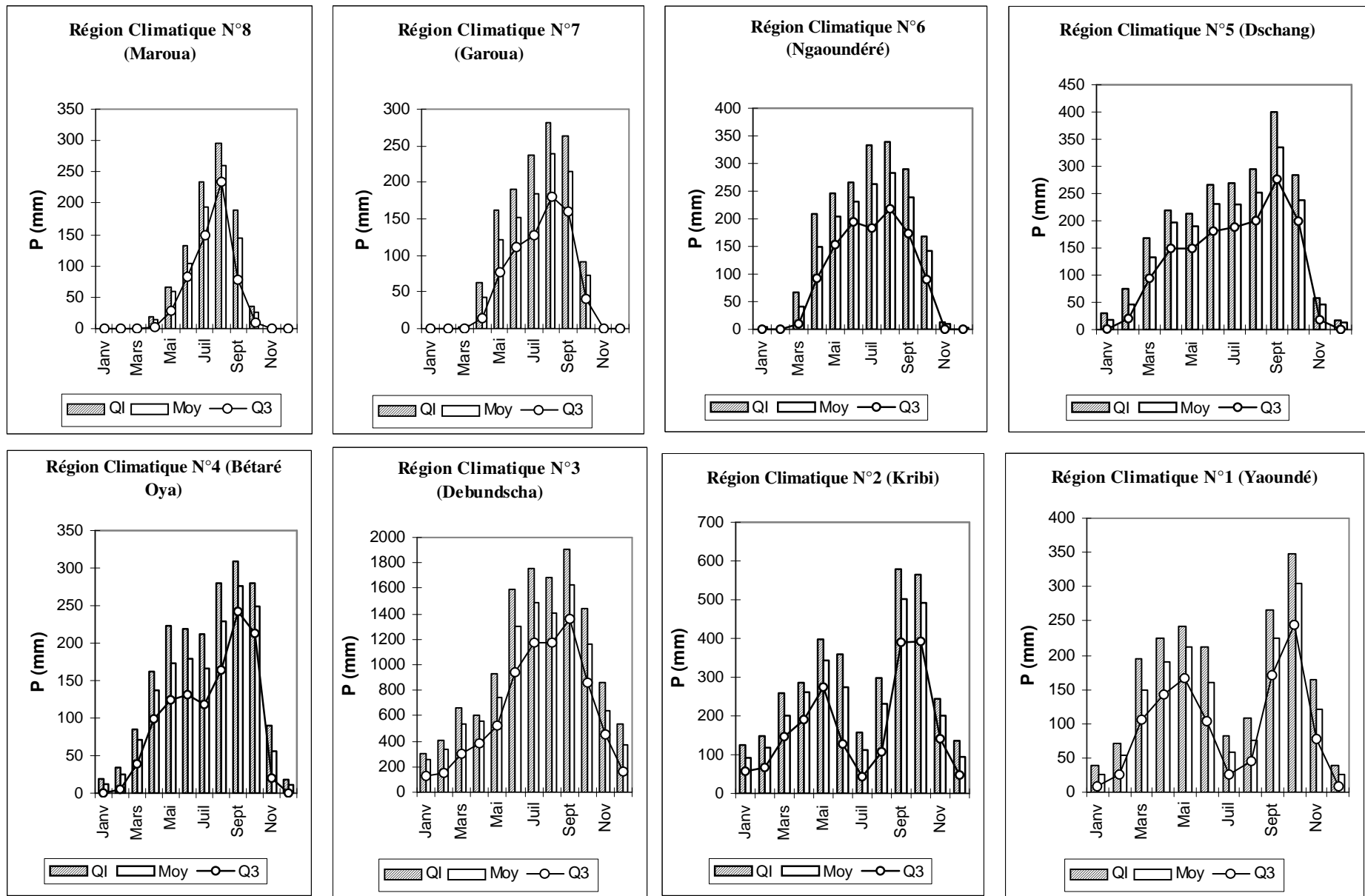


Figure 2. 10 : Histogrammes caractéristiques des précipitations des différentes régions climatiques du Cameroun

#### 2.4.4.1 - Précipitations journalières

La répartition des pluies dans le temps a plus d'incidence sur les écoulements des cours d'eau qui nous intéressent dans ce travail, que la hauteur de la pluie journalière. Il en va de même pour l'agriculture pluviale et l'élevage sur pâturage naturel qui sont à la base de l'économie du pays, comme nous l'avons souligné plus haut. Dans cette optique, notre intérêt se portera ici essentiellement sur la répartition des précipitations dans le temps et notamment l'étude des jours pluvieux au cours des douze mois de l'année. Toutefois, la hauteur maximale de pluie journalière annuelle varie de 60 à 70 mm dans le nord du pays, l'Adamaoua et la région montagneuse de l'Ouest, de 65 à 80 mm dans le sud et l'est, de 90 à 150 dans les régions océaniques, mais peut dépasser 280 mm sur la façade maritime du Mont Cameroun. La hauteur des pluies journalières de récurrence décennale, varie quant à elle entre 90 et 110 mm dans le nord du pays, l'Adamaoua et l'Ouest, 100 à 120 mm dans le sud et l'est, 120 à 190 dans les régions océaniques et atteint 420 mm au pied du Mont Cameroun.

L'étude de la répartition des jours de pluie au cours de l'année se heurte souvent au problème de la qualité très inégale des données disponibles. Nous y reviendrons en détail dans le chapitre suivant. Mais on peut déjà signaler ici que la répartition des nombres annuels de jours pluvieux est calquée sur celle des isohyètes annuelles. Selon Suchel (1987), la moyenne annuelle des jours pluvieux est de 260 jours au pied du Mont Cameroun. Elle diminue ensuite avec la latitude, en respectant les nuances régionales, pour atteindre 30 jours autour du Lac Tchad.

L'influence océanique crée des conditions plus homogènes pour les nombres de jours pluvieux en région côtière où la plupart des stations comptent autour de 220 jours de pluie par an. La région côtière du Cameroun est également connue pour le phénomène des pluies continues, notamment au cours de la période de juillet à octobre. Une étude de Sighomnou *et al.*, (1999) montre que les séquences de jours pluvieux successifs de plus d'un mois (la séquence la plus longue observée en 44 années de suivi est de 72 jours) représentent 10,3 % des séquences pluvieuses dans l'année dans la région de Douala, contre 47,5 % pour celles de 1 jour à une semaine. Dans le même ordre d'idée, la durée d'une averse peut aller au-delà de 24 heures (Sighomnou *et al.*, 1993).

Après la région côtière, le nombre de jours pluvieux dans l'année se maintient entre 150 et 120 jusqu'au plateau de l'Adamaoua avant de décroître rapidement vers le nord pour atteindre 80 dans la région de Garoua, 60 à Maroua et 40 à Kousséri. Nous reviendrons au chapitre suivant sur la répartition de ces jours de pluie sur les mois de l'année ainsi que les dates de début et de fin des différentes saisons.

#### **2.4.4.2 – Types et structure des averses**

Bien que les études des averses individualisées intéressent davantage le drainage urbain que les écoulements dans les cours d'eau qui nous préoccupent le plus ici, nous avons également voulu en dire quelques mots. Deux principaux types de pluies sont observés au Cameroun : les pluies de mousson et les pluies de perturbation. Généralement très étendues dans l'espace et de longue durée, les premières sont le plus souvent observées du sud du pays jusqu'à l'Adamaoua. Les secondes généralement organisées en "*lignes de grains*" caractérisées par une activité orageuse intense et une forte agitation atmosphérique s'observent plus généralement dans la partie nord. Si l'intensité maximale des précipitations se situe généralement au début de l'averse dans les pluies du second groupe, les pluies de mousson comptent souvent plusieurs pointes d'intensité au sein d'un même événement (Sighomnou *et al.*, 1993).

#### **2.4.5 – Les apports en eau météoriques**

En terme quantitatif, le volume moyen annuel précipité sur l'ensemble du pays est estimé (Sigha Nkamdjou *et al.*, 2002) à 800 km<sup>3</sup>, réparti par bassins versants des principaux cours d'eau :

- 426 km<sup>3</sup> pour l'ensemble des bassins de la façade atlantique dont 222 km<sup>3</sup> pour le bassin de la Sanaga (Edéa) à lui tout seul ;
- 183 km<sup>3</sup> pour le bassin du Congo ;
- 42 km<sup>3</sup> pour le bassin du Lac Tchad ;
- 149 km<sup>3</sup> pour le bassin du Niger.

Comme on peut le constater, plus de la moitié des apports météoriques reçus par le Cameroun intéresse les cours d'eau de la façade océanique. L'autre moitié est répartie entre le bassin du Congo et les deux bassins de la partie nord du pays qui reçoivent moins de 25% du volume total précipité.

## 2.5 - LES REGIMES HYDROLOGIQUES

Le réseau hydrographique du Cameroun se répartit en quatre principaux ensembles :

- Les fleuves côtiers y compris la Sanaga (qui couvre à lui tout seul près de 29% du territoire), dont la superficie de l'ensemble des bassins versants couvre un peu plus de la moitié du territoire du pays. En plus de la Sanaga, principal cours d'eau du pays, la façade atlantique du Cameroun reçoit treize cours d'eau principaux dont les plus importants sont du sud vers le nord : le Ntem, la Lobé, la Kienké, la Lokoundjé, le Nyong, la Dibamba, le Wouri, le Mungo et la Cross River qui transite par le Nigeria avant de rejoindre l'océan. Ils comptent chacun au moins une station de contrôle sauf la Dibamba qui n'a été suivie que pendant une courte période. La Sanaga abrite les principales installations hydroélectriques du pays. Trois barrages de retenues construits sur ses principaux affluents assurent la régulation de son débit : Mbakaou (2,6 milliards de m<sup>3</sup>) sur le Djerem en 1969, Bamendjing (1,8 milliards de m<sup>3</sup>) sur le Noun en 1974 et Magba (3,2 milliards de m<sup>3</sup>) sur la Mapé en 1987. En raison de la sécheresse récente, la capacité de régulation de ces trois barrages (7,6 milliards de m<sup>3</sup>) s'est avérée insuffisante ces dernières années. Des études ont été réalisées en vue de la construction prochaine d'un quatrième barrage sur le Lom et le Pangar. Il est important de souligner que la régulation du débit de la Sanaga par ces différentes retenues provoque une modification du régime naturel dont il faut tenir compte dans l'interprétation des chroniques.
- Les tributaires du fleuve Congo dont les bassins versants couvrent un peu plus de 20% du territoire. Il s'agit essentiellement du Dja, de la Boumba et de la Kadéï. On notera que les deux premiers drainent essentiellement des zones forestières, alors que la Kadéï prend sa source sur le rebord sud du plateau de l'Adamaoua.
- Les tributaires du fleuve Niger dont les bassins versants couvrent environ 20% du territoire. Il s'agit principalement de la Bénoué et de ses affluents, dont le Faro et le Mayo Kébi. D'une capacité d'environ 8 milliards de m<sup>3</sup> le plus grand barrage de retenue d'eau du pays a été mis en service sur ce cours d'eau au niveau de la localité de Lagdo en 1983. Ses eaux sont utilisées pour l'hydroélectricité et l'irrigation. Les autres tributaires camerounais du fleuve Niger sont situés dans la région Sud-ouest du pays. Ce sont la



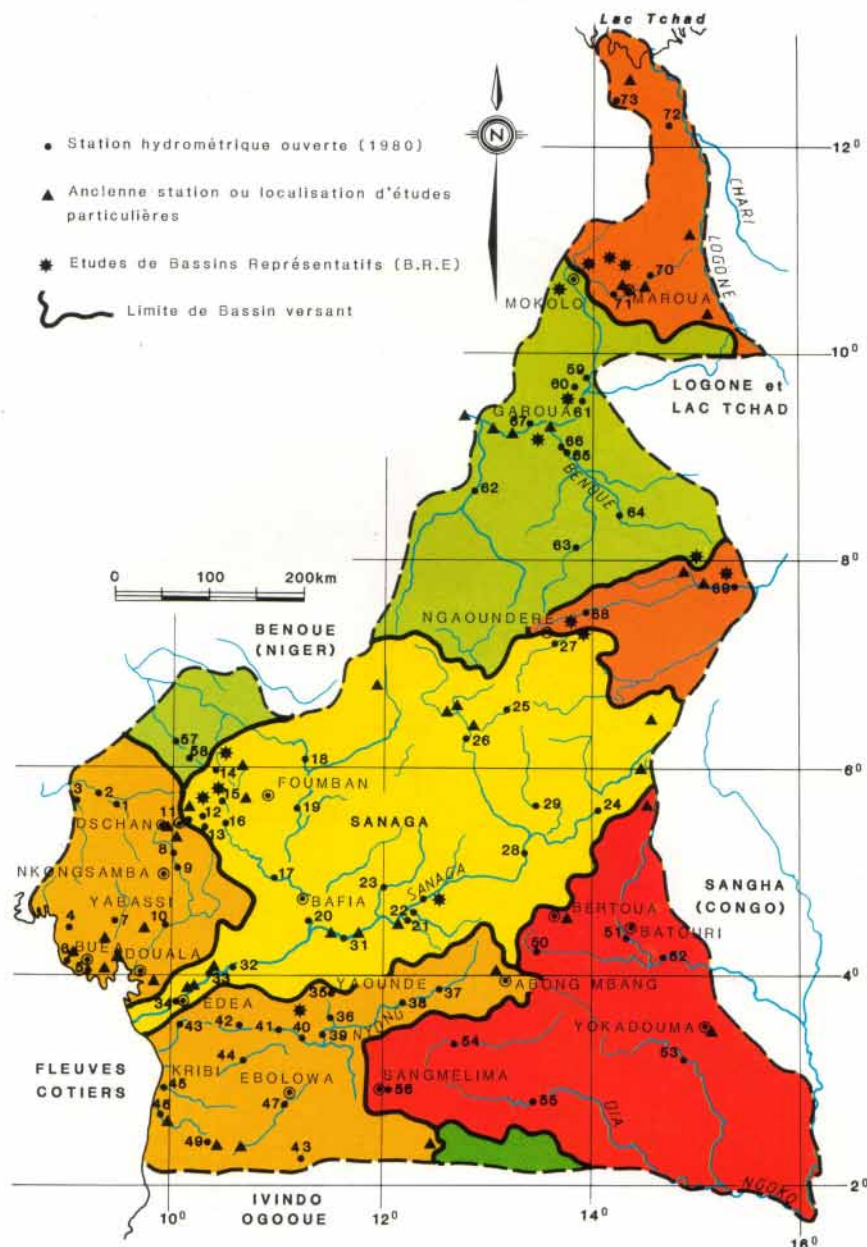
Donga, la Katsena et la Metchum. De ces trois cours d'eau, seul le dernier est contrôlé par deux stations hydrométriques d'installation relativement récente.

- Les tributaires du bassin endoréique du Lac Tchad dont les bassins versants couvrent moins de 10% du territoire. Il s'agit essentiellement des affluents (la Vina du Nord et la Mbéré) du Logone occidental qui prend sa source sur le plateau de l'Adamaoua au Cameroun. Après son passage en territoire tchadien, cette branche du fleuve conflue avec le Logone orientale avant de servir de frontière entre les deux pays sur environ 250 km, depuis la région du '*Bec de Canard*' en amont de Bongor jusqu'à la confluence avec le Chari à Kousséri. Les autres cours d'eau camerounais intéressant le Lac Tchad sont issus principalement des Monts Mandara dans la région de l'extrême nord.

Seulement 8% du total de la superficie des bassins des cours d'eau qui drainent le Cameroun intéressent un autre pays en amont. Il s'agit essentiellement du Ntem qui prend sa source au Gabon (environ 1/3 de la superficie du bassin se partage entre le Gabon et la Guinée Equatoriale), et de la Bénoué dont une partie du bassin (18.000 km<sup>2</sup> sur 95.000 à sa sortie du territoire camerounais) intéresse le territoire tchadien.

### **2.5.1 – Les observations hydrométriques**

Bien que quelques échelles limnimétriques aient été suivies au Cameroun durant les années 1930, les activités hydrométriques n'ont réellement commencé dans le pays qu'à la fin des années 1940. Elles ont été organisées, animées et contrôlées de 1947 à 1974 par l'IRD alors appelé ORSTOM avant d'être confiées à une Institution nationale. La collaboration avec les hydrologues de l'ORSTOM se poursuivra ensuite dans une période transitoire, de 1974 à 1980. Le service hydrologique fut alors érigé en Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) qui procéda à un important recrutement de personnel national. Le réseau hydrométrique national comptait alors 73 stations. Ce nombre sera porté à plus d'une centaine, les installations coïncidant souvent avec des nécessités ponctuelles. Une partie est abandonnée par la suite et à partir de 1985, le réseau hydrométrique du Cameroun compte 80 stations (fig. 2.11).



**Figure 2.11 : Le réseau hydrométrique camerounais de la décennie 1980 (Olivry, 1986)**

Les restrictions budgétaires ont conduit à abandonner l'exploitation d'une bonne partie du réseau à la fin de l'année 1987. A partir de 1988, le réseau est réduit à un minimum d'une quarantaine de stations et depuis 1992 leur suivi se fait de manière très irrégulière, à l'occasion de la réalisation de certaines études particulières. Au début des années 2000, à peine une dizaine est suivie de manière sporadique.

En définitive, des données hydrométriques de qualité satisfaisante existent pour la quasi-totalité des stations du réseau camerounais, du début des observations jusqu'en 1987. Après

cette date, les observations sont irrégulières et limitées à celles des stations suivies épisodiquement. Ces données sont publiées sous forme d'annuaires hydrologiques par l'IRD et poursuivi par le CRH jusqu'en 1984, mais le coût de revient de la publication a conduit à l'abandonner. Depuis cette date les données sont traitées et stockées sur un support informatique.

### **2.5.2 – Les principaux résultats de l'hydrométrie**

De nombreux ouvrages de synthèse, des mémoires de thèse et des articles scientifiques ont été publiés sur l'hydrologie du Cameroun, notamment la monographie hydrologique des grands fleuves du pays. En particulier, Olivry (1986) réalise l'analyse et l'interprétation des éléments du régime hydrologique de la quasi-totalité des cours d'eau jaugés du pays, sur la base des données enregistrées du début des observations jusqu'en 1977 pour la plupart des stations. Depuis le travail d'Olivry au moins 10 à 20 années de données supplémentaires ont été collectées au niveau des différentes stations du réseau, notamment au cours de la décennie 1980 caractérisée par une recrudescence de la sécheresse en Afrique intertropicale. L'une des principales tâches réalisées dans notre travail a été de rassembler et critiquer ces nouvelles données avant de procéder aux principales analyses qui feront l'objet du chapitre suivant.

Les nombreux travaux antérieurs cités en bibliographie ont largement fait le point des connaissances sur les régimes hydrologiques de l'ensemble du pays. Nous n'en rappelons ici que les principaux résultats, renvoyant le lecteur aux ouvrages de référence pour tous les autres détails.

Sur la figure 2.12 ont été représentés les débits moyens mensuels ainsi que les quartiles supérieur (Q1) et inférieur (Q3) (débit dépassé respectivement dans 25 et 75% des cas) de quelques cours d'eau représentatifs des différentes régions climatiques définies plus haut. Comme on peut le constater sur ces figures, les variations mensuelles des débits épousent les formes des histogrammes caractéristiques des régions présentées plus haut. Un décalage de quelques semaines correspondant au temps de réponse du bassin est cependant observé entre le maximum de la crue et celui des précipitations. On en déduit avec Olivry (1986) que les régimes des fleuves et rivières du Cameroun sont calqués (abondance, variabilité saisonnière et irrégularité interannuelle) sur ceux des précipitations.

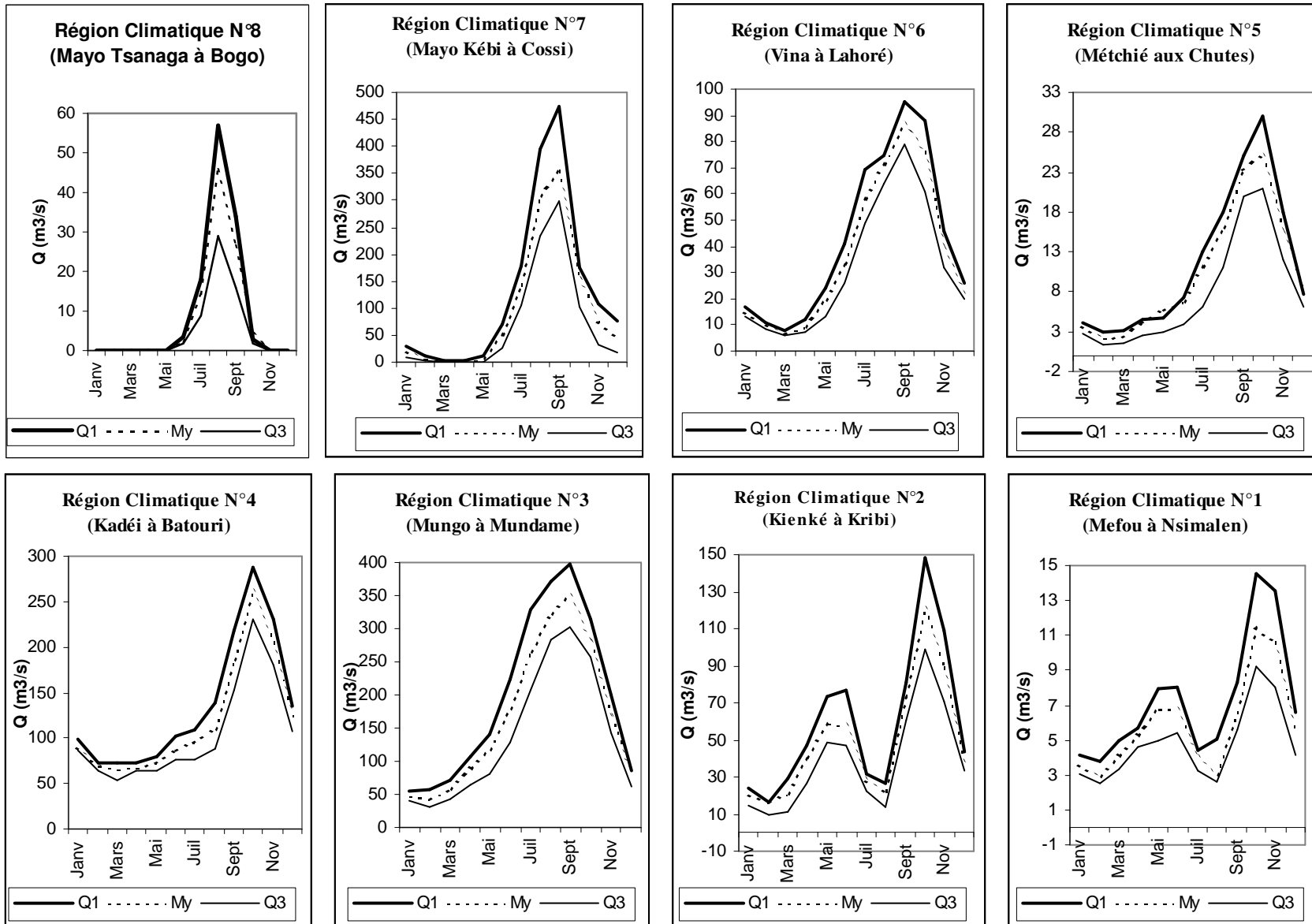


Figure 2. 12: Débits moyens mensuels caractéristiques des différentes régions climatiques du Cameroun

Sur la base de ses travaux sur les cours d'eau du Cameroun, Olivry (1986) a proposé une relation unique entre les précipitations et les écoulements moyens des cours d'eau du pays. Pour un bassin versant donné, la lame écoulée moyenne annuelle  $H_e$  (mm) peut être déduite de la pluie moyenne annuelle (P) par une relation qui s'écrit :

$$H_e = 0,973 P - 1047 \quad (\text{avec un coefficient de corrélation de } 0,980)$$

Cette relation souligne le rôle exclusif des précipitations dans la définition des régimes hydrologiques. Sa signification se limite aux valeurs interannuelles et elle doit être considérée avec une certaine prudence du fait essentiellement des tailles variables des bassins et de la diversité des pentes. Si elle semble vérifiée pour les régions à précipitations supérieures à 1500 mm du bassin de la Sanaga, du climat tropical de transition et des bassins côtiers, elle sous-estime nettement l'écoulement des régions tropicales pures et surestime celui de la bande équatoriale du bassin du Congo. En effet, les modules spécifiques interannuels sont très variables sur l'ensemble du territoire, comme on peut le constater dans le tableau 2.2 qui regroupe les principales caractéristiques hydrologiques des régions du Cameroun. Par contre, les lames écoulées et coefficients d'écoulement suivent dans l'ensemble une variation latitudinale. Comprises entre 300 et 400 mm pour des précipitations de 1500 à 1700 mm au sud du 5° parallèle, les lames écoulées augmentent de 500 à 700 mm entre 5° et 7°30 N pour des précipitations équivalentes. Elles diminuent ensuite progressivement au nord du 8° parallèle pour tomber à moins de 100 mm vers le 12° N. Sur le plan du bilan hydrologique, l'ETP est généralement satisfaite au sud du 5° parallèle où elle varie entre 1100 et 1300 mm, et peut même descendre jusqu'à 950 mm en altitude et dans les régions côtières de faible insolation. Elle devient supérieure aux précipitations au nord du 7° parallèle et peut même atteindre 2000 mm vers 12° N où les précipitations annuelles sont de l'ordre de 500 mm.

**Tableau 2.2 : Caractéristiques hydrologiques des principales régions du Cameroun**

<b>Zone climatique</b> (pluie annuelle)	Localisation	Module spécifique (l/s.km <sup>2</sup> )	Coefficient d'écoulement <b>K<sub>e</sub></b>	Coefficient <b>K<sub>3</sub></b>	Bilan hydrologique
<b>ZONE 1</b> (1600 mm)	sud de 4°30 N région côtière non comprise	de l'ordre de 10 dans le sud d'est, 12 à 15 ailleurs	25 à 30 % sur l'ensemble de la zone	1,8 à 1,6 du sud vers le nord de la zone	De = ETR = ETP (1100 à 1300 mm)
<b>ZONE 2</b> (2000 à 3000 mm)	région côtière au sud de 4° N	de l'ordre de 40 sur l'ensemble de la zone	30 à 40 % sur l'ensemble de la zone	1,8 sur l'ensemble de la zone	De = ETR = ETP (1100 à 1200 mm)
<b>ZONE 3</b> (2000 à 10000 mm)	région côtière entre 4° et 6° N	40 à 80, mais peut dépasser 100 dans la région très arrosée du Mont Cameroun	40 et plus, voire 70 à 80 % dans la région très arrosée du Mont Cameroun	1,8 à 1,6 de l'ouest vers l'est de la zone	De = ETR = ETP (950 à 1000 mm)
<b>ZONE 4</b> (1500 à 1600 mm)	région entre 4° et 6° N, à l'ouest du 10° parallèle	15 à 20 sur l'ensemble de la zone	30 à 40 % sur l'ensemble de la zone	1,4 sur l'ensemble de la zone	De = ETR = ETP (1100 à 1300 mm)
<b>ZONE 5</b> (2000 à 3000 mm)	région entre 5° et 7° N, à l'ouest du 11° parallèle	20 à 30 à l'est de la zone, 50 et plus à l'ouest	40 à 50 % sur l'ensemble de la zone	1,8 à 1,6 de l'ouest vers l'est de la zone	De = ETR = ETP (950 à 1000 mm)
<b>ZONE 6</b> (1000 à 1500 mm)	région entre 6° et 8° N	15 à 20 sur l'ensemble de la zone	30 à 40 % sur l'ensemble de la zone	1,4 à 1,6 du sud vers le nord de la zone	ETP satisfaite dans la partie sud de la zone ; ETP > P au nord des parallèles 7°- 7°30 N
<b>ZONE 7</b> (900 à 1000 mm)	région entre 8° et 10° N	décroit de 8 à 3 du sud vers le nord	Décroit de 30 à 15 % du sud vers le nord	2 à 2,2 du sud vers le nord de la zone	ETP > P (1900 à 2000 mm)
<b>ZONE 8</b> (500 à 900 mm)	Région au nord de 10° N	8 à 6 dans les monts Mandara, 3 à 2 ailleurs	Autour de 10 %, mais peut atteindre 25 % en zone de montagne	2,2 à 10 du sud vers le nord de la zone	ETP > P (2000 à 2200 mm)

K<sub>3</sub> = rapport des écoulements annuels de fréquences décennales humide et sèche. D<sub>e</sub> = déficit d'écoulement ;  
ETP = évapotranspiration potentielle, ETR = évapotranspiration réelle ; P = pluie annuelle.

### 2.5. 3 – Les ressources en eau de surface

L'évaluation des ressources en eau de surface à partir des travaux antérieurs donne les résultats du tableau 2.3 soit un total d'environ 193 km<sup>3</sup> (calculé sur la période 1950-1980), pour l'ensemble des cours d'eau contrôlés du pays. On notera que le total de chaque cours

d'eau a été estimé à partir de la station hydrométrique située le plus proche possible de la frontière du pays. Elle ne concerne en conséquence que les bassins jaugés. Une évaluation complète réalisée par Sigha Nkamdjou *et al.* (2002) indique un total de 265 km<sup>3</sup> pour l'ensemble du pays.

**Tableau 2. 3 : Ressources en eau contrôlées du Cameroun**

Nom du cours d'eau	Surface BV jaugé (Km <sup>2</sup> )	Pluie Moyenne (mm)	Lame Ecoulée (mm)	Module (m <sup>3</sup> /s)	Écoulement annuel (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )
Cross à Mamfe	6810	3600	2620	569	17,9
Metchum à Gouri	2240	2600	1575	106	3,34
Meme à Baï	975	2600	1600	50	1,58
Sanje à Idenau	77	5100	3950	9,5	0,300
Mungo à Mudame	2420	2900	2170	164	5,17
Wouri à Yabassi	8250	2350	1350	311	9,81
Dibamba (estimations)	2400	2660	1600	125	0,394
Sanaga à Edéa	131500	1686	498	2072	65,3
Nyong à Dehane	26400	1732	528	442	13,9
Lokoundje Lolodorf	1150	1880	773	28,2	0,889
Lobé à Kribi	2305	2425	1397	102,2	3,22
Kienké à Kribi	1435	2425	1082	49,2	1,55
Ntem à Niabessan	26350	1675	400	410	12,9
Kadéi à Pana	20370	1510	382	247	7,79
Ngoko à Moloundou	67075	1510	329	757	23,9
Vina du Nord à Touboro	12200	1440	353	11,6	0,366
Mbéré à Mbéré	7430	1470	467	110	3,47
Bénoué à Garoua	60500	1130	188	350	11,0
Faro à Djelepo	24000	1545	416	310	9,78
Mayo Tsanaga à Bogo	1535	853	177	7,77	0,245
<b>Total</b>	<b>405.422</b>				<b>193</b>

## 2.6 – LES EAUX SOUTERRAINES

Plus de 90% du territoire camerounais est couvert par les formations du socle où les aquifères ne sont liés qu'à la fissuration et à l'altération. De ce fait, l'essentiel des eaux souterraines du pays se retrouve dans une partie très limitée du territoire. D'autre part, aucune étude hydrogéologique détaillée intéressant l'ensemble du pays n'a été réalisée à nos jours, pour évaluer les potentialités de cette ressource. Une approche du bilan a été cependant réalisée sur la base des quelques études disponibles (SOGREAH, 1976 ; CIEH-BRGM, 1979 ; Wakuti, 1986), citées par une étude de la Banque Mondiale publiée par Mott MacDonald

International, BCEOM, SOGREAH et ORSTOM (1992). Il en ressort que les ressources exploitables dans les aquifères du Cameroun se répartissent ainsi :

- Socles : 15 396 millions de m<sup>3</sup>/an
- Bassin de Douala: 21 630 millions de m<sup>3</sup>/an
- Bassin de Garoua: 15 748 millions de m<sup>3</sup>/an
- Bassin du Tchad : 3 196 millions de m<sup>3</sup>/an

Le total fait environ 56 km<sup>3</sup> pour l'ensemble du territoire, soit environ 20 % des ressources en eau superficielle. Pour les Provinces du Nord et de l'Extrême-Nord du pays, les eaux souterraines constituent cependant la principale source d'alimentation en eau.

## CONCLUSION

La distribution des régimes hydroclimatiques sur le territoire camerounais est conforme à celle décrites par Rodier (1964) pour l'Afrique tropicale, mais comporte des nuances particulières qui ont conduit à une subdivision de certaines unités. La région au régime équatorial à quatre saisons est répartie en deux sous-groupes qui se différencient essentiellement par l'abondance des précipitations d'une part, d'autre part, le terme équatorial est conservé pour la région côtière nord en dépit du fait qu'il ne compte que deux saisons dans l'année, en raison des précipitations exceptionnelles de la région du Mont Cameroun. Les régimes tropical de transition et tropical pur sont également subdivisés en deux sous-groupes qui se différencient essentiellement par l'abondance des précipitations et la durée des saisons. Le régime tropical sec à tendance sahélienne de l'extrême nord du pays se différencie du climat sahélien pur connu ailleurs en Afrique, par des précipitations plus abondantes dans sa partie sud. Eu égard aux critères de définition des régimes hydroclimatiques, cette répartition ne devrait cependant pas être figée. Toute modification durable des caractéristiques du climat devrait conduire à la reconsidérer, et notamment les contours des différentes régions climatiques. Cette question sera examinée dans le prochain chapitre.

Le réseau hydrographique du Cameroun est particulièrement dense, notamment dans sa partie sud, en raison des précipitations particulièrement abondantes et de son relief contrasté. Le régime des écoulements suit celui des précipitations avec un décalage dans le temps



correspondant au délai de réponse des bassins versants. Sur le plan des écoulements annuels, le Cameroun présente deux zones principales :

- L'une au nord de l'Adamaoua où les écoulements diminuent fortement avec la latitude, pour des cours d'eau dont seuls les très importants comme le Logone coulent toute l'année. L'irrégularité interannuelle y augmente rapidement avec la latitude.
- L'autre, qui comprend l'Adamaoua et les régions plus au sud est beaucoup plus complexe. Si les écoulements y sont abondants et pérennes dans l'ensemble, ils sont caractérisés par une irrégularité interannuelle faible entre les parallèles 4° et 7°30 N, mais plus forte au sud en milieu équatorial et dans la région montagneuse de l'ouest.

Sur le plan quantitatif, en faisant abstraction des données qualitatives qui constituent souvent un facteur limitant, il découle de ce qui précède que les ressources en eau du Cameroun sont relativement abondantes. Elles sont évaluées à environ 300 milliards de m<sup>3</sup> en moyenne par an, soit une disponibilité par habitant de près de 20000 m<sup>3</sup> en l'an 2000, apport en précipitations directes non compris. Ce chiffre est largement supérieur au seuil du stress hydrique établi à 1000 m<sup>3</sup>/hbt/an, ainsi qu'à la moyenne mondiale qui est de 7600 m<sup>3</sup>/hbt/an (Banque Mondiale, 1992). Ainsi, le Cameroun peut être compté parmi les pays privilégiés en matière de ressources en eau.

La notion de disponibilité par habitant présente cependant très grossièrement la situation. En effet, si l'on prend en considération la distribution des ressources entre les différentes zones du pays, certaines régions du nord Cameroun peuvent dès aujourd'hui être considérées comme ayant des ressources peu ou pas fiables. D'autre part, l'irrégularité interannuelle des ressources en eau liée aux fluctuations diverses et à la variabilité climatique en particulier commande que ces chiffres soient considérés avec prudence. Les ressources en eau peuvent être plus ou moins abondantes d'une année à l'autre, ou tout simplement réparties différemment dans l'année, d'où des conséquences socio-économiques parfois considérables. Il est par conséquent fortement conseillé de tenir compte de cette donnée dans toutes les questions relatives à l'utilisation des ressources en eau. Dans cette optique, le prochain chapitre sera consacré à l'analyse et à la compréhension des manifestations de la variabilité hydroclimatique au Cameroun.

### **CHAPITRE III : MANIFESTATIONS DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE AU CAMEROUN**

### **3.1 – INTRODUCTION**

Ce chapitre sera consacré à la caractérisation et au suivi des fluctuations éventuelles au sein des séries chronologiques de variables hydrologiques, pluviométriques et des températures sur le territoire camerounais. Il s'agit essentiellement des paramètres suivants :

- températures moyennes annuelles,
- températures maximales moyennes annuelles,
- températures minimales moyennes annuelles,
- amplitudes thermiques annuelles moyennes,
- hauteurs de pluies annuelles,
- hauteurs de pluies mensuelles,
- nombre annuel de jours de pluie,
- débit moyen annuel,
- débits caractéristiques des basses et hautes eaux.

Avant d'aborder les différents traitements, il sera procédé à une présentation des données de l'étude et des principaux outils d'analyse.

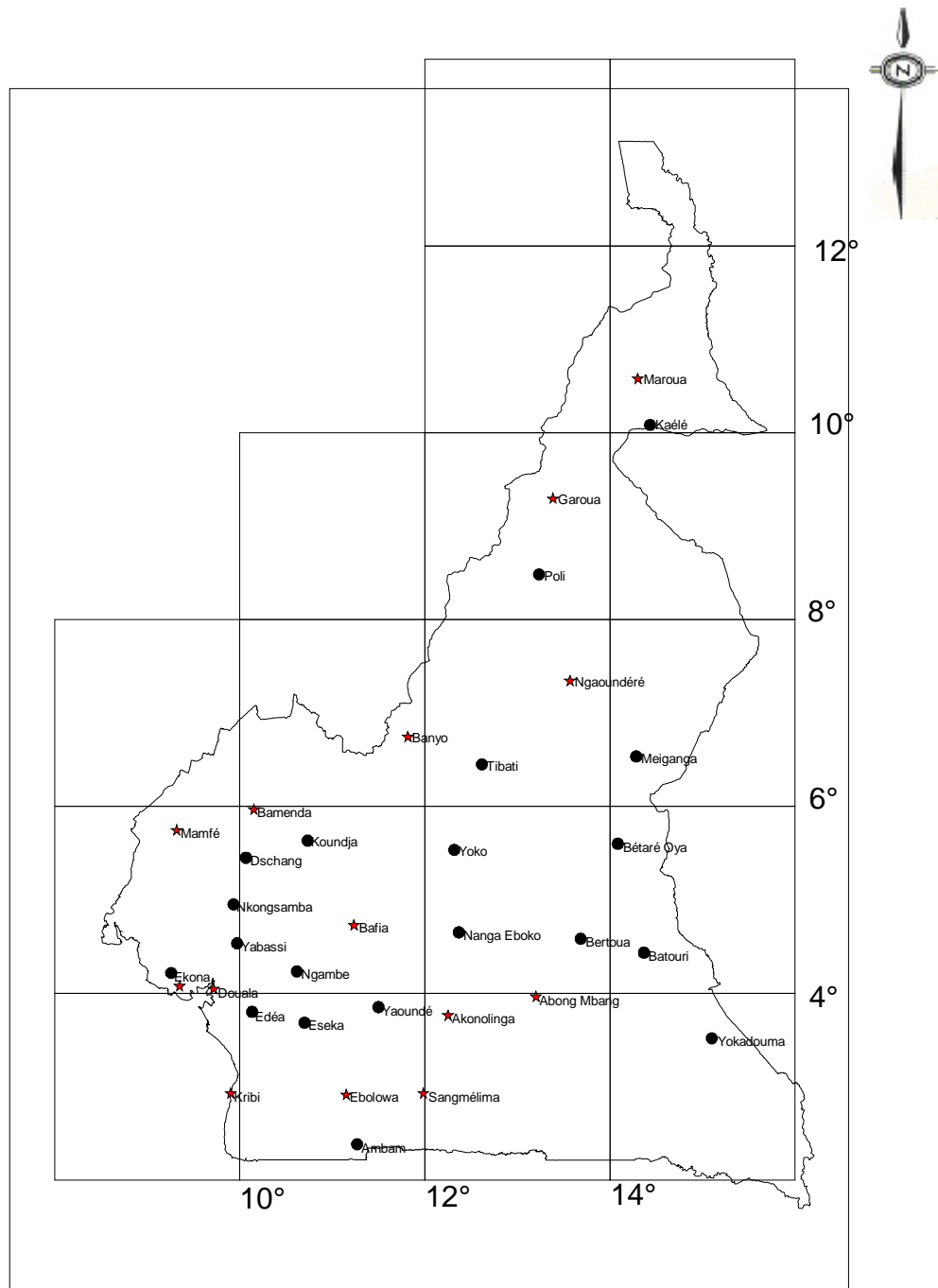
### **3.2 - LES DONNEES DE L'ETUDE**

En raison de leur importance pour les activités humaines, la température et la pluviométrie sont les paramètres climatiques les plus fréquemment mesurés dans les réseaux de mesure météorologique au sol. En plus de ces deux paramètres, nous nous intéresserons tout particulièrement aux observations hydrométriques dans cette étude.

#### **3.2.1 – DONNEES DE TEMPERATURE**

A l'inverse des précipitations, la relative complexité de la mesure des températures (nécessité d'un abri, fluctuations en fonction de nombreux facteurs, etc. .) conduit à un nombre de postes d'observation plus limité. Des relevés de température sous abri, de qualité appréciable, sont cependant effectués au Cameroun depuis longtemps par les services de la météorologie nationale et diverses institutions publiques et privées, notamment les institutions de recherches et des entreprises agro-industrielles telles la *Cameroon Development Corporation*

(CDC). C'est essentiellement au cours de la décennie 50 que les observations couvrent l'ensemble des provinces du pays. Elles se sont poursuivies jusqu'à nos jours, mais les séries de données comportent de nombreuses lacunes. Compte tenu de la stabilité des températures d'une année à l'autre, on admet habituellement que dix années d'observations sont suffisantes dans les pays tropicaux pour obtenir des moyennes représentatives (Suchel 1987). L'expérience des années récentes semble cependant démentir quelque peu cette affirmation. En effet, la première grande sécheresse observée en Afrique de l'Ouest s'est traduite par une hausse générale et très sensible des températures par rapport aux valeurs moyennes dans de nombreuses régions. Dans ces conditions, la représentativité des résultats de nos analyses ne sera effective que dans la mesure où les observations portent sur une période à la fois homogène et longue. Outre la présence des lacunes, cette exigence limite considérablement le nombre de séries utilisées dans notre étude. Ainsi, des 34 séries utilisées pour le tracé des isothermes (figure 2.7), seules une quinzaine (postes marqués d'une étoile sur la figure 3.1) sera utilisée dans l'étude de la variabilité des températures. Les sites d'observations sont cependant bien répartis pour que les résultats des analyses permettent de se faire une idée de la situation sur l'ensemble du territoire camerounais.



*Echelle 1 : 8.700.000*

Figure 3.1 : Répartition des postes de mesure de température étudiés

La liste des postes de mesure de température étudiés est donnée dans le tableau 3.1 qui précise en même temps leurs coordonnées géographiques, l'altitude du poste ainsi que les périodes d'observation.

**Tableau 3.1 : Postes de suivi de température étudiés et leur période d'observation**

N°	Nom de la Station	Longitude	Latitude	Altitude (m)	Période d'observation
1	Abong Mbang	13° 12	3° 58	694	1951 - 2002
2	Akonolinga	12° 15	3° 46	671	1951 - 2002
3	Ambam	11° 16	2° 23	602	1955 - 2002
4	Bafia	11° 14	4° 44	501	1955 - 2002
5	Bamenda	10° 09	5° 57	1620	1962 - 2002
6	Banyo	11° 49	6° 45	1110	1955 - 2002
7	Batouri	14° 22	4° 26	660	1951 - 2002
8	Bertoua	13° 41	4° 35	668	1955 - 2002
9	Bétaré Oya	14° 05	5° 36	805	1951 - 2002
10	Douala	9° 43	4° 43	18	1951 - 2002
11	Dschang	10° 04	5° 27	1399	1955 - 2002
12	Ebolowa	11° 09	2° 55	609	1955 - 2002
13	Edéa	10° 08	3° 48	32	1955 - 2002
14	Ekona	9° 15	4° 08	380	1984 - 2002
15	Eséka	10° 47	3° 37	423	1955 - 1990
16	Garoua	13° 23	9° 18	213	1951 - 2002
17	Kaélé	14° 26	10° 05	387	1953 - 2002
18	Koundja	10° 44	5° 38	1217	1955 - 2002
19	Kribi	9° 54	2° 56	13	1951 - 2002
20	Mamfe	9° 19	5° 45	126	1963 - 2002
21	Maroua	14° 15	10° 28	403	1954 - 2002
22	Meiganga	14° 17	6° 32	1027	1955 - 2002
23	Nanga Eboko	12° 22	4° 39	624	1955 - 2002
24	Ngambe	10° 37	4° 14	650	1955 - 1992
25	Ngaoundéré	13° 34	7° 21	1138	1951 - 2002
26	Nkongsamba	9° 56	4° 57	806	1955 - 2002
27	Poli	13° 14	8° 29	436	1955 - 198
28	Sangmelima	11° 59	2° 56	713	1951 - 2002
29	Tibati	12° 37	6° 27	874	1955 - 2002
30	Tiko	9° 21	4° 05	46	1962 - 2002
31	Yabassi	9° 58	4° 32	30	1955 - 2001
32	Yaoundé	11° 30	3° 31	760	1951 - 2002
33	Yokadouma	15° 06	3° 31	640	1955 - 1990
34	Yoko	12° 19	5° 32	1031	1953 - 1980

La figure 3.1 situe les différents postes de suivi de la température retenus pour l'étude sur le territoire. Comme on peut le voir dans le tableau 3.1, la durée des observations au niveau des différentes stations est comprise entre 40 et 50 ans. Cependant certaines séries comportent de très nombreuses lacunes, avec des périodes non observées dépassant parfois 10 années consécutives.

### 3.2.2 – DONNEES PLUVIOMETRIQUES

Les données de l'étude ont été obtenues à partir de la banque de plusieurs organismes nationaux et internationaux intervenant ou étant intervenus au Cameroun dans le domaine de l'eau ou dans les domaines connexes. Il s'agit notamment de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) du Cameroun, du Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) du Cameroun, de la "Cameroon Development Corporation" (CDC), de l'Institut de Recherches Agronomiques du Cameroun (IRAD), de l'Institut de Recherches pour le Développement (IRD), du Climatic Research Unit (CRU), de la Direction de Ressources en eau et de la Météorologie (DREM) du Tchad et de quelques institutions spécialisées de la sous-région telle que la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT). Quelques données collectées dans des rapports publiés par des organismes spécialisés ont été également utilisées. Il s'agit en particulier du document publié par le Centre National d'Appui à la Recherche du Tchad (Beauvilain, 1995), sur la pluviométrie dans les bassins du Tchad et de la Bénoué de la création des stations à décembre 1994.

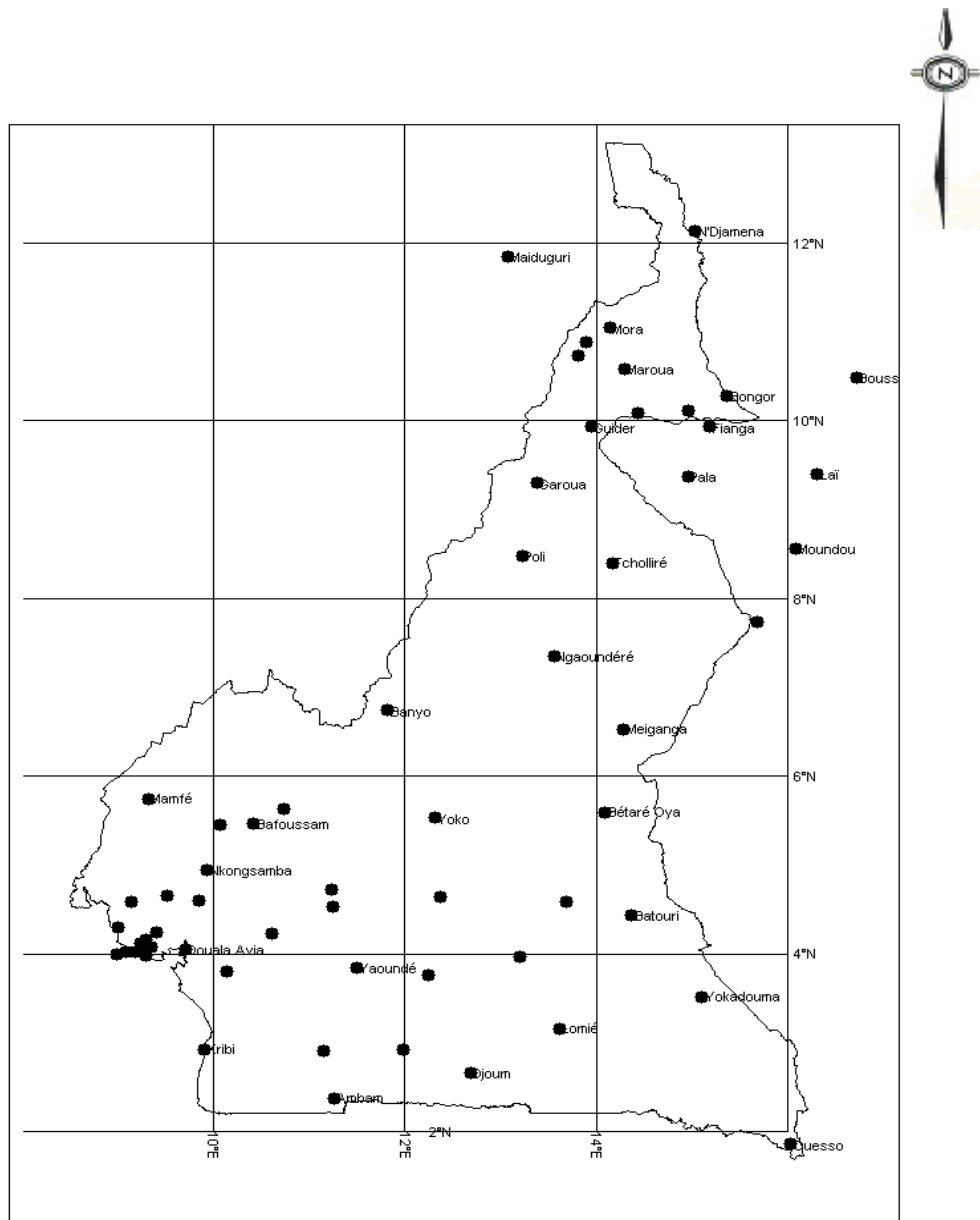
La multiplicité des sources est un avantage dans la mesure où elle permet de faire des comparaisons et de corriger ainsi certaines erreurs. On sait cependant que deux tableaux de données présentés par différents auteurs peuvent être différents en raison des critiques opérées différemment par chacun des auteurs. C'est ainsi que toutes les différences entre les tableaux de données ont été systématiquement vérifiées à partir des documents sources (notamment pour les décennies 80 et 90) quand nous pouvions les avoir à notre disposition. Il faut cependant souligner qu'en raison de la commercialisation des données désormais en vigueur à la DMN, l'accès aux documents originaux est rendu plus difficile, voire impossible. Ainsi, une partie des données a été reçue directement sur support informatique. Une critique rigoureuse de l'ensemble des observations nous permet cependant d'affirmer qu'elles sont de bonne qualité.

En région tropicale, on estime généralement qu'un minimum de 20 années d'observation des précipitations est indispensable pour obtenir des moyennes mensuelles représentatives, alors que 10 années ou même moins suffisent pour la plupart des autres éléments du climat (Suchel, 1987). Dans le cas de notre étude et en raison de son objet principal qui vise l'étude de la variabilité temporelle, la collecte des données s'est limitée aux stations de longue durée. Les stations pluviométriques étudiées sont au nombre de 65, dont 54 installés sur le territoire

camerounais, 8 au Tchad, 2 au Congo et 1 au Nigeria. La durée des observations varie de 31 à 80 ans, dont plus de 80% avec au moins 40 années de suivi. La figure 3 .2 situe les différents postes d'observation étudiés.

La différence entre la longueur des séries est une source inévitable d'hétérogénéité qui vient se superposer à l'incertitude liée à la variabilité des phénomènes. Ce choix d'une prise en compte hétérogène des séries a été dicté par la rareté des observations dans certaines régions et la nécessité de disposer d'un nombre de postes d'observation représentatifs de la diversité des régions climatiques du pays. Cependant, comme nous le verrons plus loin, certains traitements, tel le calcul des indices pluviométriques, se référeront à une sélection de postes et sur une période d'observation homogène (1940-2000) afin de garantir une cohérence statistique aux résultats. Le procédé bénéficie de la bonne répartition des postes d'observation offrant de longues séries de relevés, sur l'ensemble des zones climatiques du pays. Cependant, il a été parfois nécessaire de reconstituer quelques données pour compléter la série de certains postes géographiquement isolés dont les relevés sont indispensables pour une bonne couverture de l'ensemble du territoire.





*Echelle 1 : 8.700.000*

**Figure 3.2 : Répartition des postes pluviométriques étudiés**

La liste des postes d'observation pluviométriques utilisées est donnée dans le tableau 3.2 qui précise en même temps leurs coordonnées géographiques, l'altitude du poste ainsi que les périodes d'observation. Les données de certaines stations d'observation de pays voisins ont également été exploitées afin de combler la faible densité des observations sur certaines parties du territoire, notamment au niveau des frontières. Elles permettent en outre de faire des comparaisons et d'affiner le tracé des isohyètes et le calcul des moyennes par bassin.

Dans l'ensemble, ces données couvrent une vingtaine d'années d'observations de plus que celles utilisées par Olivry (1986) et Suchel (1987), notamment la décennie 80 qui est reconnue dans la sous-région comme la plus sèche du siècle. Il sera par conséquent possible de procéder à la caractérisation de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau du Cameroun sur toute la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.

**Tableau 3.2 : Nom et période d'observation des stations pluviométriques étudiées**

N°	Nom de la Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période d'observation
1	Abong Mbang	3° 58	13° 12	694	1939 – 2001
2	Akonolinga	3° 46	12° 15	671	1934 – 2001
3	Ambam	2° 23	11° 16	602	1934 – 2001
4	Bafia	4° 44	11° 14	501	1930 – 2001
5	Bafoussam	5° 28	10° 25	1460	1934 – 2001
6	Bamenda	5° 57	10° 09	1618	1923 – 2001
7	Banyo	6° 45	11° 49	1110	1932 – 2001
8	Batouri	4° 26	14° 22	660	1939 – 1994
9	Bertoua	4° 35	13° 41	668	1932 – 2001
10	Bétaré Oya	5° 36	14° 05	805	1940 – 1995
11	Bota Krater	4° 01	9° 11	79	1965 – 2002
12	Bota (Mokundange)	4° 01	9° 05	37	1965 – 2002
13	Debundscha	4° 00	8° 59	18	1927 – 2002
14	Djoum	2° 40	12° 41	684	1934 – 1993
15	Douala	4° 03	9° 43	18	1922 - 2001
16	Doukoula	10° 07	14° 58	340	1953 – 1994
17	Dschang	5° 27	10° 04	1399	1941 – 2001
18	Ebolowa	2° 55	11° 09	609	1939 – 2002
19	Edéa	3° 48	10° 08	32	1939 – 2001
20	Garoua	9° 18	13° 23	213	1927 – 2001
21	Guétalé	10° 53	13° 54	490	1948 – 1994
22	Guider	9° 56	13° 57	356	1934 – 1994
23	Idenau (Bibunde)	4° 18	9° 00	10	1965 – 2001
24	Kaélé	10° 05	14° 26	387	1944 – 1994
25	Koundja	5° 38	10° 44	1217	1950 – 2001
26	Kribi	2° 56	9° 54	13	1939 – 2001
27	Lomié	3° 10	13° 37	640	1946 – 2000
28	Mabeta Beach	3° 59	9° 18	12	1965 – 1995
29	Mamfé	5° 45	9° 19	126	1926 – 1987
30	Maroua	10° 35	14° 18	402	1939 – 2001
31	Mbonje Office	4° 36	9° 08	18	1965 – 2001
33	Meiganga	6° 32	14° 17	1027	1933 – 1994
34	Misselle Muanga	4° 07	9° 27	6	1965 – 2000
35	Mokolo	10° 44	13° 49	795	1934 – 1994
36	Moliwe N. C. /Bota	4° 04	9° 15	177	1966 – 2002
37	Molyko	4° 10	9° 18	573	1965 – 2002
38	Mora	11° 03	14° 09	438	1934 – 1994
39	Mukunje Bakossi	4° 40	9° 31	185	1965 – 2001
40	Mungo Mpundu	4° 15	9° 24	61	1965 – 2001
41	Nanga Eboko	4° 39	12° 22	624	1933 – 2001
42	Ngambe	4° 14	10° 37	650	1938 – 1989

N°	Nom de la Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Période d'observation
43	Ngaoundéré	7° 21	13° 34	1138	1927 – 2001
44	Nkongsamba	4° 57	9° 56	806	1930 – 2001
45	Poli	8° 29	13° 14	436	1934 – 1998
46	Sangmélina	2° 56	11° 59	713	1934 – 2002
47	Tcholliré	8° 24	14° 10	392	1951 – 1994
48	Tiko	4° 05	9° 21	46	1949 – 2002
49	Tole Factory / Tea	4° 08	9° 15	683	1965 – 2002
50	Tombel Garage	4° 37	9° 51	439	1965 – 2001
51	Yabassi	4° 32	9° 58	30	1926 – 1980
52	Yaoundé	3° 51	11° 30	760	1927 – 2001
53	Yokadouma	3° 31	15° 06	640	1930 – 1999
54	Yoko	5° 32	12° 19	1031	1930 – 1990
<b>Tchad</b>					
55	Baibokoum	7° 44	15° 41	520	1946 – 1994
56	Bongor	10° 17	15° 22	328	1935 – 1994
57	Bouso	10° 29	16° 43	336	1943 – 1994
58	Fianga	9° 56	15° 11	327	1949 – 1994
59	Lai	9° 24	16° 18	358	1946 – 1994
60	Moundou	8° 34	16° 05	422	1933 – 1994
61	N'Djamena	12° 08	15° 02	295	1931 – 2000
62	Pala	9° 22	14° 58	420	1946 – 1994
<b>Nigeria</b>					
63	Maiduguri	11° 51	13° 05	353	1915 – 1994
<b>Congo</b>					
64	Souanké				1961- 1991
65	Ouessou	1° 52	16° 02	490	1951 – 2000

### 3.2.2.1 – Qualité des données pluviométriques

La qualité des données est bonne dans l'ensemble, mais cela ne signifie pas qu'il n'y ait pas de lacunes ou de stations aux relevés erronés. Le logiciel MVR (Méthode du Vecteur Régional) a été utilisé pour évaluer la qualité des cumuls des précipitations annuelles et la mise à jour de nos données. Nous en rappelons ci-après les grandes lignes.

#### Le logiciel MVR :

Mis au point par l'IRD, MVR repose sur deux hypothèses fondamentales, Hiez (1977 & 1986) :

- Les séries de hauteurs de précipitations de postes voisins, situés dans une même région climatique, sont pseudo - proportionnelles entre elles ; ceci signifie que les variations de la hauteur de précipitations annuelles à tous les postes sont concomitantes : une année humide le sera avec des intensités du même ordre sur la plupart des stations, et vice-versa pour une année sèche.

- L'information la plus probable est celle qui se répète le plus fréquemment ; ceci signifie que la pluviosité d'une année donnée est celle indiquée par le plus grand nombre de stations. Ceci signifie aussi que les observations à une station donnée pour la période retenue sont caractérisées par le mode de ces observations.

La mise en œuvre du logiciel intègre trois fonctions principales :

- la critique individuelle de la hauteur des précipitations annuelles. Il s'apparente ainsi à la méthode classique des totaux annuels cumulés ("doubles masses"), mais en l'optimisant par la comparaison de chaque station avec une station synthétique régionale, obtenue à partir de la matrice de l'ensemble des observations d'une région homogène ;
- l'homogénéisation temporelle des données traitées : il s'agit en particulier d'obtenir les moyennes annuelles aux stations sur une période commune, la plus longue possible ;
- la synthèse des variations chronologiques de la pluviosité à l'échelle de régions géographiques ; ce qui permet des comparaisons fructueuses de vecteurs plus ou moins éloignés, au niveau d'un pays ou d'une sous-région par exemple.

Notez cependant que les performances du logiciel sont reconnues surtout dans son utilisation sur de vastes étendues géographiques pour la réalisation des synthèses. La critique classique des observations des stations individuelles est laissée à l'appréciation de l'utilisateur. A ce niveau, l'existence dans une même localité, ou dans des localités voisines, de plusieurs postes d'observations souvent suivis par des organismes différents, a été parfois mise à profit. Pour la statistique des jours de pluie par exemple, en raison de leur proximité, les informations de tels postes sont directement utilisées.

L'application de la méthode sur notre échantillon de données nous a permis de retenir un ensemble de 50 postes d'observation sur une période homogénéisée de 60 ans (1940-2000) qui seront utilisés dans le calcul des principaux indices présentés plus loin. Les 15 postes restant sont ceux où les observations ont commencé plus tard pour que leurs données soient complétées à 60 ans. Leurs données qui servent de référence locale ont parfois été utilisées pour la mise à jour des stations de longue durée.

### 3.2.3 - DONNEES HYDROMETRIQUES

Les données hydrométriques du Cameroun sont actuellement regroupées dans deux banques principales, celle de l'IRD qui rassemble les données utilisées par Olivry (1986), et celle du CRH. Les données de la banque de l'IRD qui couvrent la période allant de l'origine des stations à 1977 (voire 1980 pour quelques stations), sont gérées par Hydrom (Logiciel IRD). Celles de la banque de données du CRH couvrent la période allant du début des observations jusqu'à la fin de la décennie 1980 pour la quasi-totalité des stations étudiées. Elle est gérée par Tidhyp (Logiciel CRH) qui ne dispose pas encore de module de transformation permettant le transfert de ses fichiers vers Hydrom. Travaillant avec Hydrom, nous avons été emmenés à ressaisir les données complémentaires de l'ensemble des stations utilisées dans l'étude.

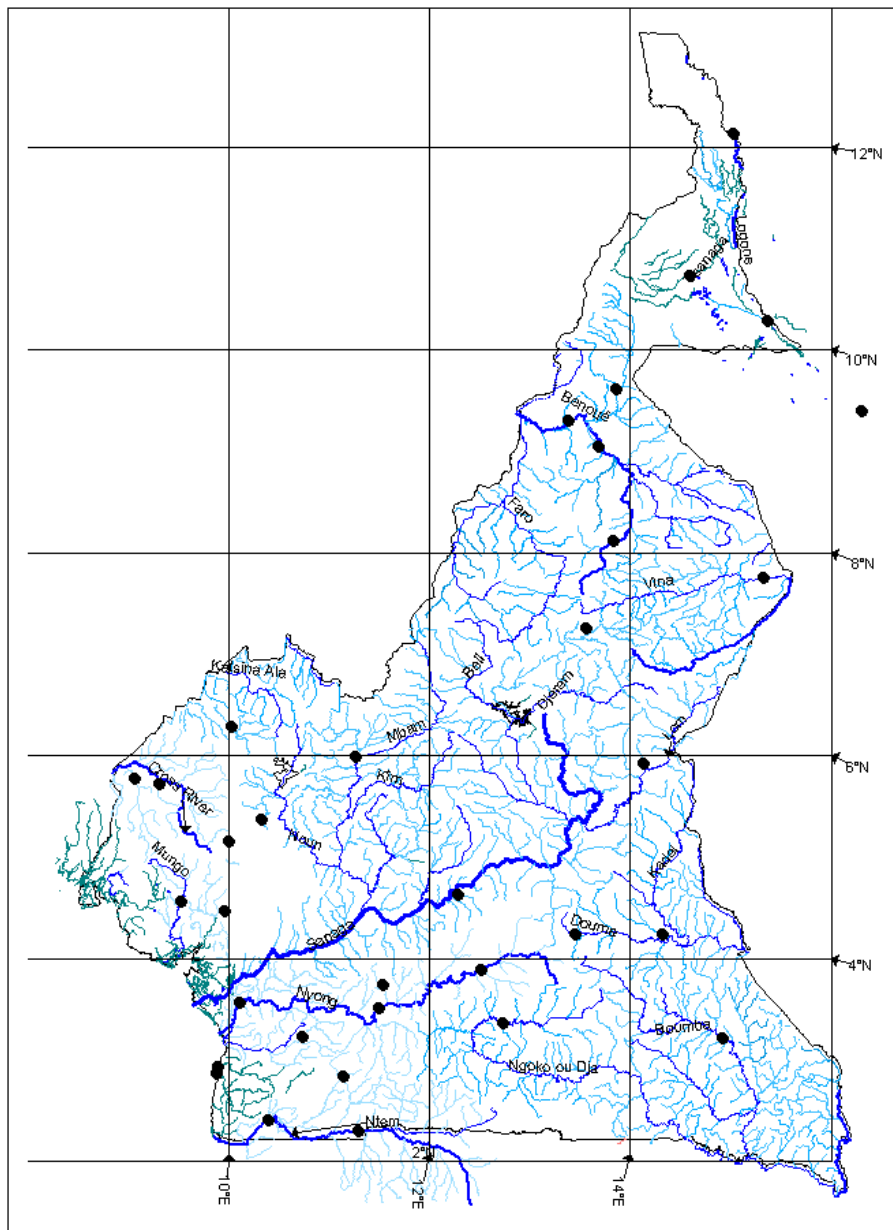
La qualité des données disponibles est bonne dans l'ensemble jusqu'en 1987, date au-delà de laquelle les moyens financiers n'ont plus permis un contrôle rigoureux des observateurs et des étalonnages. Quelques stations ont cependant été observées au cours de la décennie 90 dans le cadre de projets particuliers, notamment les travaux du "Projet Waza Logone" dans l'extrême Nord du pays, le projet HydroNiger (ABN), etc.. Bien que comportant de nombreuses lacunes d'observation, ces données ont été également critiquées et intégrées dans notre banque. Si elles ne sont pas utilisées directement dans l'étude, elles servent au moins de référence pour certaines analyses.

La figure 3.3 situe les différentes stations hydrométriques retenues pour l'étude, et le tableau 3.3 en donne la liste avec précision de la période d'observation, des coordonnées géographiques et de la superficie des bassins versants contrôlés. Les principaux critères de sélection des stations étudiées sont les suivantes : la longueur des séries, leur continuité et l'inexistence d'une influence notable de l'homme sur le régime des écoulements, notamment l'existence d'un barrage de régulation en amont.

**Tableau 3.3 : Caractéristiques et période d'observation des stations hydrométriques étudiées**

N°	Bassin versant	Nom Rivière	Nom station	Surface BV (Km <sup>2</sup> )	Période d'observation	Taille échant. (an)
1	Congo	Doumé	Doumé	515	1946 - 1988	42
2		Dja	Somalomo	5 380	1955 – 1992	37
3		Kadéi	Batouri	8 974	1954 – 1992	38
4		Boumba	Biwala	10 335	1965 – 1991	26
5	Kienké	Kienké	Kribi	1 435	1955 – 1992	37
6	Lobé	Lobé	Kribi-Campo	2 305	1953 – 1986	33
7	Lokoundjé	Lokoundjé	Lolodorf	1 150	1951 – 1987	36
8	Ntem	Seng	Assoseng	440	1955 – 1987	32
9		Ntem	Ngoazik	18 100	1953 – 1992	39
10		Ntem	Nyabessan	26 350	1957 – 1991	34
11	Nyong	Mefou	Nsimalen	425	1963 – 1987	24
12		Nyong	Ayos	5 300	1951 – 1987	36
13		Nyong	Mbalmayo	13 555	1951 – 2002	51
14		Nyong	Déhane	26 400	1951 – 1987	36
15	Mungo	Mungo	Mundame	2 420	1952 – 1986	34
16	Wouri	Nkam	Melong	2 275	1951 – 1983	32
17		Wouri	Yabassi	8 250	1951 – 1991	40
18	Cross	Munaya	Akwem	2770	1968 – 1987	19
19		Cross River	Mamfé	6 810	1967 – 1987	20
20	Sanaga	Metchié	Les Chutes	480	1964 – 1987	23
21		Vina du Sud	Lahoré	1 680	1951 – 1987	41
22		Téré	Ndoumba	1 730	1963 – 1987	24
23		Mapé	Pont Magba	4 020	1952 – 1987	35
24		Lom	Bétaré Oya	11 100	1951 – 1994	43
25		Sanaga	Edéa	131 500	1943 - 1983	41
26	Lac Tchad	Mayo Tsanaga	Bogo	1 535	1954 – 1998	44
27		Vina Nord	Berem	1 585	1963 – 1992	29
28	(Tchad)	Logone	Laï	56 700	1953 – 1996	43
29	(Tchad)	Logone	Bongor	71 400	1948 – 1999	51
30	(Tchad)	Chari	N'Djamena (Kousseri)	600 000	1933 – 1999	66
31	Niger	Metchem	Gouri	2116	1964 – 1986	22
32		Bénoué	Buffle Noir	3 220	1955 – 1987	32
33		Mayo Kébi	Cossi	25 000	1955 – 2000	45
34		Bénoué	Riao	30 650	1950 – 1991	41
35		Bénoué	Garoua	60 500	1946 – 1991	45

**NB :** En raison de la régularisation des débits de la Sanaga depuis 1969, les données de la station d'Edéa ne seront traitées que dans le cadre de la modélisation pluie-débit au chapitre V



*Echelle 1 : 8.500.000*

**Figure 3.3 : Répartition des stations hydrométriques (points noirs sur le réseau hydrographique) étudiées.**

### **3.3 - VARIABILITE HYDRO-PLUVIOMETRIQUE AU CAMEROUN**

#### **3.3.1 – METHODES D'ETUDE DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES**

Les études des fluctuations climatiques au Cameroun seront axées essentiellement sur l'analyse des caractéristiques de la température, des précipitations et des écoulements dans les différentes régions du pays. Les procédés d'analyse des fluctuations climatiques utilisent des méthodes basées sur le test de la stationnarité de séries chronologiques de mesures et la recherche de la segmentation la plus adaptée, quand des séquences statistiquement différentes sont détectées. Ces méthodes ont été utilisées avec succès sur des séries de pluies et de débits en Afrique et en Europe (Hubert, 1987 ; Paturel et al., 1996 ; Servat et al., 1999 ; Ouedraogo, 2001). Les études de tendance au moyen de régression linéaire sont aussi utilisées. La caractérisation des fluctuations des différentes variables utilise également l'analyse des indices qui mesurent un écart par rapport à une moyenne établie. Des techniques de représentation cartographique seront utilisées pour mieux décrire l'hétérogénéité des différents phénomènes étudiés à l'échelle du Cameroun.

L'étude de la température s'intéressera à la température moyenne annuelle, la température maximale moyenne annuelle, la température minimale moyenne annuelle et l'amplitude thermique annuelle moyenne.

Sur le plan de la pluviométrie, on s'intéressera aux cumuls des pluies annuelles, mensuelles, saisonnières ainsi qu'au nombre annuel de jours de pluie. On s'intéressera également à l'impact des fluctuations des précipitations sur la disponibilité en eau, sur les régimes hydrologiques.

L'étude de la variabilité des écoulements, intéressera le module interannuel, les paramètres de basses et hautes eaux ainsi que d'autres variables caractéristiques de l'évolution du régime des cours d'eau, tels que les débits dépassés ou non pendant une durée déterminée.

Avant d'aborder les analyses proprement dites, nous rappelons les grandes lignes des techniques utilisées. La démarche utilisée peut se résumer ainsi qu'il suit : un ensemble de méthodes de segmentation regroupées dans un logiciel (KhronoStat) est utilisé pour les



analyses en vue de la détection d'éventuelles composantes constitutives des séries. Le logiciel Safarhy est utilisé pour la réalisation de l'ajustement d'une loi de probabilité théorique à la distribution de fréquence de l'échantillon ou de chacun de ses éléments constitutifs. Après le calcul des différents indices, le logiciel Surfer est utilisé pour des interpolations et les représentations cartographiques.

### **Etude des indices**

Les indices étudiés ici mesurent des écarts entre les variables étudiées par rapport à une moyenne établie sur une longue période. Ils permettent de différencier les années (ou décennies) sèches/déficitaires et humides/excédentaires.

Pour chacun des paramètres étudiés, l'indice annuel est calculé par la formule :

$$(X_i - M)/S$$

avec :

$X_i$  : moyenne de l'année  $i$  étudiée,

$M$  : moyenne interannuelle de la variable étudiée sur la période de référence,

$S$  : valeur de l'écart type de la variable sur la même période de référence.

Afin de conserver à l'indice une homogénéité statistique (Moron, 1994), les indices sont calculés pour l'ensemble des variables étudiées sur une période de référence homogène.

### **Le Logiciel Khronostat :**

KhronoStat est un logiciel qui regroupe des tests de vérification du caractère aléatoire de l'échantillon (test d'autocorrélation et test de corrélation sur le rang) et de détection de rupture. La détection de rupture utilise le test de Buishand et l'ellipse de Bois, la méthode non paramétrique de Pettit, l'approche bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de Hubert (Lubès et al., 1994).

### **Test de Pettit**

Le test de Pettit est non-paramétrique et dérive de celui de Mann-Whitney. L'absence de rupture dans une série ( $X_i$ ) de taille  $N$  constitue l'hypothèse nulle. Sa mise en œuvre suppose

que pour tout instant  $t$  compris entre 1 et  $N$ , les séries chronologiques  $(X_i)$   $i-1$  à  $t$  et  $t+1$  à  $N$  appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$  définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où,  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$   
avec  $\text{sgn}(x) = 1$  si  $x > 0$ ,  $0$  si  $x = 0$  et  $-1$  si  $x < 0$

Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant  $t$  définissant le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$ .

### **Méthode Bayésienne de Lee et Heghinian**

La méthode bayésienne de Lee et Heghinian propose une approche paramétrique. Son application sur une série nécessite une distribution normale des valeurs de cette dernière.

Le modèle de base de la procédure est le suivant :

$$X_i = \begin{cases} \mu + \varepsilon_i & i = 1, \dots, \tau \\ \mu + \delta + \varepsilon_i & i = \tau + 1, \dots, T \end{cases}$$

Les  $\varepsilon_i$  sont indépendants et normalement distribués, de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ ,  $\tau$  et  $\delta$  représentent respectivement la position dans le temps et l'amplitude d'un changement éventuel de moyenne.

La méthode établit la distribution de probabilité à posteriori de la position dans le temps d'un changement. Lorsque la distribution est unimodale, la date de la rupture est estimée par le mode avec d'autant plus de précision que la dispersion de la distribution est faible.

### **Statistique U de Buishand**

La procédure de Buishand fait référence au même modèle et aux mêmes hypothèses que l'approche de Lee et Heghinian. En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture  $t$ , la statistique  $U$  de Buishand est définie par :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} S_k / D_x}{N(N+1)}$$

Où  $S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - M)$  pour  $k=1, \dots, N$  ;  $D_x$  désigne l'écart type de la série,  $M$  la moyenne.

L'hypothèse nulle du test statistique est l'absence de rupture dans la série. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test.

Outre ces différentes procédures, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de  $(X_i)$ . La variable  $S_k$ , définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance  $k(N-k)N^{-1} \sigma^2$ ,  $k=0, \dots, N$  sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des  $(X_i)$ . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des  $S_k$  sous l'hypothèse nulle.

### **La méthode de segmentation de Hubert**

La procédure de segmentation de séries chronologiques proposée par Hubert, est appropriée à la recherche de multiples changements de moyenne. Elle fournit, au moyen d'un algorithme spécifique, une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes au regard du test de Scheffé (Dagnelie, 1975).

Ces différentes méthodes seront successivement appliquées à chacune de nos séries. Cependant, de nombreuses études réalisées en Afrique et ailleurs au moyen du test de Pettit attestent de sa robustesse pour la détection des ruptures dans une série chronologique (Lubès et al., 1994; Servat et al., 1998 & 1999 ; Ouedraogo, 2001). Par conséquent, nous nous appuyerons essentiellement sur les résultats de ce dernier pour nos conclusions sur la présence ou non de rupture dans nos séries. Les autres serviront alors de confirmation et fourniront d'autres précisions sur la nature et les caractéristiques de la série.

### 3.3.2 – MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE AU CAMEROUN

#### 3.3.2.1 – VARIABILITE DE LA TEMPERATURE

Les variables étudiées sont la température moyenne annuelle, les températures maximale et minimale moyennes annuelles ainsi que l'amplitude thermique annuelle moyenne. La non-stationnarité des séries chronologiques de température ayant été rejetée dans tous les cas (très probablement en raison de la faiblesse des amplitudes de variation), seules les analyses des indices de température annuelle (variable centrée réduite) sont appliquées. Pour permettre de faire des comparaisons avec l'évolution des températures sur le plan mondial, les indices ont été étudiés par rapport à la normale de la période de référence 1961-1990.

La figure 3.4 présente l'évolution des indices de la température moyenne annuelle par rapport à la moyenne de la période 1961-1990 au niveau de quelques postes d'observations représentatifs des différentes zones climatiques du Cameroun.

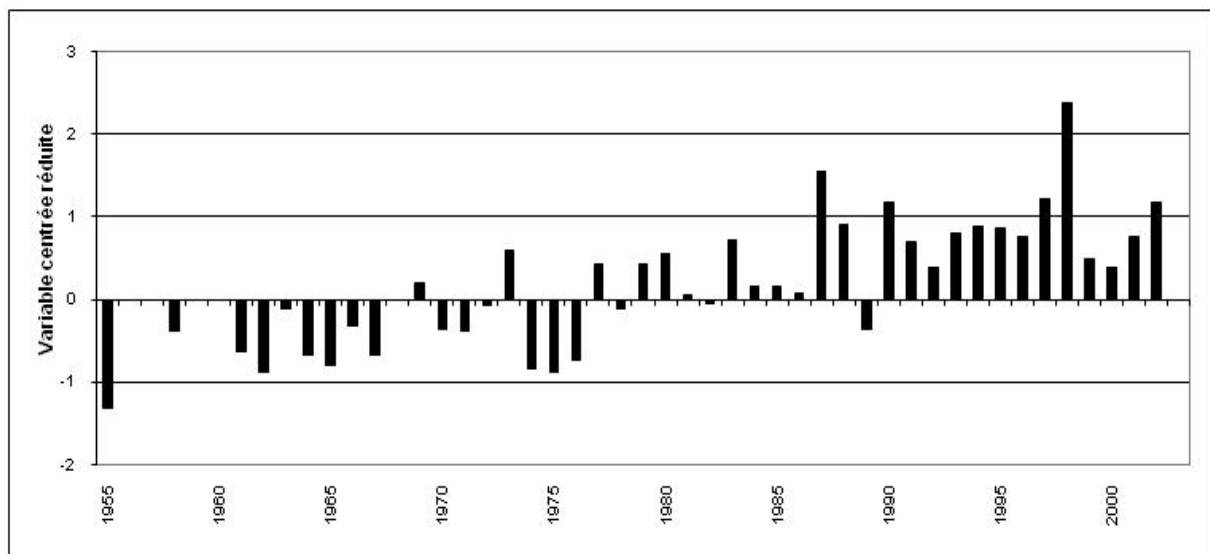
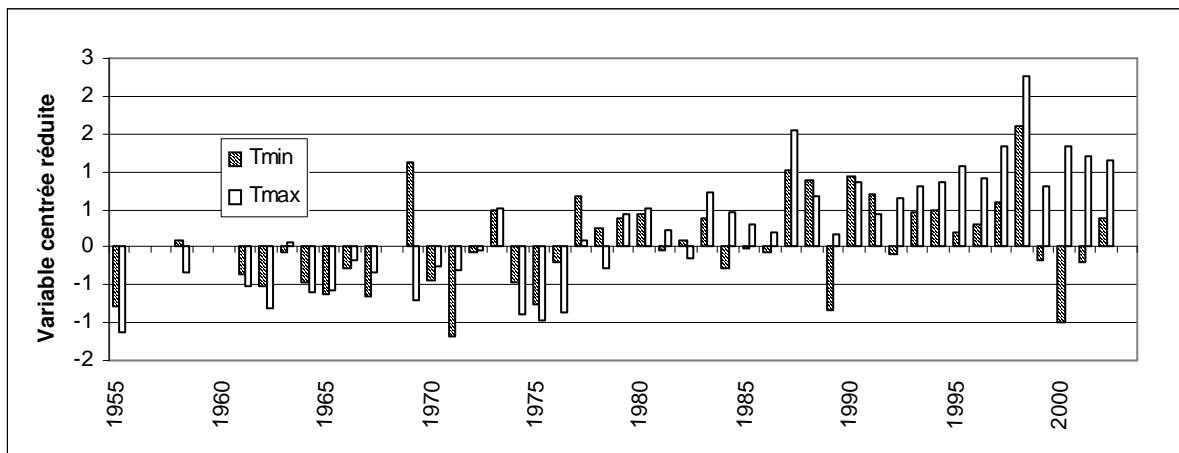


Figure 3.4 : Variation des Températures Moyennes annuelles au Cameroun par rapport à la Normale 1961-1990

Comme on peut le constater sur la figure 3.4, l'évolution de la température moyenne au Cameroun est conforme à la situation sur le plan mondial, telle que décrite au premier chapitre. En effet, la température moyenne sur l'ensemble du pays est globalement située au dessus de la normale calculée sur la période 1961-1990, depuis le milieu des années 1970. Le record des hausses annuelles de la température au Cameroun est également détenu par l'année

1998, avec une moyenne de  $+1,1^{\circ}\text{C}$  supérieure au record mondial établi à  $+0,55^{\circ}\text{C}$  la même année (IPCC, 2001 ; Zwiers F. et al., 2003 ; Lawrimore J., 2003)

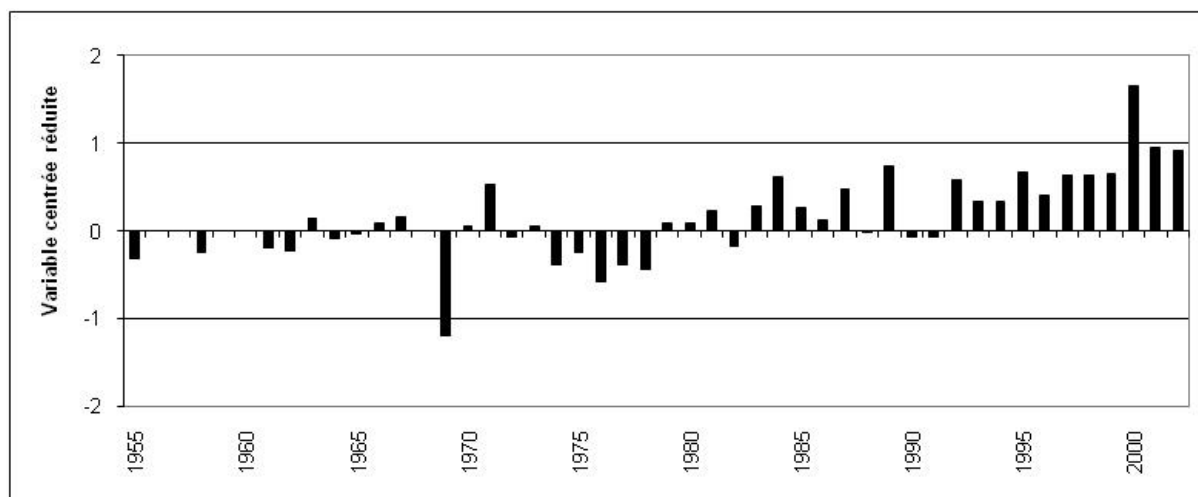
L'application de la même technique d'analyse aux températures minimales et maximales moyennes annuelles donne les résultats de la figure 3.5.



**Figure 3.5 : Variation des températures minimales et maximales moyennes annuelles au Cameroun par rapport à la normale 1961-1990**

Comme on peut l'observer sur la figure 3.5, les variations des températures minimales et maximales moyennes vont globalement dans le même sens, mais dans l'ensemble la hausse des températures maximales est supérieure à celle des températures minimales. Dans les deux cas, le record des hausses est toujours détenu par l'année 1998, avec sur l'ensemble des 15 stations étudiées, une augmentation moyenne de  $1,4^{\circ}\text{C}$  pour les températures maximales moyennes contre  $0,8^{\circ}\text{C}$  pour les minimales.

La figure 3.6 montre le résultat de l'application de la même méthode d'analyse aux amplitudes thermiques annuelles moyennes. Les résultats sont comparables à ceux des variables précédentes, mais le record de la hausse de l'amplitude thermique est détenu plutôt par l'année 2000 avec une augmentation moyenne de  $1,4^{\circ}\text{C}$  pour l'ensemble des stations étudiées.



**Figure 3.6 : Variation de l'amplitude thermique annuelle moyenne au Cameroun par rapport à la normale 1961-1990**

Le tableau 3.4 résume la situation de l'évolution des différentes caractéristiques de la température sur l'ensemble du territoire camerounais, tel qu'il ressort de l'analyse des données disponibles enregistrées au niveau des 15 stations étudiées. On note qu'à l'instar de la planète entière, le territoire camerounais subit un réchauffement depuis les années 70, avec une accélération du phénomène à partir de la décennie 90.

**Tableau 3.4 : Variation des caractéristiques moyennes annuelles de la température au Cameroun**

Variable	Hausse maximale entre 1970 et 2002 (°C)	Hausse moyenne sur la période 1970 - 2002 (°C)	Hausse moyenne sur la période 1990 - 2002 (°C)
$T_{mov}$	1,1	0,2	0,4
$T_{min}$	0,8	0,1	0,1
$T_{max}$	1,4	0,3	0,7
$A.Th_{mov}$	1,4	0,2	0,6

### **Variabilité de la température suivant les régions du pays**

Contrairement aux précipitations qui montrent souvent de grandes différences d'un emplacement à un autre dans une même région, les données de température sont relativement plus homogènes. Dans ces conditions et en dépit des contrastes d'altitude et des origines distinctes des masses d'air en compétition sur son territoire qui créent une diversité de climat et des températures peu commune au Cameroun, la bonne répartition des postes étudiés sur le pays nous permet d'établir une évaluation de la situation à l'échelle régionale.

En effet, bien que les résultats des analyses ci-dessus aient montré que l'ensemble du territoire camerounais subit un réchauffement, cela ne signifie pas que toutes les régions du pays ont été affectées avec la même intensité. Les données du tableau 3.5 montrent que les régions montagneuses de l'Ouest et de l'Adamaoua ont enregistré les plus fortes augmentations pour les températures moyennes et maximales annuelles, contre une faible augmentation des températures minimales moyennes annuelles. Il s'en suit que la hausse des amplitudes thermiques est plus importante dans cette région.

Par contre, dans la région au Nord de l'Adamaoua, les plus fortes hausses sont enregistrées au niveau des températures minimales, d'où une baisse des amplitudes thermiques annuelles moyennes. La région côtière et celles du centre, du Sud et de l'Est ont un comportement assez voisin, avec une petite différence au niveau des températures maximales qui montrent une hausse légèrement plus importante sur le littoral. L'ensemble de la situation est illustré par la figure 3.7 qui présente les indices de variation des caractéristiques moyennes annuelles de la température suivant les différentes régions du Cameroun.

**Tableau 3.5 : Variation moyenne des caractéristiques moyennes annuelles de la température suivant différentes régions du Cameroun**

Variable	Hausse maximale entre 1970 et 2002 (°C)	Hausse moyenne sur la période 1970 - 2002 (°C)	Hausse moyenne sur la période 1990 - 2002 (°C)
<b>Région côtière</b>			
<b>T<sub>mov</sub></b>	1,3	0,2	0,4
<b>T<sub>min</sub></b>	0,9	0	0,1
<b>T<sub>max</sub></b>	1,6	0,3	0,7
<b>A.Th<sub>mov</sub></b>	1,7	0,3	0,6
<b>Région montagneuse de l'Ouest et de l'Adamaoua</b>			
<b>T<sub>mov</sub></b>	1,4	0,3	0,6
<b>T<sub>min</sub></b>	0,7	0	0
<b>T<sub>max</sub></b>	2,1	0,5	1,2
<b>A.Th<sub>mov</sub></b>	2,6	0,5	1,1
<b>Région du Centre, du Sud et de l'Est</b>			
<b>T<sub>mov</sub></b>	1	0,2	0,4
<b>T<sub>min</sub></b>	0,6	0,1	0,2
<b>T<sub>max</sub></b>	1,3	0,3	0,6
<b>A.Th<sub>mov</sub></b>	1,1	0	0,1
<b>Région au nord de l'Adamaoua</b>			
<b>T<sub>mov</sub></b>	1	0,1	0,3
<b>T<sub>min</sub></b>	1,2	0,3	0,5
<b>T<sub>max</sub></b>	1	0	0,1
<b>A.Th<sub>mov</sub></b>	Baisse de 0,8	Baisse de 0,2	Baisse de 0,4

Les cartes de la figure 3.8 présentent l'évolution des caractéristiques moyennes annuelles de la température au Cameroun, entre la période récente (1991-2002) et la période de référence 1961-1990. Elles codent en couleur la variation relative entre la normale 1961-1990 des différents paramètres et les moyennes de la période 1991-2002 sur l'ensemble du pays. Les résultats confirment que ces variables n'ont pas toutes évolué dans la même direction sur l'ensemble du pays au courant de la décennie 90. Si la tendance générale est la hausse des températures moyennes annuelles (+ 0,2 °C en moyenne) sur l'ensemble du territoire, les températures minimales quotidiennes ont plutôt baissé dans la région montagneuse de l'Ouest et le Sud-est du pays, contre une hausse des températures maximales sur la quasi-totalité du territoire.



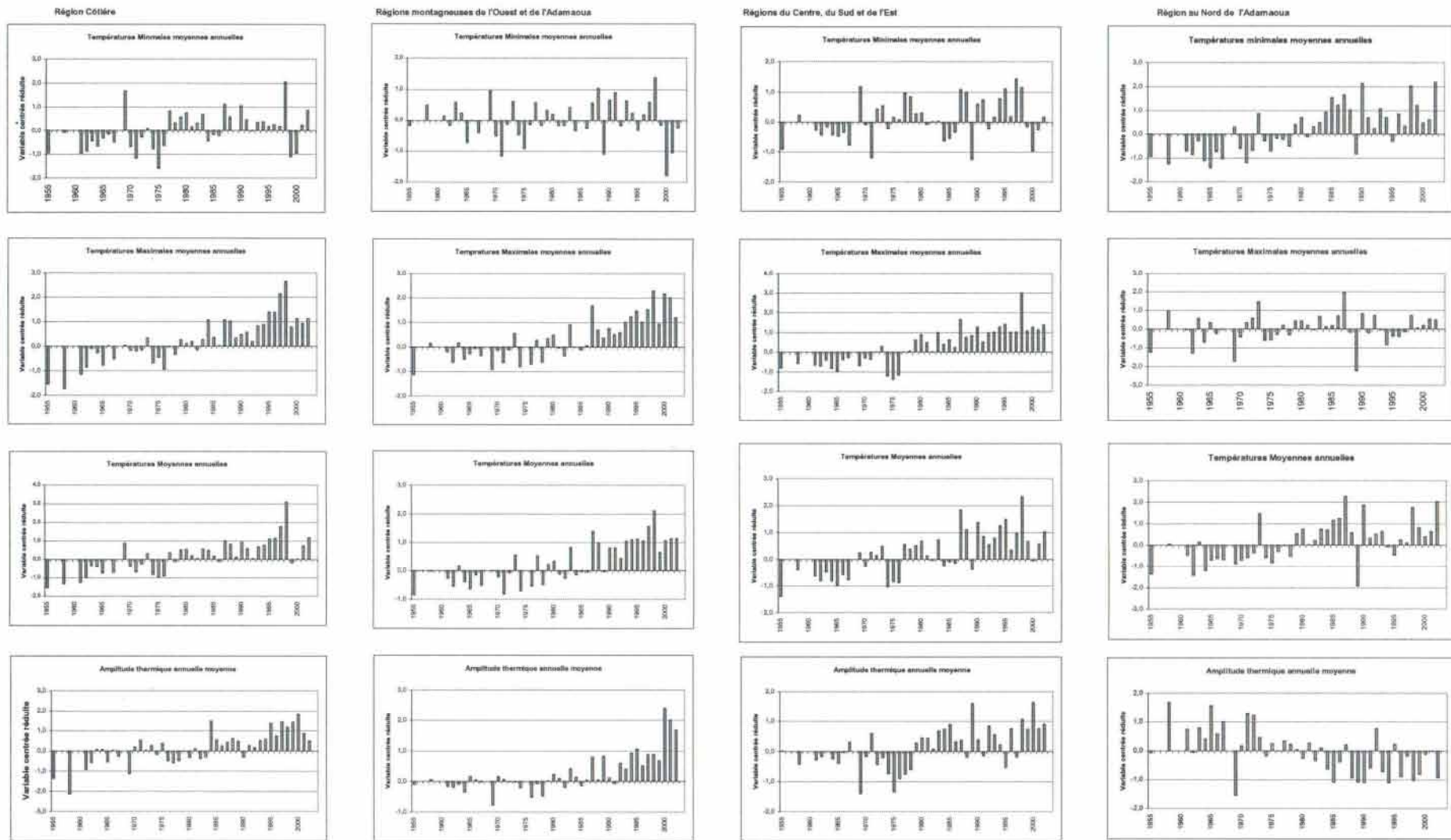
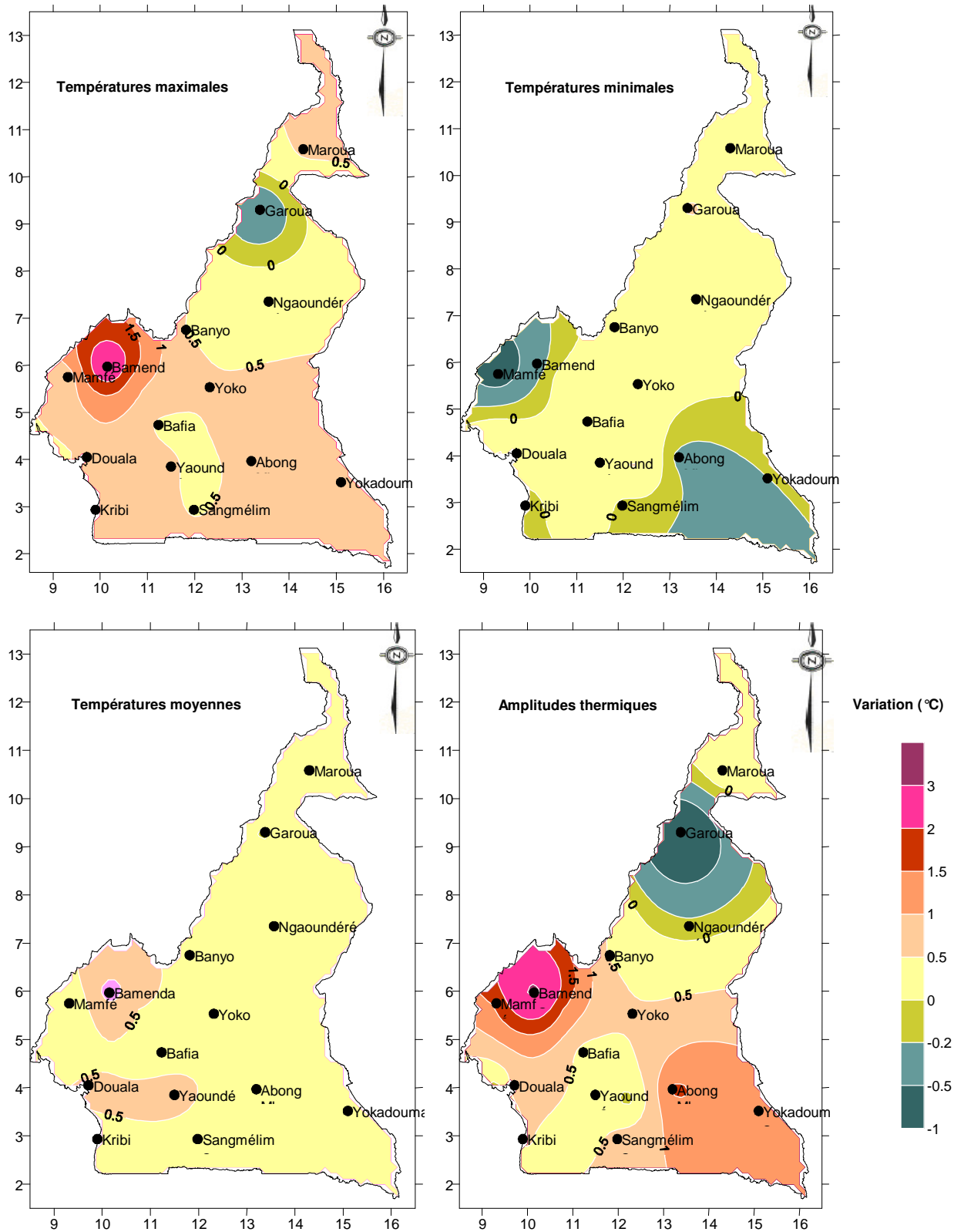


Figure 3.7 : Variation moyenne des caractéristiques moyennes annuelles de la température suivant les régions du Cameroun



*Echelle 1 : 13.800.000*

**Figure 3.8 :** Variation relative (codée en couleur) entre la normale 1961-1990 des caractéristiques moyennes annuelles de la température et les moyennes de la période 1991-2002 au Cameroun

## **Conclusion**

L'analyse des données disponibles de température montre une hausse moyenne sur la période 1970-2002, de l'ordre de 0,2°C des températures moyennes journalières sur l'ensemble du territoire camerounais contre 0,4°C pour la période 1990-2002. L'année 1998 détient le record des années les plus chaudes au Cameroun, avec une moyenne de +1,1°C, soit une valeur supérieure au record mondial établi à +0,55°C la même année. Bien que cette tendance au réchauffement soit générale sur l'ensemble du pays, l'intensité est variable suivant les régions. Les plus fortes augmentations sont enregistrées dans les régions montagneuses, notamment pour les températures maximales moyennes annuelles, alors que les plus faibles sont enregistrées dans la région au Nord de l'Adamaoua où on enregistre par ailleurs une hausse plus forte des températures minimales moyennes annuelles.

Bien que ces résultats soient tirés d'un nombre limité de stations d'observation, ils sont conformes à ce qui est observé à présent sur le plan mondial. Selon IPCC (2001), le réchauffement général de la planète est causé en grande partie par les gaz à effet de serre. Les émissions actuelles de ces gaz en provenance des pays en développement en général et du Cameroun en particulier sont négligeables, la source dominante dans ces pays étant la déforestation (Banque Mondiale, Rap. N° 120, juillet 1999). Il faudrait cependant souligner que les effets de ces gaz sur le climat sont transfrontaliers, de même que les relations des causes à effets sont complexes.

L'intensité et la durée des fortes températures ont de lourdes répercussions sur la disponibilité et la gestion des ressources en eau en milieu tropical, notamment par le biais de l'évaporation. D'autre part, dans le domaine agricole dont dépend une part très élevée de l'économie du Cameroun, des changements de température même minimes peuvent avoir des effets importants sur la production. Selon une étude de Postal citée par Sharma (2003), un accroissement de la température de 3°C conduit à une augmentation de l'ordre de 26% des besoins en eau d'irrigation par exemple, en raison de l'accroissement de l'évapotranspiration. Ces changements peuvent également conduire à une augmentation des cas de temps extrêmes avec des sécheresses sévères et des saisons de pluies chaotiques avec de fortes pluies (IPCC 2001), dont les conséquences sont également importantes sur la production agricole. En raison de l'importance de ces paramètres sur le plan agroclimatologique, ces analyses devraient cependant être plus rigoureusement documentées avant de permettre de donner des précisions pour les différentes régions du territoire camerounais.

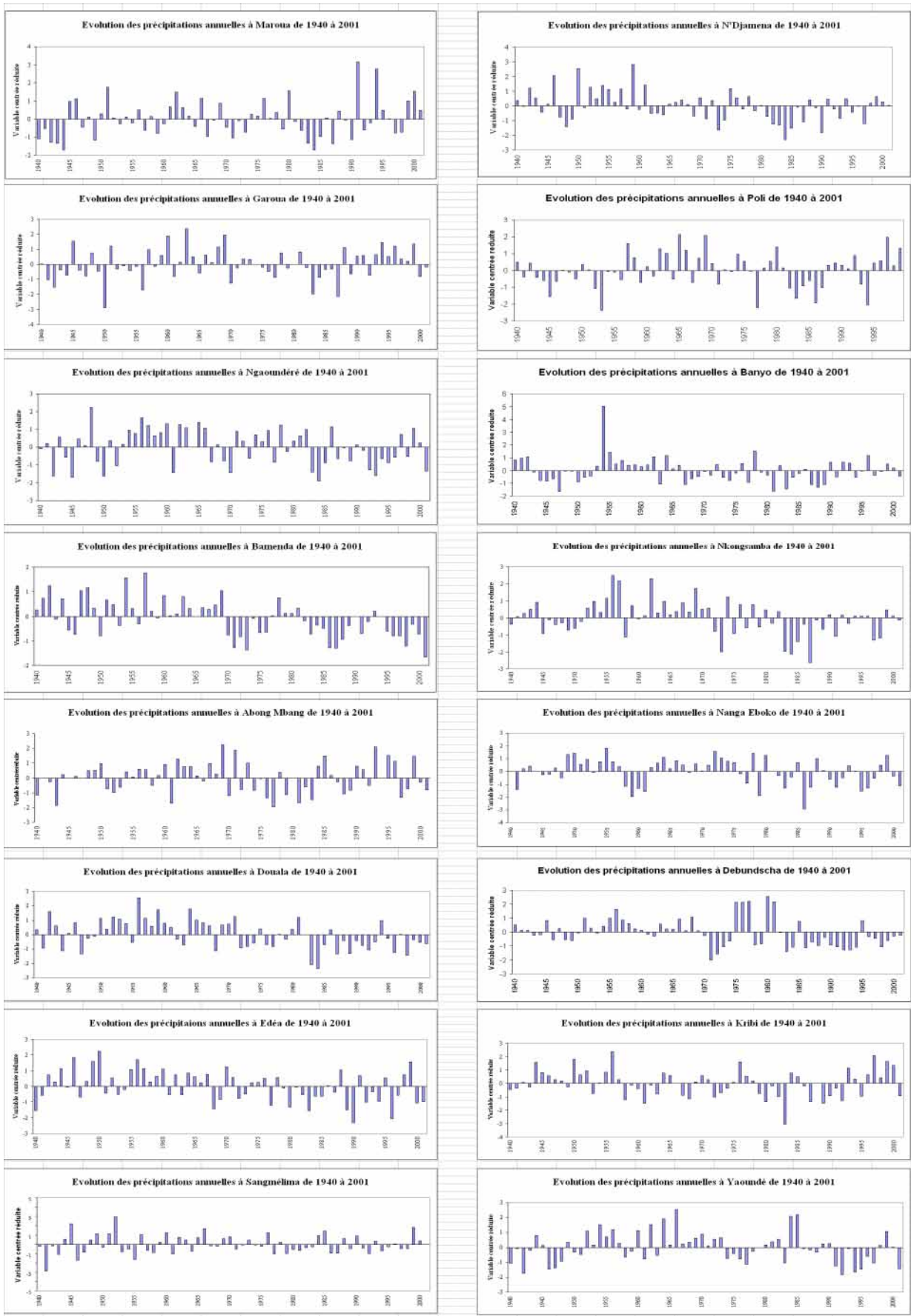
### **3.3.2.2 – VARIABILITE DES PRECIPITATIONS**

Les variables étudiées sont la hauteur de pluie enregistrée au niveau des différentes stations au courant d'une année civile, les pluies saisonnières et mensuelles ainsi que le nombre annuel de jours de pluie.

#### **3.3.2.2.1 – VARIABILITE DES PLUIES ANNUELLES**

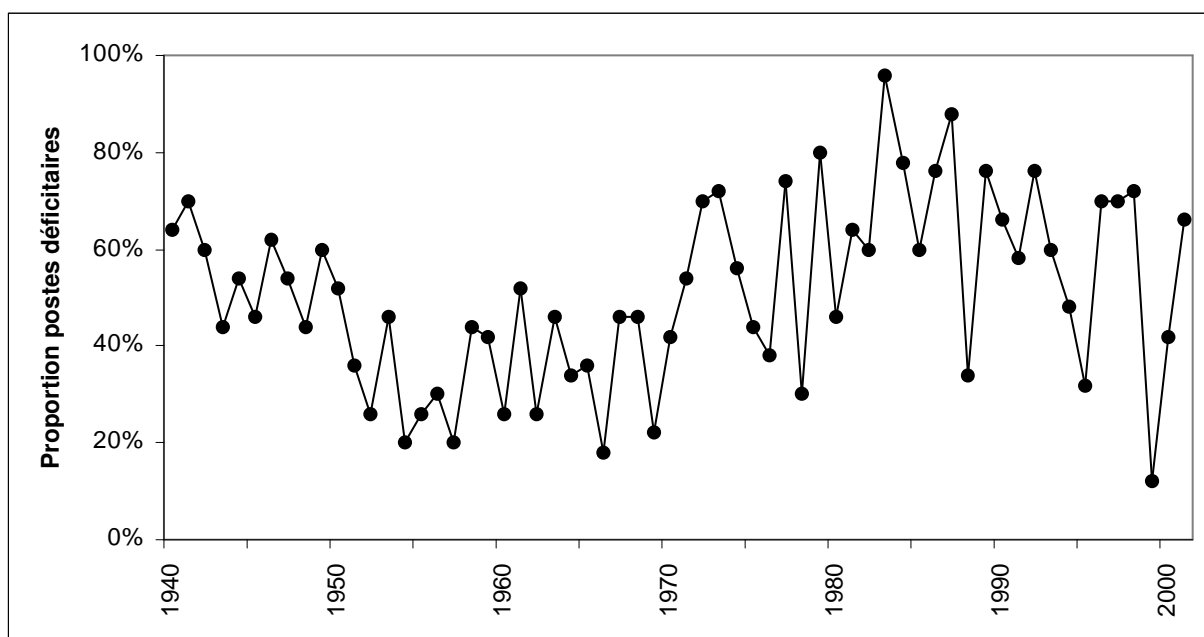
Plusieurs types d'analyses sont appliqués : les tests de détection de rupture et l'analyse des indices pluviométriques interannuels (variable centrée réduite) et décennaires.

Les graphiques de la figure 3.9 présentent l'évolution des indices de la pluviosité annuelle par rapport à la moyenne interannuelle de la période 1940-2000 au niveau de quelques postes d'observations représentatifs des 8 zones climatiques du Cameroun. Si toutes les régions n'ont pas été affectées avec la même intensité, ces graphiques montrent qu'elles ont été toutes touchées par la sécheresse récente. Quelques années humides sont enregistrées au niveau de certaines stations dans le courant de la décennie 1990, sans que cela intéresse l'ensemble du territoire.



**Figure 3.9 :** Evolution des indices de la pluviosité annuelle par rapport à la moyenne interannuelle de la période 1940-2000 au niveau de quelques stations de référence au Cameroun

La figure 3.10 montre l'évolution de la proportion des stations déficitaires sur l'ensemble du territoire pour la période allant de 1940 à 2001. Au début de la décennie 1940, le pourcentage des postes déficitaires est de l'ordre de 60%. On observe par la suite une baisse qui va jusqu'au début des années 1960, puis le nombre oscille autour de 40% jusqu'à la fin des années 1960. Une remontée s'amorce alors pour atteindre rapidement 70% en 1973. Jusqu'en 2001, le chiffre oscille autour de cette valeur, mais on notera qu'un maximum (96%) est atteint en 1983 et un minimum (12%) en 1999.

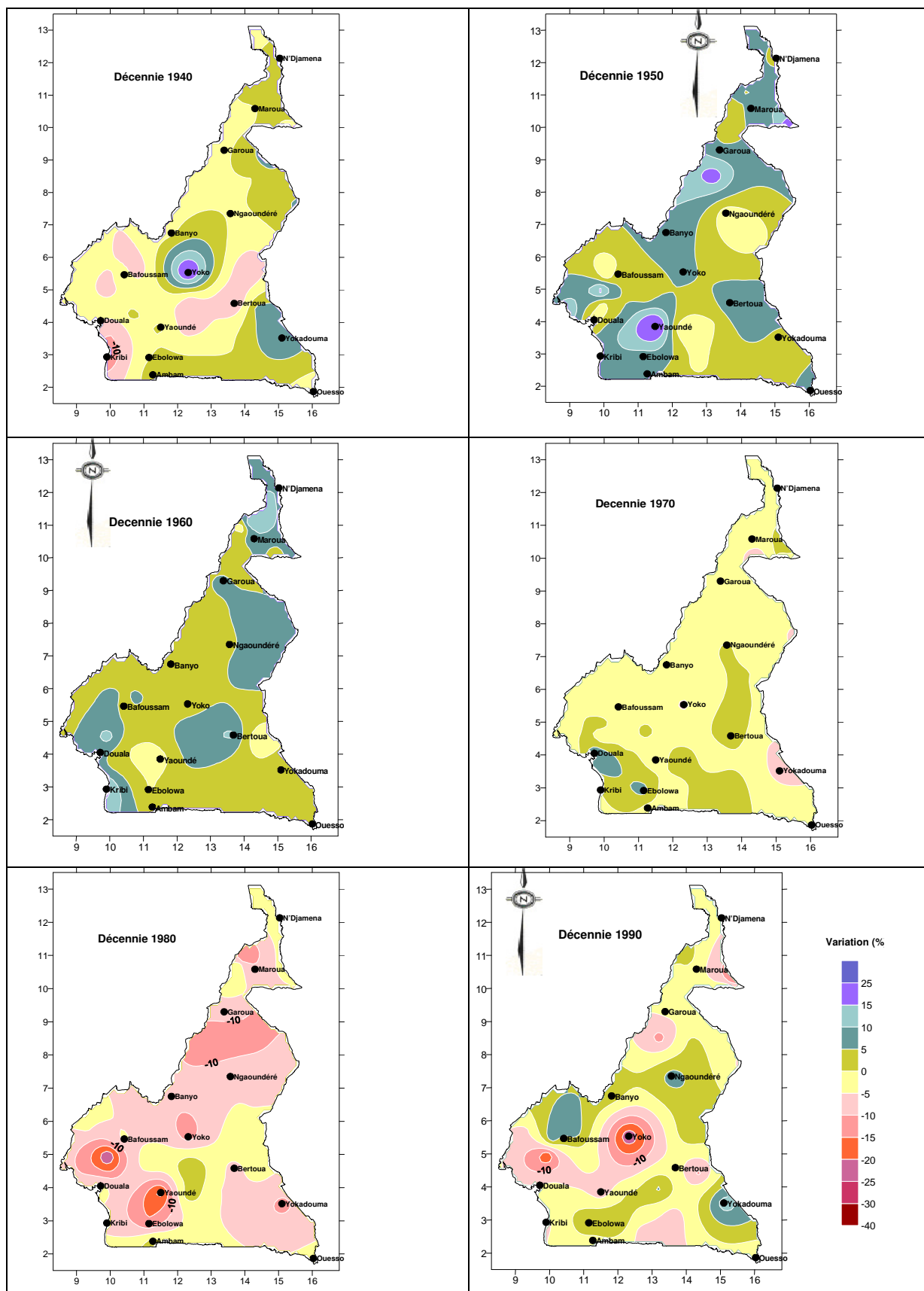


**Figure 3. 10 : Evolution de la proportion des postes d'observation pluviométriques déficitaires par rapport à la moyenne de la période 1941-2000**

Cette évolution de la situation au Cameroun est conforme à ce qui a été observé dans la plupart des travaux sur le régime des précipitations de la sous-région de l'Afrique intertropicale (Olivry, 1974 ; Sircoulon, 1976 ; Paturel et al., 1996 ; Servat et al, 1999). Après deux décennies de précipitations excédentaires en 1950 et 1960, une période déficitaire s'est installée dès la fin des années 1960 et continue jusqu'au début des années 2000. Au cours de cette période qui dure depuis trente ans, chaque décennie est cependant marquée par quelques années moyennes à humides. En effet, les années 1978, 1988, 1995 et 1999 se sont distinguées avec seulement 30% de postes déficitaires ou moins. On notera également que la décennie 90 est caractérisée par la présence d'un plus grand nombre d'années excédentaires, mais la tendance globale reste à la baisse.

Le calcul des indices pluviométriques par décennie confirme cette généralisation de la pluviosité déficitaire sur l'ensemble du territoire camerounais. Les cartes de la figure 3.11 illustrent bien la situation. Les variations relatives entre la pluie moyenne interannuelle de la période 1940-2000 et les pluies moyennes interannuelles par décennie y sont codées en couleur. Ces cartes, ainsi que les suivantes, ont été établies par la méthode de spatialisation de l'information par krigeage du logiciel Surfer. La méthode, qui suppose la continuité des précipitations dans l'espace, utilise un ensemble de procédures qui permettent d'estimer les précipitations en tout point du territoire, à partir de l'information pluviométrique disponible, dans le but d'obtenir une image d'ensemble des précipitations sur le pays.

Les résultats montrent une décennie 1940 déficitaire, suivie par deux décennies (50 et 60) globalement excédentaires qui sont elles-mêmes suivies par trois décennies déficitaires successives. La décennie 1980 est la plus affectée, aussi bien du point de vue de l'intensité du déficit que de son étendue sur le territoire. On peut alors s'interroger sur la stationnarité des séries chronologiques de mesures des précipitations dans le pays.



Echelle 1 :19.000.000

Figure : 3.11 : Variation relative (codée en couleur) entre la pluie moyenne interannuelle de la période 1940-2000 et les pluies moyennes interannuelles par décennie



### 3.3.2.2.1.1 – Homogénéité des séries et calcul des déficits

La non-stationnarité des séries chronologiques de mesures se traduit par une segmentation en séquences statistiquement différentes. Le logiciel ChronoStat a été utilisé pour l'ensemble des séries de l'étude. Les résultats du test de Pettit montrent que 28 postes pluviométriques sur les 63 analysés présentent une rupture au seuil de confiance de 90%. La carte de la figure 3.12 situe l'ensemble des postes concernés.

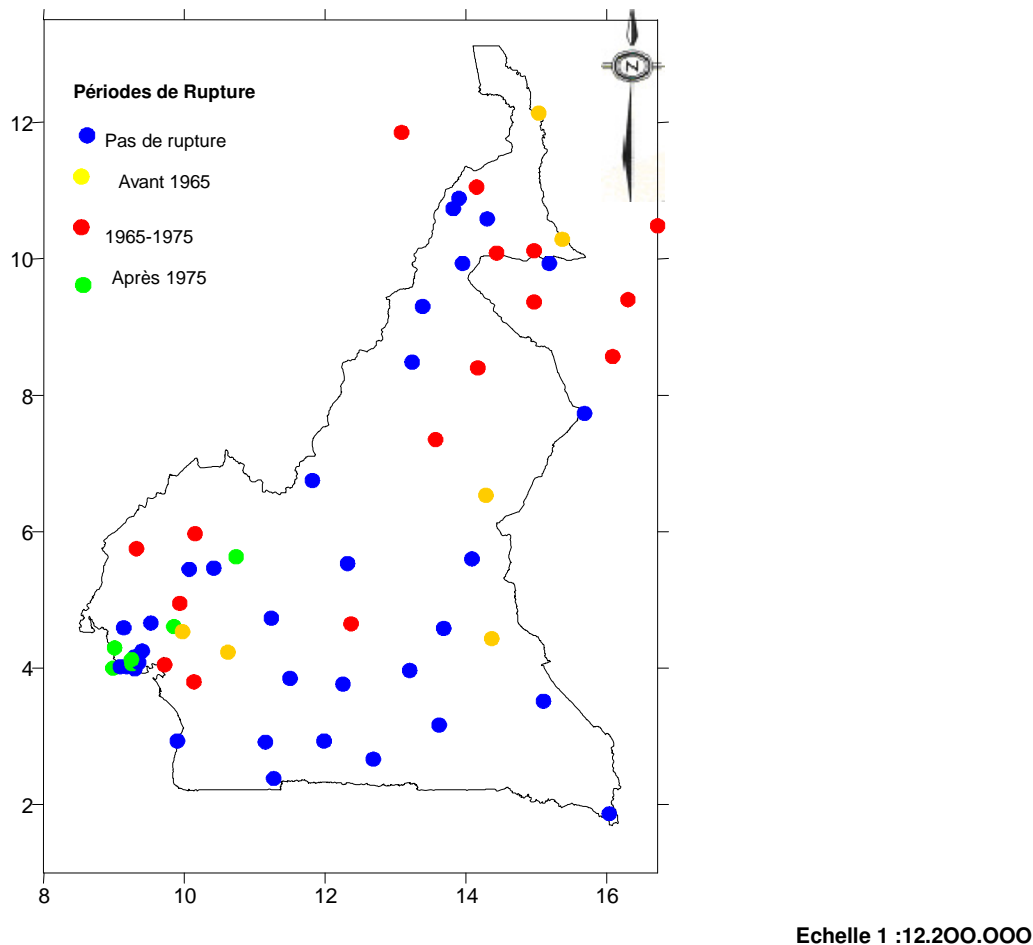


Figure 3.12 : Période de rupture des séries de hauteur de précipitations annuelles

Comme on peut le constater sur la figure 3.12, les postes où aucune rupture n'est enregistrée sont éparpillés sur l'ensemble du territoire. On peut cependant souligner qu'aucun poste de la région forestière sud du pays (zone 1 et 2 suivant la répartition présentée au chapitre précédent) ne présente de rupture. Sur le plan temporel, 16 séries sur 28 présentent une rupture entre 1965 et 1975 et les 12 restants se partagent à part égale (6) les périodes d'avant 1965 et après 1975. On notera que les postes ayant enregistré une rupture après 1975 sont tous situés dans la région autour du Mont Cameroun. Ces ruptures se situent toutes autour de

l'année 1983 qui est reconnue comme l'une des plus sèches du Cameroun et de toute la sous-région de l'Afrique tropicale. Le tableau 3.6 regroupe l'ensemble des postes présentant une rupture en précisant le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture. Le taux de variation de la moyenne avant et après la rupture est calculé suivant la formule :

$$\text{Déficit} = (\text{moyenne après rupture} - \text{moyenne avant rupture}) / \text{moyenne avant rupture}$$

**Tableau 3.6 : Variation moyenne observée par rapport à la période de rupture sur le cumul des pluies annuelles aux différentes stations**

Nom Station	Période Observation	Pluie annuelle (mm)	Date de rupture	Variation de la moyenne (%)
Bamenda	1923-2001	2428	1969	-13
Batouri	1939-1994	1523	1958	-13
Debundscha	1927-2002	9841	1983	-21
Douala	1922-2000	3935	1971	-11
Doukoula	1953-1994	816	1970	-14
Edéa	1939-2001	2505	1967	-11
Idenau	1965-2001	7930	1983	-26
Kaélé	1944-1994	817	1965	-11
Koundja	1950-2001	1965	1982	-11
Mamfe	1926-1987	3309	1969	-13
Meiganga	1934-1994	1569	1947	+16
Moliwe N. C. /Bota	1966-2002	2962	1983	-34
Mora	1934-1994	707	1965	-19
Nanga Eboko	1933-2001	1499	1975	-12
Ngambe	1938-1989	2742	1962	-7
Ngaoundéré	1927-2001	1533	1966	-8
Nkongsamba	1930-2001	2639	1971	-12
Tcholliré	1951-1994	1300	1972	-16
Tole Factory / Tea	1965-2002	2556	1980	-18
Tombel Garage	1965-2000	3134	1983	-21
Yabassi	1926-1980	2679	1950	+14
N'Djamena	1931-2000	575	1961	-20
Bongor	1935-1994	838	1961	-16
Laï	1946-1994	993	1970	-11
Moundou	1933-1994	1129	1970	-16
Bouso	1943-1994	839	1968	-18
Pala	1946-1994	1004	1966	-9
Maiduguri	1915-1994	618	1970	-21

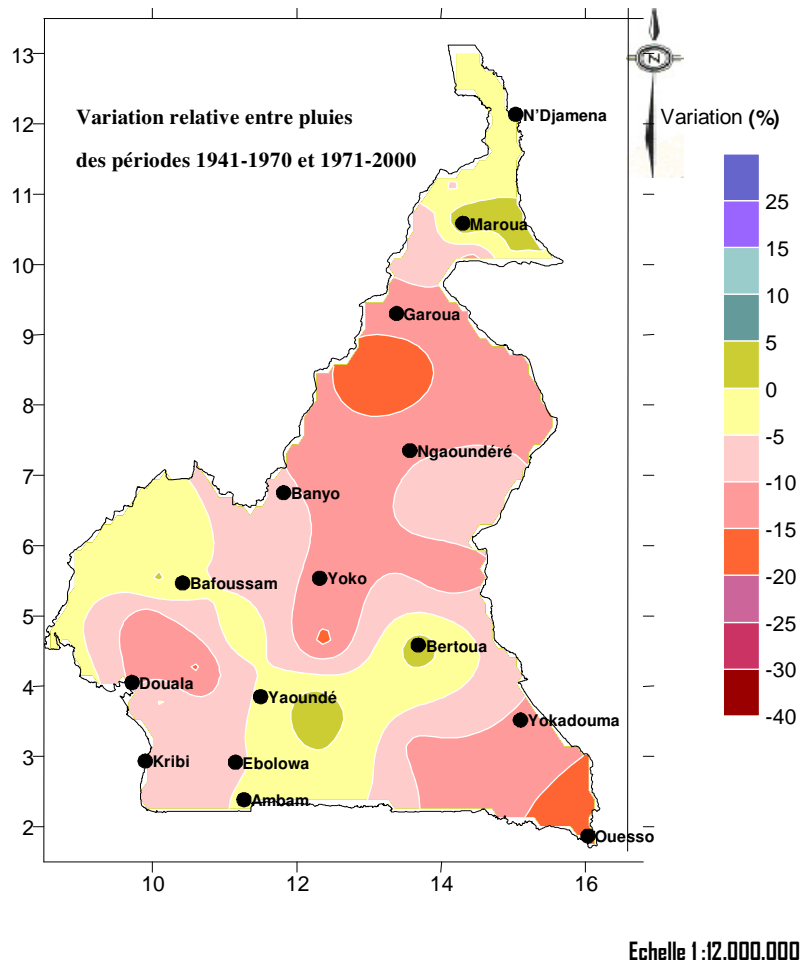
Noter que 2 des 28 postes sont caractérisés par un accroissement des précipitations après la rupture alors que les 26 autres présentent des déficits qui varient entre 7 et 34%, pour une moyenne de l'ordre de 15%. La période de rupture pour les postes qui présentent un accroissement des précipitations (Meiganga et Yabassi) se situe au début des années 50. Ceci est conforme aux observations antérieures qui présentent la décennie 50 comme une période humide.

Si l'on considère les postes déficitaires suivant les zones climatiques décrites au chapitre précédent, les déficits se regroupent grosso modo comme suit :

- zone 3, un déficit de l'ordre de 20%,
- zones 4 et 5, un déficit de l'ordre de 12%,
- zones 6 à 10, un déficit qui varie entre 10 et 20 %.

Comme on peut le constater sur la figure 3.12, la répartition des postes pluviométriques étudiés par zone climatique est très inégale. On peut cependant souligner que plus de 60% des postes situés dans les régions climatiques aux précipitations relativement faibles (zones 6 à 8) présentent une rupture. Noter par ailleurs que dans ces régions les postes épargnés sont généralement situés dans des régions sous influence montagneuse (Monts Mandara et Alantika), marquées par des précipitations généralement plus fortes que sur les autres postes environnants. Dans le sud du pays, on note également une forte concentration de postes présentant des ruptures dans la région du Mont Cameroun et la région montagneuse de l'Ouest (zones 3 et 5) caractérisées par de fortes précipitations. Ces deux remarques sont conformes à ce qui a été enregistré en Afrique de l'Ouest où il a été observé des modifications plus importantes dans les zones à régime de précipitations extrêmes (les plus arrosées et les plus arides), (Servat et al., 1999 ; Ouedraogo, 2001). Suchel (1987) explique la forte variabilité interannuelle des précipitations dans la région du Mont Cameroun par l'influence perturbatrice du massif, des changements de cap se produisant dans les vents du quadrant ouest qui fournissent la plus grosse part des précipitations. Les moindres fluctuations dans la direction de ces derniers durant la saison de mousson modifient dans de proportions considérables la répartition des pluies sur les flancs et les bordures du mont Cameroun.

Il ressort de toutes les analyses précédentes que la période 1971-2000 est globalement déficitaire par rapport à la moyenne interannuelle 1941-2000. Pour se faire une idée de la situation sur l'ensemble du territoire camerounais, nous avons calculé la variation moyenne des précipitations de part et d'autre de cette date, pour l'ensemble des 50 postes d'observations de la période homogénéisée (1941-2000). La figure 3.13 présente les résultats sur l'ensemble du pays.



**Figure 3.13 : Variation relative (codée en couleur) des précipitations moyennes annuelles de la période 1971-2000 par rapport à celles de la période 1941-1970.**

La figure 3.13 confirme que la période 1971-2000 a été déficitaire sur l'ensemble du territoire camerounais. Près de la moitié du pays est touchée par des déficits supérieurs à 10% contre plus de 3/4 pour un déficit supérieur à 5%. Les déficits les plus importants (10 à 20%) ont été enregistrés au niveau de quelques postes répartis dans l'ensemble du pays. Quelques rares poches situées essentiellement dans le sud du pays enregistrent cependant des précipitations légèrement au-dessus (jusqu'à + 5%) de la moyenne.

#### 3.3.2.2.1.2 - Evolution du cumul des pluies annuelles au Cameroun au cours du XX<sup>ème</sup> siècle

Un certain nombre de postes d'observations pluviométriques a été installé au Cameroun depuis l'époque de la colonisation allemande au début du XX<sup>ème</sup> siècle, mais les observations sont interrompues dès le début des années 1910 pour ne reprendre que dans le courant de la décennie 1930. Les observations de la ville de Douala ont cependant débuté depuis la fin des

années 1880 et ont continué jusqu'à nos jours avec une interruption de 10 ans entre 1913 et 1922. Celle de Bamenda a fonctionné de 1906 à nos jours avec une interruption entre 1913 et 1923. Leurs données permettront de se faire une idée sur l'évolution des régimes de précipitations dans le pays au cours de siècle dernier. Les données des stations d'autres pays (Dakar au Sénégal, Maïduguri au Nigeria et N'Djamena au Tchad) y seront associées à titre de comparaison.

Les analyses portent sur la variable centrée réduite (rapport de l'écart à la moyenne sur l'écart type) calculée sur le cumul par décennie pour chacun des 5 stations. La figure 3.14 qui montre l'évolution des indices permet d'apprécier les variations de la hauteur des précipitations annuelles au niveau des différents postes. La période 1901-1970 est globalement moyenne à humide alors que la période 1971-2000 est déficitaire pour l'ensemble des 5 stations. La période sèche des années 1913 connue dans la région n'est pas bien représentée en raison des lacunes d'observation au niveau des deux postes du Cameroun. On peut cependant souligner que par rapport aux deux autres observées dans la région (1913 et 1940), la sécheresse récente est marquée par une plus longue durée et des déficits plus importants.

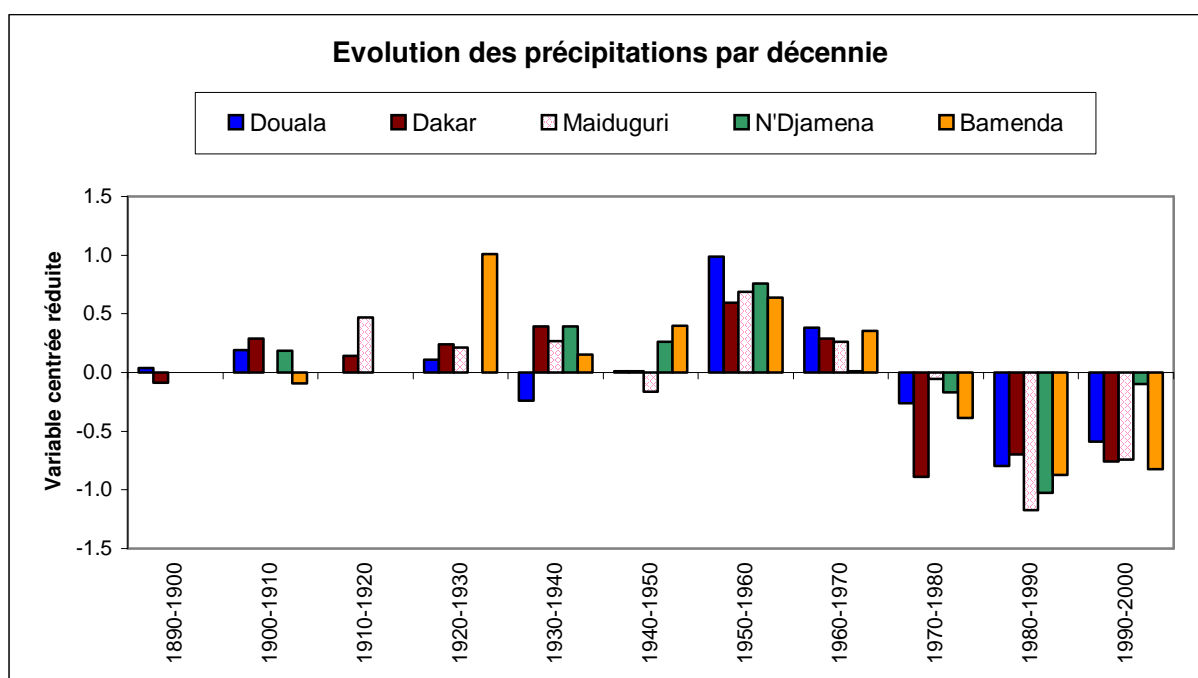


Figure 3.14 : Evolution des indices pluviométriques par décennies depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle au niveau de quelques stations pluviométriques du Cameroun et de l'Afrique tropicale.

## **Conclusion**

L'analyse des données de précipitations annuelles de la soixantaine de postes d'observation que nous avons pu rassembler dans le cadre de cette étude montre que l'ensemble du territoire camerounais a été marqué par une baisse des précipitations. La non-homogénéité des séries est attestée par l'application du test de Pettit pour 28 postes répartis du nord au sud, les dates de rupture se situant entre 1965 et 1975 pour près de 60% d'entre eux. Le calcul des indices pluviométriques montre qu'après la décennie 1940, les décennies 1970 à 1990 sont toutes déficitaires alors que les décennies 1950 et 1960 sont plus arrosées. La décennie 1980 est la plus affectée par la baisse des précipitations. Si la décennie 1990 est également déficitaire, elle est marquée par quelques années humides mais aucune réelle reprise du régime des précipitations n'est enregistrée et la sécheresse persiste jusqu'au début des années 2000. Comparativement à la période 1941-1970, la période 1971-2000 est globalement déficitaire sur l'ensemble du pays. Le déficit moyen est variable suivant les régions du pays : -20% autour de la région très pluvieuse du Mont Cameroun, -12% dans la région montagneuse de l'Ouest et le centre (axe Bertoua-Banyo), -6 à -10% pour la partie du pays au Nord de l'Adamaoua. Ces valeurs sont relativement faibles par rapport aux résultats enregistrés dans d'autres pays de l'Afrique tropicale, notamment en Afrique de l'Ouest où la moyenne des déficits pluviométriques tourne autour de 20%. Cette différence tient probablement à la présence de la zone forestière dans le Sud du pays où le régime des précipitations a très peu varié.

### **3.3.2.2.2 – VARIABILITE DES PLUIES MENSUELLES ET SAISONNIERES**

La sécheresse récente se caractérise en Afrique tropicale aussi bien par la baisse des quantités précipitées à différentes échelles que par la répartition temporelle des précipitations. Aussi, afin de mieux caractériser les effets de la récession pluviométrique sur le milieu naturel et les activités socio-économiques au Cameroun, nous allons procéder à l'analyse des précipitations mensuelles et saisonnières.

Le diagnostic de la variabilité pluviométrique à l'échelle mensuelle a appliqué les mêmes méthodes décrites précédemment. Les analyses des résultats obtenus se feront suivant un regroupement en mois :

- décembre – février : période la plus sèche sur l'ensemble de territoire. Elle correspond à la grande saison sèche dans la partie sud du pays (zones climatiques 1 à 6).
- mars – juin : correspond à la petite saison de pluies dans les régions à régime équatorial (zone 1 essentiellement)
- juillet – août : petite saison sèche dans les régions à régime équatorial (zone 1 essentiellement). A l'inverse, dans le Nord du pays (zones 7 et 8), ces deux mois cumulent à eux seuls près de 60% du total de la pluie annuelle. Ils sont également les plus pluvieux dans l'Adamaoua, le littoral et la région du Mont Cameroun.
- Septembre – novembre : grande saison des pluies dans les régions à régime équatorial (zone 1 essentiellement)

### **Période décembre - février**

Les précipitations enregistrées au cours de cette période de l'année représentent entre 0 et 2 % du total annuel. Elles sont par conséquent insignifiantes sur le plan quantitatif.

Les stations étudiées sont toutes situées au sud du 8<sup>ème</sup> parallèle nord, étant donné que les précipitations sont quasi nulles dans la partie Nord du pays pendant cette période. Sur la quarantaine des stations étudiées, le test de Pettit révèle des ruptures au mois de décembre pour 40% d'entre elles, 28% en janvier et 60% en février. Les périodes de rupture sont diversement distribuées pour chacun des 3 mois. Pour le mois de décembre, les dates de rupture sont situées entre 1965 et 1975 pour 12 stations sur 16, alors que celles de 7 stations sur 11 se situent avant 1965 pour le mois de janvier. En février par contre, les dates de rupture de 17 stations sur 24 se situent plutôt après 1975, et plus généralement après 1980. Dans l'ensemble, les déficits enregistrés après ruptures sont situés entre -40 et -80%. Si cette situation constitue une constante qu'il est important de souligner, la forte proportion n'est cependant pas significative compte tenu de la faible quantité des précipitations généralement enregistrées pendant la période.

### **Période mars – juin**

Dans la partie du territoire située au sud de l'Adamaoua, la saison de pluie commence généralement vers la mi-mars. Les précipitations augmentent ensuite régulièrement pour atteindre leur maximum entre juillet et septembre sauf en région à régime équatorial où une

baisse correspondant à la petite saison sèche est enregistrée en juillet-août. Près de 30% des précipitations sur l'ensemble du pays sont enregistrés au courant de ces quatre mois.

Cette période de l'année est celle au cours de laquelle les séries sont le moins touchées par des ruptures. Pour l'ensemble de postes traités, le test de Pettit révèle des ruptures pour 28% au mois de mars, 1% au mois d'avril, 8% au mois de mai et 30% en juin. Les années de rupture sont majoritairement situées entre 1965 et 1975, pour des déficits qui varient entre 20 et 40%.

### **Mois de juillet et août**

Ces deux mois ont la particularité d'être à la fois les plus pluvieux dans le Nord ainsi que dans une bonne partie du sud du pays, et de correspondre à la petite saison sèche dans la région à régime équatorial. Le cumul des précipitations des deux mois représente :

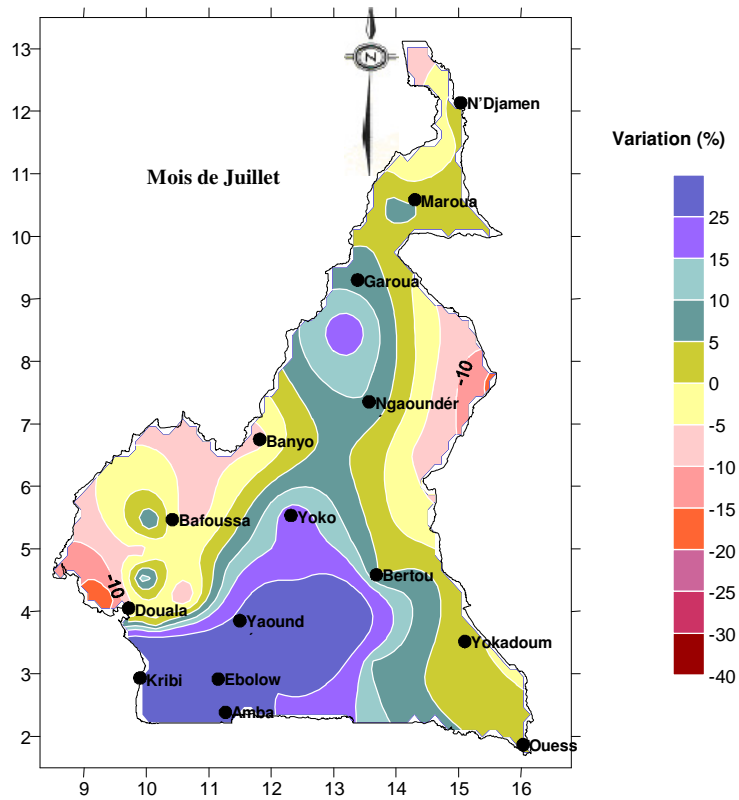
- 56% du total annuel au nord de l'Adamaoua,
- 40 % dans la région côtière et autour du plateau de l'Adamaoua,
- 30% dans la région montagneuse de l'Ouest,
- 20% dans la région de Bertoua Batouri,
- 10% dans la région équatoriale du sud.

Pour l'ensemble de postes traités, le test de Pettit révèle des ruptures pour 28% au mois de juillet contre 32% pour le mois d'août. Pour les deux mois, aucun regroupement particulier de date de rupture ne se dessine sur toute la période d'étude.

De l'ensemble des 14 stations présentant une rupture au mois de juillet, seules 3 présentent également une rupture au niveau annuel. Sur 10 des 11 postes restants (situés majoritairement dans le sud du pays), on note plutôt un accroissement des précipitations (+ 40 à +70%) après rupture. Un accroissement des précipitations est enregistré également au mois d'août au niveau de 9 postes (situés dans le sud du pays en majorité, comme précédemment) sur 16 présentant une rupture. Les postes où on enregistre un déficit après rupture présentent également des ruptures au niveau annuel.

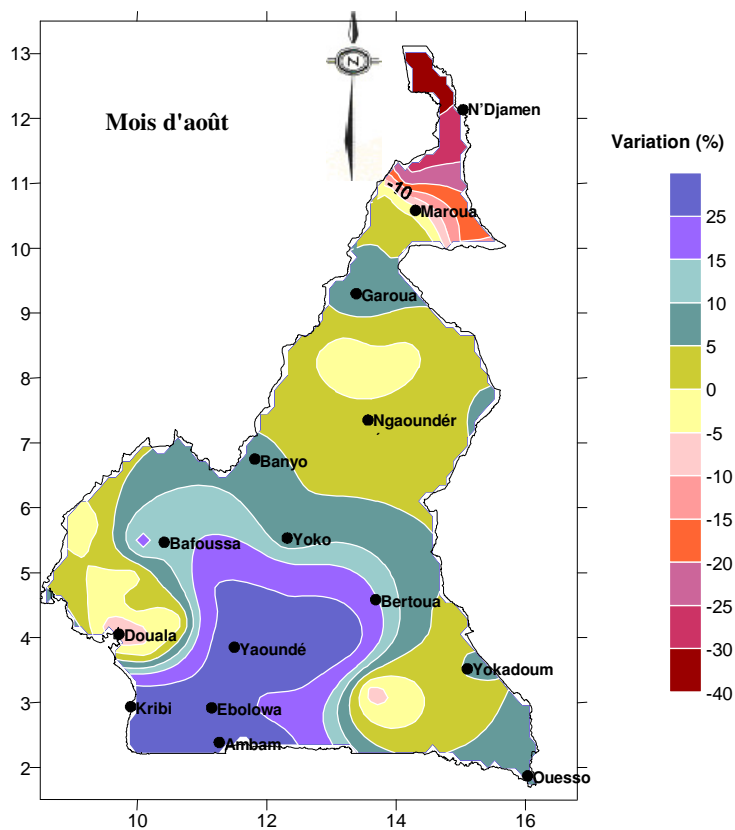
Il semble donc se dessiner une opposition nord-sud sur le territoire pour cette période et particulièrement au mois d'août. La région sud aux précipitations annuelles moins déficitaires enregistre plutôt des excédants pluviométriques alors que des déficits sont enregistrés dans le Nord et à l'Ouest du pays. Les figures 3.15 et 3.16 illustrent la situation.





Echelle 1 :13.500.000

Figure : 3.15 : Variation relative (codée en couleur) des précipitations du mois de juillet de la période 1971-2000 par rapport à la période 1941-1970



Echelle 1 :13.500.000

Figure : 3.16 : Variation relative (codée en couleur) des précipitations du mois d'août de la période 1971-2000 par rapport à la période 1941-1970

### Période septembre – novembre

Le cumul des précipitations de ces trois mois représente :

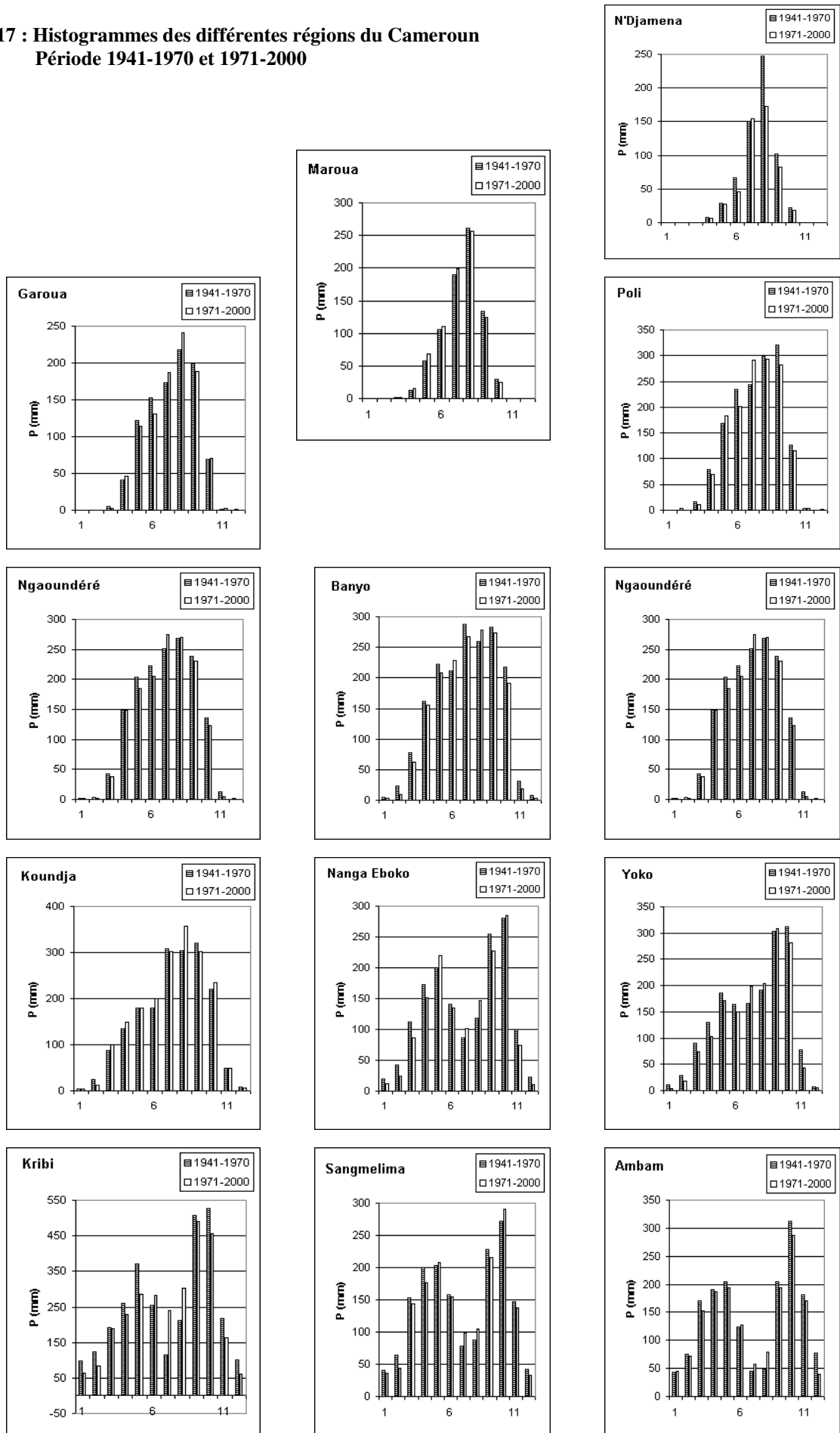
- 40 % du total annuel pour les régions sud et est,
- 30 % pour le littoral et la région montagneuse de l'Ouest,
- 25 % pour la région du plateau de l'Adamaoua,
- 20 % pour la région au nord de l'Adamaoua.

L'application du test de Pettit révèle des ruptures au niveau de 16 stations sur 60 au mois de septembre contre 11 en octobre. Très peu de précipitations sont enregistrées dans la région au nord de l'Adamaoua en novembre. Au sud de cette région, les tests révèlent des ruptures au niveau de 7 postes dont 4 dans la région montagneuse de l'Ouest. Dans l'ensemble, les déficits enregistrés après la rupture sont compris entre -20 et -30%. Les dates de rupture se situent généralement après 1965, avec une majorité après 1975.

La figure 3.17 présente les histogrammes des différentes régions du Cameroun pour les périodes 1941-1970 et 1971-2000. On y observe parfaitement le comportement particulier des mois de juillet et d'août, caractérisés dans la partie du pays au Sud de l'Adamaoua, par un accroissement des précipitations pendant la période déficitaire 1971-2000.

En définitive, on peut dire que l'irrégularité interannuelle des précipitations se répercute normalement sur l'ensemble des mois pluvieux. On note cependant un comportement singulier des mois de juillet et d'août qui se caractérise par un accroissement des précipitations pendant la période déficitaire 1971-2000. Cette observation qui concerne particulièrement la partie Sud du pays découlerait (Olivry, 1886 ; Suchel, 1987) des propriétés et dispositions moyennes des "Centres d'actions" et des "Zones de temps". Ces dernières paraissent découler principalement, quant à elles, de l'inégal dynamisme des hautes pressions subtropicales des deux hémisphères.

**Figure 17 : Histogrammes des différentes régions du Cameroun  
Période 1941-1970 et 1971-2000**



## **Conclusion**

Les analyses de la variabilité des pluies mensuelles montrent qu'à l'exception des mois de juillet et août, les précipitations ont globalement diminué au cours des trois dernières décennies sur l'ensemble du territoire camerounais. Cette diminution n'est pas uniforme, ni sur toute l'année ni sur l'ensemble du pays. On peut cependant noter que les mois de la saison pluvieuse sont proportionnellement moins affectés par la baisse que ceux de la saison sèche. Dans la partie sud du pays, les mois de juillet et août sont plutôt marqués par des précipitations excédentaires au courant de cette même période. Ces résultats sont comparables à ceux enregistrés dans la plupart des travaux sur le régime des précipitations en Afrique de l'Ouest (Servat *et al.*, 1998 et 1999).

### **3.3.2.2.3 – VARIABILITE DU NOMBRE ANNUEL DE JOURS DE PLUIE**

L'étude de la variabilité du nombre annuel de jours de pluie est rendue difficile par l'existence de nombreuses lacunes et la difficulté de se procurer de longues séries de pluies journalières de qualité fiable. Dans ces conditions, nos analyses se sont limitées à un nombre réduit de postes d'observation. Le nombre annuel de jours de pluie de hauteur supérieure ou égale à 0,5 mm ainsi que le nombre de jours de pluie de hauteur supérieure ou égale à la moitié de la hauteur de précipitations journalières de récurrence annuelle, ont été comptabilisés pour une vingtaine de stations réparties dans toutes les régions climatiques du pays. L'analyse de ces deux échantillons permettra de se faire une idée des modifications enregistrées au niveau des pluies journalières.

#### **3.3.2.2.3.1 : Variabilité du nombre annuel de jours de pluie**

L'examen de l'homogénéité des séries montre qu'elles présentent globalement un caractère non aléatoire. Cette nature est confirmée par l'application du test de Pettit qui révèle l'existence des ruptures (tableau 3.7), pour 15 séries sur un total de 22. Les dates de ruptures sont situées entre 1965 et 1975 pour 7 stations, après 1975 pour 6 et avant 1965 pour les 2 dernières. A l'exception de la station de Ngaoundéré, toutes les ruptures sont suivies d'une diminution du nombre annuel de jours de pluie. La moyenne des déficits est de 12%.

**Tableau 3.7 : Résultat du test de Pettit et variation du nombre moyen annuel de jours de pluie pour quelques postes pluviométriques du Cameroun**

Nom Station	Période d'observation	Nombre moyen annuel jours de pluie	Date de rupture	Variation (%)
Akonolinga	1934-2001	120	Pas de rupture	
Bafia	1930-2001	117	1976	-14
Bafoussam	1934-2001	144	1957	-19
Banyo	1932-2001	152	Pas de rupture	
Bertoua	1932-2001	122	1976	-4
Bétaré Oya	1940-1994	133	1969	-9
Douala	1922-1986	212	1962	-7
Dschang	1941-1993	176	1976	-5
Edéa	1939-2001	169	1970	-10
Garoua	1927-2001	85	Pas de rupture	
Kribi	1939-2001	186	Pas de rupture	
Lomié	1946-2000	132	1975	-8
Maroua	1939-2001	65	1969	-11
Nanga Eboko	1933-2001	111	1975	-19
Ngaoundéré	1927-2001	125	1980	+10
Nkongsamba	1930-2001	184	1969	-9
Sangmélina	1934-2001	137	Pas de rupture	
Yaoundé	1927-2001	134	1986	-14
Yokadouma	1930-1999	126	1982	-14
N'Djamena	1931-2000	55	1969	-17
Baibokoum	1946-1994	80	Pas de rupture	
Maiduguri	1915-1994	80	1978	-14

Les stations étudiées sont en nombre limité, mais sont bien réparties du Nord au sud, ce qui permet de se faire une idée sur l'ensemble du pays. La variation du nombre annuel de jours de pluie est étudiée de part et d'autre de l'année 1970. Le calcul des indices a porté sur la période 1950-1994. La figure 3.18 présente les résultats sur l'ensemble du pays. Elle confirme qu'en dehors de la région autour de Ngaoundéré sur le plateau de l'Adamaoua, le nombre annuel de jours de pluie a diminué partout ailleurs sur le territoire. Les déficits sont compris en majorité entre -5 et -10%, mais ils peuvent atteindre -20%, notamment dans l'extrême Nord du pays.

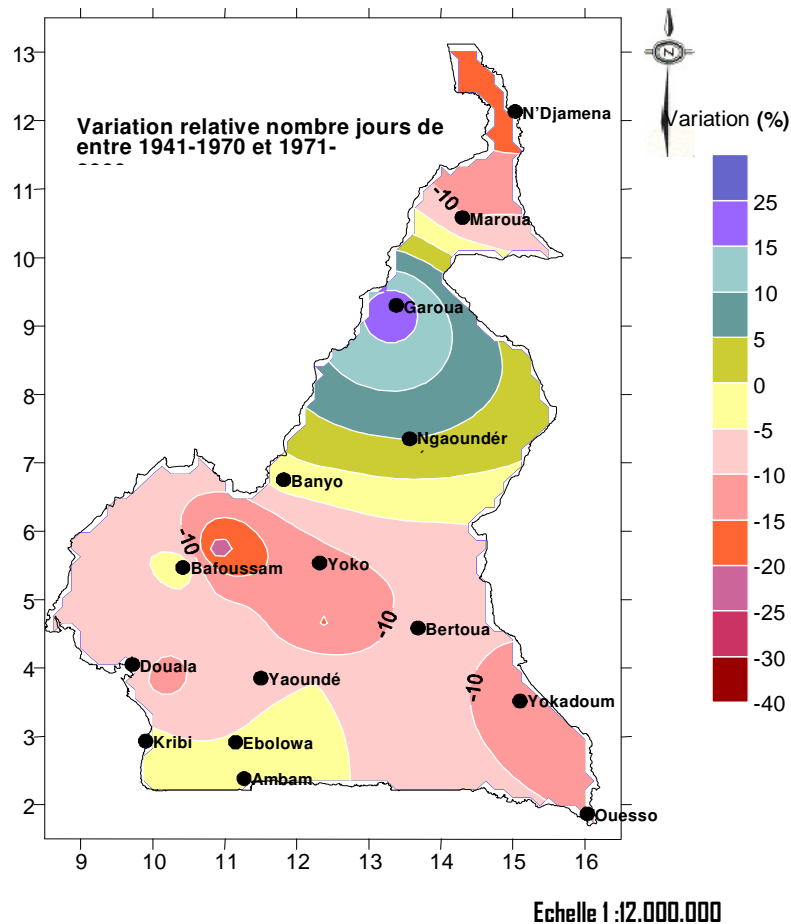


Figure 3.18 : Variation relative (codée en couleur) du nombre moyen annuel de jours de pluie de la période 1971-2000 par rapport à la période 1950-1970

### 3.3.2.2.3.2 : Variabilité du nombre de jours de fortes pluies

Les fortes pluies sont définies ici comme une “pluie journalière de hauteur supérieure ou égale à la moitié de la hauteur de précipitation journalière atteinte une fois par an”. Afin de conserver aux résultats une homogénéité statistique, le calcul des indices a été réalisé pour 16 postes pluviométriques sur les 22 précédemment traités, et n’a concerné que la période 1950-1990. Les calculs des indices pluviométriques (variable centrée réduite) par décennie, sont réalisés tel que décrit plus haut. Le tableau 3.8 présente l’ensemble des résultats. Une tendance à la diminution du nombre moyen annuel des jours de précipitations de hauteur supérieure à la moyenne semble se dessiner à partir de la décennie 1970. D’autres études à partir des échantillons de taille conséquente sont cependant indispensables pour conclure avec certitude. Cette tendance est contraire aux résultats de certaines études menées aux USA et au Royaume Uni (McCarthy *et al.*, 2001), qui montrent plutôt une augmentation de la fréquence et des volumes précipités des événements majeurs au cours de la période récente.

**Tableau 3.8 : Evolution des indices des jours de fortes pluies calculés par rapport à la période 1950-1990**

	Nbr moy. Jr pluie	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989
Kribi	186	0,158	-0,221	-0,152	-0,438
Edéa	169	0,499	0,061	-0,360	-0,133
Yaoundé	134	-0,110	0,087	-0,088	0,153
Yokadouma	126	-0,127	0,466	-0,049	0,028
Nkongsamba	184	0,088	0,405	0,279	-0,303
Sangmelima	137	0,065	0,174	-0,184	-0,043
Dschang	176	0,426	0,868	-0,132	-0,222
Lomié	132	0,293	-0,140	-0,241	0,017
Nanga Eboko	111	-0,130	-0,321	0,592	0,060
Bertoua	122	0,333	0,571	-0,026	-0,516
Banyo	152	1,184	-0,436	-0,176	-0,436
Ngaoundéré	125	0,525	-0,182	0,596	-0,265
Maroua	65	0,484	-0,093	-0,198	-0,617
Garoua	85	0,484	-0,093	-0,198	-0,617
Baïbokoum	80	0,021	0,160	0,253	-0,441
Maïduguri	80	0,075	-0,158	0,127	0,049

## CONCLUSION

Sur la base des informations disponibles, nous nous sommes attaché à faire le point sur l'évolution du climat au Cameroun à partir des séries pluviométriques. Nos résultats confirment la baisse généralisée des précipitations observée en Afrique intertropicale, en général. Cette baisse se caractérise par la diminution du cumul des pluies annuelles. Particulièrement marquée au cours de la décennie 80, la moyenne des déficits varie de  $-10\%$  à  $-20\%$  selon la région du pays, pour les trois dernières décennies.

La variabilité pluviométrique se manifeste également par une baisse globale mais non uniforme des pluies mensuelles sur l'ensemble du pays. Les mois de la saison sèche sont plus affectés, dans l'ensemble, que ceux de la saison humide. On notera en particulier que les mois de juillet et août sont généralement excédentaires dans le sud, plus humide, et déficitaires dans le Nord.

Le nombre annuel de jours de pluie ainsi que le nombre de fortes pluies enregistrées au cours d'une année ont également baissé. On peut en conclure que la baisse des précipitations se caractérise par la diminution du nombre d'événements et de la hauteur précipitée au cours de chaque événement. Des études complémentaires sont cependant indispensables pour confirmer.

Ces résultats montrent qu'en dépit de quelques années humides enregistrées au cours de la décennie 90, la sécheresse continue au Cameroun jusqu'au début des années 2000. Une étude de L'Hôte et al. (2002) aboutit à des conclusions similaires pour certaines régions du Tchad et de l'Afrique de l'Ouest.

Cette baisse généralisée des précipitations a certainement des conséquences sur les ressources en eau du pays en général, et particulièrement sur le régime des écoulements des cours d'eau. Nous le vérifierons à l'analyse de la variabilité des débits des principaux cours d'eau.

### **3.3.2.3 – VARIABILITE DES ECOULEMENTS**

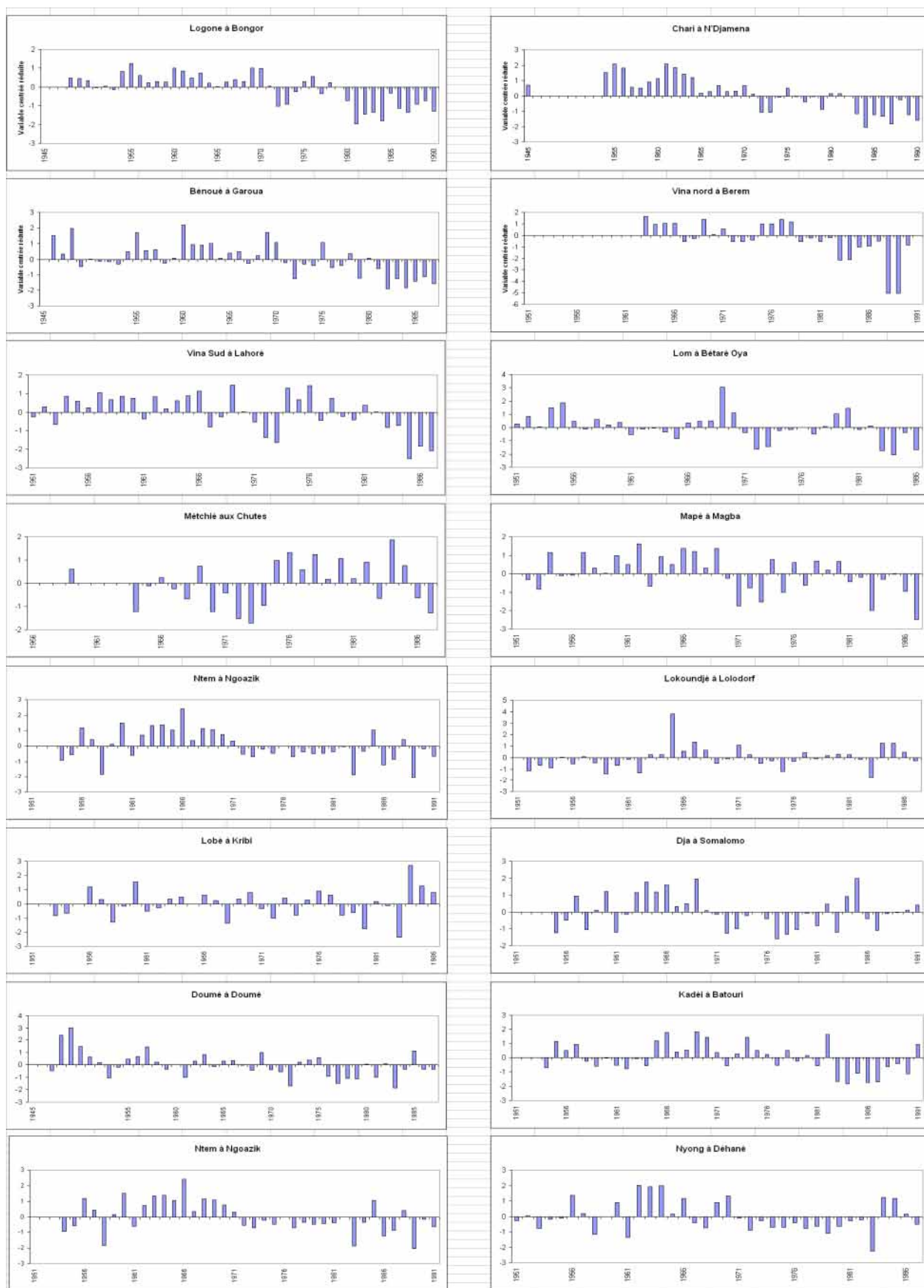
En Afrique tropicale le régime hydrologique des cours d'eau est directement influencé par celui des précipitations. Il subit de ce fait l'influence de la fluctuation des précipitations qui constituent la cause principale de leur variabilité. Les autres causes à l'origine de modifications du régime des écoulements des cours d'eau sont essentiellement d'origine anthropique. Elles vont des modifications de l'état de l'occupation des sols aux aménagements tels que les barrages de retenue d'eau réalisés sur le réseau. Cette dernière considération, associée aux critères de qualité des données et de la longueur de la série, ont permis de sélectionner la trentaine des stations qui seront analysées. Les mêmes méthodes d'analyse utilisées pour les données pluviométriques ont été appliquées.

#### **3.3.2.3.1 – VARIATIONS DES MODULES**

L'étude des modules des cours d'eau a débuté par l'analyse des indices hydrométriques interannuels (variable centrée réduite) calculés en année civile et ramenés aux écarts réduits sur l'ensemble des bassins. La figure 3.19 illustre quelques résultats représentatifs des différentes régions du pays.

Comme pour les précipitations, après deux décennies (1950 et 1960) relativement humides, on note une baisse des modules sur la quasi-totalité des cours d'eau étudiés, à partir du début des années 1970. Les déficits sont beaucoup plus marqués dans la partie Nord du pays et décroissent à mesure que l'on descend vers le sud. Pour certains cours d'eau des régions très arrosées du pays comme la Lobé et la Lokoundjé, le module (tableau 3.9) reste sensiblement proche de la moyenne. La décennie 1980 enregistre quelques années humides dans le sud, mais dans l'ensemble la sécheresse domine.





**Figure 3.19 :** Evolution des indices du débit moyen annuel par rapport à la moyenne interannuelle de la période 1950-1990 au niveau de quelques stations du Cameroun

### **3.3.2.3.1.1- Homogénéité des séries et calcul des déficits**

Les études de l'homogénéité des séries viennent confirmer ces premiers résultats. Les résultats du test de Pettit montrent que les séries de débit moyen annuel de 24 stations sur les 34 analysées présentent une rupture au seuil de confiance de 90% (tableau 3.9 ). Les dates de rupture sont moins dispersées que celles obtenues pour les séries pluviométriques. Ainsi, 15 séries sur 24 présentent une rupture entre 1969 et 1971, une seule rupture est observée avant 1969 et 5 après 1975. On notera que trois stations présentent un accroissement de débit après la rupture alors que les 21 autres sont déficitaires. Les déficits sont en moyenne plus importants pour les cours d'eau du Nord du pays (-40%) que pour ceux de la partie sud (-20%).

Il est important de souligner que des ruptures, avec des déficits relativement importants, sont observées sur certains cours d'eau de la région sud du pays où aucune rupture n'a été enregistrée au niveau des précipitations. Cette observation confirme le fait que les débits intègrent les variations spatiales des régimes pluviométriques. Sur la base de cette observation et du fait de la concentration des dates de rupture autour de 1970, nous avons déterminé les déficits de part et d'autre de cette année pour l'ensemble des cours d'eau étudiés.

**Tableau 3.9 : Résultats du test de Pettit et calcul de la variation des modules des différents cours d'eau**

Bassin versant	Nom Station	Période Observation	Module (m <sup>3</sup> /s)	Date de rupture	Variation (%)
Bassin du Congo	Kadéi à Batouri	1954 - 1991	113	1982	-20
	Boumba à Biwala	1965 - 1991	102	1971	-14
	Dja à Somalomo	1955 - 1991	66,4	Pas de rupture	
	Doumé à Doumé	1946 - 1987	6,07	1969	-17
Bassin côtier	Kienké à Kribi	1955 - 1992	47,1	Pas de rupture	
	Lobé à Kribi	1953 - 1986	103	Pas de rupture	
	Lokoundjé à Lolodorf	1952 - 1987	29,2	1962	<b>+ 30</b>
	Ntem à Nyabessan	1958 - 1988	420	1970	-18
	Ntem à Ngoazik	1954 - 1992	263	1971	-21
	Seng à Assosseng	1955 - 1987	7,57	Pas de rupture	
	Nyong à Ayos	1951 - 1987	54,6	1971	-22
	Nyong à Mbalmayo	1951 - 2002	149	Pas de rupture	
	Nyong à Déhané	1951 - 1987	436	Pas de rupture	
	Mefou à Nsimalen	1964 - 1987	6,40	Pas de rupture	
	Mungo à Mundame	1952 - 1986	160	1969	-19
	Nkam à Mélong	1951 - 1983	70,1	1969	-15
	Wouri à Yabassi	1951 - 1987	304	1969	-7
	Cross R. à Manfé	1967 - 1987	531	1971	-26
	Munaya à Akwem	1968 - 1987	145	1976	<b>+4</b>
	Bassin de la Sanaga	Metchié aux Chutes	1959 - 1987	10,4	1974
Mapé à Magba		1952 - 1987	91,7	1969	-17
Vina S. Lahoré		1951 - 1987	35,4	1978	-20
Lom à Bétaré Oya		1951 - 1994	168	1976	-10
Téré à Ndoumba		1963 - 1987	16,5	1975	-19
Bassin du Niger	Mayo Kébi à Cossi	1955 - 2000	86,8	1973	-33
	Bénoué à Buffle N.	1955 - 1987	43,8	Pas de rupture	
	Bénoué à Riao	1950 - 1991	208	1970	-44
	Bénoué à Garoua	1946 - 1991	318	1970	-40
	Metchem à Gouri	1964 - 1986	104	Pas de rupture	
Bassin du Lac Tchad	Tsanaga à Bogo	1966 - 1998	7,18	Pas de rupture	
	Vina nord à Berem	1963 - 1992	24,5	1978	-23
	Logone à Bongor	1948 - 1999	470	1971	-28
	Logone à Laï	1953 - 1995	426	1970	-37
	Chari à N'Djamena	1933 - 1999	951	1971	-45

Le tableau 3.10 présente les résultats de l'analyse comparative des écoulements des périodes d'avant et après 1970. Aucun déficit n'est calculé quand les observations du cours d'eau ont commencé au courant de la décennie 1960. L'examen des déficits ainsi calculés montre qu'à l'exception de la Lokoundjé à Lolodorf, la Metchié aux Chutes et dans une moindre mesure la Munaya à Akwem, tous les autres cours d'eau étudiés ont vu leur module diminuer après l'année 1970. Dans le sud du pays les déficits varient de 5 à 21 % pour une moyenne de 14%, alors qu'ils varient de 28 à 45% dans le Nord pour une moyenne de 35%.

**Tableau 3.10 : Variation relative du module des différents cours d'eau de la période 1971-1990 par rapport à la période 1941-1970**

<b>Rivière et Station</b>	<b>Variation (%)</b>
Kadéi à Batouri	-10
Dja à Somalomo	-13
Doumé à Doumé	-17
Kienké à Kribi	-16
Lobé à Kribi	-1
Lokoundjé à Lolodorf	+3
Ntem à Nyabessan	-18
Ntem à Ngoazik	-20
Seng à Assosseng	-15
Nyong à Ayos	-21
Nyong à Mbalmayo	-10
Nyong à Déhané	-14
Mefou à Nsimalen	-5
Mungo à Mundame	-18
Nkam à Mélong	-14
Wouri à Yabassi	-8
Metchié aux Chutes	+9
Mapé à Magba	-18
Vina du sud Lahoré	-14
Lom à Bétaré Oya	-14
Mayo Kébi à Cossi	-32
Bénoué à Buffle Noir	-32
Bénoué à Riao	-45
Bénoué à Garoua	-41
Logone à Bongor	-28
Logone à Laï	-37
Chari à N'Djamena	-42

### 3.3.2.3.1.2 - Evolution des écoulements au Cameroun au cours du XX<sup>ème</sup> siècle

Quelques échelles limnimétriques ont été suivies au Cameroun au courant des années 1930, mais les activités hydrométriques n'ont réellement débuté dans le pays qu'à la fin des années 1940. Elles se sont poursuivies jusqu'à la fin de l'année 1987 et depuis lors le suivi des stations se fait de manière très irrégulière. Au courant de la décennie 1990, la station hydrométrique du Lom à Bétaré Oya a été suivie de manière épisodique par la SONEL, celle du Mayo Kébi à Cossi a été suivie de la même manière dans le cadre du Projet HydroNiger alors que le Nyong à Mbalmayo a été suivi en collaboration avec l'IRD dans le cadre du programme PEGI. Bien qu'incomplète, les données de ces trois stations permettent de se faire une idée de l'évolution des écoulements dans les différentes régions du pays au courant de la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Les observations hydrométriques dans d'autres pays de

l'Afrique tropicale (Niger à Koulikoro au Mali, Chari à N'Djamena au Tchad, Oubangui à Bangui et Congo à Kinshasa) y seront associées à titre de comparaison.

Les analyses portent sur la variable centrée réduite calculée sur les modules par décennie pour chacune des 7 stations. La figure 3.20 qui montre l'évolution des indices permet d'apprécier les variations des débits des différents cours d'eau. En particulier, les décennies 1950 et 1960 sont excédentaires alors que les trois dernières décennies du siècle sont déficitaires pour l'ensemble des cours d'eau étudiés. Il est important de souligner que les déficits sont observés aussi bien sur les cours d'eau des régions humides du Sud que sur ceux des régions sèches du Nord.

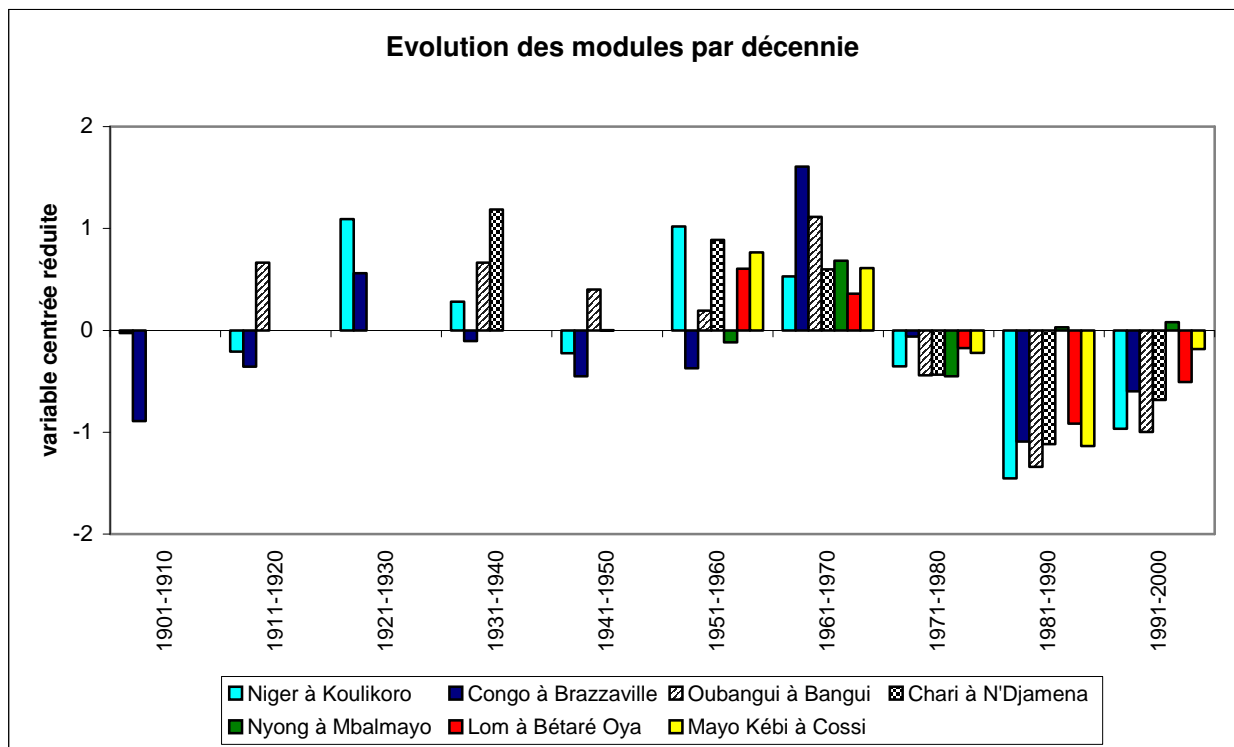


Figure 3.20 : Evolution des écoulements par décennie au courant du XX<sup>ème</sup> siècle au niveau de quelques stations hydrométriques du Cameroun et de l'Afrique tropicale.

### 3.3.2.3.2 – VARIATIONS DES DEBITS CARACTERISTIQUES

Les débits caractéristiques étudiés sont les suivants :

- $Q_{\min}$  : débit moyen journalier minimum de l'année,
- DCE : débit non dépassé pendant 10 jours de l'année,
- DC1, DC3 et DC6 : débits respectivement non dépassés pendant 1, 3 et 6 mois de l'année,
- $Q_{\max}$  : débit moyen journalier maximum de l'année,
- DCC : débit atteint ou dépassé pendant 10 jours de l'année,
- DC11 et DC9 : débits respectivement atteints ou dépassés 1 mois et 3 mois de l'année.

Ces différents paramètres sont calculés sur l'année hydrologique, le passage d'une année à l'autre se faisant en fin de saison sèche.

L'application du test de Pettit aux données disponibles donne les résultats du tableau 3.11. La quasi-totalité des débits caractéristiques d'étiage présentent des ruptures au seuil de confiance de 90%. Pour les débits caractéristiques de basses eaux, les déficits sont relativement importants (entre 20 et 60% pour  $Q_{\min}$  et le DCE). Ils diminuent ensuite à partir du DC6 pour ne plus exister (ou presque) au niveau du DC11, du DCC et du  $Q_{\max}$ .

**Tableau 3.11 : Résultats du test de Pettit appliqué aux débits caractéristiques et calcul des variations**

<i>Nom Station</i>	<i>Période Observation</i>	<b>Qmin</b>		<b>DCE</b>		<b>DC1</b>		<b>DC3</b>		<b>DC6</b>		<b>DC9</b>		<b>DC11</b>		<b>DCC</b>		<b>Qmax</b>	
		rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)	rupture	Variation (%)
Kadéi à Batouri	1954 - 1991	1974	-37	1974	-38	1974	-39	1974	-30	1974	-23	néant		néant		néant		1978	-20
Boumba à Biwala	1965 – 1991	1972	-47	1972	-38	1972	-30	néant		1984	<b>+2</b>	1984	<b>+18</b>	1984	<b>+31</b>	néant		néant	
Dja à Somalomo	1955 – 1991	1975	-44	1975	-40	1975	-34	néant		1969	-22	1969	-13	néant		néant		néant	
Doumé à Doumé	1946 – 1987	1975	-50	1975	-34	1974	-39	1969	-26	néant		néant		néant		néant		néant	
Lobé à Kribi	1953 – 1986	néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant	
Lokoundjé à Lolod	1952 - 1987	1964	<b>+34</b>	1961	<b>+25</b>	néant		néant		1961	<b>+41</b>	1961	<b>+33</b>	néant		1962	<b>+37</b>	1969	<b>+25</b>
Ntem à Ngoazik	1954 – 1992	1974	-30	1974	-27	1974	-29	1970	-34	1969	-37	1969	-22	néant		néant		néant	
Seng à Assosseng	1955 – 1987	1970	-61	1970	-54	1971	-46	1970	-41	néant		néant		néant		néant		néant	
Nyong à Ayos	1951 – 1987	1969	-49	1969	-51	1969	-56	1970	-56	1971	-31	néant		néant		néant		néant	
Nyong à Mbalm.	1951 – 2002	1975	-40	1975	-39	1975	-34	néant		néant		néant		néant		néant		néant	
Nyong à Déhané	1951 – 1987	néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant	
Mefou à Nsima	1964 – 1987	néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant		néant	
Mungo à Mund	1952 – 1986	1969	-38	1968	-34	1969	-32	1969	-26	néant		néant		1969	-13	néant		néant	
Nkam à Mélong	1951 – 1983	1967	-13	1967	-14	1967	-16	1969	-26	1970	-23	néant		néant		néant		néant	
Wouri à Yabassi	1951 – 1987	1960	-23	1957	-22	1957	-25	1957	-17	1960	-18	néant		néant		néant		néant	
Metchié aux Chut	1959 - 1987	1978	-52	néant		néant		néant		néant		néant		1974	<b>+38</b>	1974	<b>+37</b>	1974	<b>+26</b>
Mapé à Magba	1952 - 1987	1968	-61	1968	-59	1964	-40	1964	-25	néant		néant		néant		néant		néant	
Vina S. Lahoré	1951 - 1987	1970	-35	1970	-29	1969	-26	néant		néant		néant		néant		néant		néant	
Lom à Bétaré o	1951 – 1994	1970	-61	1975	-53	1975	-48	1975	-20	néant		néant		néant		néant		néant	
Téré à Ndoumba	1963 – 1987	néant		1975	-35	1975	-38	1975	-38	1976	-35	néant		néant		néant		néant	

La non-diminution des débits de hautes eaux en dépit de la baisse des précipitations peut s'expliquer par les changements intervenus sur le plan de l'occupation des sols sur les bassins versants. En effet, la diminution du couvert végétal et l'accroissement des surfaces cultivées en particulier contribue à une augmentation du coefficient de ruissellement sur les bassins. Cette dernière vient compenser la baisse des volumes précipités, d'où l'absence des déficits pour les caractéristiques des hautes eaux. Si cette situation devait persister, toute chose égale par ailleurs, on devrait arriver à la situation où on assiste à un accroissement des débits de crue en dépit de la baisse des précipitations. Cette situation, déjà observée dans le contexte sahélien (Mahé et al., 2002), se dessinerait très probablement déjà sur le bassin versant de la Métchié aux Chutes sur les hauts plateaux de l'ouest du pays. Alors que la baisse des précipitations est évaluée à environ 12% dans la région, on y observe un accroissement des débits caractéristiques des hautes eaux de plus de 30% à partir de 1974. La région drainée par le bassin versant de la Métchié est connue pour la forte densité de sa population. Il en découle que la quasi-totalité du bassin versant est actuellement cultivée, d'où un accroissement du taux de ruissellement. Il convient de noter également la taille (480 km<sup>2</sup>) relativement réduite du bassin, qui ne permet pas le gommage des effets des activités anthropiques.

Il en va de même pour le bassin de la Boumba à Biwala (10.335 km<sup>2</sup>) où on observe un accroissement des débits caractéristiques des hautes eaux de 20 à 30 % à partir de 1984. Sigha (1994) avait déjà souligné un accroissement des flux de matières sur les cours d'eau de la région, consécutive à une intensification de l'exploitation forestière.

Un accroissement (30 à 40%) des débits de basses et hautes eaux est enregistré sur la Lokoundjé à Lolodorf (1150 km<sup>2</sup>) dès le début de la décennie 1960. Sans exclure une explication analogue à celle des deux précédents bassins, cette situation peut paraître normale dans la mesure où la décennie 60 est l'une des plus humides sur toute l'étendue du territoire camerounais.

On peut déduire de cette situation que des précipitations équivalentes à celles des décennies 1950 et 1960 seraient à l'origine de crues plus importantes dans les conditions actuelles. En effet, compte tenu de l'accroissement régulier des populations du pays et du développement continu des activités socio-économiques (agriculture, exploitation forestière, etc.), il faudrait s'attendre à une augmentation de la part de l'écoulement sur les bassins de la quasi-totalité



des cours d'eau du pays. Il conviendrait d'en tenir compte dans les études de projets. Nous y reviendrons au prochain chapitre.

Pour les basses eaux, en plus des conséquences de la diminution des volumes précipités, l'augmentation du taux de ruissellement se fait au détriment de l'infiltration vers les nappes qui soutiennent le débit des basses eaux. Pour chaque cours d'eau, les périodes de rupture sont les mêmes pour le  $Q_{\min}$ , le DCE, le DC1 et le DC3. Elles se situent majoritairement après 1970, soit après la baisse généralisée des volumes précipités soulignée plus haut.

Les résultats du calcul de la variation relative des différents débits caractéristiques de la période 1971-1990 par rapport à celle de 1950-1970 (tableau 3.12) confirme cette différence de comportement entre les débits de hautes et basses eaux. En effet, les différences entre les déficits calculés pour les caractéristiques des basses eaux sont parfois plus de 10 fois supérieures à ceux calculés pour les caractéristiques des hautes eaux.

**Tableau 3.12 : Variation relative des débits caractéristiques des différents cours d'eau de la période 1971-1990 par rapport à la période 1950-1970**

Rivière et Station	$Q_{\min}$	DCE	DC1	DC3	DC6	DC11	DC9	DCC	$Q_{\max}$
Nyong à Ayos	-0,47	-0,49	-0,54	-0,55	-0,28	-0,11	-0,04	-0,05	-0,05
Nyong à Déhané	-0,36	-0,33	-0,32	-0,19	-0,12	0,00	0,00	-0,05	-0,05
Lokoundjé à Lolodorf	-0,23	-0,21	-0,19	-0,15	-0,14	0,17	-0,06	-0,01	-0,01
Lobé à Kribi	0,12	0,05	-0,09	0,02	0,10	0,04	0,01	0,04	0,04
Ntem à Ngoazik	-0,09	-0,08	-0,08	-0,10	-0,02	-0,06	0,04	0,06	0,06
Seng à Assosseng	-0,24	-0,22	-0,27	-0,33	-0,34	-0,22	-0,11	-0,07	-0,07
Wouri à Yabassi	-0,61	-0,55	-0,48	-0,42	-0,17	-0,12	-0,07	-0,02	-0,02
Nkam à Mélong	-0,17	-0,14	-0,11	-0,15	-0,12	0,13	0,06	0,01	0,01
Mungo à Mundame	-0,14	-0,14	-0,14	-0,24	-0,23	-0,10	-0,04	-0,08	-0,08
Mape à Magba	-0,37	-0,33	-0,31	-0,25	-0,21	-0,14	-0,12	-0,12	-0,12
Métchié aux Chutes	-0,59	-0,56	-0,25	-0,13	-0,13	-0,04	-0,03	-0,18	-0,18
Vina sud à Lahoré	-0,22	-0,11	-0,09	-0,09	0,05	0,10	0,21	0,25	0,25
Lom à Bétaré Oya	-0,35	-0,29	-0,25	0,02	-0,02	-0,12	-0,12	-0,12	-0,12
Dja à Somalomo	-0,60	-0,56	-0,52	-0,24	-0,05	-0,02	-0,10	-0,08	-0,08
Doumé à Doumé	-0,40	-0,36	-0,33	-0,25	-0,20	-0,11	-0,06	-0,07	-0,07
Kadéi à Batouri	-0,29	-0,30	-0,32	-0,23	-0,17	-0,07	0,00	0,03	0,03
Nyong à Déhané	-0,31	-0,32	-0,33	-0,25	-0,21	-0,10	-0,07	-0,06	-0,06
Kadéi à Batouri	-0,47	-0,49	-0,54	-0,55	-0,28	-0,11	-0,04	-0,05	-0,05

En définitive, si les écoulements sont globalement plus déficitaires que les précipitations sur l'ensemble du territoire, les étiages des cours d'eau sont de plus en plus sévères alors que les hautes eaux semblent moins affectées.

## CONCLUSION

Sur la base des informations disponibles, nous nous sommes attachés dans ce chapitre à faire le point sur l'évolution du climat au Cameroun à partir des séries pluviométriques et hydrométriques. Les analyses ont utilisé des méthodes statistiques variées et les techniques cartographiques ont permis une représentation spatiale des résultats. Nos différents résultats confirment la hausse des températures et la baisse généralisée des précipitations et des écoulements observées en Afrique intertropicale.

Une hausse moyenne de la température moyenne journalière sur la période 1970-2002, de l'ordre de  $0,2^{\circ}\text{C}$  est observée sur l'ensemble du territoire camerounais, contre  $0,4^{\circ}\text{C}$  pour la période 1990-2002. L'année 1998 détient le record des années les plus chaudes au Cameroun, avec une moyenne de  $+1,1^{\circ}\text{C}$ , soit une valeur supérieure au record mondial établi à  $+0,55^{\circ}\text{C}$  la même année. Bien que cette tendance au réchauffement soit générale sur l'ensemble du pays, l'intensité est variable suivant les régions. Les plus fortes augmentations sont enregistrées dans les régions montagneuses, notamment pour les températures maximales moyennes annuelles. Par contre, les plus faibles augmentations sont observées dans la région au Nord de l'Adamaoua où on enregistre par ailleurs une hausse plus forte des températures minimales moyennes annuelles.

La baisse des précipitations se caractérise par la diminution des pluies annuelles, particulièrement marquée au cours de la décennie 80. La moyenne des déficits varie de  $-10\%$  dans le sud du pays à  $-20\%$  dans le Nord, pour les trois dernières décennies. La variabilité pluviométrique se manifeste également par une baisse globale mais non uniforme des précipitations mensuelles sur l'ensemble du pays. Les mois de la saison sèche sont dans l'ensemble, plus affectés que ceux de la saison humide. On notera en particuliers que les mois de juillet et août sont généralement excédentaires dans le sud, et déficitaires dans le nord. Le nombre annuel de jours de pluie ainsi que le nombre de fortes pluies enregistrés au cours d'une année ont baissé. On peut en conclure que la baisse des précipitations s'explique par la diminution du nombre d'événements et de la hauteur précipitée au cours de chaque événement.

La baisse des précipitations a considérablement affecté le régime des écoulements des cours d'eau. Les débits moyens annuels ont proportionnellement plus diminué que le cumul des pluies annuelles. Le déficit moyen peut être évalué à -15% pour les cours de la partie sud du pays, contre -35% pour ceux du nord. Dans l'ensemble, les basses eaux ont été plus affectées que les hautes eaux qui bénéficieraient de l'amélioration des conditions de ruissellement sur les bassins.

Sur l'ensemble du XX<sup>ème</sup> siècle, comparativement aux sécheresses antérieures, et notamment celles des années 1910 et 1940, la sécheresse récente se différencie par son intensité plus marquée et sa durée plus longue. En effet, en dépit de quelques années humides enregistrées au cours de la décennie 90, la sécheresse continue au Cameroun, comme ailleurs en Afrique tropicale (L'Hôte et al., 2002) jusqu'au début des années 2000. On peut alors se demander quelles peuvent être les conséquences de cette récession climatique particulière sur les paramètres de référence établis à partir des données hydroclimatiques antérieures. Convient-il de faire l'hypothèse d'une modification durable du climat et d'établir de nouvelles normes à partir des données des trois dernières décennies, ou doit-on intégrer les données de cette période à celle des années antérieures ? Les analyses de situations précises du prochain chapitre apporteront les enseignements concrets des faits.

**CHAPITRE IV :           EVOLUTION DES NORMES  
HYDROPLUVIOMETRIQUES**

## 4.1 – INTRODUCTION

La notion de ‘norme’ est considérée ici sur le plan pratique. Elle se réfère à une règle fixant les conditions de l’exécution de projets dont on veut assurer la conformité aux conditions climatologiques moyennes ou à un niveau de protection déterminé. En effet, les projets d’aménagement basés sur l’eau sont en général dimensionnés en s’appuyant sur des normes établies à partir des observations de terrain. Nous venons de montrer au chapitre précédent que les précipitations et les écoulements sont globalement déficitaires au Cameroun. En raison de cette situation, des changements sont intervenus sur les modes d’utilisation et de gestion des ressources en eau mis au point ou adoptés au cours des périodes excédentaires. C’est ainsi que, dans le domaine de l’hydroélectricité, la retenue d’eau de la Mapé à Magba a été aménagée en 1984 sur le bassin de la Sanaga (d’autres sont en projet), pour améliorer la capacité de régulation de son débit d’étiage devenu de plus en plus faible. Sur le plan agricole, la construction de la retenue d’eau de Maga sur les rives du fleuve Logone dans le nord du pays en 1979 visait la réduction de la dépendance de l’agriculture vis-à-vis des précipitations. Paradoxalement à cette situation déficitaire, de nombreuses catastrophes liées aux crues et aux inondations ont été également enregistrées au Cameroun au cours de la même période. On peut citer le pont sur le Mayo Galké à Tcholliré dans le Nord, qui a été emporté en octobre 1999 par une crue dont la récurrence a été estimée à plus de 100 ans, les inondations du mois d’août 2000 dans la ville de Douala (avec destruction des ouvrages de drainage), à la suite de fortes précipitations (150 mm en deux jours), celles de juin 2001 à Limbé, dans la région du Mont Cameroun, suite à des précipitations évaluées à plus de 570 mm en deux jours.

Devant de telles situations, on peut s’interroger sur l’adéquation à la réalité, des références hydropluviométriques utilisées pour la réalisation des différents aménagements ? Pour évaluer les risques associés à la gestion des nouveaux projets, doit-on utiliser les anciennes normes ou en élaborer de nouvelles et sur quelles bases ? La situation sera discutée sur la base des données de l’étude.

On admet généralement qu’une moyenne statistique est d’autant plus proche de la réalité que la série à partir de laquelle elle a été déterminée est longue, mais on reconnaît par ailleurs qu’une chronique de 30 années d’observations est suffisante pour conduire à une moyenne convenable. Sur cette base l’Organisation Météorologique Mondiale (OMM) recommande que les normales soient déterminées sur une période de 30 ans. Les observations

hydroclimatiques sur l'ensemble du Cameroun n'ayant connu leur réel développement qu'au cours de la décennie 1940, les normes habituellement utilisées se réfèrent à la période 1951-1980. Les analyses des données hydroclimatiques actuellement disponibles nous permettront de vérifier si cette pratique cadre avec la réalité actuelle. En raison de la faible variation des paramètres de la température par rapport aux normales habituellement utilisées, nos analyses se limiteront ici aux données de mesures des précipitations et des débits des cours d'eau.

Les chroniques de données disponibles en pluviométrie couvrent la période 1940-2000. Deux options seront envisagées : les normales calculées régulièrement sur la base des 30 dernières années et celles basées sur toute la chronique disponible à un moment donné. Les chroniques disponibles en hydrologie sont plus courtes et portent sur des périodes de durée inférieure à 30 ans dans certains cas. Dans ces conditions, et malgré toutes les possibilités qu'offrent les statistiques, les normales calculées seront toujours entachées d'une incertitude non négligeable. Seules les chroniques couvrant au moins une trentaine d'années seront utilisées dans nos calculs. Cependant, pour tenir compte du contexte déficitaire que connaît le pays depuis le début des années 1970, la période 1971-1990 sera aussi analysée séparément, bien que de durée plus courte.

Les grandes lignes des méthodes utilisées seront rappelées avant d'aborder les analyses.

## **4.2 – METHODOLOGIE**

Le logiciel *Safarhy* – logiciel de calculs Statistique et d'Analyse Fréquentielle Adapté à l'évaluation du Risque en HYdrologie - (Lubès et al., 1995) a été utilisé pour la réalisation de l'ajustement des lois de probabilité aux différentes séries. Nous en rappelons brièvement les caractéristiques.

### **Le Logiciel Safarhy**

Le logiciel *Safarhy* regroupe un large éventail de lois et de méthodes d'ajustement dont l'usage montre qu'elles sont adaptées aux variables hydrologiques. Les lois utilisées sont les suivantes :

- les lois continues qui appartiennent à la famille des lois normales (normale, log. normale, racine carrée normale) ; à la famille des lois gamma (gamma, log.gamma) et à la famille des lois de valeurs extrêmes (Gumbel, log.Gumbel, Weibull, Jenkinson) ;

- les lois discrètes sont la loi géométrique et la loi binomiale négative tronquée ;
- les lois exponentielles et des fuites.

Sont calculés dans Safarhy :

- la moyenne arithmétique ;
- la moyenne harmonique ;
- la moyenne géométrique ;
- la médiane ;
- l'écart-type et le coefficient de variation correspondant si la moyenne arithmétique est significativement différente de zéro ;
- le coefficient de dissymétrie ;
- les quantiles ;
- le coefficient d'aplatissement.

Pour avoir une idée des dispersions d'échantillonnage, un certain nombre d'erreurs standards sont également calculées. L'erreur standard d'un estimateur sans biais est l'écart-type de la distribution d'échantillonnage de cet estimateur.

Le test d'adéquation des lois aux distributions empiriques est le test de  $\chi^2$ . La qualité de l'ajustement ainsi que son intervalle de confiance sont également appréciés au moyen des représentations graphiques.

#### **4.3 – ANALYSES DES PRECIPITATIONS**

Seuls les cumuls de précipitations annuelles seront analysés. Les variations des normales pluviométriques sont étudiées par la méthode suivante : calcul de la normale des périodes 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000 ; comparaison des cartes isohyètes de ces périodes entre elles. Détermination des moyennes à partir des données de la période 1941-2000, calcul des indices de variation relative entre cette moyenne et les quatre normales précédentes. Il paraît également intéressant de mettre en évidence les écarts relatifs entre la normale de référence (1951-1980) et les autres normales. Une représentation cartographique des différents indices permettra d'apprécier l'évolution de la situation sur l'ensemble du territoire.

### 4.3.1 – Comparaison des normales pluviométriques sur 30 ans

Il est d'usage de calculer les valeurs moyennes utilisées pour le tracé des cartes isohyètes sur des périodes de trente ans. Les cartes de la figure 4.1 présentent, sous forme de courbes isohyètes, les normales des périodes 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000 déterminées à partir des données disponibles. Les variations les plus importantes entre les différentes cartes sont observées dans la partie Nord du pays.

La normale 1941-1970 intègre la décennie sèche 1940 et les deux décennies humides 1950 et 1960, alors que celle de 1951-1980 intègre les 2 décennies humides et la décennie sèche 1970. Si sur la première carte (1941 –1970) la courbe isohyète 600 mm reste en dehors du territoire camerounais, elle est descendue d'environ 100 km et se retrouve au niveau de Kousseri (N'Djamena) dans la deuxième (1951 –1980). Ceci montre que la décennie 1940 était moins déficitaire dans la région que la décennie 1970.

La normale 1961-1990 intègre la décennie humide 1960 et les deux décennies sèches suivantes. La courbe isohyète 600 mm est alors descendue plus au sud et l'isohyète 1000 mm qui se trouvait au niveau de la localité de Mokolo dans les Monts Mandara sur les deux cartes précédentes, se retrouve au niveau de Garoua, soit un glissement vers le sud de près de 250 km. Dans le sud du pays, la région couverte par l'isohyète 1600 mm a considérablement diminué.

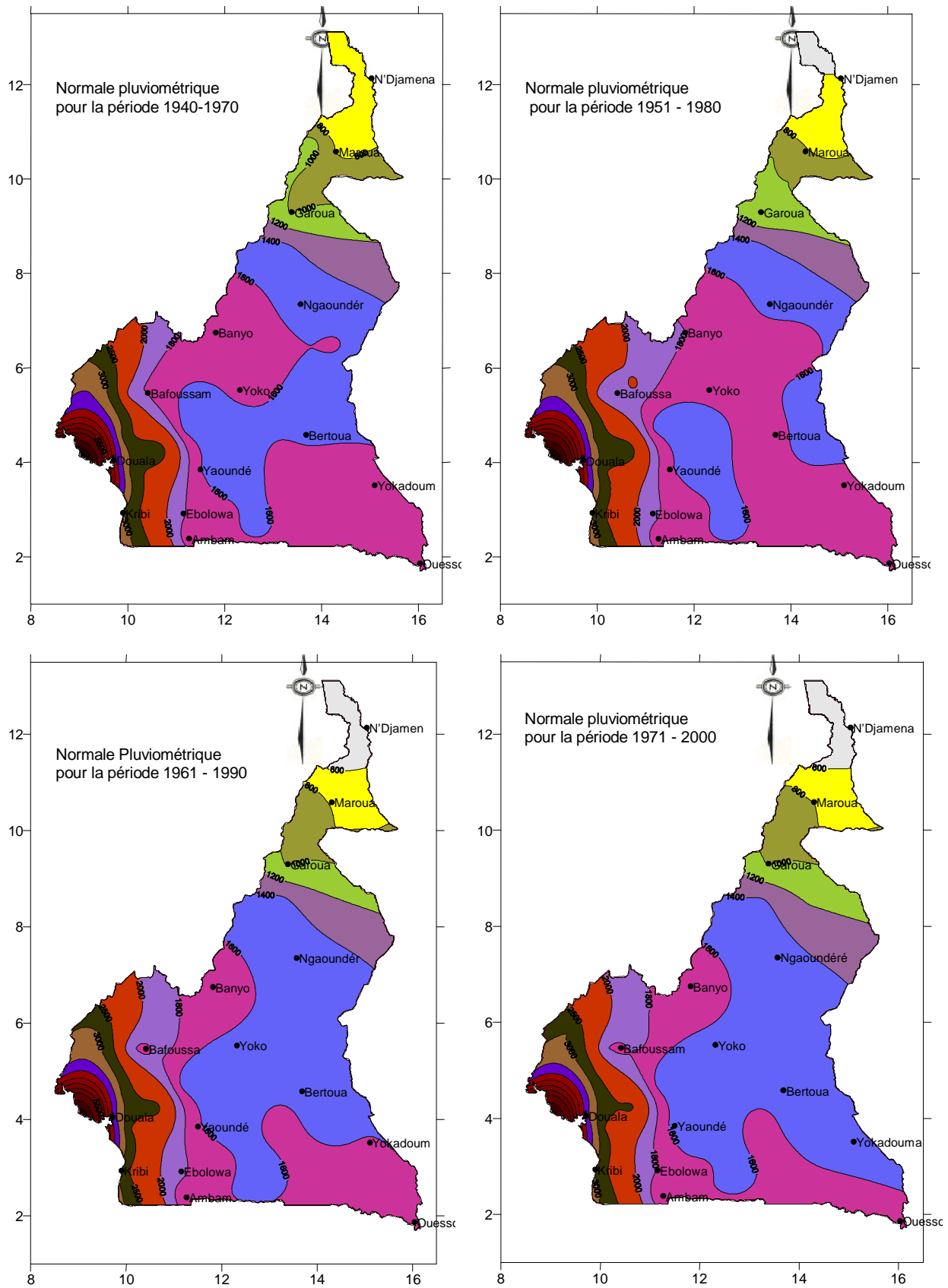
La normale 1971-2000 regroupe trois décennies déficitaires successives. On y observe une accentuation des modifications décrites au paragraphe précédent. La courbe isohyète 600 mm totalise désormais un glissement de l'ordre de 200 km vers le sud, alors que la région couverte par l'isohyète 1600 mm se rétrécit davantage au profit de l'isohyète 1400 mm.

Pour les quatre périodes étudiées, la forme générale des isohyètes est maintenue sur l'ensemble du pays, mais on note un glissement continu vers le sud, ce qui traduit un déficit pluviométrique. Pour les périodes 1961-1990 et 1971-2000, le déplacement vers le sud est de l'ordre de 200 km pour l'isohyète 600 mm, contre près de 250 km pour celle de 1000 mm. Dans le sud du pays, ce déficit se traduit essentiellement par une diminution progressive de la surface des régions précédemment encadrées par les isohyètes 1800-1600 mm au profit de celle encadrée par 1600-1400 mm.



Le glissement des isohyètes vers le Sud du pays pour les périodes 1961-1990 et 1971-2000, traduit un déficit pluviométrique par rapport aux années antérieures. Il bouscule ainsi l'organisation zonale des climats habituellement admise sur le territoire camerounais. Cependant, cette modification n'est réellement importante que dans la partie du pays au Nord de l'Adamaoua. Si l'on considère la limite sud (750 mm) de la zone sahélienne définie par Rodier (1964) par exemple, par rapport à la normale de la période 1941-1970, les cartes de la figure 4.1 montrent qu'elle se situe en dehors du Cameroun. La normale de la période 1951-1980 la situe par la suite légèrement au sud de Kousséri alors qu'elle se trouve au niveau de la région Mora-Maroua si l'on considère la normale 1971-2000. Cette délimitation situe de ce fait une bonne partie du territoire camerounais dans le Sahel alors qu'il en est exclu si l'on considère les précipitations antérieures. Par contre, si l'on considère plutôt la délimitation des régions proposée par Olivry (1986), ce glissement des isohyètes vers le Sud contribue essentiellement à la diminution de l'abondance des précipitations dans les différentes Zones qu'il a définies. Ainsi, la Zone N°8 (de précipitations comprises entre 400 et 900 mm) qui intègre la région Kousséri-Maroua que nous venons de décrire reste quasiment la même, sa limite sud ayant très peu varié. Il en va de même pour les autres subdivisions. Toutefois, la diminution des volumes annuels précipités peut atteindre 45% dans les zones N°7 et 8, comme on le verra au prochain chapitre, alors qu'elle est de l'ordre de 20% pour les autres régions dans le Sud du pays.

En définitive, si l'abondance des précipitations dans les régions climatiques définies par Olivry (1986) a globalement diminué, son organisation spatiale a très peu varié et peut encore être retenue. Toutefois, si les régimes hydrologiques du Cameroun sont calqués sur ceux des précipitations il n'en va pas forcément de même pour tous les autres éléments caractéristiques du climat. Des études complémentaires sont par conséquent indispensables pour permettre une définition des régions climatiques homogènes au regard de toutes les exigences climatiques et bioclimatiques. Outre les bilans hydriques, une telle entreprise devrait inclure des études de bilans d'énergie et de tous les autres paramètres qui déterminent les conditions d'équilibre des écosystèmes.



Echelle 1 : 13.500.000

Figure 4.1 : Normales (isohyètes en mm) pluviométriques 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000

### **4.3.2 – Comparaison de la normale 1951-1980 aux autres normales**

Il nous a paru intéressant de mettre en évidence les écarts relatifs entre la normale de référence (1951-1980) et les autres, y compris la valeur moyenne calculée sur la base de l'ensemble des données de la période d'observation 1941-2000. La figure 4.2 présente les résultats obtenus.

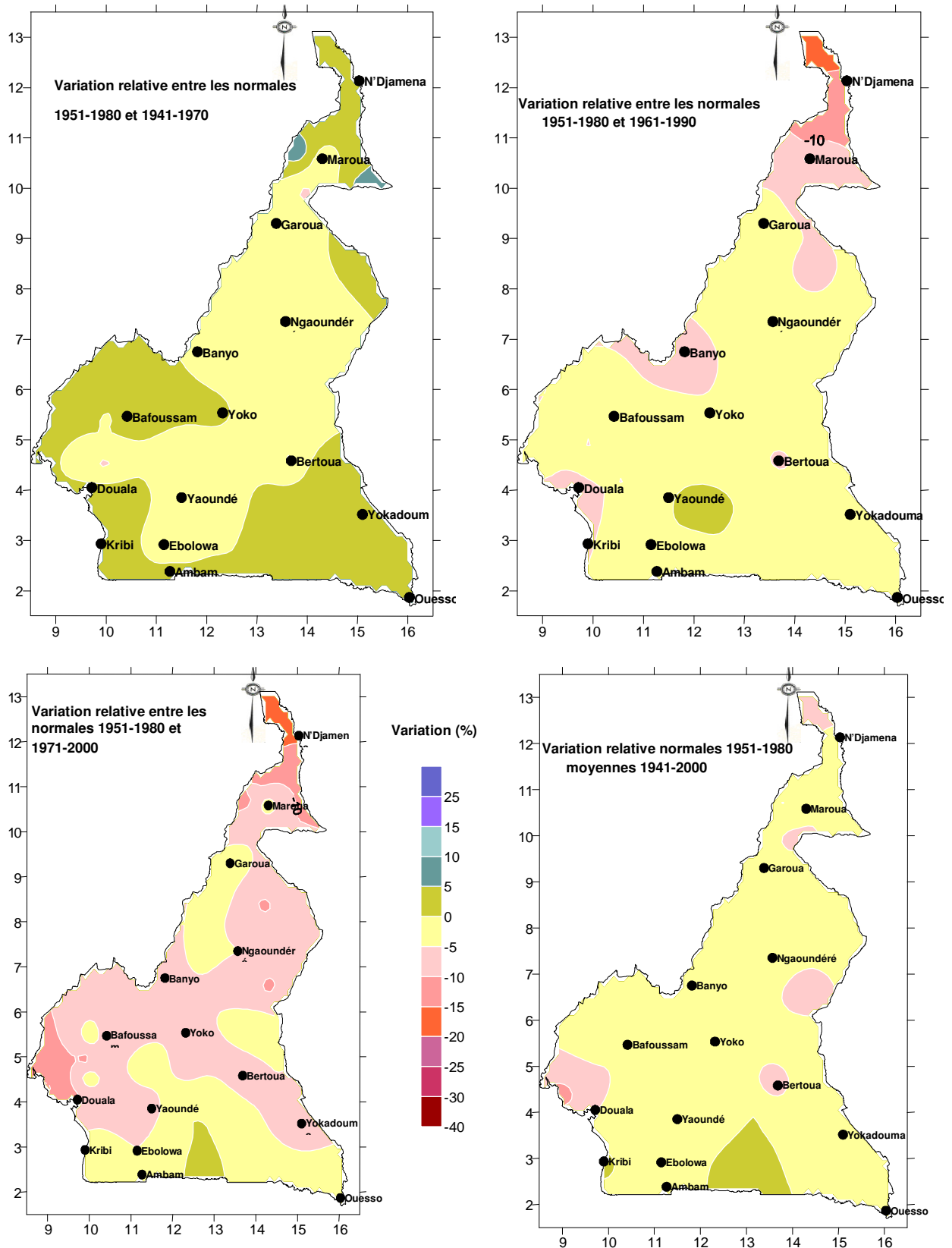
Les écarts entre les normales 1941-1970 et 1951-1980 sont relativement modestes. Ils sont compris entre -5 et +5% sur la quasi-totalité du territoire. La marge d'erreur qu'impliquerait l'utilisation de l'une à la place de l'autre est relativement faible. On peut en conclure qu'elles sont équivalentes.

Entre les normales 1961-1990 et 1951-1980, les écarts deviennent de plus en plus importants, notamment dans la partie Nord du pays où ils peuvent atteindre 20% (100 à 200 mm d'écart selon les régions). Les marges d'erreur deviennent de plus en plus importantes et l'interchangeabilité des normales présente un risque considérable.

Les différences sont encore plus importantes entre les normales 1971-2000 et 1951-1980. La plage représentant les écarts de 5 à 10 % entre les deux normales recouvre plus de la moitié du pays alors que la plage 10 à 15% intéresse tout l'extrême nord, la région du Mont Cameroun et une partie de la région montagneuse Ouest du pays.

Les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des données de la période d'observation (1941-2000) sont généralement plus faibles que celles de la période de référence habituelle. Les écarts entre les deux normales restent cependant modestes dans l'ensemble. Ils sont compris entre 0 et 5% et peuvent être considérés comme négligeables.

En définitive, seules les normales 1971-2000 se démarquent nettement des autres, ce qui souligne le caractère nettement déficitaire des trois dernières décennies.



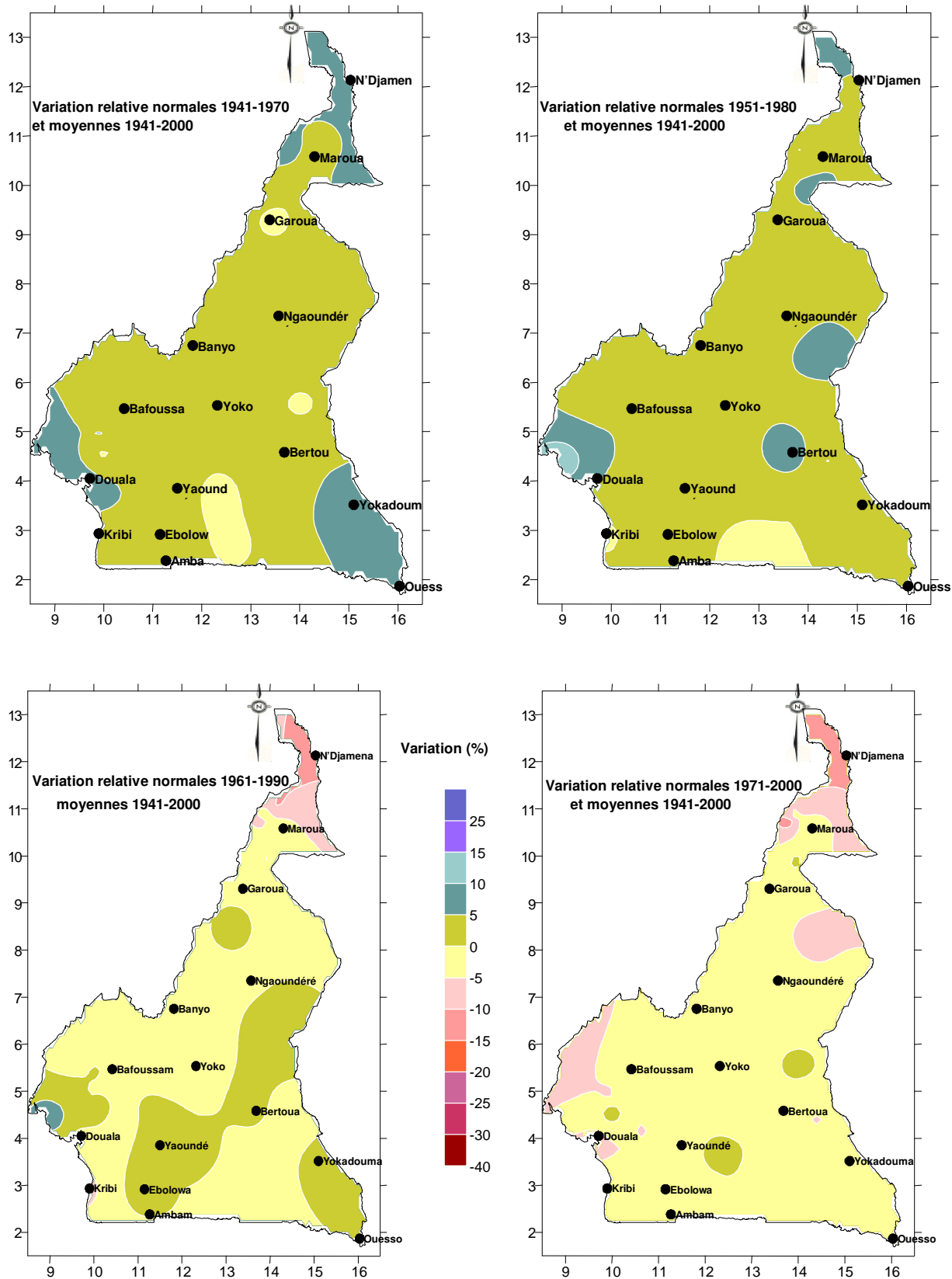
Echelle 1 : 13.500.000

Figure 4.2 : Variation relative entre la normale des précipitations annuelles 1951-1980, les normales 1941-1970, 1961-1990, 1971-2000 et la moyenne 1941-2000

### **4.3.3 – Comparaison des normales sur 30 ans aux valeurs moyennes 1941-2000**

La période 1941-2000 présente l'avantage statistique d'être plus longue et d'intégrer à la fois toutes les décennies sèches et humides de la période d'observation. Les cartes de la **figure 4.3** montrent les écarts entre les normales de cette période et celles calculées sur des périodes de 30 ans.

Les valeurs des normales 1941-1970 et 1951-1980 sont dans l'ensemble supérieures à la moyenne de la période 1941-2000, contrairement à celles des périodes 1961-1990 et 1971-2000. Cependant, en dehors de l'extrême Nord du pays et de quelques régions comme celle du Mont Cameroun et l'extrême sud-est, les écarts restent voisins de 5%. On peut en conclure que la moyenne calculée sur l'ensemble des données reste globalement plus proche des autres normales calculées sur des périodes de 30 ans.



Echelle 1 : 13.500.000

Figure 4.3 : Variation relative entre la moyenne des précipitations de la période 1941-2000 et les normales 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000

#### 4.3.4- Analyse des événements de diverses récurrences

Les analyses précédentes ont porté sur les valeurs moyennes. Les projets d'aménagement s'appuient également sur d'autres références qui sont variables en fonction du niveau de sécurité (période de retour de l'événement contre lequel on voudrait se prémunir par exemple) souhaité. La détermination du niveau de protection est basée sur des analyses économiques du couple investissements-dommages. Celles-ci sortent du cadre de cette étude. On peut cependant rappeler quelques récurrences habituellement utilisées dans le cadre des projets routiers au Cameroun. On admettra que les références sont identiques pour les précipitations et les écoulements :

- 10 ans pour les petits ouvrages de franchissement comme les buses et dalots,
- 20 à 50 ans pour les ponts de petite à moyenne importance,
- 100 ans pour les ponts de plus de 100 mètres.

Nous examinerons les conséquences du choix des échantillons de référence (données des périodes 1951-1980, 1941-2000 et 1971-2000), sur les décisions à prendre en matière de sécurité. Des lois statistiques sont ajustées aux différentes séries de données et les résultats sont analysés.

##### 4.3.4.1 – Comparaison des périodes 1941-2000 et 1951-1980

Sauf dans des cas rares, les quantiles calculés à partir des données de la période 1951-1980, qui intègre les décennies humides 1950 et 1960, sont supérieurs à ceux calculés avec les autres séries. Les variations relatives entre les pluies associées aux différentes récurrences calculées sur les deux périodes se présentent comme suit :

	<b>récurrences humides</b>	<b>récurrences sèches</b>
Pluies décennales 1951-1980 par rapport 1941-2000	0 à 5%	2 à 15%
Pluies vicennales 1951-1980 par rapport 1941-2000	0 à 8%	3 à 20%
Pluies cinquantennales 1951-1980 par rapport 1941-2000	0 à 10%	2 à 25%
Pluies centennales 1951-1980 par rapport 1941-2000	0 à 10%	2 à 35%

Les valeurs des pluies associées aux récurrences humides sur ces deux périodes sont en général plus proches que celles associées aux récurrences sèches. D'autre part, les différences sont d'autant plus importantes que les événements sont rares. Il semble par ailleurs qu'elles

soient plus importantes pour les stations présentant une rupture. Les figures 4.4 et 4.5 illustrent ces variations au niveau de quelques stations pluviométriques des différentes régions climatiques du pays.

#### 4.3.4.2 – Comparaison des périodes 1941-2000 et 1971-2000

Comme dans le cas précédent, les valeurs des pluies associées aux récurrences humides sur ces deux périodes sont en général plus proches que celles associées aux périodes sèches et les différences sont d'autant plus importantes que les événements sont rares. Dans l'ensemble, les quantiles calculés à partir des données de la période 1971-2000 sont inférieurs à ceux calculés sur la période 1941-2000. Les variations relatives entre les différents quantiles se présentent comme suit :

	<b>Humide</b>	<b>Sèche</b>
Pluies décennales 1971-2000 par rapport 1941-2000	0 à -10%	0 à -15%
Pluies vicennales 1971-2000 par rapport 1941-2000	0 à -10%	0 à -12%
Pluies cinquantennales 1971-2000 par rapport 1941-2000	0 à -15%	0 à -15%
Pluies centennales 1971-2000 par rapport 1941-2000	0 à -15%	0 à -20%

Les figures 4.4 et 4.5 illustrent les variations au niveau de quelques stations représentatives des différentes régions climatiques du pays. Nous donnons également dans le tableau 4.1, les valeurs absolues des hauteurs de précipitations de diverses récurrences à quelques postes répartis dans les différentes régions du pays, calculées sur l'ensemble de la période d'observation (1941-2000), la période récente (1971-1990) et sur la période de référence (1951-1980) habituellement utilisée.



**Tableau 4.1 : Hauteurs de précipitations annuelles (mm) de diverses récurrences à quelques postes répartis dans les différentes régions du pays**

Nom Station	Décennale			Vicennale			Cinquantennale			Centennale		
	1941-2000	1951-1980	1971-2000	1941-2000	1951-1980	1971-2000	1941-2000	1951-1980	1971-2000	1941-2000	1951-1980	1971-2000
<b>Récurrences Humides</b>												
Bamenda	2785	2829	<b>2513</b>	2894	2925	<b>2572</b>	3017	3033	<b>2631</b>	3099	3105	<b>2666</b>
Bertoua	1827	1902	<b>1740</b>	1910	1974	<b>1808</b>	2004	2055	<b>1884</b>	2066	2109	<b>1934</b>
Debundscha	13683	14410	<b>13641</b>	14660	15397	<b>15359</b>	15760	16508	<b>17552</b>	16494	17249	<b>19186</b>
Douala Avia	4619	4767	<b>4241</b>	4821	4952	<b>4412</b>	5049	5159	<b>4605</b>	5201	5298	<b>4733</b>
Garoua Ville	1183	1191	<b>1154</b>	1239	1243	<b>1202</b>	1303	1301	<b>1257</b>	1346	1340	<b>1293</b>
Kribi	3538	3446	<b>3549</b>	3718	3607	<b>3749</b>	3919	3788	<b>3974</b>	4054	3908	<b>4125</b>
Maroua Agri	984	956	<b>1015</b>	1052	995	<b>1093</b>	1133	1040	<b>1188</b>	1191	1070	<b>1256</b>
Ngaoundéré	1717	1749	<b>1672</b>	1777	1803	<b>1726</b>	1845	1864	<b>1787</b>	1890	1904	<b>1827</b>
Sangmelima	1967	1987	<b>1873</b>	2054	2073	<b>1938</b>	2152	2169	<b>2012</b>	2218	2233	<b>2061</b>
Yaoundé	1863	1859	<b>1837</b>	1947	1928	<b>1945</b>	2042	2006	<b>2073</b>	2106	2057	<b>2164</b>
N'Djamena	762	777	<b>677</b>	817	826	<b>724</b>	879	881	<b>777</b>	920	918	<b>812</b>
<b>Récurrences Sèches</b>												
Bamenda	2013	2153	<b>1850</b>	1903	2057	<b>1706</b>	1780	1949	<b>1524</b>	1698	1878	<b>1390</b>
Bertoua	1241	1395	<b>1264</b>	1157	1323	<b>1197</b>	1064	1242	<b>1121</b>	1001	1188	<b>1070</b>
Debundscha	6787	7447	<b>5909</b>	5809	6459	<b>5248</b>	4709	5349	<b>4592</b>	3976	4608	<b>4201</b>
Douala Avia	3191	3467	<b>3035</b>	2988	3282	<b>2864</b>	2761	3075	<b>2672</b>	2609	2936	<b>2544</b>
Garoua Ville	782	828	<b>811</b>	726	776	<b>762</b>	662	718	<b>708</b>	619	679	<b>671</b>
Kribi	2273	2311	<b>2137</b>	2094	2150	<b>1937</b>	1892	1969	<b>1712</b>	1758	1849	<b>1562</b>
Maroua Agri	617	677	<b>602</b>	577	637	<b>559</b>	536	593	<b>514</b>	510	563	<b>486</b>
Ngaoundéré	1290	1368	<b>1291</b>	1230	1314	<b>1237</b>	1162	1254	<b>1176</b>	1117	1213	<b>1136</b>
Sangmelima	1351	1385	<b>1411</b>	1264	1299	<b>1345</b>	1166	1203	<b>1271</b>	1100	1139	<b>1222</b>
Yaoundé	1267	1372	<b>1229</b>	1182	1303	<b>1161</b>	1087	1226	<b>1089</b>	1023	1174	<b>1043</b>
N'Djamena	376	432	<b>345</b>	321	383	<b>298</b>	259	328	<b>245</b>	218	291	<b>209</b>

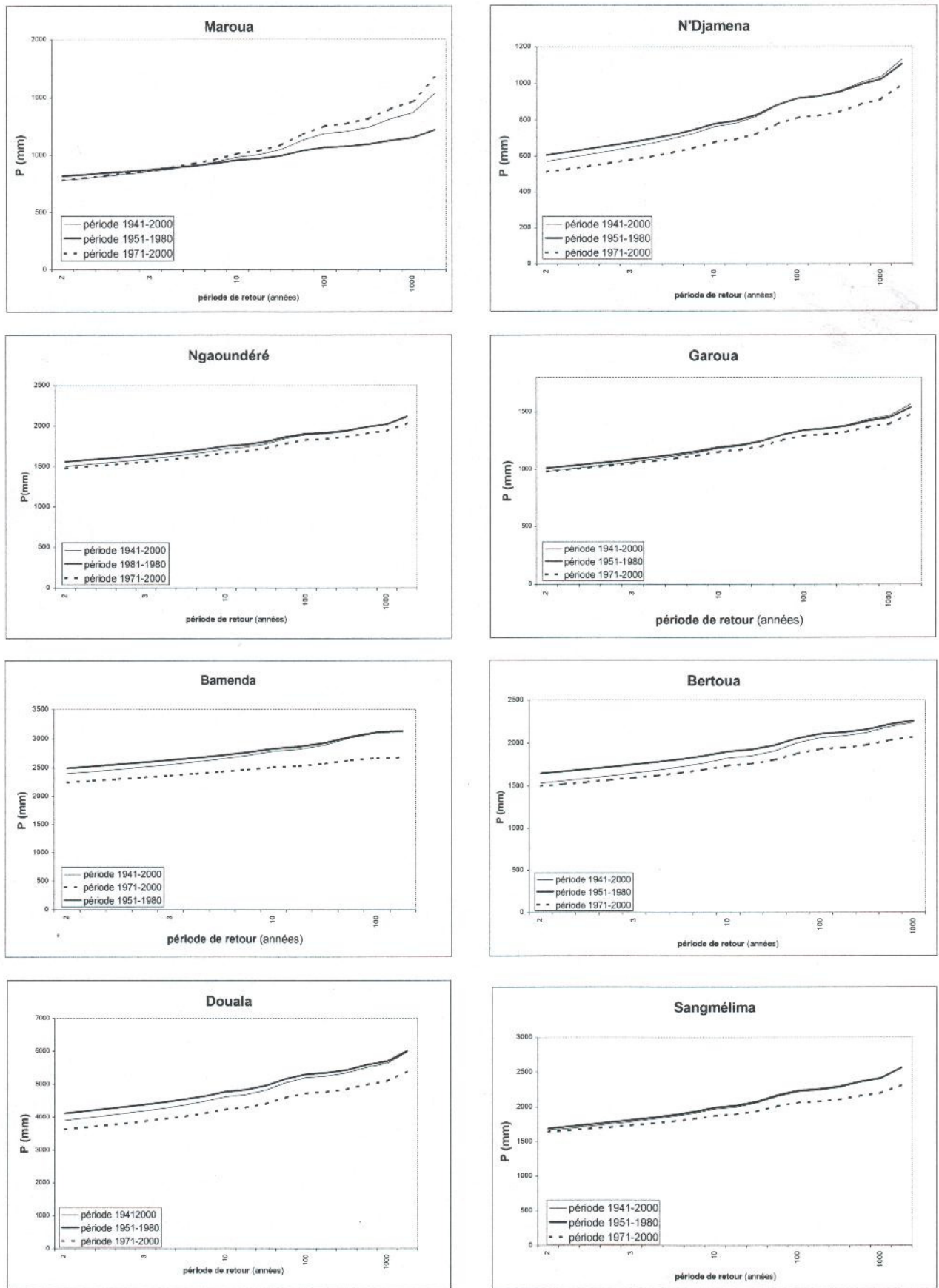


Figure 4.4 : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour les récurrences humides à quelques stations représentatives des différentes régions du Cameroun.

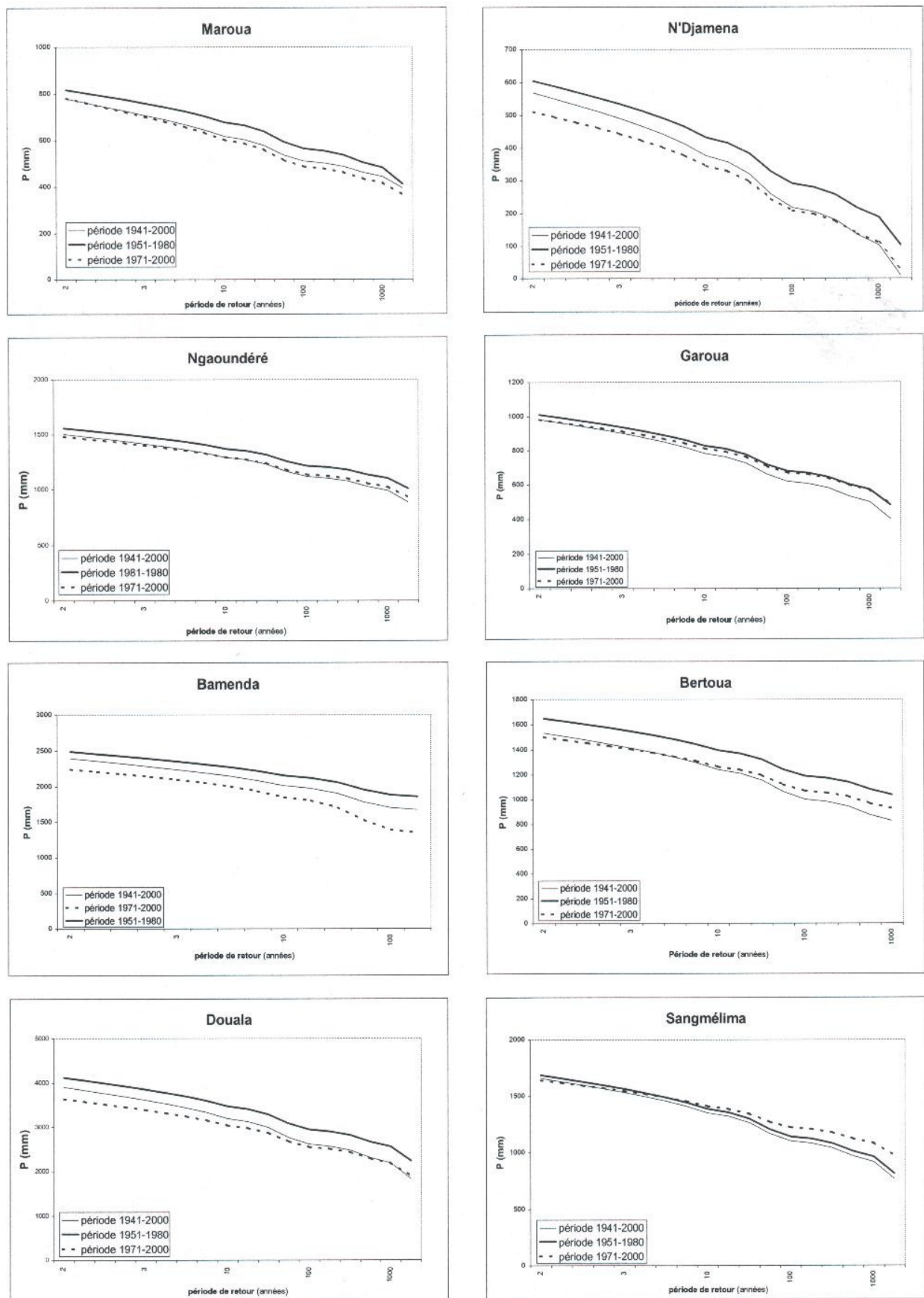


Figure 4.5 : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour les récurrences sèches à quelques stations représentatives des différentes régions du Cameroun.

Sur le plan de la statistique, les différences entre quantiles sont telles qu'une pluie de récurrence décennale calculée à partir des données de la période 1951-1980 peut être supérieure à la pluie de récurrence cinquantennale calculée à partir de celles de la période 1971-2000. L'incidence du choix de l'une ou l'autre série pour les calculs relatifs aux projets d'investissement est donc considérable. La question est d'autant plus délicate que dans le cas de certaines stations, les séries de données dont on dispose couvrent de courtes périodes qui peuvent être situées avant ou après 1970. Dans ces conditions, et malgré toutes les possibilités qu'offrent les statistiques, les résultats que l'on obtiendrait à partir de telles séries seront toujours entachés d'une incertitude non négligeable. La situation est plus préoccupante pour les écoulements comme on va le voir dans la suite.

#### **4.4 – ANALYSES DES ECOULEMENTS**

Les séries hydrométriques disponibles pour l'étude portent sur des périodes d'observation beaucoup plus courtes (situées grosso modo entre 1950-1990), que dans le cas de la pluviométrie. Dans ces conditions les analyses comparatives se limiteront aux quantiles calculés sur l'ensemble des chroniques disponibles à chaque station (1950-1990), et ceux calculés sur la période récente (1971-1990).

Les variables étudiées sont les modules et les débits caractéristiques des hautes et basses eaux. Des ajustements de loi de probabilité ont été réalisés sur les différentes variables au moyen du logiciel Safarhy, tels que décrits précédemment.

##### **4.4.1- Analyse des débits moyens annuels**

D'une manière générale, les valeurs de débit associées aux différentes récurrences calculées à partir des données de la période 1971-2000 sont inférieures à celles calculées sur la période 1950-1990. Les différences sont sensiblement les mêmes pour les récurrences sèches et humides. Généralement plus importantes que dans le cas des précipitations, elles se situent autour de -10% pour les cours d'eau situés dans le sud du pays et varient de -15 à -30% pour ceux du Nord. En terme de probabilité, les différences entre quantiles sont telles que la valeur du débit moyen annuel de récurrence décennale calculée à partir des données de la période 1950-1990 peut être supérieure à celle du débit de récurrence centennale, voire millennale, calculée à partir de la série 1971-1990.

Les figures 4.6 et 4.7 illustrent la distribution des fréquences des débits moyens de quelques cours d'eau de différentes régions climatiques du pays, pour les récurrences humides et sèches. Nous donnons également dans le tableau 4.2, la valeur absolue des débits moyens annuels de diverses récurrences sur quelques cours d'eau de différentes régions du Cameroun, calculées sur l'ensemble la période d'observation (1950-1990) et sur la période récente (1971-1990). Il va de soit que la signification des valeurs du tableau doit être nuancée en fonction de la longueur des séries utilisées, et notamment celles de la période récente pour laquelle la taille des échantillons utilisés est généralement modeste, soit une vingtaine d'année dans le meilleur des cas et seulement 15 d'années dans la plupart des cas. Noter toutefois, qu'il est généralement admis qu'une chronique de données peut être utilisée pour calculer un quantile de récurrence égale à 3 fois la taille de l'échantillon.

**Tableau 4.2 : Débits moyens annuels (m<sup>3</sup>/s) de diverses récurrences par rapport aux périodes d'observation 1950-1990 et 1971-1990, à quelques stations de différentes régions du Cameroun**

Rivière et station	Décennale		Vicennale		Cinquantennale		Centennale	
	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990
<b>Récurrences Humides</b>								
Kadéi à Batouri	136	<b>131</b>	143	<b>138</b>	150	<b>145</b>	155	<b>150</b>
Dja à Somalomo	82,3	<b>75,8</b>	87	<b>79,8</b>	92,2	<b>84,2</b>	95,8	<b>87,2</b>
Doumé à Doumé	7,78	<b>7,1</b>	8,37	<b>7,64</b>	9,1	<b>8,3</b>	9,62	<b>8,77</b>
Lokoundjé à Lolodorf	37,4	<b>37,6</b>	40	<b>39,9</b>	42,9	<b>42,6</b>	44,8	<b>44,4</b>
Ntem à Ngoazik	338	<b>288</b>	360	<b>303</b>	384	<b>320</b>	400	<b>331</b>
Seng à Assoseng	9,08	<b>9,14</b>	9,62	<b>9,91</b>	10,2	<b>10,9</b>	10,7	<b>11,6</b>
Nyong à Ayos	71,4	<b>67,9</b>	76	<b>75,6</b>	81,3	<b>85,4</b>	84,7	<b>92,5</b>
Nyong à Mbalmayo	187	<b>175</b>	198	<b>185</b>	210	<b>197</b>	219	<b>205</b>
Nyong à Déhané	546	<b>491</b>	577	<b>520</b>	613	<b>555</b>	636	<b>578</b>
Nkam à Mélong	83,4	<b>76,4</b>	87,3	<b>80,2</b>	91,6	<b>84,3</b>	94,6	<b>87,1</b>
Wouri à Yabassi	364	<b>354</b>	382	<b>373</b>	401	<b>394</b>	414	<b>408</b>
Lobé à Kribi	127	<b>132</b>	134	<b>140</b>	142	<b>150</b>	147	<b>185</b>
Mapé à Magba	113	<b>104</b>	120	<b>110</b>	127	<b>117</b>	131	<b>122</b>
Vina Sud à Lahoré	42,8	<b>41,2</b>	45,1	<b>43,9</b>	47,6	<b>46,8</b>	49,3	<b>48,8</b>
Lom à Bétaré Oya	202	<b>185</b>	214	<b>193</b>	228	<b>203</b>	238	<b>209</b>
<b>Récurrences sèches</b>								
Kadéi à Batouri	89,1	<b>83,4</b>	82,5	<b>76,7</b>	75	<b>69,1</b>	70	<b>64,1</b>
Dja à Somalomo	49,3	<b>47,7</b>	44,6	<b>43,7</b>	39,4	<b>39,2</b>	35,9	<b>36,2</b>
Doumé à Doumé	4,62	<b>4,23</b>	4,29	<b>3,93</b>	3,95	<b>3,62</b>	3,74	<b>3,43</b>
Lokoundjé à Lolodorf	19,2	<b>20,8</b>	16,6	<b>18,4</b>	13,7	<b>15,7</b>	11,8	<b>13,9</b>
Ntem à Ngoazik	187	<b>184</b>	166	<b>169</b>	142	<b>152</b>	126	<b>141</b>
Seng à Assoseng	5,23	<b>5,15</b>	4,68	<b>4,75</b>	4,07	<b>4,34</b>	3,66	<b>4,08</b>
Nyong à Ayos	38,7	<b>31,8</b>	34	<b>30,7</b>	28,8	<b>25,3</b>	25,3	<b>23,3</b>
Nyong à Mbalmayo	110	<b>101</b>	99,2	<b>90,5</b>	86,9	<b>78,7</b>	78,7	<b>70,9</b>
Nyong à Déhané	325	<b>315</b>	294	<b>294</b>	259	<b>272</b>	235	<b>258</b>
Nkam à Mélong	55,9	<b>50,2</b>	52	<b>46,5</b>	47,6	<b>42,3</b>	44,7	<b>39,5</b>
Wouri à Yabassi	242	<b>223</b>	224	<b>205</b>	205	<b>184</b>	192	<b>170</b>
Lobé à Kribi	78,1	<b>71,9</b>	71,1	<b>63,4</b>	63,3	<b>53,8</b>	58,1	<b>47,5</b>
Mapé à Magba	69,3	<b>60,1</b>	63	<b>53,9</b>	56	<b>46,9</b>	51,3	<b>42,3</b>
Vina Sud à Lahoré	26,9	<b>22,7</b>	24,7	<b>20</b>	22,1	<b>17,1</b>	20,4	<b>15,1</b>
Lom à Bétaré Oya	136	<b>126</b>	129	<b>118</b>	121	<b>108</b>	116	<b>102</b>

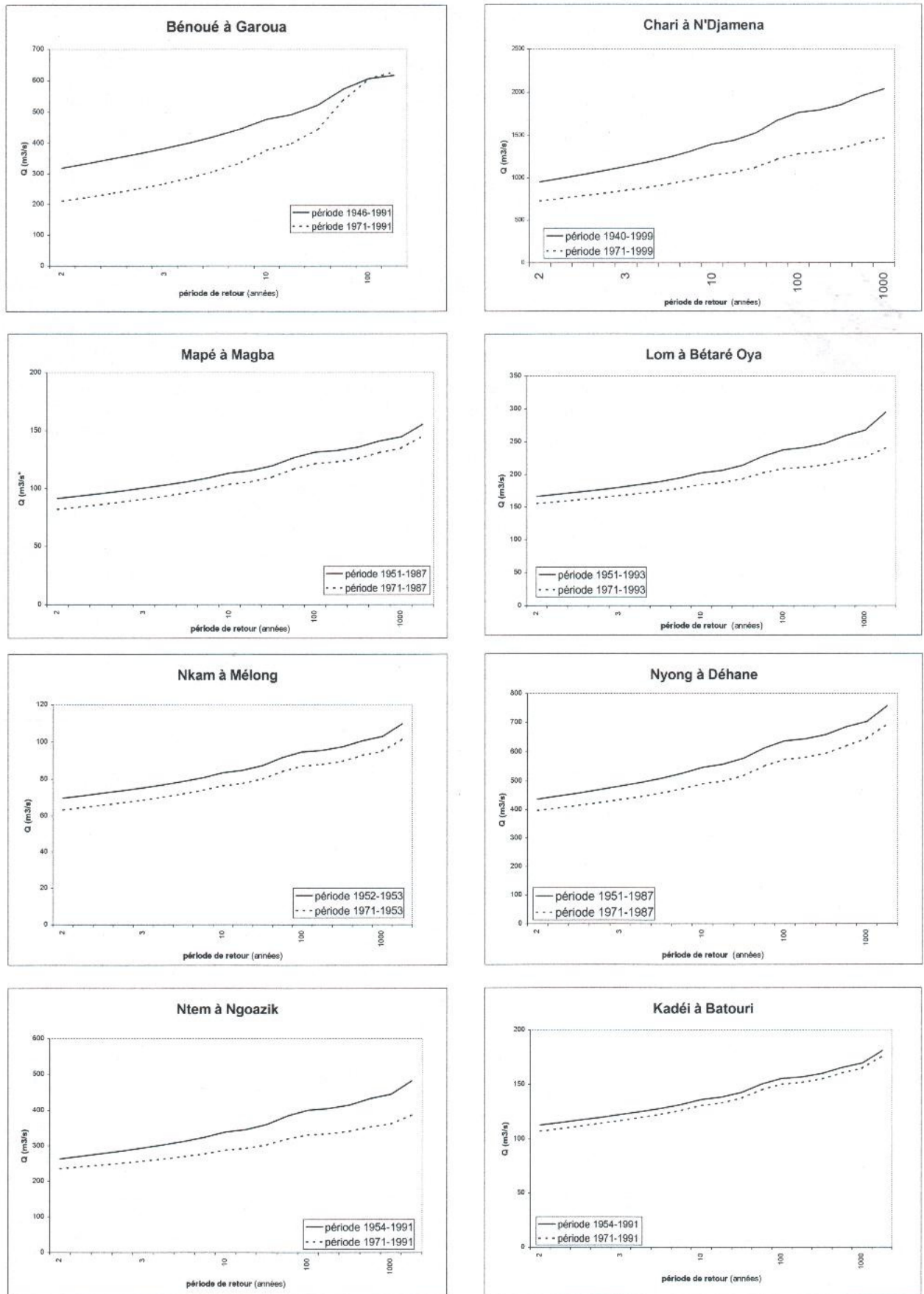


Figure 4.6 : Débits annuels en fonction des périodes de retour pour les récurrences humides à quelques stations hydrométriques dans différentes régions du Cameroun.



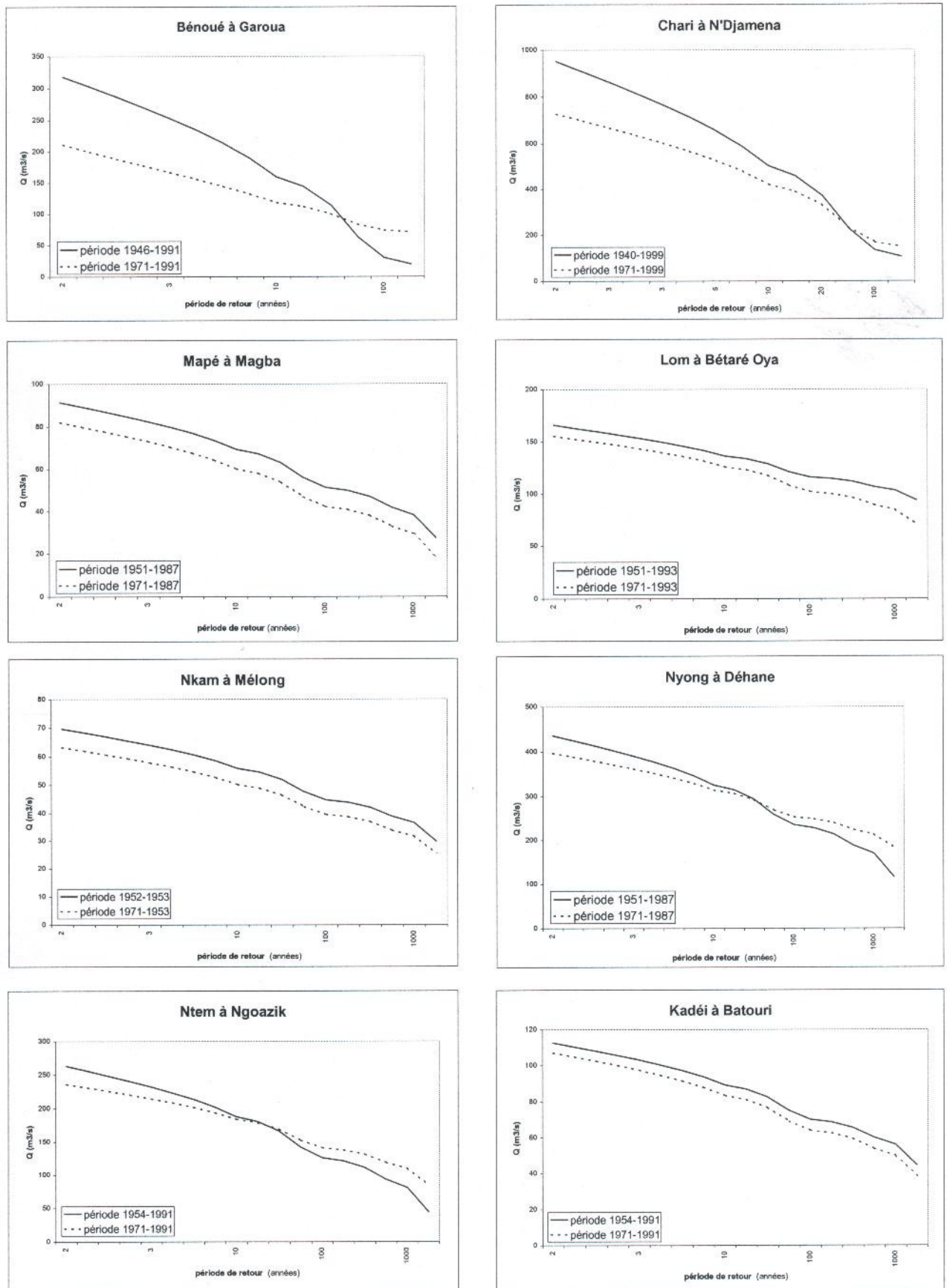


Figure 4.7 : Débits annuels en fonction des périodes de retour pour les récurrences sèches à quelques stations hydrométriques dans différentes régions du Cameroun.



#### 4.4.2- Analyse des débits caractéristiques

Les débits caractéristiques étudiés sont : le débit moyen journalier minimum annuel ( $Q_{\min}$ ), le débit moyen journalier maximum annuel ( $Q_{\max}$ ), le débit non dépassé pendant 10 jours de l'année (DCE), le débit atteint ou dépassé pendant 10 jours de l'année (DCC), les débits respectivement non dépassés pendant 1, 3 et 6 mois (DC1, DC3 et DC6 ) ainsi que les débits respectivement atteints ou dépassés 1 mois et 3 mois de l'année (DC11 et DC9). Des ajustements de loi de probabilité ont été réalisés sur ces différentes variables au moyen du logiciel Safarhy.

Comme dans le cas des paramètres précédents, les valeurs de débit associées aux différentes récurrences calculées sur la période 1950-1990 sont en général supérieures à celles calculées sur la période 1971-1990. Les différences entre les résultats obtenus à partir des paramètres relatifs aux basses eaux sont sensiblement supérieures à celles calculées entre les paramètres des hautes eaux. Dans le Nord du pays, les différences entre les paramètres des basses eaux peuvent atteindre -30% contre -10% dans le Sud pour les événements de récurrence 10 à 20 ans, -60% dans le Nord contre -30% dans le Sud pour les événements plus rares. Entre les paramètres des hautes eaux, les différences sont en général inférieures à -10% pour les récurrences de 10 à 50 ans dans le Sud, mais peuvent atteindre -20% dans le Nord pour les mêmes récurrences.

La différence observée entre l'évolution des paramètres des hautes eaux et ceux des basses eaux découle du fait que les premières bénéficient de l'amélioration des conditions de ruissellement sur les bassins. En effet, les relations pluie-débit sur les bassins versants sont telles que les effets de l'augmentation du coefficient de ruissellement de 10 à 15% par exemple (processus fort probable à cours terme sur les bassins versants de moins de 1000 km<sup>2</sup>), sont comparables à ceux qu'induirait une pluie millennale au débit de pointe, par rapport à la pluie décennale. Une augmentation du coefficient de ruissellement du bassin versant peut par conséquent contribuer à un accroissement des débits maxima qui masque la baisse consécutive au déficit des précipitations.

Les figures 4.8 et 4.9 illustrent la distribution des fréquences des débits moyens maximum et minimum annuels de quelques cours d'eau de différentes régions climatiques du pays, pour les récurrences sèches et humides. Nous donnons également dans les tableaux 4.3 et 4.4, les

valeurs absolues des débits maximums et minimums annuels de diverses fréquences (réurrences sèche et humide), calculés sur la période récente (1971-1990) et sur la période complète d'observation (décennies 50 à 80), pour quelques stations dans différentes régions du Cameroun. Il convient de rappeler que la signification des valeurs du tableau doit être nuancée en tenant compte de la longueur des séries utilisées, et notamment celles de la période récente pour la quelle la taille des échantillons est comprise entre 15 et 20 ans.

**Tableau 4. 3 : Débits maximums annuels (m<sup>3</sup>/s) de diverses réurrences par rapport aux périodes d'observation 1950-1990 et 1971-1990, à quelques stations de différentes régions du Cameroun**

Rivière et station	Décennale		Vicennale		Cinquantennale		Centennale	
	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990
<b>Réurrences humides</b>								
Kadéi à Batouri	389	<b>394</b>	410	<b>419</b>	433	<b>447</b>	449	<b>465</b>
Dja à Somalomo	216	<b>202</b>	227	<b>211</b>	239	<b>220</b>	247	<b>226</b>
Doumé à Doumé	18,2	<b>18,1</b>	19,4	<b>19</b>	20,8	<b>20</b>	21,8	<b>20,6</b>
Lokoundjé à Lolodorf	194	<b>219</b>	220	<b>246</b>	253	<b>282</b>	277	<b>308</b>
Ntem à Ngoazik	989	<b>1006</b>	1055	<b>1079</b>	1132	<b>1166</b>	1186	<b>1226</b>
Seng à Assoseng	38,7	<b>39,5</b>	40,6	<b>41,6</b>	42,7	<b>43,9</b>	44,1	<b>45,5</b>
Nyong à Ayos	203	<b>198</b>	214	<b>210</b>	228	<b>223</b>	237	<b>232</b>
Nyong à Mbalmayo	475	<b>472</b>	500	<b>497</b>	528	<b>525</b>	547	<b>544</b>
Nyong à Déhané	1670	<b>1702</b>	1755	<b>1785</b>	1850	<b>1878</b>	1914	<b>1940</b>
Nkam à Mélong	340	<b>359</b>	360	<b>386</b>	382	<b>417</b>	396	<b>437</b>
Wouri à Yabassi	1899	<b>2010</b>	2021	<b>2158</b>	2159	<b>2325</b>	2251	<b>2436</b>
Lobé à Kribi	479	<b>497</b>	504	<b>523</b>	533	<b>553</b>	551	<b>572</b>
Mapé à Magba	512	<b>413</b>	548	<b>435</b>	588	<b>460</b>	614	<b>477</b>
Vina Sud à Lahoré	141	<b>140</b>	149	<b>151</b>	158	<b>165</b>	164	<b>174</b>
Lom à Bétaré Oya	675	<b>684</b>	717	<b>731</b>	769	<b>786</b>	805	<b>824</b>
<b>Réurrences sèches</b>								
Kadéi à Batouri	244	<b>220</b>	223	<b>196</b>	200	<b>168</b>	185	<b>149</b>
Dja à Somalomo	140	<b>144</b>	129	<b>135</b>	117	<b>126</b>	108	<b>120</b>
Doumé à Doumé	11,8	<b>11,9</b>	11,1	<b>11</b>	10,4	<b>10,1</b>	9,88	<b>9,39</b>
Lokoundjé à Lolodorf	81,5	<b>93,8</b>	72,1	<b>83,2</b>	62,8	<b>72,7</b>	57,2	<b>66,4</b>
Ntem à Ngoazik	599	<b>580</b>	554	<b>532</b>	506	<b>481</b>	476	<b>449</b>
Seng à Assoseng	25,6	<b>24,6</b>	23,8	<b>22,5</b>	21,7	<b>20,2</b>	20,3	<b>18,6</b>
Nyong à Ayos	118	<b>113</b>	106	<b>101</b>	92,6	<b>87,4</b>	83,6	<b>78,4</b>
Nyong à Mbalmayo	298	<b>297</b>	274	<b>272</b>	245	<b>244</b>	227	<b>225</b>
Nyong à Déhané	1073	<b>1118</b>	989	<b>1035</b>	893	<b>942</b>	830	<b>880</b>
Nkam à Mélong	201	<b>168</b>	182	<b>141</b>	160	<b>110</b>	145	<b>90,1</b>
Wouri à Yabassi	1036	<b>966</b>	914	<b>818</b>	776	<b>651</b>	684	<b>540</b>
Lobé à Kribi	302	<b>310</b>	277	<b>284</b>	249	<b>254</b>	230	<b>234</b>
Mapé à Magba	261	<b>257</b>	226	<b>235</b>	186	<b>210</b>	159	<b>193</b>
Vina Sud à Lahoré	85	<b>74,7</b>	77,1	<b>67,6</b>	68,2	<b>60,2</b>	62,3	<b>55,6</b>
Lom à Bétaré Oya	438	<b>410</b>	411	<b>378</b>	384	<b>345</b>	367	<b>324</b>

**Tableau 4.4 : Débits minimums annuels (m<sup>3</sup>/s) de diverses récurrences par rapport aux périodes d'observation 1950-1990 et 1971-1990 à quelques stations de différentes régions du Cameroun**

Rivière et station	Décennale		Vicennale		Cinquantennale		Centennale	
	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990	1950-1990	1971-1990
<b>Récurrences humides</b>								
Kadéi à Batouri	56,3	<b>48,9</b>	60,5	<b>53,8</b>	65,2	<b>59,7</b>	68,3	<b>63,8</b>
Dja à Somalomo	24,1	<b>17,4</b>	29,3	<b>20,4</b>	36,6	<b>24,4</b>	42,4	<b>27,5</b>
Doumé à Doumé	2,89	<b>2,86</b>	3,5	<b>3,56</b>	4,35	<b>4,45</b>	5,02	<b>5,12</b>
Lokoundjé à Lolodorf	5,37	<b>5,49</b>	6,24	<b>5,99</b>	7,42	<b>6,56</b>	8,33	<b>6,94</b>
Ntem à Ngoazik	73,5	<b>59,7</b>	86,3	<b>65,1</b>	103	<b>71,3</b>	117	<b>75,5</b>
Seng à Assoseng	0,79	<b>0,45</b>	0,88	<b>0,54</b>	0,99	<b>0,65</b>	1,06	<b>0,73</b>
Nyong à Ayos	15,3	<b>10,7</b>	18,5	<b>13,1</b>	22,6	<b>16,2</b>	25,6	<b>18,5</b>
Nyong à Mbalmayo	46,2	<b>37,2</b>	54,7	<b>43,9</b>	65,2	<b>52,3</b>	72,9	<b>58,4</b>
Nyong à Déhané	128	<b>111</b>	152	<b>123</b>	184	<b>137</b>	209	<b>146</b>
Nkam à Mélong	13,7	<b>12,8</b>	14,3	<b>13,5</b>	15,1	<b>14,3</b>	15,6	<b>14,8</b>
Wouri à Yabassi	59,7	<b>55,3</b>	63,5	<b>59,2</b>	67,9	<b>63,6</b>	70,8	<b>66,5</b>
Lobé à Kribi	12,1	<b>10,7</b>	13,4	<b>11,4</b>	15,1	<b>12,2</b>	16,3	<b>12,7</b>
Mapé à Magba	4,33	<b>2,48</b>	5,23	<b>3,04</b>	6,37	<b>3,82</b>	7,21	<b>4,45</b>
Vina Sud à Lahoré	5,88	<b>5</b>	6,41	<b>5,48</b>	7,01	<b>6,03</b>	7,41	<b>6,39</b>
Lom à Bétaré Oya	43,6	<b>20</b>	53,2	<b>22,1</b>	66,5	<b>24,6</b>	77,2	<b>26,5</b>
<b>Récurrences sèches</b>								
Kadéi à Batouri	26,8	<b>22,4</b>	22,6	<b>19,7</b>	17,9	<b>17</b>	14,8	<b>15,3</b>
Dja à Somalomo	6,03	<b>5,68</b>	4,95	<b>4,84</b>	3,97	<b>4,05</b>	3,42	<b>3,59</b>
Doumé à Doumé	0,72	<b>0,29</b>	0,59	<b>0,18</b>	0,46	<b>0,1</b>	0,39	<b>0,06</b>
Lokoundjé à Lolodorf	1,97	<b>1,94</b>	1,73	<b>1,43</b>	1,51	<b>0,86</b>	1,38	<b>0,49</b>
Ntem à Ngoazik	23,6	<b>20,9</b>	20,1	<b>15,4</b>	16,8	<b>9,22</b>	14,9	<b>5,09</b>
Seng à Assoseng	0,1	<b>0,08</b>	0	<b>0,06</b>	0	<b>0,04</b>	0	<b>0,03</b>
Nyong à Ayos	2,38	<b>1,34</b>	1,65	<b>0,87</b>	1,04	<b>0,51</b>	0,74	<b>0,35</b>
Nyong à Mbalmayo	9,69	<b>7,91</b>	7,21	<b>5,91</b>	5,02	<b>4,14</b>	3,87	<b>3,2</b>
Nyong à Déhané	38,2	<b>24,1</b>	32,2	<b>11,9</b>	26,6	<b>0</b>	23,4	<b>0</b>
Nkam à Mélong	9,13	<b>7,89</b>	8,49	<b>7,2</b>	7,76	<b>6,42</b>	7,27	<b>5,9</b>
Wouri à Yabassi	32,5	<b>27,9</b>	28,6	<b>24</b>	24,3	<b>19,7</b>	21,4	<b>16,7</b>
Lobé à Kribi	5,86	<b>5,84</b>	5,29	<b>5,15</b>	4,71	<b>4,37</b>	4,36	<b>3,85</b>
Mapé à Magba	0,68	<b>0,69</b>	0,47	<b>0,6</b>	0,3	<b>0,51</b>	0,21	<b>0,46</b>
Vina Sud à Lahoré	2,12	<b>1,59</b>	1,59	<b>1,11</b>	0,99	<b>0,56</b>	0,59	<b>0,2</b>
Lom à Bétaré Oya	10,8	<b>10,1</b>	8,81	<b>9,11</b>	7,05	<b>8,17</b>	6,07	<b>7,59</b>

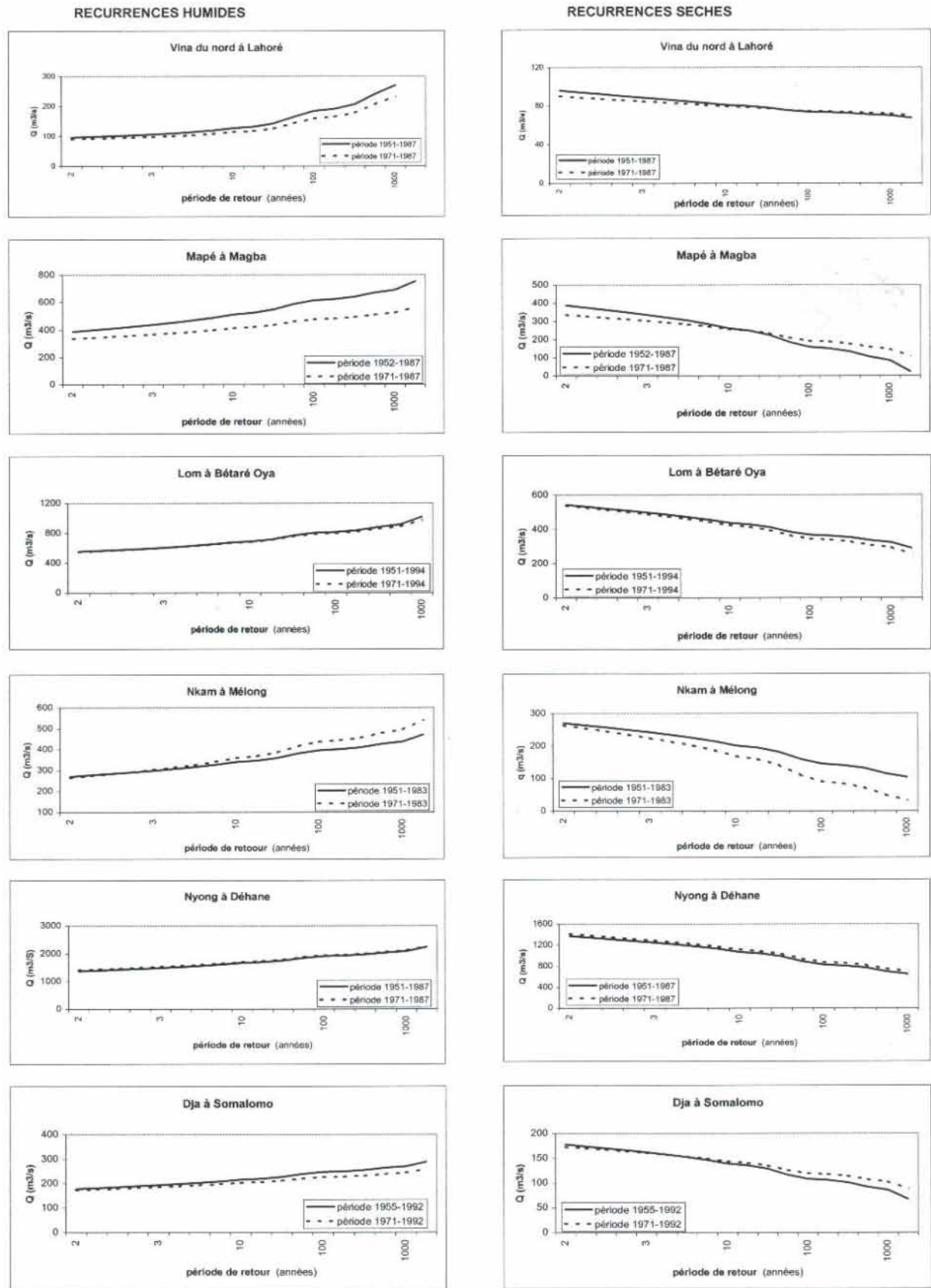


Figure 4.8 : Débits moyens maximums annuels en fonction des périodes de retour à quelques stations de différentes régions du Cameroun, pour les récurrences humides (à gauche) et sèches (à droite).

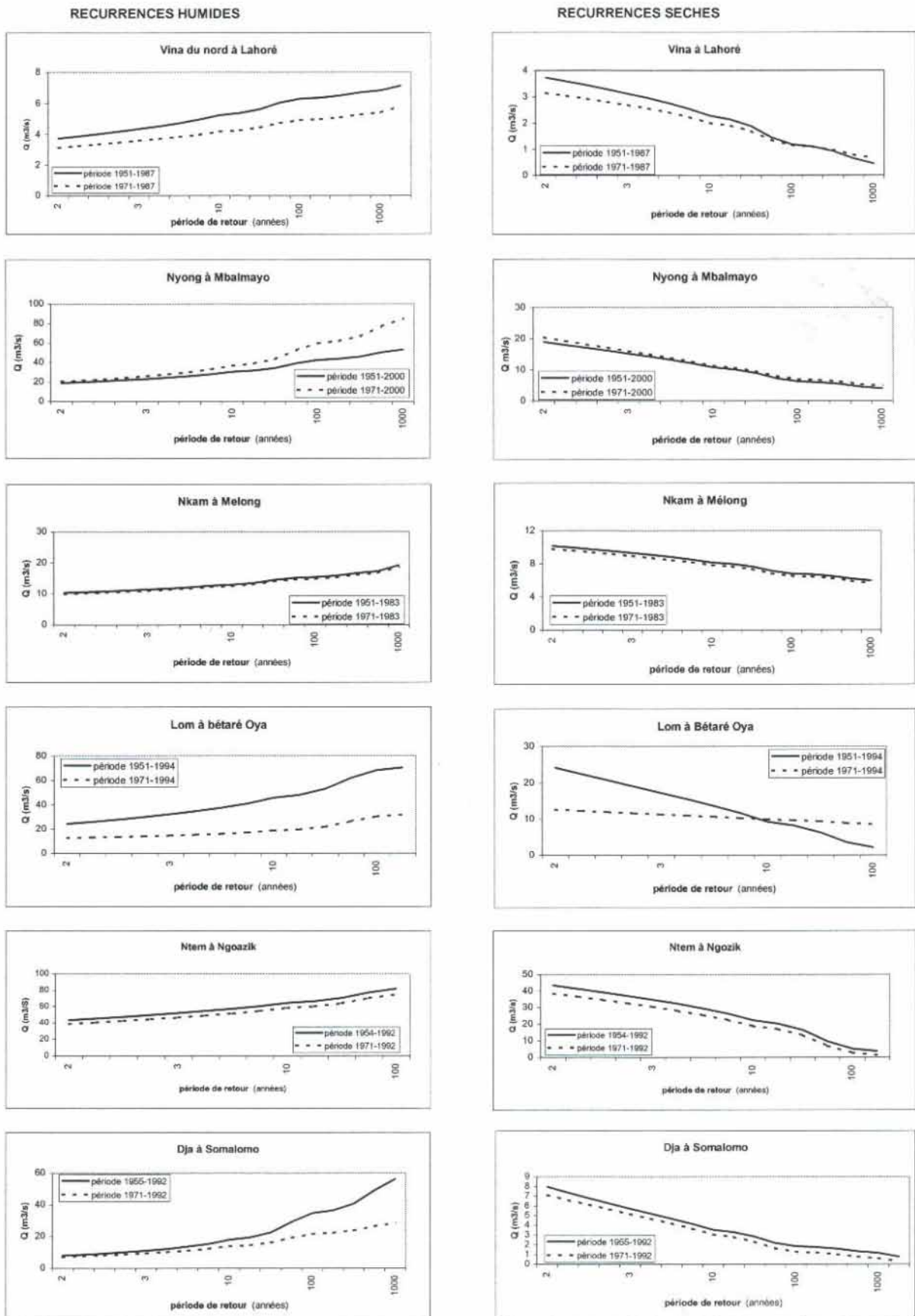


Figure 4.9 : Débits moyens minimums annuels en fonction des périodes de retour à quelques stations de différentes régions du Cameroun, pour les récurrences humides (à gauche) et sèches (à droite).

## CONCLUSION

La notion de norme hydropluviométrique fait référence à la prédétermination de paramètres en vue de la prévision du futur par extrapolation des événements connus du passé. Elle utilise des outils statistiques dont les hypothèses de base supposent la stationnarité des séries analysées. Les analyses des séries de données pluviométriques et hydrométriques collectées dans différentes régions du Cameroun montrent que cette stationnarité n'est pas toujours vérifiée. Il en découle que les normales déterminées à partir des données de la période récente (1971-2000), marquée par une sécheresse particulière sont sensiblement différentes des autres normales, notamment à celle de la période 1951-1980 utilisée habituellement comme référence pour le dimensionnement et la gestion des ouvrages d'aménagement.

Sur le plan de la pluviométrie, les différences entre les normales 1971-2000 et 1951-1980 sont plus importantes dans le Nord du pays où elles peuvent atteindre 20% (ainsi que dans la région du Mont Cameroun et les régions très pluvieuses de l'Ouest), contre environ 10% dans le Sud. Dans le nord du pays, par rapport à la période 1951-1980, on note un glissement de l'isohyète 600 mm sur environ 200 km vers le sud, pour la période 1971-2000, ainsi qu'un glissement d'environ 250 km pour l'isohyète 1000 mm, également vers le sud. Les différences entre quantiles sont telles qu'une pluie de récurrence décennale calculée à partir des données de la période 1951-1980 peut être supérieure à la pluie de récurrence cinquantennale, voire centennale, calculée à partir de celles de la période 1971-2000.

Les valeurs moyennes calculées sur les données de la période 1941-2000 sont dans l'ensemble inférieures à celles des périodes 1941-1970 et 1951-1980 mais, avec une moyenne de l'ordre de 5% les écarts restent relativement faibles.

L'examen de la situation du Cameroun en matière d'observations des écoulements montre qu'on ne pourra pas compter sur l'ensemble des renseignements souhaitables pour une appréhension vraiment satisfaisante de la situation actuelle des risques en hydrologie. Il en va de même pour l'évaluation des ressources en eau comme on le verra au prochain chapitre. Ce grave handicap se trouve accentué lorsque la situation est fortement perturbée par la variabilité climatique comme il a été démontré. On conçoit aisément qu'une analyse exhaustive de la situation soit alors compromise et les conclusions provisoires. Sur la base des données disponibles, nous avons cependant pu montrer que les quantiles calculés à partir des

débites moyens annuels de la période 1971-2000 sont inférieurs à ceux calculés sur la période 1950-1990 pour la quasi-totalité des stations étudiées. Les écarts sont généralement plus importants que dans le cas des précipitations. Ils se situent autour de  $-10\%$  pour les cours d'eau du Sud et varient de  $-15$  à  $-30\%$  pour ceux du Nord du pays. Les différences entre quantiles sont telles que la valeur du débit moyen annuel de récurrence décennale calculée à partir des données de la période 1950-1990 peut être supérieure à celle du débit de récurrence centennale, voire millennale, calculée à partir de la série 1971-1990.

Les écarts entre des paramètres relatifs aux basses eaux calculés sur les périodes 1950-1990 et 1971-1990 sont sensiblement supérieurs à ceux calculés entre les paramètres des hautes eaux pour les mêmes périodes. Si ces écarts peuvent atteindre  $-30\%$  dans le Nord du pays contre  $-10\%$  dans le Sud pour les paramètres de basses eaux de récurrence 10 à 20 ans, ils sont en général de l'ordre de  $-5\%$  dans le Sud contre  $-10$  à  $-20\%$  dans le Nord pour les hautes eaux de mêmes récurrences. Cette différence tiendrait au fait que les paramètres de hautes eaux bénéficient d'une amélioration des conditions de ruissellement sur les bassins. Il est par conséquent indispensable de prendre en considération les changements potentiels des "états de surface", pouvant intervenir au niveau du bassin versant, dans la définition des références à l'usage des aménagistes.

Le problème de la révision des normes en hydro-pluviométrie revêt une très grande importance sur un plan pratique, mais il est difficile de proposer une solution unique et définitive. Pour le cumul des pluies annuelles, l'ensemble de la chronique des données disponibles à chaque poste d'observation donne des moyennes qui restent relativement proches des normales calculées sur les autres périodes de référence. Pour les écoulements, l'évolution des paramètres de hautes et de basses eaux semble ne pas aller toujours dans le même sens. Si l'amointrissement des débits de base participe à la réduction des débits de pointe (Olivry *et al.*, 1993), l'amélioration des conditions de ruissellement sur le bassin versant peut contribuer à un accroissement des débits de crue en dépit de la baisse des précipitations (Ouedraogo, 2001b ; Mahé *et al.*, 2002 ; Paturel *et al.*, 2003). Pour la prédétermination des débits d'étiage et les autres paramètres des basses eaux, il serait préférable de se référer à la période 1971-2000 pour se mettre du côté de la sécurité, dans le cas des aménagements au fil de l'eau par exemple. Pour les normales pluviométriques, les modules et les paramètres des hautes eaux, les moyennes déterminées à partir de l'ensemble

des chroniques de données semblent mieux concilier les écarts entre les normales des périodes de référence sèches et humides.

Le glissement des isohyètes vers le Sud du pays pour les périodes 1961-1990 et 1971-2000, traduit un déficit pluviométrique par rapport aux années antérieures. Il bouleverse ainsi l'organisation zonale des climats habituellement admise. Ainsi, par rapport à la normale pluviométrique 1971-2000, la partie du territoire camerounais au Nord de la localité de Mora peut être considérée comme faisant partie de la zone sahélienne alors que tout le pays en était exclu au regard de celle de la période 1941-1970. Cependant, cette modification n'est réellement importante que dans la partie du pays au Nord de l'Adamaoua. Toutefois, par rapport à la délimitation des régions proposée par Olivry (1986), le glissement des isohyètes vers le Sud contribue essentiellement à la diminution de l'abondance des précipitations dans les différentes zones définies sans en changer considérablement l'organisation spatiale. En conséquence, cette organisation reste encore valable. Des études complémentaires, qui sortent du cadre de ce travail, sont cependant indispensables pour permettre une définition des régions climatiques homogènes au regard de toutes les exigences climatiques et bioclimatiques. Outre les bilans hydriques, une telle entreprise devrait inclure des études de bilans d'énergie et de tous les autres paramètres qui déterminent les conditions d'équilibre des écosystèmes.



**CHAPITRE V : IMPACT DE LA VARIABILITE CLIMATIQUE  
SUR LES RESSOURCES EN EAU DU CAMEROUN,  
PERSPECTIVES D'EVOLUTION**

## 5.1 - INTRODUCTION

Outre l'analyse et la compréhension des aspects mondiaux de la variabilité climatique et ses conséquences sur l'environnement, la présente étude se propose d'approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques à l'échelle du Cameroun, pays bien connu pour la forte diversité de son orographie, de sa biogéographie et de ses régimes climatiques. Dans les chapitres précédents, les analyses des données hydroclimatiques disponibles ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique et de la sécheresse observée depuis une trentaine d'années en particulier, caractérisée par une hausse des températures et la baisse généralisée des précipitations ainsi que des écoulements sur l'ensemble du territoire. En dépit de quelques années humides enregistrées au cours de la décennie 90, au début des années 2000 aucun indice précis ne permet d'augurer une fin prochaine du phénomène au Cameroun, comme ailleurs en Afrique tropicale. La caractérisation des effets de la variabilité climatique par les indicateurs analysés plus haut ne suffit cependant pas à préciser ce que sera son impact sur les différents sous-systèmes d'utilisation. Ainsi, après ces analyses axées davantage sur les effets de la variabilité climatique, on peut se demander quelles peuvent être les conséquences des fluctuations climatiques actuelles et celles à venir sur les ressources en eau du pays.

En effet, l'impact suppose un usage défini, et les usages de l'eau sont multiples. Ils vont de la demande in situ du milieu naturel, à l'agriculture irriguée et pluviale, l'eau potable, la navigation, l'industrie, l'hydroélectricité, 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.. Ces différents aspects dépassent de loin l'objet de cette étude, mais il importait d'y faire allusion dans la mesure où la gestion des ressources en eau se résume généralement à une confrontation entre les ressources disponibles et les besoins. On se limitera dans la suite de l'étude à une analyse de la distribution dans le temps du volume des disponibilités à partager entre ces différents usages. Un accent sera mis sur la répartition des ressources dans les deux régions Nord et Sud du pays et dans le bassin versant qui constitue l'unité réelle de gestion de la ressource.

Les analyses de l'évolution des ressources en eau du pays dans le futur se fonderont sur les prévisions des modèles climatiques. En effet, en se basant sur la compréhension actuelle des

processus physiques, géophysiques, chimiques et biologiques qui régissent le système solaire, de nombreuses représentations mathématiques simplifiées du système climatique de la terre ont été proposées (IPCC, 2001). Il s'agit de modèles climatiques ou Modèles de la Circulation Générale (MCG) qui permettent de simuler les réactions du système climatique et proposent des scénarios d'évolution du climat (descriptions vraisemblables, cohérentes et intrinsèquement homogènes d'un état futur), à l'échelle mondiale et dans les différentes régions du globe. Nous analyserons les différentes projections proposées pour notre région d'étude afin de sélectionner celles qui se rapprochent le mieux des réalités de terrain en Afrique centrale en général et au Cameroun en particulier. Ces scénarios seront utilisés pour évaluer l'incidence de l'évolution du climat sur les ressources en eau du Cameroun. Nos analyses utilisent des modèles pluie-débit dont le calage aura été réalisé au préalable sur la base des données d'observation. Avant d'aborder ces différentes analyses, on s'attachera à récapituler l'évolution des ressources en eau du pays telle qu'il ressort de l'analyse des données actuelles.

## **5.2 – LES RESSOURCES EN EAU DU CAMEROUN ET LEUR EVOLUTION**

Suivant le "Manuel pour l'évaluation des capacités nationales" publié en 1997 par l'OMM et l'UNESCO, les ressources en eau sont définies comme « l'ensemble des eaux disponibles ou que l'on peut mobiliser, pour satisfaire en quantité et en qualité une demande donnée en un lieu donné, pendant une période appropriée ». Pour une bonne maîtrise des ressources en eau du Cameroun, il est par conséquent indispensable de disposer de données fiables et continues, couvrant toutes les composantes du cycle de l'eau : précipitations, écoulements, niveau des nappes souterraines, qualité de l'eau etc.. La géologie du Cameroun est composée à 90% de formations du socle et aucune étude de synthèse intéressant l'ensemble des eaux souterraines du pays n'a été réalisée. D'autre part, bien que la baisse de la production des aquifères des grands bassins versants ait été soulignée (Olivry, 1993b), l'impact de la variabilité et des changements climatiques sur la recharge des eaux souterraines est très peu documenté. Les informations sur la qualité de l'eau restent également très parcellaires au Cameroun. Nos analyses se limiteront par conséquent dans cette étude à l'aspect quantitatif des ressources en eau superficielle.

L'évaluation des apports météoriques utilise la méthode de spatialisation de l'information par le procédé de krigeage du logiciel Surfer (Golden Software, 1999). La méthode utilise un

ensemble de procédures qui permettent d’exploiter au maximum l’information pluviométrique disponible pour estimer les précipitations en tout point du territoire dans le but d’obtenir une image d’ensemble des précipitations. L’évaluation du volume des écoulements annuels des cours d’eau n’intéressera que les bassins versants jaugés.

### 5.2.1 – Evolution des apports en eau météorique

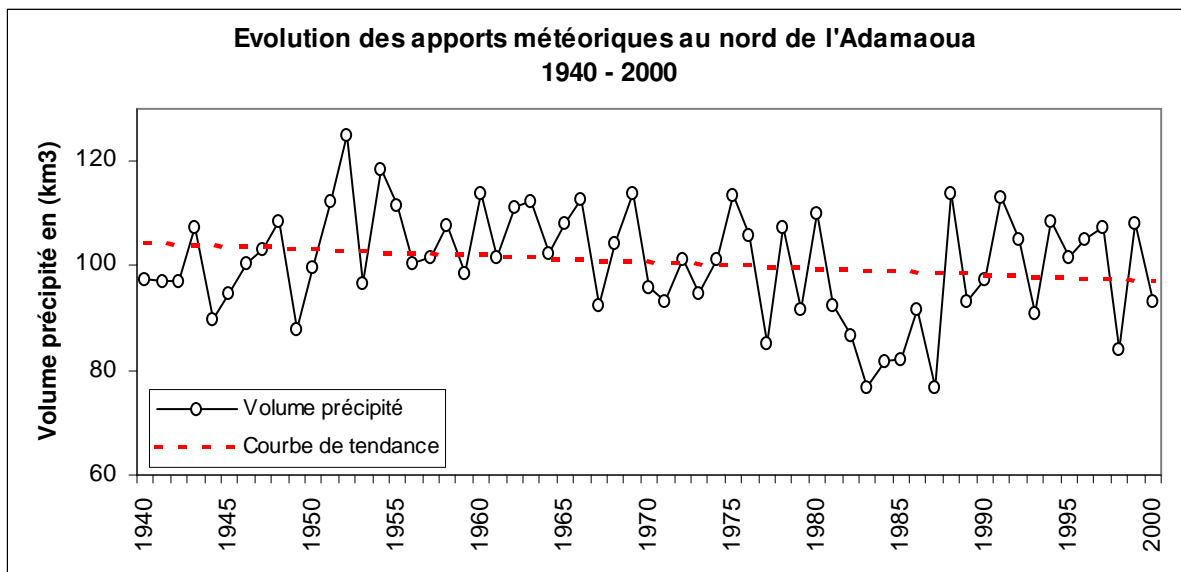
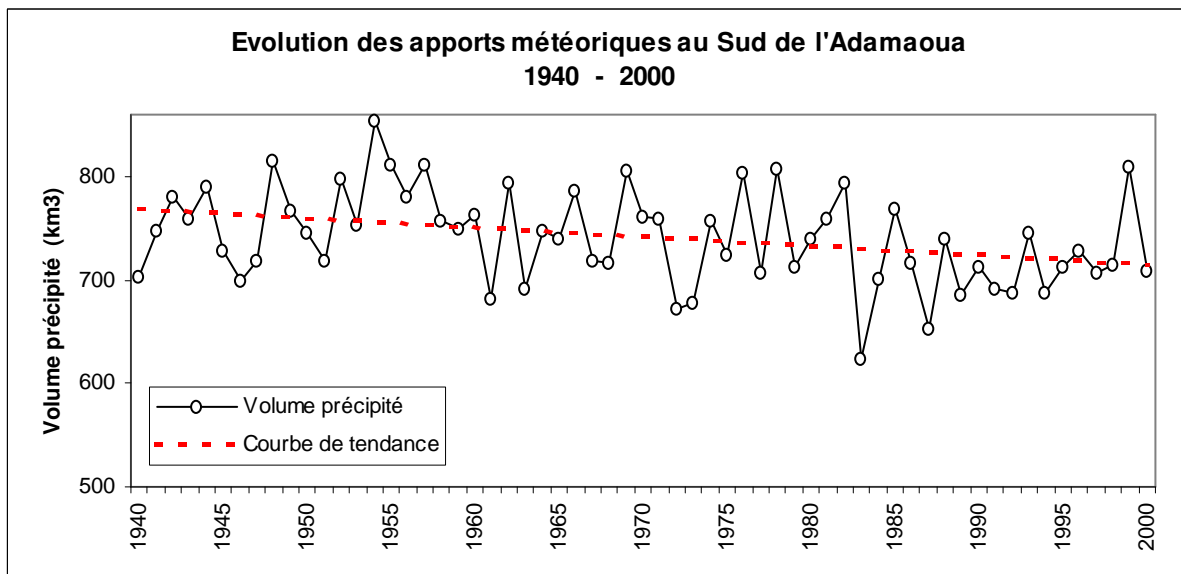
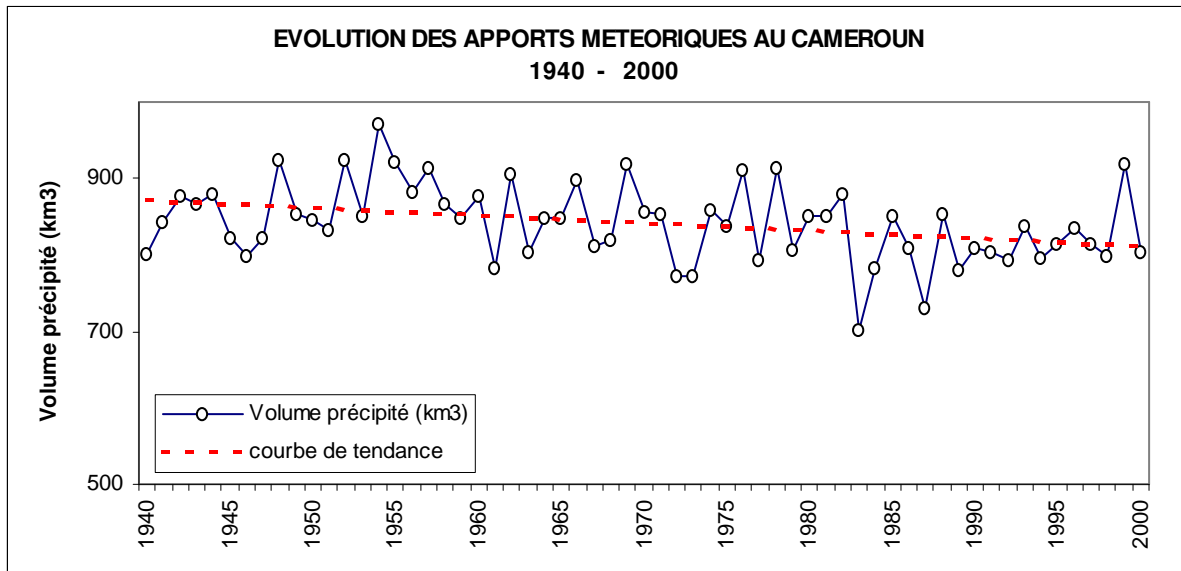
Le volume annuel des apports météoriques sera étudié sur l’ensemble du territoire et suivant une répartition du pays en deux régions Nord et Sud. La séparation suivant un schéma latitudinal a retenu le parallèle 7°30 (rebord nord de l’Adamaoua) comme limite pour distinguer les régions équatoriales du Sud (environ 80% de la superficie totale du pays) des régions sahéliennes du Nord (un peu plus de 20% du territoire). La figure 5.1 montre l’évolution des apports météoriques déterminés sur l’ensemble du territoire et suivant cette répartition du pays en deux parties. La tendance à la baisse soulignée dans les chapitres précédents y est bien perceptible. Cette baisse est non uniforme et pas toujours synchrone entre le Nord et le Sud comme on peut le constater sur la figure. Les valeurs caractéristiques (en milliards de m<sup>3</sup> ou km<sup>3</sup>) de la série des apports annuels sur l’ensemble du pays sont les suivantes :

Valeur moyenne sur la période 1940-2000 :	842 km <sup>3</sup>
Valeur maximale (enregistrée en 1954) :	972 km <sup>3</sup>
Valeur minimale (enregistrée en 1983) :	702 km <sup>3</sup>

Les volumes précipités moyens interannuels calculés par décennie sont présentés dans le tableau 5.1 On considère le territoire dans son ensemble, puis suivant une répartition latitudinale Nord et Sud par rapport à l’Adamaoua.

**Tableau 5.1 : Volumes (km<sup>3</sup>) précipités moyens par décennie**

	Ensemble du pays	Sud de l’Adamaoua	Nord de l’Adamaoua
<i>Décennie 1940</i>	854	755	99
<b>Décennie 1950</b>	889	780	109
<b>Décennie 1960</b>	850	744	106
<i>Décennie 1970</i>	837	736	101
<b>Décennie 1980</b>	805	715	90
<b>Décennie 1990</b>	821	720	101



**Figure 5.1 : Evolution des apports météoriques au Cameroun de 1940 à l'an 2000**

Les données du tableau 5.1 indiquent un maximum pour la décennie 1950 et un minimum pour la décennie 1980 sur l'ensemble du territoire. La différence entre les volumes précipités de ces deux décennies est de l'ordre de 18% pour la partie Nord du pays, mais elle n'est que de 8% pour la partie Sud et 9,5% si l'on considère l'ensemble du territoire.

Les volumes précipités moyens interannuels par périodes de 30 années ont été également calculés pour illustrer les variations des valeurs normales. Les résultats (tableau 5.2 ) confirment la nature déficitaire de la période 1971-2000, alors que la période 1941-1970 enregistre la valeur maximale sur le territoire pris dans son ensemble et la sur partie Sud du pays. Dans la partie Nord par contre, les normales des périodes 1941-1970 et 1951-1980 sont voisines, mais le maximum est enregistré plutôt sur la période 1951-1980.

**Tableau 5.2: Volumes (km<sup>3</sup>) précipités moyens par périodes de 30 ans**

	<b>Ensemble du pays</b>	<b>Sud de l'Adamaoua</b>	<b>Nord de l'Adamaoua</b>
<b>Période 1941 – 1970</b>	864	760	104
<b>Période 1951 – 1980</b>	856	752	104
<b>Période 1961 – 1990</b>	830	732	98
<b>Période 1971 – 2000</b>	821	724	97

Par rapport aux normales des périodes les plus humides respectives, les données du tableau 5.2 indiquent des différences de l'ordre de 8 % avec la moyenne trentennale la plus faible sur la partie Nord du pays. Par contre cette différence est légèrement inférieure à 5 % pour la partie Sud et 5 % si l'on considère l'ensemble du territoire.

En définitive, à l'échelle pluriannuelle, le territoire du Cameroun reçoit en moyenne 842 km<sup>3</sup> de précipitations par an (821 km<sup>3</sup> si l'on se réfère aux données non homogénéisées de la figure 2.9), soit un peu moins de 1,8 millions de m<sup>3</sup> par km<sup>2</sup>. Quand on considère le territoire suivant une répartition latitudinale Nord et Sud par rapport à l'Adamaoua, ce ratio tombe à un peu moins de 1 million de m<sup>3</sup>/an au km<sup>2</sup> dans le Nord contre environ 2 millions dans le Sud. Une partie (environ 70%) de ces apports météoriques est perdue par reprise évaporatoire et infiltration vers les nappes souterraines alors que l'autre ruisselle vers les cours d'eau qui les écoulent vers la mer et le lac Tchad.

## 5.2.2 – Evolution des écoulements de surface

Le volume total des écoulements superficiels moyens annuels a été évalué à 265 km<sup>3</sup> au chapitre 3 pour l'ensemble du pays, soit 31% des apports météoriques. La connaissance des différents termes (évaporation, infiltration et ruissellement) de la répartition des précipitations à des échelles spatiales et temporelles fines permet de mieux appréhender les ressources en eau et la maîtrise de leur gestion. Ainsi, l'analyse de l'évolution interannuelle des écoulements se fera par bassin versant et se limitera ici aux seuls cours d'eau jaugés, et en particulier ceux suivis sur une durée répartie entre les périodes humide et sèche déterminées aux chapitres précédents.

Les données du tableau 5.3 présentent les volumes écoulés moyens interannuels déterminés sur ces cours d'eau pendant la période humide d'avant 1970 et la période sèche qui l'a suivie.

**Tableau 5.3 : Volumes écoulés moyens interannuels (km<sup>3</sup>) à quelques stations jaugées du Cameroun Périodes 1941-1970 et 1971-1990**

Cours d'eau et Station	Superficie (km <sup>2</sup> )	Volume (km <sup>3</sup> ) Période 1941- 1970	Volume (km <sup>3</sup> ) 1971- 1990
<b>Kadéi à Batouri</b>	8974	3,78	3,40
<b>Boumba à Biwala</b>	10335	3,54	3,12
<b>Dja à Somalomo</b>	5380	2,26	1,96
<b>Kienké à Kribi</b>	1435	1,62	1,36
<b>Lobé à Kribi</b>	2305	3,27	3,23
<b>Lokoundjé à Lolodorf</b>	1150	0,907	0,933
<b>Ntem à Nyabessan</b>	26350	14,7	12,1
<b>Nyong à Dehane</b>	26400	14,7	12,7
<b>Mungo à Mundame</b>	2420	5,51	4,50
<b>Wouri à Yabassi</b>	8250	9,96	9,12
<b>Cross River à Mamfe</b>	6810	21,0	15,7
<b>Munaya à Akwem</b>	2770	5,19	4,45
<b>Sanaga à Edéa</b>	131500	68,7	54,5*
<b>Metchem à Gouri</b>	2116	3,86	3,09
<b>Tsanaga à Bogo</b>	1535	0,278	0,209
<b>Vina nord à Berem</b>	1585	0,875	0,730
<b>Bénoué à Garoua</b>	60500	12,34	8,34
<b>Total</b>	<b>299815</b>	<b>172</b>	<b>139</b>

\* : Noter que les débits de la Sanaga sont régulés à partir de 1970

Si le déficit des volumes écoulés moyens interannuels calculés sur la période 1971-1990 par rapport à 1941-1970 est de 24% pour l'ensemble des cours d'eau étudiés, il n'est plus que de 22% pour les cours au Sud de l'Adamaoua. Par contre, il est de 45% pour ceux situés dans le

Nord. Cette différence enregistrée entre les apports annuels des cours d'eau du Nord et ceux du Sud confirme bien les observations des chapitres précédents. On notera cependant la différence entre les valeurs des déficits des deux régions Nord et Sud du pays en terme de volume écoulé et les valeurs des déficits indiquées aux chapitres précédents par rapport aux différents cours d'eau (-15% en moyenne pour les cours d'eau du Nord contre -35% pour ceux du Sud), par rapport à la même période de référence. Cette différence tient au fait que le déficit enregistré au niveau de certains cours d'eau importants comme la Sanaga (-26%) dans le Sud et la Bénoué (-44%) dans le Nord, sont au-dessus de la moyenne.

Bien que nos analyses ne se limitent ici qu'à quelques cours d'eau du pays (couvrant près des 2/3 du territoire), les résultats reflètent convenablement la situation des ressources en eau sur l'ensemble du territoire. Ils soulignent parfaitement la différence entre les disponibilités en eau des deux parties du pays et une évolution également différente. Dans le Nord les disponibilités sont moins importantes et la diminution a été plus importante au cours de la période récente. Le Sud du pays bénéficie de ressources plus importantes et la baisse observée au cours de la période récente y est plus faible. Devant une telle situation, pour résoudre le problème de la confrontation des disponibilités aux besoins que pose la gestion des ressources en eau du pays, on peut envisager un transfert d'eau du Sud vers le Nord, comme c'est le cas dans d'autres pays du monde. Le procédé est techniquement possible, et ne devrait pas poser de problème majeur si les prélèvements sont effectués à certains moments précis de l'année. En effet, en période de crue, une part importante des écoulements échappe à toute possibilité de contrôle et de gestion, et peut même s'avérer dangereuse à l'occasion des inondations. On peut par conséquent envisager, moyennant certaines précautions, de prélever une partie des volumes « superflus » des cours d'eau du Sud pour alimenter ceux du Nord du pays. Une telle opération nécessite par conséquent une bonne maîtrise de la répartition spatio-temporelle des ressources en eau dans le pays.

Dans nos analyses des chapitres précédents, nous avons souligné les incertitudes que recèlent la connaissance et l'évolution actuelle des ressources en eau du Cameroun. Sur la base de ces connaissances et de la compréhension actuelle du phénomène, on tentera cependant dans la suite de l'étude de déterminer quelles peuvent être les conséquences des fluctuations climatiques futures sur les ressources en eau du pays. A cet égard, on aura recours à la modélisation, tant au niveau des scénarios d'évolution du climat qu'à celui des processus hydrologiques.



### **5.3 - MODELISATION EN HYDROMETEOROLOGIE, ETAT DE L'ART ET CONTRIBUTION A LA MAITRISE DES RESSOURCES EN EAU**

Un modèle mathématique est une représentation analytique (sous forme d'un ensemble d'équations) de la complexité observée ou supposée d'un phénomène physique, qui permet d'avoir une meilleure compréhension des différentes composantes et d'analyser l'influence qu'elles exercent entre elles. Dans cette optique, il est constitué d'une ou plusieurs relations entre des variables, jugées caractéristiques, de tout ou partie du phénomène représenté (Desbordes M., 1987 ; Dezetter A., 1991, Petrescou Maftai C., 2002, Voirin-Morel S., 2003). A ce sujet, les activités de recherche associées au développement de l'informatique et visant la compréhension du cycle de l'eau dans le milieu naturel ont intéressé trois points principaux :

- une meilleure compréhension du fonctionnement du système modélisé,
- une prédiction de la distribution future des ressources en eau,
- une évaluation de la réponse du système à différentes sollicitations ainsi qu'aux variations de ses différentes composantes.

La typologie des modèles mathématiques utilisés en hydrologie de nos jours est très variée. On peut distinguer dans leur classification :

- les modèles déterministes qui s'efforcent de représenter au mieux les processus physiques de la transformation de la pluie en débit sur le bassin versant,
- les modèles stochastiques pour lesquels on déduit, à partir de l'observation des variables hydrologiques (pluie, débit), des lois statistiques utilisées pour générer des événements futurs auxquels peut être attachée une probabilité d'occurrence. Pour être fiable, ce type de modèle nécessite par conséquent une information importante (débit, forme de l'hydrogramme, etc..), qui peut ne pas être disponible sur certains bassins versants,
- les modèles dérivés de l'analyse des systèmes dans lesquels les processus sont rassemblés en un seul système donnant une réponse à une entrée observée aussi proche que possible de celle de la sortie observée ;
- les modèles distribués (ou spatialisés ou encore maillés), qui tiennent compte d'une certaine complexité du système et de la structure spatiale des unités étudiées.

Ce dernier groupe de modèle représente une évolution par rapport au précédent quand il s'agit d'analyser le fonctionnement interne du bassin versant d'un cours d'eau. Le bassin versant est

alors discrétisé en unités spatiales (mailles) considérées comme homogènes, qui se vident les unes dans les autres de l'amont vers l'aval. Le maillage peut être arbitraire, mais il peut également tenir compte de la répartition spatiale des facteurs responsables de la genèse et de la propagation des écoulements à l'intérieur des bassins. Les modèles GR2M, WBM et de Yates utilisés dans notre étude appartiennent aux deux derniers groupes. Ils ont déjà été utilisés avec succès sur de nombreux bassins versants de la région tropicale africaine (Ouedraogo M., 2001 ; Nkankam Kanga F., 2001 ; Ardoin S., 2004).

La prise en compte de l'organisation spatiale dans la genèse des écoulements devrait permettre une amélioration des performances des modèles. Cependant, en dépit de cet avantage, de nombreuses difficultés restent à lever. Qu'il s'agisse des préoccupations relatives aux ressources en eau (agriculture pluviale ou irriguée, hydroélectricité, alimentation en eau potable ou industrielle, loisirs, tourisme, protection des milieux hydriques) ou de celles relatives à la protection civile (transports, inondations, etc.), l'utilisation pratique des modèles rencontre encore des difficultés d'application et peut présenter certains inconvénients. Soit que son maniement soit très lourd ou difficile, pour un gain de précision illusoire, au regard des diverses incertitudes associées du problème à résoudre, soit que le coût de sa mise en œuvre est très élevé au regard des gains de précision obtenus ou encore que leur mise en œuvre peut requérir des données qui ne sont malheureusement pas toujours disponibles. En d'autres termes, la fiabilité actuelle des mesures de pluie et des écoulements n'autorise pas la mise en œuvre de fonctions plus complexes, dont on peut difficilement vérifier l'adéquation.

### **5.3.1 - Description des modèles utilisés**

La méthode utilisée a été élaborée par Ouedraogo M. (2001) et l'équipe Vahyne (*analyse de la Variabilité HYdrologique et impacts sur les ressources eN Eau*) de l'IRD. Elle fait appel à deux modèles conceptuels de bilan hydrologique et un modèle empirique pour simuler les écoulements du bassin versant :

- le modèle WBM (Conway *et al.*, 1999) (version modifiée du modèle défini initialement par Thornwaithe & Mather, (1995),
- le modèle GR2M du CEMAGREF (Makhlouf, 1994),
- le modèle de Yates (Yates, 1997).

Les deux premiers modèles nécessitent la mise en œuvre d'une procédure de calage et validation pour la détermination des paramètres, alors que les paramètres du modèle de Yates sont prédéterminés en utilisant la classification de végétation de Holdridge. Les trois modèles présentent un mode de fonctionnement comparable, même si les équations qui les décrivent sont différentes comme on peut le voir dans le tableau 5.4. Leur mode de fonctionnement général commun peut se résumer comme indiqué sur le schéma de la figure 5.2 :

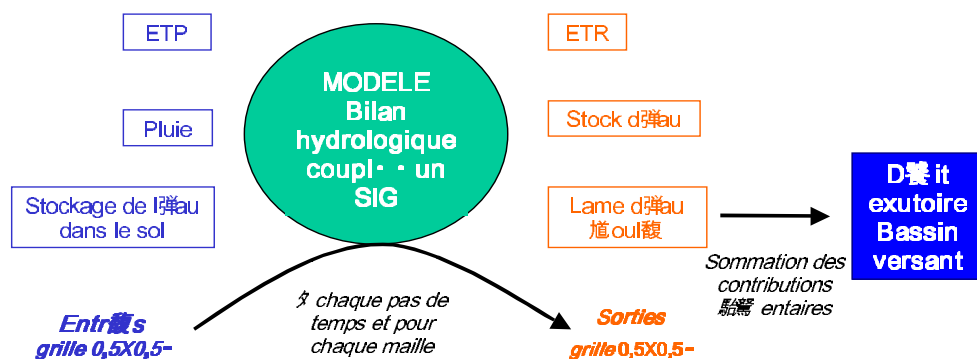


Figure 5. 2 : Schéma de fonctionnement des modèles.

Le schéma de la figure 5.2 peut se résumer comme suit :

- une fraction de la pluie mensuelle participe à l'écoulement direct,
- le niveau d'un réservoir qui représente le stock d'eau évolue en fonction de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle,
- une vidange progressive de ce stock d'eau produit l'écoulement lent.

Les lames d'eau écoulées mensuelles (voire annuelles) en tout point de l'espace sont estimées à partir d'informations disponibles sur la région étudiée. Pour ce faire, l'espace est discrétisé en mailles à la résolution du demi-degré carré ( $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , soit environ  $55 \times 55$  km), dimension reconnue comme pertinente pour représenter la variabilité spatiale (Arnell *et al.*, 1996 ; Yates, 1997) et déjà utilisée pour plusieurs types de données globales. Le pas de temps est mensuel, ce qui est suffisant pour une étude à l'échelle régionale (Gleick, 1986) et présente l'intérêt d'être également l'échelle de temps adéquate pour la gestion des ressources en eau des bassins versants de taille relativement importante.

A partir de grilles de précipitations, d'évapotranspiration potentielle et de données liées au stockage de l'eau dans le sol, on simule par un modèle de bilan, 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. On superpose à cette grille les contours des bassins versants. L'écoulement total à l'exutoire de chacun des bassins est obtenu par sommation des contributions élémentaires pondérées des différentes mailles qui les constituent. On se référera aux travaux de Ouedraogo M. (2001) pour plus de détails sur leurs principes de fonctionnement ainsi que leur robustesse comparée.

### **5.3.1.1 – Description du schéma d'application des modèles**

Les modèles GR2M et WBM comportent des paramètres dont les valeurs numériques sont obtenues après optimisation d'un critère de qualité des débits générés par ces modèles. Cette démarche de calage est constituée de deux étapes : une étape de calibration et une étape de validation. Pour chaque bassin, les séries de données sont divisées en deux sous-séries sur l'ensemble de la période d'observation. Les valeurs numériques des paramètres sont calées sur la première sous-série puis validées sur la seconde.

#### **Critère de qualité**

De nombreuses méthodes statistiques sont proposées pour permettre de faire des comparaisons entre les observations et les résultats des simulations au moyen des modèles mathématiques. Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) est l'une des plus simples. Ce critère a été associé à celui proposé par Nash et Sutcliffe (1970) pour mesurer la qualité des ajustements réalisés par nos modèles. Si le coefficient de corrélation renseigne uniquement sur la bonne occurrence ou non des observations (les débits dans notre cas) sans en évaluer les intensités, le critère de Nash permet de savoir si les résultats des simulations sont en accord avec les observations, à la fois en terme de phase et d'intensité.

Tableau 5.4 : Présentation des modèles (d'après Ouedraogo M. 2001 et Girard S. 2002)

Caractéristiques	WBM	GR2M	Yates
Auteur et dates	Conway et al., 1999 d'après Thornwaithe et Mather, 1995	Makhouf, 1994 Cemagref	Yates, 1997
Type de modèle	Conceptuel spatialisé, non directionnel, mens.	Conceptuel spatialisé, mensuel	Modèle empirique
Paramètres	DEUX - $\alpha$ module l'écoulement direct - $\beta$ module l'écoulement retardé  Variante à 6 paramètres : $\alpha$ et $\beta$ prennent chacun 3 valeurs en fonction du ratio P/EP	DEUX - X1 : module les entrées P et ETP - X2 : module le débit en sortie de réservoir S	TROIS Smax : capacité maximale de stockage du sol $\alpha$ : coefficient d'écoulement de sub-surface $\epsilon$ : coefficient d'écoulement de surface (ou écoulement direct)
Réservoir(s) en eau du sol, caractérisé par WHC	UN  Sa vidange suit une loi exponentielle inverse ; il joue le rôle de nappe de versant et produit l'écoulement de base en saison sèche	DEUX - réservoir sol (H) : fonction de production, caractérisé par WHC ou A - un réservoir eau gravitaire (S) : fonction de transfert.	UN  Les écoulements de surface et de sub-surface et l'ETR sont représentés par une fonction continue de l'humidité du sol
Variables d'entrées	- P : précipitation - ETP : évapotranspiration - WHC capacité de rétention en eau du sol	- P, modulé en pluies nette (Pn) et efficace (Pe) - ETP, modulé en ETP nette (En) - WHC ou A	- P - ETP
Variables intermédiaires et de sorties	- Déficit d'humidité du sol : SMD - ETR - Ecoulement R	- Niveaux des réservoirs H et S - ETR - Ecoulement Q	- Niveau relatif du stock d'eau : z - ETR - Ecoulement R
Calage des paramètres	Pour chaque BV Calibration et validation des paramètres Valeurs obtenues par optimisation d'un critère de qualité (critère de NASH) des débits générés par ces modèles		Par maille prédétermination des paramètres à partir du schéma de classification climat-végétation de Holdridge
Schéma de fonctionnement			

La définition du coefficient de corrélation est la suivante :

$$R^2 = [1/N \sum_{t=1, N} (Q_{\text{obs}}(t) - Q_{\text{obs}}(\text{moyen})) (Q_{\text{sim}}(t) - Q_{\text{sim}}(\text{moyen}))]^2 / \sigma_{Q_{\text{obs}}} \sigma_{Q_{\text{sim}}}$$

où  $Q_{\text{obs}}$  et  $Q_{\text{sim}}$  sont les débits mensuels observés et simulés,  $Q_{\text{obs}}(\text{moyen})$  et  $Q_{\text{sim}}(\text{moyen})$  sont les moyennes sur la période de simulation des débits observés et simulés, et  $\sigma_{Q_{\text{obs}}}$  et  $\sigma_{Q_{\text{sim}}}$  sont les écart-types des débits observés et simulés.  $N$  est le nombre de périodes (mois) de simulation.

Le critère de Nash (ou efficacité) est défini de la manière suivante :

$$\text{Critère } NASH = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_i (Q_o^i - Q_c^i)^2}{\sum_i (Q_o^i - Q_m)^2} \right] \text{ en \%}$$

avec  $Q_o^i$  et  $Q_c^i$  : débits respectivement observés et calculés

$Q_m$  : débit moyen observé sur l'ensemble de la période d'observation sans lacune.

Le modèle ajusté est d'autant meilleur que le critère de NASH est proche de 100 pour 100.

Dans notre étude, nous aurons également recours à des analyses des débits classés pour juger de la qualité des résultats. On s'intéressera en particulier aux débits maximums qui comptent parmi les variables qui intéressent généralement les projets d'aménagement. Les débits maximums mensuels enregistrés chaque année seront sélectionnés et soumis aux analyses statistiques. La comparaison des résultats obtenus à l'aide des débits observés et ceux obtenus au moyen des simulations par les modèles permettra d'apprécier la capacité de ces derniers à évaluer ces paramètres.

### **Méthodes d'optimisation**

Deux processus d'optimisation bien connus en hydrologie ont été choisis : méthode d'optimisation de *Rosenbrock* et de *Nelder et Mead* (ou *simplex*), Servat et Dezetter, (1988). Ces méthodes, dites méthodes locales adoptent une stratégie itérative dans laquelle, partant d'un point de l'espace des paramètres, on se déplace dans une direction qui améliore en continu la valeur de la fonction critère, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration.

La méthode d'optimisation de *Rosenbrock* a la particularité de définir l'optimum d'une fonction qui n'est ni dérivable, ni continue (Guilbot, 1971, Servat, 1986). C'est une méthode de recherche séquentielle qui permet à la fois de déterminer la longueur du pas de recherche, de déterminer la direction de ce pas et de tenir compte des contraintes possibles imposées aux paramètres. Elle a connu quelques modifications pour mieux l'adapter à la modélisation pluie-débit (Servat et Dezetter, 1988).

La méthode d'optimisation de *Nelder et Mead* est basée sur un algorithme antérieur, la méthode du *simplex* de Spendley. Un *simplex* est un polyèdre régulier dans l'espace à  $n$  dimensions  $\mathbf{E}^n$ . Dans le cas de la recherche du minimum d'une fonction critère  $f(x)$ , on peut sélectionner des jeux de valeurs de  $x$  en des points de  $\mathbf{E}^n$  situés aux sommets du *simplex*. En géométrie analytique, on peut montrer que les coordonnées des sommets d'un *simplex* régulier composent une matrice  $D$ , dans laquelle les colonnes représentent les composantes des sommets (numérotés de 1 à  $n+1$ ), et les lignes les coordonnées ( de  $i=1$  à  $n$ ). Soit  $i$  le nombre de paramètres d'ajustement du modèle, à partir de  $(i+1)$  points fixés arbitrairement, la méthode consiste à déterminer, par des transformations géométriques combinant homothéties et symétries, un point dont le critère est inférieur à ceux associés aux points de départ. L'opération est ainsi répétée de manière itérative jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'amélioration du critère et le processus s'arrête.

Le processus d'optimisation est limité à un nombre d'itérations égal à 50 fois le nombre de paramètres à optimiser. Cependant, avec la méthode de Nelder et Mead, la procédure d'optimisation peut s'arrêter avant, lorsque la fonction critère ne varie pratiquement plus. La phase d'initialisation des réservoirs est de deux ans. En fonction des dates de début souhaitées, le programme importe des données d'entrée deux années auparavant.

Deux autres méthodes sont également proposées :

- Itération : balayant le domaine des paramètres du modèle suivant un pas de temps fixe,
- Hasard : les valeurs des paramètres sont fixées aléatoirement.

Selon Ouedraogo (2001), une des limites des méthodes numériques d'optimisation est l'identification de solutions qui peuvent correspondre à des minima relatifs. Pour pallier ce

problème, une méthodologie, appelée *Rosen-simplex*, inspirée des travaux de Servat (1993) est également proposée. Cette dernière a été utilisée pour notre étude. Le principe de la méthode est le suivant :

1. une première session de calage avec la méthode d'optimisation de *Rosenbrock*, réputée pour son efficacité au début de la recherche de la solution optimum, fournit un premier jeu de paramètres initiaux.
2. ces paramètres sont entrés dans une session de calage avec la méthode d'optimisation de *Nelder et Mead*, pour affiner la recherche.

### **Identification des paramètres du modèle de Yates**

L'avantage de ce modèle est que ses trois paramètres peuvent être déterminés sans aucune procédure de calage et validation. Yates (1997) en s'appuyant sur le schéma de classification climat-végétation de Holdridge, propose une prédétermination des paramètres (tableau 5.5) basée sur une méthode purement empirique.

En parallèle, le Global Ecosystem Database élaboré par le NOAA-EPA fournit une couverture de type de végétation sur toute l'Afrique tropicale. A chaque maille sont donc attribuées des valeurs de paramètres en fonction de la proportion de chaque classe de végétation par maille.

**Tableau 5.5 : Paramètres  $\alpha$ ,  $\epsilon$  et  $S_{max}$  en fonction du Schéma de classification de Holdridge (Yates, 1997)**

	<i>Classification</i>	$\alpha$	$\epsilon$	$S_{max} (mm)$
1	Tundra/polar	8,0	1,0	500
2	Foret tundra/ alpine	7,0	1,5	600
3	Boreal Forest	6,0	2,0	800
4	Cool desert	2,5	1,5	1000
5	Steppe	2,5	1,0	1000
6	Temperate forest	5,0	2,5	1000
7	Hot desert	0,2	4,0	1500
8	Chapparral	0,8	2,5	1500
9	Warm temperate forest	0,3	4,0	1500
10	Tropical/Sub-tropical semi- arid	0,2	3,5	1600
11	Tropical/Sub-tropical dry forest and savannah	0,4	3,5	1600
12	Tropical/Sub-tropical seasonal forest	3,0	5,0	2000
13	Tropical/Sub-tropical rain and wet forest	4,5	4,0	2400

Le coefficient d'écoulement du sub-surface ( $\alpha$ ) dépend du stock d'eau dans le sol alors que le paramètre  $\epsilon$  qui détermine l'écoulement direct dépend du niveau relatif de ce stock et de la pluie. Seules les classes 10 à 13 sont représentées dans notre zone d'étude.



### 5.3.1.2 - Application sur quelques bassins versants du Cameroun

Cinq bassins versant ont été retenus pour tester les performances des 3 modèles. Le choix des bassins à tester a tenu compte des exigences de la procédure de mise en œuvre des modèles, mais également de la représentativité de ces bassins par rapport aux différentes régions climatiques du pays, et des modes d'occupation des sols généralement rencontrés au Cameroun.

#### 5.3.1.2.1 - Présentation des bassins versants testés

Les 5 bassins retenus sont celui du mayo Kébi à Cossi et de la Bénoué à Garoua dans le Nord, le bassin de la Sanaga dans le Centre du pays, le bassin du Nyong à Dehane et celui du Dja à Somalomo. Les données du tableau 5.6 rappellent les principales caractéristiques de ces bassins, alors que les caractéristiques propres à chaque bassin versant sont présentées séparément. Les contours des cinq bassins versants sont représentés sur la figure 5.3.

**Tableau 5.6 : Caractéristiques des bassins versants testés**

Bassin versant	Cours d'eau	Nom Station	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Indice global de pente (m/km)	Pluie moyenne (mm)	Module (m <sup>3</sup> /s)	Période d'observation
Niger	Mayo Kébi	Cossi	25000	2,40	900	87	1955-1987
Niger	Bénoué	Garoua	60500	1,74	1100	318*	1946-1987
Sanaga	Sanaga	Edéa	131000	1,82	1700	2180*	1943-1983
Nyong	Nyong	Dehane	26400	1,77	1750	436	1951-1987
Congo	Dja	Somalomo	5380	1,43	1650	87	1955-1987

\* valeur calculée sur la période avant les barrages de régulation

#### Le Mayo Kébi à Cossi et la Bénoué à Garoua

En l'absence de cours d'eau important suivis du côté camerounais dans le bassin du lac Tchad depuis suffisamment longtemps, le mayo Kébi à Cossi et la Bénoué à Garoua ont été retenus pour représenter les cours d'eau de la partie septentrionale du pays. Dans le Nord-Cameroun, des sédiments détritiques déposés sur le socle précambrien constituent l'essentiel des formations de couverture. Ces dépôts laguno-continentaux occupent la quasi-totalité des deux bassins. Les sols ferrallitiques, ferrugineux tropicaux ou hydromorphes supportent une végétation de savane arbustive dans la partie Sud du bassin de la Bénoué suivie de la savane herbeuse dans le Nord. Le régime des écoulements est marqué par une saison sèche rigoureuse caractéristique des climats tropicaux.

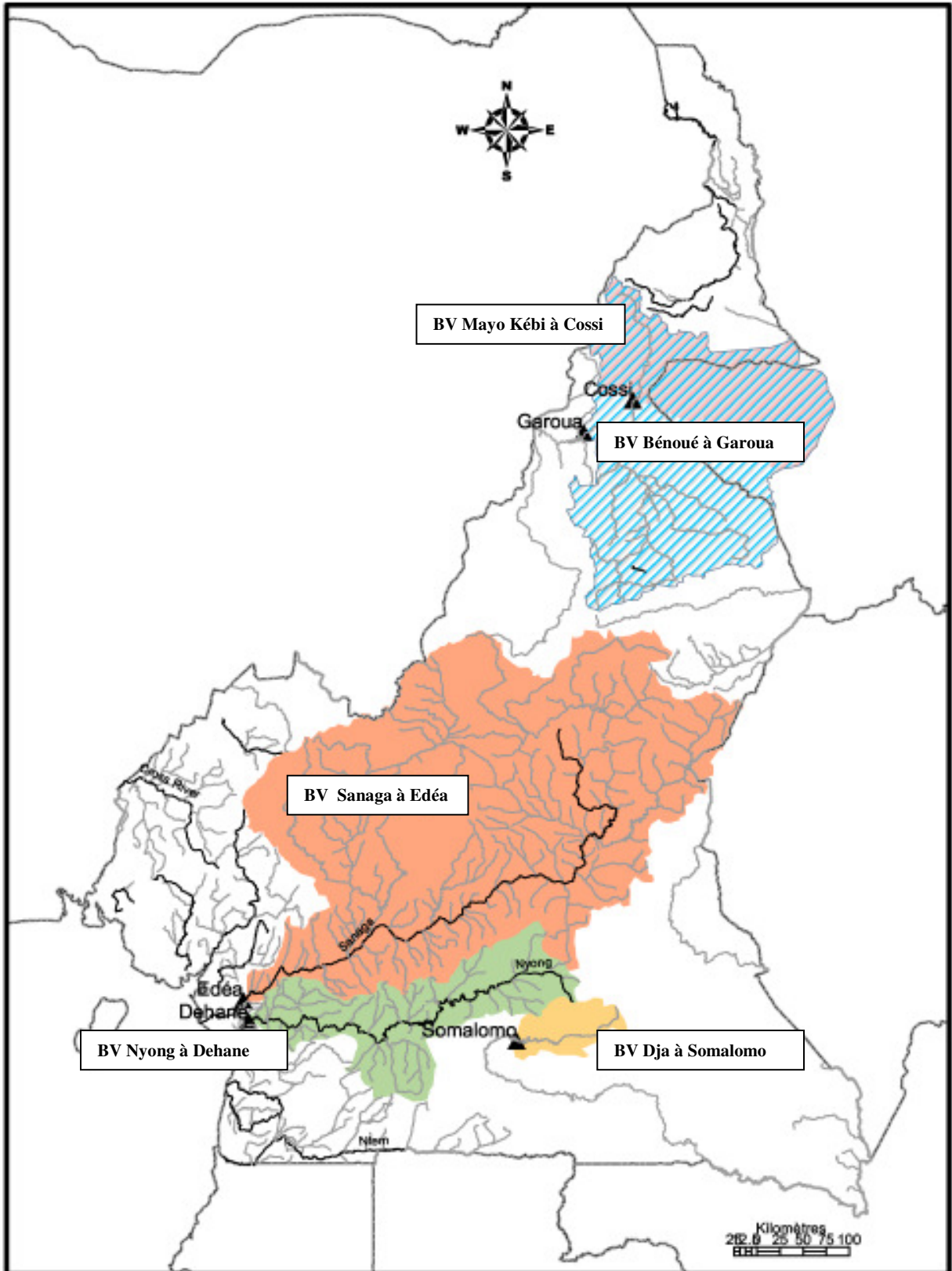


Figure 5.3 : Présentation des 5 bassins versants testés.

Un barrage hydroélectrique qui sert à la fois de retenue d'eau a été construit à Lagdo, en amont de la station de la Bénoué à Garoua depuis 1984. Cet aménagement réalisé sur la branche majeure de la Bénoué ne concerne pas le Mayo Kébi qui prend sa source du coté tchadien. Des déversements du fleuve Logone vers le bassin versant de la Bénoué sont signalés certaines années, à travers le Mayo Kébi. Nos vérifications ont cependant montré qu'ils ont été très limités au cours de la période d'étude. Leur influence sur les débits de la Bénoué au cours de la période qui nous intéresse peut donc être considérée comme négligeable.

### **La Sanaga à Edéa**

Les données du bassin versant de la Sanaga à Edéa n'ont pas été analysées dans les chapitres consacrés aux études de la variabilité climatique, en raison de la présence des ouvrages de régulation de débit situés en amont. Cependant, compte tenu de l'importance de son bassin versant qui couvre près du tiers du territoire national, de l'importance (près du ¼ des ressources en eau du pays) des volumes écoulés par rapport à l'ensemble des disponibilités du Cameroun, et de son importance sur le plan économique, ses données sont analysées dans ce chapitre. Rappelons que les dates de mise en eau des trois barrages de retenue actuellement en fonction sur la Sanaga en amont d'Edéa, sont 1969 pour le premier (Mbakaou), 1974 pour le second (Bamendjing) et 1987 pour le dernier (Magba). On en tiendra compte dans l'interprétation des résultats. La reconstitution des débits naturels avec des méthodes rigoureuses aurait été fastidieuse sans que le bénéfice tiré soit véritablement appréciable. D'autre part, la régulation des écoulements d'un cours d'eau implique des changements qui concernent davantage leur répartition annuelle que le volume des écoulements annuels, qui peuvent alors être utilisés comme élément de comparaison.

Le bassin versant de la Sanaga s'étend entre les parallèles 3°30 et 7°30 et couvre ainsi des régions passant du climat équatorial de transition (à 2 saisons) au climat tropical avec une longue saison sèche. Les sols ferrallitiques qui occupent la quasi-totalité du bassin étudié 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.

### **Le Nyong à Dehane**

Après la Sanaga, le Nyong est le deuxième fleuve en importance dont le bassin versant est entièrement inclus dans le territoire national. Représentatif du mode d'écoulement de la partie Nord du plateau sud-camerounais, son bassin versant est entièrement couvert de forêt fortement anthropisée. Les sols du bassin versant sont de type ferrallitique. Ils reposent sur un socle essentiellement granito-gneissique et les épaisseurs peuvent atteindre 15 mètres. La position latitudinale du Nyong soumet le fleuve à un climat équatorial de transition marqué dans l'année par 2 saisons sèches et 2 saisons des pluies d'inégales importance.

### **Dja à Somalomo**

Comme dans le cas du Nyong, les sols du bassin versant sont de type ferrallitique et reposent essentiellement sur un socle granito-gneissique et les épaisseurs peuvent également atteindre 15 mètres. Mais à l'opposé de la forêt à dégradation poussée du Nyong, le bassin versant du Dja à Somalomo est situé entièrement dans une région de forêt primaire. Il est représentatif de la partie du territoire couverte par une forêt dense humide toujours verte. Le régime des écoulements est de type équatorial avec 2 périodes de basses eaux et 2 de hautes eaux d'inégale importance.

#### **5.3.1.2.2 - Données d'entrée des modèles**

##### **Données de précipitations**

Pour permettre de faire des comparaisons, des données pluviométriques de deux origines différentes sont utilisées dans le modèle. Un premier échantillon est constitué des grilles de pluie mensuelle obtenues à partir de l'ensemble des données d'observation des pluies ponctuelles présentées plus haut, alors que le second est issu des données du Climatic Research Unit (CRU). Les données du CRU ont été récupérées par l'IRD auprès de l'unité de recherche climatologique de l'université d'East Anglia en Angleterre qui a établi des fichiers de pluies mensuelles sur l'Afrique tropicale pour la période 1900-1995 (New *et al.*, 1999), à une résolution spatiale du demi-degré carré ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ), à partir des données de pluie d'une centaine de postes d'observation des pays de la région. La méthode, qui suppose la continuité des précipitations dans l'espace, utilise un ensemble de procédures qui permettent d'estimer les précipitations en tout point de la région concernée, à partir de l'information pluviométrique disponible, dans le but d'obtenir une image d'ensemble des précipitations sur l'ensemble de la région. La représentativité spatiale des résultats obtenus à partir de chacune

des deux sources de données sera surtout fonction du nombre, de la bonne répartition des postes d'observation utilisés et des procédés d'analyse.

Deux types de grilles de pluie ont été construits à partir des données observations ponctuelles. Une première grille a été établie par la méthode de spatialisation de l'information par krigeage du logiciel Surfer, suivant un protocole mis au point par Ouedraogo M. (2001). Nous les appellerons ''*Psurfer*'' dans la suite de l'étude. La deuxième grille créée à partir des mêmes données utilise la méthode d'interpolation de Thiessen. Le mode opératoire, créé par le groupe Vahyne sous le logiciel Arc Info, nécessite de posséder les contours des bassins versants dans un format numérique utilisable par les Systèmes d'Information Géographique ou SIG. Les grilles de pluie établies par ce procédé sont désignées ''PThiessen'' dans la suite de l'étude. La troisième grille de pluie est constituée par les grilles du CRU ou PCRU.

#### Données d'évapotranspiration potentielle (ETP)

Les données d'ETP, sous forme de grilles au maillage  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  nous ont été fournies par l'IRD. Il s'agit de quatre séries de grilles mensuelles d'ETP, générées par le CRU à partir d'observations climatologiques de la région, selon différentes méthodes, toutes dérivées de la formule de Penman (1956). Les fichiers porteront les noms : ETP Pen pour les données calculées par la méthode de Penman, ETP RC (*Reference Crop*) pour celles déterminées par la méthode décrite par Shuttleworth (1994), ETP TO pour celles déterminées par la méthode décrite par Thom et Oliver, (1977), et ETP FAO pour celles générées par la *Food and Agriculture Organization*.

#### **Données caractéristiques des sols**

Les données caractéristiques des sols ont été également fournies par l'IRD sous forme de grilles à la résolution du demi-degré carré. Il s'agit de cinq séries de grilles mensuelles de données sur la capacité de rétention en eau du sol, dont quatre construites à partir de la carte des sols diffusée par la FAO, la cinquième ayant été 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 ajoute une dernière classe correspondant aux ''*Zones Humides*'' ou *Wetlands*. Chaque classe de sols comprend des valeurs minimales et maximales de capacité en eau comme indiqué dans le tableau 5.7 :

**Tableau 5.7 : Classification des sols selon leur capacité en eau selon la FAO**

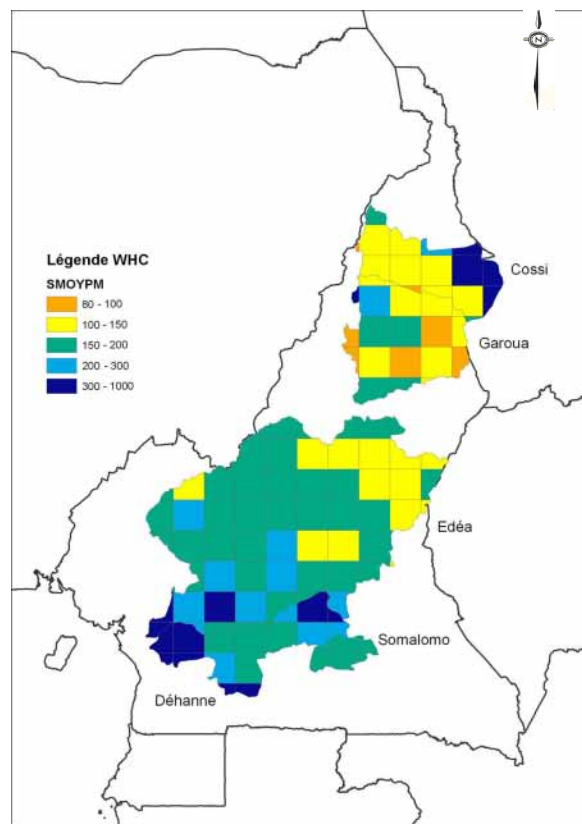
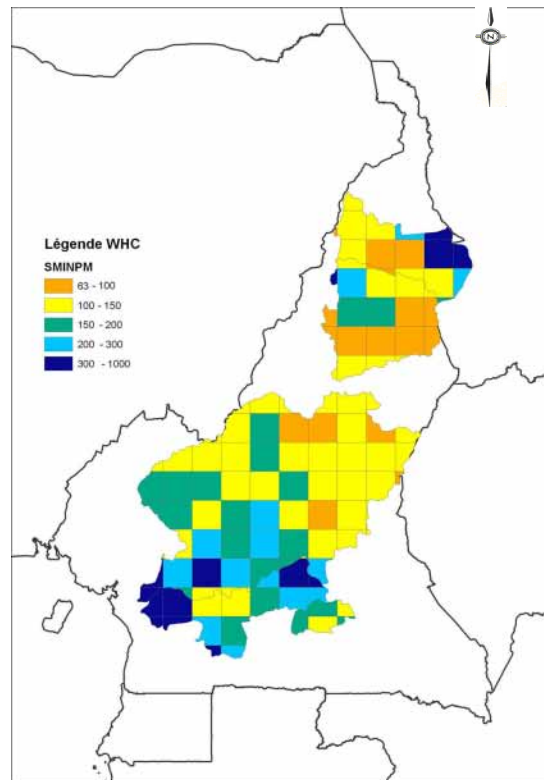
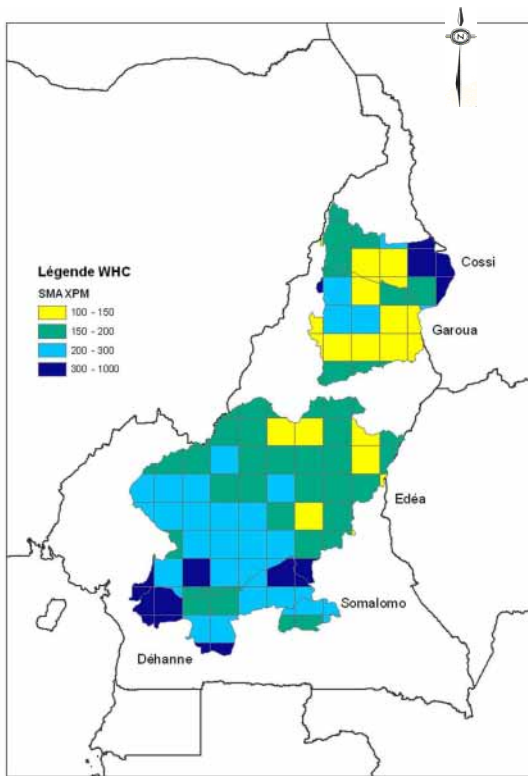
<b>Classe</b>	<b>Capacité en eau (mm)</b>
<b>Wetlands</b>	> 1000*
<b>A</b>	300 - 200
<b>B</b>	150 - 200
<b>C</b>	100 - 150
<b>D</b>	60 - 100
<b>E</b>	20 - 60
<b>F</b>	0 - 20

NB : les valeurs 1000, 300 et 0 des classes Wetlands, A et F ont été attribuées forfaitairement.

A partir de ces valeurs, trois grilles ont été construites, suivant une méthodologie mise au point par le groupe Vahyne, en utilisant respectivement les valeurs minimales (FAOMin), la valeur moyenne des valeurs extrêmes (FAOMoy) et les valeurs maximales (FAOMax). Pour être le plus exact possible, les grilles de valeurs de WHC (*Water Holding Capacity*) sont déterminées par bassin versant. Les résultats obtenus pour les cinq bassins versants testés sont présentés sur la figure 5.4.

La quatrième grille nommée FAOSaxton est obtenue à partir de la fonction de pédo-transfert (PDF) de Reynold *et al.*, (1999). Le procédé utilisé modifie la méthode de calcul de capacité en eau des unités de sol de la FAO en liant la *Digital Soil Map of the World* (DSMW) avec des fonctions PTF continues. Ces fonctions sont des équations de régression issues de grands jeux de données de profil de sol qui donnent des niveaux de confiance statistiques entre deux ou plusieurs paramètres du sol. La maîtrise de ces fonctions nécessite des données de distribution de taille des particules, des données organiques et de densité qui jouent un rôle important dans la détermination de la teneur en eau.

Les valeurs de capacité en eau du sol calculées par les différentes méthodes sont considérées comme fixes dans le temps pour les modèles utilisés dans l'étude.



**Figure 5.4 : Cartes capacité en eau des sols (Water Holding Capacity – WHC) des 5 bassins versants pour les valeurs maximales (SMAXPM), Minimales (SMINPM) et Moyennes (SMOYPM), suivant les données de la FAO**

*Echelle 1 : 13.500.000*

### Données de débits

Les chroniques de débits mensuels des cours d'eau étudiés sont celles présentées au troisième chapitre. Aucun traitement préalable de ces données n'est requis, si ce n'est de le présenter en fichiers texte avec séparateur point virgule.

#### **5.3.1.2.3 – Calibration des modèles**

Différentes combinaisons ont été réalisées avec l'ensemble des informations que nous venons de décrire afin de déterminer la ou les combinaisons qui donnent le meilleur résultat sur chaque bassin versant testé. Il s'agit de 3 grilles pluies (PSurfer, PThiessen et PCRU), 4 grilles ETP (ETP FAO, ETP Penman, ETP Reference Crop, ETP Thom et Oliver) et de 5 grilles de capacité en eau des sols (CRU, FAOMax, FAOMin, FAOMoy et FAOSaxton). Les trois modèles ont été testés sur les 5 bassins versants. Le modèle de Yates ne nécessite pas de procédure de calage de ses 3 paramètres, alors que les modèles GR2M et Conway nécessitent une étape de calage et une de validation.

#### Calage et validation des modèles GR2M et WBM

Les données disponibles ont été divisées en deux groupes, dont un premier pour le calage et un second pour la validation. L'ajustement des modèles a utilisé successivement les deux groupes de données pour déterminer celui qui conduit au meilleur calage. Le groupe conduisant à la simulation de moindre qualité est alors utilisé pour la validation des résultats du calage. L'ensemble des combinaisons a conduit à 1200 jeux de données pour les 2 modèles et les 5 bassins testés, soit 240 jeux possibles pour chaque bassin versant. Sur l'ensemble des 1200 combinaisons, 980 (82%) ont conduit à une valeur de Nash supérieure ou égale à 50%, parmi lesquelles 810 (soit 67%) dont ce critère est supérieur ou égal à 60%. Au niveau des bassins versants, le meilleur critère de Nash au niveau du calage est obtenu dans l'ordre : pour la Sanaga à Edéa (93%), le Mayo Kébi à Cossi (90%), le Nyong à Dehane (87%), la Bénoué à Garoua (86%) et le Dja à Somalomo (79%). La moindre qualité du calage obtenu pour le BV de Somalomo viendrait de sa taille relativement modeste, mais aussi et surtout de la difficulté que les modèles utilisés ont à représenter les écoulements en régime équatorial avec des hydrogrammes à 2 maximums. Pour le coefficient de corrélation mensuelle ( $R^2$ ), sur l'ensemble des 1200 combinaisons, 1028 (86%) ont conduit à une valeur supérieure ou égale à 0,70, parmi lesquelles 796 (soit 66%) dont ce coefficient est supérieur ou égal à 0,80. La valeur moyenne pour l'ensemble des 5 bassins versant est de 0,82.



Les principales caractéristiques des procédures de calage et de validation des 2 modèles pour les 5 bassins versants sont regroupées dans le tableau 5.8.

**Tableau 5.8 : Résultats Calage et Validation des 2 Modèles**

Désignation	Modèle GR2M		Modèle WBM	
	Critère de Nash (%)		Critère de Nash (%)	
	Calage	Validation	Calage	Validation
Valeur maximale	93	88	75	70
Valeur minimale	41	-19	-28	-9
Valeur Moyenne	79	73	54	50
Ecart Type	12	16	18	12

Avec une valeur moyenne du critère de Nash égale à 79 contre seulement 54 pour le modèle WBM, les résultats montrent que le modèle GR2M donne les meilleurs résultats pour l'ensemble des bassins versants. Ce dernier semble par conséquent s'adapter mieux aux différents bassins testés en phases de calage et de validation. En effet, bien que les valeurs du critère de Nash aient légèrement baissé en phase de validation, les meilleurs résultats y sont toujours obtenus avec le modèle GR2M.

### Application du modèle de Yates

Contrairement aux deux modèles précédents, le modèle de Yates ne nécessite pas un calage préalable des paramètres avant son application sur les bassins. La combinaison des différents paramètres (pluies et données ETP) sur l'ensemble des 5 bassins versants a conduit à 60 jeux de données, soit 12 pour chaque bassin testé. Le tableau 5.9 présente les meilleurs résultats obtenus sur les différents bassins versants.

**Tableau 5.9: Meilleurs résultats obtenus avec le modèle de Yates**

Cours d'eau et Station	Période de simulation	Pluie	ETP	Critère de Nash (%)
Mayo Kébi à Cossi	1955-1987	P_Surfer	Thom&Oliver	51
Bénoué à Garoua	1946-1987	P_Surfer	Thom&Oliver	86
Sanaga à Edéa	1943-1983	Thiessen	Penman	62
Nyong à Dehane	1951-1987	P_CRU	Penman	-14
Dja à Somalomo	1955-1987	P_Surfer	Penman	-52

Comme on peut le constater dans le tableau 5.9, un seul bassin versant sur cinq (la Bénoué à Garoua) conduit à un critère de Nash comparable aux résultats obtenus avec les deux modèles précédents. Des valeurs négatives du critère sont même obtenues pour les bassins versants du Nyong à Déhane et celui du Dja à Somalomo, tous deux situés en région forestière. Ces résultats témoignent de la moindre qualité de la reconstitution des hydrogrammes observés sur nos cours d'eau par le modèle de Yates, et tout particulièrement pour les bassins versants de la région forestière.

#### 5.3.1.2.4 – Comparaison de la performance des modèles

Les données du tableau 5.10 présentent les combinaisons ayant conduit aux meilleurs résultats par bassin versant selon la grille de pluie utilisée, ainsi que les valeurs du critère de Nash obtenues en phase de validation pour les trois modèles.

**Tableau 5.10 : Meilleures combinaisons de données par bassin et valeur de Nash en période de validation**

Cours d'eau et station	Pluie	Modèle GR2M			Modèle WBM			Modèle de Yates	
		ETP	Sol	NASH	ETP	Sol	NASH	ETP	NASH
Mayo Kébi à Cossi	Thiessen	Réf. Crop	FAOSaxton	83	Thom&Ol.	CRU	66	Thom&Ol.	33
	Surfer	Penman	FAOSaxton	83	Réf. Crop	CRU	69	Thom&Ol.	51
	CRU	Penman	FAOMin	87	Réf. Crop	CRU	70	Thom&Ol.	33
Bénoué à Garoua	Thiessen	Thom&Ol.	FAOMax	82	Thom&Ol.	FAOMin	63	Thom&Ol.	78
	Surfer	Thom&Ol.	FAOMax	85	Thom&Ol.	FAOMax	66	Thom&Ol.	86
	CRU	Réf. Crop	FAOMax	76	FAO	FAOMoy	50	Thom&Ol.	62
Sanaga à Edéa	Thiessen	Penman	FAOMax	87	Réf. Crop	FAOMax	64	Penman	62
	Surfer	Penman	FAOMax	88	Penman	FAOMax	66	Penman	62
	CRU	Réf. Crop	FAOMax	85	Penman	FAOMax	83	Penman	60
Nyong à Dehane	Thiessen	Penman	FAOMax	82	Penman	FAOMin	63	Penman	-17
	Surfer	Penman	FAOMoy	85	Penman	FAOMin	66	Penman	-33
	CRU	Penman	FAOMax	78	Penman	FAOMin	64	Penman	-14
Dja à Somalomo	Thiessen	Thom&Ol.	FAOMax	72	FAO	FAOMoy	51	Penman	-104
	Surfer	FAO	FAOMax	73	Penman	FAOMax	55	Penman	-52
	CRU	Réf. Crop	FAOSaxton	58	Penman	FAOMax	45	Penman	-71

Dans l'ensemble, les performances des 3 modèles sont meilleures sur les 2 bassins versants situés en zone de savane du Nord Cameroun et la Sanaga dont le bassin versant intègre la quasi-totalité des modes d'occupation des sols du pays, dont une partie importante de savane. Pour le bassin du Nyong et celui du Dja situés entièrement en région forestière, seuls les modèles GR2M et WBM présentent des combinaisons avec des critères de Nash au moins supérieurs à 50.

En dehors du bassin versant de la Bénoué à Garoua qui, avec le modèle de Yates, présente une combinaison conduisant à un critère de Nash comparable à ceux obtenus avec le modèle GR2M, les meilleurs résultats sont obtenus sur les autres bassins avec le modèle GR2M. A titre d'illustration, la figure 5.5 présente des exemples d'hydrogrammes observés et reconstitués en phase de validation par ce modèle sur 3 des 5 bassins versants testés.

On note une bonne reconstitution de la forme des hydrogrammes pour les cours d'eau du Nord et la Sanaga. Pour les bassins versants de la région forestière, si les valeurs des débits de pointe sont relativement bien reproduites ainsi que leur position dans le temps, la forme des hydrogrammes est mal reconstituée ainsi que les faibles débits, comme l'illustre bien l'exemple du Dja à Somalomo.

Afin de permettre une meilleure comparaison des performances des 3 modèles, nous avons procédé à la simulation des écoulements sur l'ensemble de la période d'observation des débits à l'exutoire de chaque bassin en utilisant chaque fois la meilleure combinaison de données obtenue en phase de calibration. Les résultats obtenus confirment les performances du modèle GR2M pour l'ensemble des bassins. Nous le retiendrons par conséquent pour la simulation des écoulements sur l'ensemble des bassins versants dans la suite de l'étude.

A titre d'illustration, la figure 5.6 présente les résultats obtenus pour la Sanaga à Edéa et la Bénoué à Garoua. Les effets des barrages de retenue sont bien perceptibles sur les hydrogrammes respectifs des deux cours d'eau. On note bien une sous-estimation des débits de basses eaux sur la Sanaga à partir de 1970, qui s'expliquerait par la mise en eau du premier barrage de retenue (Mbakaou) en 1969. Les débits de pointe sont également sous-estimés plus souvent à partir de la même date par le modèle GR2M, pour les mêmes raisons. Le modèle de Yates surestime généralement les débits à cette même station sur toute la période de simulation, alors que le WBM les sous-estime.

Pour la Bénoué à Garoua, la mise en eau du barrage de Lagdo en 1983 est également bien perceptible. L'importance de la capacité de cette retenue (8 milliards de m<sup>3</sup>) expliquerait celle de la sous-estimation des débits de pointe à cette station, notamment en année de faible hydraulicité.

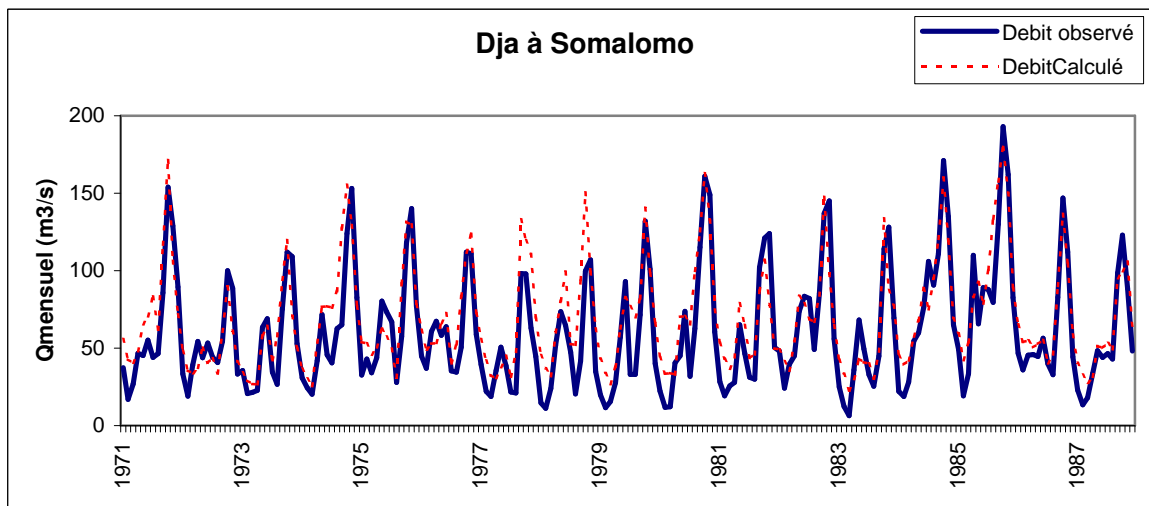
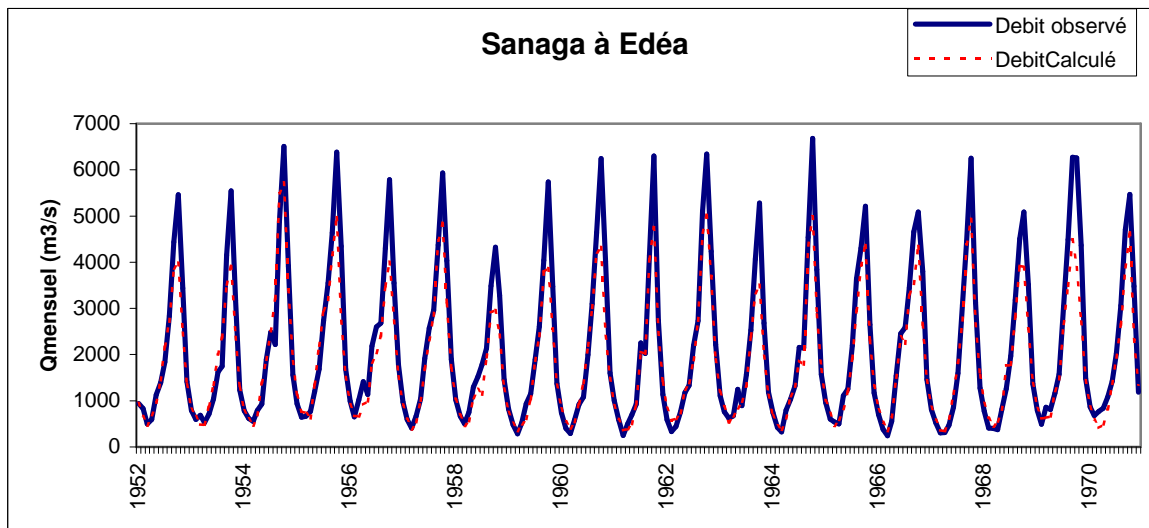
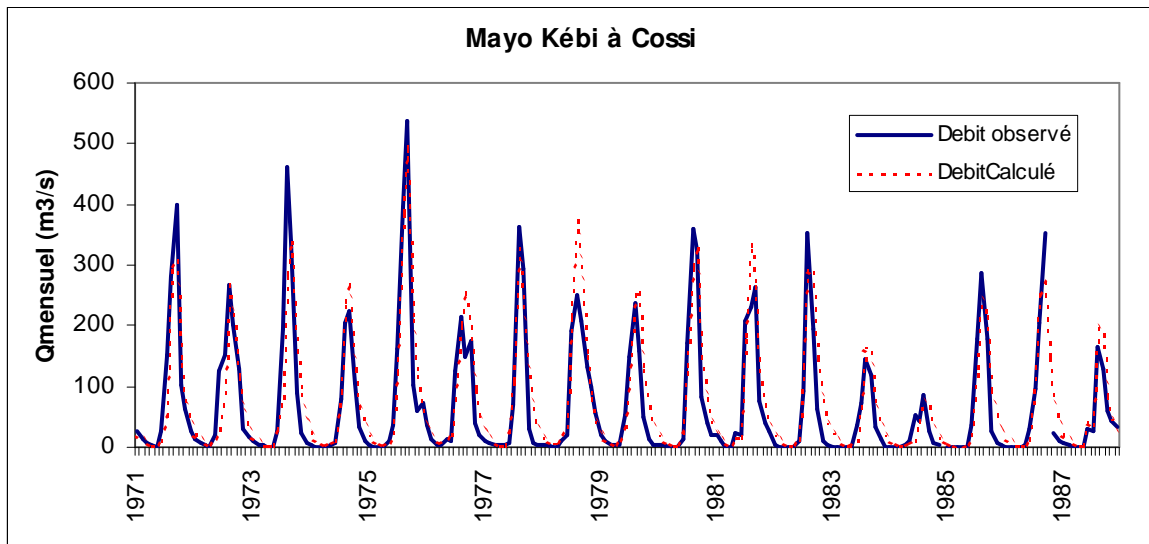


Figure 5.5 : Hydrogrammes observés et calculés sur la période de validation du modèle GR2M sur quelques bassins versants en utilisant les meilleures combinaisons du tableau 5.10

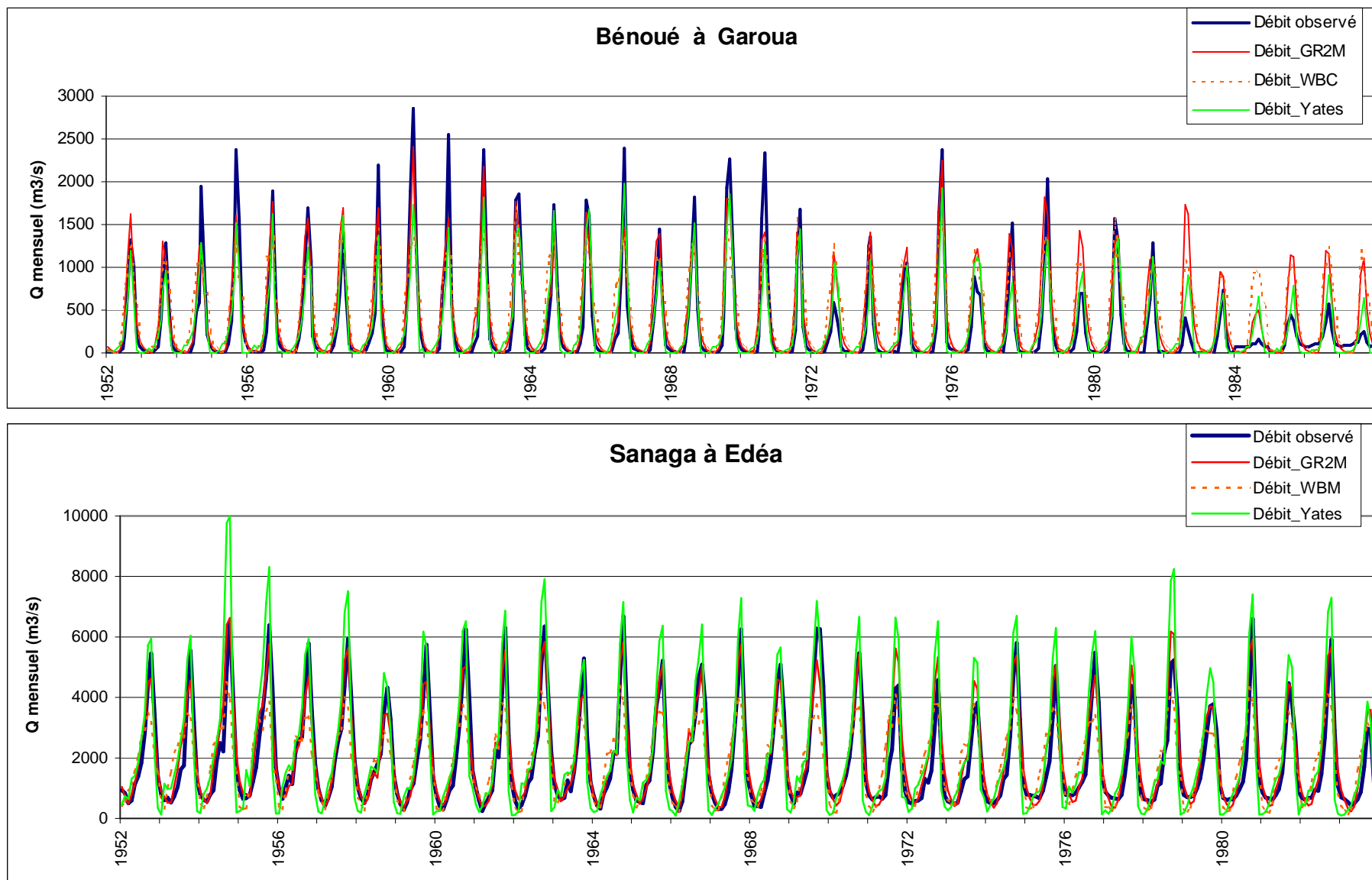


Figure 5.6 : Comparaison de la performance des modèles (avec les meilleures combinaisons du tableau 5.10) : exemple de la Bénoué à Garoua et de la Sanaga à Edéa

### 5.3.1.2.5 – Quantification des écarts aux observations et validation des résultats

La validité des résultats obtenus avec les modèles doit être confirmée par la justesse et la pertinence des jeux de données utilisés dans les différentes phases de calcul. Dans cette optique, outre la comparaison de la performance du modèle retenu en fonction des différentes grilles de données, nous procéderons ici au rapprochement des valeurs moyennes de l'ETP et des précipitations par bassin avec celles obtenues dans le cadre d'autres études sur les mêmes bassins.

#### Influence du type de pluie

Deux modes de calcul de la pluie moyenne ont été appliqués à nos données d'observation et une deuxième source de données a également été utilisée. La pluie moyenne des différents bassins, sur l'ensemble de la période d'observation, a été calculée suivant les 2 sources de données et les 2 méthodes de calcul. Le tableau 5.11 regroupe les résultats obtenus.

**Tableau 5.11 : Pluies moyennes interannuelles (mm) des bassins déterminées par différentes méthodes**

Bassin versant	Pluie Surfer	Pluie Thiessen	Pluie CRU
Mayo Kébi à Cossi	1007	923	925
Bénoué à Garoua	1192	1144	1094
Sanaga à Edéa	1732	1756	1760
Nyong à Dehane	1859	1834	1884
Dja à Somalomo	1616	1633	1608

Les pluies moyennes interannuelles obtenues par bassin sont relativement proches les unes des autres, et dans l'ordre de grandeur de celles calculées par les méthodes classiques dans d'autres travaux antérieurs (Olivry, 1986 ; Sigha, 1994, Ndam Ngoupayou J.-R., 1997)

La comparaison des résultats obtenus par le modèle GR2M (figure 5.7) avec les différentes grilles de pluies montre cependant que celles construites (par Surfer et la méthode de Thiessen) à partir des données de notre échantillon de travail conduisent aux meilleurs résultats, avec un léger avantage pour la grille de Surfer qui utilise la méthode de krigeage. Ce résultat découle de la meilleure représentativité des données de notre échantillon qui regroupe un nombre de postes d'observation plus important, d'où une meilleure reconstitution de la variabilité spatiale des précipitations. Il convient de souligner la qualité des résultats particulièrement mauvaise obtenue sur le bassin forestier du Dja à Somalomo avec les pluies du CRU.

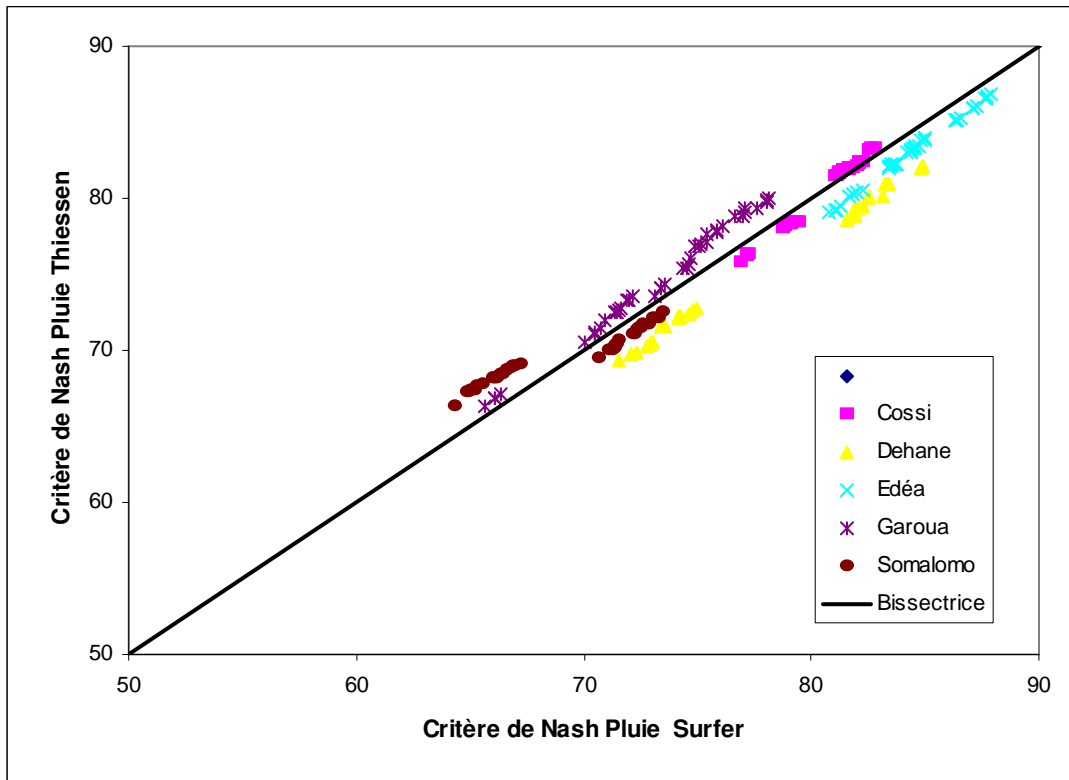
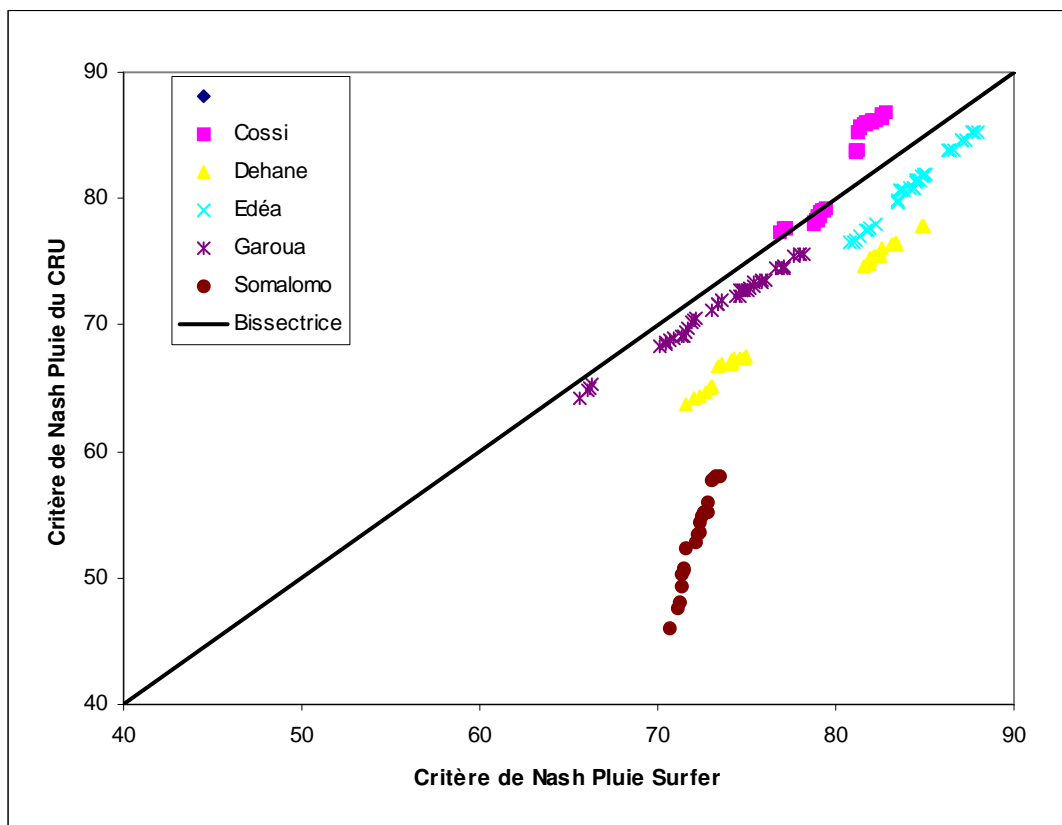


Figure 5. 7 : Comparaison des critères de Nash de GR2M obtenus avec différentes grilles de pluie

### **Influence du type d'ETP**

Les valeurs de l'ETP utilisées par les modèles pour la reconstitution des écoulements aux exutoires des différents bassins versants testés ont été calculées par quatre méthodes différentes. Les valeurs moyennes interannuelles de l'ETP des 5 bassins sont regroupées dans le tableau 5.12. Noter que pour chaque bassin le calcul de l'ETP moyenne ne porte que sur la période d'observation simultanée des pluies et des débits.

**Tableau 5.12 : ETP moyennes interannuelles (mm) des bassins par différentes méthodes de calcul**

<b>Bassin versant</b>	<b>ETP Penman</b>	<b>ETP TO</b>	<b>ETP RC</b>	<b>ETP FAO</b>
Mayo Kébi à Cossi	2261	1824	2050	2047
Bénoué à Garoua	2089	1675	1858	1844
Sanaga à Edéa	1418	1120	1200	1230
Nyong à Dehane	1241	977	1060	1055
Dja à Somalomo	1171	878	1023	908

Comme on peut le voir dans le tableau, les différences entre les résultats obtenus par les différentes méthodes de calcul sont assez significatives. Les moyennes sont logiquement plus faibles pour les bassins du Sud du pays et plus importantes pour ceux du Nord. A quelques exceptions près, les résultats du tableau 5.12 se situent dans la gamme des résultats des travaux de Olivry (1986) qui, à la suite des études de Lemoine (1972), montre la décroissance de l'ETP du Nord du Cameroun où le total annuel peut dépasser 2200 mm, vers le Sud où des valeurs inférieures à 1100 mm sont enregistrées dans certains secteurs. Noter cependant que les valeurs fournies par la méthode de Penman sont plus proches de celles d'Olivry alors que celles de la méthode de Thom et Oliver sont particulièrement faibles.

En dépit de cette différence entre les résultats avec les différentes méthodes, la comparaison des résultats obtenus par le modèle GR2M (figure 5.8) avec les différentes grilles d'ETP ne montre pas de différences significatives. Les modèles WBM et Yates semblent sensibles aux valeurs des données d'ETP, mais reconstituent moins bien les écoulements sur nos bassins versants. Les travaux de Ouedraogo M. (2001) ont conduit à des résultats comparables sur d'autres bassins versants en Afrique de l'Ouest.



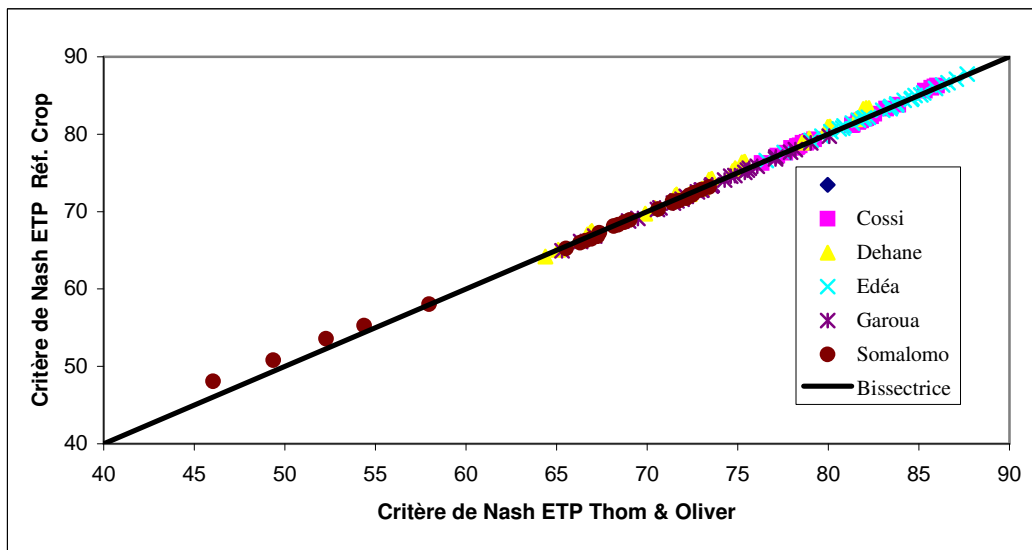
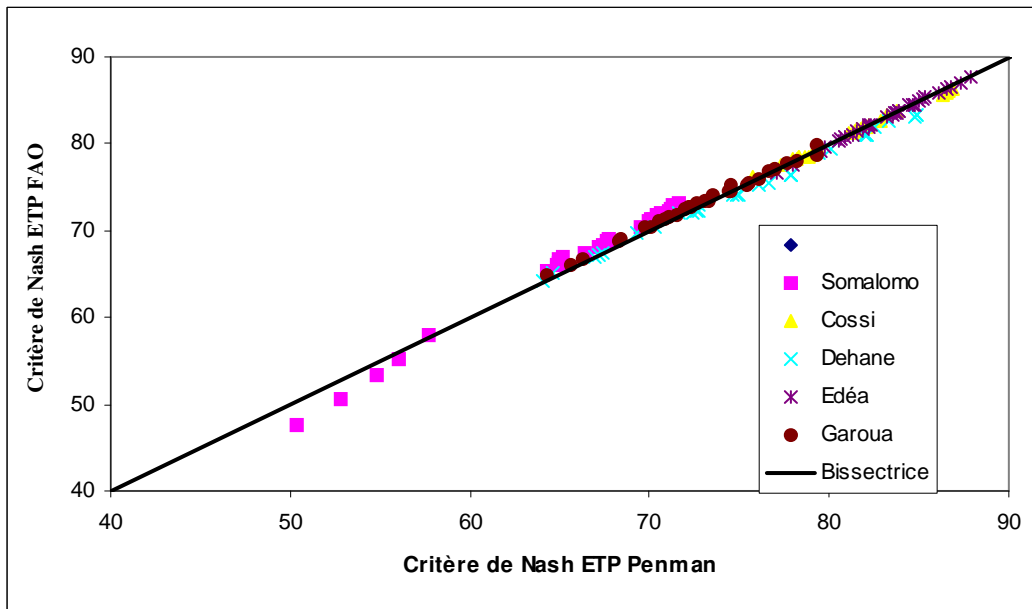
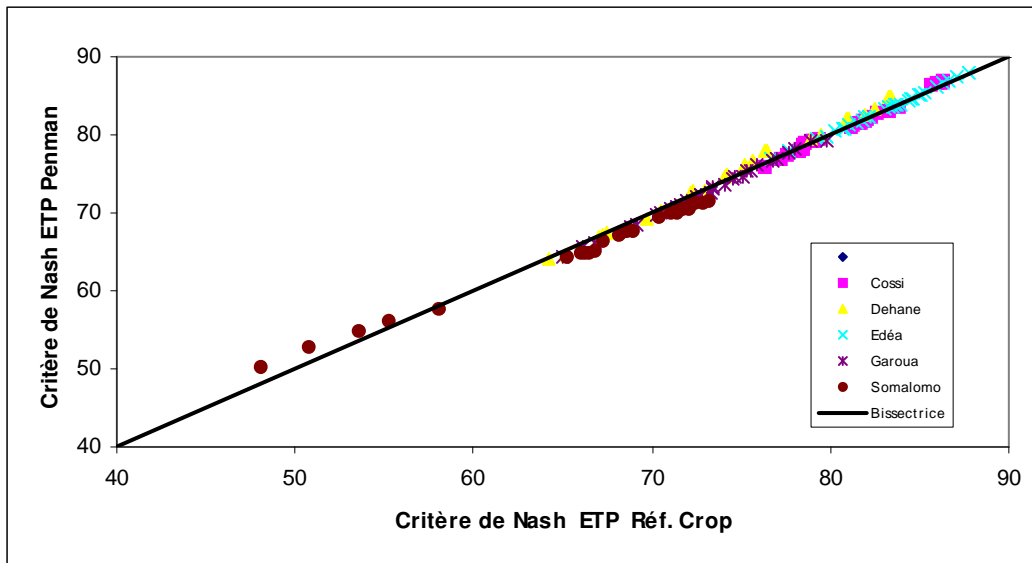


Figure 5. 8: Comparaison des critères de Nash de GR2M obtenus avec différentes valeurs d'ETP

La faible sensibilité du modèle à l'ETP laisse penser qu'on ne sait pas encore la calculer avec précision à l'échelle du bassin versant. Cette situation devrait se traduire particulièrement par une médiocre reconstitution des étiages par le modèle. D'autre part, l'ETP est le paramètre du modèle qui devrait intégrer le mieux le changement climatique qui se caractérise par une hausse permanente des températures. Ces résultats posent alors le problème de la capacité du modèle GR2M à prévoir les effets du réchauffement du climat, et la confiance que l'on peut avoir dans les travaux relatifs à l'impact du changement climatique sur le cycle de l'eau. La faible sensibilité des modèles hydrologiques à l'ETP est un problème bien connu (Paturel *et al.*, 1995 ; Arnell & Reynard, 1996, Ardoin S. *et al.*, 2001), et de nombreux travaux visant une meilleure prise en compte de cette variable dans la relation pluie-débit sont en cours.

### **Influence de la capacité de rétention en eau du sol**

Cinq grilles de données de la capacité de rétention en eau du sol ont été utilisées pour la reconstitution des écoulements aux exutoires des différents bassins versants testés. Les valeurs moyennes calculées pour chacun des 5 bassins sont regroupées dans le tableau 5.13.

**Tableau 5.13 : Différentes valeurs moyennes de la capacité de rétention en eau (mm) des sols des bassins**

<b>Bassin versant</b>	<b>FAOMax</b>	<b>FAOMin</b>	<b>FAOMoy</b>	<b>FAOSaxton</b>	<b>CRU</b>
Mayo Kébi à Cossi	230	187	207	99	48
Bénoué à Garoua	194	150	171	93	59
Sanaga à Edéa	209	162	186	103	94
Nyong à Dehane	298	254	276	104	127
Dja à Somalomo	200	150	176	90	132

Nous ne disposons malheureusement pas d'éléments de comparaison des valeurs de ce paramètre sur nos différents bassins. On peut cependant noter l'importance des différences entre les données des différentes grilles (le facteur va de 1 à plus 4 dans certains cas). Bien que la comparaison des résultats obtenus par le modèle GR2M (figure 5.9) avec les différentes grilles de WHC (Water Holding Capacity) montre que les grilles FAOMax améliorent la valeur du critère de Nash dans la plupart des cas (sauf sur le Mayo Kébi où c'est FAOSaxton qui donne le meilleur résultat), les différences entre les résultats semblent peu significatives au regard des différences entre les valeurs du paramètre dans les différentes grilles. Cet aspect de la question mériterait d'être réexaminé. D'autre part, si les grilles FAOMax conduisent au meilleur résultat sur la plupart des bassins versants, il convient de noter qu'au stade de calage du modèle GR2M, seulement 22% des combinaisons conduisent à un critère de Nash supérieur à 90% utilisent FAOMax, contre 29% pour FAOMoy et 28% pour FAOMin.

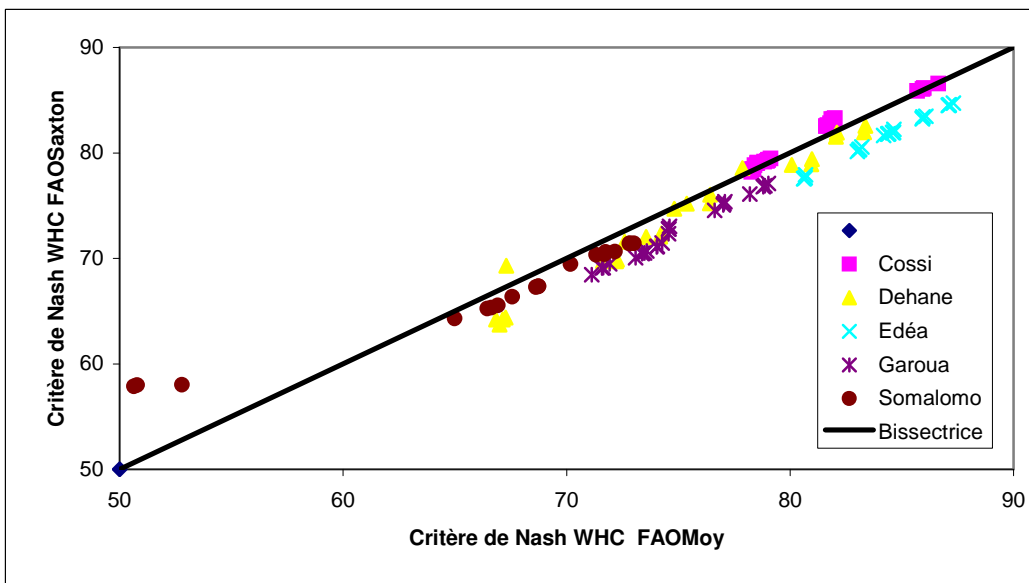
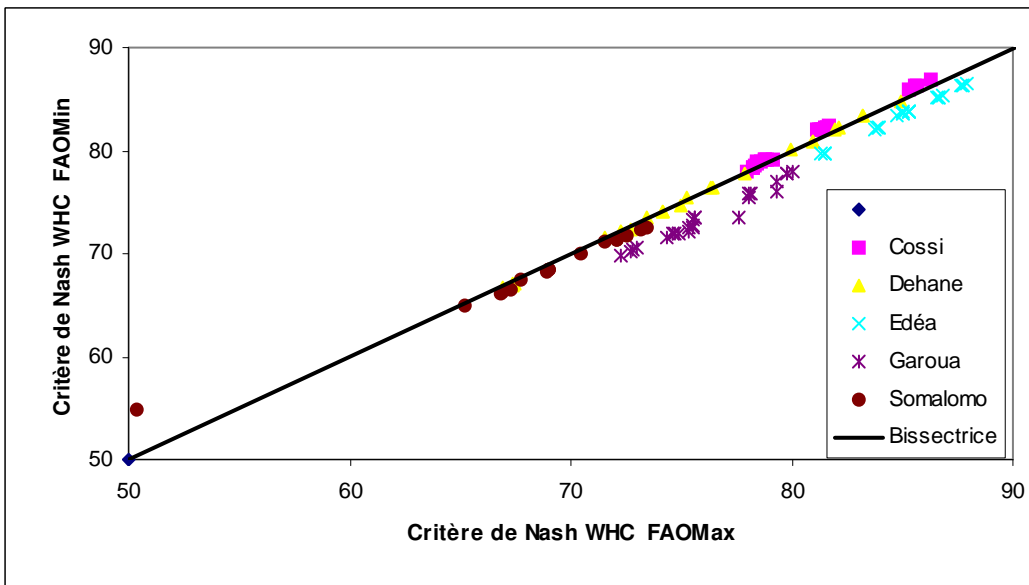
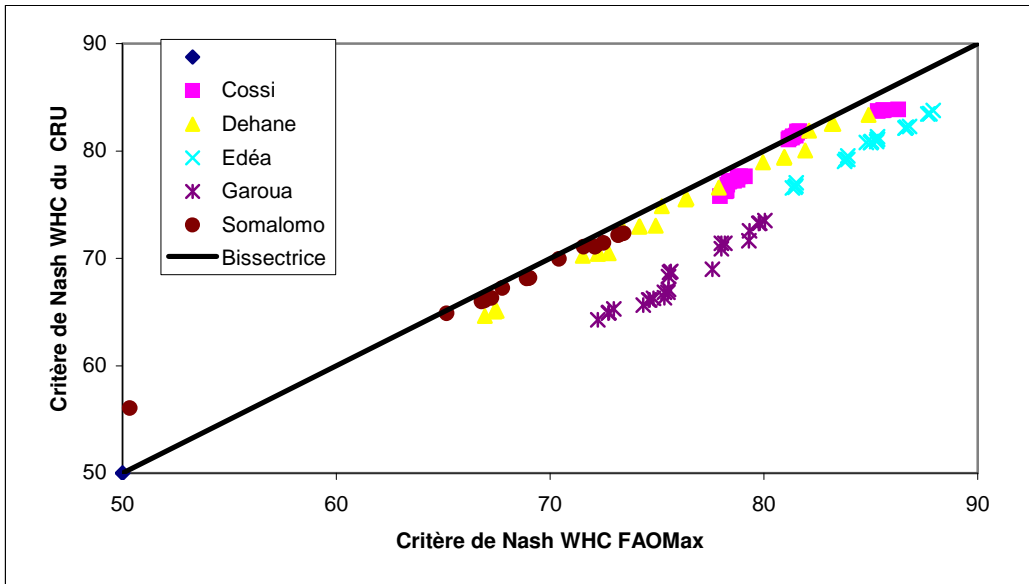


Figure 5. 9 : Comparaison des critères de Nash obtenus pour différentes grilles WHC

De nombreux travaux relatifs à l'aptitude des bassins versants à ruisseler (Albergel, 1987 ; Pouyaud, 1987 ; Kouame B. *et al.*, 1995 ; Servat E. & Sakho, 1995 ; Casenave *et al.*, 1996 ; Gellens D. *et al.*, 1997 ; Brou Yao T. *et al.*, 1998 ; Morot Ph. *et al.*, 1999) montrent que les principaux facteurs sont la nature géologique du substratum, les grands types de sols qui le constituent, le couvert végétal, la pente et les indices de compacité. En régions sahéliennes et désertiques par contre, ce sont les caractéristiques des états de surface qui conditionnent l'hydrodynamique. Comme on peut le constater, ces caractéristiques n'ont pas toutes été prises en compte dans nos modèles. D'autre part, à la différence des variables climatiques, dans nos modèles les données de la capacité de rétention en eau du sol sont fixes dans le temps. Dans ces conditions, bien que la capacité de rétention en eau des sols ait une influence certaine sur le bilan hydrologique global des bassins, il est très difficile de faire la part de choses entre les effets respectifs des différents paramètres liés au sol. On peut logiquement penser que WHC intègre les effets de tous ces paramètres qui se rattachent à la fois aux états de surface et à la morphométrie des bassins versants.

#### **5.4 - LIMITES DE LA MODELISATION**

Travaillant avec des modèles réputés imparfaits, il est nécessaire de s'interroger sur la pertinence des modèles choisis par rapport à la question posée, et d'examiner les incertitudes qui pourraient entacher les conclusions que nous allons tirer des analyses. Plutôt que la description exhaustive des processus, une des approches de la modélisation utilisée en hydrologie consiste à extraire de la complexité des systèmes hydrologiques observés à l'échelle des bassins versants, des caractères stables permettant d'interpréter leurs comportements sous l'effet des précipitations. Cette approche se traduit par des modèles simples qui s'accommodent de très peu de données. C'est le cas des 3 modèles que nous avons testé dans cette étude. Outre les imperfections inhérentes à cette démarche, l'un des principaux obstacles à l'utilisation des modèles pour la description de la relation pluie-débit est l'absence ou l'insuffisance des données fiables représentatives. En effet, la robustesse des modèles est attestée par une validation exhaustive portant sur un grand nombre de bassins versants (Edijatno *et al.*, 1999). Il n'est pas certain dans ces conditions que les données hydroclimatiques actuellement disponibles sur les différents bassins versants du Cameroun permettent une vérification complète des modèles construits pour répondre à des questions précises. Les études du climat et de son évolution dans le temps se heurtent en Afrique en général et au Cameroun en particulier, sur le fait que les observations du réseau hydro-

climatologique ont subi une dégradation très poussée (sur le double plan qualitatif et quantitatif) au cours des 20 dernières années. Cet important handicap se trouve accentué lorsque la situation est fortement perturbée comme c'est le cas actuellement. On conçoit aisément que la représentativité des résultats des analyses soit discutable et les conclusions provisoires.

D'autre part, de nombreux travaux soulignent le fait que les paramètres calés pour un bassin versant donné semblent spécifiques et caractéristiques de ce dernier, ce qui laisse penser que les caractéristiques climatiques annuelles et physiographiques du bassin jouent un rôle non négligeable. Cette forte dispersion du comportement des hydrosystèmes modulera nos conclusions quant à la possibilité de transposition des résultats de quelques études particulières au cas général d'une région ou d'un pays comme le Cameroun par exemple. La dispersion entre les modèles hydrologiques est également significative, et la variété des processus est telle que les conclusions peuvent différer profondément d'un modèle à un autre. Des efforts sont encore à réaliser sur un certain nombre de points, notamment une meilleure maîtrise de la variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'ETP, ainsi que du mécanisme de ruissellement sur les bassins. Des études incluant la compréhension de la relation pluie/ruissellement au niveau du sol, réalisées sur une durée assez longue devraient permettre d'expérimenter sur le terrain une gamme importante de variabilité climatique et une meilleure compréhension du phénomène.

La prévision de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau est cependant fondamentale pour la planification et l'organisation des usages. C'est à ce niveau que la modélisation en hydrologie trouve l'une de ses principales motivations. Dans ces conditions, en dépit des insuffisances que nous venons d'évoquer, des efforts sont maintenus dans la modélisation en hydrologie. L'actualité des questions de changement climatique a conduit de nombreux auteurs à s'intéresser ces dernières années à leurs impacts sur les ressources en eau (Morin & Slivitzky, 1992 ; Gellens & Schädler, 1997 ; Arnell, 1996 et 1998), sur le régime des écoulements de même que sur les relations avec les activités socio-économiques. Si de nombreux aspects de la question restent à documenter, les conclusions de ces travaux sont globalement encourageantes.

La première partie de ce chapitre nous a permis d'évaluer l'aptitude de 3 modèles hydrologiques à reconstituer les écoulements sur 5 bassins versants représentatifs des

principaux hydrosystèmes du Cameroun. Le modèle GR2M s'est révélé être celui qui permet la meilleure reconstitution des hydrogrammes de l'ensemble des bassins versants testés. La robustesse de ce modèle est confirmée par des résultats similaires enregistrés sur d'autres bassins versants de la région tropicale africaine. Nous l'avons retenu pour estimer les flux hydriques du XXI<sup>ème</sup> siècle sur nos cinq bassins versants. Cette estimation sera réalisée sur la base des informations fournies par des modèles climatiques, mais avant d'aborder cet aspect de l'étude nous rappellerons brièvement les méthodes d'analyse de l'évolution du climat et quelques propositions de scénarios d'évolution dans différentes régions du monde.

## **5.5 – INCIDENCES DE L'EVOLUTION DU CLIMAT SUR LES HYDROSYSTEMES**

### **5.5.1- Généralités sur les études de l'évolution du climat**

En vue d'évaluer les informations scientifiques disponibles et rendre des avis scientifiques, techniques et socio-économiques sur l'évolution du climat mondial, un Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) – *ou Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* - a été constitué à la fin des années 1980 par l'OMM et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Ce groupe a produit de nombreux rapports, dont des documents techniques, des méthodologies et des directives à l'adresse des scientifiques, des autorités et des experts intéressés par les questions de changement climatique. Un rapport spécial sur les scénarios d'émissions ou SRES (*Special Report on Emission Scenarios*) donne une description des scénarios envisageables pour l'évolution future du climat. En effet, 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 de Circulation Générale Couplés Atmosphère-Océans (AOGCM). 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 d'évaluation de l'IPCC (IPCC, 2001) sert de référence de nos jours pour les changements observés et les projections pour l'évolution future du système climatique.

### **Modèles climatiques et scénarii d'évolution de IPCC 2001**

Des nombreux modèles qui ont déjà été mis au point, sept (tableau 5.14) sont recommandés par le GIEC pour les études de l'impact du changement climatique.

**Tableau 5.14 : Modèles de Circulation Générale Couplés Atmosphère-Océans de IPCC, 2001**

<b>Modèle</b>	<b>Origine</b>	<b>Résolution atmosphérique</b>	<b>Résolution océanique</b>
<b>HadCM3</b>	UK	2,5° x 3,75°	2,5° x 3,75°
<b>CSIRO-Mk2</b>	Australie	3,2° x 5,6°	3,2° x 5,6°
<b>ECHAM4</b>	Allemagne	2,8° x 2,8°	2,8° x 2,8°
<b>GFDL-R15</b>	USA	4,5° x 7,5°	4,5° x 3,75°
<b>CGCM1</b>	Canada	3,7° x 3,7°	1,8° x 1,8°
<b>CCSR/NIES</b>	Japon	5,6° x 5,6°	2,8° x 2,8°
<b>NCAR-DOE</b>	USA	2,8° x 2,8°	1° x 1°

Ces modèles permettent la simulation des climats actuel et futur sous la contrainte des gaz à effet de serre. Les simulations du climat futur se font généralement sous un scénario de composition atmosphérique avec une contrainte d'augmentation de 1% de la concentration du CO<sup>2</sup> par an. Les détails sur le mode opératoire, les avantages et inconvénients ainsi que les performances de chacun de ces modèles sont décrits dans IPCC (2001).

Quatre canevas (A1, A2, B1 et B2) circonstanciés ont été élaborés pour donner une description cohérente des rapports entre les éléments qui déterminent les émissions des gaz à effet de serre et leur évolution. Les 40 scénarios qui en découlent portent sur un large éventail des principales forces démographiques, économiques et technologiques qui détermineront les émissions des gaz à effet de serre et d'aérosol dans le futur. Chaque scénario représente une quantification spécifique de l'un des 4 canevas. Les scénarios ne prennent pas en compte une éventuelle initiative sur le plan mondial en matière du climat.

- Le canevas et la famille de scénarios A1 décrivent un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la

convergence des régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant. La famille A1 se scinde en 3 groupes (A1FI, A1T et A1B) qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique.

- Le canevas et la famille de scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultats un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.
- Le canevas et la famille de scénarios B1 décrivent un monde convergeant avec la même population mondiale culminant au milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle et déclinant ensuite comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres utilisant les ressources de manière efficiente.
- Le canevas et la famille de scénarios B2 décrivent un monde où l'accent est mis sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans le cas de B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

Seuls les scénarios des familles A2 et B2 ont été déjà pris en compte par plusieurs modèles de circulation générale. Six groupes de scénarios pouvant être considérés comme également fiables, recouvrant 4 combinaisons d'évolution démographique et technologique générale, de développement social et économique, correspondant aux 4 canevas (avec chacun un scénario



‘marqueur’) décrits ci-dessus, ont été présentés dans le SRES. Le rapport de l’IPCC (2001) démontre en accord avec les conclusions du GIEC, que les principales forces motrices des futures quantités des gaz à effet de serre seront l’évolution démographique, le développement économique et social, le rythme et la direction de l’évolution technologique. Sur cette base, les émissions à travers les scénarios pour les échéances 2020, 2050 et 2100, par rapport à 1990 ont été établies.

### **5.5.2 – Prévisions sur le plan global**

Les prévisions pour le changement climatique convergent vers une augmentation de la température moyenne à la surface de la terre. Les gammes de variation prévue sont comprises entre 1.5 et 5°C dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle. L’accroissement de la capacité de rétention de l’eau de l’atmosphère est l’une des principales rétroactions à l’origine de ce réchauffement. Il en résultera un flux d’évaporation plus important et à l’échelle du globe une augmentation moyenne de l’humidité atmosphérique et des précipitations. A l’échelle régionale cependant, on prévoit à la fois des augmentations et des diminutions des précipitations. Une augmentation des précipitations hivernales (décembre à mars) est prévue aux latitudes moyennes de l’hémisphère nord, en Afrique tropicale et en Antarctique. Il en va de même des précipitations estivales (juin à septembre) en Asie du Sud et de l’Est. Une diminution régulière des précipitations hivernales est par contre prévue en Afrique australe, en Amérique centrale et en Australie (IPCC, 2001).

Pour ce qui concerne l’évolution future des phénomènes météorologiques extrêmes, il faudrait s’attendre très probablement à un accroissement du nombre de journées de chaleur et de vague de chaleur sur presque toutes les terres émergées. On prévoit que les extrêmes des précipitations augmenteront plus que les moyennes et que l’intensité des précipitations augmentera également. La fréquence des précipitations extrêmes devrait progresser presque partout. Un assèchement général de la partie centrale des continents en été (juin à septembre) est également prévu, sous l’influence d’un ensemble de facteurs, notamment d’une élévation de la température et d’un accroissement de l’évaporation potentielle non compensé par un accroissement des précipitations. Le tableau 5.15 résume les effets du changement climatique sur les ressources en eau du globe en général.

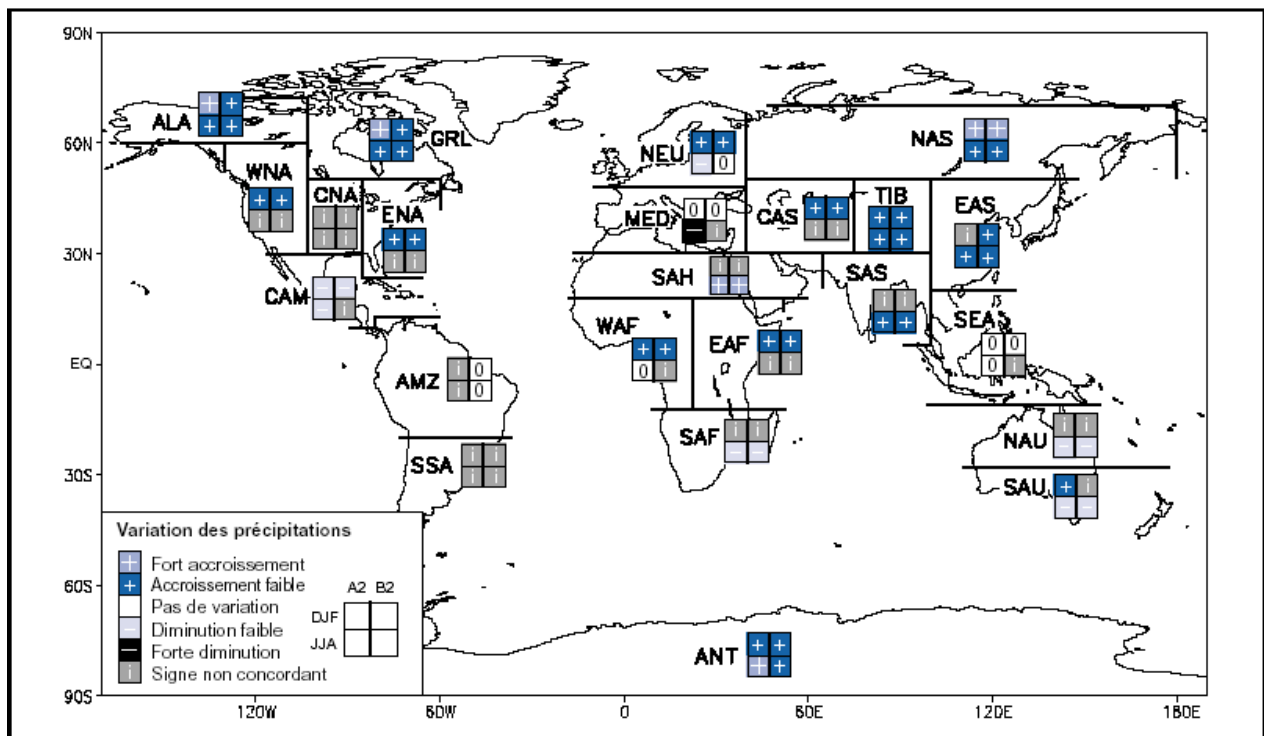
**Tableau 5.15 : Effets des changements climatiques sur les ressources en eau, en l'absence de mesure d'intervention climatiques (IPCC, 2001)**

	<b>Horizon 2025</b>	<b>Horizon 2050</b>	<b>Horizon 2100</b>
Concentration CO <sub>2</sub> <sup>a</sup>	405 – 460 ppm	445 – 640 ppm	540 – 970 ppm
Variations température moyenne mondiale depuis 1990 <sup>b</sup>	0,4 – 1,1°C	0,8 – 2,6°C	1,4 – 5,8°C
Élévation moyenne mondiale du niveau de la mer depuis 1990 <sup>b</sup>	3 - 14 cm	5 – 32 cm	9 - 88 cm
<b>Effets sur les écosystèmes<sup>c</sup></b>			
Alimentation en eau	Changement des périodes de débits fluviaux maximaux –du printemps en hiver - dans les bassins où les chutes de neige sont une source d'eau importante (confiance élevée <sup>d</sup> )	Diminution des ressources en eau dans de nombreux pays soumis au stress hydrique ; augmentation de ces ressources dans certains pays soumis au stress hydrique (confiance élevée <sup>d</sup> )	Amplification des effets des ressources en eau (confiance élevée <sup>d</sup> )
Qualité de l'eau	Dégradation de la qualité de l'eau en raison de températures plus élevées. Modification de la qualité de l'eau due aux changements des débits fluviaux. Augmentation de la pénétration d'eau de mer dans les aquifères côtiers en raison de l'élévation du niveau de la mer (confiance moyenne <sup>d</sup> )	Dégradation de la qualité de l'eau en raison de températures plus élevées (confiance élevée <sup>d</sup> ). Modification de la qualité de l'eau due aux changements des débits fluviaux (confiance élevée <sup>d</sup> )	Amplification des effets de la qualité de l'eau (confiance élevée <sup>d</sup> )
Besoins hydriques	Les besoins hydriques à des fins d'irrigation répondront aux changements climatiques ; la demande aura tendance à augmenter avec des températures plus élevées (confiance élevée <sup>d</sup> )	Amplification des effets des ressources en eau (confiance élevée <sup>d</sup> )	Amplification des effets des ressources en eau (confiance élevée <sup>d</sup> )
Phénomènes extrêmes	Augmentation des dommages dus aux inondations résultant des précipitations plus intenses (confiance élevée <sup>d</sup> ) Sécheresse plus fréquente (confiance élevée <sup>d</sup> )	Augmentation des dommages dus aux inondations (confiance élevée <sup>d</sup> ). Augmentation des sécheresses et de leurs incidences	Dommages dus aux inondations plusieurs fois plus importants que dans les "scénarios sans changements climatiques"
<p><b>a)</b> fourchettes estimées à l'aide de modèle à cycle rapide du carbone pour les 6 scénarios d'illustration du Rapport Spécial sur les Scénarios d'émission (RSSH) et correspondent aux valeurs minimales et maximales estimées ; <b>b)</b> les fourchettes indiquées pour les variations de température moyenne mondiale et l'élévation moyenne mondiale du niveau de la mer ; <b>c)</b> ces estimations sont très sensibles aux profils régionaux et saisonniers des variations de température et de précipitations, ainsi qu'aux hypothèses caractéristiques des sociétés futures ; <b>d)</b> la confiance est dite très élevée pour les niveaux supérieurs à 95%, élevée entre 67 et 95% et moyenne entre 33 et 67%.</p>			

Soulignons cependant que les prévisions proposées par les modèles climatiques sont des valeurs moyennes sur des mailles de dimensions comprises, de nos jours, entre 250 et 600 km pour la composante atmosphérique, contre 125 à 250 km pour la composante océanique, alors que les processus étudiés se fondent sur des données à des échelles beaucoup plus faibles. Les autres points faibles des modèles climatiques actuels sont la mauvaise représentation de certains processus comme l'évaporation continentale qui nous intéressent particulièrement, l'interrelation entre l'évolution socio-économique et les paramètres économiques, etc.. En

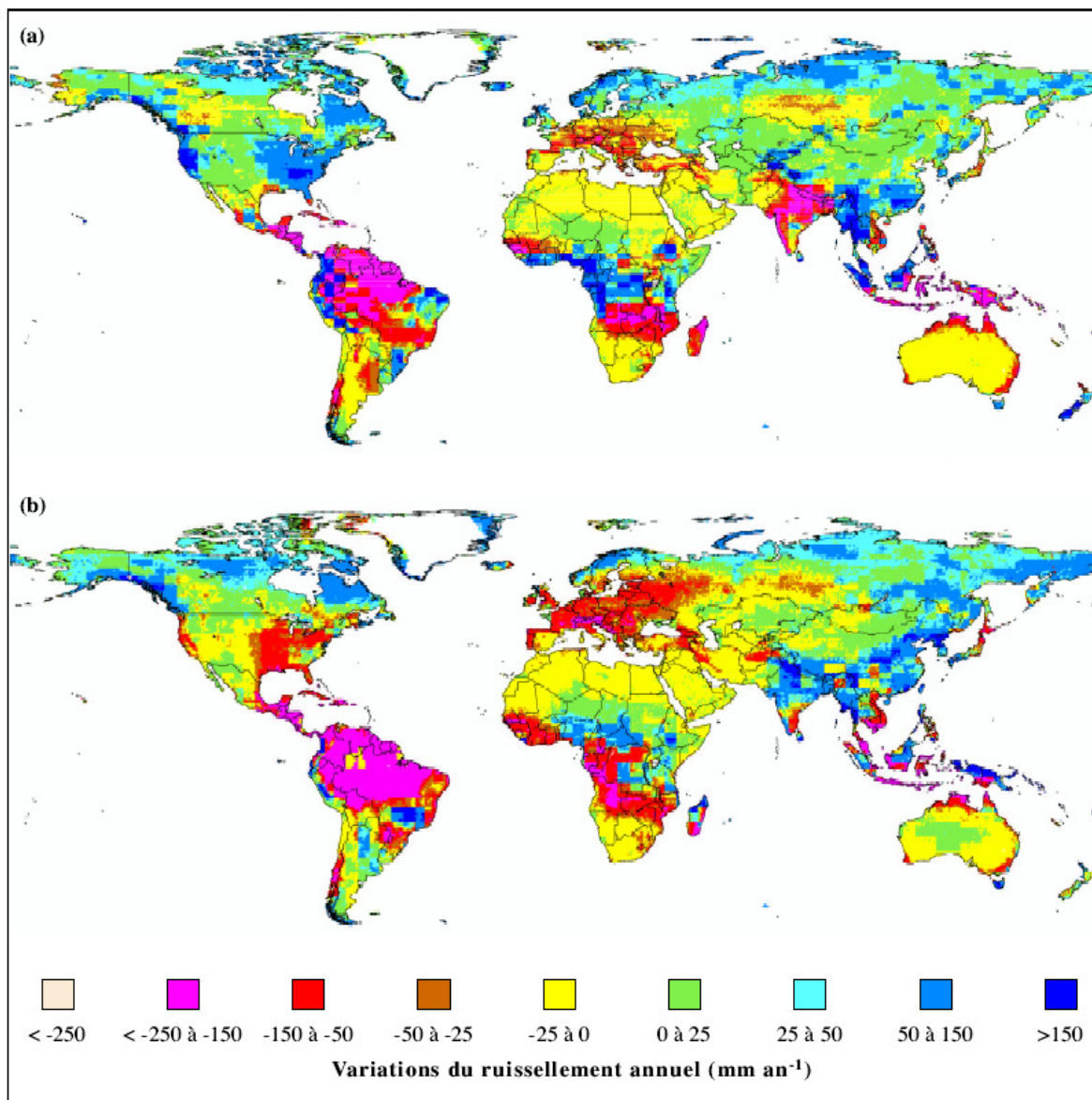
conséquence, en dépit de l'accroissement du degré de confiance aux résultats des modèles sur le plan global ces dernières années, les prévisions locales restent imprécises.

Dans l'ensemble, les changements prévus dans le domaine de l'eau aggraveraient les problèmes de pénurie et de qualité de l'eau dans de nombreuses régions désertiques, mais les amélioreraient dans d'autres régions du monde. En général, les besoins hydriques augmenteraient en raison de la croissance démographique et du développement économique, bien qu'une diminution soit prévue dans certains pays en raison d'une gestion plus efficace. Les écoulements fluviaux et l'alimentation des nappes souterraines devraient diminuer dans de nombreuses régions du monde, mais augmenteraient dans certaines régions. L'ampleur des changements varie selon les scénarios, en partie en raison des différences au niveau des précipitations prévues (notamment à propos de l'intensité des pluies) et en partie en raison des différences au niveau de l'évaporation prévue. Mais dans l'ensemble, ce sont les systèmes hydriques non gérés ou mal gérés qui seront les plus vulnérables aux effets négatifs des changements climatiques. La figure 5.10 présente une analyse des points de concordance entre les modèles, pour ce qui concerne les variations futures des précipitations.



**Figure 5.10 :** Analyse de la concordance entre les modèles en ce qui concerne la variation des précipitations régionales. Les régions sont classées comme affichant soit un accord sur un accroissement avec une variation moyenne de plus de 20 % ("Fort accroissement"), un accord sur un accroissement avec une variation moyenne comprise entre 5 et 20 % ("Accroissement faible"), un accord sur une variation moyenne comprise entre -5 et +5 % ("Pas de variation"), un accord sur une diminution avec une variation moyenne comprise entre -5 et -20 % ("Diminution faible"), un accord sur une diminution avec une variation moyenne de moins de -20 % ("Forte diminution"), ou un désaccord ("signe non concordant"). (IPCC, 2001)

Pour ce qui concerne le Cameroun et l’Afrique Centrale en général, il ressort de ces prévisions un accroissement des précipitations qui devrait varier au courant du XXI<sup>ème</sup> siècle, entre 5 et 20% pour les mois de décembre à janvier alors qu’aucune variation ne serait enregistrée sur la période de juin à août. Comparées au ruissellement moyen des années 1961–1990, les prévisions des changements du ruissellement annuel moyen d’ici 2050 correspondent en grande partie aux changements prévus pour les précipitations. La figure 5.11 présente les prévisions de variation du ruissellement moyen annuel dans le monde d’ici l’an 2050 selon le Hadley Centre.



**Figure 5.11** : Variation du ruissellement moyen annuel d’ici l’an 2050. Les variations du ruissellement sont calculées par rapport au ruissellement moyen de la période 1960-1990, à l’aide d’un modèle hydrologique utilisant des projections climatiques provenant de deux versions du modèle de circulation générale atmosphère/océans du Hadley Centre (AOGCM) pour un scénario avec 1 % d’augmentation annuelle effective de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l’atmosphère : (a) moyenne d’ensemble HadCM2 et (b) HadCM3 (IPCC, 2001).

Dans l'ensemble, des augmentations du ruissellement sont prévues aux hautes latitudes et en Asie du Sud-est, et des diminutions en Asie Centrale, autour de la Méditerranée, en Afrique australe, et en Australie. Pour ce qui concerne le Cameroun, il en ressort une diminution des écoulements de 25 à 150 mm/an dans la partie du pays au sud de l'Adamaoua (région du Mont Cameroun non comprise), contre une augmentation de 25 à 150 mm/an au Nord de l'Adamaoua et dans la région autour du Mont Cameroun, si l'on se réfère aux prévisions du modèle HadCM3. Par contre le modèle HadCM2 prévoit des augmentations sur l'ensemble du territoire, qui peuvent dépasser 150 mm/an dans le Sud du pays.

La connaissance de l'impact de ces variations sur les différents termes du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant, qui constitue l'unité de base de gestion des ressources en eau, est indispensable pour évaluer le devenir des ressources en eau de ces bassins dans le futur. Il est alors indispensable de disposer des informations sur les prévisions des modèles climatiques relatives aux précipitations et à l'évapotranspiration, les deux principales variables climatiques qui influent sur les ressources en eau. De telles informations sont proposées par de nombreux modèles climatiques, mais des différences très importantes existent entre les données fournies. Il est par conséquent nécessaire d'analyser les différentes données proposées pour notre région d'étude afin de sélectionner celles qui se rapprochent le mieux des réalités de terrain.

### **5.5.3 – Analyse comparative et choix de scénarios d'évolution du climat**

Les prévisions des modifications du climat de la planète au courant du XXI<sup>ème</sup> siècle sont très variables d'un modèle climatique à l'autre (IPCC, 2001). Un moyen d'estimer la fiabilité des prévisions d'un modèle pour une région donnée est la comparaison entre les résultats (quand ils existent) des simulations du climat passé et actuel avec les observations. Pour ce volet de l'étude, nous partirons du travail récent de collecte et de critique de scénarios climatiques réalisé par Ardoin-Bardin (2004) pour sa thèse. Quatre modèles climatiques (HadCM3, CSIRO-Mk2, ECHAM4/OPYC3 et NCAR-PCM ) parmi les 7 cités plus haut sont retenus en raison de la disponibilité des données et de leur utilisation fréquente. Pour ce qui concerne les précipitations en particulier, une analyse comparée des performances des 4 modèles montre qu'aucun ne reproduit correctement les observations de la période instrumentée, notamment les volumes annuels précipités, leur variabilité interannuelle et la dynamique des saisons. Les observations sont en général surestimées ou sous-estimées en fonction des modèles et du

scénario d'émission utilisés. Les modèles climatiques restent cependant 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 d'une région donnée. Nous les utiliserons donc, tout en restant conscient des limites et des incertitudes qui restent à lever. Le choix du modèle climatique et du scénario d'émission à utiliser dépend des objectifs poursuivis et relève de la responsabilité de l'utilisateur.

En raison de la disponibilité des données simulées sur la période 1950-2099 qui inclue la période observée 1950-2000, le modèle HadCM3 a été retenu pour la simulation de l'évolution du climat sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale. Cette simulation est basée sur le scénario d'émission A2. Le choix du modèle HadCM3 est également conforté par le fait qu'il représente une version évoluée du Modèle HadCM2 dont les performances ont été classées parmi les meilleures dans le cadre d'autres études précédentes (Arnell et al., 1999 ; Hulme et al., 2000 ; Mkankam Kamga, 2001). Le choix du scénario d'émission A2 est quant à lui motivé par sa vision plus "réaliste" qui considère un XXI<sup>ème</sup> siècle où aucune mesure concertée mondiale n'est prise pour enrayer l'augmentation des gaz à effet de serre. Cette vision, peut-être pessimiste de la capacité de concertation au niveau mondial, a l'avantage de se situer du côté où une éventuelle concertation aboutissant à des conclusions positives constituerait un avantage dans la mesure où elles contribueraient à une atténuation des conséquences d'une forte production des gaz à effet de serre, plaçant ainsi nos conclusions du côté de la sécurité.

Deux méthodes d'exploitation des sorties du modèle HadCM3 et du scénario d'émission A2, sont utilisées pour générer des grilles de précipitations et d'ETP qui seront utilisées dans le modèle hydrologique :

- un premier jeu de données calculé sur la base des écarts (ou anomalies) calculés par rapport à une période de référence correspondant à la période déficitaire récente (1969 – 1998). Pour chaque mois  $i$  sur la grille  $j$ , les anomalies issues du modèle climatique (GCM) sont calculées selon la formule :

$$\text{Ano}_{\text{GCM},i,j} = (X_{\text{GCM},i,j} - X_{\text{moy}}_{\text{GCM},i,j}) / \sigma_{\text{GCM},i,j}$$

**Avec**  $X_{\text{GCM},i,j}$  = valeur mensuelle simulée,

$X_{\text{moy}}_{\text{GCM},i,j}$  = valeur moyenne mensuelle simulée sur la période de référence,

$\sigma_{\text{GCM},i,j}$  = écart type de la série simulée sur la période de référence.

On génère ensuite pour chaque cellule une nouvelle série de données corrigées qui prend en compte les prévisions du modèle climatique, mais avec des valeurs plus vraisemblables. La formule de calcul utilisée est la suivante :

$$X_{SCEN,i,j} = X_{Obs,i,j} + (Ano_{GCM,i,j} \times \sigma_{Obs,i,j})$$

**Avec**  $Ano_{GCM,i,j}$  = anomalie mensuelle issue du modèle climatique,  
 $X_{Obs,i,j}$  = valeur moyenne observée sur la période de référence,  
 $\sigma_{Obs,i,j}$  = écart type de la série sur la période de référence.

Cette procédure de correction des données issues des modèles climatiques est appliquée sur les séries mensuelles d'ETP et de précipitations sur la période prospective sur chaque cellule. Ce procédé permet de conserver la dynamique des variations mensuelles des précipitations au courant d'une année, que le modèle climatique a du mal à reproduire.

- le second jeu de données est calculé en prenant en compte les variations aux trois horizons définis par l'IPCC (2020, 2050 et 2080). Il s'agit de calculer les taux de variation des précipitations et d'ETP mensuelles entre les trois horizons et la période de référence retenue précédemment (1969-1998), et d'appliquer ces taux aux données d'observation. Les taux de variations mensuelles pour les différents horizons sont calculés selon la formule :

$$\Delta_{Horiz,i,j} = 100 \times [(X_{moyHoriz} - X_{moyRef,i,j}) / X_{moyRef,i,j}]$$

**Avec**  $X_{moyHoriz}$  = valeur moyenne mensuelle calculée sur l'horizon déterminé,  
 $X_{moyRef,i,j}$  = valeur moyenne mensuelle calculée sur la période de référence.

Les taux de variation sont appliqués sur les séries de données observées pour obtenir les séries correspondantes aux différents horizons. En supposant que les observations (de précipitations et d'ETP) de la période de référence peuvent se reproduire à nouveau, un tirage aléatoire de trois séries de 30 années chacune est effectué sur la période de référence pour créer des séries fictives pour les différentes échéances. Les taux de variation calculés précédemment sont appliqués à la série fictive suivant la formule :

$$X_{\text{SCEN},i,j} = X_{\text{moyObsRef},i,j} \times \Delta_{\text{Horiz},i,j}$$

Avec  $X_{\text{moyObsRef},i,j}$  = valeur moyenne mensuelle observée sur la période de référence,  
 $\Delta_{\text{Horiz},i,j}$  = taux de variation mensuel à un horizon déterminé.

Une nouvelle série de données qui respecte les taux de variation aux trois horizons 2020, 2050, 2080 du modèle climatique est ainsi créée, mais avec des valeurs plus réalistes qui respectent la dynamique de la répartition mensuelle du total annuel de chacun des paramètres. Les détails de la construction des grilles de données des différents paramètres sont décrits dans le travail de Ardoin-Bardin (2004).

Les jeux de données de précipitations et d'ETP ainsi créés seront utilisés pour la simulation des écoulements sur les bassins versants testés précédemment. Compte tenu de l'importance des incertitudes qui restent à lever pour une meilleure prévision des volumes précipités annuels et une bonne reproduction de la dynamique des saisons de pluies, les analyses détaillées des variations des écoulements annuels et mensuels nous semblent peu réalistes au stade actuel. Dans ces conditions, notre analyse des impacts du changement climatique sur les ressources en eau se limitera à des ordres de grandeur de variation au cours de différentes périodes d'une trentaine d'années.

#### 5.5.4 – Simulation de l'évolution des bilans hydriques

Le premier objectif de cette partie de l'étude est la simulation de l'évolution des ressources en eau pour le XXI<sup>ème</sup> siècle sur nos bassins. L'analyse des différents termes du bilan hydrique des bassins versants testés permettra de se faire une idée de cette évolution. Après l'élaboration des jeux de données de précipitations et d'ETP, nous allons procéder à la simulation des écoulements à l'aide du modèle hydrologique GR2M, en utilisant comme données d'entrée les sorties des modèles climatiques. Les données d'entrée de ce modèle sont : les précipitations, l'évapotranspiration potentielle et la capacité de rétention en eau du sol. Si les données de prévision des deux premiers paramètres sont fournies par les sorties des modèles climatiques, aucune prévision n'est disponible pour la capacité de rétention en eau des sols. Dans ces conditions, pour la prévision des écoulements sur nos bassins, nous allons faire l'hypothèse de la conservation de la capacité de rétention en eau des sols dans une situation voisine de leur état actuel, au courant du XXI<sup>ème</sup> siècle.



#### 5.5.4.1 – Evolution des précipitations

Trois grilles de données pluie ont été construites à partir des données à notre disposition : une première grille (P\_GCMBrut) à l'aide des pluies brutes directement sorties du modèle climatique, une deuxième grille (P\_Ano) à l'aide des pluies reconstituées par le procédé des "Anomalies" tel que décrit ci-dessus et une troisième (P\_Horiz) à l'aide des pluies reconstituées par le procédé des Horizons également décrit ci-dessus.

La figure 5.12 montre l'évolution des précipitations moyennes annuelles au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle sur les cinq bassins versants étudiés, telles qu'elles ressortent des deux méthodes de construction de scénarios. Les observations de la période actuelle sont présentées dans la figure à titre de comparaison, ainsi que les prévisions du scénario Anomalies pour la période observée. On note que des différences très importantes peuvent exister entre les observations et les prévisions du scénario Anomalies pour la période 1950-2000, notamment pour les bassins versants situés dans le Nord du pays.

Pour deux des cinq bassins étudiés (un dans le Nord du pays et l'autre dans le Sud), la figure 5.13 présente en même temps que les données des deux méthodes de construction de scénarios, les prévisions des données brutes de précipitations ainsi que les moyennes mobiles sur 30 ans (P30a\_Obs : 1951-1980 ; P30b\_Obs : 1961-1990 et P30c\_Obs : 1971-2000) pour différentes périodes. Comme on peut le constater sur cette figure, les données de pluies brutes (présentées ici à titre indicatif), sont largement supérieures aux observations de la période actuelle, notamment pour les bassins versants du Nord du pays. Les pluies moyennes déterminées à partir des deux méthodes de construction sont bien différentes entre elles, mais les moyennes calculées sur des périodes de 30 ans (P30\_Ano et P30\_Horiz) sont relativement voisines. On peut également noter qu'après une période 2000-2050 où les précipitations continuent globalement à diminuer par rapport à la période récente (1971-2000) sur les bassins de la région du Nord du pays, une légère reprise s'amorce au cours de la période 2051-2080 et se poursuit de manière plus marquée entre 2081 et 2095. En dépit de cet accroissement des précipitations, la moyenne de la période 2081-2095 reste inférieure à la normale 1951-1980.

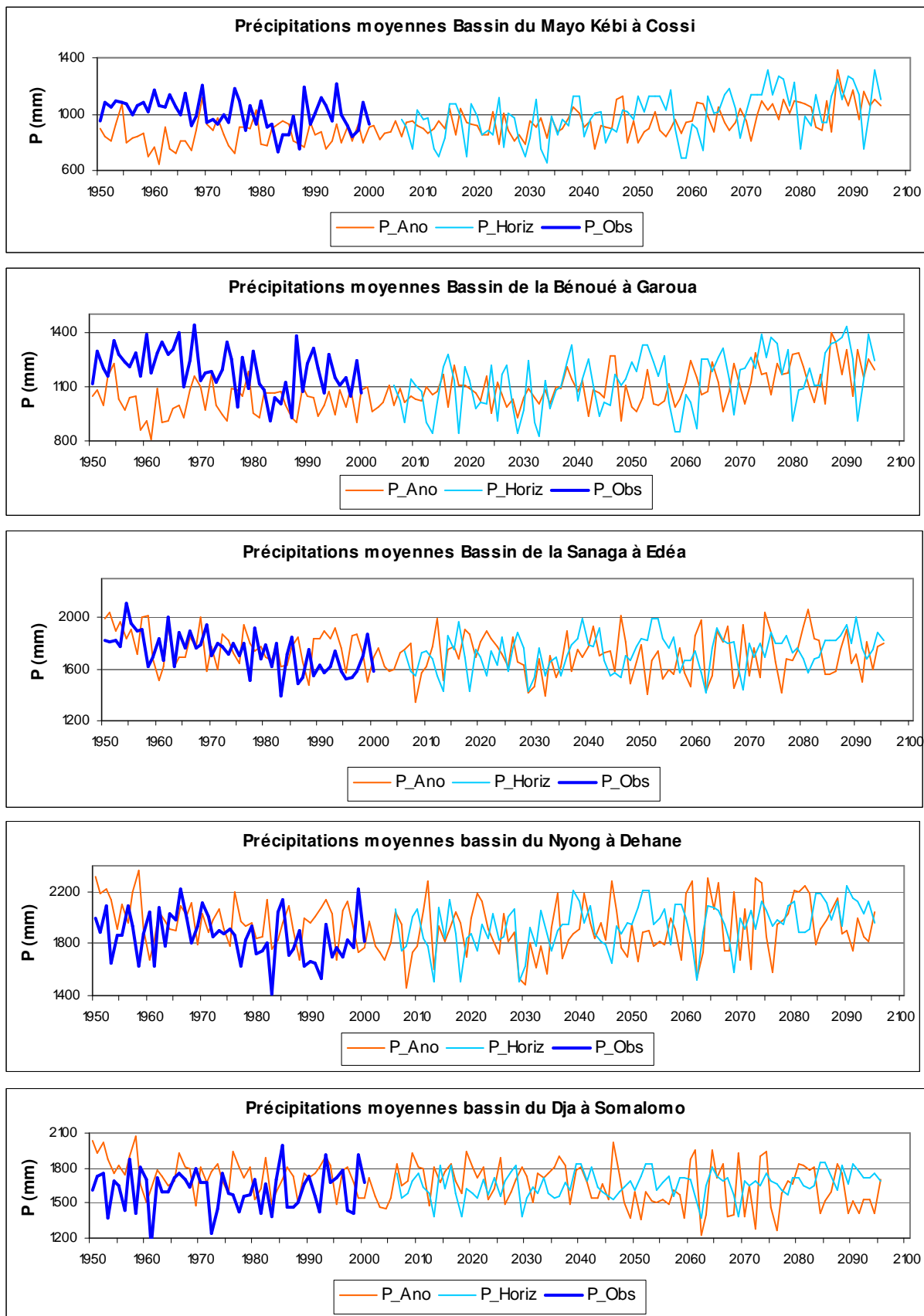
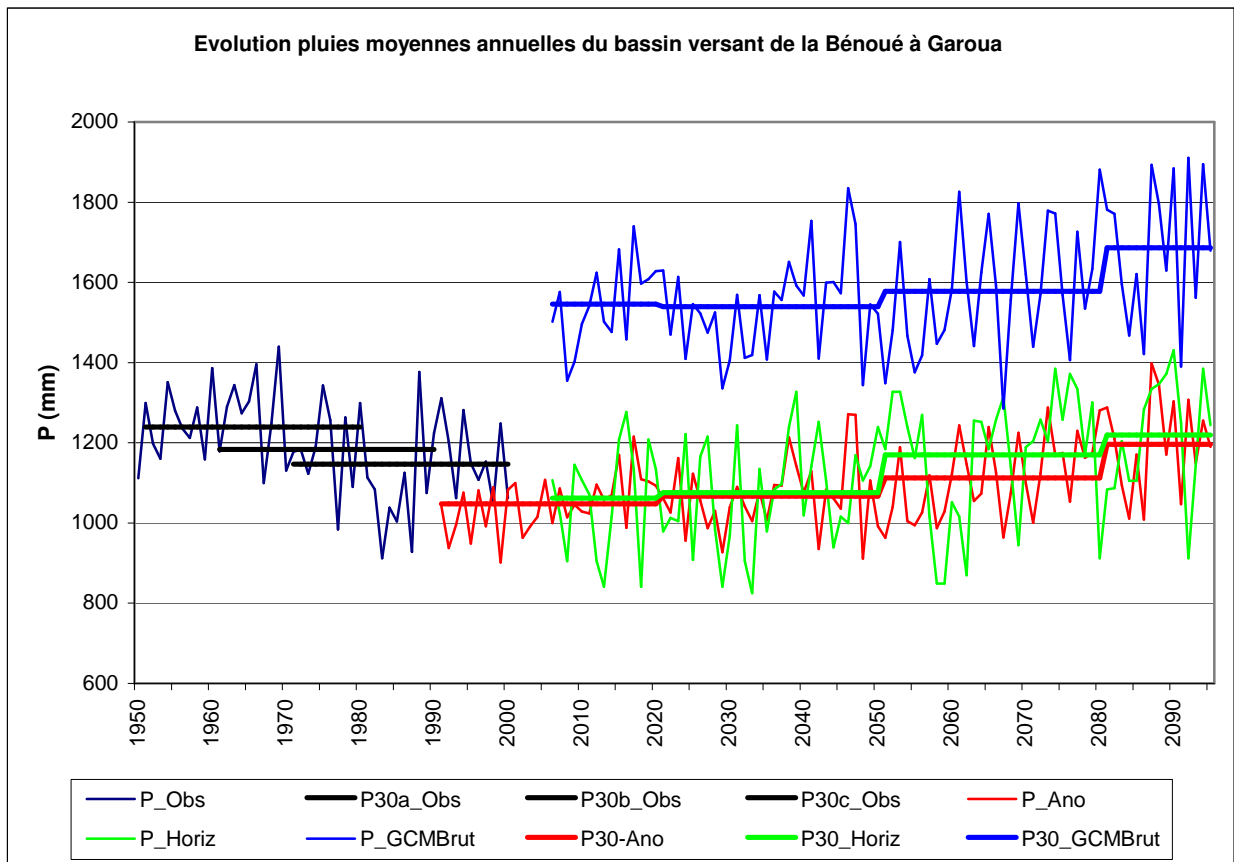
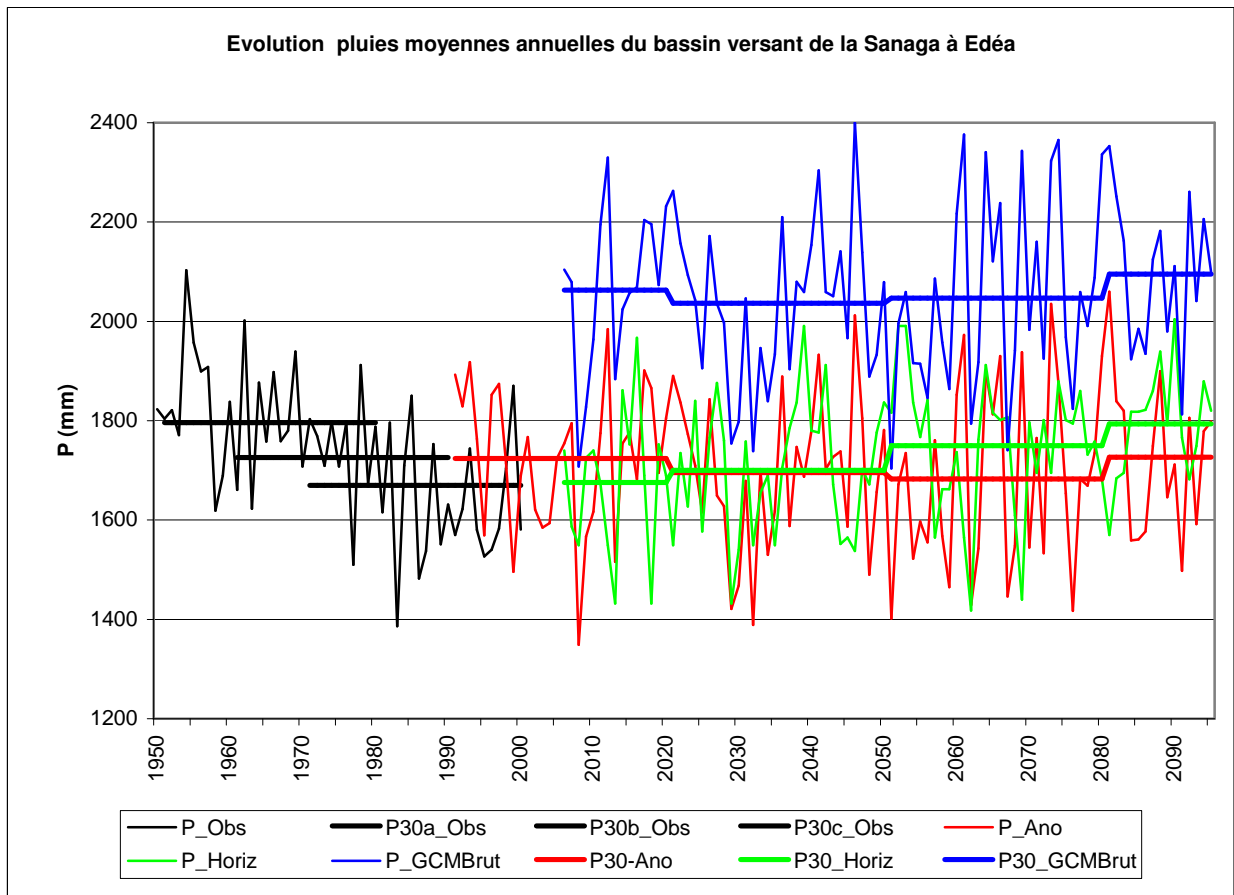


Figure 5.12 : Evolution des précipitations moyennes annuelles sur les 5 bassins versants testés, selon les scénarios Anomalies (P\_Ano) et Horizons (P\_Horiz) en regard des pluies observées (P\_Obs)



**Figure 5.13 :** Evolution des précipitations moyennes annuelles et interannuelle sur quelques bassins versants

Pour les bassins versants du sud du pays par contre, on note que la reprise des précipitations amorcée au cours des années 1990 se maintient globalement jusqu'au début des années 2030 suivie d'une baisse jusqu'à la fin de la décennie 2030, mais globalement la pluviométrie de la période 2000-2050 reste légèrement supérieure à celle de la période 1971-2000. Par la suite, l'accroissement des précipitations continue au cours de la période 2051-2080 et se poursuit globalement jusqu'à la fin du siècle pour les pluies du scénario Horizon, alors qu'une légère baisse s'amorce sur la période 2051-2080 pour celles du scénario Anomalie, suivie d'une nouvelle progression, en moyenne jusqu'à la fin du siècle. Dans les deux cas, en dépit de cet accroissement des précipitations, la moyenne de la période 2081-2095 reste inférieure à la normale 1951-1980, comme pour les bassins versants du Nord. Le tableau 5.16 en présente les taux de variation suivant les 2 scénarios testés.

**Tableau 5.16 : Variation (%) de la pluie moyenne annuelle par période par rapport à la période 1971-2000**

<b>Bassin versant</b>	<b>Horizon 2020</b>		<b>Horizon 2050</b>		<b>Horizon 2080</b>		<b>Horizon 2095</b>	
	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz
Mayo Kébi à Cossi	-8,2	-5,7	-6,2	-4,8	+0,1	+6,8	+9,1	+12
Bénoué à Garoua	-11	-13	-8,9	-12	-5,0	-3,8	+2,1	+0,2
Sanaga à Edéa	+3,2	+0,4	+1,5	+1,8	+0,8	+4,8	+3,4	+7,4
Nyong à Dehane	+4,4	+3,1	+3,6	+4,8	+6,9	+10	+10	+14
Dja à Somalomo	+3,0	+1,5	-0,2	+2,5	-0,3	+4,1	+0,1	+8,0

Comparativement à la période récente (1971-2000), les trois bassins versants du Sud du pays enregistrent un accroissement des précipitations (1 à 14 % selon le bassin, la période et le scénario), alors que les deux bassins de la partie Nord du pays enregistrent d'abord une diminution des précipitations (-4 à -12% selon le bassin, la période et le scénario) dans la première moitié du siècle avant une augmentation (jusqu'à 12% sur le mayo Kébi ) vers la fin du siècle.

#### **5.5.4.2 – Evolution de l'évapotranspiration potentielle**

Comme dans le cas des précipitations, trois grilles de données d'ETP ont également été construites à partir des données à notre disposition : une première grille (ETP\_GCMBrut) à partir des sorties brutes du modèle climatique, une deuxième grille (ETP\_Ano) à l'aide de l'ETP reconstituée suivant la méthode des Anomalies et une troisième (ETP\_Horiz) construite à l'aide de l'ETP reconstituée par le procédé des Horizons tel que décrit ci-dessus.

La figure 5.14 montre l'évolution de l'ETP moyenne annuelle sur les cinq bassins versants au courant du XXI<sup>ème</sup> siècle, selon les prévisions des deux scénarios. Les valeurs de l'ETP moyenne annuelle calculée par la méthode de Penman sur chacun des 5 bassins, pour la période actuelle sont également présentées dans la figure à titre de comparaison. Comme dans le cas des précipitations, on note des différences qui peuvent être importantes entre les valeurs de l'ETP moyenne annuelle calculée par la méthode de Penman et les prévisions du scénario Anomalies pour la période 1950-2000 sur les mêmes bassins.

Sur la figure 5.15, en plus des observations citées ci-dessus, sur deux des cinq bassins étudiés (un dans le Nord et l'autre dans le Sud), les données d'ETP brutes telles que sorties du modèle ainsi que les moyennes mobiles sur 30 ans (ETP30a\_Obs : 1951-1980 ; ETP30b\_Obs : 1961-1990 et ETP30c\_Obs : 1971-1995) de l'ETP moyenne annuelle sont représentées. Comme dans le cas des précipitations, les valeurs de l'ETP brute sont très différentes des observations de la période actuelle, pour les bassins versants des deux régions du pays. Par contre, bien que les valeurs moyennes annuelles de l'ETP déterminées à partir des deux méthodes de construction soient différentes entre elles, les valeurs moyennes interannuelles calculées sur des périodes de 30 ans (ETP30\_Ano et ETP30\_Horiz), sont relativement voisines.

Contrairement aux précipitations, on note un accroissement continu de l'ETP, avec une hausse beaucoup plus importante (jusqu'à +45%) dans la partie sud du pays. L'augmentation de l'ETP s'explique par l'accroissement continu de la température. Il convient de rappeler que la variation de la température moyenne annuelle pour le scénario d'émission A2 utilisé dans l'étude se situe entre 1,2 et 4,5°C, avec des amplifications régionales qui peuvent atteindre 40%, soit en définitive une fourchette de variation de 1,7 à 6,3°C. Par ailleurs, la différence entre les situations observées dans chacune des 2 parties du pays s'explique par des précipitations plus importantes dans le Sud, alors que ces dernières constituent un facteur limitant dans le Nord. Le taux d'accroissement plus élevé sur le bassin du Dja tiendrait au fait que ce bassin est entièrement couvert de forêt primaire. Le tableau 5.17 indique les taux de variation sur les différents bassins versants étudiés.

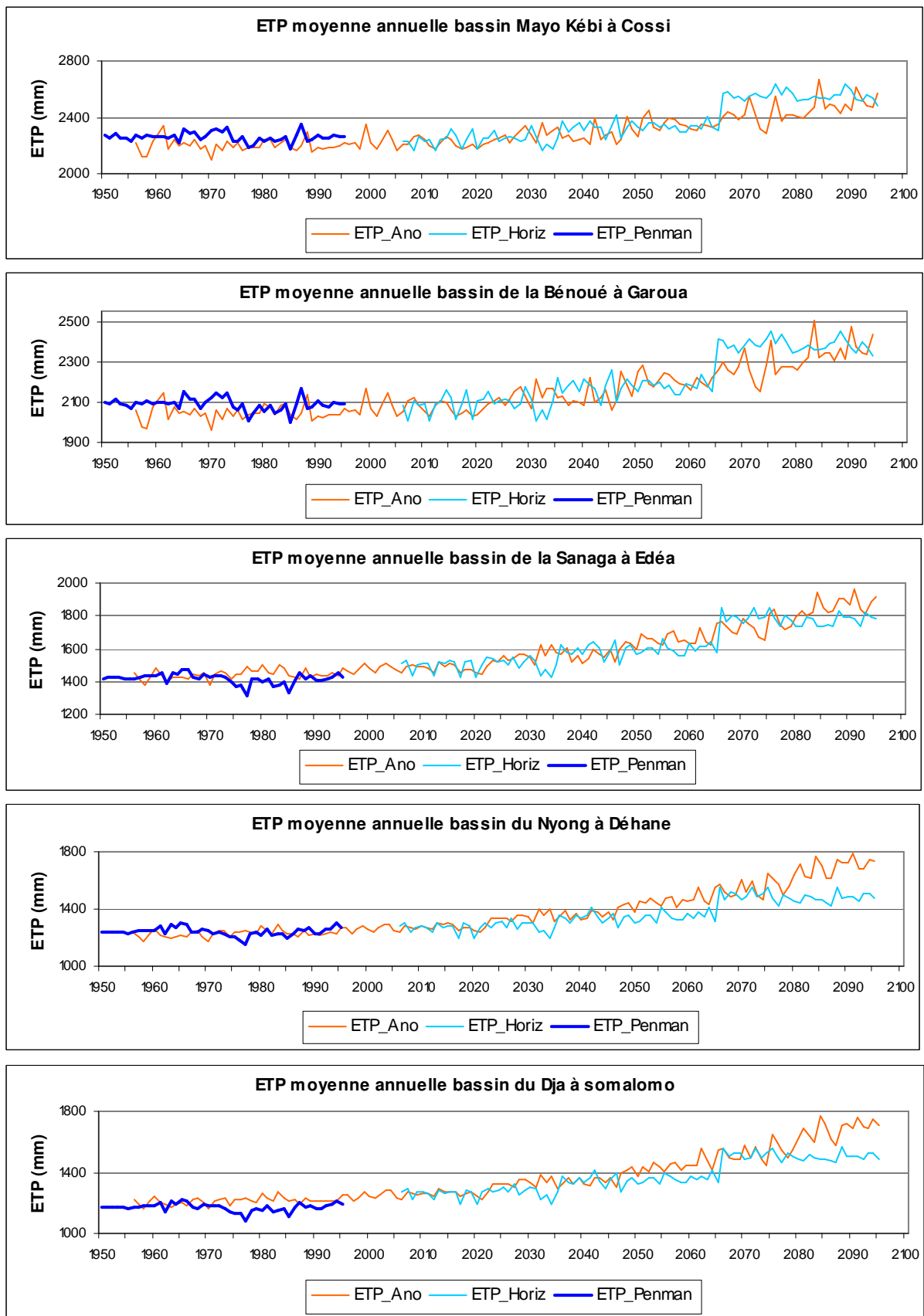
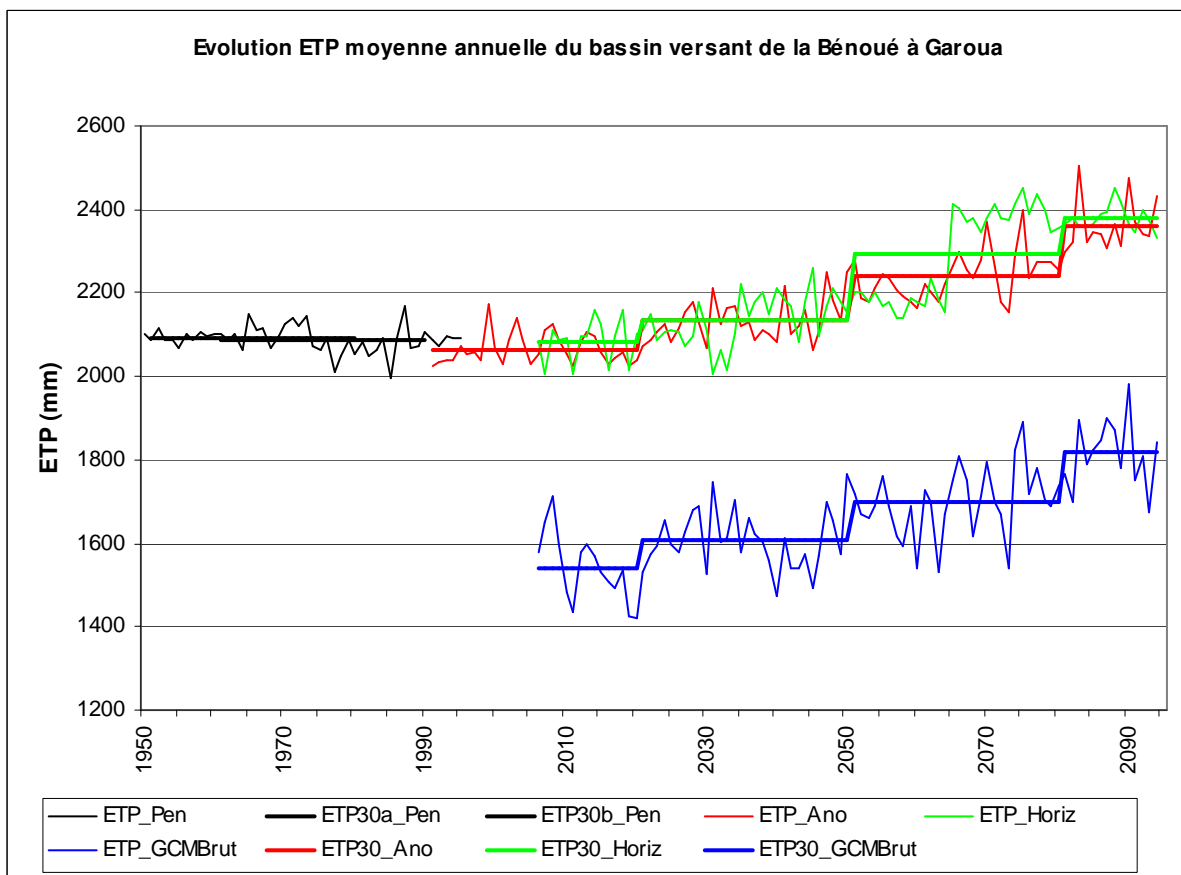
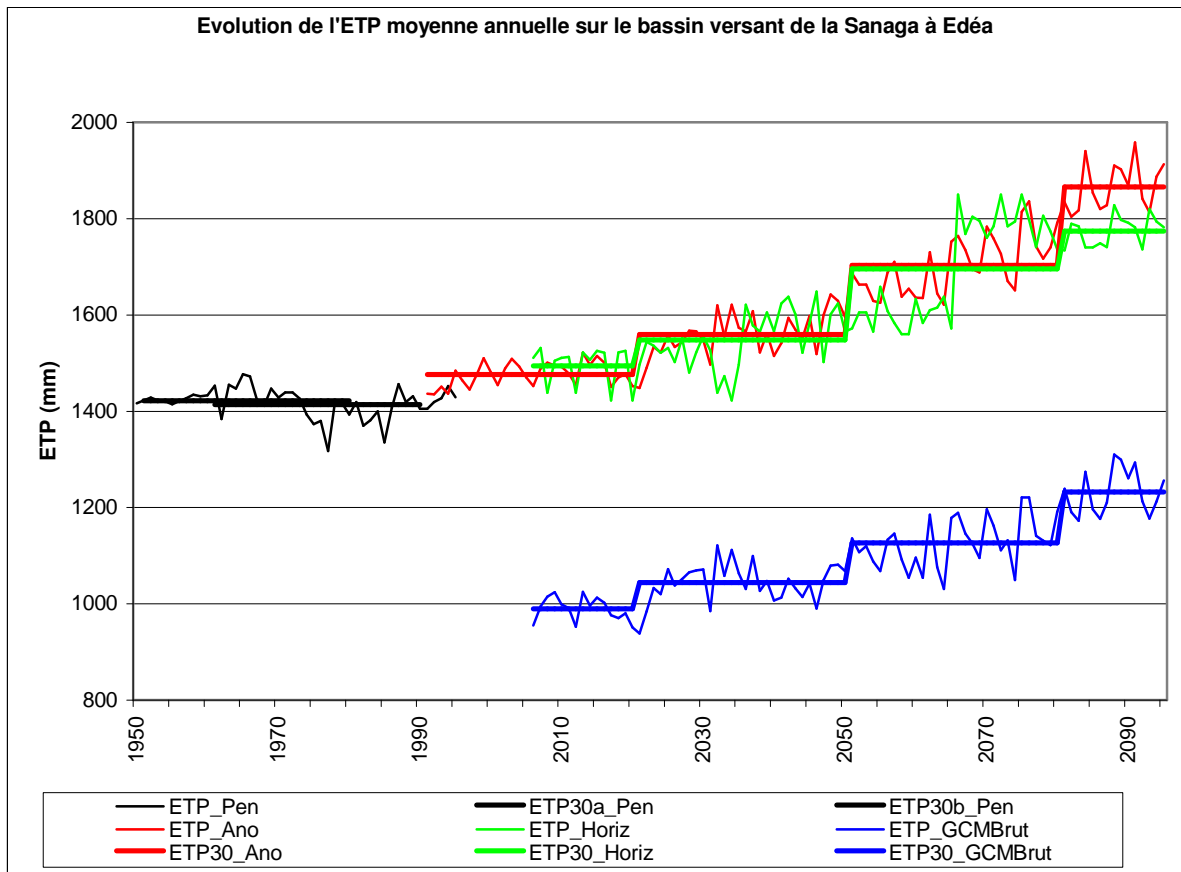


Figure 5.14 : Evolution de l'ETP moyenne annuelle selon les scénarios Anomalies (ETP\_Ano) et Horizons (ETP\_Horiz), sur les 5 bassins versants testés, en regard de l'ETP calculée par la méthode de Penman (ETP\_Penman) pour la période actuelle.



**Figure 5. 15 : Evolution de l'évapotranspiration moyenne annuelle et interannuelle sur quelques bassins**

**Tableau 5.17 : Variation (%) de l'ETP moyenne annuelle par période par rapport à la période 1971-2000**

Bassin versant	Horizon 2020		Horizon 2050		Horizon 2080		Horizon 2095	
	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz
Mayo Kébi à Cossi	-1,8	-1,0	+0,7	+1,5	+5,7	+8,4	+11	+13
Bénoué à Garoua	-0,8	+0,1	+2,5	+2,7	+7,6	+10	+14	+14
Sanaga à Edéa	+5,0	+6,3	+11	+10	+21	+21	+33	+26
Nyong à Dehane	+2,6	+2,9	+10	+6,3	+23	+16	+38	+20
Dja à Somalomo	+7,6	+8,2	+15	+13	+29	+24	+45	+29

Comparativement à la période 1971-2000, les trois bassins versants du Sud du pays enregistrent un accroissement (3 à 45 % selon le bassin et le scénario) de l'ETP, le maximum étant enregistré à la fin du siècle. Les deux bassins situés dans le Nord du pays devraient enregistrer d'abord une légère baisse (-1 à -2%) au début du siècle avant un accroissement (1 à 14%) de la fin des années 2020 à la fin du siècle.

#### 5.5.4.3 – Evolution des écoulements

Les trois grilles de données de précipitations et d'ETP sont utilisées pour simuler des écoulements à l'exutoire des 5 bassins versants testés précédemment, en utilisant le modèle GR2M dont la robustesse a été mise en évidence plus haut. Trois types d'évolutions des écoulements moyens mensuels sont obtenus, desquels nous avons déduit les débits moyens annuels : Q\_Pbrut, à partir des sorties brutes du modèle climatique, Q\_Ano, à l'aide des précipitations et de l'ETP reconstituées suivant la méthode des Anomalies et Q\_Horiz, à l'aide des précipitations et de l'ETP reconstituées par le procédé des Horizons.

La figure 5.16 montre l'évolution des débits moyens annuels sur les bassins de l'étude dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle, tels qu'il ressort des prévisions des deux méthodes de construction de scénarios. Les débits moyens annuels (Q\_Obs) observés sont également présentés dans la figure à titre de comparaison. Comme dans le cas des précipitations et de l'ETP, on note des différences qui peuvent être très importantes, entre les débits moyens annuels observés et ceux calculés par le modèle GR2M en utilisant les données de prévision d'ETP et de précipitations du scénario Anomalies sur la période 1950-2000, pour les différents bassins versants étudiés.



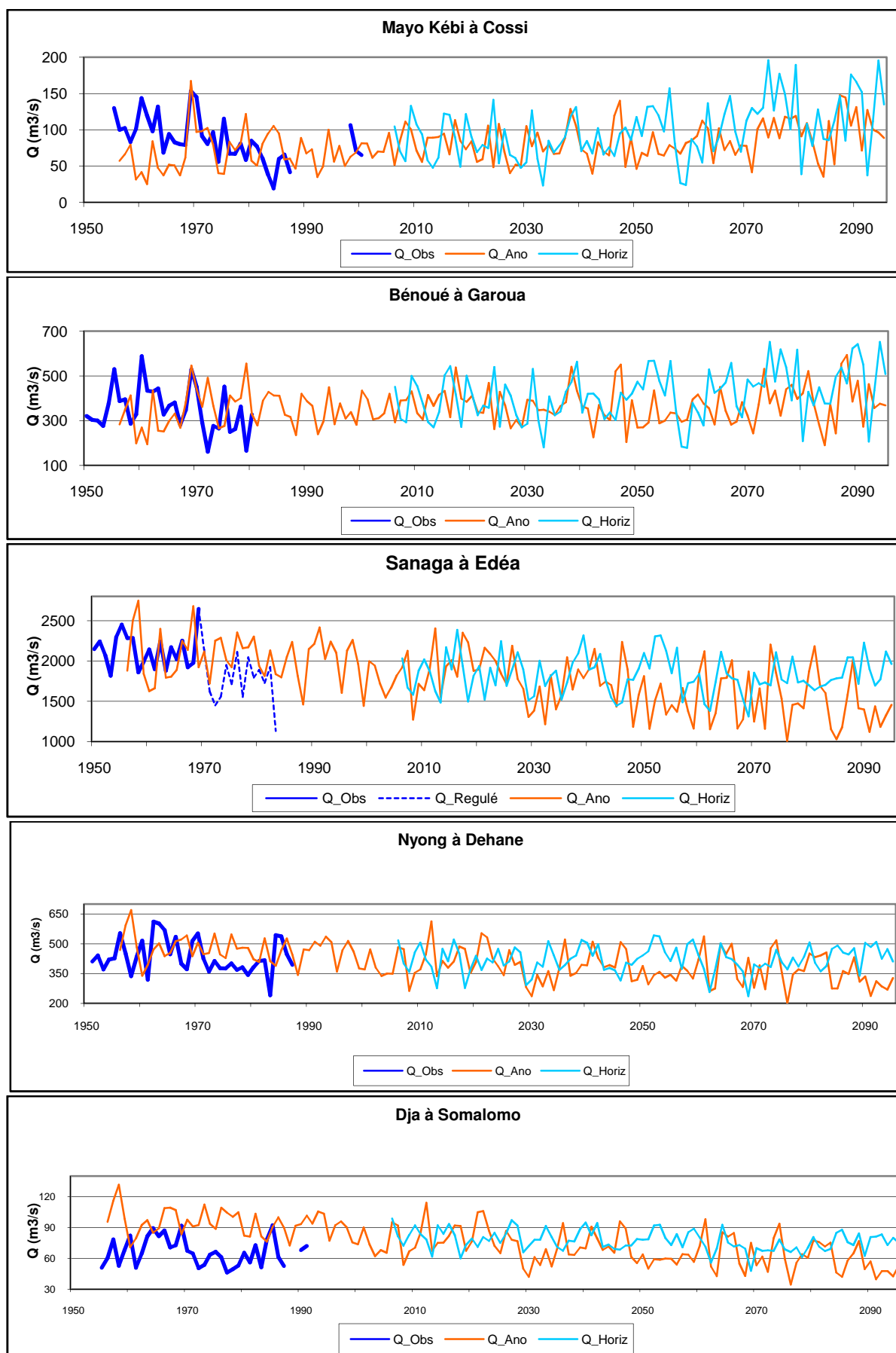


Figure 5.16 : Evolution des débits moyens annuels des 5 cours d'eau testés suivant les scénarios Anomalies (Q\_Ano) et Horizons (Q\_Horiz) en regard des débits observés (Q\_Obs)

Une nette différence apparaît entre l'évolution des débits des cours d'eau du Sud et de ceux du Nord du pays. Pour les cours d'eau du Sud, la tendance à l'amélioration de l'hydraulicité amorcée dans le courant des années 1990 continue jusqu'à la fin de la décennie 2020 (dans les 2 cas, Anomalie et Horizon), puis s'amorce une baisse qui continue globalement jusqu'au milieu des années 2030. Au début de la décennie 2040, une légère baisse s'amorce avant que les écoulements moyens ne se stabilisent globalement jusqu'à la fin du siècle, dans le cas du scénario Horizon. Dans le cas du scénario Anomalie, la baisse du début des années 2040 est plus importante. Elle s'accroît globalement vers la fin du siècle en dépit de la présence de quelques années de bonne hydraulicité.

Pour les cours d'eau du Nord par contre, le maintien de la tendance à l'amélioration de l'hydraulicité amorcée au courant des années 1990 continue jusqu'à la fin de la décennie 2020 dans les 2 cas (Anomalie et Horizon). L'hydraulicité de la période 2021-2050 est globalement plus faible que celle des années 2020. Une nouvelle hausse s'amorce au début des années 2050 et se perpétue globalement jusqu'en 2095. En dépit de cette augmentation, dans le cas du scénario Anomalie, les écoulements restent globalement en deçà de ceux de la période humide d'avant 1970. Dans le cas du scénario Horizon par contre, ils sont en moyenne supérieurs à ceux de cette période à partir du début des années 2050.

La figure 5.17 montre l'évolution des débits moyens annuels sur deux des cinq bassins (un bassin versant de la partie Nord du pays et l'autre du Sud) au courant du XXI<sup>ème</sup> siècle, tels qu'il ressort des prévisions et des deux méthodes de construction de scénarios. Les valeurs des débits moyens interannuels observés avant et après 1970 (QMav70\_Obs : 1951-1970 et QMap70\_Obs : 1971-1990), considérée comme date charnière entre la période humide antérieure et la période sèche actuelle, tel qu'il ressort des analyses des chapitres précédents. Comme pour l'ETP et les précipitations, on y constate que les débits obtenus avec les valeurs brutes des différents paramètres sont très différents des observations de la période actuelle. Les débits moyens annuels calculés à l'aide des paramètres issus des deux scénarios sont également différents entre eux, alors que les moyennes calculées sur des périodes de 30 ans (Q30\_Ano, Q30\_Horiz et Q30\_GCMBrut), peuvent être voisines pour certaines périodes.

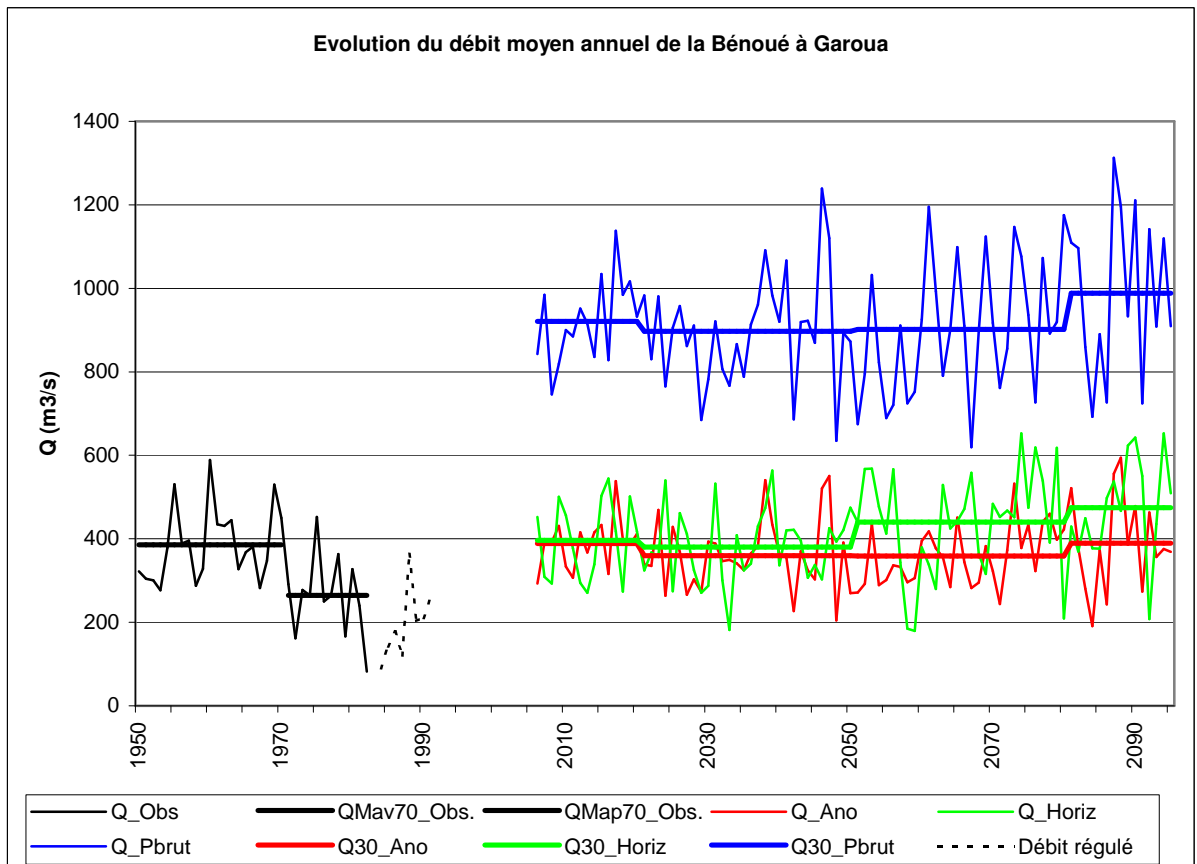
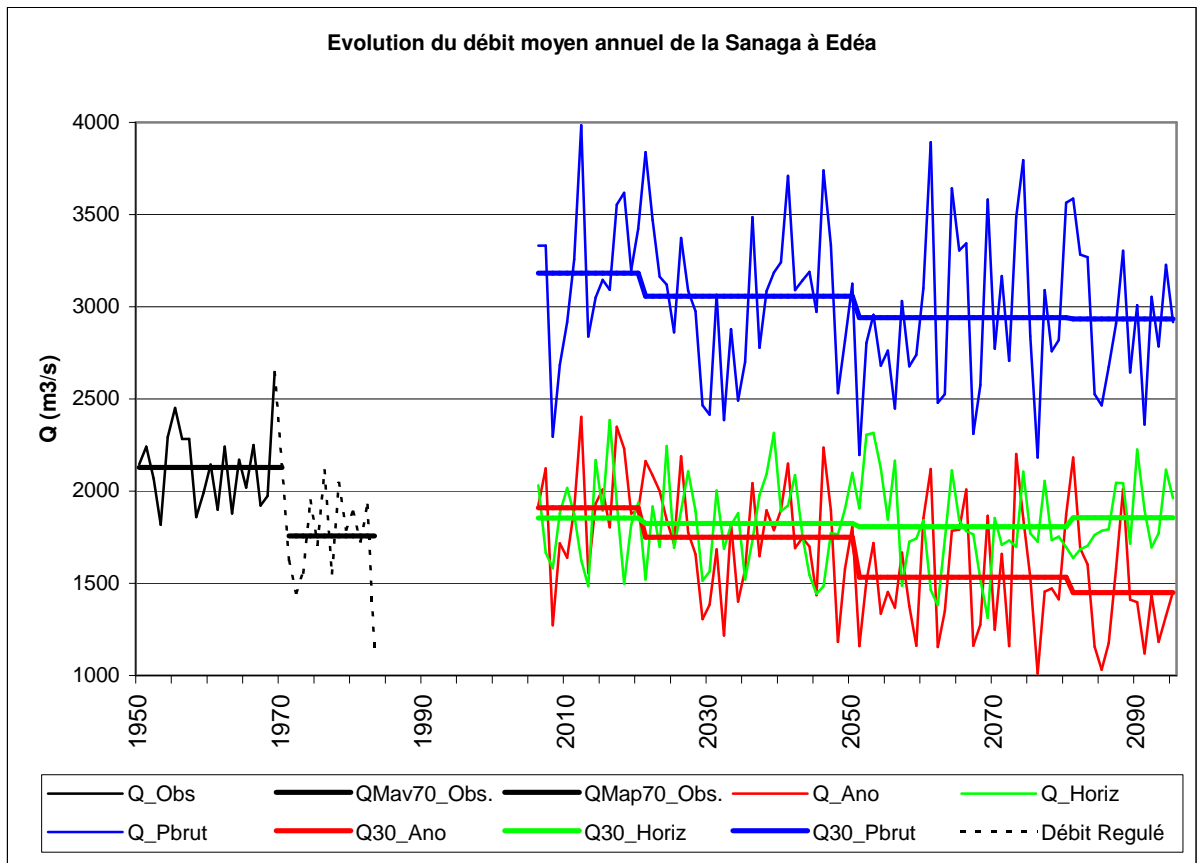


Figure 5. 17 : Evolution du débit moyen annuel et interannuel sur quelques cours d'eau

En définitive, pour les bassins versants de la partie Nord du pays, dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle les écoulements devraient être globalement plus importants que ceux de la période récente, en dépit de la baisse des précipitations enregistrée jusqu'à la fin des années 2050. Pour les cours d'eau du Sud par contre, les écoulements baissent nettement dans le cas du scénario Anomalie alors qu'ils sont relativement stables dans le cas du scénario Horizon. Cette différence de comportement entre les cours d'eau des 2 parties du pays tiendrait à l'accroissement de l'ETP dont la moyenne annuelle sur les bassins versants du Sud est plus importante. En effet vers la fin du siècle, le taux d'accroissement de l'ETP atteint 28% sur le bassin de la Sanaga à Edéa, 33% sur celui du Nyong à Dehane et 45% sur le bassin du Dja à Somalomo, alors qu'il ne dépasse pas 14% pour les bassins du Nord. Les réserves en eau, suffisantes en permanence, des régions Sud du pays favorisent une évaporation plus forte, alors que leur insuffisance à certains moments de l'année constitue un facteur limitant dans le Nord. Les données du tableau 5.18 indiquent les taux de variation des écoulements par rapport à la période (1971-1990) sur l'ensemble des bassins étudiés.

**Tableau 5.18 : Variation (%) du débit moyen annuel par période par rapport à la période 1971-1990**

Bassin versant	Horizon 2020		Horizon 2050		Horizon 2080		Horizon 2095	
	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz	Scen_Ano	Scen_Horiz
Mayo Kébi à Cossi	+24	+30	+14	+21	+27	+61	+43	+77
Bénoué à Garoua	+59	+63	+48	+56	+47	+80	+60	+80
Sanaga à Edéa	(-10)	(-13)	(-18)	(-14)	(-28)	(-15)	(-32)	(-13)
Nyong à Dehane	+7,6	+7,6	+0,9	+6,9	-5,0	+8,5	-13	+14
Dja à Somalomo	+32	+33	+19	+29	+3,7	+21	-7,7	+25

*NB : En raison de la régulation de ses débits après 1970, les variations de la Sanaga sont calculées par rapport à la période 1950-1970*

Comparativement à la période récente, les deux bassins versants du Nord enregistrent un accroissement important des écoulements annuels tout au long du siècle (14 à 80% selon le bassin, la période et le scénario). Ceux de la partie Sud enregistrent un accroissement beaucoup plus faible dans le courant de la première moitié du siècle pour les deux scénarios (1 à 8% sur le Nyong ; 19 à 33% sur le Dja). Entre 2050 et 2100, un accroissement de 9 à 25% se maintient sur les 2 cours d'eau selon les prévisions du scénario Horizon. Par contre sur le Nyong une période de baisse (-5 à -13%) s'installe et continue jusqu'à la fin du siècle selon les prévisions du scénario Anomalie. Cette baisse (-8%) des écoulements n'est par contre observée sur le Dja qu'après 2080.

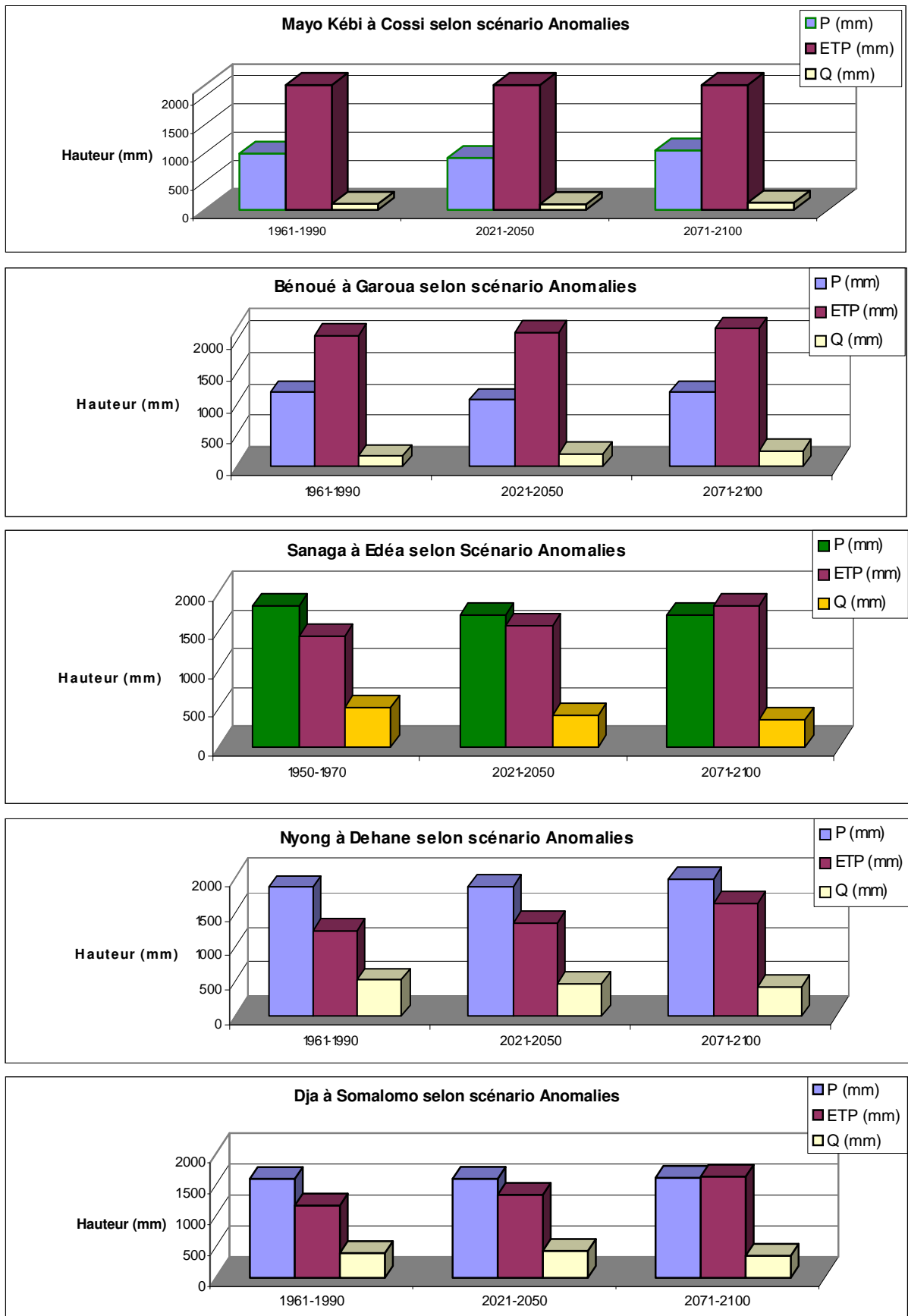
En raison de la régulation des débits de la Sanaga après 1970, les variations des écoulements de ce cours d'eau sont calculées par rapport à la période 1950-1970 connue pour son caractère humide dans la région. Les deux scénarios testés prévoient des écoulements globalement plus faibles (-10 à -32%) que ceux de cette période, tout au long du XXI<sup>ème</sup> siècle. On devrait en tenir compte dans l'exploitation des aménagements en cours ou en projet sur ce cours d'eau.

Pour permettre de faire des comparaisons avec les résultats d'autres études, l'OMM recommande de se référer à la période 1961-1990 dans les études relatives à l'évolution du climat. Le tableau 5.19 indique les changements prévus sur nos différents bassins, pour les précipitations, l'ETP et les écoulements, aux horizons 2050 et 2100 par rapport à cette référence, alors que les figures 5.18 a et b proposent les représentations graphiques des normales 2021-2050 et 2071-2100 de ces paramètres, en regard des normales 1961-1990. Les variations des écoulements sont données en pourcentage et en lame d'eau annuelle rapportée à la superficie de chaque bassin versant.

**Tableau 5.19 : Variations (%) attendue en 2050 et 2100 pour les précipitations, l'ETP et les écoulements, sur les bassins testés, par rapport à la période référence 1961-1990**

Bassin versant	Mayo Kébi à Cossi		Nyong à Dehane		Sanaga à Edéa		Bénoué à Garoua		Dja à Somalomo	
	Sc_Ano	Sc_Horiz	Sc_Ano	Sc_Horiz	Sc_Ano	Sc_Horiz	Sc_Ano	Sc_Horiz	Sc_Ano	Sc_Horiz
<b>Variation attendue en 2050</b>										
Pluie	-7,8	-6,4	+0,6	+1,7	-1,8	-1,5	-9,8	-9,1	+0,1	+2,9
ETP	+0,5	+1,3	+9,3	+5,7	+10,4	+9,5	+2,2	+2,4	+14,8	+12,4
Ecoulement	-5,9 (-6 mm)	-0,1 (0,1 mm)	-10,0 (-53 mm)	-4,6 (-25 mm)	-	-	+5,5 (10 mm)	+11,5 (21 mm)	+9,8 (39 mm)	+19,3 (77 mm)
<b>Variation attendue en 2100</b>										
Pluie	+7,2	+9,6	+6,4	+10,5	0	+3,9	+1,1	+3,0	+0,5	+8,4
ETP	+10,4	+12,5	+37,3	+19,4	+32,1	+25,5	+13,2	+13,9	+44,7	+28,7
Ecoulement	+18,5 (19 mm)	+46,6 (49 mm)	-21,9 (-116 mm)	+1,8 (9 mm)	-	-	+14,2 (26 mm)	+39,3 (71 mm)	-14,7 (-58 mm)	+15,9 (63 mm)

Par rapport à la période 1961-1990, on note à l'horizon 2050 une baisse des précipitations pouvant atteindre 10% sur certains bassins versants selon les scénarios, alors qu'elles restent approximativement stables sur d'autres. A l'échéance 2100 par contre, un accroissement des précipitations pouvant atteindre 10% est prévu sur l'ensemble des bassins étudiés. L'accroissement de l'évapotranspiration moyenne annuelle prévu sur nos bassins varie entre 0.5 et 15% en 2050, contre 10 à 45% selon le scénario, vers la fin du siècle. Des baisses des écoulements atteignant 10% sont prévues sur le Nyong et le mayo Kébi, alors que des augmentations pouvant atteindre 19% sont prévues sur la Bénoué et le Dja, à l'horizon 2050. A l'horizon 2100 par contre un accroissement des écoulements annuels de 2 à 47% est prévu sur l'ensemble des bassins étudiés.



**Figure 5.18a : Normales des paramètres du bilan hydrologique annuel des bassins testés, pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 selon le scénario Anomalies, en regard de celles de 1961-1990/de la moyenne 1950-1970 pour la Sanaga**

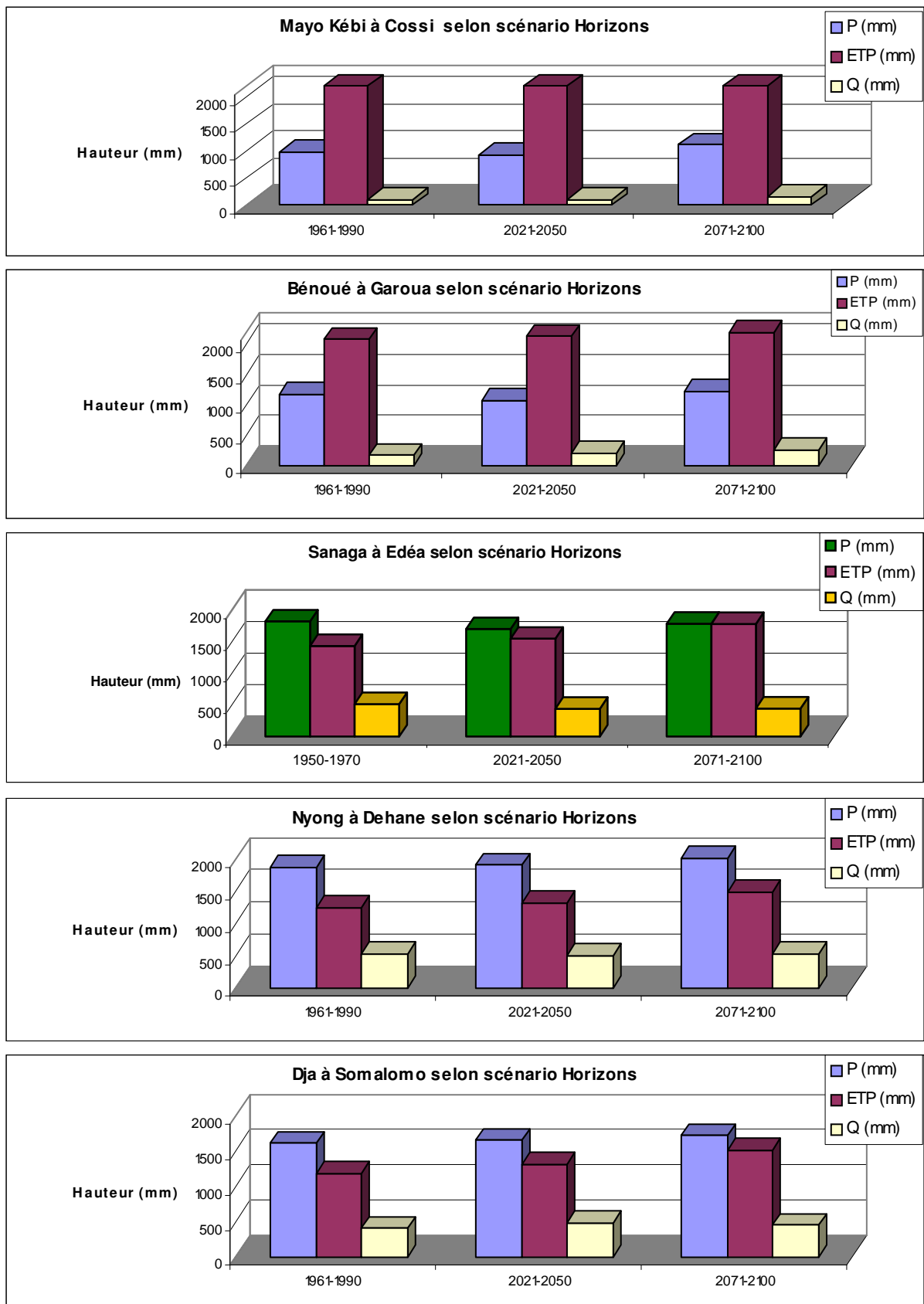


Figure 5.18b : Normales des paramètres du bilan hydrologique annuel des bassins testés, pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 selon le scénario Horizon, en regard de celles de 1961-1990/de la moyenne 1950-1970 pour la Sanaga

Les résultats des tableaux 5.18 et 5.19 qui comparent les écoulements prévus dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle, respectivement à ceux des périodes 1971-1990 et 1961-1990, montrent des différences qui sont parfois très importantes notamment pour les cours d'eau de la partie Nord du pays. Un accroissement des écoulements de 60 à 80% est prévu par exemple sur la Bénoué à Garoua vers la fin du siècle par rapport aux écoulements de la période 1971-1990, contre seulement 14 à 40% si l'on se réfère plutôt à ceux de la période 1961-1990. Cette différence souligne le caractère particulièrement déficitaire des décennies 1970 et 1980.

A titre de comparaison, une étude de Mkankam Kanga (2001) prévoit sur le bassin supérieur de la Bénoué, un accroissement de l'ETP de 4 à 11 % et une variation des écoulements qui va de -7 à +18% en 2100 selon le scénario, par rapport à cette même période de référence. Ces résultats sont dans la même fourchette et vont dans le même sens que les nôtres. Il convient de souligner que l'étude de Mkankam Kanga a utilisé des données issues des modèles de prévision (HadCM2 et ECHAM4/OPYC3) différents du nôtre.

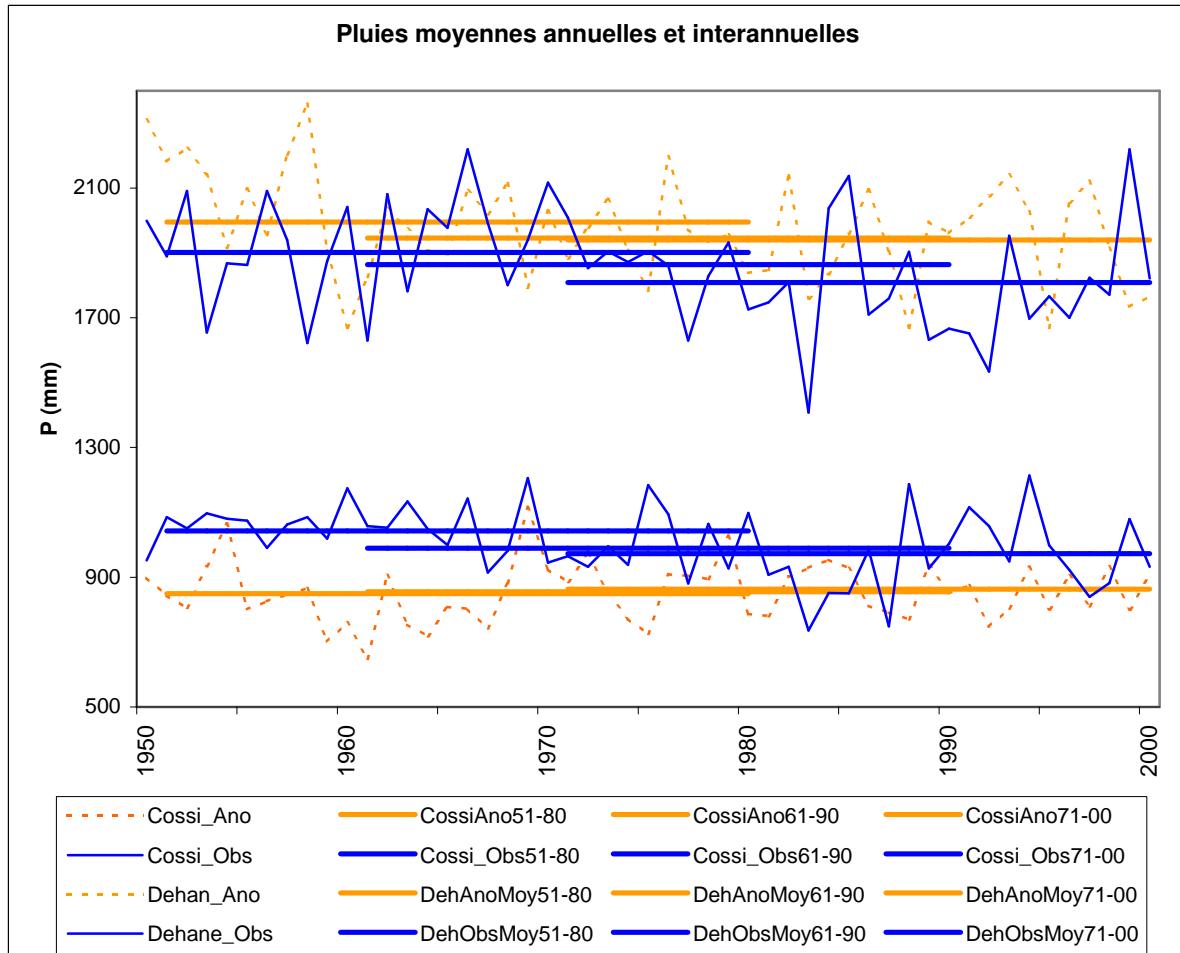
Nos résultats diffèrent par contre, sur certains bassins, des prévisions du Hadley Centre qui prévoient pour le Cameroun en 2050 (figure 5.11), une diminution des écoulements de 25 à 150 mm/an sur les bassins de la partie du pays au sud de l'Adamaoua (région du Mont Cameroun non comprise) contre une augmentation de 25 à 150 mm/an au nord de l'Adamaoua et dans la région du Mont Cameroun. En effet, si une diminution (-53 mm/an) des écoulements est bien enregistrée sur le Nyong, on note plutôt un accroissement des débits du Dja (+ 40 à 80 mm/an) à cette échéance. Il en va de même pour nos prévisions dans le Nord du pays, où une augmentation des écoulements de 21 mm/an est enregistrée sur la Bénoué à Garoua contre une légère baisse (-6 mm/an) sur la mayo Kébi par rapport à la période 1961-1990.

### **5.5.5 – Evaluation des incertitudes sur les prévisions**

Travaillant avec des modèles (hydrologiques et climatiques) réputés imparfaits, il est nécessaire d'examiner les incertitudes qui pourraient entacher les conclusions de nos analyses. Nous disposons des prévisions du scénario Anomalie sur la période 1950-2000 qui correspond à la période d'observation de nos données de terrain. La confiance dans la capacité du modèle à prévoir l'évolution future d'un phénomène est renforcée s'il parvient à reproduire ce même phénomène pour la période actuelle sur la base des mêmes facteurs et processus utilisés dans



les prévisions. La figure 5.19 présente la comparaison des chroniques d'observation pluviométriques des bassins versants du Mayo Kébi et du Nyong à celles du scénario Anomalie sur les mêmes bassins au cours cette période commune.



**Figure 5. 19 : Pluies moyennes annuelles et interannuelles sur les bassins Nyong à Dehane (Haut) et celui du Mayo Kébi à Cossi (Bas) ; le scénario Anomalie est comparé au climat actuel**

Comme on peut le constater sur cette figure, la différence entre les précipitations annuelles peut atteindre 100% certaines années, alors qu'elle n'est plus que de 7 à 10% entre les normales des bassins versants de la région Sud du pays, contre 11 à 13% entre celles des bassins du Nord. On peut en conclure que les modèles de prévision donnent une idée acceptable des tendances générales de l'évolution des précipitations sur des durées suffisamment grandes pour intégrer les fluctuations naturelles alors que des incertitudes très importantes peuvent subsister pour les faibles pas de temps. Dans ces conditions, les analyses détaillées de l'impact du changement climatique sur le régime des écoulements (notamment les études des écoulements mensuels) seraient sans grand intérêt au stade des connaissances actuelles.

Dans la suite, nous nous intéresserons essentiellement aux écoulements qui intègrent la totalité des incertitudes. On s'attachera à faire une analyse comparative des chroniques de débits observés et de ceux reconstitués à l'aide du modèle afin d'en caractériser les différences. On s'intéresse aussi bien aux débits reconstitués à l'aide des chroniques de précipitations et d'ETP observées qu'à ceux reconstitués avec les chroniques issues des scénarios d'évolution climatique.

### **Critères statistiques**

Le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) et le critère de Nash décrits plus haut sont utilisés pour mesurer la qualité des ajustements réalisés par notre modèle. Le tableau 5.20 présente les valeurs obtenues pour ces deux paramètres en utilisant les grilles d'ETP et de pluies "Anomalies" de la période 1950-2000 pour reconstituer les écoulements observés sur les 5 bassins testés.

**Tableau 5.20 : Critères de Nash et coefficient de corrélation mensuelle**

<b>Bassin versant</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Nash</b>	<b>Coefficient corrélation mensuelle</b>
<b>Mayo Kébi à Cossi</b>	25000	45	0,69
<b>Bénoué à Garoua</b>	60500	50	0,73
<b>Sanaga à Edéa</b>	131500	72	0,86
<b>Nyong à Dehane</b>	26400	51	0,73
<b>Dja à Somalomo</b>	5380	-19	0,65

Avec un coefficient de corrélation de 0,86 et un critère de Nash de 72, le résultat est globalement satisfaisant sur la Sanaga à Edéa qui a la plus grande superficie. Les résultats sont par la suite de moins en moins bons à mesure que la superficie du bassin versant diminue. Avec les données de prévision de ce scénario le modèle GR2M aurait donc tendance à reproduire d'autant mieux les débits que la superficie du bassin versant est grande.

### **Incertitudes des scénarios et celles du modèle hydrologique**

Certaines caractéristiques statistiques des hydrogrammes comme les débits de pointe et les étiages absolus sont particulièrement sollicitées en hydrologie dans le cadre des projets d'aménagement en particulier. Nous utiliserons les différences entre les résultats d'analyses statistiques des débits de pointe pour nous faire une idée de la distinction entre les incertitudes dues aux scénarios et celles du modèle hydrologique. Ces résultats permettent également de synthétiser le comportement du modèle GR2M par rapport à la reconstitution des débits maximums. Nous disposons des chroniques de débits moyens maximums mensuels observées

(Q\_Obs) sur nos différents bassins, des chroniques reconstituées à l'aide des observations pluviométriques (Q\_Cal\_PObs) de la période 1950-2000 et des chroniques de débits reconstituées à l'aide des pluies issues de modèle climatique (Q\_Cal\_Ano), pour la même période. Il s'agit ici de faire une comparaison des résultats des analyses statistiques de type débit-durée-fréquence (Qdf) établis à partir des données d'observation et ceux issus de la modélisation sur les 5 bassins testés.

Le logiciel SAFARHY a été utilisé pour l'ajustement statistique des différents échantillons. La distribution de tous nos échantillons est approchée par les lois normale et log-normale. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.21, pour les valeurs de récurrence 10 ans (les différences sont du même ordre de grandeur pour les récurrences 20 à 100 ans), ainsi que les différences entre résultats issus des différents échantillons.

**Tableau 5.21 : Différence (%) entre les débits maximums mensuels décennaux ( $Q_{10}$ ) déterminés à partir des observations et ceux calculés à l'aide des pluies observées (PObs) d'une part et des pluies déduites du scénario Anomalie (PAno) d'autre part.**

Bassin versant	$Q_{10\_Obs}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{10\_PObs}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{10\_PAno}$ ( $m^3/s$ )	$Q_{10\_Obs} - Q_{10\_PObs}$ (%)	$Q_{10\_Obs} - Q_{10\_PAno}$ (%)	$Q_{10\_PObs} - Q_{10\_PAno}$ (%)
M. Kébi à Cossi	511	464	434	9,2	15	6,5
Nyong à Dehane	1211	1179	1144	2,6	5,5	3,0
Sanaga à Edéa	6560	5926	5758	9,7	12	2,8
Bénoué à Garoua	2490	2463	1796	1,1	28	27
Dja à Somalomo	183	168	208	8,2	14	24

Les données du tableau 5.21 montrent que les différences entre les débits décennaux déterminés à l'aide des chroniques reconstituées par le modèle GR2M sur les cinq bassins (seuls les débits naturels ont été analysés le cas échéant) et ceux issus des observations sont relativement faibles. Par contre, la différence entre les paramètres issus des observations et ceux du scénario sont toutes supérieures à 10%, sauf sur le Nyong à Dehane. La différence entre les paramètres issus de la reconstitution à partir des deux types de pluie (observation et scénario) est relativement faible sur le Mayo Kébi, le Nyong et la Sanaga ; alors qu'elle est forte sur la Bénoué et le Dja, mais tout en restant dans la fourchette de ce qui a été observé sur Garoua entre débit observés et reconstitués avec les pluies du scénario Anomalie. L'écart entre les débits observés et reconstitués à partir des pluies observées constitue l'erreur du modèle hydrologique, celui entre les débits observés et ceux issus des pluies du scénario climatique est une combinaison des erreurs des modèles climatique et hydrologique, alors que

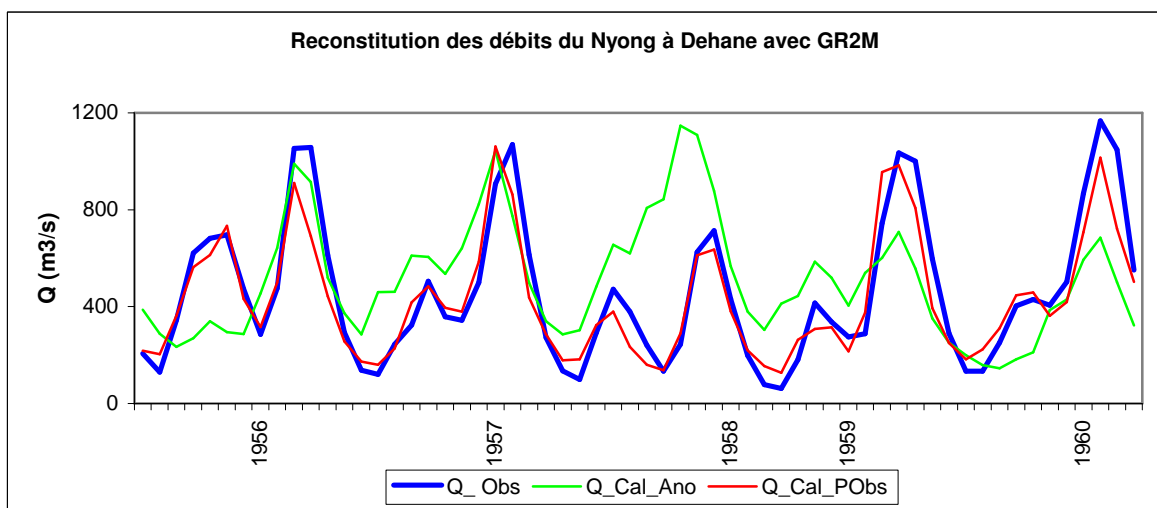
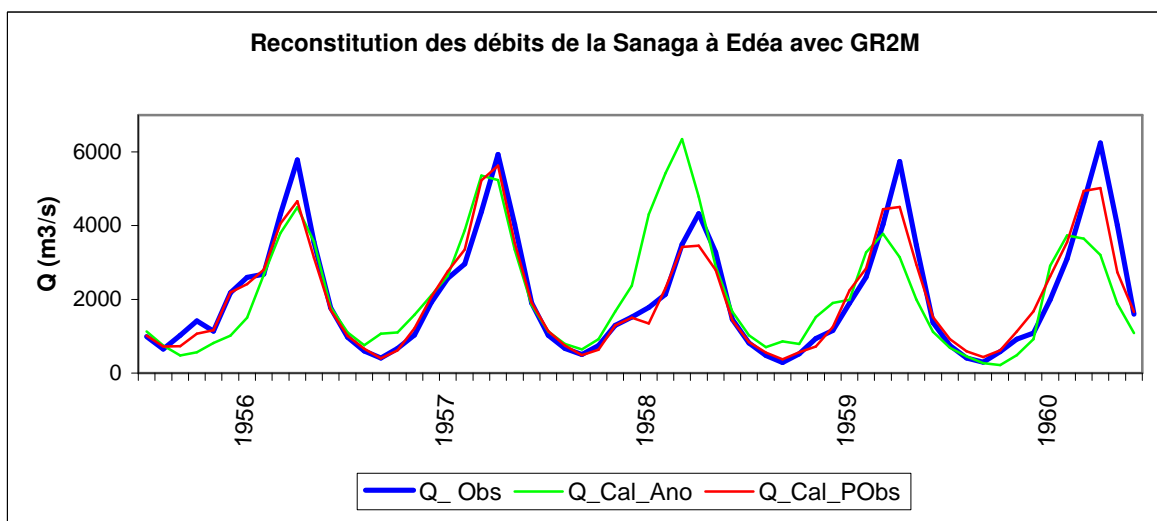
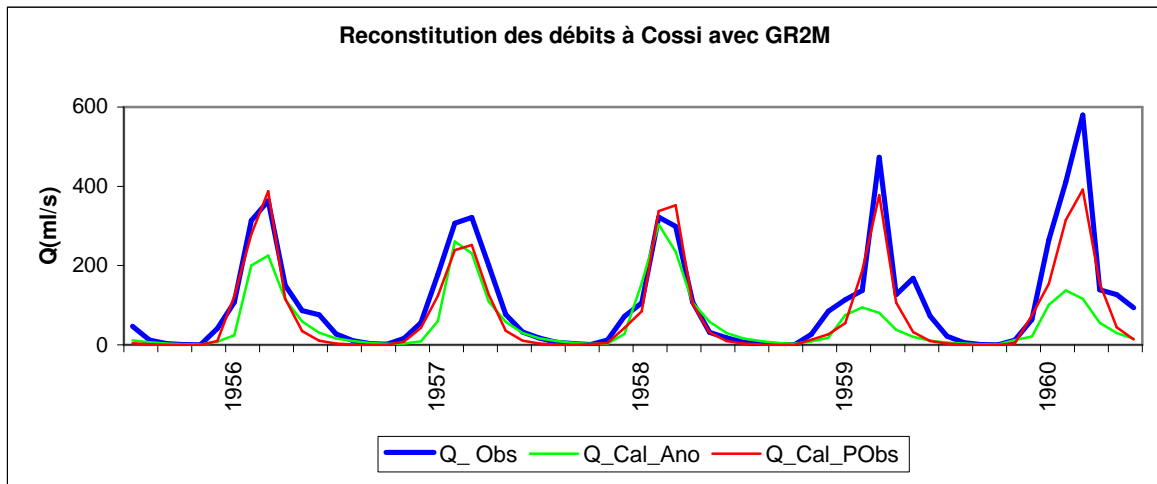
celui entre les débits reconstitués à l'aide des pluies observées et ceux issus des pluies du scénario climatique est une erreur du scénario climatique. Pour être acceptable, un écart aux observations ne devrait pas dépasser 10%, valeur qui représente le seuil d'incertitude sur les mesures. On peut en conclure que le modèle GR2M reproduit correctement les paramètres statistiques de nos cinq cours d'eau à partir des pluies observées, mais que les écarts sont importants quand on utilise les pluies issues de modèle climatique. Il est par contre intéressant de constater que les valeurs de "l'erreur du scénario climatique" ne sont pas très différentes de "l'erreur de modélisation". En attendant d'autres vérifications, ceci témoigne de la bonne qualité des "pluies Anomalie" construites à partir des données brutes du modèle climatique HadCM3 .

### **Dispersion des débits reconstitués par rapport aux observations**

Nous disposons de chroniques des débits observés et des débits reconstitués sur la période d'observation à l'aide du modèle. On s'intéresse à caractériser l'erreur de modélisation qu'on peut définir comme la différence entre les débits observés et ceux simulés pour la même période. Il sera également fait une comparaison entre les hydrogrammes reconstitués à partir des précipitations observées et celles prévues par les modèles climatiques pour la même période. La figure 5.20 montre les hydrogrammes mensuels de trois stations.

On note une assez bonne corrélation des simulations avec les observations sur les bassins du Nord et sur la Sanaga (confirmée par le critère de Nash (85 à 90) et le coefficient de corrélation mensuelle (90 à 96 %)). Sur les bassins versants de la région équatoriale du Sud par contre les 2 pointes de l'hydrogramme annuel sont mal représentées. Il en est de même pour les étiages qui y sont généralement moins bien représentés.

Sur l'ensemble des bassins testés, on note que des différences très importantes peuvent exister entre les hydrogrammes reconstitués à l'aide des grilles de pluie du scénario Anomalie et les hydrogrammes observés, et particulièrement entre les débits de pointe. Cette différence est plus importante pour les bassins de la région équatoriale et découlerait des difficultés que les modèles climatiques ont à prévoir les précipitations sur les faibles pas de temps et particulièrement leur répartition dans l'année.



**Figure 5. 20 : Hydrogrammes observés et reconstitués avec le modèle GR2M sur quelques bassins**  
**Les débits reconstitués à partir des précipitations du scénario climatique (période actuelle)**  
**sont comparés à ceux reconstitués à partir des précipitations observées**

## CONCLUSION

Les analyses des données hydroclimatiques disponibles nous ont permis d'identifier les manifestations de la variabilité climatique et de la sécheresse observée, depuis une trentaine d'années en particulier, sur l'ensemble du territoire camerounais. Ce chapitre visait essentiellement à donner un éclairage sur les impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau du pays, et leur évolution future dans le contexte de changement climatique. A partir de l'information pluviométrique disponible, la méthode de spatialisation de l'information par le procédé de krigeage du logiciel Surfer a permis de faire une estimation des apports météoriques sur l'ensemble du Cameroun. Le territoire du Cameroun reçoit en moyenne  $842 \text{ km}^3$  de précipitations par an, soit un peu moins de 1,8 millions de  $\text{m}^3$  au  $\text{km}^2$ . Quand on considère le territoire suivant une répartition latitudinale Nord et Sud par rapport à l'Adamaoua, ce ratio tombe à environ 1 million de  $\text{m}^3/\text{an}$  au  $\text{km}^2$  dans le Nord contre un peu moins de 2 millions dans le Sud. Le volume total des écoulements superficiels moyens annuels est évalué à  $265 \text{ km}^3$  pour l'ensemble du pays, soit environ 30% des apports météoriques. Une évaluation du volume des écoulements annuels basée sur les seuls bassins versants jaugés (couvrant environ 63% de la superficie totale du territoire), donne une moyenne annuelle de  $172 \text{ km}^3$  pour la période humide d'avant 1970, contre  $139 \text{ km}^3$  pour la période sèche 1971-1990, soit une différence de 24% pour l'ensemble des cours d'eau étudiés. Si l'on considère uniquement les cours d'eau au Sud de l'Adamaoua, cette différence n'est plus que de 22%, contre 45% pour ceux situés dans le Nord. Les scénarios d'évolution climatique sont utilisés pour évaluer l'incidence du changement climatique sur les ressources en eau du Cameroun, en utilisant un modèle hydrologique dont le calage a été réalisé au préalable sur la base des données d'observation.

Après une analyse des performances de trois modèles hydrologiques (GR2M, WBM et Yates) sur cinq bassins versants représentatifs des régimes hydrologiques du Cameroun, la meilleure reconstitution des débits sur les cinq bassins testés est obtenue avec le modèle GR2M. Toutefois, la modélisation des écoulements en régime équatorial est de qualité moyenne. On note en particulier une mauvaise représentation des 2 pointes annuelles de l'hydrogramme. Les modèles testés se comportent globalement de manière satisfaisante sur le bassin de la Sanaga en dépit de la régulation de ses débits. On note une tendance à l'amélioration de l'efficacité (critère de Nash et coefficient de corrélation) des modèles à mesure que la taille du bassin versant s'accroît. Des scénarios d'évolution du climat construits à partir des

données brutes du modèle climatique HadCM3 sont utilisés par la suite pour se faire une idée de l'impact des changements climatiques futurs sur l'évolution des ressources en eau du pays.

Deux scénarios sont tirés des données brutes du modèle HadCM3. Les impacts varient d'un bassin à l'autre en raison de la variété (de taille, de physiographie, des états de surface et des caractéristiques des sols) de ces bassins, qui leur donne une sensibilité différente aux différents termes du climat. Si les données brutes issues du modèle climatique conduisent à des résultats sans commune mesure avec la réalité, les scénarios construits à partir de ces données présentent une évolution réaliste des paramètres hydroclimatiques qui permettent de se faire une idée de l'impact des modifications du climat sur les ressources en eau. Des incertitudes importantes subsistent cependant pour les faibles pas de temps, notamment les prévisions annuelles et mensuelles.

Par rapport à la période 1971-2000 les scénarios utilisés prévoient sur les bassins versants testés, des variations de précipitations moyennes annuelles qui vont de -13 à +14 % dans le courant du XXI<sup>ème</sup> siècle. Contrairement aux précipitations, l'évapotranspiration moyenne annuelle augmente graduellement pour atteindre un taux d'accroissement de 45% vers 2100 pour les bassins versants de la partie Sud du pays, contre seulement 14% pour ceux du Nord. En ce qui concerne les écoulements, par rapport à 1971-1990, des débits moyens annuels globalement plus importants (+14 à +80%, soit 12 à 122 mm/an) sont prévus pendant tout le siècle pour les deux cours d'eau de la partie Nord du pays. Pour ceux de la partie Sud par contre, après une augmentation relativement plus faible (+1 à + 33%, soit 4 à 120 mm/an) des écoulements annuels au cours de la première moitié du siècle, des baisses de -5 à -13% (-24 à -59 mm/an) sont prévues dans certains cas vers la fin du siècle. Les variations des écoulements de la Sanaga sont étudiées par rapport aux débits non régulés de la période 1950-1970. Les deux scénarios testés prévoient des débits annuels globalement inférieurs (-10 à -32%, soit -53 à -163 mm/an) à ceux de cette période connue pour son caractère humide, tout au long du XXI<sup>ème</sup> siècle. La comparaison de nos résultats à la période de référence 1961-1990 recommandée par l'OMM montre que nos prévisions sur la Bénoué se situent dans la même fourchette que celles de Mkankam Kanga (2001) qui a utilisé sur le même bassin des données issues des modèles de prévision différents.

En définitive, la variété des processus en œuvre dans les modèles climatiques, dans les différents bassins ainsi que dans leur agrégation temporelle et spatiale est telle que les

conclusions peuvent différer profondément d'un bassin à un autre. En particulier, les conclusions dépendent fortement des "images du futur possible" que proposent les scénarios 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 nos bassins. Les résultats constituent une hypothèse valable de travail qu'il conviendrait d'affiner à mesure que les performances des modèles climatiques vont s'améliorer.

Quelques difficultés ont cependant été relevées. Un modèle hydrologique est construit pour répondre à un certain nombre de questions et exige par conséquent une certaine complexité. Il n'est par contre pas certain que les données disponibles soient en quantité suffisante pour permettre sa vérification complète. Cet handicap est particulièrement préoccupant au Cameroun où les observations du réseau hydrométrique sont arrêtées sur la quasi-totalité du territoire depuis près de 2 décennies. Un modèle ainsi incomplètement renseigné peut fournir des résultats idéalement réalistes, mais nécessairement incertains. Les modèles hydrologiques utilisés privilégient les écoulements moyens qui se limitent aux valeurs moyennes mensuelles alors que les prévisions des scénarios climatiques privilégient la tendance générale au courant d'une période d'environ 30 ans. D'autre part, aucun modèle n'est absolument fiable lorsqu'il sort de son domaine de calibration. Dans ces conditions, si les résultats obtenus sur les 5 bassins testés peuvent permettre de se faire une idée de l'évolution de leurs ressources en eau particulières dans les années à venir, une extrapolation des résultats à l'ensemble des écoulements de surface au Cameroun nécessite une certaine prudence. Par ailleurs, le changement climatique correspond à une situation où les conditions de fonctionnement hydrologiques sont modifiées, situation comparable en de nombreux points à un changement de domaine de calibration. On peut alors se demander quel degré de confiance accorder aux prévisions réalisées sur nos bassins ? Les résultats relatifs à la prévision des écoulements sont également fortement dépendants de l'hypothèse de conservation des états de surface dans une situation voisine de leur état actuel, ce qui est hautement improbable. Des efforts devraient par conséquent être faits dans le sens d'une meilleure prise en considération des états de surface, du contenu en eau des sols et de la couverture végétale dans les modèles hydrologiques. Les faiblesses de la modélisation hydrologique sont donc réelles, cependant les incertitudes les plus importantes se situeraient du côté des scénarios climatiques. Toute amélioration des performances des modèles climatiques aura par conséquent des répercussions sur la précision et la fiabilité des projections relatives aux ressources en eau.



## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Rendu au terme de l'étude, nous voulons tirer ici les principaux enseignements. En nous appuyant sur un important travail déjà réalisé sur le sujet et des données nouvelles sur la période 1981-2000, la présente étude se proposait d'approfondir la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques et hydrologiques à l'échelle du Cameroun, avant de jeter un regard prospectif sur l'évolution des ressources en eau du pays dans le contexte du changement climatique. Les informations disponibles pour l'étude ne couvrent pas toutes les régions du pays, et celles existantes sont parfois fragmentaires, souvent incomplètes. Il s'agit notamment des observations hydrométriques qui s'arrêtent à la fin des années 1980 pour la majorité des stations, alors que l'information pluviométrique va pour l'essentiel jusqu'en l'an 2000. Au nom de certains principes de rigueur qui inspirent la démarche scientifique, il aurait fallu une parfaite homogénéité des séries analysées, ce qui signifiait éliminer un grand nombre de données et ne considérer par exemple que la période d'observation commune des précipitations et des débits. L'importance et l'urgence du sujet pour la planification et l'organisation des usages des ressources en eau du pays dans le contexte déficitaire actuel, ont motivé notre choix de conserver cette différence entre les chroniques d'observations, quitte à les discuter parfois sur des bases différentes. Cette attitude n'a cependant pas exclu la critique rigoureuse des informations disponibles et nous nous sommes efforcés d'indiquer les limites de nos conclusions chaque fois que cela s'avérait indispensable. Au terme de l'étude, la convergence des différentes analyses vers des résultats parfaitement cohérents nous permet d'affirmer que cette entreprise quelque peu risquée en valait parfaitement la peine. Nous en rappelons ici les idées maîtresses, les principales conclusions et les limites.

A l'instar des autres régions du monde, une hausse moyenne des températures journalières a été relevée sur l'ensemble du pays. Par rapport à la période 1961-1990, une hausse des températures moyennes journalières de l'ordre de 0,2°C en moyenne, est observée sur l'ensemble du territoire au cours de la période 1971-2000. Cette hausse est de 0,4°C en moyenne si l'on ne considère que la période 1991-2000, 1998 détenant le record des années les plus chaudes au Cameroun, avec une hausse moyenne de +1,1°C. Cette valeur est supérieure au record mondial établi à +0,55°C la même année. Bien que cette tendance au réchauffement soit générale sur l'ensemble du pays, l'intensité est variable suivant les régions. Les plus fortes augmentations sont enregistrées dans les régions montagneuses,

notamment pour les températures maximales moyennes annuelles, alors que les plus faibles sont observées dans la région au Nord de l'Adamaoua où on enregistre par ailleurs une hausse plus forte des températures minimales moyennes annuelles.

Sur le plan des ressources en eau, avec une disponibilité moyenne annuelle par habitant de près de 20000 m<sup>3</sup> en l'an 2000, le Cameroun est classé parmi les pays aux ressources en eau abondantes. Cette évaluation fait cependant abstraction de la distribution des ressources entre les différentes zones du pays, de la variabilité interannuelle et des données qualitatives qui constituent souvent un facteur limitant. En effet, depuis la fin des années 60, une baisse généralisée des précipitations et des écoulements est observée sur l'ensemble du territoire camerounais, à l'instar des autres régions de l'Afrique intertropicale. Par rapport à la période de référence 1941-1970, la moyenne des déficits pluviométriques annuels varie de -10% dans le Sud du pays à -20% dans le Nord, au cours des trois dernières décennies. Cette variation se manifeste par un allongement de la saison sèche et par la baisse du nombre de fortes pluies enregistrées au cours d'une année. Sur le plan des précipitations mensuelles l'évolution n'est pas uniforme. C'est ainsi que les mois de juillet et d'août ont été plutôt excédentaires dans le Sud du pays en général, au cours de cette même période. La baisse des précipitations a considérablement affecté le régime des écoulements des cours d'eau qui ont proportionnellement plus diminué que le cumul des pluies annuelles. Par rapport à la même période de référence, la moyenne des déficits des modules interannuels est évaluée à -15% pour les cours d'eau de la partie Sud du pays, contre -35% pour ceux du Nord. Dans l'ensemble, les basses eaux ont été plus affectées que les hautes eaux qui bénéficieraient de l'amélioration des conditions de ruissellement sur certains bassins versants.

Comparativement aux sécheresses antérieures, et notamment celles des années 1910 et 1940, la sécheresse récente en Afrique tropicale en général et au Cameroun en particulier, se différencie par son intensité plus marquée et sa durée plus longue. Il était alors urgent de déterminer leurs conséquences sur les normes de référence établies à partir des données hydroclimatiques antérieures. Les résultats de nos analyses montrent que les conséquences sont variables selon que l'on s'adresse aux paramètres de référence des précipitations ou des écoulements, et en particuliers ceux des hautes et basses eaux. Pour les normales pluviométriques, les modules et les paramètres des hautes eaux, les moyennes déterminées à partir de l'ensemble des chroniques de données disponibles sont relativement proches des normales établies sur la base des données des périodes de référence sèches (1971-2000) et

humides (1951-1980). Les écarts entre les paramètres relatifs aux basses eaux calculés sur les différentes périodes avant et après 1970 sont par contre très importants. Les différences sont telles que certains débits caractéristiques de récurrence décennale calculés à partir de l'ensemble de la chronique de données disponibles peuvent être supérieurs au débit de récurrence centennale, voire millennale, calculé à partir de la série 1971-1990.

Ces résultats mettent en cause les limites des régions climatiques du Cameroun définies sur la base des données antérieures. En effet, la cartographie des normales sur des périodes glissantes de 30 ans montre un glissement des isohyètes vers le Sud du pays pour les périodes 1961-1990 et 1971-2000, traduisant ainsi un déficit pluviométrique par rapport à la période de référence 1951-1980. Ce déficit est beaucoup plus marqué pour la période 1971-2000, ce qui traduit globalement une accentuation de la sécheresse en dépit de quelques années humides enregistrées au cours de la décennie 1990 (L'Hôte *et al.*, 2002). La modification n'est cependant réellement importante que dans la partie Nord du pays et concerne essentiellement la diminution des précipitations et, par voie de conséquence celle des écoulements. Les limites des zones climatiques proposées par Olivry (1986) ayant relativement peu changé, nous pouvons les considérer comme toujours valables. Cependant, la définition des régions climatiques homogènes au regard de toutes les exigences climatiques et bioclimatiques nécessite des études complémentaires qui sortent du cadre de ce travail. Outre les bilans hydriques, une telle entreprise devrait inclure des études de bilans d'énergie et de tous les autres paramètres qui déterminent les conditions d'équilibre des écosystèmes. En attendant, les résultats de nos analyses permettent d'affirmer que la définition spatiale des régions climatiques est susceptible de modification si une évolution durable du climat est avérée. Les conséquences des fluctuations climatiques sur les ressources en eau sont donc très importantes, et il serait intéressant d'anticiper leurs impacts pour la planification et l'organisation des usages futurs.

Le Cameroun reçoit en moyenne  $842 \text{ km}^3$  de précipitations par an, soit un peu moins de 1,8 millions de  $\text{m}^3$  au  $\text{km}^2$ . En considérant le territoire suivant une répartition latitudinale nord et sud par rapport à l'Adamaoua, ce ratio tombe à environ 1 million de  $\text{m}^3/\text{an}$  au  $\text{km}^2$  dans le Nord contre un peu moins de 2 millions dans le Sud. Le volume total des écoulements superficiels moyens annuels est évalué à  $265 \text{ km}^3$  pour l'ensemble du pays, soit environ 30% des apports météoriques. Une analyse du volume de ces écoulements basée sur les principaux bassins versants jaugés (couvrant près des 2/3 du territoire) montre un déficit de 24% des

écoulements moyens annuels de la période sèche 1971-1990 par rapport à ceux des années humides d'avant 1970. Ce déficit est de 22% si l'on ne considère que les cours d'eau de la partie Sud du pays, contre 45% pour ceux situés dans le Nord. Pour évaluer l'incidence de l'évolution du climat sur les ressources en eau du Cameroun, nous avons eu recours aux scénarios d'évolution climatique et à la simulation des écoulements au moyen de modèles hydrologiques dont le calage a été réalisé au préalable sur la base des données d'observation.

Les performances de trois modèles hydrologiques (GR2M, WBM et Yates) ont été analysées en utilisant les données d'observation de cinq bassins versants représentatifs des régimes hydrologiques du Cameroun. La meilleure simulation des débits sur les cinq bassins testés est obtenue avec le modèle GR2M. On souligne cependant les qualités moyennes de la modélisation des écoulements en régime équatorial où on note en particulier une mauvaise représentation du rythme hydropluviométrique bimodal. Les modèles testés se comportent globalement de manière satisfaisante sur le bassin de la Sanaga en dépit de la régulation de ses débits. Une tendance à l'amélioration de l'efficacité (critère de Nash et coefficient de corrélation) des modèles est relevée, à mesure que la taille du bassin versant s'accroît.

Des données simulées par le modèle climatique HadCM3 sont disponibles sur la période 1950-2099 qui inclut la période observée (1950-2000) des cours d'eau testés. Les performances de ce modèle sont classées par ailleurs parmi les meilleures dans le cadre d'autres études précédentes (Arnell et al., 1999 ; Hulme et al., 2000 ; Mkankam Kamga, 2001). En raison de ces différents avantages, les données de simulation de ce modèle ont été retenues pour tester l'impact des changements climatiques sur nos bassins. Cette simulation est basée sur le scénario d'émission A2 qui décrit un monde futur très hétérogène. Deux jeux de données construits à partir des données brutes de ce modèle sont utilisés pour évaluer l'impact des changements climatiques futurs sur l'évolution des ressources en eau du Cameroun, en s'appuyant sur les résultats de simulation du modèle GR2M. En raison de la variété (de taille, de physiographie, des états de surface et des caractéristiques des sols) des bassins testés, qui leur donne une sensibilité différente aux différents termes du climat, les impacts sont variables d'un bassin à l'autre. Il convient de souligner que les données brutes issues du modèle climatique conduisent à des résultats sans commune mesure avec la réalité. Les scénarios construits à partir de ces données permettent cependant de se faire une idée réaliste des conséquences de l'évolution du climat sur les ressources en eau du pays, même si des incertitudes importantes subsistent pour les prévisions annuelles et mensuelles.

Par rapport à la période 1971-2000 les scénarios utilisés prévoient sur les bassins versants testés, des variations de précipitations moyennes annuelles qui vont de  $-13$  à  $+14$  % au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle. Contrairement aux précipitations, l'évapotranspiration moyenne annuelle augmente graduellement pour atteindre un taux d'accroissement de  $45\%$  vers 2100 pour les bassins versants de la partie Sud du pays, contre seulement  $14\%$  pour ceux du Nord. En ce qui concerne les écoulements, par rapport à la période 1971-1990, des débits moyens annuels globalement plus importants ( $+14$  à  $+80\%$ , soit  $12$  à  $122$  mm/an) sont prévus durant le siècle pour les deux cours d'eau de la partie Nord du pays. Pour ceux de la partie Sud par contre, après une augmentation relativement plus faible ( $+1$  à  $+33\%$ , soit  $4$  à  $120$  mm/an) des écoulements annuels dans la première moitié du siècle, des baisses de  $5$  à  $13\%$  ( $24$  à  $59$  mm/an) sont prévues dans certains cas vers la fin du siècle. Selon les deux scénarios utilisés, les variations des débits de la Sanaga étudiées par rapport aux débits non régulés de la période 1950-1970 prévoient des écoulements annuels globalement inférieurs ( $-10$  à  $-32\%$ , soit  $-53$  à  $-163$  mm/an) du début jusqu'à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle. L'analyse de nos résultats par rapport à la période de référence 1961-1990 recommandée par l'OMM montre des baisses d'écoulements atteignant  $10\%$  sur certains cours d'eau à l'horizon 2050, alors qu'on enregistrerait plutôt des augmentations (jusqu'à  $19\%$ ) sur d'autres. A l'horizon 2100 par contre un accroissement des écoulements annuels de  $2$  à  $47\%$  est prévu sur l'ensemble des bassins étudiés. Nos prévisions sur le bassin versant de la Bénoué se situent dans la même fourchette que celles publiées par Mkankam Kamga (2001) qui se réfère à la même période et utilise sur le même bassin des scénarios d'évolution climatique différents (HadCM2 et ECHAM4/OPYC3).

En dépit de ces résultats encourageants, quelques zones d'ombre subsistent, du fait du déficit des observations hydrométriques en particulier, des limites des modèles climatiques actuels et de celles des modèles hydrologiques. Un modèle hydrologique est construit pour répondre à un certain nombre de questions et exige par conséquent une certaine complexité. Il n'est par contre pas certain que les données disponibles soient en quantité suffisante pour permettre sa vérification complète. Cet handicap est particulièrement préoccupant au Cameroun où les observations du réseau hydrométrique sont arrêtées sur la quasi-totalité du territoire depuis près de 2 décennies. Un modèle ainsi incomplètement vérifié peut fournir des résultats idéalement réalistes, mais nécessairement incertains. D'autre part, les analyses réalisées dans cette étude n'ont concerné que quelques bassins versants. Il est important d'étendre le travail sur les autres cours d'eau du pays avant de tirer des conclusions générales sur les ressources

en eau du pays. Il se pose alors le problème de la disponibilité des données indispensables dans certaines régions. En effet, une absence quasi totale d'observations hydroclimatiques est notée au niveau des régions frontalières, notamment dans la région du Sud-est du pays et celle bordant le Nigeria, où tout le flanc ouest de la Dorsale camerounaise (bassin versant des tributaires camerounais de la Bénoué inférieure) ne dispose pas de dispositif d'observations hydroclimatiques. Pour une bonne maîtrise de l'eau et la planification d'une mobilisation optimum des ressources, il est indispensable de disposer de données fiables et continues, couvrant les différentes composantes du cycle de l'eau et les différentes régions du pays. Cependant, si une extension du réseau d'observation hydroclimatique est souhaitable pour combler cet handicap et consolider nos conclusions sur toute l'étendue du territoire, la reprise des observations est urgente sur un réseau minimum de stations représentatives des différents régimes hydrologiques du pays pour permettre de se faire une idée précise de leur évolution. L'important potentiel économique de la Sanaga dans le Sud du pays et de la Bénoué dans le Nord, plaide également en faveur d'un réseau d'observation mieux étoffé et plus étroitement suivi.

Par ailleurs, les modèles hydrologiques utilisés privilégient les écoulements moyens qui se limitent aux valeurs moyennes mensuelles alors que les prévisions des scénarios climatiques privilégient la tendance générale au cours d'une période relativement longue. Il est également connu qu'aucun modèle n'est absolument fiable lorsqu'il sort de son domaine de calibration. Dans ces conditions, si les résultats obtenus sur les 5 bassins testés peuvent permettre de se faire une idée de l'évolution de leurs ressources particulières dans les décennies à venir, une extrapolation des résultats à l'ensemble des écoulements de surface au Cameroun exige une certaine prudence. Il convient de souligner que le changement climatique correspond à une situation où les conditions de fonctionnement hydrologiques sont modifiées. Cette situation pourrait être comparable à un changement de domaine de calibration. Les résultats relatifs à la prévision des écoulements sont également fortement dépendants de l'hypothèse de conservation de la capacité en eau des sols et des états de surface dans une situation voisine de leur état actuel, ce qui est fortement improbable. Des efforts restent par conséquent à faire dans le sens d'une meilleure prise en considération de ces paramètres dans les modèles hydrologiques.

En définitive, les insuffisances de la modélisation hydrologique sont réelles, cependant les incertitudes les plus importantes se situeraient plutôt du côté des scénarios atmosphériques. La

variété des “images possibles du futur” que proposent les scénarios climatiques est telle que les conclusions peuvent différer profondément d’un modèle à un autre et d’un bassin à l’autre. Il serait par conséquent intéressant de multiplier ce genre d’exercice sur de nombreux bassins versants du Cameroun avec d’autres scénarios climatiques, ce qui permettrait de faire des comparaisons. D’autre part, toute amélioration des performances des modèles climatiques devrait avoir des répercussions sur la précision et la fiabilité des projections relatives aux ressources en eau. 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 et les résultats constituent une hypothèse valable de travail qu’il conviendrait d’affiner à mesure que les performances des modèles climatiques vont s’améliorer.



## **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

African climate variability, [http://www.clivar.org/publications/other\\_pubs/iplan/iip/pg4.htm](http://www.clivar.org/publications/other_pubs/iplan/iip/pg4.htm)

- Agor A. Shiklomanov, Jeanna A. Balonishnikova, 2003. World water use availability : trends, scenarios, consequences. In: Water Resources Systems-Hydrological Risk, Management and Development, (ed. By GüterBlöschl, Stewart F., Kumagai M., Musiak K. & Rosbjerg D.) (Proc. Of Sapporo Sym. HS02b; IUGG2003, July. 2003), 358-364. IAHS Publ. N°281.
- Aka A., Kouame B., Paturel J. E., Servat E., Lubès H., Masson J. M., 1996. Analyse statistique de l'évolution des écoulements en Cote d'Ivoire. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 167 – 177.
- Aka A ;O., 1999. Variabilité des écoulements et activités anthropiques. Cas du bassin du Bandama en Côte d'Ivoire, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 243 p.
- Albergel J. & Gioda A., 1986. Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine. 10ème Journée de l'Hydraulique, SHF Rep. N°9, Paris.
- Albergel, J., 1987. Sécheresse, désertification et ressource en eau de surface. Application aux petits bassins versants du Burkina Faso. In : The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (Proc. of Vancouver Symposium, August 1987). IAHS publ. N° 168, 355 - 365.
- Albergel J., Dacosta H., 1995. Les écoulements non pérennes sur petits bassins du Sénégal. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 139 - 156.
- Albergel J., Claude J., Habaieb H., 2000. Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du sud et de l'est du bassin méditerranéen. in, Séminaire International Montpellier 2000 ; "Hydrologie des Régions Méditerranéennes"; PHI-V/ Doc. Tech. en Hydrol. N°51, UNESCO, Paris ; 19-31 pp.
- Alory G., Delcroix T., 1997. Climatic variability in the vicinity of Wallis Futuna, and Samoa islands (13°-15° S, 180°-170° W). *Oceanologica Acta* - Vol. 22 , n°3 249-263.
- Amani A., Nguetora M., 2002. Evidence d'une modification du régime du fleuve Niger à Niamey. Procédings de la 4ème Conf. Internationale FRIEND du PHI de l'UNESCO, Cape Town, IAHS Publ. n° 274, pp. 449-456.
- Andriamananjara R. R., 1985. Simulation de débits journaliers. Recherche d'une méthodologie utilisant l'analyse de Fourier. Application à l'IKOPA (Madagascar). Thèse de Docteur-Ingénieur en sciences agronomiques, ENSA de Rennes. 165 p
- Ardoin S., Dezetter A., Servat E., Bocquillon C., 2001. Redéfinition des fonctions de production des modèles globaux de relation pluie-débit en milieu semi-aride africain. *C.R. Acad. Sci. Paris* 333, série IIa, 611-616.
- 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. 440 p.

- Arnell N.W., Reynard N.S., 1996. The effect of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology* 183 (1996) 397-424.
- Arnell N.W., 1998. Climate change and water resources in Britain. *Climatic Change*. 39, 83-110.
- Arnell N.W., 1999. Climate change and global water resources. *Global Environment Change* 9 (1999) S31-S49
- Banque Mondiale 1992 Evaluation hydrologique de l'Afrique Sub-Saharienne, Pays de l'Afrique de l'Ouest. Rapport de pays Cameroun réalisé Mott MacDonald International, BCEOM, SOGREAH & ORSTOM.
- Banque Mondiale, 1999. Le changement du Climat et l'Afrique Sub-Saharienne : Problème et Opportunité. FINDING, Région Afrique. A World Free of Poverty, N° 120, Jul. 1999. [Http://www.worldbank.org/afr/findings/french/ffind120.htm](http://www.worldbank.org/afr/findings/french/ffind120.htm)
- Beauvilain A., 1995. Tableau de la pluviométrie dans les bassins du Tchad et de la Bénoué de la création des stations à décembre 1994. Travaux et Documents scientifique du Tchad, document pour la recherche III. 103 p.
- Bell B., 1971. The Dark Ages in ancient history. The first Dark Age in Egypt. *Am. J. Archaeology* 75, 1-36.
- Beltrando G., 1990. Variabilité interannuelle des précipitations en Afrique orientale (Kenya, Ouganda, Tanzanie) et relation avec la dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 234 p
- Bergonzini L., Richard Y., Camberlin P., 2002. Variation interannuelle du bilan hydrique du lac Tanganyika (1932-1995) : Changement dans la relation précipitation-excédent lacustre. *Journal des Sc. Hydrol.* 47 (5), 781-796, pp.
- Bernus E., 1981. Touaregs nigériens : unité culturelle et diversité régionale d'un peuple. 508 p. Mém. ORSTOM, n° 94, Paris.
- Bessoles, B., 1969. Synthèse simplifiée des connaissances sur la Géologie du Cameroun. *Bulletin de la Direction des Mines et de la Géologie*, n°5, 218p.
- Bessoles, B., 1980. Géologie de l'Afrique – Vol. 2 – La chaîne panafricaine, zone mobile d'Afrique Centrale et zone mobile soudanaise. Mémoire BRGM n° 92, 398p.
- Beslon M., 1958. Les débits solides du Logone à Laï. Commission Scientifique du Logone et du Tchad, Fort Lamy. ORSTOM, Paris, 20 p.
- Bidi F., Servat E., Niel H., 2000. Contribution à l'analyse de la variabilité pluviométrique du Bassin méditerranéen. in, Séminaire International Montpellier 2000 ; "Hydrologie des Régions Méditerranéennes"; PHI-V/ Doc. Tech. en Hydr. N°51, UNESCO, Paris. 339-350 pp.

- Bigot S., Moron V., Melice J.-L., Servat E., Paturel J. E., 1998. Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds): Water Resources Variability in Africa during the XXth Century. Proceedings de la Conférence Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, publ. AISH. n° 252, pp. 71-78.
- Breslow B.P., Sailor J.D., 2002. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. *Renewable Energy* 27 (2002) 585-598.
- Bricquet J. P., Mahé G., Bamba F., Olivry J. C., 1996. Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 157 - 166
- Bricquet J. P., Bamba F., Mahé G., Toure M., Olivry J. C., 1997. Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique atlantique. *Rev. Sci. Eau* 3, 321-337
- Bronstret A., Niehoff D., Bürger G., 2002. Effects of climate and land-use change on storm runoff Generation : present knowledge and modelling capabilities. *Hydrol. Processes*. 16, 509-529.
- Brou Yao T., Servat E., Paturel J. E., 1998. Activités humaines et variabilité climatique : cas du sud forestier ivoirien. In: Water Resources Variability in Africa during the XX<sup>th</sup> Century (Proc.Abidjan'98, Conf. nov. 1998); IASH publ. n° 252, p. 365 - 373
- Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Navarra A., 2002. Droughts and extreme events in regional daily Italian precipitation series. *Int. J. of Climatology*; 22 : 543-558.
- Burn D.H., Hag Elnur M.A., 2002. Detection of hydrologic trends and variability. *J. of Hydrology*, Vol. 255, Issues 1-4., 107-122.
- Cadet D.L., Houston S.H., 1984. Precipitable water over Africa and Eastern/Central Atlantic Ocean during the 1979 summer. *Jour. Met. Soc. Japan*, 62, 761-774.
- Callede J., Guyot J.L., Molinier M., Guimaraes V.S., Eurides De Oliveira, Filizola N.P., 1997. La variabilité des débits de l'Amazone à Obidos (Amazonas, Brésil), Sustainability of water resources under increasing uncertainty (Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997) IAHS Publ. N° 240, 163-171.
- Carbonnel J.-P., Hubert P., 1992. Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne. Remise en cause de la stationnarité des séries. Collection Didactique L'Aridité, Edit. ORSTOM, 1992, 37-52
- Carbonnel J.P., Petrorian R., Serban P., 1997. Evolution récente du régime hydrologique de quelques rivières de Roumanie centrale. *Rev. Sci. Eau* 4, 545-552
- Casenave A., Valentin C., 1996. Etats de surface et transposition des données hydrologiques. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 225 - 233
- Changements climatiques : pourquoi s'alarmer ?  
[http://biosphere.ec.gc.ca/bio/actu/doss/doss\\_00013\\_f.html](http://biosphere.ec.gc.ca/bio/actu/doss/doss_00013_f.html)

- Charney J. G., 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. *Quat. J.*, Roy, Meteorology Soc. 101; 193-202.
- Charney J. G., Quirk J. J., Chow S., Kornfield J., 1977. A comparative study of the effects of Albedo change on drought in semi arid regions. *J. Atmos. Sci.*, 34; 1366 - 1385.
- CIEH-BRGM, 1979. Carte de planification des ressources en eau du Cameroun - FAC  
2 feuilles au 1/1000.000.
- Citeau J., Berges J.C., Demarcq H., Mahé G., 1988. The watch of ITCZ migration over the tropical Atlantic Ocean as an indicator in drought forecast over Sahelian areas. *T.O.A.N.*, n°45; 1-3
- Citeau J., Demarcq H., 1989. Questions relatives to ITCZ, migration over the tropical Atlantic Ocean, sea surface temperature and Senegal river runoff. *Meteorol. Atmos*, 41; 181-190.
- Conway, D., Hulme, M., 1993. Recent fluctuation in precipitation and runoff over the Nile sub-bassin and their impact on main Nile discharge. *Climatic Change* 25, 127-151, pp.
- Conway D., Jones, P.D., 1999. Assessing the impact of future climatic change on water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Final report. Climatic Research unit, University of East Anglia.
- Courel M.-F., Kandel R.S., Rasool S.I., 1984. Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, 307, 528 - 531.
- Dagnélie P., 1975. Théorie et méthodes statistiques. Applications agrométéorologiques. Vol. II. Les presses Agronomiques de Gembloux. 459 p.
- Desbordes M., 1987. Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain. Thèse doctorat d'Etat, Univ. des Sci. et Tech. du Languedoc, Montpellier ; 242 p.
- Desconnets J. C., Galles S., Leduc C., Peugeot C., 1996. Les processus de redistribution des eaux en région sahélienne : l'hydrologie dans l'expérience Hapex-Sahel. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 125 - 137.
- Dezetter A., 1991. Modélisation globale de la relation pluie-débit. Application en zone de savanes soudanaises (nord-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat. Université Montpellier II. 422 p.
- Dhonneur G., 1978. Traité de Météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale. Direction de la Météorologie, France. 151 p.
- Doherty R.M., Hulme M., Jones C.G., 1999. A gridded reconstruction of land and ocean precipitations for the extended tropics from 1974-1994, *Int. J. Climatol.* 19, 119-142 pp.
- Douglas B.C., 1997. Global sea level rise : a redetermination, *Surv. Geophys.* 18, 279-292 pp.
- Dubief J., 1953. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Dir. Serv. Col. Hydraul. Alger

- Duplessy J.C., 2001. Etat des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. C. R. Acad. des Sciences Paris, Sciences de la terre et des planètes 333 (2001) 765-773.
- Edijatno N., Yang X., Makhlouf Z., Michel C., 1999. A daily watershed model with three parameters. Hydrological Sciences Journal, 44(2) : pp. 263-278.
- Evans T., 1994. History of Nile flows. In P.P. Howell and J.A. Allan (Eds) The Nile: Sharing a Scarce Resource. Cambridge Univ. Press, Cambridge, pp. 27-63.
- Farmer, G., 1986. Rainfall variability in tropical Africa. Some implications for policy. Land use policy, October 1986.
- Finlayson C.M., 1999. Coastal wetlands and climate change : the role of governance and science. Aquatic conservation : Marine and freshwater ecosystems, 9 : 621-626.
- Folland C.K., Palmer T.N., Parker D.E., 1986. Sahel rainfall and worldwide sea temperatures 1901-85. Nature 320, 602-7.
- Fontaine B., 1991. Variations pluviométriques et connexions climatiques : l'exemple des aires de mousson indienne et ouest-africaine. Sécheresse 1991 ; 2 : 259-64
- Fontaine B., Bigot S., 1991. Modes de sécheresse ouest-africain et température de Surface océanique. Veille Clim. Satell; 38 ;37- 49.
- Fontaine B., Janicot S., Moron V., Roucou P., Trzaska S., 1998. Anomalie de température de surface de la mer et précipitations tropicales. In: La Météorologie, 8<sup>e</sup> série, n°23, 14-34.
- Fritsch J.-M., Servat E., 1998. Conditions de l'amélioration de la connaissance des ressources et des usages de l'eau pour la gestion durable dans un contexte de rareté croissante. In: Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proc.Abidjan'98, Conf. nov. 1998); IASH publ. n° 252, p. 395 - 409
- Gac, J.-Y., 1979. Géochimie du bassin du Lac Tchad – Bilan de l'altération, de l'érosion et de la sédimentation. Thèse Sc., Strasbourg, 249p.
- Gazel, J., 1958. Géologie du Cameroun. In, Atlas du Cameroun. IRCAM, Yaoundé, 10p.
- Gellens D., Schädler B., 1997. Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisse à un changement de climat. Rev. Sci. Eau 10 (3), p. 395-414
- Genieux M., 1958. Climatologie du Cameroun (in Atlas du Cameroun, IRCAM, Yaoundé, 7p.)
- Giambelluca T.W., 2002. Hydrology of altered tropical forest. Hydrol. Process. 16, 1665-1669.
- Girard S., 2002. Mode opératoire Logiciel de modélisation hydrologique spatialisée mensuelle sur l'Afrique ; Programme Vahyné ; IRD.
- Gleick, P.H., 1986. methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. Journal of Hydrology, 88 : 97-116

- Godefroy N., Haaser F., Henniaux S.-N., Mosser N., Stern N., Vogel N., 2001. Changement climatique et hydrologie. <http://www.enpc.fr/de/trav-elev/cc/impacts/impacts.htm>
- Golden Software, 1999. Surfer(R) Version 7, Aug 15, 1999.  
809, 14th Street ; Golden, CO 80401-1866 USA, <http://www.goldensoftware.com>
- Grist P. J., Nicholson S.E., 2000. A study of the dynamic factors influencing the rainfall variability in the West african Sahel. *J. of Climate*, vol. 14., p. 1338 - 1352.
- Guilbot, A., 1971. Processus d'optimisation en quatre étapes appliqué à la recherche des paramètres des modèles déterministes. Laboratoire d'Hydrologie et de Modélisation. Université Montpellier, note LHM 16/71
- Hadef R., Hadef A., 2001. Le déficit de l'eau en Algérie : une situation alarmante. *Désalinisation* 137 (2001) 215-218.
- Harzallah A., Chapelle A., 2002. Contribution of climate variability to occurrences of anoxic crises 'malaïgues' in the Thau lagoon (southern France). *Oceanologia Acta* 25 (2002) 79-86.
- Hiez G., 1977. L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. ORSTOM, sér .Hydrol.*, vol. XIV, n° 2 : 129-172.
- Hiez G. 1986. Bases théoriques du "vecteur régional". Les premières applications et leur mise en oeuvre informatique."Propos recueillis par B. Pouyau".Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : 1-35.
- Higgins R., Chen Y., Douglas A.V., 1999. Interannual variability of the north American warm season precipitation regime. *J. of Climate*, Vol. 12, 653-680.
- Hisdal H., Stahl K., Tallaksen L.M., Demuth S., 2001. Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent ? *Int. J. of Climatology*, 21, 317-333.
- Hubert P., Carbonnel J. P., 1987. Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 95; 165-183.
- Hubert P., Carbonnel J. P., Chaouche A., 1989. Segmentation des séries hydrométriques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of hydrology*, 110; 349-367.
- Hubert P., Servat E., Paturel J. E., Kouamé B., Bendjoudi H., Carbonnel J.P., Lubes-Niel H., 1998. La procédure de segmentation, dix ans après. In: *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proc.Abidjan'98, Conf. nov. 1998)*; IASH publ. n° 252, pp. 395 - 409
- Hulme, M., 1992. Rainfall changes in Africa, 1931-60 to 1961-90. *Int. J. Climatology* 12, 185-99.
- Hulme, M., 1994. Global change in precipitation in the instrumental period. *Global Precipitation and Climate Change*. M Desbois & F. Désalmand, Eds., Springer-Verlag, 387-405.

- Hulme, M., Osborne T.J., Johns T.C., 1998. Precipitations sensibility to global warming : comparison of observations with HadCM2 simulations, *Geophys. Res. Lett.* 25 3379-3382 pp.
- 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 Version2.4 Workbook, Climatic Research Unit, Norwich, U.K., 52 p.
- Hulme M., 2001. Climatic perspectives on Sahelian desiccation : 1973-1998. *Global Environmental Change* 11 (2001) 19-29.
- Hunt A.G., 2001. El Nino : Dynamics, its role in climate change, and its effects on climate variability. *The limits of predictability. Complexity*, John Wiley & Sons, Inc., Vol.6, n°3, 16-32
- IPCC, 2001a. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* J. T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden and D. Xiaosu (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 944; <http://www.ipcc.ch>.
- 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.
- Janicot S., 1989. 2ème partie. Article 1. Climatologie descriptive des précipitations en Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat, Univ. Paris VI, 93 P.
- Janicot S., 1990a. Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulation quasi-stationnaire durant une phase de transition climatique. 1ère partie - synthèse. Thèse de doctorat, Univ. Paris VI, 178 P. + annexes.
- Janicot S., 1990b. Deux facteurs principaux impliqués dans la sécheresse au Sahel. *Veille Clim. Satll.* N°32 ; 24-33.
- Janicot S., Fontaine B., 1993. L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'Ouest. In : *La Météorologie*, 8e série, n°1, 28-51
- Janicot S., Fontaine B., 1997. Evolution saisonnière des corrélations entre précipitations en Afrique guinéenne et température de surface de la mer (1945-1994). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, t.324, série II a, 785-792.
- Jones P.D., New M., Parker D.E., Martin S., Rigor E.G., 1999. Surface air temperature and its change over the past 150 years, *Rev. Geophys.* 37 173-199 pp.
- Jose A.M., Francisco R.V., Cruz N.A., 1996. A study on impact of climate variability/change on water resources in the Philippines. *Chemosphere*, Vol. 33, n° 9, pp. 1687-1704.
- Junod A., 1987. Influences possibles des activités humaines modifiant le climat sur le cycle hydrologique. In : *The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources.* (Proc. of Vancouver Symposium, August 1987). IAHS publ. N° 168, 555-569.



- Karambiri H., Hubert P., Bendjoudi H., 2000. Apport des multifractales à l'étude des longues séries pluviométriques, *Sud Sciences et Technologies*, n°6, 4 - 14.
- Karl T.R., Knight R.W., 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(2), 231-241.
- Kasperek L., Novicky O., 2002. Hydrological drought in the wide context of climate variability. In : *Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice (Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference held at Cape Town, South Africa, March 2002)*. IAHS Publ. N° 274, p. 85-91
- Kiely G., 1999. Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observations. *Advances; In Water Resources* 23 (199) 141-151.
- Kimaro T.A., Tachikawa Y., Takara K., 2003. Evaluating land-use change effects on flood peaks using a distributed rainfall-runoff model in Yasu river, Japan. (Proc. Of Sapporo Sym. HS03 ; IUGG2003, July. 2003) , 241-248. IAHS Publ. N°282.
- Kingumbi A., Bergaoui Z., Bourges J., Hubert P., Kalled R., 2000. Etude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale. in, *Séminaire International Montpellier 2000 ; "Hydrologie des Régions Méditerranéennes"*; PHI-V/ Doc. Tech. en Hydrol. N°51, UNESCO, Paris ; 341-345 pp.
- Kite G.W., Harvey K.D., (eds.),1992. *Proceedings of the NHRI Workshop N°8, Using hydrometric data to detect and monitor climatic change*. Environnement Canada, NHRI, Saskatoon, Saskatchewan, 247 pp.
- Kitoh A., Yamazaki K., Tokioka T., 1988. Influence of soil moisture and surface albedo changes over the African tropical rain forest on summer climate investigated with the MRI-GCM-I. *Jour. Met. Soc. Japan*, 66, 65-85.
- Kouamé B., Servat E., Dezetter A., 1995. Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau en Cote d'Ivoire. *Mélanges à la mémoire de Jean Rodier*, Publication AISH, n°238, 343 - 354
- Kumagai M., Musiaka K., Rosbjerg D. (Proc. Of Sapporo Sym. HS02b; IUGG2003, July. 2003), 349-357. IAHS Publ. N°28.1
- La variabilité climatique et les océans,  
[http://biosphere.ec.gc.ca/bio/actu/doss/doss\\_00013\\_f.html](http://biosphere.ec.gc.ca/bio/actu/doss/doss_00013_f.html)
- Lamb P., 1978. Large-scale tropical Atlantic surface circulation patterns associated with subsaharan weather anomalies. *Tellus*, n°30, 240 - 251
- Lamb P., 1985. Rainfall in Subsaharan West Africa during 1941-83. *Z. Gletscherkunde und Glazialgeologie* 21, 131-9.
- Lahuec J.P., Bellec B., Dagonne D., Guillot B., Noyalet A., Soulabail C., 1985. Convection intertropicale et pluviométrie. Essai de mises en relation pour l'Afrique de l'ouest du 11 mai au 20 août 1985. Centre Metéo. Spat. Lannion, Antenne ORSTOM/CMS, 7 p.

- Laraque A., Olivry J. C., 1996. Evolution de l'hydrologie du Congo-Zaïre et de ses affluents rive droite et dynamique des transports solides et dissous. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 271 - 288
- Laraque A., Mahé G., Orange D., Marieu B., 2001. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the twentieth century. *Journal of Hydrology*, 245, 1-4, 104-117.
- Lawford R.G., 1992. Hydrological indicator of climatic change: Issue or opportunity ? Proceedings of the NHRI Workshop N°8, Using hydrometric data to detect and monitor climatic change. Environnement Canada, NHRI, Saskatoon, Saskatchewan 9-20 pp.
- Lawrimore J., 2003. Aperçu historique du climat de la terre : un système en constante évolution. *Bulletin OMM*, Vol. 52 N°3 ; Juil. 2003 ; 281-283
- Lebel T., Amani A., Cazenave F., Lecocq J., Taupin J. D., Elguero E., Greard M., Le Barbe L., Laurent H., D'Amato N., Robin J., 1996. La distribution spatio-temporelle des pluies au Sahel : apport de l'expérience EPSAT-Niger, Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 77 - 98.
- Leduc C., Favreau G., Schroeter P., 2001. Long-term rise in a Sahelian water-table : the Continental Terminal in South-West Niger. *J. Hydrol.* 243, 43-54 pp.
- Lee S.E., Press M.C., Lee J.A., 2000. Observed climate variations during the last 100 years, in Lapland, northern Finland. *Int. J. of Climatology*, 20 : 329-346.
- Lefevre R., 1967. Aspect de la pluviométrie dans la région du Mont Cameroun. *Cah. ORSTOM sér. Hydrol.* Vol. IV, n° 1967, pp. 15-44
- Le Houérou H. N., 1962. Les pâturages naturels de la Tunisie steppique. *Ann. Int. Nat. Rech. Agron.*, 42, 5: 1-624.
- Le Houérou H. N., 1985. The impact of climate on pastoralism. In R. W. Kates, J.H. Ausubel Et M. Berberian, edits : *Climate Impact Assessment. CH. 7, Scope Study n° 7*, J. Wiley et Son, N.-Y., USA, 155-186 pp.
- Le Houérou H. N., 1992. Relation entre la variabilité des précipitations et celle des productions primaires et secondaires en zone aride. *Collection Didactique L'Aridité*, Edition ORSTOM, 1992, 197 -219.
- Lemoine L., Prat J. C., 1972. Cartes d'évapotranspiration potentielle calculée d'après la formule de L. Turc pour les pays-membres du CIEH ; *Pub. CIEH, sér. Climatologie*, Ouagadougou ; 7 vol..
- Leroux M., 1980. Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Dijon, Tome I à III, 1427 p.
- L'Hôte Y., Mahé G., Somé B., Triboulet J. P., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1986 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal* 47(4), 563-572

- Lienou, G., Sighomnou D., Sigha Nkamdjou L., 1997. Impact de la sécheresse sur les ressources en eau de la cuvette du lac Tchad en période d'étiage : Exemple des apports du fleuve Logone. Rap. FRIEND'AOC, (Etiages)
- Lienou G., Sigha Nkamdjou L., Sighomnou D., Djeuda Tchabda B., Tchoua F., 1999. Variabilité des écoulements à travers le territoire camerounais et le sud du Tchad au cours des trois dernières décennies. Séminaire FRIEND-AOC, Yaoundé, 30 nov. au 03 déc. 1999.
- Lienou G., Sighomnou D., Sigha Nkamdjou L., 1999. Impact de la sécheresse sur les ressources en eau de la cuvette du lac Tchad en période d'étiage : Exemple des apports du fleuve Logone. Collection GEOCAM, n° 2; Presses Univ. Yaoundé, pp. 89-97
- Lienou, G., Sighomnou, D., Sigha-Nkamdjou, Mahé, G., Ekodeck G.-E., Tchoua, F., 2003. Système hydrologique du Yaéré (Extrême-Nord Cameroun), changements climatiques et actions anthropiques : conséquences sur le bilan des transferts superficiels. In, Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. n°. 278; 403-409 pp.
- Lloyd-Hughes B., Saunders M.A., 2002. Seasonal prediction of European spring precipitation from El Nino-southern oscillation and local sea-surface temperatures. *Int. J. of Climatology*, 22, 1-14.
- Lockwood J.G., 2001. Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations : a review. *Int. J. of Climatology* Vol. 21, 1153-1179.
- Long M., Entekhabi D., Nicholson S.E., 2000. Interannual variability in rainfall, west vapor flux, and vertical motion over West Africa.; *J. of Climate*, vol. 13; p. 3827 - 3841.
- Lubès H., Masson J.M., Servat E., Paturel J.E., Kouame B., Boyer J.F., 1994. Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etudes bibliographique. Programme ICCARE, Rapport n°3, ORSTOM, Montpellier.
- Lubès H., Masson J.M., Raous P., Tapiou M., 1995. Safary. Logiciel de calcul et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation des risques en hydrologie. ORSTOM-Université Montpellier II.
- Lucero O.A., Rodriquez N.C., 1999. Relationship between interdecadal fluctuation in annual rainfall amount and annual rainfall trend in a southern mid-latitudes region of Argentina. *Atmospheric Research* 52 (199) 177-193
- Mahé G. , Olivry J.C., 1991. Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. In: Hydrology for the water management of large river basins. F.H.M. Van de Ven, D. Gutknecht, D.P. Loucks, K.A. Salewicz Eds, Publication AISH n°201. Congrès AISH, Vienne, Autriche, 13-15 août 1991 : 163-172.
- Mahé, G., 1993. Les écoulements fluviaux de la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle. Analyse des situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Coll. Etudes et Thèses. ORSTOM Paris, 438 p.

- Mahé G., 1995. Modulation annuelle et fluctuations interannuelles des précipitations sur le bassin versant du Congo. In : Olivry J.C., Boulègue J. (Eds.) : Actes du Colloque PEGI Grands Bassins Fluviaux Péri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone, INSU, CNRS, ORSTOM, 22-24 nov. 1993, Paris, 13-26.
- Mahé G. , Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989, Sécheresse, n°1, vol 6, 109-117.
- Mahé G. , Olivry J.C., 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Séries IIa, vol. 328, 621-626.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C. , Wotling G., 2001. Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa - 1951-1989. Hydrological Sciences Journal, 46 (2), 211-226.
- Mahé G., Dray A., Paturel J.E., Cres A., Kone F., Manga M, Cres F.N., Djoukam J., Maiga A., Ouedraogo M., Conway, Servat E., 2002. Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina Faso. Proceedings de la 4<sup>ème</sup> Conf. Internationale FRIEND du PHI de l'UNESCO, Cape Town, IAHS Publ. n° 274, pp. 69-76.
- Mahé G., Leduc C., Amani A., Paturel J.-E., Girard S., Servat E., Dezetter A., 2003. Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau. In, Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. n° 278 ; 215-222 pp.
- Maiga H. A., 1998. Effets des sécheresses et étiages dans le bassin moyen du fleuve Niger au Mali. In: Water Resources Variability in Africa during the XXth Century, (Proc. Abidjan'98, Conf. nov. 1998); IASH publ. n° 252, p. 437 - 443
- Makhlouf Z., 1994. Compléments sur le modèle Scen-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris - Sud, 413 p.
- Maley J., 1981. Etudes palynologiques dans le bassin du lac Tchad et paléoclimatologie de l'Afrique nord tropicale de 30000 ans BP à l'époque actuelle. Trav. Et Doc. 129, ORSTOM, Paris.
- Maley J., 2001. La destruction catastrophique des forêts d'Afrique centrale survenue il y a environ 2500 ans exerce encore une influence majeure sur la répartition actuelle des formations végétales; Syst. Geogr. Pl. 71; 777-796.
- Mason S.J., 2001. El Nino, climate change, and Southern African climate. Environmentrics 2001 ; 12 : 327-345.
- McCarthy J. J, Canziani O. F., Leary N. A., Dokken D. J., White K. S, 2001. Climate Change 2001, Impacts, Adaptation, and Vulnerability ; IPCC Report 2001, Working Group II, WMO & UNEP ; edit. Cambridge Univ. Press; 1031 pp.

- McKinnell S.M., Brodeur R.D., Hanawa K., Hollowed A.B., Polovina J.J., Zhang C. I., 2001. Editorial. An introduction to the beyond El Nino conference : climate variability and marine ecosystem impact from the tropics to the Arctic. *Progress in Oceanography* 49 (2001) 1-6.
- Meddi M., Hubert P., 2003. Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du nord-ouest de l'Algérie. In, *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions* (Proceedings of an international symposium held at Montpellier, April 2003). IAHS Publ. n°. 278 ; 229-235 pp.
- Mitosek H.T., 1992. Occurrence of climate variability and change within the hydrological time series: a statistical approach. World Climate Programme - Project A2, CP-92-05, IIASA, Laxenburg, Austria, 167 pp.
- Mkankam Kamga F., 2001. Impact of greenhouse gas induced climate change on the runoff of the upper Benue River (Cameroon). *Journal of Hydrology* 252 (2001) 145-156.
- Mkdat Kadioglu, Zekai Sen, 2001. Monthly precipitation-runoff polygons and mean runoff coefficients, *Journal des Sciences Hydrologiques*, 46 (1), 3-11.
- Molinier M., Guyot J. L., Eurides de Oliveire, Valdemar Guimaraes, 1996. Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. *Mélanges à la mémoire de Jean Rodier*, Publication AISH, n°238, 209 - 222.
- Molinier, M., Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou L., 2000. Perturbation du milieu naturel du Yaéré dans le Nord Cameroun : changement climatique ou action anthropique ? *Revue de Géographie du Cameroun - Vol. XIV - n°2, 2000 ; pp. 155-170.*
- Monteny B. A., 1987. Contribution à l'étude des interactions végétation-atmosphère en milieu tropicale humide. Importance du rôle du système forestier dans le recyclage des eaux de pluies. Thèse de doctorat d'Etat.. Université de Paris-Sud Centre d'Orsay, 170 p.
- Moore M.V., Pace M.L., Mather J.R., Murdoch P.S., Howarth R.W., Folt C.L., Chen C.Y., Hemond H.F., Flebbe P. A., Drisscoll Ch.T., 1997. Potential effects of climate change on freshwater ecosystems of the new England/Mid-Atlantic region. *Hydrol. Processes*, Vol. 11, 925-947.
- Morel M., 1986. Problèmes posés par les normes pluviométriques dans la région sahélienne. In, *Compte Rendu du Colloque International sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse; Communication n° 14, CIEH*
- Morin G., Slivitzky L., 1992. Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : Le cas de la rivière Moisie, *revue des Sciences de l'Eau*, 5, 2, pp. 179-196.
- Moron V., 1994. Variabilité des précipitations en Afrique Tropicale au Nord de l'Equateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océaniques et la dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat. Centre de recherches de climatologie, université de Bourgogne, Dijon, 219 p.
- Morot Ph., Gascuel-Oudou G., Walter C., Zhang X., Molenat J., 1999. Influence du réseau de haies des paysages bocagers sur le cheminement de l'eau de surface. *Rev. Sc. Eau* 12 (1), p.23-44

- Mouafo D., Sighomnou D., Fotsing E., Sigha Nkamdjou L., 2000. Das Logone-Tal ; In Ordkamerun : Entwicklungsmabnahmen und Umweltfolgen. In : Geographische Rundschau H3211 Nov. 2000 ; pp. 35-41.
- Naah E., 1990. Hydrologie du Grand Yaéré du Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université de Yaoundé, 326 p.
- Nakicenovic N. ; Alcamo J. ; Davis G.; De Vrie B.; Fenhann J. ; Gaffin S. ; Gregory K. ; Grübler A.; Jung T.Y.; Kram T.; La Rovere E. L.; Michaelis L.; Mori S.; Morita T. ; Pepper W.; Pitcher H.; Price L.; Raihi K. ; Roehrl A.; Rogner H-H.; Sankovski A.; Schlesinger M.; Shukla P.; Smith S.; Swart R.; Van Rooijen S.; Victor N.; Dadi Z., 2000. Emissions scenarios, A Special Report of Working Group III of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U. K. and New York, NY, USA, 599 pp.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I : a discussion of principles. *Journal of hydrology* 10 pp. 282-290.
- Nazemosadat M.J., Cordery I., 2000. On the relationships between Enso and Autumn rainfall in Iran. *Int. J. of Climatology* Vol. 20, 47-61
- Ndam Ngoupayou J-R., 1997. Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique : du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga au Sud-Cameroun. Thèse Doc. Uni. Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- New M., Hulme M., Jones P., 1999. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I : Development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *J. of Climate*, Vol. 12, 829-856.
- New M., Hulme M., Jones P., 2000. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II : Development of a 1961-90 monthly Grids of terrestrial surface climate. *J. of Climate*, Vol. 13, 2217-2238.
- Ngako, V., 1999. Les déformations continentales panafricaines en Afrique Centrale ; Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Yaoundé I, 301p.
- Nicholson S.E., 1980. Saharan climates in historic times. In Williams and H. Faure (Eds) *The Sahara and the Nile*. Balkema Rotterdam, pp. 173-200.
- Nicholson S.E., 1981. Rainfall and atmospheric circulation during drought period and wetter year in West Africa. *Monthly Weather Rev.* 109, 2191-208.
- Nicholson S.E., Jeeyoung K., Hoopingarner J., 1988. *Atlas of African Rainfall and its interannual variability*. Dept. of Meteorology, Florida State Univ. Tallahassee, FL.
- Nicholson S.E., 1998. Interannual and interdecadal climate variability of rainfall over African continent during the last two centuries. In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds) : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*. Proceedings de la Conférence Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, pub. AISH. n° 252, pp. 107-116.

- Nicholson S.E., 2000. The nature of rainfall variability over Africa on time-scales of decades to Millennia. *Global and Planetary Change*, 26, p. 137-158
- Nicholson S.E., Selato J.C., 2000. The influence of la Nina on African rainfall. *Int. J. Climatology* 20; p. 1761-1776.
- Nicholson S.E., Some B., Kone B., 2000. An analysis of recent rainfall condition in west Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Nino and the 1998 La Nina years ; *J. of Climate*, vol., 2623 - 2639.
- Nzenti, J. P., 1987. Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun). Eléments pour un modèle géodynamique de la chaîne Pan-Africaine nord-équatoriale. Thèse de Doctorat, Univ. Nancy I, 147p.
- Nzenti, J. P., 1994. L'Adamaoua panafricain (région de Banyo, Cameroun). Une zone clé pour un modèle de la chaîne panafricaine au Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences, Dép. de Géologie, Dakar, 176p.
- Nzolang C., Kagami H., Nzenti J. P., Holtz F., 2003. Geochemistry and preliminary Sr-Nd isotopic data on the Neoproterozoic granitoids from the Bantoum area, west Cameroon: evidence for a derivation from a Paleoproterozoic to Archean crust. *Polar Geoscience*, National Institute of Polar Research, Tokyo, No. 16, 196-226
- Olivry J.-C., 1974. Les déficits hydropluviométriques au Cameroun pendant les années sèches 1972 et 1973, 71 p.
- Olivry J.-C., Chastanet M., 1986. Evolution du climat dans le bassin du Fleuve Sénégal (Bakel) Depuis le Milieu du 19ème Siècle. *Coll. Trav. Et Doc. N° 197, ORSTOM*, Paris, pp. 337-343.
- Olivry J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. *Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM, n° 9, 733 p.*
- Olivry J.C., 1987. Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la Basse-Casamence. In : *The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (Proc. of Vancouver Symposium, August 1987). IAHS publ. N° 168, 501-512.*
- Olivry J.C., 1993a. Evolution récente des régimes hydrologiques en Afrique intertropicale . In " *l'eau, la terre et les hommes, hommage à René Frécaut* ". Madeleine Griselin Ed. Presses Universitaires de Nancy. pp. 181 - 190.
- Olivry J.C., 1993b. De l'évolution de la puissance des crues des grands cours d'eau intertropicaux d'Afrique depuis deux décennies. *Actes des journées hydrologiques - Centenaire Maurice Pardé ; Grenoble, 22-24 sept.1993. Les dossiers de la revue de géographie alpine. N° 12 , 1994.*
- Olivry J.C., Bricquet J. P., Mahé G. - 1993 a- Les études du PEGI sur le bassin du Congo-Zaïre dans le contexte déficitaire des ressources en eau de l'Afrique humide. *Actes du colloque PEGI, INSU - CNRS - ORSTOM, P. 3-12. Paris.*

- Olivry J.C., Bricquet J.P., Mahé G., 1993 b. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ?. In : Gladwell J.S. (Ed.) : Hydrology of warm humid regions, 4ème Assemblée AISH, Yokohama, Japon, 13-15 Juillet 1993, publication AISH n°216, 67-78.
- Olivry J.C., Mahé G., Bricquet J.P., 1995. Les études du PEGI sur le bassin du Congo-Zaïre dans le contexte déficitaire des ressources en eau de l'Afrique humide. In : Olivry J.C. & Boulègue J. (Eds.) : Actes du Colloque PEGI Grands Bassins Fluviaux Péri-Atlantiques : Congo, Niger, Amazone, INSU, CNRS, ORSTOM, Paris, 3-12
- Olivry J.C., Chouret, A., Vuillaume, G., Lemoalle, J., Briquet, J. P., 1996. Hydrologie du lac Tchad. Col. Monographie Hydro. 12. édit. ORSTOM, Paris; 266 p.
- Olivry J. C., 1996. Quelques aspects des études régionales sur les étiages et les tarissements en Afrique intertropicale. 12ème Journées Hydrologiques - Montpellier, 10 et 11 octobre 1996.
- Olivry J.C., Mahé G., Bricquet J.P., 1998. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des deux dernières décennies. In : Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds) : Water Resources Variability in Africa during the XXth Century. Proceedings de la conférence Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, Pub. AISH no 252, 189-197.
- OMM/UNESCO, 1997. Evaluation des ressources en eau. Manuel pour l'évaluation des capacités nationales.
- OMM, 2001. Déclaration de l'OMM sur l'état du climat mondial en 2001 (OMM-N° 670)
- Orange D., Wesselink A., Mahé G., Feizouré C., 1997. The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. Proceedings of Rabat Symposium, 5th IAHS Assembly, Publ. 240, Sustainability of water resources under increasing uncertainty, 113-123. Osborn T. J., Hulme M., Jones P. D., Basnet T.A., 2000. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. International J. of Climatology, 20, 347-364.
- Ouarda T., Rasmusen P. F., Cantin J.F., Bobee B., Laurence R., Hoang V.D., Barabe G., 1999. Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec, Rev. Sci. Eau 12 (2), 425-448
- Ouedraogo M., Paturol J.E., Mahé G., Servat., Dezetter A., Conway D., 2001a. Influence de la nature et de l'origine des données sur la modélisation hydrologique de grands bassins versants en Afrique de l'Ouest. AISH Symp., Maastricht, July 2001.
- Ouedraogo M., 2001b. 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, 257 p.



- Quener A. P., 2002. Analysis of basin response resulting from climate change and mitigation measures. In : Regional Hydrology : Bridging the Gap between Research and Practice (Proceedings of the Fourth International FRIEND Conference held at Cape Town, South Africa, March 2002). IAHS Publ. N° 274, p.77-84
- Oyediran Ojo, 1987. Rainfall trends in West Africa, 1901-1985. In : The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (Proc. of Vancouver Symposium, August 1987). IAHS publ. N° 168,37-43.
- Oyebande L., 2001. Stream flow regime change and ecological response in the lake Chad basin in Nigeria. IN: Hydro-ecology; Linking Hydrology and Aquatic Ecology (ed. By M.C. Acreman (Proc. Birmingham Workshop, July 1999), 101-111. IASH Publ. No 266.
- Ozer P., Erpicum M., Demarée G., Vandiepenbeeck, 2003. The Sahelian drought may have ended during the 1990s. Hydrolo. Sci. J., 48(3), 489-492.
- Palmer T.N., 1986. Influence of the Atlantic, Pacific and Indian Oceans on Sahel Rainfall. Nature 320, 251-3.
- Parent E., Chaouche A., 1997. Détection de changement dans une série hydrométéorologique :détermination de la date d'installation de la mousson soudano-sahélienne. Proceedings of Rabat Symposium,5th IAHS Assembly, Publ. 240, Sustainability of water resources under increasing uncertainty, 347-354.
- Paturel, J.E., Servat, E., Vassiliadis, A., 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. Journal of Hydrology, 168, pp. 111-125.
- Paturel J. E., Servat E., Kouamé B., Boyer J. F., Lubès Niel H., Masson J. M., 1996. Procédures d'identification de " rupture " dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 99 - 110.
- Paturel, J.E., Servat, Kouame, B., Lubès, H.,Fritsch, J., Masson, J.M.,1997.Manifestations d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'ouest et centrale. In Substainability of water resources under increasing uncertainty (proc. Rabat symp., 21-30. IAHS Publ.n°240
- Paturel J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M., Masson J.M., 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea Part II : an integrated regional approach. Jour.of hydrology 191 (1997) 16-36
- Paturel J. E., Servat E., Kouamé B., Travaglio M., 1998. Variabilité des régimes pluviométriques et hydrologiques en cette fin de siècle en Afrique de l'ouest et centrale. In Sud Sc. et Techno. N° 2, Ouagadougou.
- Paturel J. E., Ouedraogo M., Servat E., Mahé G., Dezetter A., Boyer J. F., 2003. The concept of Rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability. Hydrol. Sci. Journ. 48 (1), 125-137.

- Penaye, J., Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., and Nzenti, J. P., 1993. U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaounde series, Cameroon : re-interpretation of the granulitic rocks as the suture of a collision in the "Centrafrican" belt. C.R. Acad. Sci. Paris, t.309, serie II, pp.315-318.
- Penman, H. L., 1956. Evaporation : An introduction survey. Netherlands J. Agri. Sci., Vol. 1, pp. 9-29.
- Petit M., 2001. L'humanité face à l'effet de serre additionnel qu'elle crée. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes 333 (2001) 775-786.
- Pettit A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. Applied statistics, 28, n°2, pp. 126-135
- Petrescu Maftai C., 2002. Etudes concernant les écoulements superficiels. Modélisation spatialisée de l'écoulement sur le bassin versant de Voinesti - Roumanie. Thèse de doctorat, Univ. Ovidis de Constanta et de Montpellier II, 182 p.
- Pilling C.G., Jones J.A.A., 2002. The impact of future climate change on seasonal discharge, hydrological processes and extreme flows in the Upper Wye experimental catchments, mid-Wales. Hydrol. Processes, 16, 1201-1213.
- Plag H.P., Tsimplis M.N., 1999. Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability. Global and Planetary Change, 20, 173-203
- Pouyaud B., 1986. Normes hydrologiques des réseaux de mesures hydrométriques et sécheresse. In Colloque Int. Sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. Ouagadougou, 20-24 mai 1986. CIEH Série Hydrol. 16 pp.
- Pouyaud B., 1987. Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques. In : The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (Proc. of Vancouver Symp., August 1987). IAHS publ. N° 168, 447 - 461.
- Pouyaud B., Colombani J., 1989. Les variations extrêmes du lac Tchad : l'assèchement est-il possible ? Ann. Géographie, Paris 98(545), 1-23.
- Rajagopalan B., Lall U., 1998. Interannual variability in western US precipitation. J. of Hydrology 210 (1998) 51-67.
- Redmond K.T., Koch R.W., 1991. Surface climate and streamflow variability in the western United States and their relationship to large-scale circulation indices. Water resources research, Vol. 27, n°9 2381-2399.
- 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 199 spring Conf., Boston, MA. May 31 -June 4, 1999.

- Robinson P. J., 1997. Climate change and hydropower generation. *Int. J. of Climatology*, Vol 17, (1997) 983-996.
- Rodier J., 1964. Régimes hydrologiques de l'Afrique Noire à l'Ouest du Congo. ORSTOM, Paris, 137 p.
- Rognon P. 1989. Biographie d'un Désert, Coll. Scientifique Synthèse, Plon, Paris.
- Rossel F., Le Goulven P., Cadier E., 1999. Répartition spatiale de l'influence de l'ENSO sur les précipitations annuelles en Equateur. *Rev. Sci. Eau* 12 (1), p. 183-200
- Roset J.-P., 1987. Néolithisation, Néolithique et Post-néolithique au Niger Oriental. Congrès INQUA, Ottawa, pp. 203-14.
- Rowell D.P., Blondin C., 1990. The influence of soil wetness distribution on short rang rainfall forecasting in the west African Sahel. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116, 1471-85.
- Royer J.-F., Cariolle D., Chauvin F., Dèque M., Douville H., Hu R.M., Planton S. et al. 2002. Simulation des changements climatiques au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle incluant l'ozone stratosphérique. *C.R. Geoscience* 334 (2002) 147-154.
- Schmidli J., Schmutz C., Frei C., Wanner H., Schär C., 2002. Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *Int. J. of Climatology* ; 22 1049-1074.
- Scholte, P., Kari, S., Moritz, M., 1997. Participation des pastoralistes nomades et transhumants à la réhabilitation et à la gestion de la plaine inondable du Logone, dans le Nord Cameroun. In IIED, programme des zones arides, Dossier n° 66, 24 p.
- Scholte, P., Kirda, P., Adam, S., Kadiri, B., 2000. Floodplain rehabilitation in North Cameroon : Impact on vegetation dynamics. *Appl. Veg. Sci.* 3, 33-42 pp
- Servain J., Wainer I., Dessier A., 1998. Evidence of a relationship between the two main interannual climatic variability over the tropical Atlantic. *C. R. Acad. Sci. Paris. Sciences de la terre et des planètes*, 327, 1-8.
- Servant-Vildary S., 1978. Etude des diatomées et paléolimnologie du bassin du Tchad au Cénozoïque Supérieur. Coll. Trav. Et Doc. N° 84, ORSTOM, Paris.
- Servat E., 1986. Présentation de trois modèles globaux conceptuels et déterministes : CREC 5, MODGLO et MODIBI. Centre ORSTOM de Montpellier, Novembre 1986
- Servat E., Dezetter A., 1988. SIMPLE et ROSEN : deux méthodes d'optimisations non linéaire. Théorie et pratique. ORSTOM Montpellier, notice OVNIh1.
- Servat, E., 1993. Evaluation régionale des ressources en eau : application à la Cote d'Ivoire. Rapport de synthèse du programme ERREAU. Antenne hydrol. ORSTOM Abidjan, 154 p.
- Servat E., 1994. ICCARE - Identification et Conséquences d'une variabilité du Climat en AfRIque de l'ouest non sahELienne - Présentation du programme. Rapport n° 1. ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire, 1994.

- Servat E., Sakho M. 1995. Instability of water resources and management of a planned water system in non-sahelian West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 40, 2, 217-230.
- Servat E., Paturel J. E., Brou Kouame, Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubès-Niel H., J.M. Fritsch, Masson J.M., Marieu B., 1998. Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds) : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Country*. Proceedings Conf. Abidjan'98, pub. AISH. n° 252, pp. 323-337.
- Servat E., Paturel J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., Marieu B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des sciences de l'eau*, vol. 12, n° 2, pp. 363-387.
- Sharma U.C., 2003. Impact of population growth and climate change on the quantity and quality of water resources in the northeast of India. In: *Water Resources Systems-Hydrological Risk, Management and Development*, (ed. By GüterBlöschl, Stewart F., Kumagai M., Musiak K., Rosbjerg D.) (Proc. Of Sapporo Sym. HS02b; IUGG2003, July. 2003), 349-357. IAHS Publ. N°28.1
- Shuttleworth, W.J., 1994. Evaporation. In *Handbook of Hydrology* (ed. by R. D. Maidment), Chapter 4, McGraw-Hill.
- Sigha-Nkamdjou L., 1994. Fonctionnement hydrochimique d'un écosystème forestier de l'Afrique Centrale : La Ngoko à Moloundou (sud-est du Cameroun). Th. Doc. Uni Paris XI (Orsay), Coll. TDM n°111, Ed. ORSTOM, Paris. 380 p.
- Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Nia P., Naah E., Carre P., Olivry J. C., 1997. Impacts des activités anthropiques sur les régimes hydrochimiques d'un écosystème forestier sud-camerounais : Le système Dja-Ngoko. *Actes des JNR*, Yaoundé, p. 263-272.
- Sigha Nkamdjou L., Sighomnou D., Lienou G., Ayissi G., Bedimo J. P., Naah E., 1998. Variabilité des régimes hydrologiques des cours d'eau de la bande méridionale du plateau sud-camerounais. In, Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds) : *Water Resources Variability in Africa during the XXth Country*. Proceedings Conf. Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, pub. AISH. n° 252, pp. 215 - 222.
- Sigha Nkamdjou L., Sighomnou D., Tanyileke G., Molinier M., Naah E., 1999. Hydrological variability of some equatorial rivers basins of Southern Cameroon - Central Africa. *Second Colloquium on Hydrology and Water Management in the Humid Tropics*, Panama..
- Sigha-Nkamdjou L., Sighomnou D., Liéno G., 2002. Vers une approche globale de la gestion de la ressource comme solution aux crises d'eau des dernières décennies au Cameroun. Proceedings de la 4ème Conf. Internationale FRIEND du PHI de l'UNESCO, Cape Town, IAHS Publ. n° 274, pp. 337-343.
- Sighomnou D., Desbordes M. , 1988. Recherche d'un modèle de pluie de projet adapté aux précipitations de la zone tropicale africaine ; Cas d'Adiopodoumé -Abidjan (Côte d'Ivoire) ; in, *Hydrologie Continentale*, n°2, pp 131-139

- Sighomnou D., Sigha Nkamdjou D., Ntonga J.-C., Naah E., 1990. Influence de la densité du réseau sur l'estimation de la pluie moyenne journalière ; un exemple au Cameroun ; in, *Hydrologie Continentale*, n°1, pp 53-60
- Sighomnou D., Sigha Nkamdjou L., Taniyeléké G., 1993. Les fortes pluies de la région du Mont Cameroun ; Cas d'Idenau ; in, *La Météorologie - 8<sup>e</sup> série* n°2, juin 1993, pp 41-47
- Sighomnou D., Naah E. 1997. Gestion des ressources en eau et développement durable. Un exemple dans la province de l'Extrême-nord de Cameroun. In *Friend'97- Regional Hydrology: Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management*; IAHS n° 246, p. 355-363
- Sighomnou D., Sigha Nkamdjou L., Molinier M., 1997. Perturbação no meio natural do Yaere no norte dos Camaroes : Mudancas climaticas ou acaoantropica ? XII Simposio Brasileiro de recursos hidricos. 16 - 20 nov. 1997 ; ANAIS 3 . pp 399 – 406
- Sighomnou, D, Sigha Nkamdjou, L., Molinier, M., 1999. Influence des prélèvements pour irrigation sur l'hydrosystème du Lac Tchad ; Exemple des aménagements hydro-agricoles de la SEMRY dans l'Extrême-nord Cameroun. Présenté à "Manaus'99" ; International Symposium on Hydrological and Geochemical Processes in Large Scale River Basin ; novembre 1999.
- Sighomnou D., Sigha Nkamdjou L., 1999. Pluie et assainissement ; Analyse des séquences de jours secs et pluvieux et des hauteurs de pluie de 1 à 30 jours consécutifs dans la ville de Douala, in *Géosciences au Cameroun Col. GEOCAM - 2/1999 - Presses Universitaire du Cameroun*.
- Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou, L., Lienou, G., 2002a. Fluctuation des ressources en eau et dynamique environnementale. Exemple de la plaine d'inondation du Logone - Nord Cameroun. Poster présenté à la 4<sup>ème</sup> Conférence Internationale de FRIEND, Cape Town, mars 2002.
- Sighomnou, D., Sigha Nkamdjou, L., Lienou, G., 2002b. La plaine du Yaéré dans le Nord-Cameroun. Une expérience de restauration des inondations. Gestion intégrée des ressources naturelles en zones Inondables. Coll. Colloques et séminaires, Edit. IRD Paris, pp. 375-384 ;
- Singh N., Sontakke N.A., 1999. On the variability and prediction of rainfall in the post-monsoon season over India. *Int. J. of Climatology* Vol. 19, 309-339.
- Sircoulon J., 1976. Les données hydropluviométrique de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses 1913 et 1940. *Cah. ORSTOM, sér. Hydr. XIII (2)*, 75, 174
- Sircoulon J., Olivry J.C., 1986. Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale (considération sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières. Sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse. Ouagadougou, 20 - 24 mai 1986. CIEH, Série hydrologie 20 pp.

- Sircoulon J., 1987. Variation des débits des cours d'eau et des niveau des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20ème siècle. In : The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources. (Proc. of Vancouver Symposium, August 1987). IAHS publ. N° 168, 13 - 25.
- Sircoulon J., 1990. Impact possible des changements climatiques à venir sur les ressources en eau des régions arides et semi-arides. WMO/TD n°380, 87 p.
- Sircoulon J., 1992. Caractéristiques des ressources en eau de surface, zone arides de l'Afrique de l'Ouest. Variabilité et évolution actuelle. In: l'Aridité une contrainte au développement. Didactique/ORSTOM Editions, 1992
- Sircoulon J., 1992. Caractéristiques des ressources en eau de surface en zones arides de l'Afrique de l'Ouest. Variabilité et évolution actuelle. In : Collection Didactique L'Aridité, Edit. ORSTOM, 1992, 53-68
- Smith, M., 1992. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. Report, Land and Water Development Division, UN FAO, Rome, Italy.
- Soba, D., 1989. La série du Lom : étude géologique et géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 198p.
- SOGREAH, 1976. Inventaire de sites de barrages dans les Mont Mandara - Données de base Carte 1/50.000 Hydrogéologie du périmètre Tsanaga.
- Sow C. S., 1996. Etude de la variabilité spatiale de la pluviométrie en région sahélienne, Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 67 - 75.
- Stahl K., Demuth S., 1999. Linking streamflow drought to the occurrence of atmospheric circulation patterns. Hydrological Sci. J., 44 (3) 467-482.
- Stangalie G., Catana S., Poiana I., Iordache A., Craciunescu V., 2003. Assessment of the impact of climate and ecosystem changes on drought conditions: case study from Romania. In: Water Resources Systems-Hydrological Risk, Management and Development, (Proc. Of Sapporo Sym. HS02b; IUGG2003, July. 2003) , 158-164. IAHS Publ. N°281.
- Street F. A., Grove A. T., 1979. Global map of lac level fluctuations since 30000 BP. Quaternary Res. 12, 83-118
- Street-Perrott, F.A., Harrison, S.P., 1985. Lake level and climate reconstitution. In, Paleoclimate Analysis and Modeling (ed. By D.A. Hecht) Wiley Interscience, New York, USA
- Suchel J.B., 1972. La répartition et les régimes pluviométriques au Cameroun. Travaux et documents de géographie tropicale n°5. CEGET-CNRS, Bordeaux, 283 p.
- Suchel J.B., 1987. Les climats du Cameroun. Thèse. Doc. d'Etat, Université de Bordeaux III. France, 1186 p.

- Sud Y.C., Abd Molod D.G., 1988. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface albedo anomalies on July circulation and rainfall. *Monthly Weather Rev.* 116, 2388-400.
- Sultan B., Servat E., Maley J., Mahé G., 2001. Interrelation entre les forêts tropicales et la variabilité climatique : une synthèse des études récentes. *Sécheresse*, Vol. 12 ; n°4, Dec. 2001: 221-229
- Sultan B., 2002. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Application à la sensibilité des rendements agricoles. Th. Doc. Univ. Paris 7 - Denis Diderot, 283 p.
- Sutcliffe J.Y., Knott D.G., 1987. Historical variation in African Water Resources. IASH Publ. No 168, pp. 463-75.
- Thresher R.E., 2002. Solar correlates of southern hemisphere mid-latitude climate variability. *Int. J. of Climatology* ; 22 901-915.
- Thornwaithe C.W., Mather J.R., 1995. The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8 (1), 1-104.
- Thom A.S., Oliver H.R., 1977. On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 193 : 345-357.
- Todorov, A.V., 1985. Sahel, the changing rainfall and the 'Normals' used for its assessment, *Journal of climate and Applied Meteorology*, 24; pp. 97-107.
- Toteu, S. F., 1990. Geochemical characterization of the main petrographic and structural units of northern Cameroon ; implication for the Pan-African evolution. *Journal of African Earth Sciences*, vol.10, n°4, pp.615-624.
- Tsalefac M., 1999. Variabilité climatique, crise économique et dynamique des milieux agraire sur les hautes terres de l'Ouest du Cameroun. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Yaoundé I, Cameroun, 564 p.
- Van Dam J.C., 1999. Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes; International Hydrology Series, UNESCO, Cambridge Univ. Press, 137p
- Variabilité climatique/ Interactions air-mer à l'échelle climatique,  
[http://biosphere.ec.gc.ca/bio/actu/doss/doss\\_00013\\_f.html](http://biosphere.ec.gc.ca/bio/actu/doss/doss_00013_f.html)
- Voirin-Morel S., 2003. Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour-Garonne. Th. Doct. Univ. Toulouse III (Paul Sabatier). 277 p
- Werner P.C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K., Oesterle H., 2000, Recent climate change in the north Atlantic/European sector. *Int. J. of Climatology* Vol. 20, 463-471

- Wesselink A. J., Orange D., Feizoure C. T., Randriamiarisoa, 1966. Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine). Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Pub. AISH, n°238, 179 - 194.
- WMO, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change. Third assessment report – Climate Change 2001, Synthesis report , 34 pp.
- Wooldridge S.A., Franks S.W., Kalma J.D., 2001. Hydrological implications of the Southern Oscillation : variability of the rainfall-runoff relationship, *Journal des Sciences Hydrologiques*, 46 (1), 73-88.
- Wotling G., Mahé G., L'Hôte Y. , Le Barbe L., 1995. Analyse par les vecteurs régionaux de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine. *Veille Climatique Satellitaire*, 52, 58-73.
- Yates, D.N., 1997. Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *Journal of Hydrology*, 201 : 289-310.
- Yu P.S., Yang T.C., Wu C.K., 2002. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. *J. of Hydrology* 260 (2002) 161-175
- Zwiers F., Cattle H., Peterson Th. C., Mokssit A. 2003. La détection des changements climatiques. *Bulletin OMM*, Vol. 52 N°3 ; Juil 2003 ; 267-273.



## **LISTE DES ABREVIATIONS, TABLEAUX ET FIGURES**

## **ABREVIATIONS ET SIGLES**

**ABN** : Autorité du Bassin du Niger

**AGRHYMET** : Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle

**AOGCM** : Atmosphere and Ocean coupled General Circulation Model

**ASECNA** : Agence pour la SECurité et la Navigation Aérienne

**BCEOM** : Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre-Mer

**BP** : Before Present

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France)

**CBLT** : Commission du Bassin du Lac Tchad

**CDC** : Cameroon Development Corporation

**CEMAGREF** : Centre du Machinisme du Génie Rural et des eaux et Forêts.

**CIEH** : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

**CLIVAR** : CLImate VARIability and predictability.

**CRH** : Centre de Recherches Hydrologiques du Cameroun.

**CRU** : Climatic Research Unit

**DMN** : Direction de la Météorologie Nationale du Cameroun.

**DREM** : Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie de Tchad.

**DSMW** : Digital Soil Map of the World

**ECHAM** : ECmwf forecasts model modified and extended in HAMBurg

**ECMWF** : European Centre for Medium range Weather Forecasts

**EM** : Équateur Météorologique

**ENSO** : El Niño Southern Oscillation

**ETP** : ÉvapoTranspiration Potentielle

**FAO** : Food and Agriculture Organization

**FIT** : Front InterTropical

**FRIEND-AOC**: Flow Regimes from International and Experimental Network Data –Afrique de l'Ouest et Centrale

**GCM/MCG** : General Circulation Model / Modèle de Circulation Générale

**GES** :Gaz à effet de serre

**GIEC/IPCC** :Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

**GR2M** : modèle "Génie Rural, 2 paramètres, Mensuel"

**HadCM2** : "Hadley Centre Model version 2"

**HadCM3** : "Hadley Centre Model version 3"

**ICCARE** : Identification et Conséquences d'une variabilité Climatique en AfRique de l'Ouest et Centrale non sahélienne

**IPCC/GIEC** : Intergovernmental Panel on Climate Change

**IRAD** : Institut de Recherches Agronomiques du Cameroun.

**IRD** : Institut de Recherche pour le Développement (ex-ORSTOM)

**IRGM** : Institut de Recherches Géologiques et Minières du Cameroun.

**MVR** : Méthode du Vecteur Régional

**NCAR** : National Center for Atmospheric Research

**NCEP** : National Center for Environmental Prediction

**NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration

**NOAA-EPA** : National Oceanic and Atmospheric Administration – Environment Protection Agency.

**OMM / WMO** : Organisation Météorologique Mondiale/World Meteorological Organization

**ORSTOM** : Office de Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer.

**PHI** : Programme Hydrologique International de l'UNESCO

**PIB** : Produit Intérieur Brut

**PNB** : Produit National Brut.

**PNUE** : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

**RSSS /SRES** : Rapport Spécial sur les Scénarios d'émission / Special Report on Emission Scenarios

**SIG** : Système d'Information Géographique.

**SOGREAH** : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques

**SST / TSM / TSO** : Sea Surface Temperature / Température de Surface Marine / Température de Surface Océanique

**UNESCO** : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

**WBM** : Water Balance Model

**WHC** : Water Holding Capacity

**ZCIT** : Zone de Convergence InterTropicale

## LISTE DES TABLEAUX

### Chapitre 1

<b>Tableau 1.1:</b> Précipitations moyennes (mm/an) sur les principaux bassins versants de l'Afrique tropicale et équatoriale (Olivry et al. 1993) .....	27
<b>Tableau 1.2 :</b> Déficits pluviométriques moyens observés par rapport à la date de rupture (Servat et al., 1999) .....	30
<b>Tableau 1.3 :</b> Valeurs de déficits des débits moyens annuels calculés à certaines stations hydrométriques de part et d'autre de la date de rupture (Servat et al., 1998) .....	37
<b>Tableau 1.4 :</b> Recent studies into trends in river flows ; (IPCC, 2001) .....	39

### Chapitre 2

Tableau 2.1a : Paramètres climatiques remarquables à quelques stations .....	70
<b>Tableau 2.1b :</b> Paramètres climatiques remarquables à quelques stations (suite) .....	71
<b>Tableau 2.2 :</b> Caractéristiques hydrologiques des principales régions du Cameroun .....	84
<b>Tableau 2.3 :</b> Ressources en eau contrôlées du Cameroun .....	85

### Chapitre 3

<b>Tableau 3.1 :</b> Postes suivis de température étudiés et leur période d'observation .....	92
<b>Tableau 3.2 :</b> Nom et période d'observation des stations pluviométriques étudiées .....	96
<b>Tableau 3.3 :</b> Caractéristiques et période d'observation des stations hydrométriques étudiées .....	100
<b>Tableau 3.4 :</b> Variation des caractéristiques moyennes annuelles de la température au Cameroun .....	108
Tableau 3.5 : Variation moyenne des caractéristiques moyennes annuelles de la température suivant différentes régions du Cameroun .....	109
<b>Tableau 3.6 :</b> Variation moyenne observée par rapport à la période de rupture sur le cumul des pluies annuelles aux différentes stations .....	120
<b>Tableau 3.7 :</b> Résultat du test de Pettit et variation du nombre moyen annuel de jours de pluie pour quelques postes pluviométriques du Cameroun .....	131

<b>Tableau 3.8 :</b> Evolution des indices des jours de fortes pluies calculés par rapport à la période 1950-1990 .....	<b>133</b>
<b>Tableau 3.9 :</b> Résultats du test de Pettit et calcul de la variation des modules des différents cours d'eau .....	<b>137</b>
<b>Tableau 3.10 :</b> Variation relative du module des différents cours d'eau de la période 1971-1990 par rapport à la période 1941-1970 .....	<b>138</b>
<b>Tableau 3.11 :</b> Résultats du test de Pettit appliqué aux débits caractéristiques et calcul des variations .....	<b>141</b>
<b>Tableau 3.12 :</b> Variation relative des débits caractéristiques des différents cours d'eau de la période 1971-1990 par rapport à la période 1950-1970 .....	<b>143</b>
 <b><u>Chapitre 4</u></b>	
<b>Tableau 4.1 :</b> Hauteurs de précipitations annuelles (mm) de diverses récurrences à quelques postes répartis dans les différentes régions du pays .....	<b>159</b>
<b>Tableau 4.2 :</b> Débits moyens annuels (m <sup>3</sup> /s) de diverses récurrences par rapport aux périodes d'observation 1950-1990 et 1971-1990, à quelques stations de différentes régions du Cameroun .....	<b>164</b>
<b>Tableau 4.3 :</b> Débits maximums annuels (m <sup>3</sup> /s) de diverses récurrences par rapport aux périodes d'observation 1950-1990 et 1971-1990, à quelques stations de différentes régions du Cameroun .....	<b>168</b>
<b>Tableau 4.4 :</b> Débits minimums annuels (m <sup>3</sup> /s) de diverses récurrences par rapport aux périodes d'observation 1950-1990 et 1971-1990 à quelques stations de différentes régions du Cameroun .....	<b>169</b>
 <b><u>Chapitre 5</u></b>	
<b>Tableau 5.1 :</b> Volumes (km <sup>3</sup> ) précipités moyens par décennie .....	<b>178</b>
<b>Tableau 5.2:</b> Volumes (km <sup>3</sup> ) précipités moyens par périodes de 30 ans .....	<b>180</b>
<b>Tableau 5.3 :</b> Volumes écoulés moyens interannuels (km <sup>3</sup> ) à quelques stations jaugées du Cameroun Périodes 1941-1970 et 1971-1990 .....	<b>181</b>
<b>Tableau 5.4 :</b> Présentation des modèles utilisées .....	<b>187</b>
<b>Tableau 5.5 :</b> Paramètres $\alpha$ , $\epsilon$ et $S_{max}$ en fonction du Schéma de classification de Holdridge (Yates, 1997) .....	<b>190</b>
<b>Tableau 5.6 :</b> Caractéristiques des bassins versants testés .....	<b>191</b>
<b>Tableau 5.7 :</b> Classification des sols selon leur capacité en eau selon la FAO .....	<b>196</b>

<b>Tableau 5.8 :</b> Résultats Calage et Validation des 2 Modèles .....	<b>199</b>
<b>Tableau 5.9:</b> Meilleurs résultats obtenus avec le modèle de Yates .....	<b>199</b>
<b>Tableau 5.10 :</b> Meilleures combinaisons de données par bassin et valeur de Nash en période de validation .....	<b>200</b>
<b>Tableau 5.11 :</b> Pluies moyennes interannuelles (mm) des bassins déterminées par différentes méthodes .....	<b>204</b>
<b>Tableau 5.12 :</b> ETP moyennes interannuelles (mm) des bassins par différentes méthodes de calcul .....	<b>206</b>
<b>Tableau 5.13 :</b> Différentes valeurs moyennes de la capacité de rétention en eau (mm) des sols des bassins .....	<b>208</b>
<b>Tableau 5.14 :</b> Modèles de Circulation Générale Couplés Atmosphère-Océans de IPCC, 2001 .....	<b>213</b>
<b>Tableau 5.15 :</b> Effets des changements climatiques sur les ressources en eau, en l'absence de mesure d'intervention climatiques (IPCC, 2001) .....	<b>216</b>
<b>Tableau 5.16 :</b> Variation (%) de la pluie moyenne annuelle par période par rapport à la période 1971-2000 .....	<b>226</b>
<b>Tableau 5.17 :</b> Variation (%) de l'ETP moyenne annuelle par période par rapport à la période 1971-2000 .....	<b>231</b>
<b>Tableau 5.18 :</b> Variation (%) du débit moyen annuel par période par rapport à la période 1971-1990 .....	<b>234</b>
<b>Tableau 5.19 :</b> Variations (%) attendue en 2050 et 2100 pour les précipitations, l'ETP et les écoulements, sur les bassins testés, par rapport à la période référence 1961-1990. ..	<b>235</b>
<b>Tableau 5.20 :</b> Critères de Nash et coefficient de corrélation mensuelle .....	<b>240</b>
<b>Tableau 5.21:</b> Différence (%) entre les débits maximums mensuels décennaux déterminés à partir des observations et ceux calculés à l'aide des pluies observées d'une part et des pluies déduites du scénario Anomalie d'autre part. ....	<b>241</b>

## LISTE DES FIGURES

### Chapitre 1

<b>Figure 1.1a</b> : Schéma de circulation générale type PALMEN pour l'ensemble du globe, pendant l'hiver austral. (Dhonneur, 1978).....	20
<b>Figure 1.1b</b> : Principaux courants océaniques. (Dhonneur, 1978). ....	20
<b>Figure 1.2</b> : Variations de la composition chimique de l'air sous l'influence des émissions dues aux activités humaines. (Duplessy, 2001) .....	23
<b>Figure 1.3</b> : Evolution de la température moyenne de l'air depuis 1856 par rapport à la moyenne de la période 1961-1990 (Duplessy, 2001). ....	24
<b>Figure 1.4</b> : Indices pluviométriques interannuels des hauteurs de pluies annuelles par rapport à la période 1901-1990 ; (Nicholson, 1998). ....	27
<b>Figure 1.5</b> : Synthèse des principales discontinuités pluviométriques rencontrées dans sept régions africaines sur la période 1951- 1988. (Bigot <i>et al.</i> , 1998) .....	30
<b>Figure 1.6</b> : Positions extrêmes du FIT en Afrique .....	34
<b>Figure 1.7</b> : Variation de l'hydraulicité depuis 1950 pour l'Afrique sèche (Chari, Niger et Sénégal) et l'Afrique humide (Oubangui et Sangha), (Bricquet <i>et al.</i> , 1997) .....	37
<b>Figure 1.8</b> : Relations entre le cumul des pluies annuelles et les effectifs des petits ruminants jeunes (âge inférieur à 12 mois) en Tunisie méridionale (Le Houérou, 1962) .....	43

### Chapitre 2

Figure 2.1 : Le Cameroun en Afrique, ses relations avec les grands bassins du continent (Olivry, 1986) .....	52
<b>Figure 2.2</b> : Coupe géomorphologique schématique du Cameroun suivant un axe SSW-NNE (Olivry, 1986) .....	53
Figure 2.3 : Esquisse géologique du Cameroun d'après Nzolang (2003), montrant les formations de la chaîne panafricaine, avec le Complexe du Ntem (Craton du Congo) à sa limite sud et la couverture phanérozoïque tchadienne dans le Nord .....	56
<b>Figure 2.4</b> : Schéma phytogéographique du Cameroun (Olivry, 1986) .....	60
<b>Figure 2.5</b> : Schéma simplifié des zones de temps pour différentes saisons au Cameroun (Olivry, 1986) .....	62
<b>Figure 2.6</b> : Régions climatiques du Cameroun (Banque mondiale, 1992) .....	65

Figure 2.7 : Températures moyennes annuelles au Cameroun à partir des données non homogénéisées de la période 1955-2002 .....	68
<b>Figure 2.8 :</b> Evaporation Piche, Humidité relative et Températures moyennes mensuelles des différentes régions climatiques du Cameroun .....	72
<b>Figure : 2.9 :</b> Esquisse des isohyètes interannuelles du Cameroun à partir des données non homogénéisées de la période 1940-2001 .....	74
<b>Figure 2.10 :</b> Histogrammes caractéristiques des précipitations des différentes régions climatiques du Cameroun .....	75
<b>Figure 2.11 :</b> Le réseau hydrométrique camerounais de la décennie 1980 (Olivry, 1986) .	80
<b>Figure 2.12 :</b> Débits moyens mensuels caractéristiques des différentes régions climatiques du Cameroun .....	82
 <b><u>Chapitre 3</u></b>	
Figure 3.1 : Postes de mesure de température utilisés dans l'étude .....	91
<b>Figure 3.2 :</b> Répartition des postes pluviométriques étudiés .....	95
<b>Figure 3.3 :</b> Répartition des stations hydrométriques étudiées .....	101
<b>Figure 3.4 :</b> <i>Variation des Températures Moyennes annuelles au Cameroun par rapport à la Normale 1961-1990</i> .....	106
<b>Figure 3.5:</b> Variation des températures minimales et maximales moyennes annuelles au Cameroun par rapport à la normale 1961-1990 .....	107
<b>Figure 3.6:</b> Variation de l'amplitude thermique annuelle moyenne au Cameroun par rapport à la normale 1961-1990 .....	108
<b>Figure 3.7 :</b> Variation moyenne des caractéristiques moyennes annuelles de la température suivant les régions du Cameroun .....	111
<b>Figure 3.8 :</b> Variation relative entre la normale 1961-1990 des caractéristiques moyennes annuelles de la température et les moyennes de la période 1991-2002 au Cameroun .....	112
<b>Figure 3.9 :</b> Evolution des indices de la pluviosité annuelle par rapport à la moyenne interannuelle de la période 1940-2000 au niveau de quelques stations de référence au Cameroun .....	115
<b>Figure 3.10 :</b> Evolution de la proportion des postes d'observation pluviométriques Déficitaires par rapport à la moyenne de la période 1941-2000 .....	116



Figure : 3.11 : Variation relative entre la pluie moyenne interannuelle de la période 1940-2000 et les pluies moyennes interannuelles par décennie .....	118
<b>Figure 3.12</b> : Période de rupture des séries de hauteur de précipitations annuelles .....	119
<b>Figure 3.13</b> : Variation relative des précipitations moyennes annuelles de la période 1971-2000 par rapport à celles de la période 1941-1970. ....	122
<b>Figure 3.14</b> : Evolution des indices pluviométriques par décennies depuis la fin du 19 <sup>ème</sup> siècle au niveau de quelques stations pluviométriques du Cameroun et de l’Afrique tropicale.....	123
<b>Figure 3.15</b> : Variation relative des précipitations du mois de juillet de la période 1971-2000 par rapport à la période 1941-1970 .....	127
<b>Figure : 3.16</b> : Variation relative des précipitations du mois d’août de la période 1971-2000 par rapport à la période 1941-1970 .....	127
Figure 3.17 : Histogrammes des différentes régions du Cameroun Période 1941-1970 et 1971-2000 .....	129
Figure 3.18 : Variation relative du nombre moyen annuel de jours de pluie de la période 1971-2000 par rapport à la période 1950-1970 .....	132
<b>Figure 3.19</b> : Evolution des indices du débit moyen annuel par rapport à la moyenne interannuelle de la période 1950-1990 au niveau de quelques stations du Cameroun .....	135
<b>Figure 3.20</b> : Evolution des écoulements par décennie au courant du XX <sup>ème</sup> siècle au niveau de quelques stations hydrométriques du Cameroun et de l’Afrique tropicale. ....	139
 <b><u>Chapitre 4</u></b>	
Figure 4.1 : Normales pluviométriques 1941-1970, 1951-1980, 1961-1990 et 1971-2000 .....	152
Figure 4.2 : Variation relative entre la normale des précipitations annuelles 1951-1980, les normales 1941-1970, 1961-1990, 1971-2000 et la moyenne 1941-2000 .....	154
<b>Figure 4.3</b> : Variation relative entre la moyenne des précipitations de la période 1941-2000 et les normales 1941-1970, 1951-1980 , 1961-1990 et 1971-2000 .....	156
<b>Figure 4.4</b> : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour les récurrences humides à quelques stations représentatives des différentes régions du Cameroun. ....	160
<b>Figure 4.5</b> : Pluies annuelles en fonction des périodes de retour pour les récurrences sèches à quelques stations représentatives des différentes régions du Cameroun. ....	161
<b>Figure 4.6</b> : Débits annuels en fonction des périodes de retour pour les récurrences humides à quelques stations hydrométriques dans différentes régions du Cameroun. ....	165

<b>Figure 4.7 :</b> Débits annuels en fonction des périodes de retour pour les récurrences sèches à quelques stations hydrométriques dans différentes régions du Cameroun. ....	<b>166</b>
<b>Figure 4.8 :</b> Débits moyens maximums annuels en fonction des périodes de retour à quelques stations de différentes régions du Cameroun, pour les récurrences humides et sèches .....	<b>170</b>
<b>Figure 4.9 :</b> Débits moyens minimums annuels en fonction des périodes de retour à quelques stations de différentes régions du Cameroun, pour les récurrences humides et sèches .....	<b>171</b>

## **Chapitre 5**

<b>Figure 5.1 :</b> Evolution des apports météoriques au Cameroun de 1940 à l’an 2000 .....	<b>179</b>
<b>Figure 5.2 :</b> Schéma de fonctionnement des modèles .....	<b>185</b>
<b>Figure 5.3 :</b> Présentation des 5 bassins versants testés .....	<b>192</b>
<b>Figure 5.4 :</b> Cartes capacité en eau des sols des 5 bassins versants pour les valeurs maximales, minimales, et moyennes, suivant les données de la FAO. ....	<b>197</b>
<b>Figure 5.5 :</b> Hydrogrammes observés et calculés sur la période de validation du modèle GR2M sur quelques bassins versants .....	<b>202</b>
<b>Figure 5.6 :</b> Comparaison de la performance des modèles : exemple de la Bénoué à Garoua et de la Sanaga à Edéa .....	<b>203</b>
<b>Figure 5.7 :</b> Comparaison des critères de Nash de GR2M obtenus avec différentes grilles de pluie .....	<b>205</b>
<b>Figure 5.8 :</b> Comparaison des critères de Nash de GR2M obtenus avec différentes valeurs d’ETP .....	<b>207</b>
<b>Figure 5.9 :</b> Comparaison des critères de Nash obtenus pour différentes grilles WHC .....	<b>209</b>
<b>Figure 5.10 :</b> Analyse de la concordance entre les modèles en ce qui concerne la variation des précipitations régionales. (IPCC, 2001) .....	<b>217</b>
<b>Figure 5.11 :</b> Variation du ruissellement moyen annuel d’ici l’an 2050 (IPCC, 2001). ....	<b>218</b>
<b>Figure 5.12 :</b> Evolution des précipitations moyennes annuelles sur les 5 bassins versants testés, selon les scénarios Anomalies et Horizons en regard des pluies observées .....	<b>224</b>
<b>Figure 5.13 :</b> Evolution des précipitations moyennes annuelles et interannuelles sur quelques bassins versants .....	<b>225</b>
<b>Figure 5.14 :</b> Evolution de l’ETP moyenne annuelle selon les scénarios Anomalies et Horizons, sur les 5 bassins versants testés, en regard de l’ETP calculée par la méthode de Penman pour la période actuelle .....	<b>228</b>

<b>Figure 5.15</b> : Evolution de l'évapotranspiration moyenne annuelle et interannuelle sur quelques bassins versants .....	<b>229</b>
<b>Figure 5.16</b> : Evolution des débits moyens annuels des 5 cours d'eau testés suivant les scénarios Anomalies et Horizons en regard des débits observés .....	<b>231</b>
<b>Figure 5.17</b> : Evolution du débit moyen annuel et interannuel sur quelques cours d'eau .....	<b>233</b>
<b>Figure 5.18a</b> : Normales des paramètres du bilan hydrologique annuel des bassins testés, pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 selon le scénario Anomalies, en regard de celles de 1961-1990/de la moyenne 1950-1970 pour la Sanaga .....	<b>236</b>
<b>Figure 5.18b</b> : Normales des paramètres du bilan hydrologique annuel des bassins testés, Pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 selon le scénario Horizons, en regard de Celles de 1961-1990/et de la moyenne 1950-1970 pour la Sanaga .....	<b>237</b>
Figure 5.19 : Pluies moyennes annuelles et interannuelles sur les bassins Nyong à Dehane et celui du Mayo Kébi à Cossi ; le scénario Anomalie est comparé au climat actuel .....	<b>239</b>
<b>Figure 5.20</b> : Hydrogrammes observés et reconstitués avec le modèle GR2M sur quelques bassins Les débits reconstitués à partir des précipitations du scénario climatique (période actuelle) sont comparés à ceux reconstitués à partir des pluies observées .....	<b>243</b>



**Daniel SIGHOMNOU est né à Baham, près de Bafoussam au Cameroun en 1955. Après des études de géologie à l'Université de Yaoundé, il est recruté à l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) où il débute une carrière de chercheur en hydrologie en 1980, tout en poursuivant des études dans les universités françaises de Paris VI et de Montpellier. Nommé Adjoint au Chef du Centre de Recherches Hydrologiques du Cameroun en 1993 puis Chef du Centre en 2004, il quitte l'IRGM en 2005 au grade de Maître de recherche, pour rejoindre l'Autorité du Bassin du Niger à Niamey au Niger, où travaille comme Expert Consultant en hydrologie. Il y assure à ce titre, la supervision scientifique et technique des activités relatives à la connaissance et la gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Niger. Il est enseignant associé de plusieurs écoles et universités africaines et auteur de nombreuses publications scientifiques en hydrologie.**