

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

**PAR
DAVID BROUSSEAU**

**CLASSIFICATION ET CARACTÉRISATION DES RÉGIMES
HYDROLOGIQUES SAISONNIERS DE L'AFRIQUE AU MOYEN DE
L'ANALYSE STATISTIQUE MULTIVARIÉE**

Juin 2007

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

J'aimerais personnellement remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de mon projet de maîtrise en Sciences de l'Environnement. Je tiens tout d'abord à remercier grandement mon directeur de recherche, M. Ali Arkamose ASSANI, pour la l'appuie et la supervision constante qu'il m'a alloués tout au long de ces deux années de maîtrise. Je tiens aussi à remercier ma famille qui a toujours cru en moi et qui m'a appuyé sans broncher, même dans les moments les plus difficiles. Aussi, de façon plus technique, j'aimerais remercier la GRDC (Global Runoff Data Center) pour les bases de données hydrologiques sur les rivières en Afrique qu'elle m'a fournie. Sans ces données hydrologiques, aucune analyse statistique n'aurait pu avoir lieu étant donné la distance qui nous sépare du continent africain. Enfin, mes derniers remerciements s'adressent aux deux évaluateurs de mon comité d'évaluation, soit M. Stéphane Campeau et M. Mamhed Mesfioui qui ont accepté d'évaluer ce travail.

RÉSUMÉ

La classification et la caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers de l'Afrique sont fondées exclusivement sur les critères qualitatifs. Ceux-ci présentent plusieurs faiblesses soulignées par plusieurs auteurs. Pour pallier ces faiblesses, nous proposons une nouvelle méthode de classification basée sur les critères quantitatifs en appliquant le concept de « régimes des débits naturels ». Ce concept nous a permis de définir 13 variables hydrologiques. Celles-ci ont été soumises à l'analyse statistique multivariée (analyse en composantes principales, analyse de variance à un seul critère de classification et l'analyse de la classification hiérarchique ascendante). Ces différentes méthodes ont permis de regrouper les 212 stations analysées en six régimes hydrologiques saisonniers en Afrique. Les trois premiers régimes sont caractérisés par un écoulement permanent et se différencient principalement par le caractère pondéré des régimes, défini au moyen du coefficient de variation des débits mensuels à l'échelle annuelle. Ces trois régimes se rencontrent dans les régions équatoriales et tropicales humides. Les trois derniers régimes sont caractérisés par un écoulement temporaire et se différencient par le nombre de mois sans écoulement, les débits hivernaux et estivaux notamment. Ces trois régimes caractérisent les climats tropicaux secs et arides. L'analyse des corrélations entre les variables hydrologiques, sélectionnées par la méthode de l'analyse en composantes principales, et la latitude a révélé que dans les deux hémisphères, ce facteur est significativement corrélé aux coefficients de variation des débits mensuels (corrélation positive) et au rapport entre les débits printaniers et les débits estivaux (corrélation négative). Quant à la longitude, dans l'hémisphère nord, elle est significativement corrélée à plusieurs variables hydrologiques notamment aux débits hivernaux. L'intérêt de cette étude réside dans le fait qu'elle fournit pour la première des indices hydrologiques quantitatifs qui permettront de suivre les changements naturels et/ou anthropiques qui affectent les régimes hydrologiques en Afrique.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|-----------|
| REMERCIEMENTS | I |
| RÉSUMÉ | II |
| TABLE DES MATIÈRES | III |
| LISTE DES TABLEAUX | V |
| LISTE DES FIGURES | VI |
| CHAPITRE I | 1 |
| Contexte, problématique, objectifs et hypothèses du travail | 1 |
| 1.1. Historique de la régionalisation des régimes hydrologiques saisonniers des rivières... | 1 |
| 1.1.1. La période avant 1970 : Travaux pionniers de la régionalisation | 1 |
| 1.1.2. La période entre 1970 et 1990 : Essor de la régionalisation des régimes hydrologiques | 2 |
| 1.1.3. La période après 1990 : Évolution méthodologique | 4 |
| 1.1.4. Utilité de la régionalisation des régimes hydrologiques saisonniers | 4 |
| 1.2. Problématique, objectifs et hypothèses de la recherche | 5 |
| 1.3 Présentation de l'Afrique | 7 |
| 1.3.1. Le relief..... | 7 |
| 1.3.1.1. L'Afrique occidentale et centrale : surfaces plates et monotones | 8 |
| 1.3.1.2. L'Afrique orientale : hautes et profondes dépressions..... | 10 |
| 1.3.1.3 L'Afrique australe : un plateau intérieur et des escarpes bordières | 11 |
| 1.3.2. Le climat | 11 |
| 1.3.2.1. Les centres d'action et les facteurs du climat..... | 11 |
| 1.3.2.2. La circulation atmosphérique générale en Afrique | 12 |
| 1.3.2.3. La Température..... | 13 |
| 1.3.2.4. Les précipitations | 15 |
| 1.3.2.5. Les principales zones climatiques..... | 17 |
| 1.3.2.5.1. Le climat équatorial | 17 |
| 1.3.2.5.2. Les climats tropicaux humides..... | 18 |
| 1.3.2.5.3. Les climats tropicaux secs et semi-arides | 18 |
| 1.3.2.5.4. Le climat tropical maritime..... | 19 |
| 1.3.2.5.5. Le climat désertique | 19 |
| 1.3.2.5.6. Le climat méditerranéen..... | 19 |
| 1.3.3. Hydrographie | 19 |
| 1.3.3.1. Les fleuves | 20 |
| 1.3.3.2. Les lacs | 22 |
| CHAPITRE II | 24 |
| Méthodologie | 24 |
| 2.1. Source de données hydrologiques..... | 24 |
| 2.2. Analyse statistique des données | 25 |
| 2.2.1. Choix de la méthode d'analyse statistique de données pour classifier et caractériser les régimes hydrologiques | 25 |
| 2.2.1.1. Définition des caractéristiques des débits et des variables hydrologiques..... | 26 |
| 2.2.2. Choix des variables hydrologiques pour déterminer l'influence de la latitude et de la longitude | 32 |
| 2.2.3. Méthode de classification des régimes hydrologiques saisonniers | 33 |
| CHAPITRE III..... | 34 |
| Résultats, Discussion et Conclusions | 34 |
| 3.1. Résultats d'analyse en composantes principales | 34 |

| | |
|---|----|
| 3.2. Les régimes hydrologiques saisonniers en Afrique | 40 |
| 3.2.1. Classification..... | 40 |
| 3.3. Caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers | 41 |
| 3.4. Description des régimes hydrologiques saisonniers | 45 |
| 3.4.1. Les régimes hydrologiques saisonniers permanents | 45 |
| 3.4.2. Les régimes hydrologiques saisonniers temporaires..... | 50 |
| 3.5. Discussion et conclusion | 55 |
| BIBLIOGRAPHIE | 61 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| 1.1. Principes de classification des régimes hydrologiques scandinaves (tiré de Krasovskaia et al., 1994)..... | 3 |
| 1.2.a. Nombre de bassins internationaux par continent et % du territoire couvert (World Facts and Figures, 1989)..... | 21 |
| 1.2.b. Les principaux fleuves de l'Afrique (World Facts and Figures, 1989)..... | 22 |
| 2.1. Caractéristiques des débits (Richter et al., 1996)..... | 30 |
| 2.2. Variables hydrologiques utilisées pour caractériser les régimes hydrologiques naturels (Richter et al., 1996)..... | 31 |
| 3.1. Valeurs de saturation des variables sur les quatre composantes principales significatives..... | 35 |
| 3.2. Coefficients de corrélation calculés entre les variables hydrologiques associées aux composantes principales, la latitude et la longitude (Hémisphère Nord)..... | 36 |
| 3.3. Classification et caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers en Afrique..... | 42 |
| 3.4. Comparaison des valeurs moyennes des variables hydrologiques de six régimes hydrologiques saisonniers en Afrique. Résultat de l'analyse de variance à un seul critère de classification..... | 43 |
| 3.5. Comparaison par paire des moyennes des valeurs de coefficients de variation entre les régimes hydrologiques. Valeurs de p obtenues avec le test de Tukey..... | 44 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| 1.1. Le relief de l'Afrique (USGS, www.usgs.gov)..... | 9 |
| 1.2. Circulation générale atmosphérique janvier (a) et en juillet (b) (Leroux, 1996)..... | 13 |
| 1.3.a. La répartition spatiale de la température moyenne annuelle en Afrique (USGS, www.usgs.gov)..... | 14 |
| 1.3.b. Répartition des précipitations annuelles moyennes en Afrique (USGS, www.usgs.gov)..... | 16 |
| 1.4. Les principaux climats de l'Afrique (www.reynier.com)..... | 17 |
| 1.5. Le réseau hydrographique de l'Afrique (USGS, www.usgs.gov)..... | 20 |
| 2.1. Localisation des stations pluviométriques analysées (GRDC, www.bafg.de/grdc.htm)..... | 25 |
| 3.1. Relation entre la latitude des stations et les variables hydrologiques corrélées à la première composante principale. HN : hémisphère nord; HS : hémisphère sud (AJ/JS)..... | 38 |
| 3.2. Relation entre la latitude des stations et les variables hydrologiques corrélées à la première composante principale. HN : hémisphère nord; HS : hémisphère sud (CV)..... | 39 |
| 3.3. Dendogramme résultant de la méthode hiérarchique de Ward..... | 41 |
| 3.4. Distribution spatiale des stations appartenant aux trois régimes hydrologiques permanents..... | 46 |
| 3.5. Exemple d'hydrogramme mensuel d'une station du régime de type I..... | 47 |
| 3.6. Exemple d'hydrogrammes mensuels des stations du régime de type II..... | 48 |
| 3.7. Exemple d'hydrogrammes mensuels des stations du régime de type III..... | 49 |
| 3.8. Exemple d'hydrogrammes mensuels des stations du régime de type IV..... | 51 |
| 3.9. Exemple d'hydrogrammes mensuels des stations du régime de type V..... | 52 |
| 3.10. Exemple d'hydrogrammes mensuels des stations du régime de type VI.... | 53 |
| 3.11. Distribution spatiale des stations appartenant aux trois régimes hydrologiques temporaires..... | 54 |

CHAPITRE I

Contexte, problématique, objectifs et hypothèses du travail

1.1. Historique de la régionalisation des régimes hydrologiques saisonniers des rivières

On peut distinguer trois grandes périodes dans la régionalisation des régimes hydrologiques saisonniers des rivières :

- La période avant 1970
- La période entre 1970-1990
- La période après 1990

1.1.1. La période avant 1970 : Travaux pionniers de la régionalisation

Cette période est marquée par la publication des travaux pionniers en régionalisation des régimes hydrologiques saisonniers des rivières naturelles. Selon Hisdal (2000), la première classification a été publiée par le soviétique Lvovich en 1938. Mais cette publication est restée méconnue par la communauté scientifique. Il faut attendre alors en 1955, la publication du géographe français Pardé qui fut popularisée dans le monde francophone. En effet, cet auteur proposa une première classification basée sur deux critères qualitatifs, déjà utilisés par Lvovich selon Hisdal (2000) : la source d'alimentation et la variabilité intra-annuelle des débits. Sur la base de ces deux critères, Pardé proposa trois principaux types de régimes hydrologiques :

- Le régime simple caractérisé par un seul mode d'alimentation ainsi que par un seul maximum et minimum des débits par an. Il traduit l'existence de deux saisons hydrologiques distinctes.

- Le régime mixte caractérisé par plusieurs modes d'alimentation ainsi que par deux maxima et minima par an. Il traduit l'existence de plus de deux saisons hydrologiques au cours d'une année.
- Le régime complexe caractérisé par plus de deux modes d'alimentation et plus des extremas.

Cette classification ne tient compte que des débits mensuels et d'une seule caractéristique. Sa finalité est de pouvoir déterminer l'ensemble des conditions qui conduisent à la genèse de l'écoulement dans un espace donné en raison de son rôle intégrateur.

1.1.2. La période entre 1970 et 1990 : Essor de la régionalisation des régimes hydrologiques

Cette période est caractérisée par un développement important de travaux de régionalisation des régimes hydrologiques. En 1973, Lvivoch proposa une nouvelle classification fondée sur le mode d'alimentation principal et de la répartition du volume d'eau écoulé durant l'année. Dans cette nouvelle classification, l'auteur ajoute un quatrième mode d'alimentation, à savoir, l'alimentation souterraine. De plus, en ce qui concerne la variabilité intra-annuelle des débits, il subdivisa l'année en quatre saisons découpées selon la répartition du volume écoulé. Sur la base de ces critères, il construisit une matrice avec 144 régimes hydrologiques possibles. Sur la terre, selon Sauquet cité par Musy et Higy (2003), seuls 38 régimes ont été formellement identifiés. Notons que cette classification tient toujours compte seulement des débits mensuels.

En 1979, les chercheurs scandinaves proposèrent une nouvelle classification fondée exclusivement sur les causes des périodes des basses et hautes eaux. Ils distinguèrent ainsi 6 cas possibles résumés au tableau 1.1.

TABLEAU 1.1

Principes de classification des régimes hydrologiques scandinaves (tiré de Krasovskaia et al., 1994).

| Période hydrologique | Caractérisation | | |
|--------------------------------|------------------------|---|-----------------------|
| Période des hautes eaux | Fonte des neiges | Transition à une seconde période des hautes eaux | Pluies |
| Période des basses eaux | Basses eaux hivernales | Zone de transition, deux périodes d'étiage en différentes saisons | Basses eaux estivales |

L'application de ces critères a permis d'identifier six régimes en Scandinavie (Gottschalk et al., 1979) et 13 régimes hydrologiques en Europe de l'ouest (Krasovskaia et al., 1994). Cette classification a été étendue à la zone des pays participant au projet FRIEND qui est un projet international d'hydrologie régionale intégré à la cinquième phase du programme hydrologique international de l'UNESCO (Musy et Higy, 2003).

En 1988, Haines et al. ont proposé de construire une typologie fondée sur un indice de similarité entre des débits moyens mensuels inter-annuels. Cette classification, validée a posteriori sur un jeu de 913 séries de débits mesurés sur tous les continents, permet d'automatiser l'attribution d'une station de mesure à un type de régime hydrologique.

Cette décennie a été marquée par l'introduction des méthodes quantitatives comme celles de Haines et al. (1988) rompant ainsi avec l'approche qualitative des travaux pionniers. En 1985, Gottschalk introduisit pour la première fois la méthode d'analyse en composantes principales pour classer les régimes hydrologiques en Suède.

1.1.3. La période après 1990 : Évolution méthodologique

Les méthodes quantitatives se sont généralisées et diversifiées. Deux évolutions remarquables au cours de cette période sont à souligner :

- La prise en compte de la dimension temporelle dans la classification des régimes hydrologiques. Cette prise en compte se justifiait dans le cadre des changements climatiques et écologiques (Arnell, 1992; Harris et al., 2000; Hisdal, 2000; Krasovkaia, 1995, 1996).

- L'introduction de nouvelles variables pour décrire les régimes hydrologiques. Cette introduction se justifiait par l'application du concept de « régime des débits naturels » développée en écologie aquatique (Richter et al., 1996; Poff et al, 1997). Ce concept est de plus en plus appliqué pour la classification des régimes hydrologiques (Pettit et al., 2001; Poff, 1996; Poff et al., 2006; Sanz et Gracia del Jalon, 2005; Snelder et al., 2005). Cependant, contrairement aux travaux précédents, ces derniers travaux tiennent compte aussi des débits journaliers. Toutefois, Assani et Tardif (2005) ont démontré que ce concept pouvait être appliqué en se limitant seulement aux échelles saisonnière et mensuelles.

1.1.4. Utilité de la régionalisation des régimes hydrologiques saisonniers

La classification des régimes hydrologiques saisonniers ne présentait aucun intérêt pratique. Elle faisait seulement partie du champ d'étude de la géographie dont l'un des objectifs est d'analyser la répartition spatiale des phénomènes à la surface de la terre et de déterminer les facteurs à l'origine de cette répartition. Depuis la décennie 1980, la classification des régimes hydrologiques saisonniers a été utilisée pour diverses fins :

- Pour suivre les changements environnementaux induits par les facteurs naturels comme les changements climatiques ou les activités anthropiques (barrages, irrigation,

agriculture). Les caractéristiques des régimes hydrologiques sont ainsi utilisées pour le suivi environnemental.

- En Écologie aquatique, les régimes hydrologiques sont utilisés pour expliquer les différences de structure et de composition spécifiques fauniques et floristiques entre les différents cours d'eau. De plus en plus de travaux sont consacrés à ce sujet (Poff et Ward, 1989; Poff, 1996; Tharme, 2003; Clausen et Biggs, 2000; Richter et Richter, 2000; Biggs et al., 2005; Pettit et al., 2001; Fleming, 2005; Sheldon et Thoms, 2006; Reid et Ogden, 2006; Poff et al., 2006; Dyer et Thoms, 2006; Blanch et al., 2000; Richter et al., 1997).

Cette revue de la littérature démontre que la classification des régimes hydrologiques saisonniers a connu beaucoup de développements durant ces trois dernières années tant sur le plan méthodologique que sur le plan de son utilité. Ces développements se traduisent par l'introduction des méthodes quantitatives fondées en partie sur l'analyse multivariée et par l'élargissement de sa finalité. On observe un regain d'intérêt de la part des écologistes à la classification des régimes hydrologiques. Cet intérêt des écologistes se justifie par le fait que « water flow is a master variable that governs the fundamental nature of streams and drivers, so it should come as no surprise that the modification of flow (...) alters the structure and function of river ecosystem ». (Hart et al., 2002).

1.2. Problématique, objectifs et hypothèses de la recherche

En Afrique, la classification des régimes hydrologiques saisonniers est jusqu'à présent basée sur les deux critères proposés par Pardé (1955), à savoir le mode principal d'alimentation et la répartition intra-annuelle du volume d'écoulement. Pardé a ainsi distingué deux types de régimes hydrologiques en Afrique : le régime simple qui caractérise le climat tropical à une seule saison des pluies et le régime mixte qui caractérise le climat équatorial avec ses deux maxima pluviométriques ou des bassins

versants alimentés par les affluents situés dans les deux hémisphères. Cependant, ces deux critères présentent trois faiblesses :

- Ces critères sont purement qualitatifs. Par conséquent, selon Musy et Higy (2003), ils rendent difficiles l'exploitation automatique des séries des débits afin de procéder à une détermination du régime hydrologique.

- Cette classification ne tient pas compte de toutes les caractéristiques des débits comme le suggère le concept de « régime des débits naturels ». En effet, selon ce concept, toutes les caractéristiques des débits contribuent au maintien de l'intégrité des écosystèmes aquatiques.

- Enfin, cette classification admet a priori l'influence de la proximité géographique sur les régimes hydrologiques. Mais, cette influence a été remise en cause par des récents travaux.

En ce qui concerne ce dernier point, Ouarda et al. (2001), ont démontré qu'au Québec et en Ontario (Canada) notamment, la longitude et la latitude n'avaient aucune influence sur la variabilité spatiale des débits maximums annuels. Par conséquent, le regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes n'était pas influencé par la proximité géographique des stations hydrologiques. Cette conclusion soulève la question suivante : deux stations situées dans deux hémisphères différents peuvent-elles présenter les mêmes caractéristiques des débits pour qu'elles soient regroupées dans une même région hydrologique homogène ?

L'objectif de notre étude est de répondre à cette question, c'est-à-dire de déterminer l'influence de la latitude et de la longitude sur la variabilité spatiale des variables hydrologiques et sur la classification des régimes hydrologiques. Pour déterminer cette influence, nous avons choisi le continent africain car il s'étend sur les deux hémisphères et les zones climatiques sont disposées de manière quasi symétrique de part et d'autre de l'Équateur géographique. En ce qui concerne l'influence de la latitude

et de la longitude, Assani et al. (2005, 2006a, 2006b) ont pu démontrer que ces deux facteurs influençaient certaines variables hydrologiques et pas d'autres et cette influence dépendait du type de série hydrologique et de l'échelle d'analyse. C'est ainsi que par exemple au Québec, la période d'occurrence des débits maximums annuels était principalement influencée par la latitude alors que celle des débits minimums annuels par la longitude.

À la lumière de ces considérations, l'hypothèse que nous voulons vérifier est la suivante : la variabilité spatiale des variables hydrologiques et la classification des régimes hydrologiques sont en partie influencées par la proximité géographique du fait que celle-ci n'influence pas toutes les variables hydrologiques.

1.3 Présentation de l'Afrique

L'Afrique est l'un des six grands continents de la Terre. En fait, avec une superficie de 30 330 000 km², elle occupe la seconde place après les deux Amériques réunies. Le continent africain est situé entre les latitudes 37°N et 35°S. Plus de 80% de sa superficie est localisée entre les deux tropiques (Capricorne au nord et Cancer au sud). C'est un continent chaud. L'Afrique mesure 8050 km du nord au sud et 7560 km d'est en ouest dans la partie la plus large. L'Afrique est reliée à l'Asie par l'Isthme de Suez, et séparée de l'Europe par le détroit de Gibraltar. À peu près dépourvue de hautes chaînes de montagne, l'Afrique a comme point le plus élevé le sommet de Kilimandjaro en Tanzanie (5895 m). Le point le plus bas est le lac Assal (153 m sous le niveau de la mer) à Djibouti. Toutes les îles africaines réunies mesurent 622 000 km² et Madagascar est la plus grande.

1.3.1. Le relief

Du point de vue topographique, l'Afrique peut être subdivisée en deux ensembles : l'Afrique basse dont l'altitude ne dépasse pas 1000 m. Cet ensemble s'étend de l'Afrique de l'ouest à l'Afrique nord orientale. Il englobe aussi une partie de l'Afrique

centrale. Il correspond en gros à la zone d'affleurement du bouclier. Le reste de l'Afrique (Afrique haute) se situe au-dessus de 1000 m en raison des mouvements tectoniques (fig.1.1.). Trois facteurs ont influencé la morphologie du continent africain.

- L'absence des transgressions marines qui a favorisé l'érosion du bouclier pendant une période relativement longue à l'origine des vastes surfaces d'aplanissement.

- Les mouvements tectoniques au Primaire et au Tertiaire sont à l'origine des cuvettes, des chaînes de montagne, des plateaux et des montagnes.

- Les éruptions volcaniques qui ont donné naissance à certains plateaux et montagnes.

Du point de vue morphologique, l'Afrique peut être subdivisée en trois régions : L'Afrique occidentale et centrale, l'Afrique orientale et l'Afrique australe

1.3.1.1. L'Afrique occidentale et centrale : surfaces plates et monotones

Cette région est caractérisée par de vastes surfaces d'aplanissement et des bassins intérieurs. C'est la partie de l'Afrique où se justifie avec le plus d'évidence la notion de monotonie : les reliefs se situent à moins de 2000 m et les surfaces planes au-dessous de 500 m couvrent d'immenses superficies. Ce système est celui des môles et des cuvettes. Deux dorsales existent : au nord, jalonnée par les môles cristallins du Sahara; et au sud, elle s'aligne le long de la côte de Fouta Djallon au Mayombé.

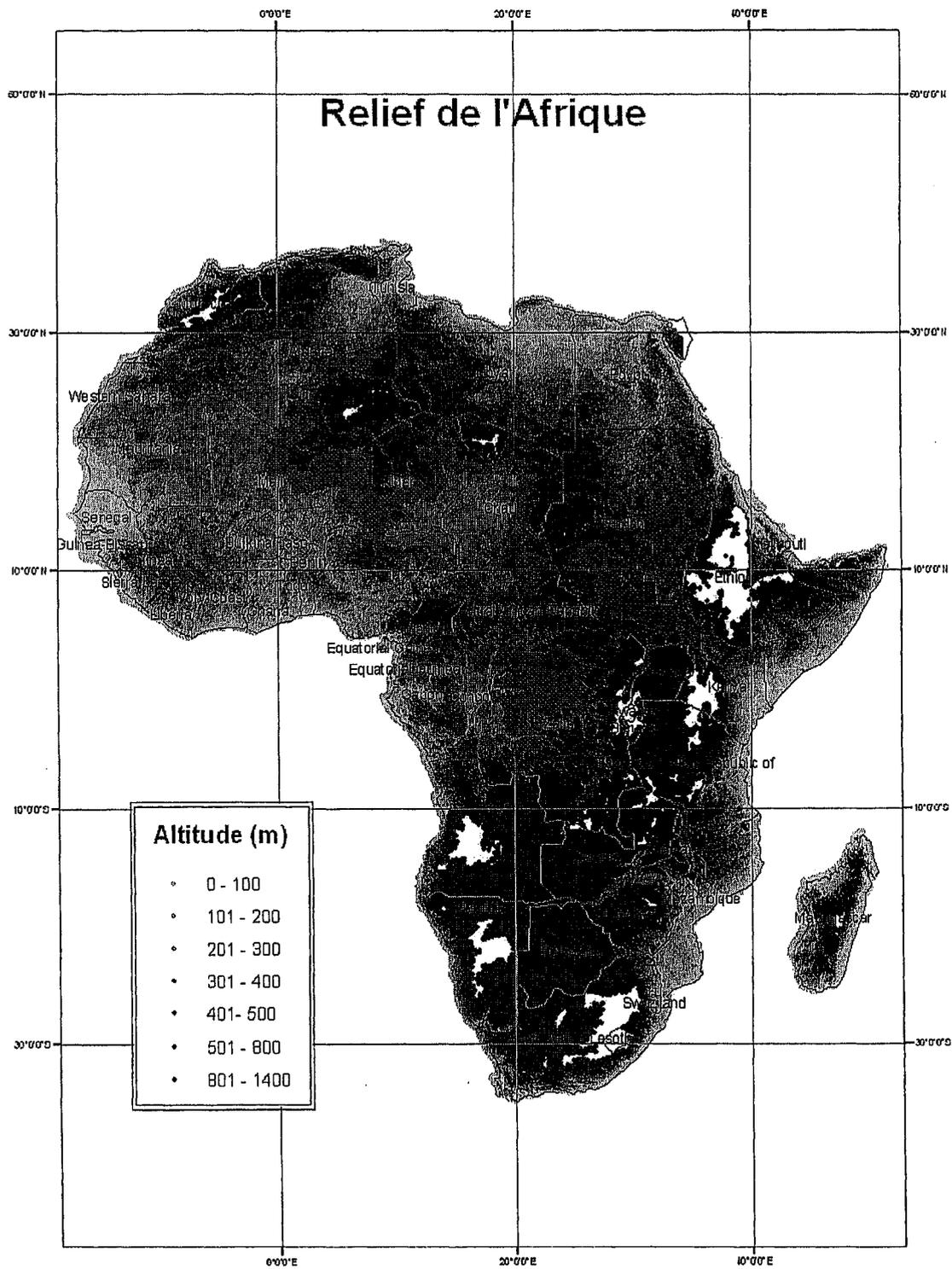


Figure 1.1 : Le relief de l'Afrique (USGS)

Elle correspond aux véritables massifs anciens où les roches dures prennent l'allure de véritables massifs montagneux (monts Loma, Nomba, Simandou, Togo-Atakora) dans le prolongement se trouvent les massifs volcaniques (plateaux Bamiliké, Adamaoua et monts Cameroun). Ce sont les seules régions vraiment accidentées de cette partie de l'Afrique.

Entre les deux, une série de cuvettes déprimées du Niger, du Tchad, du Nil (Bahr el Gazar) et du Congo. Les plateaux se raccordent aux plaines d'érosion par des escarpements imposants (falaise de Bandiagara-Hambori, de Banfora, de Tambaouara). Les plaines littorales sont étroites et discontinues, les littoraux rectilignes. Les côtes basses et sablonneuses dominant du Cap-Vert à la Côte-d'Ivoire et du Cameroun à l'Angola. Les falaises sont rares et modestes; elles correspondent aux roches anciennes (Cap-Vert, Côte d'Ivoire, Monts Cameroun). Les véritables plaines se situent à l'intérieur du continent. Les grands fleuves qui les traversent ont réussi à se frayer une voie vers la mer en perçant les accidents proches du rivage; ces deltas intérieurs sont nombreux.

1.3.1.2. L'Afrique orientale : hautes et profondes dépressions

Le relief est plus haut et les surfaces planes plus réduites. C'est un pays varié, compartimenté et étagé en trois niveaux. Les forces ont été puissantes, le soulèvement considérable, les fractures impressionnantes. Le sommet de la dorsale, sur plus de 5000 km du nord au sud, donne naissance à des failles bordières. Les fossés (Rift Valley) sont occupés par des lacs mal drainés. Au cœur de cet ensemble se trouvent les plaines d'érosion. Mais par un effet de compensation aux effondrements, des parties du socle ont été portées en altitude et constituent des môles (Ruwenzori) qui dépassent souvent 4000 m d'altitude. À l'est les hautes terres sont bordées par une lisière de plaines côtières : bas plateaux et large plaine somalienne. Au Kenya et en Tanzanie, les plaines se rétrécissent et s'accidentent d'une série de gradins.

1.3.1.3 L'Afrique australe : un plateau intérieur et des escarpes bordières

L'intérieur est un plateau déprimé en son centre qui échappe pour partie au drainage vers l'extérieur. Sur les marges, les escarpements sont abrupts et atteignent fréquemment 3000 m d'altitude. Le socle est déformé en cuvettes intérieures et dorsales; toutes les altitudes sont supérieures à 700 m. Lors de la déformation, le socle a réagi en bloc et les fractures sont discrètes. Les paysages s'organisent en trois grands ensembles :

- L'intérieur est un haut plateau de 700 à 2000 m dont le rebord est plus relevé que le centre. Toutes les pentes convergent vers la grande dépression intérieure de l'Okavango-Makarikari.
- Le grand escarpement va du Zambèze à l'Angola sur plus de 2000 km ; il enserre le plateau intérieur et présente partout une dénivellation considérable vers l'extérieur. À l'est, le Drakensberg affecte un front de côte de 3000 m d'altitude; sur la façade occidentale, c'est le Roggenveld berge (2000 m d'altitude).
- Les plaines sédimentaires à pente faible bordent une côte plate, sans véritable abri.

1.3.2. Le climat

1.3.2.1. Les centres d'action et les facteurs du climat

La circulation atmosphérique générale de l'Afrique est contrôlée par trois centres d'action ou cellules anticycloniques plus ou moins permanentes. Il s'agit de la cellule anticyclonique des Açores dans l'hémisphère nord, centrée sur l'océan atlantique au large des côtes de l'Afrique occidentale, les cellules anticycloniques de Mascareignes et de Saintes-Hélènes centrées respectivement sur l'océan Indien et Atlantique sud. Outre ces trois cellules quasi permanentes, il se forme en hiver hémisphérique, deux autres cellules anticycloniques continentales : une au-dessus du Sahara en hiver boréal, une autre au-dessus de l'Afrique australe en hiver austral. Le long de certaines côtes circulent des

courants marins froids qui engendrent des climats azonaux plus froids et secs que ceux de l'intérieur du continent. C'est le cas notamment des courants marins froids de Benguela le long de la côte occidentale de l'Afrique australe et le courant marin froid des Canaries, le long de la côte de l'Afrique occidentale. Par ailleurs, la présence des montagnes influence la circulation générale en favorisant ou en inhibant les précipitations et en adoucissant la température en altitude.

1.3.2.2. La circulation atmosphérique générale en Afrique

Les vents qui proviennent de cellules anticycloniques sont appelés les alizés. Ce sont des vents secs et frais. Par conséquent, ils ne donnent pas des précipitations. Ils sont donc à l'origine de la saison sèche. Les alizés convergent vers l'équateur géographique où ils se rencontrent pour former la Zone de Convergence Intertropicale (ZCI) ou l'Équateur Météorologique (EM). Cette zone est le siège de précipitations abondantes. Elle migre saisonnièrement entre les latitudes de 21°N et 12°S . Un alizé d'un hémisphère peut traverser l'autre hémisphère. Il devient une mousson. Cette traversée entraîne un changement des caractéristiques hygrométriques et thermiques de l'alizé originel. Celui-ci peut ainsi donner des précipitations abondantes sur les régions au-dessus desquelles il souffle. Deux alizés du même hémisphère peuvent se rencontrer. Ils forment la Zone de Confluence Inter-Océanique (CIO). Cette dernière peut donner des précipitations ou pas. Cette zone est observée souvent dans l'hémisphère sud par la rencontre des alizés provenant de cellules anticycloniques de Saintes-Hélènes et de Mascareignes (fig.1.2.).

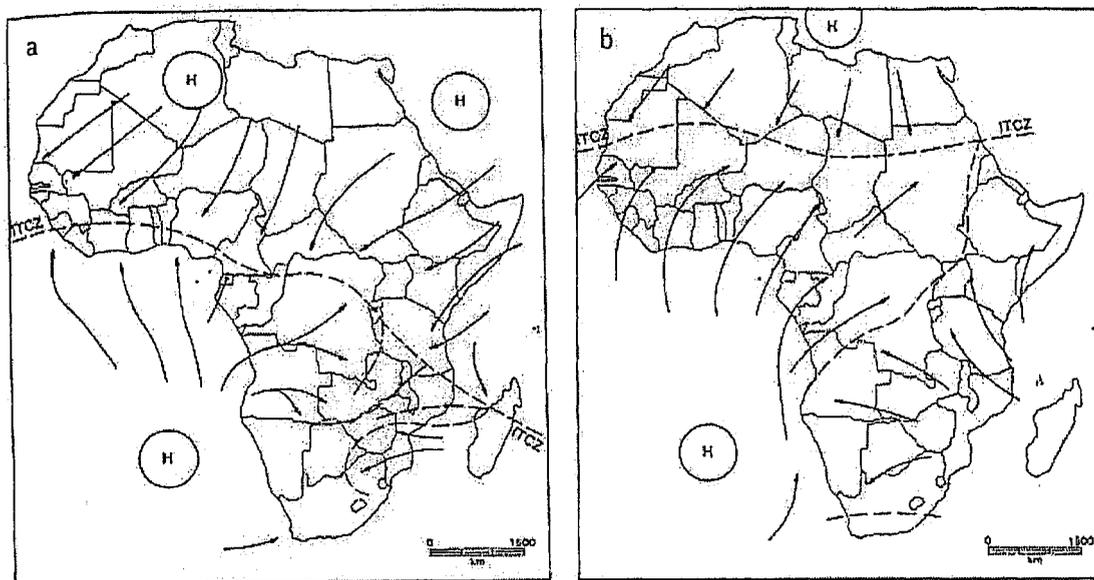


Figure 1.2 : Circulation générale atmosphérique janvier (a) et en juillet (b). Source : Leroux (1996)

1.3.2.3. La Température

Située entre les deux tropiques, l'Afrique est avant tout un continent avec des températures élevées en toutes saisons. Dans la zone intertropicale, le soleil passe deux fois au Zénith et tout au long de l'année, ses rayons sont proches de la verticale. Ce qui explique la moyenne élevée des températures et l'absence d'hiver thermique (fig. 1.3.a.). De par leur position médiane, les variations saisonnières de température sont très faibles : inférieures à 4°C. Il n'existe pas de saison thermique. D'autre part, les durées du jour et de la nuit sont toujours proches de 12h00. Lorsque les deux passages du soleil se rapprochent jusqu'à se confondre aux tropiques, ils correspondent à l'été et expliquent les fortes températures; lorsque le soleil s'éloigne vers l'autre tropique, les températures baissent. L'hiver de chaque hémisphère connaît les mois les plus frais.

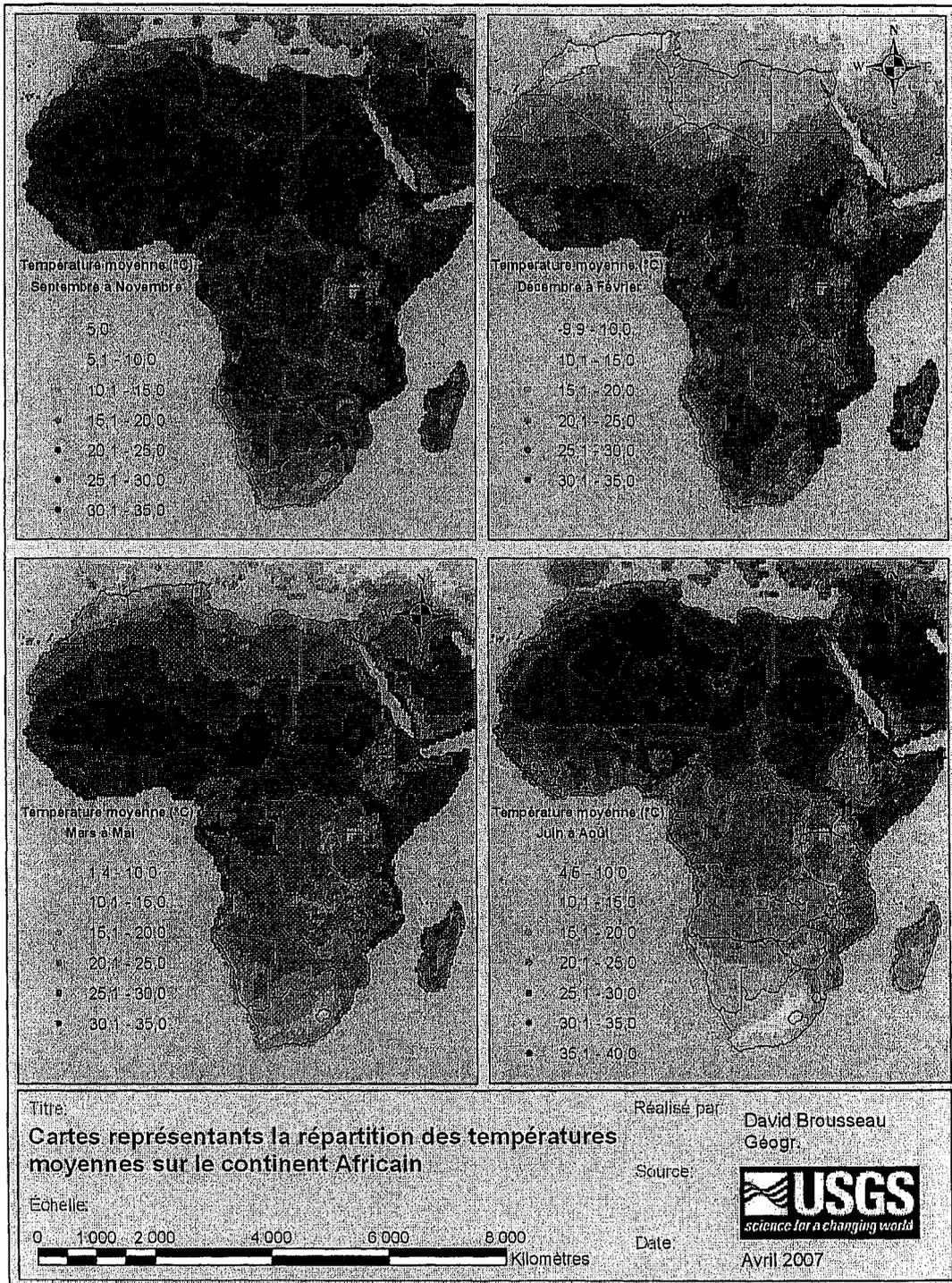


Figure 1.3.a : La répartition spatiale de la température moyenne annuelle en Afrique (USGS)

La répartition de la température est influencée par plusieurs facteurs :

- L'altitude : elle tend à faire baisser la température sur les hauts plateaux et les massifs montagneux.
- La latitude : son influence se manifeste surtout en Afrique du sud dans la région du Cap.
- Les courants marins froids : ils entraînent une baisse des températures le long de la côte de l'Afrique australe.
- Enfin, les nuages et les précipitations font baisser légèrement la température dans la région équatoriale et en saison de pluies dans les régions tropicales.

L'absence de nuages et de précipitations est à l'origine des températures élevées observées dans la région sahélo-saharienne (équateur thermique).

1.3.2.4. Les précipitations

Les données pluviométriques déterminent les rythmes climatiques saisonniers. L'axe de symétrie est défini par l'équateur géographique. Les régions les plus arrosées de l'Afrique se situent sur les rives du golfe de Guinée et dans la cuvette congolaise. Vers le nord et le sud, les pluies se concentrent en une seule période, « l'hivernage » qui correspond à l'été de chaque hémisphère et s'oppose à une saison sèche de plus en plus longue vers les tropiques (fig.1.3.b.). Ce régime pluviométrique contrasté correspond à un renversement saisonnier des vents. Lors de la saison sèche, chaque hémisphère est le domaine des alizés continentaux secs, issus des latitudes subtropicales (anticyclones maritimes)

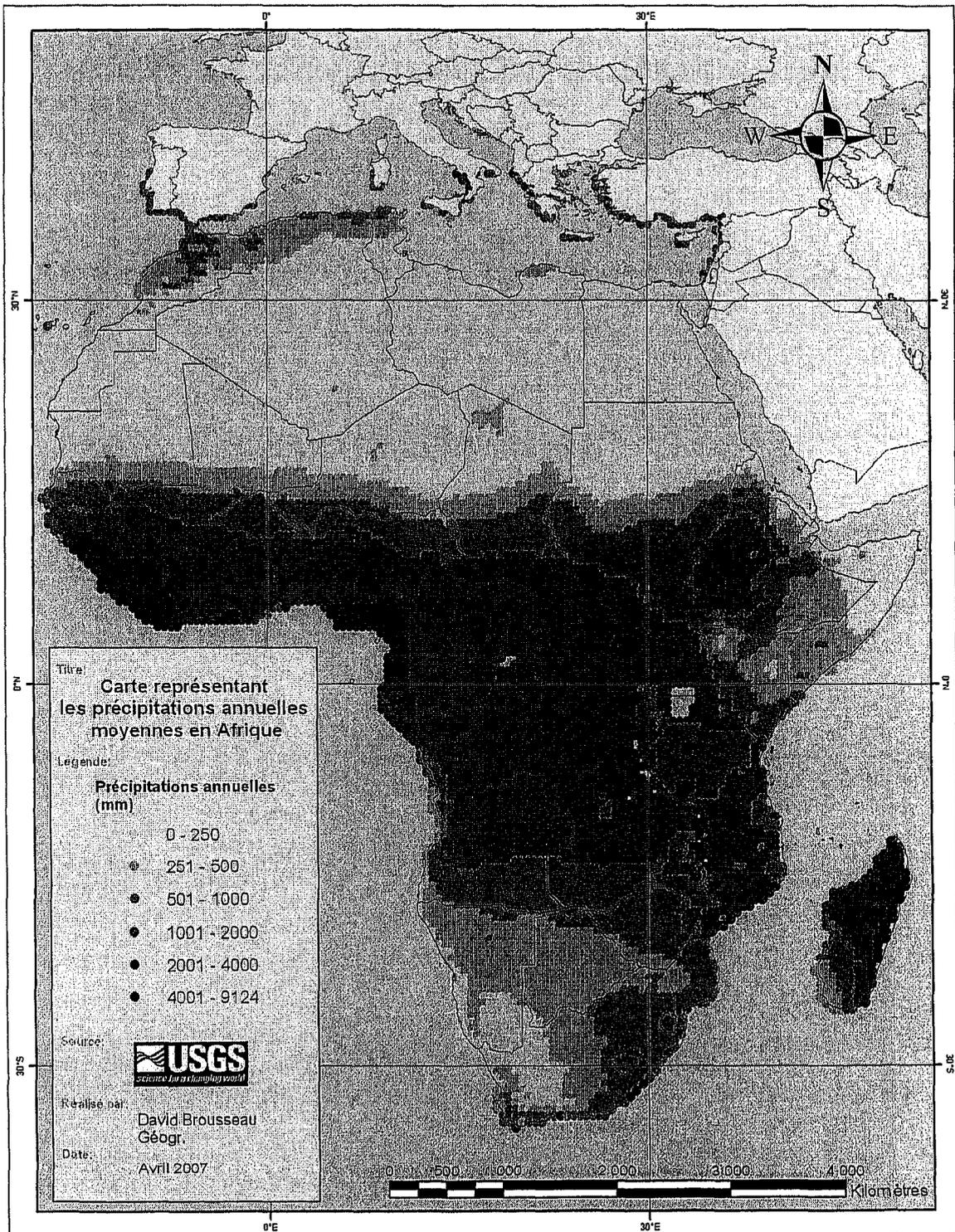


Figure 1.3.b : Répartition des précipitations annuelles moyennes en Afrique (USGS)

1.3.2.5. Les principales zones climatiques

En Afrique, les zones climatiques ont une disposition zonale par rapport à l'équateur (fig.1.4.).

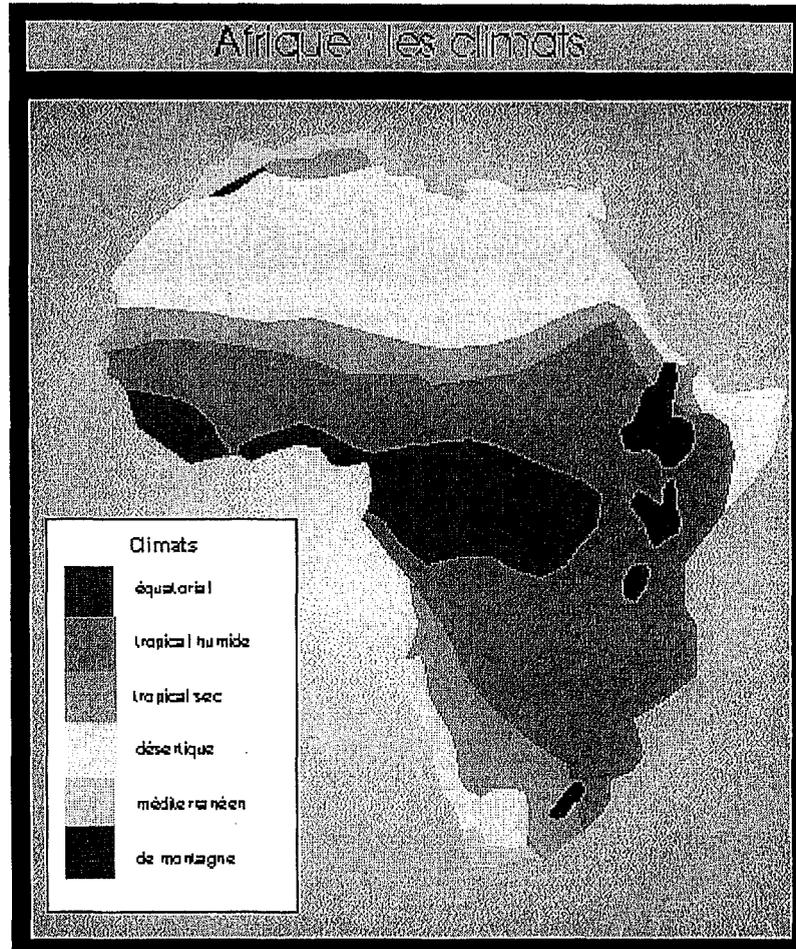


Figure 1.4 : Les principaux climats de l'Afrique (www.reynier.com)

1.3.2.5.1. Le climat équatorial

La température reste élevée toute l'année (autour de 26°C), l'humidité constante, le ciel plombé, couvert de nuages, le faible ensoleillement y créent une ambiance moite, oppressante. Ces climats caractérisent la zone située de part et d'autre de l'équateur géographique. Le rythme à double maximum de précipitations d'équinoxe avec période de rémission d'été et grande saison sèche d'hiver caractérise la cuvette congolaise et les régions guinéennes (Abidjan, Lagos). Les régions littorales du Golfe de Guinée ont un

style climatique assez particulier, associant un climat équatorial à des effets puissants de mousson. Ainsi, les précipitations sont plus abondantes qu'ailleurs et peuvent atteindre parfois plus de 3 m de hauteur.

1.3.2.5.2. Les climats tropicaux humides

Ce sont les climats les plus classiques de l'Afrique intertropicale. De part et d'autre des régions équatoriales, ils connaissent des conditions thermiques et pluviométriques saisonnières de plus en plus contrastées vers les tropiques. L'opposition d'une saison sèche et d'une saison humide située en été est fondamentale. Ces climats sont par excellence ceux de l'Afrique occidentale. Le rythme pluviométrique est caractérisé par une alternance de saison sèche et de saison humide. Les fortes précipitations sont dues au tracé de la côte perpendiculaire à la mousson et à la présence de hauts reliefs proches du rivage. Dans l'hémisphère sud, les climats tropicaux humides se trouvent au sud de la ligne Gabon-Zimbabwe. L'altitude contribue à une baisse des températures moyennes souvent inférieures à 20°C. Le régime thermique devient pratiquement tempéré et l'ensemble des précipitations est inférieur à celle de l'hémisphère nord. Le massif éthiopien représente un domaine à étagement climatique très marqué.

1.3.2.5.3. Les climats tropicaux secs et semi-arides

Ce sont des climats de transition vers le désert. Le total des précipitations est faible; l'hivernage court et les écarts pluviométriques d'une année à l'autre peuvent être considérables. Les amplitudes saisonnières et diurnes sont les plus fortes de toute l'Afrique. Dans ces régions, l'agriculture est précaire. Ce climat sahélien s'étend du Cap-Vert au massif éthiopien. Il se retrouve dans l'hémisphère sud depuis la région côtière de Loanda jusqu'aux hautes terres du Transvaal.

1.3.2.5.4. Le climat tropical maritime

Il s'agit du climat de la côte sud, du Mozambique et du Natal. Les conditions thermiques sont exceptionnelles : les amplitudes sont faibles et les mois d'hiver sont exempts de froid. Les fortes précipitations de l'été austral sont liées au jeu du front intertropical qui descend jusqu'au tropique du Capricorne. L'air tropical maritime de l'océan indien apporte alors quelques pluies.

1.3.2.5.5. Le climat désertique

Les pluies sont sporadiques et les totaux pluviométriques annuels sont inférieurs à 250 mm. C'est le climat du désert du Sahara dans l'hémisphère nord et celui du Kalahari dans l'hémisphère sud. Le Sahara est le premier désert au monde. Il couvre une superficie de 8 millions de km².

1.3.2.5.6. Le climat méditerranéen

Ce climat se rencontre à l'extrême nord et sud de l'Afrique. Il est caractérisé par des pluies en hiver et la sécheresse en été. Les températures sont modérées et peu contrastées : elles s'écartent peu de la moyenne annuelle de 11°C. Les précipitations totales varient entre 800 et 1000 mm.

1.3.3. Hydrographie

Le continent africain est parcouru par de nombreux fleuves et lacs, à l'exception des régions désertiques (fig.1.5.).

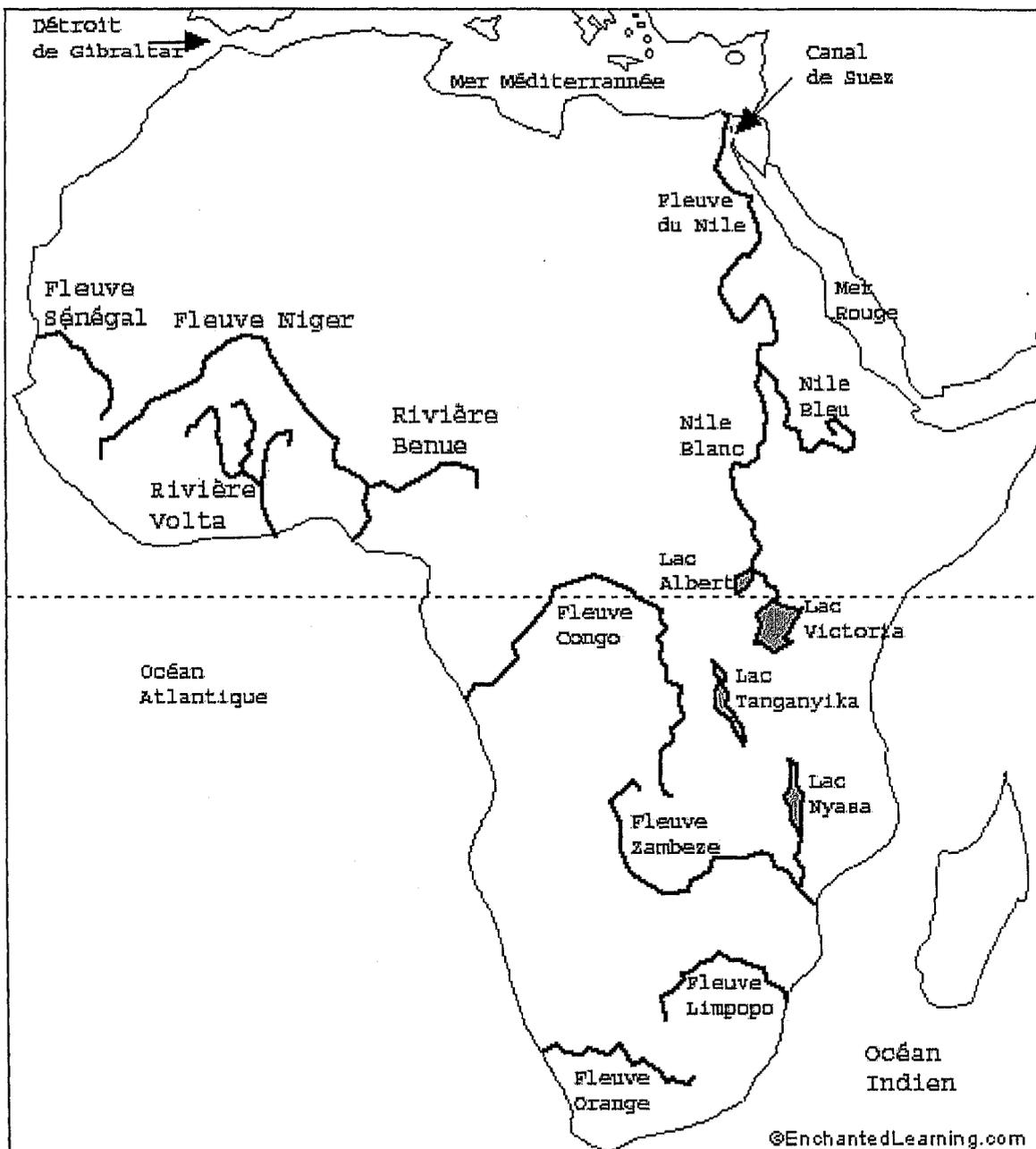


Figure 1.5 : Le réseau hydrographique de l'Afrique (USGS)

1.3.3.1. Les fleuves

L'Afrique compte un tiers des plus grands bassins fluviaux internationaux. Le tableau 1.2.a. présente les principaux bassins fluviaux de l'Afrique. Ces fleuves sont entrecoupés de chutes et rapides qui les rendent peu navigables. En revanche, ils leur

offrent des potentialités énergétiques énormes. Ainsi, l'Afrique possède 40% du potentiel hydroélectrique mondial.

TABLEAU 1.2.a.

Nombre de bassins internationaux par continent et % du territoire couvert

| Continent | 1978 | 1999 | 2002 | % Territoire |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|
| Afrique | 57 | 60 | 59 | 62 |
| Asie | 40 | 53 | 57 | 39 |
| Europe | 48 | 71 | 60 | 54 |
| Amérique du Nord et centrale | 33 | 39 | 40 | 35 |
| Amérique du sud | 36 | 38 | 38 | 60 |
| Total | 214 | 261 | 263 | 45 |

Source : World Facts and Figures, 1989.

TABLEAU 1.2.b.
Les principaux fleuves de l'Afrique.

| Nom du fleuve | Longueur | | Bassin versant | | Débits | |
|---------------|----------|--------------|-------------------------------------|--------------|---------------------|--------------|
| | (km) | Rang mondial | (X10 ⁶ km ²) | Rang mondial | (m ³ /s) | Rang mondial |
| Nil | 6670 | 1 | 3.349 | 3 | 2830 | - |
| Congo | 4630 | 10 | 3,822 | 2 | 39000 | 2 |
| Niger | 4100 | 14 | 2092 | 9 | 5700 | 37 |
| Zambèze | 2650 | 33 | 1331 | 15 | 7070 | 29 |
| Ubangi | 2460 | 40 | 773 | 33 | 7500 | 28 |
| Orange | 2250 | 50 | 855 | 26 | 215 | - |

Source : World Facts and Figures, 1989.

1.3.3.2. Les lacs

Les lacs africains ont plusieurs origines.

- Les lacs d'origine tectonique. Ce sont des lacs qui occupent les fossés (graben) d'origine tectonique. Les lacs du Rift Valley africain font partie de cette catégorie. Ils sont généralement très profonds et étendus. Parmi les plus importants, citons les lacs

Victoria (le plus grand et l'exutoire naturel du Nil) en Ouganda, Tanganyika (en Tanzanie), le Malawi, le Nyassa, etc.

- Les lacs de barrages. Ils sont liés à l'obturation d'une vallée par un cône, une coulée ou des projections massives de tufs. C'est le cas notamment du lac Kivu (en RDC) dont les coulées de laves ont obturé des vallées existantes.

- Les lacs résiduels qui sont le reste des anciennes mers intérieures évaporées. C'est le cas des lacs de la cuvette centrale du Congo.

CHAPITRE II

Méthodologie

2.1. Source de données hydrologiques

Les données hydrologiques proviennent du Global Runoff Data Center (GRDC) basé en Allemagne. Cet organisme centralise toutes les données de débits de tous les pays du monde. Pour chaque station hydrologique, cette base de données fournit les informations suivantes : le numéro de la station attribuée par GRDC, le nom des pays auquel appartient la station, le nom du cours d'eau, les coordonnées géographiques des stations et les différents types de données hydrologiques disponibles (données journalières et/ou données moyennes mensuelles) ainsi que le type d'écoulement. Nous avons disposé au total de 213 stations. Dans le cadre de ce travail, nous avons retenu seulement les stations qui avaient au moins 20 ans de mesure continue des débits entre la période 1970 et 2000. Le choix de cette période se justifiait par le changement de la pluviométrie observé dans une grande partie de l'Afrique vers 1970. En effet, de nombreux travaux ont démontré qu'à partir de 1970, les séries pluviométriques en Afrique occidentale et sahélienne étaient affectées par un changement significatif de leurs moyennes (Hubert et *al.*, 1989 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Bricquet et *al.*, 1997 ; Servat et *al.*, 1999). Ce qui rendait les séries pluviométriques non stationnaires. Ce changement de la pluviométrie avait affecté sans nul doute les régimes hydrologiques. En définitive, nous avons retenu 203 stations parmi les 213 stations reçues. Elles sont présentées à la figure 2.1. La répartition des stations n'est pas homogène dans l'espace en raison de l'absence des données dans de nombreux pays. Cette absence affecte l'Afrique centrale, l'Afrique sahélienne et la partie nord de l'Afrique australe ainsi que l'Afrique orientale. Quoi qu'il en soit, les stations retenues reflètent les grandes tendances climatiques de l'Afrique.

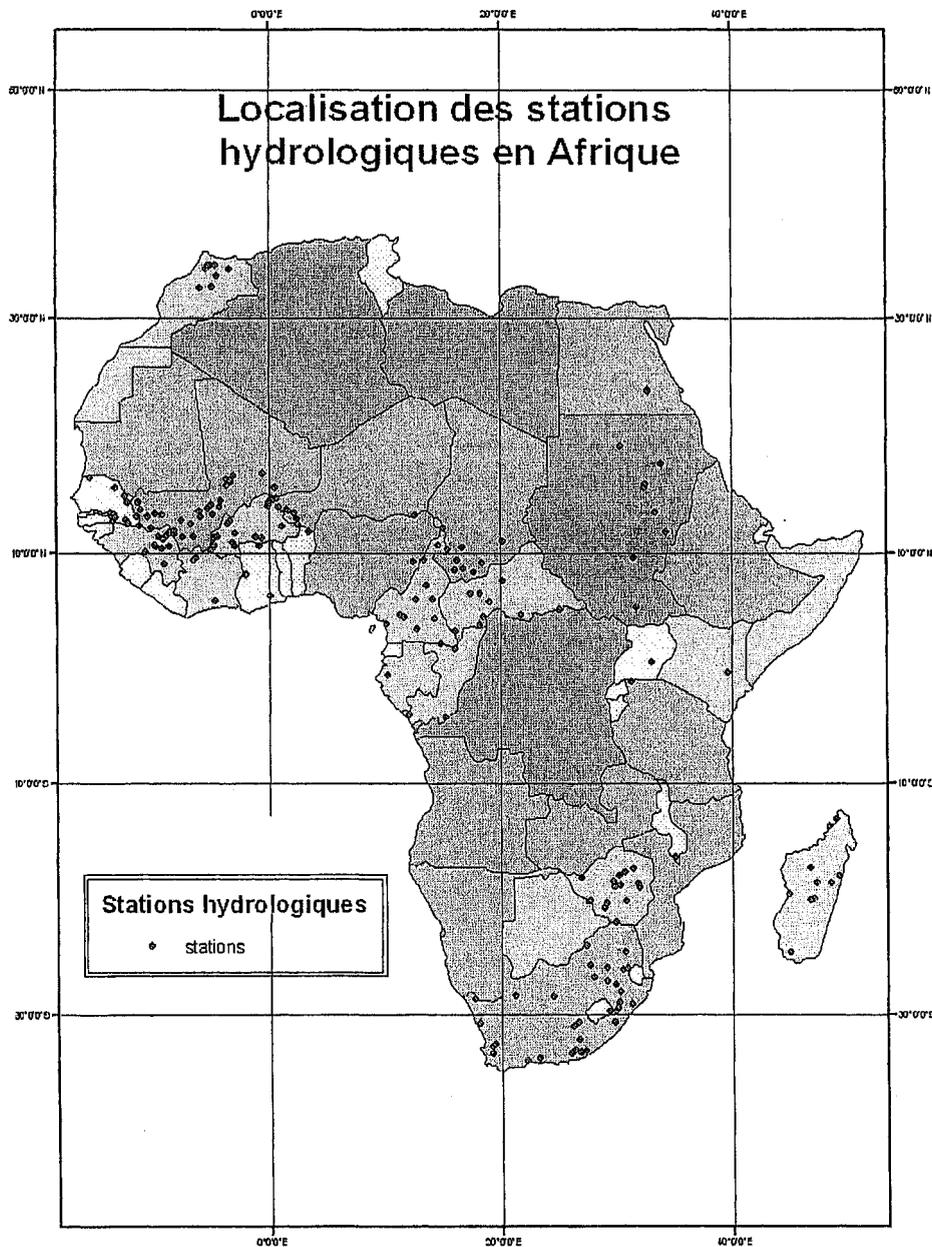


Figure 2.1 : Localisation des stations pluviométriques analysées

2.2. Analyse statistique des données

2.2.1. Choix de la méthode d'analyse statistique de données pour classifier et caractériser les régimes hydrologiques

L'analyse statistique a été effectuée trois étapes :

- La définition des caractéristiques et des variables hydrologiques.
- La sélection des variables hydrologiques pertinentes au moyen de l'analyse en composantes principales en vue de déterminer l'influence de la latitude et de la longitude.
- Enfin, la classification et la caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers de l'Afrique au moyen de la méthode de classification ascendante hiérarchique de Ward (Lebart et al., 2004).

2.2.1.1. Définition des caractéristiques des débits et des variables hydrologiques

Le concept de « régime des débits naturels » a permis d'établir une différence nette entre une « caractéristique » des débits et une « variable ou indice hydrologique » (Richter et al., 1996; Poff et al., 1997). Ces deux notions ou concepts sont généralement confondus en hydrologie. Une "caractéristique" des débits est une composante intrinsèque des débits ou un paramètre qui permet de caractériser les débits d'une rivière. Quant à la "variable ou indice hydrologique", c'est une variable statistique qui sert à définir une caractéristique des débits. Pour illustrer ces deux définitions, nous donnons l'exemple suivant : la fréquence est une caractéristique des débits. Cette fréquence (caractéristique) peut être définie par une multitude des variables ou indices hydrologiques comme les débits de récurrence de 100 ans, de 50 ans, de 5 ans, etc. ou par les percentiles 99, 95, 90, etc. calculés sur une série hydrologique donnée. Le nombre des caractéristiques est limité alors que celui des variables hydrologiques qui les définissent peut être illimité.

Richter et al. (1996) ont identifié cinq caractéristiques fondamentales des débits (tableau 2.1.) : la magnitude, la fréquence, la durée, la période d'occurrence et la variabilité intra ou inter-annuelle. Ils proposèrent 32 variables hydrologiques pour définir ces cinq caractéristiques des débits. Ces variables sont connues sous le nom des Indicateurs d'Altération Hydrologique (Indicators of Hydrologic Alteration, IHA) ou IAH du fait qu'elles sont principalement destinées à détecter et à quantifier les impacts d'origine anthropique sur les régimes hydrologiques. Cependant, à l'échelle mensuelle,

les variables proposées par Richter et al. (1996) ne décrivent qu'une seule caractéristique des débits, à savoir la magnitude (moyennes mensuelles). Par conséquent, elles ne suffisent pas pour effectuer une analyse en composantes principales. De plus, selon le concept du « régime des débits naturels », il faut tenir compte de toutes les caractéristiques des débits pour décrire un régime hydrologique. C'est ainsi que pour appliquer intégralement ce concept, nous avons tenu compte d'autres caractéristiques des débits qui peuvent être définies à l'échelle mensuelle. Ces caractéristiques ont été définies par d'autres variables hydrologiques (tableau 2.2.). Ainsi, nous avons identifié trois caractéristiques qui ont été définies par 13 variables hydrologiques. Outre ces trois caractéristiques, nous avons ajouté une quatrième qui tient compte du caractère permanent ou temporaire de l'écoulement. Cette caractéristique a été définie par la variable associée au nombre des mois sans écoulement mesurable.

- Les variables relatives à la magnitude des débits mensuels et saisonniers : HIV, PRI, ETE, AUT, MAM et MIM. Afin de réduire la dimension de la matrice des données à analyser, nous avons préféré grouper les mois en saisons afin de faciliter l'interprétation des résultats d'analyse en composantes principales comme nous le verrons plus tard. Par ailleurs, ces variables sont exprimées en pourcentage par rapport au débit annuel total. Cette transformation permet une meilleure comparaison des données de bassins de différentes tailles d'une part, et d'éliminer l'influence de la taille des bassins versants sur les coefficients de corrélation et les notes factorielles, d'autre part.

- Les variables qui caractérisent la période d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums : DMAM et DMIM. Pour déterminer la période d'occurrence du débit mensuel maximum ou minimum, nous avons considéré le jour julien médian du mois correspondant à la période d'occurrence de ce débit. Par exemple, si le débit moyen mensuel minimum a été observé au mois de janvier au cours d'une année hydrologique (d'octobre à septembre), le jour julien de la période d'occurrence de ce débit correspond donc au 15 janvier. Ensuite, nous avons calculé la moyenne des jours juliens médians sur toute la période d'observation. Il en est de même pour les débits moyens mensuels maximums.

- Les variables qui caractérisent la variabilité intra-annuelle des débits : PRI/HIV, PRI/ETE, ETE/HIV, MAM/MIM et CV. Ces cinq variables définissent le caractère « contrasté » et « pondéré » du cycle annuel des débits. Plus ces variables sont élevées, plus la variabilité des débits à l'échelle annuelle est relativement forte. Les valeurs de MAM/MIM permettent de définir la notion de « contraste ». Si ces valeurs sont élevées (il n'existe pas des seuils précis), le régime hydrologique est dit « contrasté », c'est-à-dire que le régime est caractérisé par un grand écart entre les débits moyens mensuels maximums et les débits minimums (forte amplitude de la fluctuation du niveau d'eau). Quant aux valeurs de CV, elles permettent de définir la notion de « pondération ou de modération » d'un régime hydrologique. Lorsque ces valeurs sont élevées (il n'existe pas non plus des seuils précis), le régime est dit « impondéré ou imodéré », c'est-à-dire un régime caractérisé par une forte variabilité des débits mensuels à l'échelle annuelle (variabilité intra-annuelle). Ces deux caractéristiques sont importantes en écologie aquatique. Ainsi par exemple, Fleming (2005) a pu démontrer qu'en Colombie Britannique, la composition spécifique des poissons était influencée par la pondération des régimes hydrologiques. Les rivières pondérées glaciaires avaient moins d'espèces que les rivières impondérées nivales. Pour ce qui est de la variable MAM/MIM, nous avons été dans l'obligation de calculer le logarithme afin d'éliminer les trop grandes différences de ce rapport d'une station à une autre.

- La durée des débits. Elle correspond, selon le cas, au mois ou à la saison. Mais elle n'est pas définie par une variable hydrologique spécifique. Par conséquent, elle ne sera pas prise en compte par l'analyse statistique. Les données mensuelles ne permettent pas de déterminer la fréquence, un dernier critère pour caractériser écologiquement les régimes hydrologiques. Quoi qu'il en soit, à notre avis, les variables retenues suffisent amplement à caractériser écologiquement le comportement saisonnier moyen des débits d'une rivière.

- Enfin, la dernière caractéristique « nombre des mois sans écoulement mesurable ou débit nul à la station » décrit le caractère temporaire ou permanent de l'écoulement.

Comme il existe un décalage des saisons entre les deux hémisphères, nous avons au préalable éliminé l'effet de ce décalage en faisant correspondre les mêmes saisons de deux hémisphères. Ainsi, l'hiver boréal (janvier-mars) va correspondre à l'hiver austral (juillet-septembre), le printemps boréal (avril-juin) au printemps austral (octobre-décembre), l'été boréal (juillet-septembre) à l'été austral (janvier-mars), ainsi de suite. De même, nous avons fait correspondre aussi les rapports saisonniers des débits.

TABLEAU 2.1.
Caractéristiques des débits

| Caractéristiques | Implications écologiques |
|--|--|
| Magnitude | Défini le volume d'habitat disponible pour les espèces aquatiques ou semi-aquatiques. Influence le niveau de productivité des écosystèmes. |
| Fréquence | Influence la dynamique des populations (reproduction et mortalité) |
| Variabilité de la fréquence | Variabilité du volume d'habitat disponible: degré de stress (compétition, risque d'être emprisonné dans les milieux humides riverains, etc.) |
| Date d'occurrence des débits extrêmes | Donne le signal de départ de certains cycles vitaux synchronisé de manière à éviter ou exploiter les crues ou les étiages |
| Variabilité de la date d'occurrence des débits extrêmes | Augmente le degré de stress ou de mortalité en déplaçant dans le temps le signal de départ de certains cycles vitaux. |

Source : Richter et al. (1996)

TABLEAU 2.2

Variables hydrologiques utilisées pour caractériser les régimes hydrologiques naturels

| Sigle | Signification | Mode de calcul |
|----------------|--|---|
| HIV | Coefficient saisonnier des débits (en %) | Le rapport entre les débits hivernaux et le débit annuel total |
| PRI | Coefficient saisonnier des débits (en %) | Le rapport entre les débits printaniers et le débit annuel total |
| ETE | Coefficient saisonnier des débits (en %) | Le rapport entre les débits estivaux et le débit annuel total |
| AUT | Coefficients saisonniers des débits (en %) | Le rapport entre les débits automnaux et le débit annuel total |
| PRI/HIV | Rapport entre AJ et JM | |
| PRI/ETE | Rapport entre AJ et JS | |
| ETE/HIV | Rapport entre JS et JM | |
| CV | Coefficient de variation | Rapport entre l'écart-type et la moyenne de douze débits moyens mensuels (en %) |
| MAM | Coefficient mensuel du débit moyen mensuel maximum | Le rapport entre le débit mensuel maximum et le débit annuel total |
| MIM | Coefficient mensuel du débit moyen mensuel minimum | Le rapport entre le débit mensuel minimum et le débit annuel total |
| MAM/MIM | Coefficient d'immodération mensuel | Le rapport entre les débits mensuels maximums et minimums |
| DMAM | Jour julien moyen du débit mensuel maximum | La moyenne des jours juliens correspondant à la date médiane du débit moyen mensuel maximum |
| DMIM | Jour julien moyen du débit mensuel minimum | La moyenne des jours juliens correspondant à la date médiane du débit moyen mensuel minimum |
| MES | État de l'écoulement (permanent ou temporaire) | Nombre de mois durant lesquels les débits sont nuls |

Les débits saisonniers hivernaux, printaniers, estivaux sont la somme des débits de trois mois qui constituent chacune de ces quatre saisons.

2.2.2. Choix des variables hydrologiques pour déterminer l'influence de la latitude et de la longitude

Étant donné le nombre élevé des variables utilisées, il est impossible de les utiliser toutes pour déterminer l'influence de la latitude et de la longitude. Nous avons donc appliqué l'analyse en composantes principales dont l'objectif est précisément de synthétiser l'information (Beguin, 1979). L'analyse en composantes principales a été appliquée à la matrice des corrélations calculées entre les variables hydrologiques. Cette matrice est moins sensible aux valeurs extrêmes et permet d'éliminer l'effet provoqué par la variabilité locale d'un site (Siew-Yan-Yu et al., 1998). Nous avons procédé par deux étapes pour sélectionner les variables hydrologiques. La première étape a consisté à déterminer le nombre des composantes significatives selon les critères de Kayser (1960) et de Cattell (1966). Le premier critère est basé sur la valeur des valeurs propres. Selon ce critère, seules les composantes principales dont la valeur propre est supérieure à 1 sont considérées comme significatives. Le second critère permet de sélectionner parmi ces composantes significatives lesquelles méritent d'être retenues. Le critère de sélection est essentiellement graphique. Après la sélection des composantes significatives selon les deux critères, la dernière étape consiste à choisir les variables qui sont fortement corrélées à celles-ci. Le critère de sélection est basé exclusivement sur les valeurs de saturation (corrélations entre la composante principale et la variable hydrologique) après une rotation varimax. Celle-ci a pour but de maximiser les valeurs de saturations sur les composantes principales. Selon Beguin (1979), une variable est fortement corrélée à une composante lorsque sa saturation est supérieure à 0,800 ou inférieure à -0,8000.

2.2.3. Méthode de classification des régimes hydrologiques saisonniers

Il existe une panoplie des méthodes de classification des régimes hydrologiques. Grehys (1996) a comparé sur le plan statistique leurs efficacités. Toutefois, les méthodes retenues par Grehys ne peuvent être appliquées à l'échelle saisonnière. Ainsi, malgré ses faiblesses, seule la méthode de classification hiérarchique ascendante est appliquée à cette échelle (Hannah et al., 2005 ; Harris et al., 2000 ; Pegg et Pierce, 2002 ; Poff et Ward, 1989 ; Poff, 1996 ; Poff et al., 2006 ; Sanz et Garcia del Jalon, 2005). Il est bien connu qu'il n'existe aucune meilleure méthode de classification universellement acceptée. En effet, le nombre de classes ne peut être défini de manière objective. Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour la méthode de classification de Ward qui possède l'avantage de rechercher à chaque étape une partition telle que la variance interne de chaque classe soit minimale et par conséquent la variance entre les classes soit maximale (Lebart et al., 2004). De plus, elle est plus performante que d'autres méthodes de classification dans la mesure où elle permet un meilleur regroupement des stations en classes avec une très faible variance à l'intérieur de chaque classe.

CHAPITRE III

Résultats, Discussion et Conclusions

3.1. Résultats d'analyse en composantes principales

Rappelons que l'objectif de l'analyse en composantes principales est de sélectionner les variables pertinentes susceptibles d'être influencées par les deux facteurs analysés, à savoir la latitude et la longitude. Pour sélectionner les composantes principales significatives, nous avons d'abord appliqué le critère de Kayser. Sur la base de ce critère, nous avons retenu cinq composantes principales significatives. Finalement, l'application du critère de Cattell nous autorise de retenir seulement quatre de ces cinq. La variance totale expliquée par ces quatre composantes est d'environ 80% dont le tiers est expliquée par la première composante. Les valeurs de saturation (cordonnée de chaque variable hydrologique sur une composante principale) des variables hydrologiques associées à ces composantes principales sont consignées dans le tableau 3.1. La première composante principale est fortement corrélée à trois variables : les débits hivernaux ainsi qu'au rapport entre les débits printaniers et estivaux. Les deux premières variables sont corrélées négativement à la composante principale. On notera aussi que les périodes d'occurrence des débits moyens mensuels maximums (DMAM) et minimums (DMIM) présentent aussi des saturations relativement élevées sur la composante mais leurs valeurs sont légèrement inférieures à 0,800. La seconde composante principale est positivement corrélée au coefficient de variation des débits mensuels (CV) et au coefficient d'écoulement des débits moyens mensuels maximums (MAM). La troisième composante principale est négativement corrélée au coefficient d'immodération (MAM/MIM) mais positivement corrélée au coefficient d'écoulement mensuel des débits moyens minimums (MIM). Enfin, la dernière composante principale, elle est corrélée négativement aux débits saisonniers automnaux.

TABLEAU 3.1.

Valeurs de saturation des variables sur les quatre composantes principales significatives

| <i>Sans tenir compte de la position hémisphérique des stations</i> | | | | |
|--|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
| HIV | -0,862 | -0,316 | -0,026 | -0,061 |
| PRI | -0,309 | -0,707 | -0,022 | -0,052 |
| ETE | 0,614 | 0,592 | 0,121 | 0,389 |
| AUT | 0,026 | -0,121 | -0,149 | -0,935 |
| PRI/HIV | 0,086 | 0,085 | 0,266 | 0,162 |
| PRIETE | -0,821 | -0,082 | -0,081 | 0,21 |
| ETE/HIV | 0,095 | 0,493 | 0,598 | 0,305 |
| CV | 0,205 | 0,911 | 0,103 | 0,107 |
| MAM | 0,071 | 0,820 | 0,109 | 0,055 |
| MIM | 0,095 | 0,262 | 0,848 | 0,011 |
| DMAM | 0,799 | 0,032 | -0,010 | -0,042 |
| DMIM | -0,779 | -0,063 | -0,096 | -0,325 |
| MES | 0,053 | 0,500 | 0,734 | 0,233 |
| MAM/MIM | -0,048 | 0,302 | -0,923 | 0,001 |
| Variance cumulée | 23,2 | 46,1 | 64,8 | 77,8 |

Les valeurs de saturations les élevées (>0,8000) apparaissent en gras

Il ressort de cette analyse que les deux caractéristiques des débits qui sont corrélées aux composantes significatives sont la magnitude et la variabilité des débits. En ce qui concerne la magnitude, ce sont les débits saisonniers hivernaux et automnaux d'une part, et les débits moyens mensuels maximums et minimums, d'autre part. Quant à la variabilité des débits, les deux variables qui définissent le caractère de « pondération » (CV) et de « modération » (MAM/MIM) sont corrélées respectivement à la deuxième et à la troisième composante principale.

Pour déterminer l'influence de la latitude et de la longitude, nous avons corrélé les valeurs des variables hydrologiques associées aux quatre composantes principales à ces deux facteurs. En ce qui concerne la longitude, les corrélations ont été calculées seulement dans l'hémisphère nord en raison de l'extension du continent de part et d'autre du méridien d'origine. Il convient de préciser que ces corrélations ont été calculées pour les stations situées entre la zone strictement tropicale, c'est-à-dire la zone comprise entre 30°N et 30°S. Le tableau 3.2 révèle que la latitude est significativement corrélée aux

variables PRI/ETE (AJ/JS) (fig. 3.1) et CV (fig.3.2) dans les deux hémisphères. Elle est négativement corrélée à la première mais positivement à la seconde variable. Dans l'hémisphère nord, elle est aussi corrélée positivement à MAM et dans l'hémisphère, elle l'est négativement à HIV. Quant à la longitude, dans l'hémisphère nord, elle est significativement corrélée aux variables suivantes : HIV, CV, MAM, MIM et MAM/MIM. Seules les variables hydrologiques CV et MAM sont influencées aussi bien par la latitude que la longitude dans l'Hémisphère Nord.

TABLEAU 3.2

Coefficients de corrélation calculés entre les variables hydrologiques associées aux composantes principales, la latitude et la longitude (Hémisphère Nord)

| Composantes | Variables hydrologiques | Latitude | | Longitude |
|-------------|-------------------------|----------|---------|-----------|
| | | HN (126) | HS (53) | HN (126) |
| CPI | HIV | 0,085 | -0,360 | 0,328 |
| | PRI/ETE | -0,535 | -0,535 | -0,06 |
| CPII | CV | 0,430 | 0,302 | 0,253 |
| | MAM | 0,320 | 0,141 | -0,248 |
| CPIII | DMAM | 0,103 | -0,055 | 0,179 |
| | MAM/MIM | 0,108 | 0,166 | 0,221 |
| CPIV | OD | -0,116 | -0,073 | 0,073 |

CP = Composante Principale; HN = Hémisphère Nord; HS = Hémisphère Sud. (126) = nombre de stations. Les valeurs des coefficients de corrélation significatives au seuil de 5% apparaissent en gras.

La différence s'observe seulement dans chaque hémisphère. En effet, les valeurs de ces deux variables sont globalement plus faibles dans la zone tropicale (entre les parallèles de 25°) que dans la zone extratropicale (figure 3.1. et figure 3.2.). En ce qui concerne la seconde composante principale, dans la zone tropicale, pour environ 10% des stations de l'hémisphère nord, les valeurs de coefficient de variation des débits moyens mensuels sont plus élevées que celles des stations de l'hémisphère sud. Quant aux valeurs de MAM, il n'existe aucune différence entre les stations des deux hémisphères. Aucune

différence n'a été non plus observée entre la zone tropicale et la zone extratropicale en ce qui concerne les deux variables. Quant à la troisième composante principale, les variables hydrologiques qui lui sont corrélées ne sont pas influencées par la latitude. Toutefois, quelques stations de l'hémisphère nord dans la zone tropicale ont des valeurs de coefficient d'immodération plus élevées que celles des stations de l'hémisphère sud. Il n'existe aucune différence entre les zones tropicales et extratropicales. Enfin, en ce qui concerne la dernière composante principale, on peut noter qu'environ 20% des stations de la zone tropicale de l'hémisphère nord ont des valeurs des débits automnaux plus élevées que celles des stations de l'hémisphère sud. Mais aucune différence n'existe entre la zone tropicale et la zone extratropicale.

Quant à la longitude, ce facteur ne semble pas influencer la distribution spatiale des variables hydrologiques.

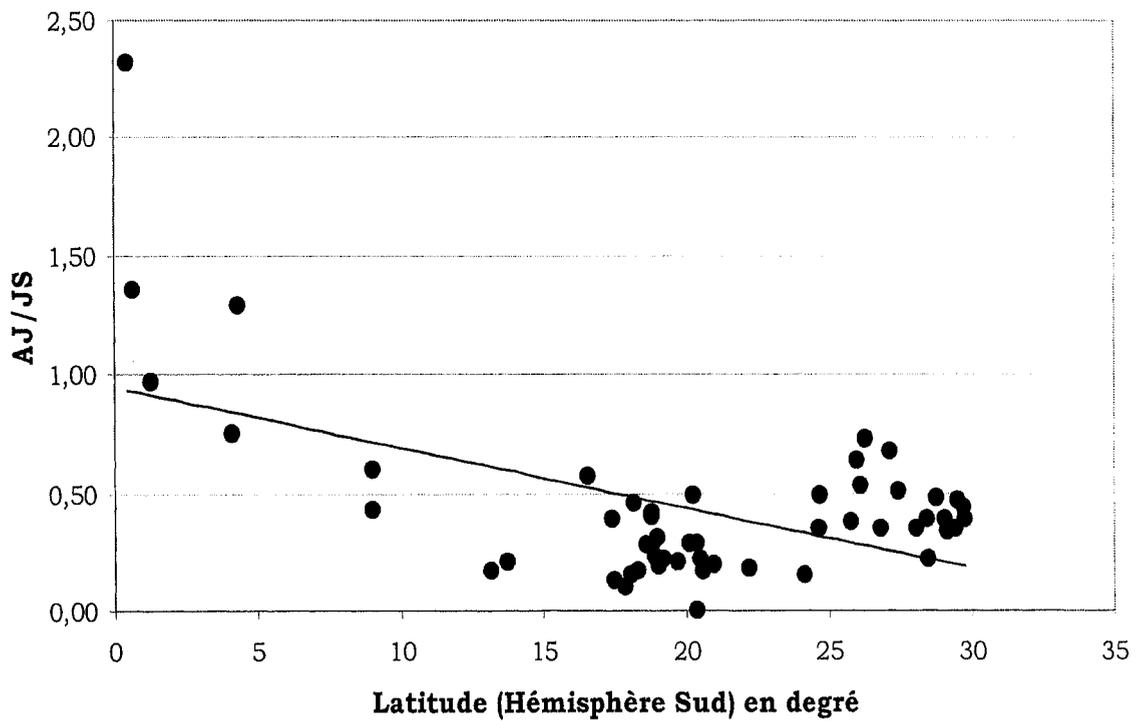
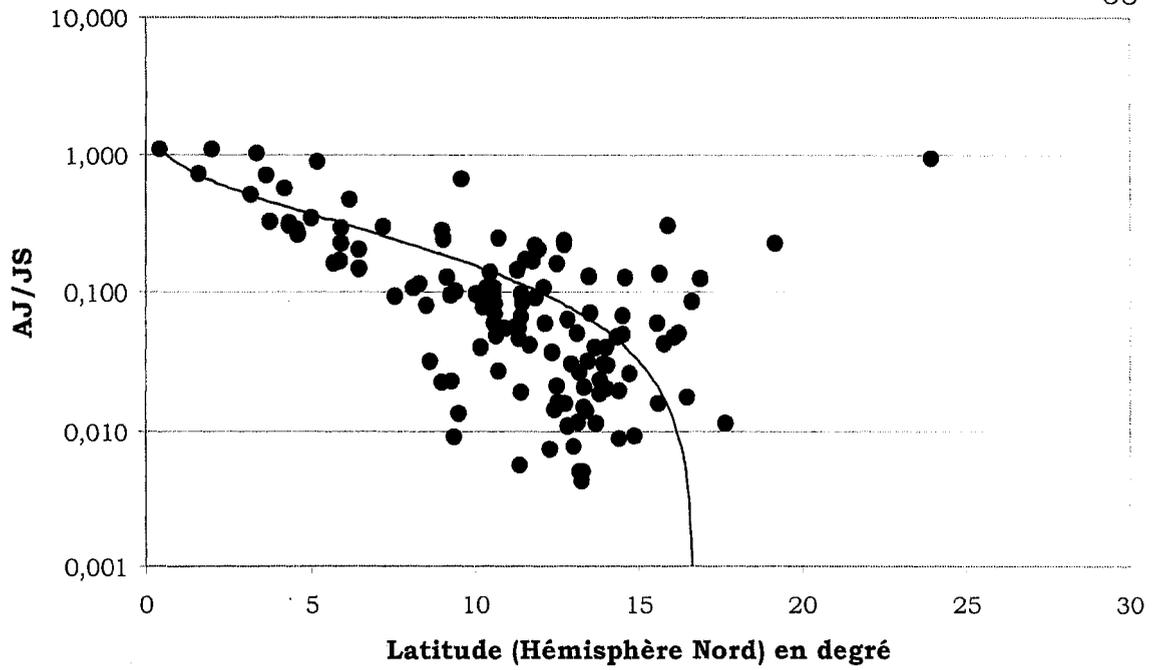


Figure 3.1 : Relation entre la latitude des stations et la variable hydrologique AJ/JS (PRI/ETE).

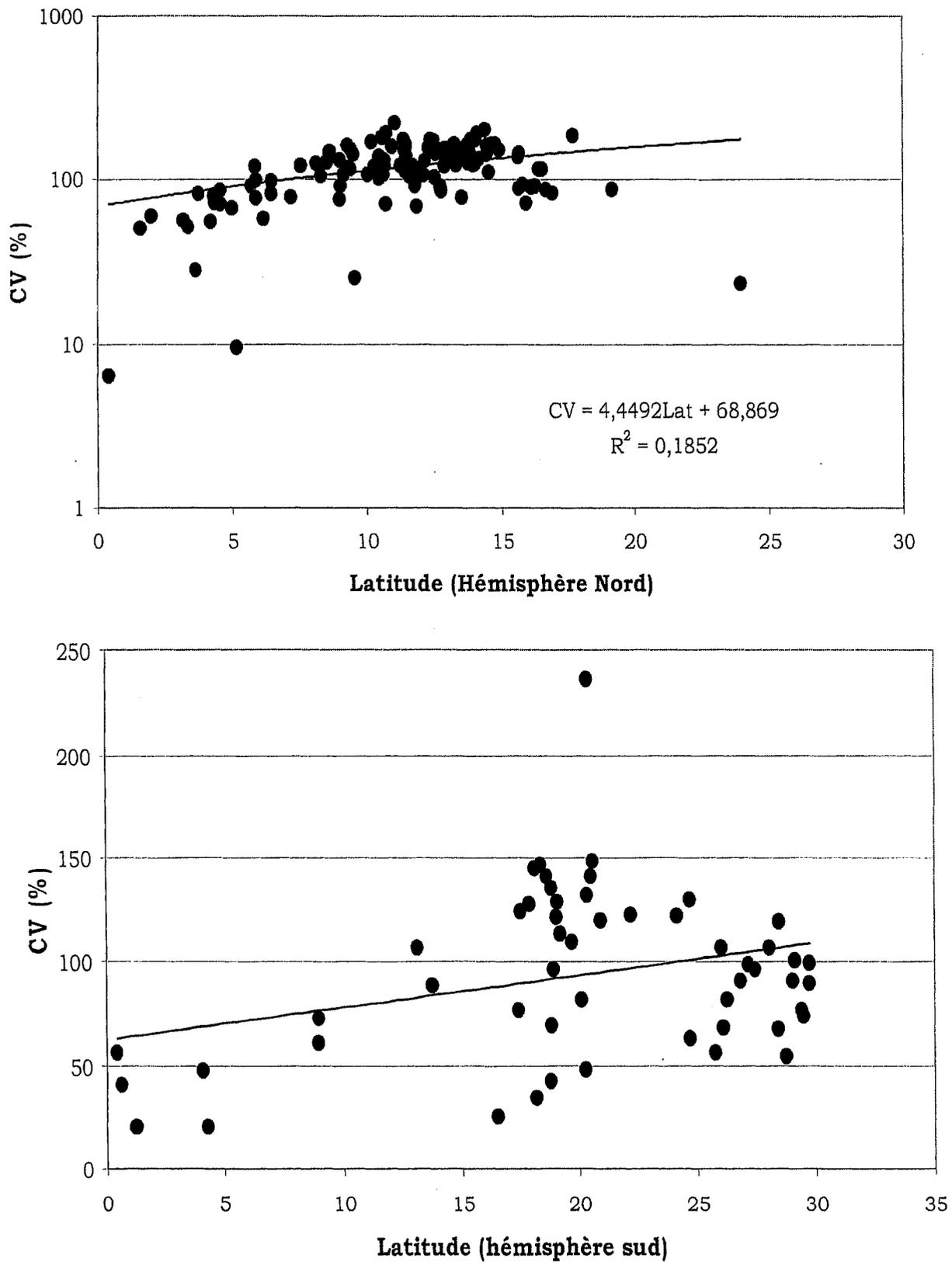


Figure 3.2 : Relation entre la latitude des stations et la variable hydrologique CV.

Il ressort de ces considérations que la latitude exerce une influence sur la variabilité spatiale de certaines variables hydrologiques en Afrique aussi bien dans l'Hémisphère Nord que dans l'Hémisphère Sud.

3.2. Les régimes hydrologiques saisonniers en Afrique

3.2.1. Classification

La classification hiérarchique ascendante par la méthode de Ward nous a permis de regrouper les stations analysées en six régimes hydrologiques saisonniers. Les valeurs moyennes des variables hydrologiques de chaque régime sont consignées dans les tableaux 3.3. Le dendrogramme obtenu par la méthode de Ward est présenté à la figure 3.3. Il convient de faire remarquer qu'en raison du nombre très élevé des stations analysées, les numéros des stations ne sont pas lisibles sur ce dendrogramme. Toutefois, dans les données de sortie, le programme propose le nombre maximum optimal de classes après le processus d'itération. En tenant compte de ce nombre de classes (régimes hydrologiques), nous avons procédé à une classification à deux niveaux. Le premier niveau a consisté à regrouper les classes (régimes hydrologiques) en deux catégories en fonction du caractère permanent ou non de l'écoulement. Nous avons ainsi distingué deux catégories de régimes : les régimes hydrologiques permanents et les régimes temporaires. Ces derniers sont caractérisés par l'absence de l'écoulement pendant au moins un mois durant l'année. Ce critère est fort important des points de vue climatique et écologique. Du point de vue climatique, il permet de différencier les cours d'eau des climats humides de ceux des climats secs. Du point de vue écologique, il permet de distinguer des rivières dont le cycle vital annuel des populations aquatiques est interrompu en raison de l'absence de l'eau pendant une certaine période de ceux dont ce cycle ne connaît aucune interruption (Poff et Ward, 1989). Dans chacune de deux catégories, nous avons regroupé les rivières en trois régimes hydrologiques distincts en fonction des variables hydrologiques analysées. En définitive, nous avons distingué six régimes hydrologiques saisonniers en Afrique.

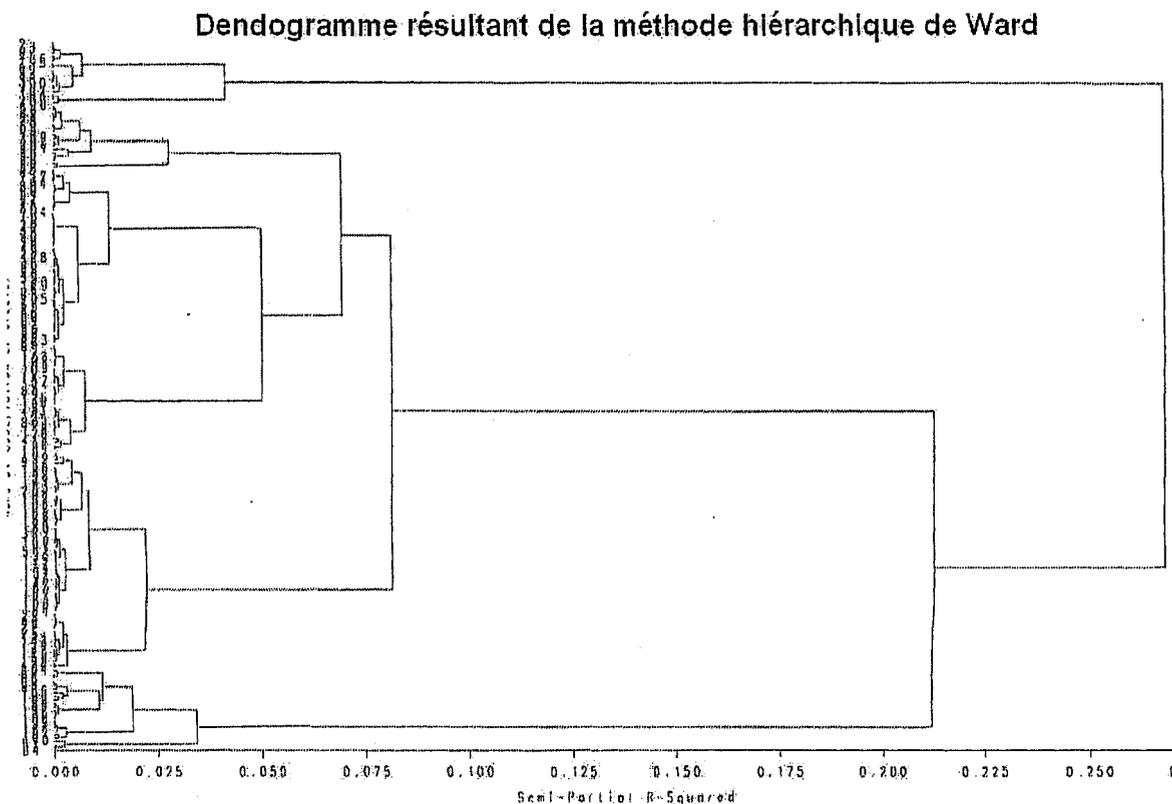


Figure 3.3 : Dendrogramme résultant de la méthode hiérarchique de Ward

3.3. Caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers

Pour différencier ces six régimes, nous avons comparé leurs valeurs moyennes des variables hydrologiques au moyen de l'analyse de variance à un seul critère de classification et du test de Tukey (Tableau 3.4.). L'analyse de variance a révélé que toutes les moyennes des variables hydrologiques étaient significativement différentes (Tableau 3.4.). Pour identifier les régimes dont les moyennes sont significativement différentes, nous avons appliqué le test de Tukey dont un cas est illustré au tableau 3.5. Il ressort de ce tableau que les valeurs de coefficients de variation (CV) sont significativement différentes hormis pour les régimes II et VI, ainsi que pour les régimes III et V.

TABLEAU 3.3

Classification et caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers en Afrique

| Variables hydrologiques | Régimes hydrologiques permanents | | | Régimes hydrologiques temporaires | | |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|
| | Régime I | Régime II | Régime III | Régime IV | Régime V | Régime VI |
| HIV | 10,3 (6,76) | 8,0 (6,62) | 1,9(1,2) | 4,6(8,01) | 0,10(0,01) | 39,7(16,8) |
| PRI | 19,4 (6,79) | 5,5(3,51) | 3,2(3,27) | 5,1(6,99) | 5,8(6,5) | 25,6 (11,9) |
| ETE | 49,8 (13,8) | 43,3(11,4) | 70,7(7,5) | 56,1 (20,4) | 88(8,1) | 12,8 (10) |
| AUT | 20,5 (8,6) | 43,2(7,76) | 24,2(8,6) | 34,3(17,1) | 6,2(5,4) | 21,9 (8) |
| PRI/HIV | 3,4 (4,21) | 0,96(0,75) | 3,2(6,9) | 7,1 (15,0) | 60,5(68) | 0,93 (0,83) |
| PRI/ETE | 0,44 (0,24) | 0,13 (0,09) | 0,04(0,04) | 0,1(0,17) | 0,07(0,09) | 4,5 ± 4,82 |
| ETE/HIV | 10,2(11,2) | 8,7(5,5) | 67,4 (98,0) | 88,8 (107,5) | 920 (145,4) | 0,56 (0,72) |
| CV | 77,9(30,28) | 103,6(17,7) | 147,1(14,1) | 131 (26,9) | 177(26,3) | 67,7(32,1) |
| MAM | 0,21(0,06) | 0,23(0,07) | 0,37 (0,04) | 0,37(0,25) | 0,43(0,08) | 0,19(0,06) |
| MIM | 0,03(0,04) | 0,01(0,01) | 0,003 (0,003) | 0 | 0 | 0,03(0,03) |
| DMAM* | Été | Été | Été | Été | Été | Hiver |
| DMIM* | Hiver | Hiver/Printemps | Hiver/Printemps | Hiver/Printemps | Hiver | Été |
| MSE | 0 (0) | 0(0) | 0(0) | 1,4 (1,1) | 5,4(2,1) | 0,04(0,20) |
| Log(MAM/MIM) | 0,93 (0,58) | 1,4 (0,58) | 2,6(0,83) | - | - | 1,01(0,68) |
| N | 62 | 50 | 31 | 18 | 18 | 23 |

N = nombre des stations. () = Écart type de la moyenne. Les valeurs qui apparaissent en gras permettent de différencier les régimes dans chacune de deux catégories. Les dates ont été remplacées par les saisons d'occurrence afin de mieux comparer les stations de deux hémisphères

TABLEAU 3.4

Comparaison des valeurs moyennes des variables hydrologiques de six régimes hydrologiques saisonniers en Afrique. Résultat de l'analyse de variance à un seul critère de classification

| Variables | Sources de variation | SCE | CM | F |
|-----------|----------------------|---------------|------------|---------|
| HIV | Régimes | 24746,07 | 4949,21 | 79,06 |
| | Rivières | 12269,97 | 62,60 | |
| PRI | Régimes | 13730,97 | 2746,19 | 63,97 |
| | Rivières | 8413,82 | 42,93 | |
| ETE | Régimes | 73846,34 | 14769,27 | 96,22 |
| | Rivières | 30084,25 | 153,49 | |
| AUT | Régimes | 25402,29 | 5080,46 | 60,21 |
| | Rivières | 16539,41 | 84,39 | |
| PRI/HIV | Régimes | 55219,67 | 11043,94 | 25,48 |
| | Rivières | 84964,87 | 433,49 | |
| PRI/ETE | Régimes | 378,14 | 75,63 | 28,74 |
| | Rivières | 515,85 | 2,63 | |
| ETE/HIV | Régimes | 1327440000000 | 2654879,26 | 609,86 |
| | Rivières | 853238,08 | 4353,26 | |
| CV | Régimes | 228705,82 | 45741,16 | 72,3 |
| | Rivières | 123955,49 | 6,32 | |
| MAM | Régimes | 1,45 | 0,29 | 31,99 |
| | Rivières | 1,77 | 0,009 | |
| MIM | Régimes | 28,38 | 5,68 | 8135,58 |
| | Rivières | 0,14 | 0,001 | |
| MS | Régimes | 492,20 | 98,44 | 197,53 |
| | Rivières | 97,68 | 0,50 | |
| DMAM | Régimes | 677851,24 | 135570,25 | 110,98 |
| | Rivières | 239419,68 | 1221,53 | |
| DMIM | Régimes | 614894,33 | 122978,87 | 130,69 |
| | Rivières | 184441,85 | 941 | |
| MAM/MIM | Régimes | 163,03 | 32,61 | 92,26 |
| | Rivières | 69,27 | 0,35 | |

SCE = somme des carrés; CM = carré moyenne; Toutes les valeurs de F (test de Fisher-Snedecor) sont significatives au seuil de 0,0001%.

TABLEAU 3.5

Comparaison par paire des moyennes des valeurs de coefficients de variation entre les régimes hydrologiques. Valeurs de p obtenues avec le test de Tukey.

| | I | II | III | IV | V | VI |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| I | 1 | | | | | |
| II | 0,000 | 1 | | | | |
| III | 0,000 | 0,000 | 1 | | | |
| IV | 0,000 | 0,000 | 0,005 | 1 | | |
| V | 0,000 | 0,000 | 0,263 | 0,000 | 1 | |
| VI | 0,000 | 0,556 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1 |

Les valeurs de $p < 0,05$ sont statistiquement significatives

3.4. Description des régimes hydrologiques saisonniers

3.4.1. Les régimes hydrologiques saisonniers permanents

En ce qui concerne les régimes saisonniers hydrologiques permanents, nous avons distingué trois principaux régimes qui regroupent 72% des stations analysées (tableau 3.3. et figure 3.4.).

Deux variables hydrologiques permettent de différencier ces trois régimes permanents : le coefficient de variation des débits mensuels (CV) et le rapport entre les débits printaniers et les débits estivaux. Ainsi, le premier régime est caractérisé par des coefficients de variation très faibles et par un rapport entre les débits printaniers et estivaux « relativement élevé ». Le second régime se caractérise par des valeurs modérées de ces deux variables. Le dernier régime se distingue des deux précédents par une hausse significative des valeurs de CV mais une baisse significative du rapport AJ/JS. Il se caractérise aussi par des valeurs élevées des coefficients d'immodération et des débits estivaux mais des valeurs faibles des débits hivernaux et printaniers. En tenant compte de toutes ces différences, on peut caractériser les trois régimes permanents de la manière suivante :

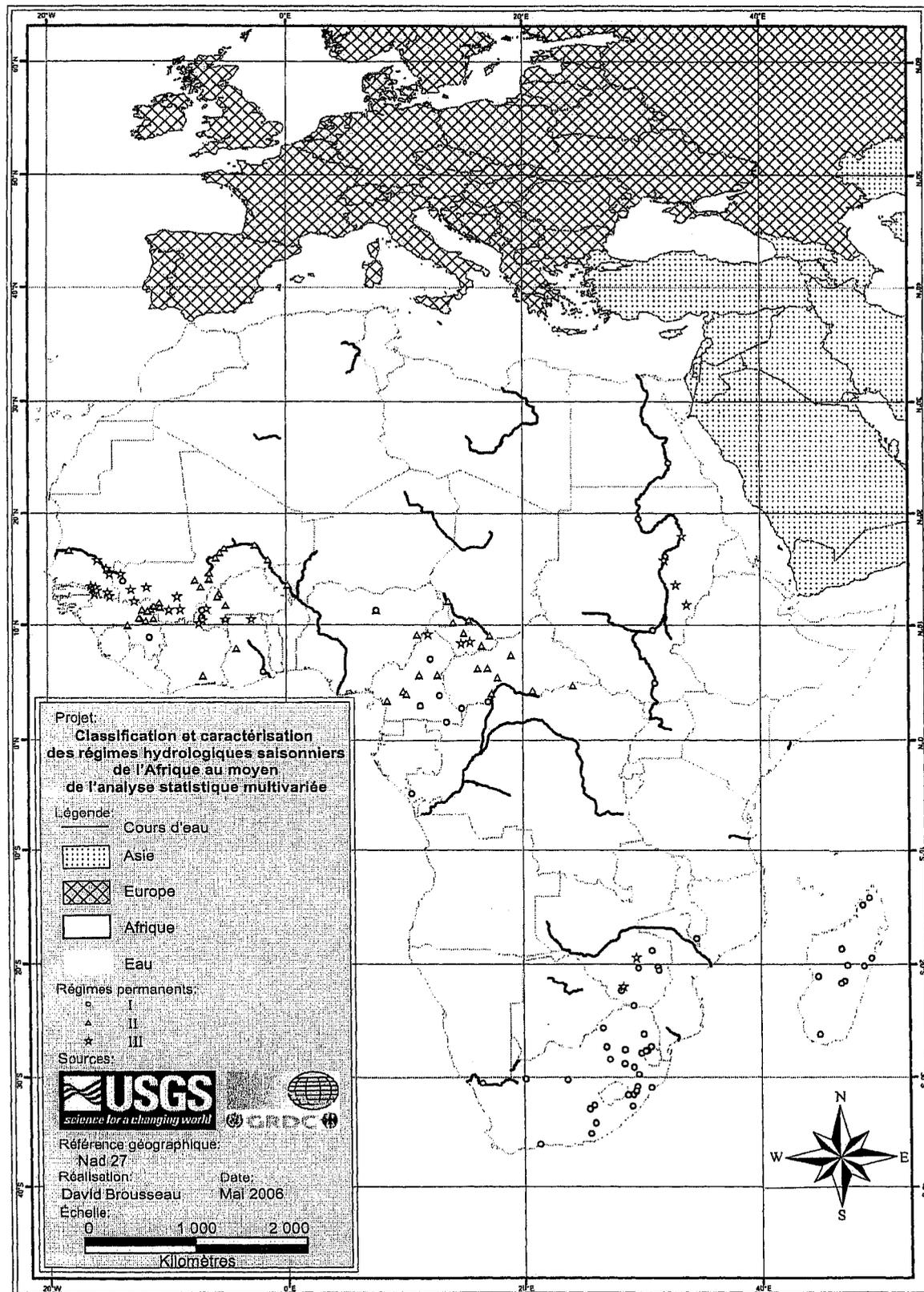


Figure 3.4: Distribution spatiale des stations appartenant aux trois régimes hydrologiques permanents

- Le régime permanent I est un régime fortement pondéré et modéré (fig.3.5). La fluctuation inter-mensuelle des débits est plus faible que celle des deux autres régimes. Les débits printaniers sont plus élevés. Ainsi, à toute saison, le coefficient saisonnier de l'écoulement est supérieur à de 10%. Ceci signifie que les débits restent soutenus durant toute l'année. De plus, les débits mensuels minimums surviennent tôt dans l'année (janvier ou février). La période des hautes eaux est observée seulement en été. Ce régime est observé en Afrique centrale (Congo-Brazzaville, Congo-Kinshasa, République centrafricaine, le sud du Tchad) en Afrique occidentale (Cote d'ivoire, Nigeria, Guinée Forestière) en Afrique australe (Le nord de l'Afrique du sud, le Mozambique, le Zimbabwe) et sur l'île de Madagascar.

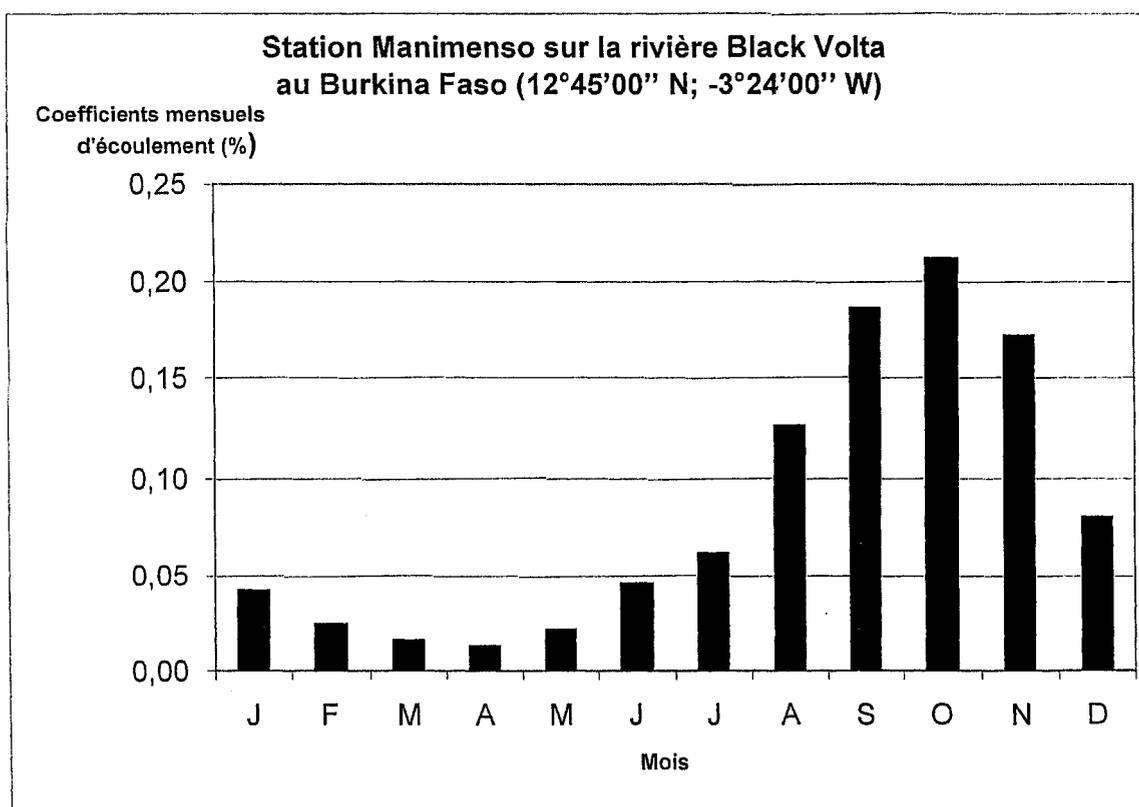


Figure 3.5 : Exemple d'Hydrogramme mensuel d'une station du régime de type I

- Le régime permanent II est un régime moyennement modéré et pondéré par rapport aux deux autres régimes (fig.3.6). Il est en outre caractérisé par des débits automnaux plus élevés. Contrairement aux deux autres régimes, la période des hautes eaux s'étend sur deux saisons, à savoir en été et en automne. Les débits minimums mensuels sont enregistrés à la fin de la saison hivernale (mars) et au début du printemps (Avril). Ce régime est observé seulement dans l'hémisphère nord en Afrique centrale et occidentale. C'est un régime qui caractérise le fleuve Niger et ses affluents. Il se situe un peu au nord du régime I.

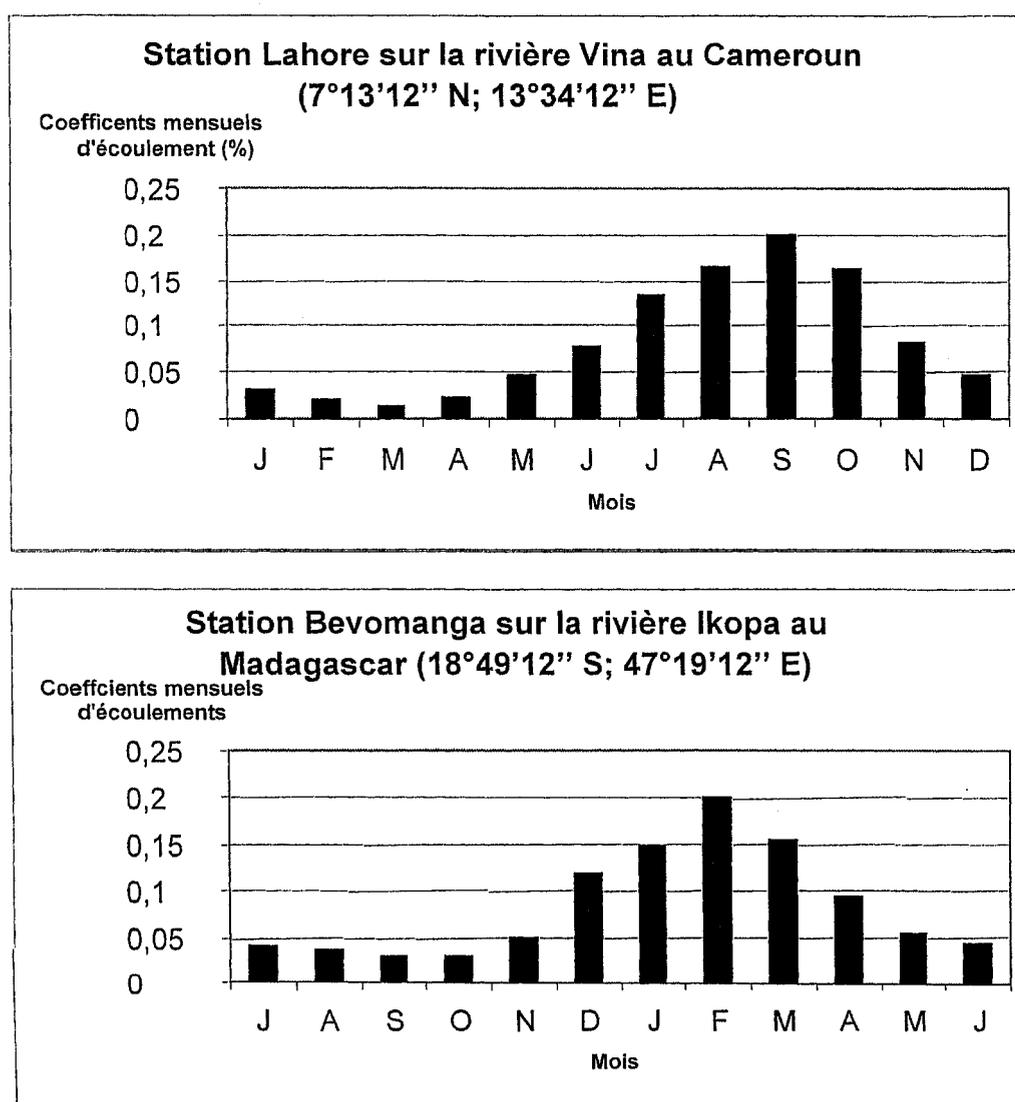


Figure 3.6 : Exemple d'Hydrogrammes mensuels des stations du régime de type II

- Le régime permanent III est un régime faiblement pondéré et modéré (fig.3.7). Par conséquent, la variabilité inter-mensuelle des débits est plus forte que celle de deux autres régimes. De plus, il est caractérisé par des débits estivaux très élevés ; ce qui se traduit par une hausse du coefficient d'écoulement des débits moyens mensuels maximums et du rapport entre les débits estivaux et hivernaux. En revanche, les débits moyens mensuels minimums et saisonniers hivernaux diminuent significativement. Ce régime est surtout observé dans l'hémisphère nord observé à l'intérieur de l'Afrique centrale et occidentale. Il caractérise le fleuve Sénégal.

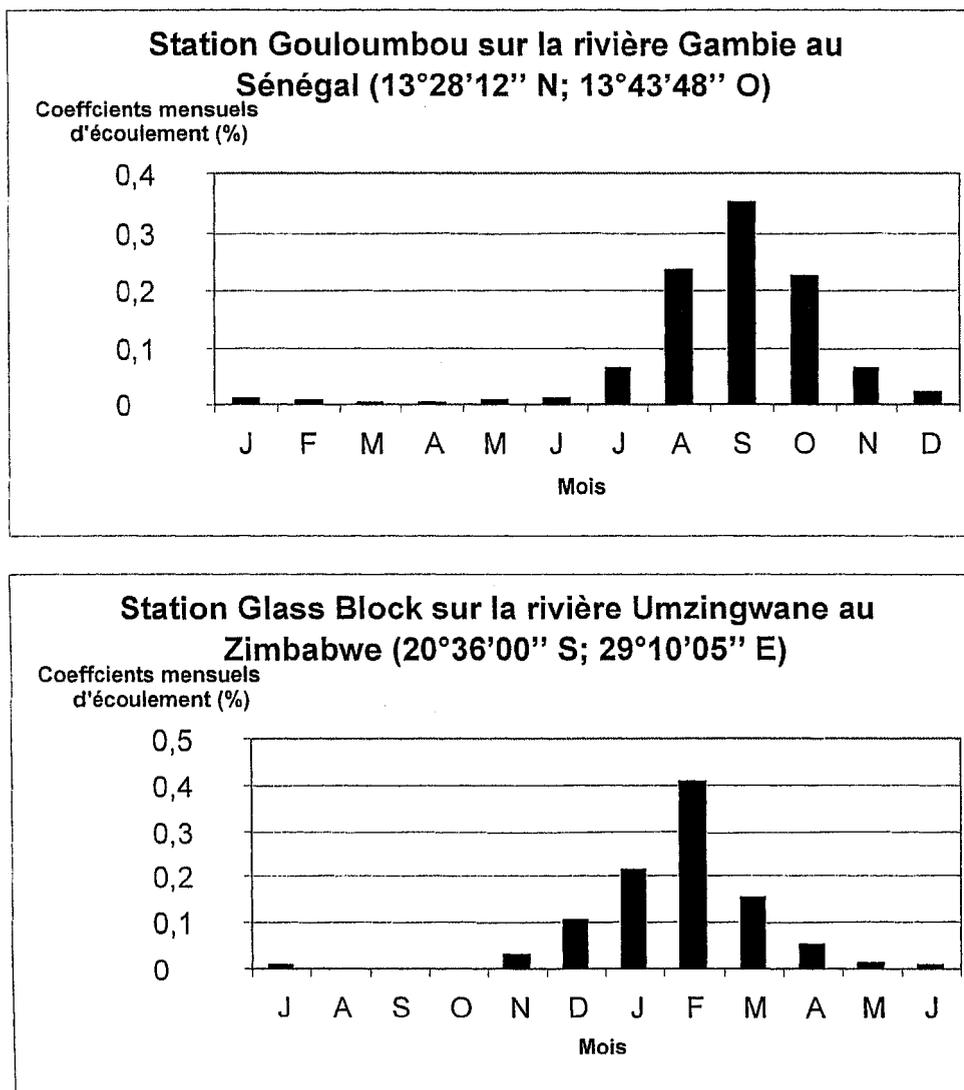
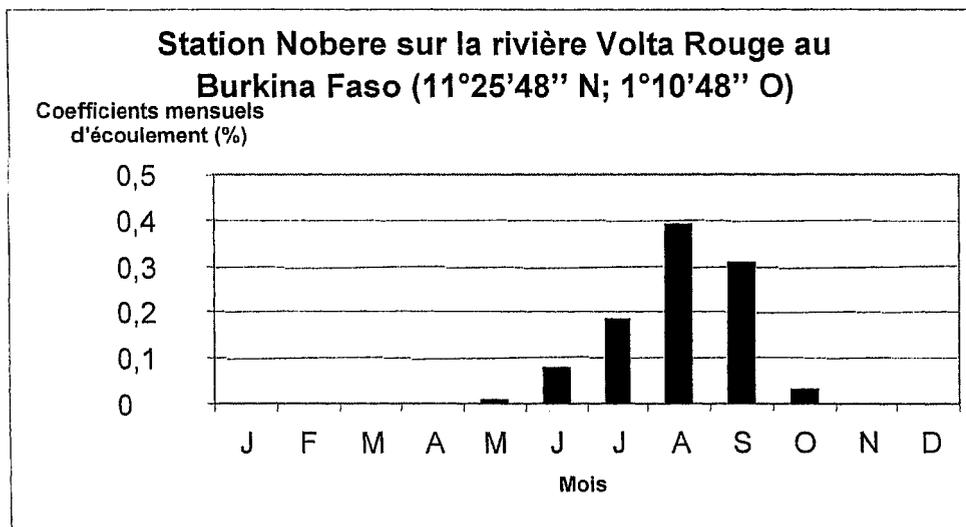


Figure 3.7 : Exemple d'Hydrogrammes mensuels des stations du régime de type III

3.4.2. Les régimes hydrologiques saisonniers temporaires

Quant aux régimes hydrologiques à écoulement temporaire, nous avons différencié aussi trois types de régimes sur la base de cinq variables hydrologiques : les coefficients de variation, les débits saisonniers hivernaux et estivaux, le rapport entre ces deux débits ainsi que le nombre de mois sans écoulement (Tableau 3.3. et figure 3.11.).

- Le régime temporaire IV se distingue du régime précédent par une hausse des débits hivernaux, une baisse des débits estivaux et du rapport entre les débits estivaux et les débits hivernaux (fig.3.8). De plus, le nombre de mois sans écoulement et la variabilité inter-mensuelle des débits diminuent. Ce régime est observé à l'intérieur de l'Afrique occidentale principalement au sud du Mali (fleuve Niger et ses affluents) en Afrique australe (Zimbabwe).



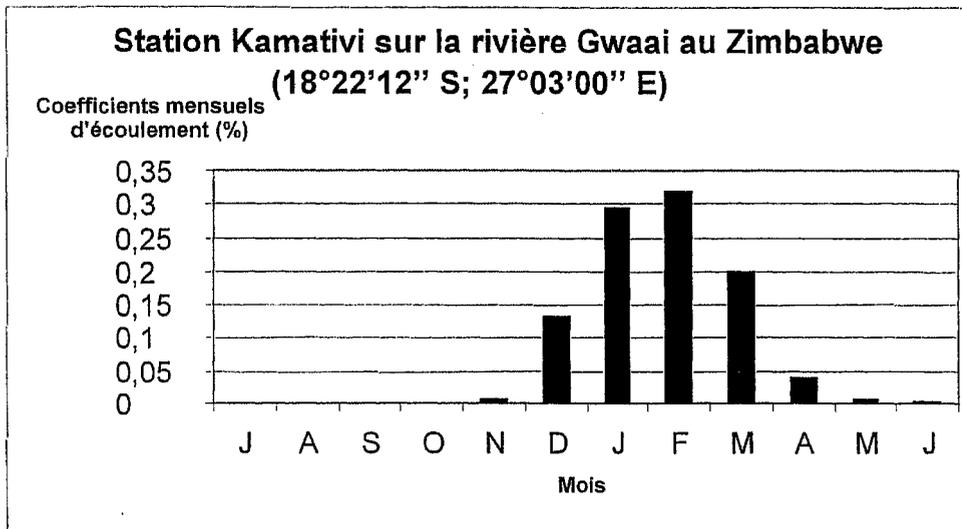
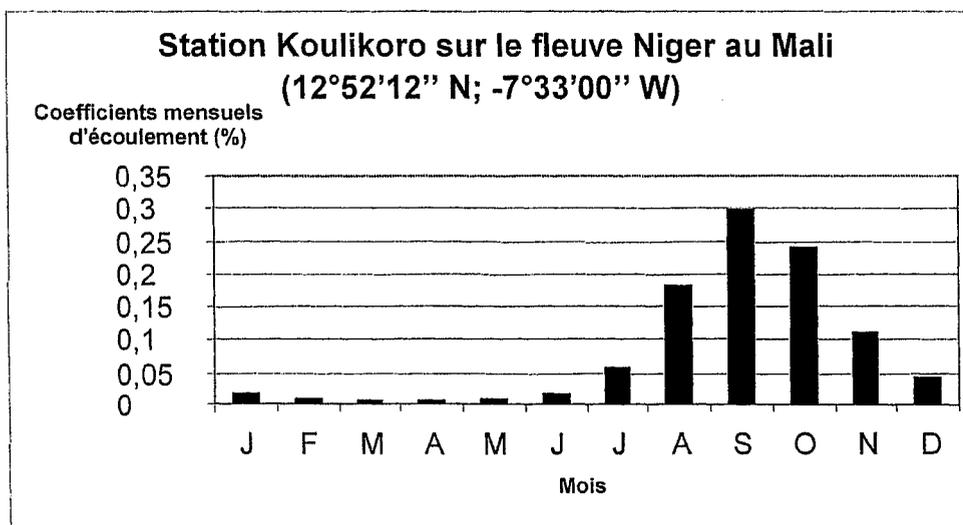


Figure 3.8 : Exemple d'Hydrogrammes mensuels des stations du régime de type IV

- Le régime temporaire V est caractérisé par des débits hivernaux très faibles mais des débits estivaux très élevés, le rapport entre ces deux débits devient alors très élevé (fig.3.9). De plus, le nombre des mois sans écoulement est le plus élevé. Il est en moyenne de 5 mois. On notera aussi que c'est un régime très impondéré; ce qui traduit une forte variabilité intermensuelle des débits. Ce régime est observé principalement au Burkina-Faso sur le fleuve Niger.



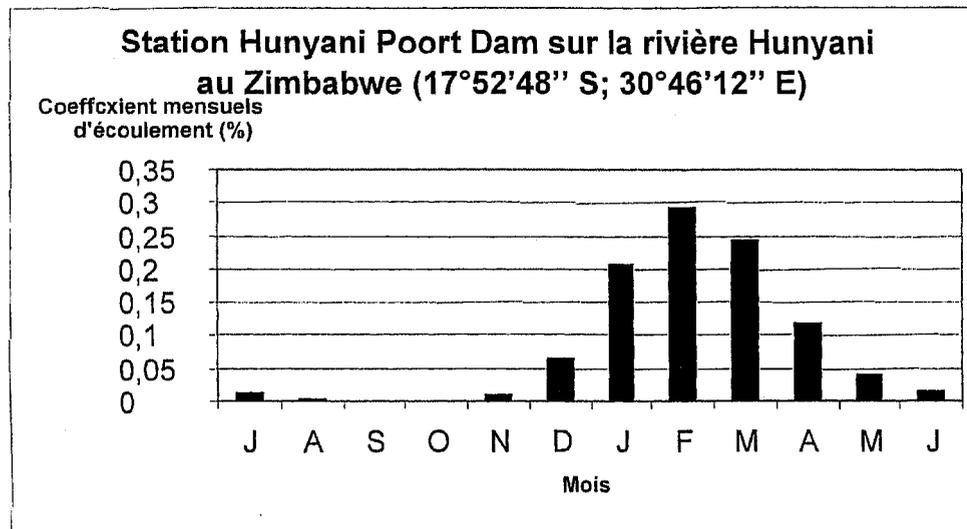


Figure 3.9 : Exemple d'Hydrogrammes mensuels des stations du régime de type V

- Le régime temporaire VI est un régime caractérisé par des débits hivernaux très élevés mais des débits estivaux et une variabilité intermensuelle des débits faibles (fig.3.10). Contrairement aux deux régimes précédents, le caractère temporaire de l'écoulement ne semble pas se produire chaque année car le nombre moyen des mois sans écoulement est inférieur à 1. L'interruption de l'écoulement surviendrait alors que lors des années particulièrement sèches. La durée maximale de cette interruption ne dépasse, d'ailleurs, guère 1 mois. C'est sans surprise que ce régime est observé dans le nord (Maroc) et le sud (Afrique du sud) du continent africain, régions qui baignent dans le climat méditerranéen.

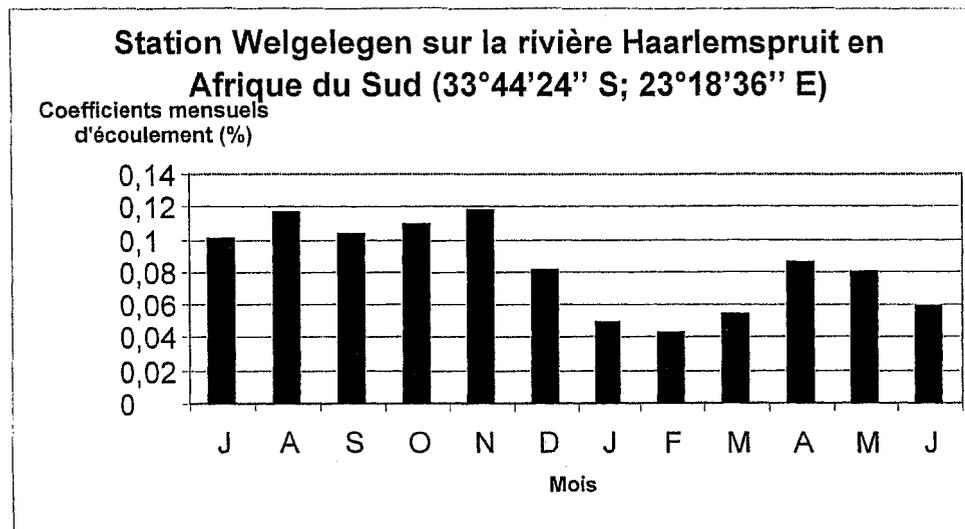
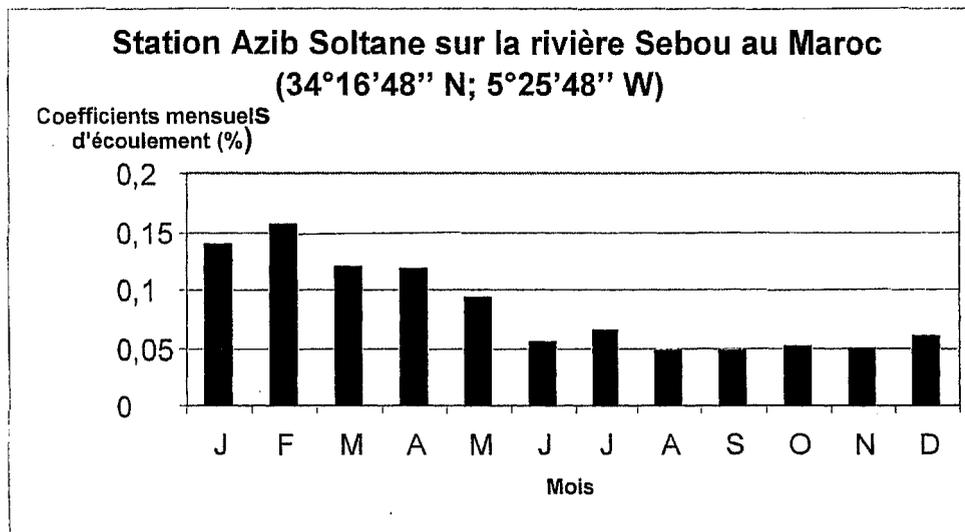


Figure 3.10 : Exemple d'Hydrogrammes mensuels des stations du régime de type VI.

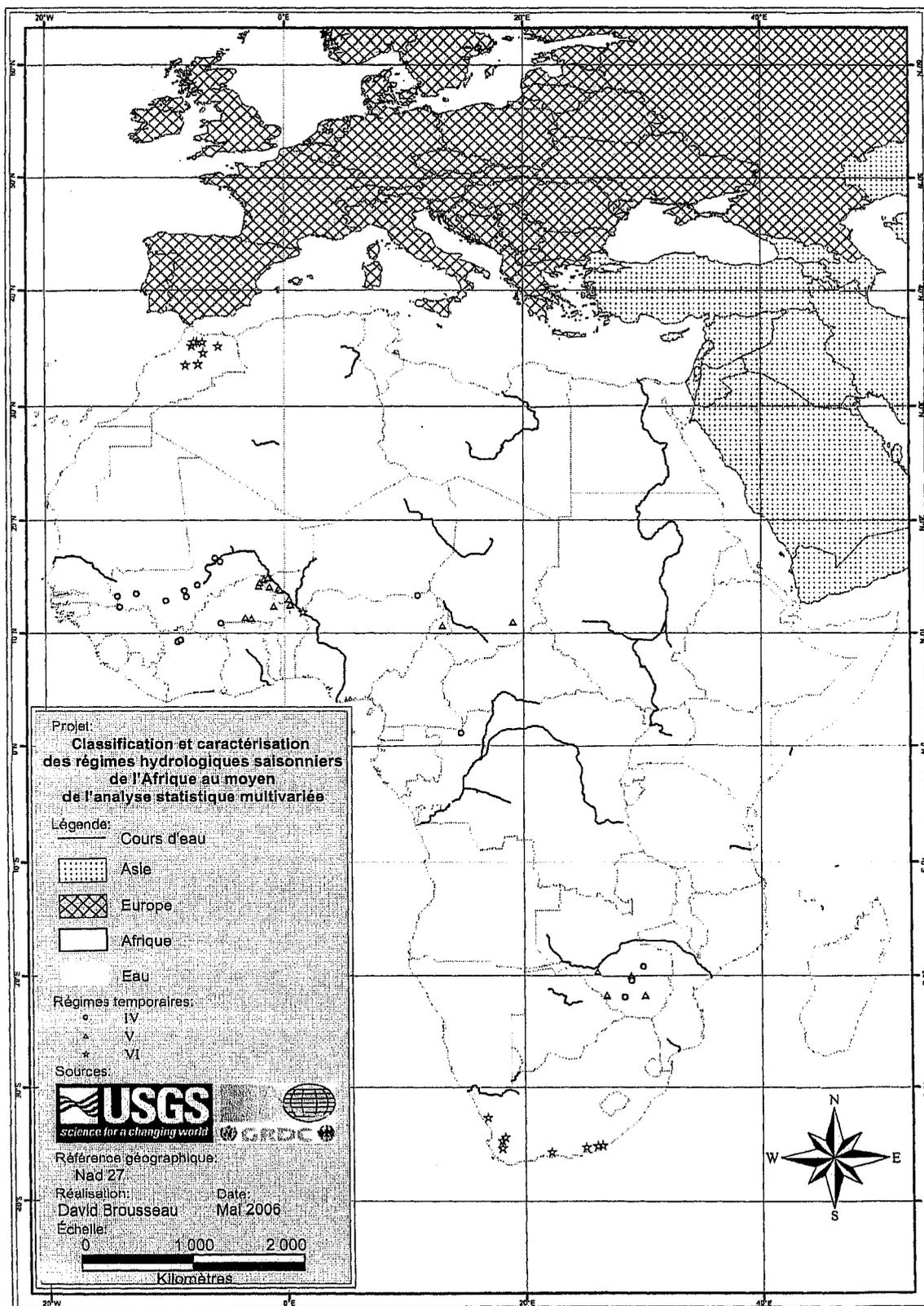


Figure 3.11 : Distribution spatiale des stations appartenant aux trois régimes hydrologiques temporaires.

3.5. Discussion et conclusion

La variabilité spatiale des variables hydrologiques et des régimes hydrologiques qui en résultent est influencée par de nombreux facteurs. Depuis fort longtemps, la proximité géographique, définie notamment par la latitude et la longitude, a été considérée comme principal facteur de variabilité spatiale des variables et des régimes hydrologiques. Ainsi, les régimes hydrologiques sont définis selon les modes d'alimentation des débits (régime pluvial, régime nival, régime glaciaire ou la combinaison de ces trois modes) ou selon les climats (régime hydrologique tropical, régime équatorial, régime méditerranéen, régime tempéré, etc.). L'autre critère utilisé est la topographie. On parle ainsi des régimes montagneux, des régimes des plaines ou des régimes côtiers. On peut aussi combiner ces différents critères pour définir et caractériser les régimes hydrologiques. La principale critique formulée à l'endroit de ces travaux fondés sur le regroupement des stations en régimes hydrologiques sur la base de la proximité géographique est l'absence des preuves pour démontrer l'influence de ce facteur sur la similarité hydrologique. Selon les défenseurs de cette thèse, les facteurs explicatifs de l'écoulement (telles que la superficie et la forme des bassins versants) ne constituent pas une garantie de sa similarité entre deux bassins versants spatialement contigus (Ouarda et al., 1999). C'est ainsi qu'en Ontario et au Québec, Ouarda et al. (2001) ont pu démontrer que la latitude et la longitude n'avaient aucune influence sur la variabilité spatiale des débits de crues analysés. Cette conclusion a poussé Assani et al. (2006a) à formuler un certain nombre d'hypothèses pour expliquer l'absence de cette influence de la latitude et de la longitude. Nous reprenons in extenso ces hypothèses.

- Cette absence peut être expliquée par le fait qu'on ne tient pas compte de toutes les caractéristiques des débits à une échelle d'analyse donnée. Selon cette hypothèse, l'influence de la proximité géographique peut s'exercer sur certaines caractéristiques des débits et non sur d'autres. Par conséquent, si on n'analyse pas les caractéristiques des débits qui sont influencées par la proximité géographique, on ne peut donc mettre en évidence son influence.

- Elle peut être expliquée par les méthodes d'analyse. En effet, les méthodes utilisées jusqu'à présent sont fondées sur les corrélations linéaires (corrélations canoniques). Mais le lien entre la proximité géographique et les débits ne peut pas être nécessairement linéaire. Par ailleurs, ces méthodes ne peuvent pas mettre en évidence cette influence lorsque celle-ci est latente.

- Elle peut être due aussi à l'échelle d'analyse. L'influence de la proximité géographique peut se manifester sur une échelle et disparaître sur une autre échelle. Ainsi, on peut postuler que l'influence de la proximité géographique soit plus forte aux échelles mensuelle ou annuelle qu'à l'échelle journalière. Cette influence dépend aussi du type des débits analysés. Ainsi par exemple, l'influence de la proximité géographique peut être plus forte pour les débits annuels minimums que pour les débits annuels maximums car ceux-ci sont très peu influencés par les caractéristiques des sols notamment.

- L'influence de la proximité géographique peut dépendre du climat et des caractéristiques physiographiques (orographie, lithologie, végétation) des bassins versants. Il est fort possible que cette influence soit plus manifeste dans certains types de climat et conditions physiographiques que dans d'autres.

- Enfin, cette influence peut dépendre aussi du nombre des stations analysées. Lorsque le nombre des stations analysées est insuffisamment distribué dans l'espace (répartition irrégulière), l'influence de la proximité géographique risque d'être masquée ou moins exprimée du fait que l'effet de la diversité spatiale des caractéristiques physiographiques et climatiques des sites sur les débits risque de ne pas être pris suffisamment en compte.

Dans une série de travaux entrepris au Québec et en Colombie-Britannique, Assani et al. (2005, 2006a, 2006b, 2006c) ainsi que Assani et Tardif (2005) ont pu vérifier ces différentes hypothèses. Dans ces différents travaux, ils ont démontré que la proximité géographique influençait seulement certaines variables hydrologiques, et par conséquent, cette influence pourrait être limitée sur la répartition spatiale des régimes hydrologiques. Cette conclusion impliquait aussi que la mise en évidence de l'influence

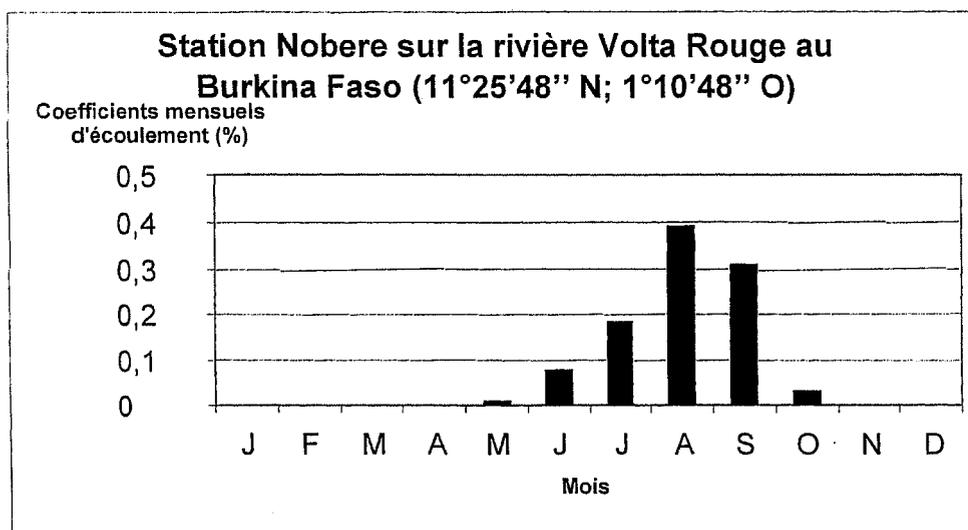
de la proximité géographique nécessite de prendre en considération toutes les caractéristiques des débits à une échelle d'analyse donnée. Ce qui justifiait l'application du concept de « régime des débits naturels » pour définir ces caractéristiques. Par ailleurs, les auteurs ont pu démontrer aussi que l'influence de la proximité géographique sur les régimes hydrologiques dépendait aussi de la diversité physiographique du territoire étudié. Dans ces travaux, les auteurs n'ont pas examiné l'effet lié à la localisation des stations sur deux hémisphères géographiques différents. L'objectif de notre mémoire était d'analyser cet effet. Le continent africain se prêtait mieux à ce genre d'étude.

À l'instar des autres travaux entrepris par Assani et al., nous avons utilisé deux approches statistiques pour analyser l'influence de la latitude et de la longitude sur la répartition spatiale des variables et des régimes hydrologiques. La première méthode utilisée fut l'analyse en composantes principales. Celle-ci fut appliquée à 13 variables hydrologiques définissant quatre caractéristiques des débits, à savoir, la magnitude-fréquence, la période d'occurrence et la variabilité intermensuelle des débits. Après rotation varimax des axes, l'application du critère de Cattell nous a permis de retenir seulement quatre composantes significatives dont la variance totale expliquée atteignait 78% environ. La première composante principale est corrélée aux débits saisonniers hivernaux et au rapport entre les débits saisonniers printaniers et estivaux. La seconde composante principale est corrélée aux coefficients de variation des débits mensuels et au débit moyen mensuel maximum. Quant à la troisième composante principale, elle est corrélée au débit moyen mensuel minimum et au coefficient d'immodération (rapport entre les débits moyens mensuels maximums et minimums). Enfin, la dernière composante principale est corrélée aux débits saisonniers automnaux. L'analyse de corrélation (méthode graphique) entre ces variables hydrologiques et la latitude et la longitude a pu démontrer que ces deux variables avaient une influence sur la variabilité spatiale de quelques variables hydrologiques. La latitude est significativement corrélée au CV (corrélation positive) et à AJ/JS (corrélation négative). Dans l'hémisphère sud, elle est significativement corrélée à MAM (corrélation positive) alors qu'elle l'est à JM (corrélation négative). Quant à la longitude, dans l'hémisphère nord, elle est significativement corrélée aux variables hydrologiques suivantes : JM, CV, MAM,

3.4.2. Les régimes hydrologiques saisonniers temporaires

Quant aux régimes hydrologiques à écoulement temporaire, nous avons différencié aussi trois types de régimes sur la base de cinq variables hydrologiques : les coefficients de variation, les débits saisonniers hivernaux et estivaux, le rapport entre ces deux débits ainsi que le nombre de mois sans écoulement (Tableau 3.3. et figure 3.11.).

- Le régime temporaire IV se distingue du régime précédent par une hausse des débits hivernaux, une baisse des débits estivaux et du rapport entre les débits estivaux et les débits hivernaux (fig.3.8). De plus, le nombre de mois sans écoulement et la variabilité inter-mensuelle des débits diminue. Ce régime est observé à l'intérieur de l'Afrique occidentale principalement au sud du Mali (fleuve Niger et ses affluents) en Afrique australe (Zimbabwe).



abondant durant cette saison. En effet, plus de 60% de l'écoulement annuel se produit en été qui correspond à la saison des pluies.

Lorsque le nombre des mois secs devient égal ou supérieur aux mois pluvieux, on passe à un climat sec. Le régime d'écoulement devient alors temporaire. Ainsi, pendant au moins un mois, les rivières se tarissent. Le premier régime temporaire (régime IV) est caractérisé par un nombre très réduit de mois sans écoulement. C'est un régime où les précipitations tombent en été et en automne. Ainsi, les débits hivernaux restent plus soutenus en hiver et au printemps que dans le régime permanent III. Ainsi, les deux régimes sont comparables en ce qui concerne la modération et la pondération des débits. Lorsque le nombre des mois secs devient plus élevé que celui des mois pluvieux, le climat devient semi-aride ou aride. Le nombre des mois sans écoulement augmente significativement. Les précipitations tombent seulement en été. Le régime devient ainsi très impondéré et très immodéré (régime V). Le dernier régime temporaire (régime VI) est un régime du climat méditerranéen avec des écoulements abondants en hiver mais faibles en été. Ce qui le rend plus pondéré et plus modéré que les régimes tropicaux secs.

Ces résultats démontrent que les régimes hydrologiques saisonniers de l'Afrique se calquent sur ceux des régimes pluviométriques. Il s'ensuit qu'en Afrique, le climat est le principal facteur de variabilité spatiale des régimes hydrologiques. Par conséquent, cette variabilité spatiale est influencée en partie par la proximité géographique. Toutefois, malgré cette influence, deux stations situées dans deux hémisphères différents peuvent être regroupées dans une même région hydrologique homogène en raison de la symétrie des zones climatiques par rapport à l'équateur géographique.

Enfin, l'apport significatif de notre travail est de proposer une classification et une caractérisation des régimes hydrologiques saisonniers en Afrique en appliquant le concept de « régime des débits naturels ». Ce concept a permis de définir de nombreuses variables hydrologiques aux échelles mensuelles et saisonnières. L'analyse de ces variables au moyen des méthodes statistiques multivariées a permis de différencier six régimes hydrologiques qui sont influencés par les régimes pluviométriques. De plus, la

caractérisation des différents régimes hydrologiques saisonniers par des variables quantitatives constitue un excellent outil pour le suivi les changements environnementaux provoqués par les activités anthropiques et des changements climatiques. C'est l'apport pratique de cette étude. Par ailleurs, notre étude a permis d'établir de manière claire les différences entre les régimes en fonction des climats. Cette distinction n'existe pas dans la classification proposée par Pardé (1955). Ceci constitue un autre apport scientifique de notre travail.

BIBLIOGRAPHIE

- ARNELL N. 1992. Impacts of climatic change on river flow regime in the UK. *Journal of Institut of Water and Environment Management*, **6**, 432-442.
- ASSANI A.A., LAJOIE F., TARDIF S., BROUSSEAU D., CAMPEAU S. – Classification et caractérisation des régimes saisonniers de la Colombie Britannique (Canada). Influence de la proximité géographique. Soumis au *The Canadian Geographer*.
- ASSANI A.A. & TARDIF S. 2005. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche Éco-géographique. *Revue des Sciences de l'Eau*, **18**, 247-266.
- ASSANI A.A., TARDIF S., LAJOIE F. 2006. Statistical analysis of factors affecting the spatial variability of annual minimum flow characteristics in a cold temperate continental region (Southern Québec, Canada). *Journal of Hydrology*, **328**, 753-763.
- ASSANI A.A., TARDIF S., BENSEGHIR S., CHALIFOUR A., MESFIOUI M. 2006. Développement d'une nouvelle méthode de régionalisation basée sur le concept de "régime des débits naturels" : La méthode éco-géographique. *Revue des Sciences de l'Eau*, **19**, 365-380.
- BEGUIN H., 1979. *Méthodes d'analyse géographique quantitative*. Litec, Paris.
- BIGGS B.J.F., NIKORA V.I., SNELDER T.H. 2005. Linking scales of flow variability to lotic ecosystems structure and function. *Rivers Research and Applications*, **21**, 283-298.
- BLANCH S.J., WALKER K.F., GANF G.G. 2000. Water regimes and littoral plants in four weir pools of the river Murray, Australia. *Regulated Rivers : Research and Management*, **16**, 445-456.
- BRICQUET J.P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M. et OLIVRY J.C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *PHI-V*, **16**, 83-95.

- CATTEL R.B., 1966. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, **1**, 245-276
- CLAUSSEN B., BIGGS, B.J.F., 2000. Flow variable for ecological studies in temperature streams: grouping based on covariance. *Journal of Hydrology*, **237**, 184-197.
- DAGNELIE P. 1986. *Analyse statistique à plusieurs variables*. Les presses agronomiques de Gembloux, Gembloux, 4^{ème} édition.
- DYER F.J., THOMS M.C. 2006. Managing river flows for hydraulic diversity: an example of an upland regulated gravel-bed river. *River Research and Applications*, **22**, 257-267.
- FLEMING S.W. 2005. Comparative analysis of glacial and nival streamflow regimes with implications for lotic habitat quantity and fish species richness. *River Research and Applications*, **21**, 363-379.
- GOTTSCHALK L. 1985. Hydrological regionalization of Sweden. *Hydrological Sciences Journal*, **30**, 65-83.
- GOTTSCHALK L, JENSEN J.L., LUNDQUIST D., SOLANIE R., TOLLAN A., 1979. Hydrological regions in nord countries. *Nordic Hydrology*, **10**, 273-276.
- GREHYS, 1996. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, **186**, 63-84.
- HAINES A.T., FINLAYSON B.L., McMAHON T.A., 1988. A global classification of river regimes. *Applied Geography*, **8**, 255-272.
- HARRIS, N.M., GURNELL, A.M., HANNAH D.M & PETTS G.E. 2000. Classification of river regimes : a context for hydroecology. *Hydrological Processes*, **14**, 2831-2848.
- HART D.D., JOHSON T.E., BUSHAW-NEWTON K.L., HORWITZ R.J., BEDNAREK A.T., CHARLES D.F., KREEGER D.A., VELINSKY D.J. 2002. Dam Removal : challenges and opportunities for ecological research and river restoration. *Bioscience*, **52**, 669-681.

- HISDAL H., 2000. *Tests for changes in flow regimes. In : Kundzewicz, ZW et Robson, A. Detecting Trend and other changes in hydrological data. WMO/TD-No. 1013, Geneva, WMO, p93-101.*
- HUBERT P., CARBONEL J.P. et CHAOUICHE A. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *Journal of Hydrology*, **110**, 349-367.
- KAISER H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, **20**, 141-151.
- KRASOVSKAIA I. 1995. Quantification of the stability of river low regimes. *Hydrological Sciences Journal*, **40**, 587-598.
- KRASOVSKAIA I. 1996. Sensitivity of the stability of river flow regimes to small fluctuations in temperature. *Hydrological Sciences Journal*, **41**, 251-264.
- KRASOVSKAIA I., GOTTSCHALK L, 1996. Stability of river flow regimes. *Nordic Hydrology*, **41**, 173-191.
- KRASOVKAIA I., ARNELL N., GOTTSCHALK L. 1994. Flow regime in north and western Europe : development and application of procedures for classifying flow regimes. *IAHS Publ.*, **221**, 185-193.
- LEBART L., MORINEAU A., PIRON M. 2004. *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. Dunod, Paris.
- LEROUX M. 1996. *La dynamique du temps et du climat*. Masson, Paris.
- LVOVICH M.I. 1973. *The world water*. MIR, Moscou.
- MAHE G. et OLIVRY J.C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, **6**, 109-17.
- MUSY A. & HIGY C. 2003. *Hydrologie. Une science naturelle*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.

- NILSSON C. & SVEDMARK M. (2002) Basic principles and ecological consequence of changing water regimes: Riparian plant communities, *Environmental management*, **30**, 648-480.
- OUARDA T.B.M.J., GIRARD C., CAVADIAS G.S., BOBÉE B. 2001. Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *Journal of Hydrology*, **254**, 157-173.
- OUARDA T.B.M.J., LANG M, BOBÉE B., BERNIER J., BOIS P., 1999. Synthèse de modèles régionaux d'estimation de crue utilisés en France et au Québec. *Revue des Sciences de l' Eau*, **12**, 155-182.
- PARDÉ M. 1955. *Fleuves et rivières*. Collin, Paris.
- PEGGS, M.A. & PIERCE C.L. 2002. Classification of reaches in the Missouri and lower Yellowstone rivers based on flow characteristics. *River Research and Applications*, **18**, 31-42.
- PETTIT N.E., FROEND R.H., DAVIES P.M. 2001. Identifying the natural flow regime and the relationship with riparian vegetation for two contrasting western Australian rivers. *Regulated Rivers : Research and Management*, **17**, 201-215.
- POFF N.L., 1996. A hydrogeography of unregulated streams in the United States and an examination of scale-dependance in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology*, **36**, 71-91.
- POFF N.L, ALLAN J.D., BAIN M.B., KARR J.R., PRESTEGAARD K.L., RICHTER B.D., SPARKS R.E, STROMBERG J.C., 1997. The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, **47**, 769-784.
- POFF N.L., OLDEN J.D., PEPIN D.M., BLEDSOE, B.P. 2006. Placing global stream flow variability in geographic and geomorphologic contexts. *River Research and Application*, **22**, 149-166.
- POFF N.L., WARD J.V., 1989. Implications of stream variability and predictability for lotic community structure : a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **46**, 1805-1818.

- REID M.A., OGDEN R.W. 2006. Trend, variability or extreme event? the importance of long-term perspectives in river ecology. *River Research and Applications*, **22**, 167-177.
- RICHTER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P., 1996. A method for assessing hydrologic alterations within ecosystems. *Conservation Biology*, **10**, 1163-1174.
- RITCHER B.D., BAUMGARTNER J.V., WIGINGTON R., BRAUN D.P. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology*, **37**, 231-249.
- RITCHER B.D., BAUMGARTNER J.V., BRAUN D.P., POWELL J., 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers : Research and Management*, **14**, 329-340.
- RICHTER B.D., RICHTER H.E. 2000. Prescribing flood regimes to sustain riparian ecosystems along meandering rivers. *Conservation Biology*, **14**, 1467-1478.
- SANZ D.B., Garcia DEL JALON D. 2005. Characterisation of streamflow regimes in central Spain, based on relevant hydrobiological parameters. *Journal of Hydrology*, **310**, 266-279.
- SERVAT E., PATUREL J.-E., LUBES-NIEL H., KOUAME B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M. et MARIEU B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, **12**, 363-387.
- SHELDON F., THOMS M.C. 2006. Relationships between flow variability and macroinvertebrate assemblage composition : data from four Australian dryland rivers. *River Research and Applications*, **22**, 219-238.
- SIEW-YAN-YU T.O., J. ROUSSELLE J., JACQUES G., NGUYEN V.T.V., 1998. Régionalisation du régime des précipitations dans la région des Bois-francs et de l'Estrée par l'analyse en composantes principales. *Canadian Journal of Civil Engineers*, **25**, 105-1058.
- SNELDER T.H., BIGGS B.J.F., WOODS R.A. 2005. Improved eco-hydrological classification of rivers. *River Research and Applications*, **21**, 609-628.

THARME R.E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and applications of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications*, **19**, 397-441.