

UNIVERSITE DE YAOUNDE I
UNIVERSITY OF YAOUNDE I



FACULTE DES SCIENCES
FACULTY OF SCIENCE

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VEGETALES
DEPARTMENT OF PLANT BIOLOGY

**Facteurs climatiques, régimes hydrologiques
et production de l'énergie hydroélectrique au
Cameroun : cas du bassin du fleuve Sanaga**

THESE

Présentée et soutenue en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat/PhD en Biologie des
Organismes Végétaux

Option : Botanique et Ecologie
Spécialité : Hydrométéorologie

Par :

BESSOH BELL Stanislas

DESS ès Sciences de l'Environnement

Matricule : 89H249



Jury

Président : BELL Joseph Martin, Professeur, Université de Yaoundé I

Rapporteurs : TCHINDJANG Mesmin, Professeur, Université de Yaoundé I

BIYE Elvire Hortense, Maître de conférences, Université de Yaoundé I

Membres : NDONGO DIN, Professeur, Université de Douala

Année 2022



Département de Biologie et Physiologie végétales
Department of Plant Biology

ATTESTATION DE CORRECTION

Nous soussignés, membres de Jury de soutenance de Thèse de Doctorat/Ph.D en Biologie des Organismes Végétaux Option Botanique-Ecologie le 07 juillet 2022 par Monsieur BESSOH BELL Stanislas, Matricule 89H249, portant sur le thème « Facteurs climatiques, régimes hydrologiques et production de l'énergie hydroélectrique au Cameroun : cas du bassin du fleuve Sanaga »

Attestons que l'intéressé a effectué les corrections demandées par le Jury.

En foi de quoi la présente attestation est établie pour servir et valoir ce que de droit.

Président de Jury

BELL Joseph Martin, Professeur

Rapporteurs

Prof. Dr. Tchindjang Mesmin
Géographe Environnementaliste
HDR-Paris 7 Diderot-Fce
Université de Yaoundé 1
BP. 30484 Ydé-Cameroun
Tél. +237 699 856 926-679 308 818

TCHINDJANG Mesmin, Professeur

BIYE Elvire Hortense, Maître de Conférences

Membres

NDONGO DIN, Professeur

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I Faculté des Sciences Division de la Programmation et du Suivi des Activités Académiques		THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I Faculty of Science Division of Programming and Follow-up of Academic Affairs
LISTE DES ENSEIGNANTS PERMANENTS		LIST OF PERMANENT TEACHING STAFF

LISTE PROTOCOLAIRE

ANNÉE ACADEMIQUE 2021/2022

(Par Département et par Grade)

DATE D'ACTUALISATION 22 juin 2022

ADMINISTRATION

DOYEN : TCHOUANKEU Jean- Claude, *Maître de Conférences*

VICE-DOYEN / DPSAA: ATCHADE Alex de Théodore, *Maître de Conférences*

VICE-DOYEN / DSSE : NYEGUE Maximilienne Ascension, *Professeur*

VICE-DOYEN / DRC : ABOSSOLO ANGUE Monique, *Maître de Conférences*

Chef Division Administrative et Financière : NDOYE FOE Florentine Marie Chantal, *Maître de Conférences*

Chef Division des Affaires Académiques, de la Recherche et de la Scolarité DAARS : AJEAGAH Gideon AGHAINDUM, *Professeur*

1- DÉPARTEMENT DE BIOCHIMIE (BC) (39)

N°	NOMS ET PRÉNOMS	GRADE	OBSERVATIONS
1.	BIGOGA DAIGA Jude	Professeur	En poste
2.	BOUDJEKO Thaddée	Professeur	En poste
3.	FEKAM BOYOM Fabrice	Professeur	En poste
4.	FOKOU Elie	Professeur	En poste
5.	KANSCI Germain	Professeur	En poste
6.	MBACHAM FON Wilfred	Professeur	En poste
7.	MOUNDIPA FEWOU Paul	Professeur	<i>Chef de Département</i>
8.	OBEN Julius ENYONG	Professeur	En poste
9.	ACHU Merci BIH	Maître de Conférences	En poste
10.	ATOGHO Barbara MMA	Maître de Conférences	En poste
11.	AZANTSA KINGUE GABIN BORIS	Maître de Conférences	En poste
12.	BELINGA née NDOYE FOE F. M. C.	Maître de Conférences	Chef DAF / FS
13.	DJUIDJE NGOUNOUÉ Marceline	Maître de Conférences	En poste
14.	EFFA ONOMO Pierre	Maître de Conférences	En poste
15.	EWANE Cécile Annie	Maître de Conférences	En poste
16.	KOTUE TAPTUE Charles	Maître de Conférences	En poste
17.	MOFOR née TEUGWA Clotilde	Maître de Conférences	Doyen FS / UDs
18.	NANA Louise épouse WAKAM	Maître de Conférences	En poste
19.	NGONDI Judith Laure	Maître de Conférences	En poste
20.	NGUEFACK Julienne	Maître de Conférences	En poste
21.	NJAYOU Frédéric Nico	Maître de Conférences	En poste
22.	TCHANA KOUATCHOUA Angèle	Maître de Conférences	En poste
23.	AKINDEH MBUH NJI	Chargé de Cours	En poste
24.	BEBEE Fadimatou	Chargée de Cours	En poste

25.	BEBOY EDJENGUELE Sara Nathalie	Chargé de Cours	En poste
26.	DAKOLE DABOY Charles	Chargé de Cours	En poste
27.	DJUIKWO NKONGA Ruth Viviane	Chargée de Cours	En poste
28.	DONGMO LEKAGNE Joseph Blaise	Chargé de Cours	En poste
29.	FONKOUA Martin	Chargé de Cours	En poste
30.	KOUOH ELOMBO Ferdinand	Chargé de Cours	En poste
31.	LUNGA Paul KEILAH	Chargé de Cours	En poste
32.	MANANGA Marlyse Joséphine	Chargée de Cours	En poste
33.	MBONG ANGIE M. Mary Anne	Chargée de Cours	En poste
34.	OWONA AYISSI Vincent Brice	Chargé de Cours	En poste
35.	Palmer MASUMBE NETONGO	Chargé de Cours	En poste
36.	PECHANGOU NSANGOU Sylvain	Chargé de Cours	En poste
37.	WILFRED ANGIE Abia	Chargé de Cours	En poste
38.	FOUPOUAPOUOGNIGNI Yacouba	Assistant	En poste
39.	MBOUCHE FANMOE Marceline Joëlle	Chargée de Cours	En poste

2- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE ANIMALES (BPA) (51)

1.	AJEAGAH Gideon AGHAINDUM	Professeur	<i>DAARS/FS</i>
2.	BILONG BILONG Charles-Félix	Professeur	Chef de Département
3.	DIMO Théophile	Professeur	En Poste
4.	DJIETO LORDON Champlain	Professeur	En Poste
5.	DZEUFIET DJOMENI Paul Désiré	Professeur	En Poste
6.	ESSOMBA née NTSAMA MBALA	Professeur	<i>Vice Doyen/FMSB/UIYI</i>
7.	FOMENA Abraham	Professeur	En Poste
8.	KEKEUNOU Sévior	Professeur	En poste
9.	NJAMEN Dieudonné	Professeur	En poste
10.	NJIOKOU Flobert	Professeur	En Poste
11.	NOLA Moïse	Professeur	En poste
12.	TAN Paul VERNYUY	Professeur	En poste
13.	TCHUEM TCHUENTE Louis Albert	Professeur	<i>Inspecteur de service</i> <i>Coord.Progr./MINSANTE</i>
14.	ZEBAZE TOGOUET Serge Hubert	Professeur	En poste

15.	ALENE Désirée Chantal	Maître de Conférences	<i>Chef Service/</i> <i>MINESUP</i>
16.	BILANDA Danielle Claude	Maître de Conférences	En poste
17.	DJIOGUE Séfirin	Maître de Conférences	En poste
18.	JATSA BOUKENG Hermine épse MEGAPTCHÉ	Maître de Conférences	En Poste
19.	LEKEUFACK FOLEFACK Guy B.	Maître de Conférences	En poste
20.	MBENOUN MASSE Paul Serge	Maître de Conférences	En poste
21.	MEGNEKOU Rosette	Maître de Conférences	En poste
22.	MONY Ruth épse NTONE	Maître de Conférences	En Poste
23.	NGUEGUIM TSOFAK Florence	Maître de Conférences	En poste
24.	NGUEMBOCK	Maître de Conférences	En poste

25.	TOMBI Jeannette	Maître de Conférences	En poste
26.	ATSAMO Albert Donatien	Chargé de Cours	En poste
27.	BASSOCK BAYIHA Etienne Didier	Chargé de Cours	En poste
28.	DONFACK Mireille	Chargée de Cours	En poste
29.	ESSAMA MBIDA Désirée Sandrine	Chargée de Cours	En poste
30.	ETEME ENAMA Serge	Chargé de Cours	En poste
31.	FEUGANG YOUMSSI François	Chargé de Cours	En poste
32.	GONWOUO NONO Legrand	Chargé de Cours	En poste
33.	GOUNOUE KAMKUMO Raceline	Chargée de Cours	En poste
34.	KANDEDA KAVAYE Antoine	Chargé de Cours	En poste
35.	KOGA MANG DOBARA	Chargé de Cours	En poste
36.	LEME BANOCK Lucie	Chargé de Cours	En poste
37.	MAHOB Raymond Joseph	Chargé de Cours	En poste
38.	METCHI DONFACK MIREILLE FLAURE EPSE GHOU MO	Chargé de Cours	En poste
39.	MOUNGANG LucianeMarlyse	Chargée de Cours	En poste
40.	MVEYO NDANKEU Yves Patrick	Chargé de Cours	En poste
41.	NGOUATEU KENFACK Omer Bébé	Chargé de Cours	En poste
42.	NJUA Clarisse Yafi	Chargée de Cours	<i>Chef Div. Uté Bamenda</i>
43.	NOAH EWOTI Olive Vivien	Chargée de Cours	En poste
44.	TADU Zephyrin	Chargé de Cours	En poste
45.	TAMSA ARFAO Antoine	Chargé de Cours	En poste
46.	YEDE	Chargé de Cours	En poste
47.	YOUNOUSSA LAME	Chargé de Cours	En poste
48.	AMBADA NDZENGUE GEORGIA ELNA	Assistante	En poste
49.	FOKAM Alvine Christelle Epse KEGNE	Assistante	En poste
50.	MAPON NSANGOU Indou	Assistant	En poste
51.	NWANE Philippe Bienvenu	Assistant	En poste

3- DÉPARTEMENT DE BIOLOGIE ET PHYSIOLOGIE VÉGÉTALES (BPV) (33)

1.	AMBANG Zachée	Professeur	<i>Chef DAARS /UYII/ Chef du Département</i>
2.	BELL Joseph Martin	Professeur	En poste
3.	DJOCGOUE Pierre François	Professeur	En poste
4.	MBOLO Marie	Professeur	En poste
5.	MOSSEBO Dominique Claude	Professeur	En poste
6.	ZAPFACK Louis	Professeur	En poste
7.	ANGONI Hyacinthe	Maître de Conférences	En poste
8.	BIYE Elvire Hortense	Maître de Conférences	En poste
9.	MALA Armand William	Maître de Conférences	En poste
10.	MBARGA BINDZI Marie Alain	Maître de Conférences	<i>DAAC /UDla</i>
11.	NDONGO BEKOLO	Maître de Conférences	<i>CE / MINRESI</i>
12.	NGODO MELINGUI Jean Baptiste	Maître de Conférences	En poste

13.	NGONKEU MAGAPTCHE Eddy L.	Maître de Conférences	<i>CT / MINRESI</i>
14.	TONFACK Libert Brice	Maître de Conférences	En poste
15.	TSOATA Esaïe	Maître de Conférences	En poste
16.	ONANA JEAN MICHEL	Maître de Conférences	En poste
17.	DJEUANI Astride Carole	Chargé de Cours	En poste
18.	GOMANDJE Christelle	Chargée de Cours	En poste
19.	GONMADGE CHRISTELLE	Chargée de Cours	En poste
20.	MAFFO MAFFO Nicole Liliane	Chargé de Cours	En poste
21.	MAHBOU SOMO TOUKAM. Gabriel	Chargé de Cours	En poste
22.	NGALLE Hermine BILLE	Chargée de Cours	En poste
23.	NNANGA MEBENGA Ruth Laure	Chargé de Cours	En poste
24.	NOUKEU KOUAKAM Armelle	Chargé de Cours	En poste
25.	NSOM ZAMBO EPSE PIAL ANNIE CLAUDE	Chargé de Cours	<i>En détachement /UNESCO MALI</i>
26.	GODSWILL NTSOMBOH NTSEFONG	Chargé de Cours	En poste
27.	KABELONG BANAHOU Louis-Paul-Roger	Chargé de Cours	En poste
28.	KONO Léon Dieudonné	Chargé de Cours	En poste
29.	LIBALAH Moses BAKONCK	Chargé de Cours	En poste
30.	LIKENG-LI-NGUE Benoit C	Chargé de Cours	En poste
31.	TAEDOUNG Evariste Hermann	Chargé de Cours	En poste
32.	TEMEGNE NONO Carine	Chargé de Cours	En poste
33.	MANGA NDJAGA JUDE	Assistant	En poste

4- DÉPARTEMENT DE CHIMIE INORGANIQUE (CI) (31)

1.	AGWARA ONDOH Moïse	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	Florence UFI CHINJE épouse MELO	Professeur	<i>Recteur Univ.Ngaoundere</i>
3.	GHOOGOMU Paul MINGO	Professeur	<i>Ministre Chargé de Miss.PR</i>
4.	NANSEU Njiki Charles Péguy	Professeur	En poste
5.	NDIFON Peter TEKE	Professeur	<i>CT MINRESI</i>
6.	NDIKONTAR Maurice KOR	Professeur	<i>Vice-Doyen Univ. Bamenda</i>
7.	NENWA Justin	Professeur	En poste
8.	NGAMENI Emmanuel	Professeur	<i>DOYEN FS Univ.Ngaoundere</i>
9.	NGOMO Horace MANGA	Professeur	<i>Vice Chancellor/UB</i>
10.	ACAYANKA Elie	Maître de Conférences	En poste
11.	EMADACK Alphonse	Maître de Conférences	En poste
12.	KAMGANG YOUNBI Georges	Maître de Conférences	En poste
13.	KEMMEGNE MBOUGUEM Jean C.	Maître de Conférences	En poste
14.	KENNE DEDZO GUSTAVE	Maître de Conférences	En poste
15.	KONG SAKEO	Maître de Conférences	En poste
16.	MBEY Jean Aime	Maître de Conférences	En poste

17.	NDI NSAMI Julius	Maître de Conférences	En poste
18.	NEBAH Née NDOSIRI Bridget NDOYE	Maître de Conférences	<i>CT/ MINPROFF</i>
19.	NJIOMOU C. épouse DJANGANG	Maître de Conférences	En poste
20.	NJOYA Dayirou	Maître de Conférences	En poste
21.	NYAMEN Linda Dyorisse	Maître de Conférences	En poste
22.	PABOUDAM GBAMBIE AWAWOU	Maître de Conférences	En poste
23.	TCHAKOUTE KOUAMO Hervé	Maître de Conférences	En poste

24.	BELIBI BELIBI Placide Désiré	Chargé de Cours	<i>Chef Service/ ENS Bertoua</i>
25.	CHEUMANI YONA Arnaud M.	Chargé de Cours	En poste
26.	KOUOTOU DAOUDA	Chargé de Cours	En poste
27.	MAKON Thomas Beauregard	Chargé de Cours	En poste
28.	NCHIMI NONO KATIA	Chargé de Cours	En poste
29.	NJANKWA NJABONG N. Eric	Chargé de Cours	En poste
30.	PATOUOSSA ISSOFA	Chargé de Cours	En poste
31.	SIEWE Jean Mermoz	Chargé de Cours	En Poste

5- DÉPARTEMENT DE CHIMIE ORGANIQUE (CO) (38)

1.	DONGO Etienne	Professeur	<i>Vice-Doyen/FSE/UIYI</i>
2.	NGOUELA Silvère Augustin	Professeur	<i>Chef de Département UDS</i>
3.	PEGNYEMB Dieudonné Emmanuel	Professeur	<i>Directeur/ MINESUP/ Chef de Département</i>
4.	WANDJI Jean	Professeur	En poste
5.	MBAZOA née DJAMA Céline	Professeur	En poste

6.	Alex de Théodore ATCHADE	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen / DPSAA</i>
7.	AMBASSA Pantaléon	Maître de Conférences	En poste
8.	EYONG Kenneth OBEN	Maître de Conférences	En poste
9.	FOLEFOC Gabriel NGOSONG	Maître de Conférences	En poste
10.	FOTSO WABO Ghislain	Maître de Conférences	En poste
11.	KAMTO Eutrophe Le Doux	Maître de Conférences	En poste
12.	KENMOGNE Marguerite	Maître de Conférences	En poste
13.	KEUMEDJIO Félix	Maître de Conférences	En poste
14.	KOUAM Jacques	Maître de Conférences	En poste
15.	MKOUNGA Pierre	Maître de Conférences	En poste
16.	MVOT AKAK CARINE	Maître de Conférences	En poste
17.	NGO MBING Joséphine	Maître de Conférences	<i>Chef de Cellule MINRESI</i>
18.	NGONO BIKOBO Dominique Serge	Maître de Conférences	<i>C.E.A/ MINESUP</i>
19.	NOTE LOUGBOT Olivier Placide	Maître de Conférences	<i>DAAC/Uté Bertoua</i>
20.	NOUNGOUE TCHAMO Diderot	Maître de Conférences	En poste
21.	TABOPDA KUATE Turibio	Maître de Conférences	En poste
22.	TAGATSING FOTSING Maurice	Maître de Conférences	En poste
23.	TCHOUANKEU Jean-Claude	Maître de Conférences	<i>Doyen /FS/ UYI</i>
24.	YANKEP Emmanuel	Maître de Conférences	En poste
25.	ZONDEGOUMBA Ernestine	Maître de Conférences	En poste

26.	NGNINTEDO Dominique	Chargé de Cours	En poste
27.	NGOMO Orléans	Chargée de Cours	En poste
28.	OUAHOUE WACHE Blandine M.	Chargée de Cours	En poste
29.	SIELINOUE TEDJON Valérie	Chargé de Cours	En poste
30.	MESSI Angélique Nicolas	Chargé de Cours	En poste
31.	TCHAMGOUE Joseph	Chargé de Cours	En poste
32.	TSAMO TONTSA Armelle	Chargé de Cours	En poste
33.	TSEMEUGNE Joseph	Chargé de Cours	En poste

34.	MUNVERA MFIFEN Aristide	Assistant	En poste
35.	NONO NONO Éric Carly	Assistant	En poste
36.	OUETE NANTCHOUANG Judith Laure	Assistante	En poste
37.	TSAFFACK Maurice	Assistant	En poste

6- DÉPARTEMENT D'INFORMATIQUE (IN) (22)

1.	ATSA ETOUNDI Roger	Professeur	<i>Chef Div.MINESUP</i>
2.	FOUDA NDJODO Marcel Laurent	Professeur	<i>Chef Dpt ENS/Chef IGA.MINESUP</i>

3.	NDOUNAM René	Maître de Conférences	En poste
4.	TSOPZE Norbert	Maître de Conférences	En poste

5.	ABESSOLO ALO'O Gislain	Chargé de Cours	<i>Sous-Directeur/MINFOPRA</i>
6.	AMINOUE Halidou	Chargé de Cours	<i>Chef de Département</i>
7.	DJAM Xaviera YOUH - KIMBI	Chargé de Cours	En Poste
8.	DOMGA KOMGUEM Rodrigue	Chargé de Cours	En poste
9.	EBELE Serge Alain	Chargé de Cours	En poste
10.	HAMZA Adamou	Chargé de Cours	En poste
11.	JIOMEKONG AZANZI Fidel	Chargé de Cours	En poste
12.	KOUOKAM KOUOKAM E. A.	Chargé de Cours	En poste
13.	MELATAGIA YONTA Paulin	Chargé de Cours	En poste
14.	MONTHÉ DJIADEU Valéry M.	Chargé de Cours	En poste
15.	OLE OLE Daniel Claude Delort	Chargé de Cours	<i>Directeur adjoint ENSET. Ebolowa</i>
16.	TAPAMO Hyppolite	Chargé de Cours	En poste

17.	BAYEM Jacques Narcisse	Assistant	En poste
18.	EKODECK Stéphane Gaël Raymond	Assistant	En poste
19.	MAKEMBE. S . Oswald	Assistant	En poste
20.	MESSI NGUELE Thomas	Assistant	En poste
21.	NKONDOCK. MI. BAHANACK.N.	Assistant	En poste
22.	NZEKON NZEKO'O ARMEL JACQUES	Assistant	En poste

7- DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES (MA) (31)

1.	AYISSI Raoult Domingo	Professeur	Chef de Département
2.	EMVUDU WONO Yves S.	Professeur	<i>Inspecteur MINESUP</i>
3.	KIANPI Maurice	Maître de Conférences	En poste
4.	MBANG Joseph	Maître de Conférences	En poste
5.	MBEHOU Mohamed	Maître de Conférences	En poste
6.	MBELE BIDIMA Martin Ledoux	Maître de Conférences	En poste
7.	NOUNDJEU Pierre	Maître de Conférences	<i>Chef Service des Programmes & Diplômes/FS/UYI</i>
8.	TAKAM SOH Patrice	Maître de Conférences	En poste
9.	TCHAPNDA NJABO Sophonie B.	Maître de Conférences	<i>Directeur/AIMS Rwanda</i>
10.	TCHOUNDJA Edgar Landry	Maître de Conférences	En poste
11.	AGHOUKENG JIOFACK Jean Gérard	Chargé de Cours	<i>Chef Cellule MINEPAT</i>
12.	BOGSO ANTOINE MARIE	Chargé de Cours	En poste
13.	CHENDJOU Gilbert	Chargé de Cours	En poste
14.	DJIADEU NGAHA Michel	Chargé de Cours	En poste
15.	DOUANLA YONTA Herman	Chargé de Cours	En poste
16.	KIKI Maxime Armand	Chargé de Cours	En poste
17.	MBAKOP Guy Merlin	Chargé de Cours	En poste
18.	MENGUE MENGUE David Joe	Chargé de Cours	<i>Chef Dpt /ENS Uté Maroua</i>
19.	NGUEFACK Bernard	Chargé de Cours	En poste
20.	NIMPA PEFOUKEU Romain	Chargée de Cours	En poste
21.	OGADOA AMASSAYOGA	Chargée de Cours	En poste
22.	POLA DOUNDOU Emmanuel	Chargé de Cours	<i>En stage</i>
23.	TCHEUTIA Daniel Duviol	Chargé de Cours	En poste
24.	TETSADJIO TCHILEPECK M. E.	Chargé de Cours	En poste
25.	BITYE MVONDO Esther Claudine	Assistante	En poste
26.	FOKAM Jean Marcel	Assistant	En poste
27.	LOUMNGAM KAMGA Victor	Assistant	En poste
28.	MBATAKOU Salomon Joseph	Assistant	En poste
29.	MBIAKOP Hilaire George	Assistant	En poste
30.	MEFENZA NOUNTU Thiery	Assistant	En poste
31.	TENKEU JEUFACK Yannick Léa	Assistant	En poste

8- DÉPARTEMENT DE MICROBIOLOGIE (MIB) (22)

1.	ESSIA NGANG Jean Justin	Professeur	<i>Chef de Département</i>
2.	NYEGUE Maximilienne Ascension	Professeur	<i>VICE-DOYEN / DSSE/FS/UIYI</i>
3.	NWAGA Dieudonné M.	Professeur	En poste

4.	ASSAM ASSAM Jean Paul	Maître de Conférences	En poste
5.	BOUGNOM Blaise Pascal	Maître de Conférences	En poste
6.	BOYOMO ONANA	Maître de Conférences	En poste
7.	KOUITCHEU MABEKU Epse KOUAM Laure Brigitte	Maître de Conférences	En poste
8.	RIWOM Sara Honorine	Maître de Conférences	En poste
9.	SADO KAMDEM Sylvain Leroy	Maître de Conférences	En poste

10.	BODA Maurice	Chargé de Cours	En position d'absence irrégulière
11.	ESSONO OBOUGOU Germain G.	Chargé de Cours	En poste
12.	NJIKI BIKOÏ Jacky	Chargée de Cours	En poste
13.	TCHIKOUA Roger	Chargé de Cours	En poste
14.	ESSONO Damien Marie	Chargé de Cours	En poste
15.	LAMYE Glory MOH	Chargé de Cours	En poste
16.	MEYIN A EBONG Solange	Chargée de Cours	En poste
17.	NKOUDOU ZE Nardis	Chargé de Cours	En poste
18.	TAMATCHO KWEYANG Blandine Pulchérie	Chargée de Cours	En poste
19.	TOBOLBAÏ Richard	Chargé de Cours	En poste

20.	MONI NDEDI Esther Del Florence	Assistante	En poste
21.	NKOUÉ TONG ABRAHAM	Assistant	En poste
22.	SAKE NGANE Carole Stéphanie	Assistante	En poste

9. DEPARTEMENT DE PYSIQUE(PHY) (43)

1.	BEN- BOLIE Germain Hubert	Professeur	En poste
2.	DJUIDJE KENMOE épouse ALOYEM	Professeur	En poste
3.	EKOBENA FOU DA Henri Paul	Professeur	<i>Vice-Recteur. Uté Ngaoundéré</i>
4.	ESSIMBI ZOBO Bernard	Professeur	En poste
5.	NANA ENGO Serge Guy	Professeur	En poste
6.	NANA NBENDJO Blaise	Professeur	En poste
7.	NDJAKA Jean Marie Bienvenu	Professeur	<i>Chef de Département</i>
8.	NJANDJOCK NOUCK Philippe	Professeur	En poste
9.	NOUAYOU Robert	Professeur	En poste
10.	PEMHA Elkana	Professeur	En poste
11.	SAIDOU	Professeur	<i>Chef de</i>

			<i>centre/IRGM/MINRESI</i>
12.	TABOD Charles TABOD	Professeur	<i>Doyen FSUniv/Bda</i>
13.	TCHAWOUA Clément	Professeur	En poste
14.	WOAFO Paul	Professeur	En poste
15.	ZEKENG Serge Sylvain	Professeur	En poste

16.	BIYA MOTTO Frédéric	Maître de Conférences	<i>DG/HYDRO Mekin</i>
17.	BODO Bertrand	Maître de Conférences	En poste
18.	ENYEGUE A NYAM épouse	Maître de Conférences	En poste
19.	EYEBE FOUA Jean sire	Maître de Conférences	En poste
20.	FEWO Serge Ibraïd	Maître de Conférences	En poste
21.	HONA Jacques	Maître de Conférences	En poste
22.	MBINACK Clément	Maître de Conférences	En poste
23.	MBONO SAMBA Yves Christian U.	Maître de Conférences	En poste
24.	NDOP Joseph	Maître de Conférences	En poste
25.	SIEWE SIEWE Martin	Maître de Conférences	En poste
26.	SIMO Elie	Maître de Conférences	En poste
27.	VONDOU DerbetiniAppolinaire	Maître de Conférences	En poste
28.	WAKATA née BEYA Annie	Maître de Conférences	<i>Directeur/ENS/UIYI</i>

29.	ABDOURAHIMI	Chargé de Cours	En poste
30.	CHAMANI Roméo	Chargé de Cours	En poste
31.	EDONGUE HERVAIS	Chargé de Cours	En poste
32.	FOUEDJIO David	Chargé de Cours	<i>Chef Cell. MINADER</i>
33.	MELI'I Joelle Larissa	Chargée de Cours	En poste
34.	MVOGO ALAIN	Chargé de Cours	En poste
35.	WOULACHE Rosalie Laure	Chargée de Cours	<i>Absente depuis Janvier 2022</i>
36.	AYISSI EYEBE Guy François Valérie	Chargé de Cours	En poste
37.	DJIOTANG TCHOTCHOU Lucie Angennes	Chargée de Cours	En poste
38.	OTTOU ABE Martin Thierry	Chargé de Cours	En poste
39.	TEYOU NGOUPOU Ariel	Chargé de Cours	En poste

40.	KAMENI NEMATCHOUA Modeste	Assistant	En poste
41.	LAMARA Maurice	Assistant	En poste
42.	NGA ONGODO Dieudonné	Assistant	En poste
43.	WANDJI NYAMSI William	Assistant	En poste

10- DÉPARTEMENT DE SCIENCES DE LA TERRE (ST) (42)

1.	BITOM Dieudonné-Lucien	Professeur	<i>Doyen / FASA / UDs</i>
2.	FOUATEU Rose épouse YONGUE	Professeur	En poste
3.	NDAM NGOUPAYOU Jules-Remy	Professeur	En poste
4.	NDJIGUI Paul Désiré	Professeur	<i>Chef de Département</i>

5.	NGOS III Simon	Professeur	En poste
6.	NKOUMBOU Charles	Professeur	En poste
7.	NZENTI Jean-Paul	Professeur	En poste

8.	ABOSSOLO née ANGUE Monique	Maître de Conférences	<i>Vice-Doyen / DRC</i>
9.	BISSO Dieudonné	Maître de Conférences	<i>Directeur/Projet Barrage Memve'ele</i>
10.	EKOMANE Emile	Maître de Conférences	En poste
11.	FUH Calistus Gentry	Maître de Conférences	<i>Sec. D'Etat/MINMIDT</i>
12.	GANNO Sylvestre	Maître de Conférences	En poste
13.	GHOGOMU Richard TANWI	Maître de Conférences	<i>Chef de Département /Uté Maroua</i>
14.	MOUNDI Amidou	Maître de Conférences	CT/ MINIMDT
15.	NGO BIDJECK Louise Marie	Maître de Conférences	En poste
16.	NGUEUTCHOUA Gabriel	Maître de Conférences	CEA/MINRESI
17.	NJILAH Isaac KONFOR	Maître de Conférences	En poste
18.	NYECK Bruno	Maître de Conférences	En poste
19.	ONANA Vincent Laurent	Maître de Conférences	<i>Chef service Maintenance & du Matériel/UYII</i>
20.	TCHAKOUNTE J. épse NUMBEM	Maître de Conférences	<i>Chef.cell / MINRESI</i>
21.	TCHOUANKOUE Jean-Pierre	Maître de Conférences	En poste
22.	TEMGA Jean Pierre	Maître de Conférences	En poste
23.	YENE ATANGANA Joseph Q.	Maître de Conférences	<i>Chef Div. /MINTP</i>
24.	ZO'O ZAME Philémon	Maître de Conférences	<i>DG/ART</i>

25.	ANABA ONANA Achille Basile	Chargé de Cours	En poste
26.	BEKOA Etienne	Chargé de Cours	En poste
27.	ELISE SABABA	Chargé de Cours	En poste
28.	ESSONO Jean	Chargé de Cours	En poste
29.	EYONG JOHN TAKEM	Chargé de Cours	En poste
30.	MAMDEM TAMTO LIONELLE ESTELLE	Chargé de Cours	En poste
31.	MBESSE CECILE OLIVE	Chargée de Cours	En poste
32.	MBIDA YEM	Chargé de Cours	En poste
33.	METANG Victor	Chargé de Cours	En poste
34.	MINYEM Dieudonné	Chargé de Cours	<i>CD/ Uté Maroua</i>
35.	NGO BELNOUN Rose Noël	Chargée de Cours	En poste
36.	NOMO NEGUE Emmanuel	Chargé de Cours	En poste
37.	NTSAMA ATANGANA Jacqueline	Chargé de Cours	En poste
38.	TCHAPTCHET TCHATO De P.	Chargé de Cours	En poste
39.	TEHNA Nathanaël	Chargé de Cours	En poste
40.	FEUMBA Roger	Chargé de Cours	En poste
41.	MBANGA NYOBE Jules	Chargé de Cours	En poste

42.	NGO'O ZE ARNAUD	Assistant	En poste
-----	-----------------	-----------	----------

Répartition chiffrée des Enseignants de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I

NOMBRE D'ENSEIGNANTS					
DÉPARTEMENT	Professeurs	Maîtres de Conférences	Chargés de Cours	Assistants	Total
BCH	8 (00)	14 (10)	15 (05)	02 (01)	39 (16)
BPA	14 (01)	11 (07)	22 (07)	04 (02)	51 (17)
BPV	06 (01)	10(01)	16 (09)	01 (00)	33 (11)
CI	09(01)	14(04)	08 (01)	00 (00)	31 (06)
CO	06 (01)	20 (04)	08 (03)	04 (01)	38(09)
IN	02 (00)	02 (00)	12 (01)	06 (00)	22 (01)
MAT	02 (00)	08 (00)	14 (01)	07 (01)	31 (02)
MIB	03 (01)	06 (02)	10 (03)	03 (02)	22 (08)
PHY	15 (01)	13 (02)	11 (03)	04 (00)	43 (06)
ST	07 (01)	16 (03)	18 (04)	01 (00)	42(08)
Total	72 (07)	114 (33)	134 (37)	32 (07)	352 (84)

Soit un total de **352 (84)** dont :

- Professeurs **72(07)**
- Maîtres de Conférences **114 (33)**
- Chargés de Cours **134 (37)**
- Assistants **32 (07)**

() = Nombre de Femmes **84**

DEDICACE

À mes parents

BELL BESSOH Joseph

Et ESSOMGA Bénédicte

À mes enfants

Mariette Clémence.

Patience Salomé.

Judith Bénédicte.

Elisette.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, toute ma gratitude à ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce document. Tous mes remerciements aux :

- Encadreurs le Professeur TCHINDJANG Mesmin, enseignant au Département de Géographie et le Pr. BIYE Elvire Hortense, Maître de Conférences au Département de Biologie et Physiologie Végétales, tous de l'Université de Yaoundé I pour leur encadrement, leurs encouragements et leur disponibilité pour le guide conjoint de ce travail. En plus, le premier m'a initié et introduit dans le champ des publications et la seconde, dans le cadre du suivi minutieux du travail, puis pour la traduction de la plupart de nos publications ;
- Professeur YOUMBI Emmanuel, Chef de département de Biologie et Physiologie Végétales, pour l'intérêt qu'il a accordé aux enseignements à nous dispenser ;
- Professeur BELL Joseph Martin, enseignant à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, à l'origine chef de département par intérim à l'année de notre sélection qui m'a toujours encouragé et guidé dans certaines parties de ce travail ;
- Professeur NDJIGUI Paul Désiré, Chef de Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour avoir contribué à l'amélioration de ce travail ;
- Professeur NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy, enseignant au Département des Sciences de la Terre qui m'a toujours réservé des moments d'entretien, me prodiguant des conseils liés à la publication des résultats scientifiques ;
- Professeur AMOUGOU Joseph Armathé, au Département de Géographie de l'Université de Yaoundé I et Directeur de l'Observatoire National sur le Changement Climatique (ONACC) non seulement pour le choix de ce sujet mais aussi pour avoir apporté de son expertise dans ce travail ;
- Pr. ABOSSOLO Samuel Aimé, Maître de Conférences au Département de Géographie de l'Université de Yaoundé I pour la formulation dudit sujet, par qui on a pu obtenir certaines données et pour des moments précieux de discussions à moi réservés qui consistaient à m'orienter sur les chemins à explorer pour mener à bien ce travail ;
- Professeur NDONGO DIN, enseignant au département de Biologie et Physiologie Végétales, de l'Université de Douala pour avoir expertisé ce travail et accepté de disposer de son temps pour l'examiner ;
- Pr. NGONKEU, Maître de Conférences au Département de Biologie et Physiologie Végétales de l'Université de Yaoundé I pour les orientations pouvant faciliter l'achèvement de ce travail ;
- Enseignants de la filière Sciences de la Vie-Santé et Environnement de la Faculté des Sciences pour leurs enseignements et leur formation ;
- A l'endroit de l'Université d'Hydrométéorologie de Saint Petersburg en Russie qui nous a procuré des données dont nous nous sommes servis dans cette étude. Nous sollicitons davantage cette collaboration afin d'améliorer en cas de besoin nos résultats ;
- A AES/SONEL (ENEO) d'une part aux responsables des services des stages, de la formation et du recrutement de la direction des ressources humaines et d'autre part à ceux du « Service de Quart » à la Centrale d'Édéa (Édéa Hydroplant) coordonnant la production. Leur magnanimité, collaboration et attachement à ce sujet, ont contribué à l'acquisition des données de production hydroélectrique au barrage d'Édéa et celles de remplissage des

barrages de retenues de Bamendjing, de la Mapé et de Mbakaou ainsi qu'à l'accès à des connaissances sur l'électrotechnique.

- Au LAGE (Laboratoire d'Analyses Géochimiques des Eaux) de Nkolbisson à Yaoundé, fruit du partenariat entre IRGM et IRD, pour sa collaboration et son attachement à l'analyse des échantillons mis à sa disposition, dont les résultats ont permis la rédaction d'une partie de ce travail ;
- Monsieur MINLEND Olivier, traducteur pour sa contribution à la traduction de l'Abstract du présent document ;
- Messieurs BELL BELL Joseph Emmanuel du dispensaire de la Ferme Suisse par Édéa et BELL Alain pour leurs soutiens moral et financier ;
- Monsieur BELL BELL Emmanuel et son épouse NGO MANDENG Elise, NGO BELL Marie Louise, ESSOUNGA Jean Paul, MPOM Pascal Benjamin, pour leur assistance rotative ;
- mes neveux BELL Joseph Bertrand, NGO BELL Thérèse, NGO BELL Bénédicte Nadège, pour leur réconfort permanent ;
- Mes enfants MASODA Mariette Clémence, LIKEBEL Patience Salomé, MAYEGA Judith Bénédicte, BIMAI Anisette Laure, NGONDA MBONDO Elisette, pour des sacrifices dont elles ont fait preuve ;
- Les familles COFANDO et NGWEHA-NKONG particulièrement M. MAEMBLE Crespin, cadre retraité à la CFAO, BENGA Joseph et son épouse pour les encouragements ;
- Madame NGO MBONDO Elisette qui toujours, me relayait pendant mes descentes sur le terrain et Monsieur NSOKA Emmanuel, pour leur exhortation à l'achèvement de ce rapport.

SOMMAIRE

LISTE PROTOCOLAIRE	I
DEDICACE	XIII
REMERCIEMENTS	XIV
SOMMAIRE	XVI
ANNEXES	XVIII
LISTE DES FIGURES.....	XIX
LISTE DES TABLEAUX.....	XXI
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	XXIII
RESUME	XXVI
ABSTRACT.....	XXVII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE.....	8
I.1. ENERGIE HYDROELECTRIQUE	9
I.1.1. Situation de l'énergie électrique dans le monde	9
I.1.2. Situation de l'énergie électrique en Afrique	10
I.1.2.1. Contrastes entre le potentiel électrique et sa mise en valeur	10
I.1.2.2. Organisations sous régionales pour une efficacité de production	13
I.1.3. Situation de l'énergie électrique au Cameroun.....	13
I.1.4. Présentation de quelques barrages hydroélectriques camerounais	15
I.1.5. Types de barrages	17
I.1.6. Types de centrales hydroélectriques	18
I.1.6.1. Centrales gravitaires	18
I.1.6.2. Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)	18
I.1.7. Types de turbines hydrauliques	19
I.1.8. Energie hydraulique.....	20
I.1.8.1. Mécanisme de transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique	21
I.1.8.2. Chaîne de transmission	21
I.1.9. Coût de l'hydroélectricité.....	22
I.1.10. Quelques avantages et limites de l'hydroélectricité	23
I.2. REGIMES HYDROLOGIQUES.....	23
I.2.1. Caractéristiques géographiques et morphologiques	24
I.2.2. Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.....	25
I.2.3. Caractéristiques phytogéographiques et météorologiques.....	25
I.2.4. Réseau des talwegs	26
I.2.5. Apports météoriques et ressources en eau	28
I.2.6. Sédimentation	30
I.3. FACTEURS CLIMATIQUES	31
I.3.1. Facteurs cosmiques	31
I.3.2. Facteurs planétaires	32
I.3.3. Facteurs géographiques	33
I.3.4. Types de climats dans le monde	34
I.3.5. Cycle de l'eau	35
I.3.5.1. Dynamique de l'atmosphère et formation des précipitations	36
I.3.5.2. Percolation et infiltration	38

I.3.5.3. Ruissellement.....	38
I.4. HYDROLOGIE ET DEVELOPPEMENT DU CAMEROUN	38
I.5. CADRE REGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL SUR L’HYDROELECTRICITE ET L’ENVIRONNEMENT	39
I.5.1. La politique de l’eau au Cameroun.....	39
I.5.2. La politique énergétique du Cameroun.....	41
I.5.3. La politique de l’environnement au Cameroun	46
CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES.....	51
II.1. MATERIEL.....	52
II.1.1. Site d’étude.....	52
II.1.2. Collecte des données	52
II.1.3. Stations météorologiques exploitées	54
II. 2. METHODES	54
II.2.1. Evaluation de l’évolution de facteurs climatiques majeurs.....	54
II.2.1.1. Validation des données.....	54
II.2.1.2. Analyse des températures moyennes de surface de l’Océan Atlantique et de la pression aux mêmes latitudes ainsi que l’indice NAO.....	55
II.2.1.3. Analyse des températures moyennes de certaines stations du bassin de la Sanaga	55
II.2.1.4. Détermination des pluies moyennes dans une localité	55
II.2.1.4.1. Analyse de la variabilité pluviométrique.....	56
II.2.1.4.2. Détermination des déficits hydro pluviométriques	57
II.2.1.4.3. Calcul de l’évapotranspiration potentielle et son impact sur la ressource en eau	58
II.2.2. Mise en relation entre les variations des facteurs climatiques et les ressources en eau pour la production de l’énergie hydroélectrique	59
II.2.2.1. Relation entre la température de l’air et la pluviométrie.....	60
II.2.2.2. Relation entre la pluviométrie et l’écoulement	60
II.2.3. Comparaison de l’évolution de l’énergie hydroélectrique potentielle à celle de l’énergie hydroélectrique réelle.....	60
II.2.3.1. Estimation de l’énergie hydroélectrique potentielle de certains barrages et chutes du bassin du fleuve Sanaga	60
II.2.3.2. Détermination de la production hydroélectrique réelle de la Centrale d’Édéa	63
II.2.3.2.1. Données de production de la Centrale d’Édéa	63
II.2.3.2.2. Données des matières en suspension (MES).....	63
II.2.3.2.3. Analyse de la production effective de l’énergie hydroélectrique.....	64
II.2.3.2.4. Détermination des paramètres physico-chimiques de l’eau.....	64
II.1.4. Analyse de la dynamique des écosystèmes du bassin versant de la Sanaga	65
II.2.4.1. Prétraitements.....	65
II.2.4.1.1. Segmentation.....	65
II.2.4.1.2. Identification des classes	65
II.2.4.2. Traitements.....	66
II.2.4.2.1. Caractérisation des objets.....	66
II.2.4.2.2. Classification.....	66
II.2.4.2.3. Validation	66
II.2.4.3. Analyse des interactions entre la dynamique des écosystèmes et celle des précipitations du sein du bassin	67
II.2.5. Détermination des corrélations entre les paramètres étudiés	68

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION	69
III.1. RESULTATS	70
III.1.1. Evolution des principaux facteurs climatiques	70
III.1.1.1. Variations des températures relevées au niveau de la surface de l’Océan Atlantique	70
Fig. 22. Evolution (a) et écarts à la moyenne (b) des températures sur la surface de l’Océan Atlantique.....	70
III.1.1.2. Les anticyclones de l’océan Atlantique	71
III.1.1.3. Variations des températures de l’air dans le bassin du fleuve Sanaga.....	72
III.1.1.4. Variations des précipitations moyennes annuelles dans certaines stations du bassin	78
III.1.1.5. Ecart à la moyenne des précipitations	80
III.1.1.5. Comportement des précipitations moyennes mensuelles.....	82
III.1.1.5.1. Typologie pluviométrique dans les stations observées	82
III.1.1.5.2. Analyse de la pluviométrie des stations du bassin du fleuve Sanaga et ses environs	84
III.1.1.5.3. Régime pluviométrique dans les zones climatiques du bassin versant du fleuve Sanaga de 1950 à 2018	85
III.1.1.6. Evolution des précipitations moyennes au niveau de certains exutoires du bassin	89
III.1.1.5.4. Moyennes décennales des précipitations au bassin du fleuve Sanaga	90
III.1.2. Relation entre les variations des facteurs climatiques et les ressources en eau pour la production de l’énergie hydroélectrique	93
III.1.2.1. Combinaison des précipitations et des températures dans le bassin du fleuve Sanaga.....	93
III.1.2.2. Evapotranspiration potentielle dans le bassin du fleuve Sanaga.....	94
III.1.2.3. Disponibilité en eau évaluée par des stations météorologiques étudiées.....	95
III.1.2.4. Lamme d’eau écoulée à Edéa.....	97
III.1.2.5. Déficit d’écoulement.....	97
III.1.2.6. Coefficient d’écoulement.....	98
III.1.3. Comparaison de la production de l’énergie hydroélectrique potentielle des barrages et chutes à celle des centrales installées au sein du bassin du fleuve la Sanaga	100
III.1.3.1 L’énergie hydroélectrique potentielle des barrages et chutes	100
III.13.1.1. Evènements tectoniques contemporains	100
III.1.2.1. Débits interannuels.....	101
III.1.2.2. Débits mensuels	103
III.1.2.3. Régimes hydrologiques.....	103
III.1.2.4. Moyennes décennales des débits naturels de la Sanaga à Edéa.....	104
III.1.2.8. Energie hydroélectrique potentielle	104
III.1.3.5. Corrélation énergie potentielle-et énergie réelle.....	108
III.1.3.5. Impact de la sédimentation sur la disponibilité en eau	108
III.1.4. Analyse de la dégradation des écosystèmes du bassin versant de la Sanaga	109
III.1.4.1. Dynamique des écosystèmes au sein du bassin de la Sanaga de 1950 à 2018.....	109
III.1.4.2. Régulations et contrastes climatiques en montagne.....	116
III.1.4.2. Corrélations facteurs climatiques et écoulements au sein du bassin du fleuve Sanaga de 1950 à 2018.....	121
III.1.4.3. Influence anthropique	121
III.1.4.6. Nature du substratum (géologie) et des sols	124
III.1.4.7. Dégradabilité du bassin de la Sanaga et problème de ressources en eau	124
III.1.5. Corrélations entre valeurs indépendantes (pluviométrie, températures de l’air) et valeurs dépendantes (débits, production réelle de l’énergie hydroélectrique)	127

III.1.5.1. Relation pluie moyenne et débits	127
III.1.5.2. Réajustement de l'hydraulicité en vue de renforcer les débits.....	129
III.1.5.3. Relation entre les facteurs climatiques et la production de l'énergie hydroélectrique	129
III.1.5.4. Effets de la variabilité des facteurs climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique.....	131
III.1.5.4.1. Sur le plan économique.....	131
III.1.5.4.2. Variation saisonnière de la tarification de l'énergie électrique au Cameroun	131
III.1.5.4.3. Pertes financières probables relatives à la variabilité des facteurs climatiques	132
III.1.5.4.4. Sur le plan environnemental	133
III.2. DISCUSSION	134
III.2.1. Fluctuations climatiques	134
III.2.2. Effets des facteurs climatiques sur les ressources en eau au sein du bassin du fleuve Sanaga	137
III.2.3. Effets des facteurs climatiques sur la dynamique du couvert végétal.....	140
III.2.4. Estimations de la production de l'énergie hydroélectrique.....	143
CHAPITRE IV. CONCLUSION GENERALE	146
ET PERSPECTIVES.....	146
IV.1. CONCLUSION GENERALE.....	147
IV.2. PERSPECTIVES	152
IV.3. RECOMMANDATIONS	152
IV. 3. 1. Au Gouvernement.....	152
IV. 3. 2. A l'Observatoire National sur les Changements Climatiques (ONACC) et à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN).....	154
IV. 3. 3. A Electricity Development Corporation (EDC)	154
IV. 3. 4. A l'entreprise concessionnaire (ENEO)	154
IV. 3. 5. A la Société Nationale de Transport d'Electricité (SONATREL).....	155
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	156

ANNEXES

Annexes A1. Températures de surface de l'Atlantique.	I
Annexes A2. Pression des anticyclones.	III
Annexes A3. Présentation des stations météorologiques.....	V
Annexes A4. Températures moyennes mensuelles des stations observées du bassin.	V
Annexes A5. Régime spatiotemporel et domaines de variations des précipitations (en mm) des stations du bassin de la Sanaga.	VI
Annexes 6. Evolution des précipitations et températures moyennes annuelles dans certaines stations du bassin de la Sanaga.	VI
Annexes 7. Domaines de variations des précipitations (en mm) des stations du bassin de la Sanaga.....	IX
Annexes 8. Diagrammes ombrothermiques des stations étudiées.	XI
Annexes 9. Domaine de variation spatiotemporelle de l'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle et annuelle dans le bassin de la Sanaga.	XII
Annexes 10. Coefficients de Thiessen.	XIV
Annexes 11. Publications.	XIV

LISTE DES FIGURES

Fig. 1. Potentiel d'énergie renouvelable en Afrique subsaharienne.....	11
Fig. 2. Capacité du réseau installé (GW) en Afrique subsaharienne de 2005 à 2015	12
Fig. 3. Proportion des foyers de production de l'énergie électrique (A) et dans les différentes centrales hydroélectriques (B) en MW.	14
Fig. 4. Barrages d'Édéa (a) et de Song Loulou (B).....	16
Fig. 5. Barrage de Memve'ele (a) et mise en eau à Lom-Pangar (b) (actucameroun.com)	16
Fig. 6. Barrage de Lagdo sur la Bénoué (Energies Media, 2019).....	17
Fig. 7. Mécanisme de transformation de l'énergie hydroélectrique	21
Fig. 8. Transmission de puissance d'une centrale.....	21
Fig. 9. Jeux de barres (Source : archives d'installation de la centrale d'Édéa).....	22
Fig. 10. Exemple de chaîne énergétique	22
Fig. 11. Suivi (a) Monitoring de turbidité et (b) d'hydrologie.....	22
Fig. 12. Bassins hydrographiques du Cameroun.....	27
Fig. 13. Pompage d'Ekman (a) et effets des centres d'action atmosphérique (b) (http://www.wired.com/wiredscience/2010/08/atlantic-plastic/).....	31
Fig. 15. Diagramme de changement des phases de l'eau.....	35
Fig. 16. Schéma simplifié du cycle hydrologique	36
Fig. 17. Circulation atmosphérique générale	37
Fig. 18. Réseau hydrographique et hydrométrique du bassin de la Sanaga.....	53
Fig. 19. Principe de classification	66
Fig. 20. Techniques de filtrage d'images	67
Fig.21. Schéma de segmentation, du choix des attributs et de classification d'images.....	67
Fig. 22. Evolution (a) et écarts à la moyenne (b) des températures sur la surface de l'Océan Atlantique (5-30°North, 60-30°West ; 0-30°S, 30°W-10°E).....	70
Fig 23. Evolution de la pression aux niveaux des anticyclones de l'Atlantique.....	71
Fig. 24. Combinaison des pressions des anticyclones atlantiques et la NAO.....	72
Fig. 25. Températures moyennes annuelles au-dessus du bassin de la Sanaga	73
Fig. 26. Températures moyennes interannuelles dans les différentes zones agroécologiques du bassin du fleuve Sanaga	74
Fig. 27. Températures mensuelles dans les différentes zones agroécologiques couvertes par le bassin du fleuve Sanaga	77
Fig. 28. Evolution des précipitations moyennes annuelles dans les zones agroécologiques du bassin de la Sanaga	79
Fig. 29. Ecart à la moyenne des précipitations dans les différentes zones agroécologiques du bassin de la Sanaga	81
Fig. 30. Précipitations moyennes mensuelles dans les aires agroécologiques du bassin de la Sanaga	86
Fig. 31. Précipitations moyennes tombée à l'échelle des sous bassins du fleuve Sanaga de 1950 à 2018.....	89
Fig. 32. Précipitations moyennes mensuelles recueillies dans le bassin du fleuve Sanaga de 1950 à 2018.....	90
Fig. 33. Pourcentage décennal et coefficient de variation décennal des précipitations de la dans les zones agroécologiques du bassin du fleuve Sanaga.....	91

Fig. 34. Moyennes décennales des précipitations moyennes tombées dans le bassin du fleuve Sanaga.....	92
Fig. 35. Diagramme ombrothermique des stations du bassin du fleuve Sanaga.....	93
Fig. 36. Evapotranspiration potentielle moyenne dans le bassin de la Sanaga.....	95
Fig.37. Carte climatique du bassin du fleuve Sanaga.....	96
Fig. 38. Lame d'eau écoulée à Édéa.....	97
Fig. 39. Variation du déficit d'écoulement de la Sanaga à Édéa.....	98
Fig. 40. Coefficient d'écoulement de la Sanaga à Édéa.....	98
Fig. 41. Propension spatiotemporelle des épisodes sismiques au sein du bassin de la Sanaga et ses environs.....	101
Fig. 42. Comportements cumulés des épisodes sismiques au sein du bassin de la Sanaga.....	101
Fig. 43. Evolution des débits naturels interannuels de certains exutoires du bassin du fleuve Sanaga.....	102
Fig. 44. Débits naturels moyens mensuels de certains exutoires du bassin de la Sanaga de 1950 à 2018.....	104
Fig. 45. Moyennes décennales des débits naturels de la Sanaga à Edéa.....	104
Fig. 46. Evolution de l'énergie hydroélectrique potentielle à certains exutoires du bassin du fleuve Sanaga.....	105
Fig. 47. Production interannuelle de l'énergie réelle à la Centrale hydroélectrique d'Édéa.....	107
Fig. 48. Production mensuelle de l'énergie hydroélectrique à la Centrale d'Édéa.....	107
Fig. 49. Evolution de l'offre et de la demande des années 2000 à 2006.....	108
Fig. 50. Corrélation interannuelle (a) et mensuelle (b) entre énergie potentielle et énergie réelle..	108
Fig. 51. Effet du cumul de MES sur les débits.....	109
Fig. 52. Classification des images utilisées à 9 pixels, à 5 pixels et à 1 pixel.....	110
Fig. 53. Indices de représentations des écosystèmes dans le bassin de la Sanaga.....	111
Fig. 54. Dynamique du couvert végétal dans le bassin du fleuve Sanaga.....	114
Fig. 55. Ecart à la moyenne et rapport à la normale des températures du bassin du fleuve Sanaga.....	117
Fig. 56. Moyenne décadaire (mm) des précipitations du bassin du fleuve Sanaga.....	119
Fig. 57. Abaques hydrothermiques des zones agroécologiques du bassin de la Sanaga.....	120
Fig. 58. Brûlis et houage au sein du bassin de la Sanaga.....	122
Fig. 59. Destruction des espaces considérables de végétation de forêt au cours du montage des aqueducs (a) et la construction de l'autoroute Yaoundé-Douala (b) (Photos de terrain).....	125
Fig. 60. Evolution de la charge solide moyenne en fonction des débits dans la Sanaga.....	126
Sanaga à Ebebda, 1994-1996 ; (2) Sanaga à Ebebda 2005-2006 ; (3) Sanaga à Edéa 2009-2010.	126
Fig. 61. Evolution de l'érosion fluviale (taux d'altération chimique et d'érosion mécanique) dans le bassin de la Sanaga.....	127
Fig. 62. Relation interannuelle pluie moyenne-débits de la Sanaga à Edéa.....	128
Fig. 63. Relation mensuelle pluie moyenne-débits dans le bassin du fleuve Sanaga.....	128
Fig. 64. Remplissage des retenues de régulation de la Sanaga.....	129

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Ressource hydraulique dans le monde en milliards de kilowatts	9
Tableau II. Production de l'énergie hydroélectrique des continents en 2014 et 2015.....	10
Tableau III. Grands producteurs de l'hydroélectricité dans le monde en 2017	10
Tableau IV. Consommation d'électricité par habitant et électrification par zone géographique d'Afrique et la France	12
Tableau V. Aménagements probables dans les bassins versants camerounais.....	15
Tableau VI. Grille d'estimation de puissance (en MW) libérée par une turbine selon ses caractéristiques.....	20
Tableau VII. Bassins versants et caractéristiques bioclimatiques.....	26
Tableau VIII. Pourcentage d'occupation du territoire par bassin hydrographique	30
Tableau IX. Températures et précipitations des climats du globe en certaines localités de 1931 à 1960.....	34
Tableau X. Stations météorologiques exploitées pour les données des précipitations et des températures	54
Tableau XI. Attitude du paramètre.	58
Tableau XII. Caractérisation hydrologique mensuelle	60
Tableau XIII. Caractéristiques de certaines chutes exploitées dans le bassin de la Sanaga	61
Tableau XIV. Quelques caractéristiques des données antérieures sur le bassin versant de la Sanaga provenant des travaux de divers auteurs entre 1994 et 2012.....	64
Tableau XV. Caractéristiques des images SPOT utilisées.....	65
Tableau XVI. Variation des températures de surface de l'Atlantique	71
Tableau XVII. Les cycles d'apparition des évènements El-Niño et La Niña	72
Tableau XVIII. Variation des températures annuelles (en °C) dans certaines stations du bassin de la Sanaga de 1970 à 2018.....	75
Tableau XIX. Discontinuités des températures dans certaines stations du bassin de la Sanaga....	76
Tableau XX. Typologie et régime pluviométrique au cours mois de la période d'observation	82
Tableau XXI. Attitude de la pluviométrie des stations du bassin de la Sanaga et environs	83
Tableau XXII. Estimations de la dynamique des précipitations (phase et intervalles de confiance) dans le bassin de la Sanaga	83
Tableau XXIII. Discontinuités pluviométriques des stations observées.....	88
Tableau XXIV. Disponibilité mensuelle de l'eau (en mm) de l'année moyenne au niveau des stations du bassin de la Sanaga.	95
Tableau XXV. Bilan hydrologique tel que recueilli par des stations identifiées	99
Tableau XXVI. Paramètres de variabilité hydrologique.....	99
Tableau XXVII. Irrégularité interannuelle et saisonnière.....	99
Tableau XXVIII. Inventaire des épisodes sismiques au sein du bassin du fleuve Sanaga et ses environs de 1950 à 2019.	100
Tableau XXIX. Les débits naturels interannuels (m ³ /s) dans le bassin de la Sanaga de 1950 à 2018 et zone climatique	102
Tableau XXX. Variations des débits (m ³ /s) dans le bassin du fleuve Sanaga de 1950 à 2018 ...	103
Tableau XXXI. Energie hydraulique libérable par certaines chutes du bassin de la Sanaga.....	105
Tableau XXXII. Les phases de l'eau au sein du bassin du fleuve Sanaga	106
Tableau XXXIII. Variation saisonnière des débits solides et de la dégradation spécifique du bassin versant de la Sanaga	109
Tableau. XXXIV. Résultats d'interprétation des images satellitaires du bassin versant de la Sanaga	112
Tableau XXXV. Domaines biogéochimiques dans le bassin du fleuve Sanaga.....	122
Tableau XXXVI. Géomorphologie et processus d'érosion	123
Tableau XXXVII. Types de sols et substratum selon les localités	124

Tableau XXXVIII. Variation des concentrations des matières particulaires et dissoutes dans le bassin de la Sanaga	125
Tableau XXXIX. Evolution de la lame d'eau, des taux d'érosion mécanique et d'altération chimique, lame de sol érodé dans le bassin du fleuve Sanaga entre 1970 et 2010.....	126
Tableau XL. Corrélation entre facteurs climatiques et débits à Édéa	128
Tableau XLI. Corrélation facteurs climatiques- production d'énergie	129
Tableau XLII. Corrélation débits production d'énergie hydroélectrique à la Centrale d'Édéa ...	130
Tableau XLIII. Corrélation rho de Spearman (Rs)	130
Tableau XLIV. Impacts éventuels des éléments bioclimatiques et solutions y afférentes	131
Tableau XLV. Horo-saisonnalité de la tarification (en francs CFA) de l'énergie électrique depuis 2003.....	132
Tableau XLVI. Coût de revient (en francs CFA) en fonction des facteurs climatiques du kWh d'énergie.....	132
Tableau XLVII. Effets de la production de l'hydroélectricité sur les composantes environnementales suite à la variabilité climatique	133
aisonnalité de la tarification (en francs CFA) de l'énergie électrique depuis 2003.	132
Tableau XLVI. Coût de revient (en francs CFA) en fonction des facteurs climatiques du kWh d'énergie	132
Tableau XLVII. Effets de la production de l'hydroélectricité sur les composantes environnementales suite à la variabilité climatique	133

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ABN :	Autorité du Bassin du Niger
ADER :	Agence de Développement des Energies Renouvelables
AES-SONEL	All Electricity Services-Société Nationale d'Electricité au Cameroun
AFD :	Agence Française pour le Développement
AIE/IEA :	Agence Internationale de l'Energie/International Energy Agency
ALUCAM :	Compagnie d'Aluminium du Cameroun
AMCOW :	African Ministers Association in Charge Of Water
AMS :	American Mathematics Society
ANAPI :	Agence Nationale pour la Promotion de l'Investissement
ARSEL :	Agence de Régulation du Secteur d'Electricité
BUCREP :	Bureau Central de Recensement de la Population
CAMWATER :	Cameroon Water Utilities Corporation
CBLT :	Commission pour le Bassin du Lac Tchad
CCNUCC.	Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques
CDC :	Cameroon Development Corporation
CEA :	Commissariat d'Energie Atomique
CEHQ :	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
CEPMAE :	Centre d'Editions et de Production des Manuels et Auxiliaires de l'Enseignement
CERFACS :	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CICOS :	Comité Inter Etats pour le Congo et la Sangha
CIEH :	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
CIGB :	Commission Internationale des Grands Barrages
CME :	Coronal Mass Ejection
CNE :	Comité National de l'Eau
CNES :	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS :	Centre National des Recherches Scientifiques
COP :	Conference Of Parties
CRDI :	Centre de Recherches pour le Développement International
CRH :	Centre de Recherches Hydrologiques
CRU :	Climatic Research Unit
DATZF :	Direction de l'Aménagement du Territoire et de la mise en valeur des Zones Frontalières
DAVOC :	Draw A Vision Of Cameroon
DGTC :	Direction des Grands Travaux Canadiens
DMN :	Direction de la Météorologie Nationale
DOT :	Dutch Open Telescope
DSCE :	Document de Stratégies pour la Croissance et l'Emploi
DSRP :	Document de Stratégie pour la Réduction de la Pauvreté
EDC :	Electricity Development Corporation
EDF :	Electricité De France
ENR :	Energies Renouvelables
ENEO :	Energy Of Cameroon
ENPC :	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
ESA :	European Space Agency (Agence Spatiale Européenne)
FAO :	Food and Agricultural Organization of United Nations
GIEC/IPCC.	Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat/Intergovernmental Panel on Climate

	Change
GIRE.	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GIS :	Geographic Information System
GISS :	Goddard Institute for Space Studies
GMT :	Greenwich Mean Time
GWP.	Global Water Partnership
ICRE-RF :	Investment Climate and Business Environment Research Fund
IDAF :	Integrated Development of Artisanal Fisheries
IERS :	International Earth Rotation and Reference Systems Service
IESO :	Independent Electricity System Operator
IMCCE :	Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides
IMO	Electricity Market Operator
INC :	Institut National de Cartographie
IRAD	Institut des Recherches Agronomiques pour le Développement
IRD :	Institut de Recherches pour le Développement
IRGM :	/Institut des Recherches Géologiques et Minières
ITIE :	Initiative pour la Transparence dans les Industries Extractives
IWMI :	International Water Management Institute
LAGE.	Laboratoire d'Analyses Géochimiques des Eaux
LESIA :	Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Interprétation en Astrophysique
MDI :	Michelson Doppler Imager
MINADER :	Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural
MINATD :	Ministère de l'Administration Territoriale et de la Décentralisation
MINEE :	Ministère de l'Energie et de l'Eau
MINEF :	Ministère de l'Environnement et des Forêts
MINEPAT :	Ministère de l'Economie, du Plan et de l'Aménagement du Territoire
MINEPDED :	Ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et du Développement Durable
MINEPIA	Ministère de l'Elevage, des Pêches et des Industries Animales
MINFOF :	Ministère des Forêts et de la Faune
MINMEE :	Ministère des Mines de l'Eau et de l'Energie
MSC :	Messinian Salinity Crisis
NAO :	Northern Atlantic Oscillation
NASA :	National Aeronautics and Space Administration
NCDC :	National Climatic Data Center
NEPAD :	New Partnership for African Development
NOAA :	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODD :	Objectifs De Développement
OMD :	Objectifs du Millénaire pour le Développement
OMM.	Organisation Mondiale de la Météorologie
ONACC :	Observatoire National sur les Changements Climatiques
ONERC :	Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique
ORSTOM :	Office des Recherches Scientifiques et Techniques d'Outre-Mer
PACER :	Programme d'Action Energies Renouvelables
PAGER :	Programme d'Approvisionnement Groupé en Eau potable des populations Rurales
PANERP :	Plan d'Action National Energie pour la Réduction de la Pauvreté
PDSE :	Programme de Développement du Secteur de l'Energie
PEN :	Plan Energétique National

PME :	Petites et Moyennes Entreprises
PNACC :	Plan National d'Adaptation aux Changements Climatiques
PNUD :	Programme des Nations Unies pour le Développement
PSFE :	Programme Sectoriel Forêt et Environnement
PSMC :	Public Service Management Code
PSRMEE :	Programme de Sécurisation des Ressources Minières, de l'Eau et de l'Energie
RCD :	Réseau Climat et Développement
REDD+ :	Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Désertification
RIE :	Réseau Isolé de l'Est
RIN :	Réseau Interconnecté Nord
RIS :	Réseau Interconnecté Sud
SOGREAH :	Société Grenobloise d'Analyses Hydrologiques
STEREO :	Solar Terrestrial Relations Observatory
UCLA :	Université de Californie à Los Angeles
UICN.	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
UMR :	Unité Mixte de Recherche
UNESCO :	United Nations for Education Science and Culture Organization
UTC :	Temps Universel Coordonné de Greenwich
WEO :	World Energy Outlook
WRI :	World Resource Institute
WWAP :	World Water Assessment Program

RESUME

La production énergétique constitue l'un des quatre facteurs fondamentaux du développement moderne des pays en général et ceux en voie de développement en particulier. Le riche potentiel hydroélectrique du Cameroun marqué par la présence de nombreux chutes et rapides sur les cours d'eau est un véritable atout pour la production de l'énergie hydraulique qui est influencée par la taille et la nature des écosystèmes des bassins versants concernés. La déclivité et le substratum entraînent l'accélération des écoulements. Le passage dans les différentes zones climatiques peut augmenter ou réduire les écoulements et par conséquent le débit du cours d'eau. Le but de cette étude est d'apprécier l'impact des variations des facteurs climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique au Cameroun. Dans la poursuite de l'objectif principal, des données secondaires de pluviométrie, de températures et des débits de 1950 à 2018 ont été étudiées, en plus une collecte des données sur le prélèvement d'échantillons d'eau du bassin du fleuve Sanaga à certains exutoires à des périodes différentes. Ces données ont été analysées par les méthodes statistiques qui consistaient à faire la synthèse des données sur les précipitations et les températures ; à détecter les ruptures, à calculer l'ETP, à évaluer la disponibilité de l'eau au sein du bassin et les matières en suspension et à analyser les débits ainsi que la production de l'énergie hydroélectrique effective dans les barrages du bassin et enfin à établir des corrélations diverses. De cette méthodologie, il ressort que la pluie moyenne dans le bassin de la Sanaga à Édéa est de 1881,4 mm au cours de la première sous-période d'étude (1950-1982) tandis qu'elle est 1773,8 mm pour la deuxième (1983-2018) soit un écart absolu de 107,6 mm (5,7 %). La tendance (trend) d'équation $y = -0,641x + 1866$, montre une régression. Les températures moyennes annuelles évoluent de 23,1 °C en 1976 à 24,2 °C en 2016. La moyenne est de $23,7 \pm 0,27$ °C. La tendance montre une augmentation progressive des températures depuis 1979. L'ETP varie de 936,6 mm en 1976 à 1219,9 mm en 1998, pour une moyenne de 1138,2 mm et une tendance d'équation $y = 2,549x + 1088$. Les courbes de l'énergie potentielle ont les allures de celles des débits. La puissance hydroélectrique potentielle subit une chute de l'ordre de 0,12 % à 0,26 % au cours de sa transformation par la turbine puis sa transmission au réseau par le biais d'une génératrice dont les rendements sont compris entre 74 % et 88 %. La production effective de la centrale d'Édéa a atteint son maximum en 1978-1979 qui était de 1.384.352,6 MW. Sa moyenne est de 1.231.024 MW au cours de la période 1974-1991. La baisse de la production de l'électricité observée entre juillet et août pour la période peut provenir du problème de réadaptation des machines au flux élevé de l'eau qui tend à les étouffer de la vitesse de croisière atteinte et de la diminution de la hauteur de chute de l'eau. La production de l'énergie peut décroître tandis que les débits augmentent, à cause de l'état des machines tel que leur âge, la maintenance, les produits transportés par l'érosion (limons et alluvions). L'entreprise concessionnaire de l'hydroélectricité et l'Etat perdent respectivement 6125 et 1145,34 FCFA par consommateur moyen suite à la variabilité climatique. Ces résultats montrent une baisse des précipitations couplée à une hausse de températures, les impacts étant une forte évaporation et une diminution des ressources en eau au sein du bassin. Adjoints à la sédimentation, ces effets affectent la production hydroélectrique induisant les délestages.

Mots clés : bassin du fleuve Sanaga, impact, potentiel énergétique, précipitations, puissance, températures.

ABSTRACT

This study is entitled “Climatic factors and hydrological regimes for the hydroelectric production in Cameroon: cases study of the Sanaga watershed”

Energy production is one of the four fundamental factors in the modern development of countries in general and the developing ones in particular. The rich potential hydroelectric of Cameroon marked by the presence of numerous falls and rapids on watercourses is a real asset for the production of hydroelectric power, which is influenced by the size, and nature of the ecosystems of the concerned slopes. The slope and the substratum cause the acceleration of the flows. The passage of watercourses in the different climatic zones of the basin can increase or reduce the run-off and consequently the flow of the watercourse. In order to assess the impact of variations in climatic factors on the production of hydroelectric power in Cameroon. Based on this objective, secondary data on rainfall, temperatures and flows from 1950 to 2018, and the collection of water sampling data from the Sanaga basin to some outlets at different times. The used data were analyzed by statistical methods. The methodology consisted of making data synthesis on precipitations and temperatures, detecting breaks, calculating the FTE and assessing the availability of water within the basin, the suspended material and analyzing the flows as well as the effective production of the hydroelectric energy in the dams and finally to determine the various correlations. It emerges that the module of average rainfall in the Sanaga basin in Édéa during the first study sub-period (1950-1982) is 1881.4 mm while it is 1773.8 mm for the second (1983-2018), i.e. an absolute difference of 107.6 mm (5.7%). The trend of equation $y = -0.641x + 1866$ shows a decrease and the average annual temperatures range from 23.1 °C in 1976 to 24.2 °C in 2016. The trend shows a gradual increase in temperatures since 1979. The FTE varies from 936.6 mm in 1976 to 1219.9 mm in 1998, for an average of 1138.2 mm with the tendency of equation $y = 2.549x + 1088$, indicating a slight availability of water. The curves of potential energy are similar to those of flow rates. The potential hydroelectric power falls between 0.12% to 0.26% during its transformation by the turbine then its transmission to the network through a generator, with characteristics between 74 % and 88%. The effective production in the Édéa power plant peaked in 1978-1979 and varies from 1,384,352.6 MW to 1,048,981 MW. Its average was 1,231,024 MW during the period 1974-1991. The drop-in electricity production observed between July and August may be due to the problem of readjusting the machines to the high flow of water, which tends to suffocate them from reaching the cruising speed and the decrease in the level of waterfall. The production of energy can decrease while the vital flow increases, because of the condition of the machines such as their age, maintenance, the products transported by erosion (silt and alluvium). The hydroelectric concessionaire and the State could lose annually 6,125 and 1,145.34 FCFA respectively per average consumer due to climate variability. These results show a decrease in rainfall linked to an increase in temperatures, the impacts being a high evaporation and a decrease in water resources within the basin. Added to sedimentation, these effects affect the hydroelectric production causing electric current shortage to its network.

Keywords: energy power, hydroelectric potential, impact, precipitations, Sanaga watershed, temperature.

INTRODUCTION GENERALE

Contexte

Le changement climatique, un des enjeux du 21^è siècle mobilise sans cesse les décideurs et scientifiques de la planète dès l'aube du 21^è siècle (GIEC, 2001). Il coordonne les interactions océan-atmosphère déterminant la variabilité d'autres éléments du système hydro climatique (CNRS, 2014) et affectant divers secteurs de développement. Le développement moderne dépend de quatre facteurs fondamentaux à savoir les ressources financières, minières, humaines et énergétiques (PNUD, 2015). On distingue parmi les ressources énergétiques, celles qui sont non renouvelables (hydrocarbures, uranium) et d'autres qualifiées de renouvelables (ENR) ou dites énergies propres (solaire, géothermique, éolienne, hydraulique, ...).

La production hydroélectrique en Afrique en 2017 étant environ de 126 TéraWatts-heure, soit 3 % de la production mondiale (IEA, 2019). Celle du Cameroun pour la même année n'est que de 6 TéraWatts-heure, soit 0,14 % de la production mondiale et 4,76 % au niveau continental bien qu'elle représente 63,63% de la production hydroélectrique de la RDC de la même année à savoir 9,4 Terawatts-heure (ANAPI, 2020). Ces chiffres confirment le fait que le Cameroun avec 294 Terawatts-heure (MINEPAT, 2020), dispose du second potentiel hydroélectrique en Afrique subsaharienne après la République Démocratique du Congo (RDC) (PNUD, 2014) qui a un potentiel de 1000 Terawatts-heure (ANAPI, 2020) devant le Cameroun soit 29,4 %. Seulement 0,8 Gigawatt de puissance installée est en service sur un potentiel exploitable de 115 TéraWatts d'énergie de source hydraulique encore non mise en valeur (MINEE, 2009). Ce potentiel hydro énergétique est plus concentré dans le bassin versant de la Sanaga.

Le Président Ahmadou Ahidjo dans son discours inaugural en 1974 déclare « La création du barrage d'Édéa a posé des inquiétudes non seulement pour sa rentabilité, mais aussi pour l'intérêt que la nation voulait en tirer... » (CEPMAE, 1976). Ainsi, la Centrale d'Édéa répond à l'inquiétude axée sur son intérêt car, sa production ne varie qu'entre 46,83 % et 61,61 % de la capacité de production des machines installées (Bessoh *et al*, 2019).

Les ressources en eau jouent un rôle capital dans l'économie par leur usage dans l'agriculture, la santé, l'industrie et l'hydroélectricité ou pour l'approvisionnement des agglomérations urbaines et rurales en eau potable et par la satisfaction d'autres besoins domestiques comme l'assainissement (MINEE, 2009 ; AMCOW, 2011). Les enjeux liés aux utilisations concurrentielles des ressources en eau au regard de leurs disponibilités (quantité

et qualité), ainsi qu'à leurs capacités de renouvellement sont multiples (Causeret & Sarrazin, 2001). L'approche GIRE (gestion intégrée des ressources en eau) et l'approche par écosystème (Paturel *et al*, 1997 ; MINEE, 2009 ; Renaud, 2011) concourent à une gestion durable des bassins versants.

Les projets de développement du Cameroun définis dans le Document des Stratégies pour la Croissance et l'Emploi (MINEPAT, 2009) intéressent tous les secteurs de la vie économique du pays. Ces projets dont l'exécution prévisionnelle arrive à terme en 2035 s'appuient entre autres dans le secteur de l'énergie à travers le Plan de Développement du Secteur de l'Énergie (PDSE), dont les investissements en dépendent (PEN, 1990 ; MINEPAT, 2009). Si dans le DSCE (MINEPAT, 2009), le Cameroun met l'accent sur le développement des énergies propres, notamment l'hydroélectricité et le solaire, dans la SND30 (MINEPAT, 2020), le Cameroun inscrit les énergies renouvelables au cœur de la planification locale et compte produire 20 % de l'offre électrique nationale à partir des énergies renouvelables à l'horizon 2035.

L'énergie hydroélectrique dépend des facteurs climatiques qui influencent les volumes pluviométriques et leur répartition spatio-temporelle. Ces facteurs climatiques s'appuient sur les interactions océan-atmosphère qui agissent sur les régimes hydrologiques (climat, sols et écoulements). La pluviométrie a chuté au Cameroun et ailleurs depuis les années 1970 et cela s'est accentué dans les années 1980, contribuant au problème des ressources en eau au sein des bassins versants (Sighomnou, 2004 ; Liéno, 2007 ; Sighomnou *et al*, 2007). Cette chute des précipitations intensifiée par le changement climatique résulte en des écarts de températures.

Les barrages hydrauliques subissent les caprices de la nature à travers les éléments météorologiques (Grinberg, 2003) qui contribuent à l'évolution des écoulements. La construction des barrages de production sur l'étendue du territoire et celle des retenues n'a pas conduit à une production hydroélectrique satisfaisante car la demande énergétique croît encore plus vite à cause de la poussée démographique et des ambitions de développement du pays. Les variations climatiques influencent cette production par la fluctuation des ressources en eau au niveau des réservoirs, marquée par l'anticipation ou la prolongation de l'étiage (Bessoh, 2005). Les fortes précipitations ou leurs prolongements occasionnent l'accumulation des alluvions qui affecteront plus tard la production de l'énergie

hydroélectrique (Tchindjang *et al.* 2012). L'énergie hydraulique est influencée par la taille et la nature des écosystèmes des bassins versants concernés. Ces caractéristiques influencent sur les écoulements (Babin *et al.* 1974). La déclivité et le substratum contribuent à l'accélération des écoulements. Le ravalement des espaces inclinés par des eaux de ruissellement favorise le départ des matières particulaires et dissoutes vers les zones planes ou celles des barrages dont le comblement impacte sur l'hydroélectricité (Grinberg, 2003).

Depuis la fin des années 1990, on a assisté au Cameroun aux coupures inopinées et intempestives du courant électrique (délestages) sur le Réseau Interconnecté Sud (RIS) de la Société Nationale d'Electricité (AES-SONEL). Les décideurs ont opté pour sa privatisation avec l'ambition de surmonter ces délestages. Ainsi, depuis le début des années 2000, l'entreprise concessionnaire du courant électrique porte le doigt accusateur sur la baisse des précipitations dans les bassins versants. Le Cameroun a mis en vigueur depuis octobre 2003 par l'Agence de Régulation du Secteur de l'Electricité (ARSEL), une tarification horosaisonnaire de l'énergie, revue en 2012. Dans ce document, le prix du kWh de l'énergie est réparti en deux périodes (sèche et humide) de l'année en vue de rentabiliser la productivité même en période d'étiage. L'écart relatif du prix du kWh relevé au cours des deux périodes est d'environ 15,4 % (Bessoh *et al.*, 2019a). Malgré cela, les problèmes de délestages persistent.

Problématique

Les ressources hydriques sont considérées comme une source d'énergie renouvelable. Leur exploitation pour des fins de production d'énergie électrique constitue un défi pour les pays qui tendent à réduire leur dépendance aux sources d'énergie fossile comme les hydrocarbures et le charbon (Samoura, 2011). Souvent, l'énergie tirée de l'eau dépend des débits impactés par le climat.

Incidence de la variabilité climatique sur les régimes hydrologiques

Les variations des précipitations provoquent des changements de comportement des cours d'eau. L'excès des précipitations provoque des inondations (Tchindjang *et al.*, 2012 ; Amougou *et al.* 2015) et leur rareté pendant la période d'étiage ramène les cours d'eau au plus bas niveau. Cependant, on a évalué à Édéa le débit maximal (crue millénaire) à 8860 m³/s entre 1943 et 1969, extrapolé à 10 000 m³/s avant l'installation de la salle des machines de la Centrale d'Édéa, afin d'éviter des dommages (IGECO, 1967). La variation climatique

des récentes décennies se manifeste par la hausse des températures, accentue l'évaporation la conséquence directe étant le déficit d'écoulement. La rudesse des saisons sèches et leur longueur (4 mois au moins) intensifient l'irrégularité du réseau hydrographique (Dubreuil *et al.* 1975).

Sédimentation et disponibilité de l'eau

La végétation subit une dégradation continue du fait des activités humaines, les plus importantes étant l'agriculture, l'élevage et la pêche (Dubreuil *et al.*, 1975 ; Djoufack, 2011). Les dommages du couvert végétal perturbent la capacité de régulation de l'eau des pluies, mettent les sols à nu et exposent les cours d'eau au contact du soleil (Babin *et al.*, 1974). Les sols ferrallitiques en majorité absorbent de l'eau au cours de l'infiltration, gonflent en début des pluies et perdent cette eau en début de saison sèche suite à l'évaporation. La topographie favorise des dépôts importants de matériaux solides le long des cours d'eau par le ruissellement. Ces dépôts au fil des ans ont entraîné l'envasement et le comblement des barrages (Bessoh, 2005 et 2012 ; Tchindjang *et al.*, 2012) réduisant ainsi la quantité d'eau disponible.

Sous exploitation des centrales hydroélectriques

En période de crues, les centrales produisent de l'énergie avec une baisse relative de 10 % par rapport aux interphases (Bessoh *et al.* 2019a). Pendant l'étiage, la production énergétique baisse dans ces centrales malgré les apports des barrages de retenues. Au barrage d'Édéa par exemple, on a noté que la production de la centrale a été de 61,61% (1978-1979) et 46,83% (1982-1983) de la puissance installée et que 47% des productions interannuelles ont été en dessous de la moyenne au cours de la période 1974-1991, preuve que cette Centrale n'atteint pas ses objectifs visés d'installation (Bessoh *et al.* 2019a).

La présente étude contribue à bien cerner la dynamique des facteurs climatiques dans la gestion durable des ressources en eau dans les bassins versants. Le travail permet de déterminer, dans les conditions climatiques actuelles, de nouvelles franges de paramètres hydrologiques nécessaires pour une rentabilité des aménagements antérieurs et futurs. Enfin, ce travail s'ouvre à d'autres perspectives, notamment, la production des services climatologiques et hydrologiques nécessaires au secteur du tourisme, de la santé, de l'hydroélectricité, de l'agriculture, de l'approvisionnement en eau ainsi qu'à une meilleure valorisation de la ressource en eau.

Questions de recherche

Question principale

Les variations climatiques permettent-elles une gestion durable des ressources en eau pour le développement des infrastructures de production de l'énergie hydroélectrique au Cameroun ?

Questions spécifiques

- les facteurs climatiques principaux enregistrés suffisent-ils pour une production hydroélectrique optimale ?
- y a-t-il un lien entre les facteurs climatiques actuels et les ressources en eau au sein du bassin du fleuve Sanaga ?
- le niveau des équipements actuels répond-il aux besoins énergétiques escomptés ?
- comment se présentent les écosystèmes actuels du bassin versant de la Sanaga ?
- quel rapport y a-t-il entre les facteurs climatiques actuels et la production de l'énergie hydroélectrique effective ?

Hypothèses de recherche

Hypothèse principale

Les changements climatiques observés ne sont pas de nature à modifier durablement la production de l'énergie hydroélectrique au Cameroun.

Hypothèses spécifiques

- Les facteurs climatiques principaux mesurés ne présentent pas de différences significatives sur le long terme.
- Les variations climatiques n'impactent pas sur les ressources en eau au sein du bassin du fleuve Sanaga.
- Les équipements hydroélectriques installés au Cameroun semblent combler leurs attentes.
- L'état de la végétation au sein du bassin du fleuve Sanaga n'affecte pas les ressources en eau.
- Il existe une corrélation certaine entre les facteurs climatiques et la production de l'énergie hydroélectrique effective.

Objectifs de la recherche

Objectif général

L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'impact des variations des facteurs climatiques sur les ressources en eau pour une production de l'énergie électrique le long du bassin du fleuve Sanaga.

Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques qui guident cette recherche sont entre autres de :

- Évaluer l'évolution des facteurs climatiques principaux de 1950 à 2018 ;
- Établir la relation entre les variations des facteurs climatiques et les ressources en eau pour la production de l'énergie hydroélectrique ;
- Comparer l'évolution de l'énergie hydroélectrique potentielle des barrages et chutes et la production hydroélectrique réelle des centrales installées au sein du bassin de la Sanaga ;
- Déterminer la dynamique des écosystèmes du bassin versant du fleuve Sanaga ;
- Établir les corrélations entre les variations des facteurs climatiques et la production de l'énergie hydroélectrique.

Utilisant une démarche hypothético-déductive, cette étude traite des enjeux liés à l'exploitation du potentiel hydroélectrique du bassin du fleuve Sanaga à Edéa. Ce travail commence par une introduction générale qui inclut la présentation du problème et des objectifs de l'étude. Le premier chapitre comprend la revue de la littérature liée au cadre théorique de la recherche centrée sur l'impact des facteurs climatiques sur les ressources en eau pour une option de l'approche GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) qui prend en compte les principes et mécanismes de la gestion efficace de l'eau. Cette revue de littérature s'appuie sur des réflexions portant sur des thématiques liées à la gestion du bassin versant. Le chapitre II comprend le matériel ayant servi à atteindre chacun des objectifs fixés et la présentation de la méthodologie générale de l'étude basée sur différentes approches, les outils et les données utilisés. Le chapitre III est axé sur les résultats et leur discussion. Le document se termine par une conclusion générale assortie des recommandations et des perspectives pour les travaux futurs, la bibliographie suivie des articles publiés.

CHAPITRE I. REVUE DE LA LITTERATURE

Logé en Afrique Centrale au fond du Golfe de Guinée, le Cameroun dispose des ressources énergétiques diversifiées et inégalement réparties sur le territoire national. Certaines ressources énergétiques sont influencées par le climat, lui aussi caractérisé par sa diversité. Les infrastructures de production et de transformation de l'hydroélectricité sont influencées par la variabilité hydrologique qui découle de la variabilité climatique (Grinberg, 2003 ; Boyogemo *et al.* 2012). L'étude de la série de transformations successives relevées au cours de la production, nécessite la combinaison des facteurs physiques et techniques. Ce chapitre présente la situation de l'hydroélectricité dans le monde, en Afrique et au Cameroun, des régimes hydrologiques desquels résulte la ressource en eau et les facteurs du climat qui agissent sur les régimes hydrologiques et par ricochet sur la production de l'énergie hydroélectrique.

I.1. ENERGIE HYDROELECTRIQUE

I.1.1. Situation de l'énergie électrique dans le monde

La production hydroélectrique dans le monde était estimée à 4 197 TWh en 2017 soit près de 2,6 % des offres totales mondiales en énergie toutes sources confondues. La même année, les offres en énergie a représenté un total de 162 494,36 TWh dominée par la thermique à flamme du fait du développement industriel des pays tels que la Chine qui dispose de grandes réserves de charbon (AIE, 2019). Pourtant la même année, l'électricité consommée représente 18,7% de l'énergie mondiale utilisée. Le potentiel hydroélectrique total de la planète serait d'environ 5 fois plus que le niveau d'exploitation actuel (AIE, 2010 ; EDF, 2010). La répartition des ressources hydrauliques dans les régions du monde ne concorde ni avec la puissance installée ni avec production d'hydroélectricité (Tableau I).

Tableau I. Ressource hydraulique dans le monde en milliards de kilowatts (AIE, 2010, modifié)

Zone	Potentiel (10 ⁹ kW)	Exploité (10 ⁹ kW)	% du potentiel mondial	% du potentiel régional
Asie	658	17	22,9	2,58
Afrique	666	3,5	23,18	0,52
Europe	105	60	3,65	57,14
Océanie	130	4	4,52	3,07
Amérique du Nord	196	54	6,82	27,55
Amérique du Sud	463	6,5	16,11	1,40
Ex-URSS	655	15	22,8	2,29
Total	2873	160	99,98	5,569

L'Ex-URSS seule côtoyait le continent africain ou le continent asiatique en ressource. En dehors de l'Europe et de l'Amérique du Nord qui aménagent leur ressource, les autres

parties du monde sont à la traîne (EDF, 2010). La production d'électricité stagne en Europe, en Asie Centrale et Méridionale, régresse en Amérique du Nord et Centrale, progresse en Afrique et en Asie Orientale et Pacifique (Tableau II).

Tableau II. Production de l'énergie hydroélectrique des continents en 2014 et 2015 (AIE, 2016)

Région	PCC (GW)	PPT (GW)	2014 (TWh)	Ajouts 2014 (MW)	2015 (TWh)
Afrique	27,0	2,0	112	128	120
Asie Méridionale et Centrale	156,0	6,4	455	4 073	455
Asie Orientale et Pacifique	364,0	59,0	1 330	24 724	1 400
Europe	166,1	50,9	633	405	633
Amérique du Nord et Centrale	175,6	22,5	690	3 081	682
Amérique du Sud	147,9	1,0	680	4 979	685

PCC=Puissance centrales conventionnelles ; PPT=Puissance pompage-turbinage.

L'énergie hydraulique représente plus de la moitié de la production d'électricité totale nationale pour 4 des 10 premiers producteurs d'énergie du monde (Tableau III).

Tableau III. Grands producteurs de l'hydroélectricité dans le monde en 2017 (IEA, 2019)

Producteurs	EH (TWh)	% TM	CI	Q (GW)	PGP	% HPEN
Chine	1190	28,3	Chine	344	Norvège	95,7
Canada	393	9,4	Etats-Unis	103	Brésil	62,9
Brésil	371	8,8	Brésil	100	Canada	59,6
Etats-Unis	298	7,7	Canada	81	Viet Nam	44,8
Russie	187	4,5	Russie	52	Suède	39,7
Norvège	143	3,4	Japon	50	Chine	17,9
Inde	142	3,4	Inde	48	Russie	17,1
Japon	90	2,5	Norvège	32	Inde	9,3
Viet Nam	89	2,1	Turquie	27	Japon	8,4
Suède	66	1,6	France	26	États-Unis	7,6
Autres	1202	28,7	Autres	407	Autres	14,3
Monde	4197	100,0	Monde	1 270	Monde	16,3

EH= Energie hydraulique ; TM=total mondial ; CI=capacité installée ; Q=quantité ; PGP=Plus Grand Producteur ; HPEN=hydroélectricité dans la production d'électricité totale nationale

La pénurie d'électricité ne freine pas seulement la productivité économique, mais affecte aussi le confort, la qualité de vie et entrave la réalisation de nombreux Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). L'accès à une énergie fiable et abordable est essentiel à une productivité agricole meilleure (ADER, 2017), secteur dominant en Afrique.

I.1.2. Situation de l'énergie électrique en Afrique

I.1.2.1. Contrastes entre le potentiel électrique et sa mise en valeur

En matière d'électricité, l'Afrique se présente comme un continent de paradoxes ; à la fois un géant énergétique par les ressources dont elle dispose et un nain électrique avec 34

GW soit 19 % de capacité installée en fin d'année 2018 (<https://www.powermag.com/tag>). L'Afrique est riche en ressources solaire, éolienne, géothermique et hydroélectrique (ADER, 2017). Selon l'agence internationale de l'énergie (AIE), l'Afrique du Sud, la plus grande puissance économique du continent, possède 46 % de la capacité de production électrique de l'Afrique, suivie de l'Afrique du Nord 34 % et le reste de l'Afrique 20 % seulement. De plus, un quart des centrales électriques de l'Afrique subsaharienne ne sont pas en état de fonctionner et l'infrastructure existante s'étend rarement au-delà des principales villes (Kimani, 2008). Pialot (2016) souligne que l'Afrique, l'une des régions les plus ensoleillées ne tire que 2 % de son énergie du solaire et que l'Afrique subsaharienne compte aujourd'hui quelques 620 millions de personnes sans accès à l'électricité. Pour l'Agence Internationale pour les Energies Renouvelables (IRENA), le continent pourrait disposer de plus de 70 000 MW de capacité photovoltaïque à l'horizon 2030. Dans cette lancée, Cartwright (2015) décrit la répartition des types d'énergies renouvelables selon les zones géographiques d'Afrique (Fig. 1).

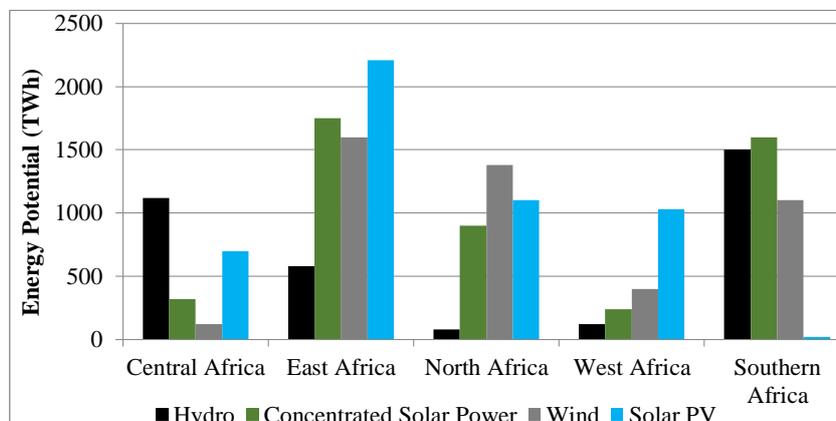


Fig. 1. Potentiel d'énergie renouvelable en Afrique subsaharienne (Cartwright, 2015)

En dehors de l'hydroélectricité relativement moins représentée, l'Afrique orientale présente de fortes quantités d'énergies renouvelables et variées. L'Afrique centrale et l'Afrique australe sont dominées par l'hydroélectricité. Le réseau électrique de l'Afrique subsaharienne dispose d'une capacité de production installée d'environ 90 GW, soit près de 0,1 kW par habitant contrairement aux économies les plus riches qui ont des capacités d'installer 1 à 3 kW par habitant (AIE, 2014). De cette capacité de l'Afrique Subsaharienne, la moitié est située en Afrique du Sud, 13 GW au Nigeria (Fig. 2). Si l'on exclut l'Afrique du Sud, l'ensemble de la production installée de l'Afrique subsaharienne n'est que de 28 GW, équivalente à celle de l'Argentine (Castellano *et al.* 2015). La faible capacité de production dans cette partie du continent s'explique en partie par la faiblesse des

investissements dans les systèmes électriques. La capacité technique de production potentielle en Afrique subsaharienne est estimée à 11 000 GW surtout à partir des sources renouvelables (Cartwright, 2015 ; Avila *et al.* 2017).

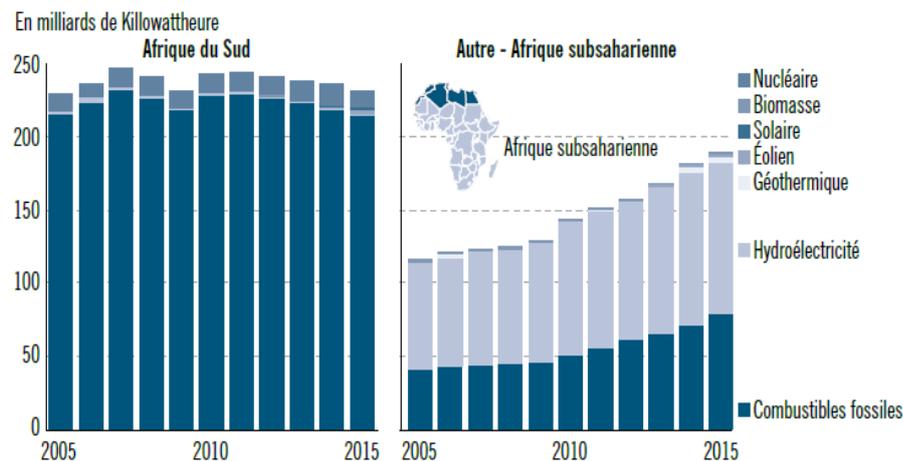


Fig. 2. Capacité du réseau installé (GW) en Afrique subsaharienne de 2005 à 2015 (Montaigne, 2019)

La République démocratique du Congo, troisième potentiel hydroélectrique du monde après la Chine et la Russie, donne moins de 6 % de sa population accès à l'électricité (Kimani, 2008). En 2016, l'Afrique a atteint une capacité totale d'électricité installée de 168 GW dont 33 GW en énergie renouvelable. Toutefois, le déficit d'électricité reste énorme : 45 % de la population africaine et 28 % des personnes dans les pays à faible revenu ont accès à l'électricité (ADER, 2017). La Banque Mondiale en 2009 a établi un rapprochement entre chaque zone géographique du continent africain et la France (Tableau IV).

Tableau IV. Consommation d'électricité par habitant et électrification par zone géographique d'Afrique et la France (Banque Mondiale, 2009; WEO, 2009)

Zone géographique	Consommation en kWh/hab./an	% d'électrification totale	% d'électrification urbaine	% d'électrification rurale
Afrique du Nord	961	94	97	93
Afrique de l'Ouest	128	40	64	19
Afrique Centrale	92	18	37	6
Afrique de l'Est	351	41	43	30
Afrique australe	1010	37	46	16
Afrique hors Afrique du Sud	254	15	36	6
France	7500	100	100	100

En Afrique subsaharienne, la consommation moyenne annuelle d'électricité est de 488 kWh par habitant, soit 5 % de la consommation par habitant des Etats-Unis (Banque Mondiale, 2014 ; ADER, 2017). Avila *et al.* 2017 relèvent que l'Afrique subsaharienne est confrontée à un déficit en électricité à deux égards : un décalage entre l'offre et la demande dans les régions connectées au réseau et un manque d'accès dans les régions hors réseau.

Les estimations de la demande incluant l'autoproduction telle que les générateurs diesel en Afrique subsaharienne, rapportent une demande d'électricité à 423 TWh en 2010 (Castellano *et al.* 2015). L'Agence Internationale de l'Energie (AIE) estime que la demande en électricité en Afrique subsaharienne augmente d'environ 45 % de 2000 à 2012 et s'attend à une demande moyenne de 4 % par an jusqu'à 2040 (AIE, 2014).

I.1.2.2. Organisations sous régionales pour une efficacité de production

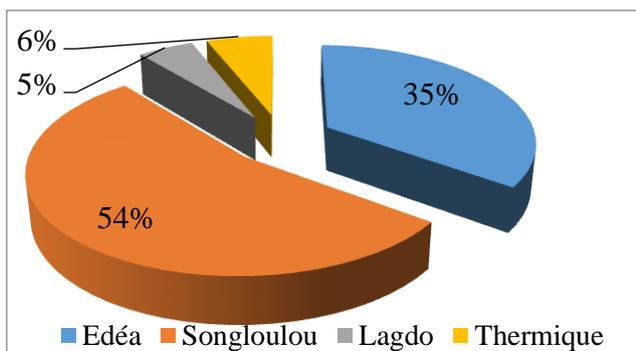
La concentration des ressources dans différentes zones souligne l'importance de la coopération régionale, certaines régions ayant le plus grand potentiel de production mais manquant la demande (Castellano *et al.* 2015). La nécessité en énergie, les moyens limités et le souci du développement ont contraint certains pays à opter pour l'intégration régionale. Le Pool d'énergie ouest-africain (West African Power Pool - WAPP) constitué de 14 pays, espère construire un réseau de partage et d'échanges d'électricité qui devrait coûter 4,6 milliards de dollars (Kimani, 2008). En Afrique de l'Est, l'énergie géothermique est une source potentielle d'énergie propre et fiable. Le Kenya rénove ses installations et ajoute de nouveaux puits pour élever la production d'énergie géothermique à 25 % du total actuel de la production d'électricité du pays (Kimani, 2008).

I.1.3. Situation de l'énergie électrique au Cameroun

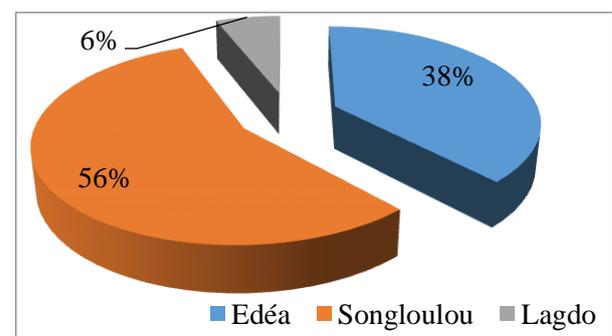
L'énergie consommée au Cameroun avant la mise en service de la centrale à gaz de Kribi est à 98 % hydroélectrique et à environ 2 % thermique (fioul). La puissance hydroélectrique installée est restée constante et égale à 719 MW pour une énergie hydroélectrique produite de 3892 GWh en 2006. Le potentiel exploitable est pourtant assez considérable : 19,7 GW pour un productible moyen de 115 TW par an. Cependant, moins de 1,5 % de ce potentiel est exploité (PEN, 1990). Une légère croissance de la puissance électrique installée s'observe de 2003 à 2006 résulte de l'entrée en service de nouvelles capacités thermiques importantes, en l'occurrence la centrale de Limbé (85 MW) ; de l'augmentation de la capacité existante (Oyomabang I et Logbaba) et de celle du nombre d'auto-producteurs d'électricité. La puissance des centrales thermiques publiques installées en 2006 est de 206 MW pour une production d'énergie de 255 GWh. La capacité d'autoproduction installée en 2006 est évaluée à 275 MW pour une énergie produite d'environ 960 GWh (ARSEL, 2004 ; AES-SONEL, 2006).

Le Plan de développement du secteur de l'électricité (PDSE) à l'horizon 2030 (MINEE, 2006), prévoit la construction du barrage de Lom-Pangar (réservoir et Usine au pied de 30 MW),, des centrales hydroélectriques de Nachtigal (330 MW), de Song-Mbengue (950 MW), de Kikot (350-550 MW), de Njock (270 MW) , de Ngodi (475 MW), de Song Ndong (250-300 MW), de Nyanzom (375 MW), de Bayomen (470 MW), de Mouila-Mogué (350 MW), de Mékin (12 MW), de Memve'ele (120-201 MW), de Bangangté (90 MW), de Warak (75 MW), de Colomines (12 MW). A ces projets, s'ajoutent des sites voués à l'exportation d'énergie à l'échelle sous régionale (CEMAC) et régionale (Nigéria) : Cholet (400 MW) , Grand Eweng (386 MW), Petit Eweng (230 MW), Noun-Wouri (1200 MW), Mandourou (67 MW), Mbinjal (66 MW), Lancrenon (34 MW), Vogzom (33 MW), Munaya (200 MW), Kpaf (300 MW) et Metchum (15-35 MW)

A la lumière du DSCE (MINEPAT, 2009), le Cameroun dispose d'un potentiel hydroélectrique estimé à 12000 MW par an, soit plus de 10 fois le potentiel exploité. Les projets à réaliser viseront à porter les capacités de production à 3000 MW à l'horizon 2020. Le gouvernement camerounais a opté pour l'amélioration de l'offre de l'électricité et à la relève du niveau des infrastructures pour relancer l'économie par l'attraction des investissements lourds dans les secteurs industriels et miniers. Ce qui explique l'émulation constatée dans le lancement simultané de plusieurs chantiers énergétiques. On note cependant une Puissance Thermique Utilisable (PTU) de 60 MW représentant 6 % de l'énergie produite au Cameroun (Fig. 3) dont 20 MW à Bamenda, 20 MW à Mbalmayo et 20 MW à Yaoundé renforcé par la centrale à gaz de Kribi de 216 MW (AES-SONEL, 2006).



A : AES-SONEL, 2006



B : MINEE, 2006

Fig. 3. Proportion des foyers de production de l'énergie électrique (A) et dans les différentes centrales hydroélectriques (B) en MW.

La sous-exploitation du potentiel naturel explique la faible offre énergétique du Cameroun, évaluée à 933 MW alors que le potentiel hydraulique rentable est estimé à 20

000 MW. La puissance installée est de 800 MW. Le taux de couverture nationale environ 26 % est assuré par trois réseaux : le réseau interconnecté Nord (RIN), le réseau interconnecté Sud (RIS) et le réseau isolé de l'Est (RIE). Le plan de développement dans ce domaine prévoit des investissements de 5853 milliards FCFA dans les dix prochaines années et comporte des projets de production et de construction de réseaux qui vont porter la production à 3000 MW en 2020 (PNUD, 2014). Les solutions à court terme ont été retenues : la construction d'une centrale à fioul lourd de 86 MW à Yassa près de la Dibamba entrée en service en décembre 2010, celle à gaz naturel à Kribi mise en service en mai 2013, la construction du barrage hydroélectrique de Mékin sur le Dja, de Memve'ele sur le Ntem, de Lom-Pangar et la réhabilitation des centrales hydroélectriques d'Édéa, de Song-Loulou et de Lagdo. Par la suite, des réflexions ont continué d'être menées pour le financement d'autres barrages hydroélectriques comme Nachtigal, SongMbengé, Colomines, Warak sur la Bini, Kikot, Njock (Tableau V).

Tableau V. Aménagements probables dans les bassins versants camerounais (MINMEE, 1990)

Chutes	Rivière	V (hm ³)	PI (MW)	DE (m ³ /s)	P (GWh)	CC (GF)	CRE (FCFA/kWh)
Noun-Wouri	Noun	560	1200	/	5200	/	28/30
Bayomen	Mbam	250	470	715	2 500	230/260	15/16
Kikot	Sanaga	305	630	1 575	4100 +400	350/400	12/13
Song-Mbengue	Sanaga	130	950	460	4000 +1100	400/450	13 /14
Song-Dong	Sanaga	150	275	1 200	1200+150	165/190	19/20
Chutes	Rivière	V (hm ³)	PI (MW)	SR (km ²)	P (GWh)	CC (GF)	(FCFA /kWh)
Njock	Nyong	125	120/270	14	925/1400	70/180	12/ 17
Mouila	Nyong	10	200	3	2000	140/160	12
Makaï	Nyong	20	120	10	930	75/90	14
Mpoumé	Nyong	200	120	45	800	75/90	15
Gouri	Metchum		450	NE	NE	NE	NE
Memve'Elé	Ntem	8	200	19	1140	200/220	28/30
Warak	Bini	530	75	/	192	/	/

V : Capacité réservoir ; PI : Puissance Installée ; DE : Débit d'équipement ; P : Productible ; CC : Coût de construction ; CRE : Coût de revient économique ; SR : Superficie réservoir ; GF : gigafrancs CFA ; NE : non évalué.

I.1.4. Présentation de quelques barrages hydroélectriques camerounais

Le barrage d'Édéa (Fig. 4a), premier du pays situé à 3°46'N 10°04'E est fait de digues en béton. L'amont est relié à l'aval par les canaux de passage d'eau (conduites forcées). A la terminaison de ces dernières, se présentent 14 canaux ou quatorze groupes turboalternateurs conçus par trois types d'architecture, réalisés en trois phases. La phase Édéa I comporte 3 groupes à pales fixes tandis que les phases Édéa II et III comportent respectivement 6 groupes de 20 mégawatts et 5 groupes de 21 mégawatts chacun, à pales orientables soit un total de 14 groupes. La différence de potentiel établie au-dessus de la turbine est transformée selon les types d'installations à savoir 5 500 V pour Édéa I et 10 300 V chacun

pour Édéa II et Édéa III. Les trois groupes d'Édéa I et quatre des cinq groupes d'Édéa III sont transformés en moyenne et haute tension de 15 et 90 kVA pour ALUCAM tandis que les six groupes d'Édéa II et un des cinq groupes d'Édéa III sont transformés en 90 kV à destination du reste du pays. Le débit efficace est de 935 m³/s tandis que celui de délestage est de 524 m³/s (AES SONEL, 2006).

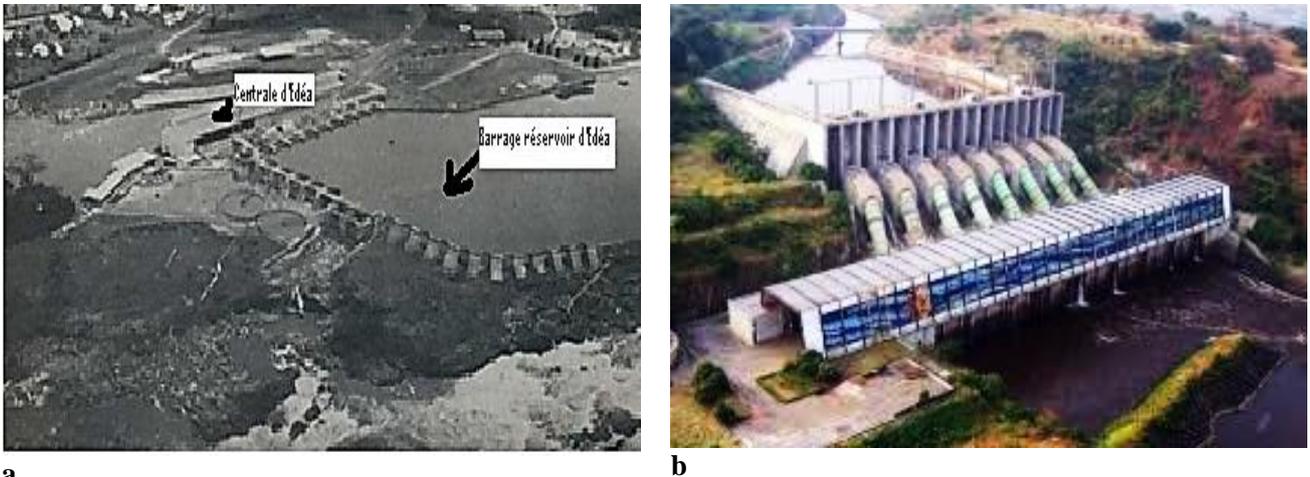


Fig. 4. Barrages d'Édéa (a) (Mélingui & Gwanfogbe, 1986) et de Song Loulou (B)

La centrale de Song-Loulou (Fig. 4b) est située à 4°04'41'' N, 10°27'54''E à 55 km en amont de celle d'Édéa. Elle possède un réservoir de modulation de tête avec 5 millions de mètres cubes pour 300 m de longueur et 27 m de hauteur.



Fig. 5. Barrage de Memve'ele (a) (DAVOC, 2008) et mise en eau à Lom-Pangar (b) (actucameroun.com)

Les évacuateurs de crues sont des vannes de surface de 135 m de longueur et 20 m de hauteur, pour une hauteur de chute moyenne de 40 m. Elle a été équipée en deux phases, Song-Loulou I (1981) et Song-Loulou II (1984), avec 8 groupes de 48 MW chacun pour atteindre une puissance installée de 384 MW. L'architecture est semblable à celle d'Édéa.

Ces groupes encaissent un débit efficace de $1040 \text{ m}^3/\text{s}$, celui des délestages étant de $724 \text{ m}^3/\text{s}$ (AES SONEL, 2006). Deux lignes de 90 kV en fils soutenus par des pylônes tout en alliage d'aluminium produit par le complexe ALUCAM/SOCATRAL, relie la centrale d'Édéa (260 MW) à celle de Song-Loulou (384 MW) par le Poste Contrôle du Réseau (PCR ou Grid Dispatch) de Mangombè. Le PCR est relié aux centrales thermiques de Bafoussam, Limbé, Bassa, Logbaba, Yassa, Oyom-Abang formant le Réseau Interconnecté Sud (RIS) enrichi par les barrages de Memve'ele (Fig. 5a) et de Mékin. Le Réseau Isolé de l'Est (RIE) débute par Lom-Pangar (Fig. 5b). Par ailleurs, le réseau interconnecté nord (RIN) centré pour le moment sur le barrage de Lagdo situé à $9^{\circ}03'N$ et $13^{\circ}41'E$ (Fig. 6) est en voie d'extension avec la réalisation future du barrage de Warak sur la Bini. Ce barrage a changé la physionomie et la dynamique de la localité mais, commence à présenter quelques fissures. Parallèlement, le futur barrage de Warak constituera non seulement un moyen de régulation du barrage de Lagdo, mais également un tremplin pour valoriser davantage les ressources en eau en amont du bassin versant de la Bénoué.

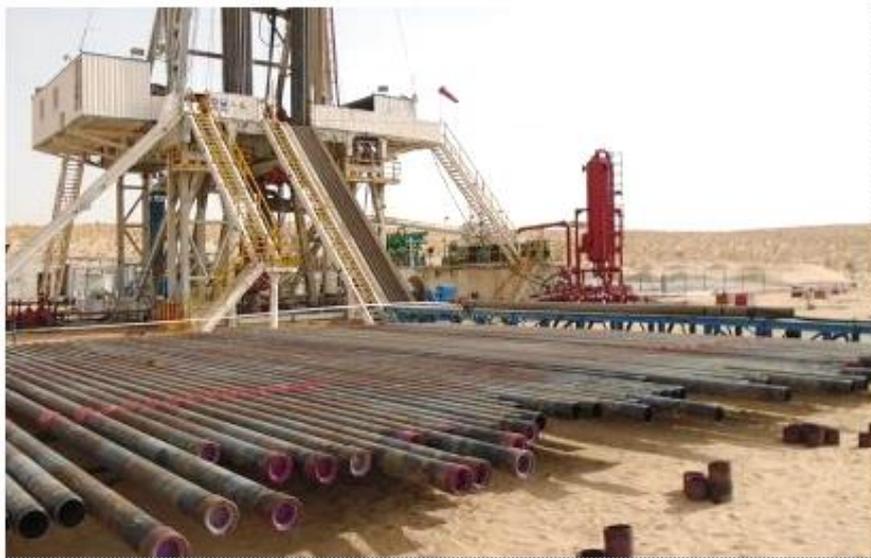


Fig. 6. Barrage de Lagdo sur la Bénoué (Energies Media, 2019).

I.1.5. Types de barrages

Ouvrage artificiel disposé en travers du lit d'un cours d'eau pour freiner son écoulement et créer une retenue élevant le niveau de l'eau en amont, un barrage hydroélectrique est puissant grâce sa hauteur de chute (Shamin *et al*, 2011). Les barrages peuvent en fonction de la hauteur appartenir aux catégories de barrage-poids, barrage-couple, barrages-voûtes, barrages à contreforts, et barrages mobiles (Gramme, 2006). L'architecture différencie les barrages (en béton et ceux en matériaux meubles). De

nombreux barrages cumulent plusieurs fonctions : stocker puis amener l'eau des rivières vers des systèmes d'irrigation ; augmenter la profondeur des rivières pour la navigation ; contrôler les débits pendant les périodes de sécheresse et de crue ; créer des lacs artificiels pour les loisirs ; concentrer la pente naturelle d'un site de rivière pour la production d'électricité à partir de l'énergie potentielle de l'eau (Thibaud, 2015). La nature des fondations est décisive dans le choix du barrage et de la centrale à édifier (CEHQ, 2014).

I.1.6. Types de centrales hydroélectriques

I.1.6.1. Centrales gravitaires

Les lignes suivantes sont issues de EDF, 2010 ; Blanchard, 2013 ; WEO, 2013. Les centrales gravitaires (zones d'escarpements) au Cameroun correspondent à celles où les apports d'eau dans le réservoir sont essentiellement issus des cours d'eau. Elles se distinguent selon le type de fonctionnement. Ainsi on a :

- Les centrales au fil de l'eau (Édéa), constante de vidange généralement inférieure à deux heures, sont installées dans des zones de plaines et présentent des retenues de faible hauteur. Elles utilisent le débit du fleuve tel qu'il se présente, sans capacité significative de modulation par stockage. Elles fournissent une énergie en base très peu coûteuse ;
- Les centrales à « éclusées » (Song-Loulou, Lagdo), pour une constante de vidange qui varie entre deux et deux cents heures, présentent des lacs importants permettant une modulation dans la journée voire la semaine. Leur gestion permet le suivi de variation de la consommation sur les intervalles de temps (pics de consommation matin et soir, différence entre jours ouvrables et weekends) ;
- Les « lacs » ou réservoirs (Mapé, Lom-Pangar) de constante de vidange supérieure à deux cents heures, correspondent aux ouvrages de retenues très importantes, permettent un stockage saisonnier de l'eau et une modulation journalière pour maîtriser les pics de consommation. Ils constituent des aménagements typiques de moyenne et haute montagne.

I.1.6.2. Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)

En plus de produire de l'énergie à partir de l'écoulement naturel, les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) comportent un mode de pompage permettant de stocker l'énergie produite par d'autres types de centrales lorsque la consommation est basse,

pour la redistribuer en mode turbinage lors des pics de consommation. Ces centrales possèdent deux bassins (supérieur et inférieur) entre lesquels est placée une machine hydroélectrique réversible. La partie hydraulique peut fonctionner aussi bien en pompe qu'en turbine et la partie électrique aussi bien en moteur qu'en alternateur (machine synchrone). En mode accumulation, la machine utilise le courant fourni pour remonter l'eau du bassin inférieur vers le supérieur et en mode production la machine convertit l'énergie potentielle de l'eau en électricité (EDF, 2010 ; Blanchard, 2013 ; Jaumotte *et al.*, 2016).

I.1.7. Types de turbines hydrauliques

Ces turbines sont exploitées en fonction des possibilités de réglage et du type d'écoulement.

- La turbine Kaplan et à hélices (Édéa) appropriée pour le turbinage de faible chute dont la puissance peut varier de quelques kilowatts à plusieurs centaines, se caractérise par sa roue similaire à une hélice de bateau dont les pales sont fixes (hélices) ou réglables (Kaplan).
- La turbine Francis (Song-Loulou, Lagdo) généralement utilisée pour de moyennes à hautes chutes avec roue à aube simple ou double, peut développer des puissances très importantes. Ce matériel n'est pas recommandé lorsque le débit est susceptible de varier au-delà de ces limites (EDF, 2010 ; Albagnac, 2014 ; Jaumotte *et al.* 2016).
- La turbine Wells utilise le mouvement de l'air provoqué par le mouvement des vagues à travers un tube vertical (EDF, 2010 ; Albagnac, 2014 ; Jaumotte *et al.* 2016).
- La turbine Pelton utilisée pour les hautes chutes (> 200 m) et petits débits, est constituée d'une roue à augets profilés pour obtenir un rendement maximal (Albagnac *et al.* 2014).
- Il existe d'autres types de turbines.

Les turbines hydrauliques (turboalternateurs) se caractérisent selon l'endroit où a lieu la conversion énergétique. L'écoulement s'accélère à la chute. La pression de chute ou l'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau retenue dans les biefs des fleuves ou dans les barrages est convertie (Shamin *et al.* 2011 ; Jaumotte, 2016). Selon les mécanismes de la transformation, Jenny (2016) distingue les turbines à action pour lesquelles l'énergie potentielle totale est transformée en vitesse dans le distributeur fixe. Il n'y a pas de chute de pression entre l'entrée et la sortie de la roue. L'écoulement est uniquement dévié dans le

rotor (turbine Pelton). Quant aux turbines à réaction, il précise que l'énergie potentielle est convertie en partie dans le distributeur et en partie dans le rotor. Dans ce dernier, une différence de pression existe entre l'entrée et la sortie, l'écoulement étant dévié dans le rotor (turbines Francis et Kaplan). Le choix d'une turbine résulte des conditions d'écoulement, des escarpements, des objectifs et des moyens financiers selon leurs caractéristiques $V_i = 2gH$. La performance varie d'un modèle à un autre. L'efficacité d'une centrale dépend non seulement des turbines (EDF, 2010 ; Albagnac *et al.* 2014), mais aussi des autres éléments associés (Tableau VI).

Tableau VI. Grille d'estimation de puissance (en MW) libérée par une turbine selon ses caractéristiques (EDF, 2010).

		Hauteur de chute (en mètres)																		
		1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Diamètre de roue (en mm)	3150	88	98	107	118	128	139	150	162	173	185	197	210	223	236	249	262	276	290	304
	3550	112	124	137	150	163	177	191	206	221	236	252	268	284	300	317	334	352	370	388
	4000	143	159	175	191	208	226	244	263	282	301	321	341	362	383	404	426	448	471	494
	4500	182	201	222	243	265	287	310	334	358	382	408	433	460	486					
	5000	225	249	275	301	328	356	384	413	443	474									

La différence d'altitude entre le miroir théorique plein et la turbine détermine la hauteur de chute selon laquelle on peut classer les ouvrages de hautes chutes (>200 m), de moyennes chutes (entre 50 et 200 m) et de basses chutes (<50 m), critère du choix des turbines. Selon EDF (2010), la capacité d'une centrale est estimée grâce à la charge hydraulique adéquate à la hauteur de chute brute H_b . La chute nette (H_n) en est déduite par les pertes de charges ΣH liées aux spécificités des conduites et de la turbine ($H_n = H_b - \Sigma H$).

I.1.8. Energie hydraulique

L'énergie renouvelable la plus exploitée à l'échelle mondiale résulte de l'action de l'eau : cours d'eau, courant marin, marée, vagues, diffusion ionique. Deuxième source d'énergie toutes catégories confondues en 2010 (AIE, 2010), la filière hydraulique comprend les grands barrages, les usines marémotrices, les petites centrales au fil de l'eau. L'hydraulique tient ses sources des phénomènes météorologiques c'est-à-dire de l'énergie solaire qui provoque l'évaporation surtout dans les océans et libère une partie de l'eau sur les continents.

I.1.8.1. Mécanisme de transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique

L'eau constitue la matière première d'une Centrale. C'est un fluide dont l'écoulement dans les conduites se fait de manière incompressible (Crausse & Vieillefosse, 2011). A la digue par le canal d'amener, l'eau entre dans la conduite forcée, atterrit dans la bêche spirale où se trouve la turbine installée à la fin. L'eau en traversant applique son énergie sur les pales de la roue mobile (Fig. 7).

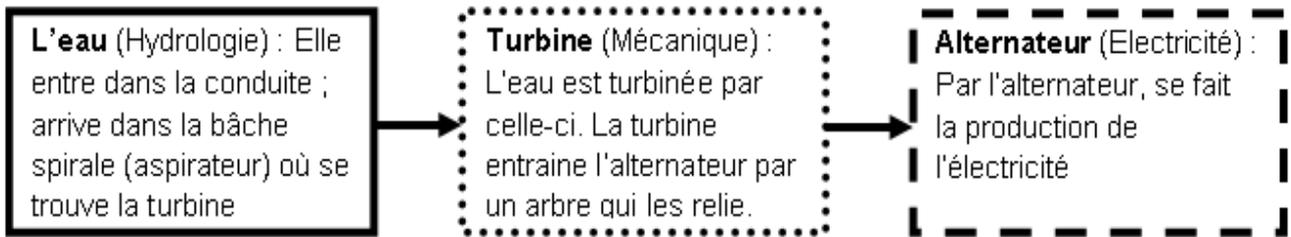


Fig. 7. Mécanisme de transformation de l'énergie hydroélectrique (Bessoh, 2005)

I.1.8.2. Chaîne de transmission

Par la pression sur ses pales, l'eau fait tourner la turbine (énergie hydraulique) qui entraîne l'arbre à son tour (énergie mécanique) surmonté d'un alternateur (électricité). La turbine et l'alternateur reliés par un même axe constituent un groupe générateur d'électricité appelé turboalternateur ou turbomachine. Toute centrale est généralement constituée d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse et d'un générateur (Crausse & Vieillefosse, 2011). Ce qui aboutit à la chaîne de transmission de puissance (Fig. 8).

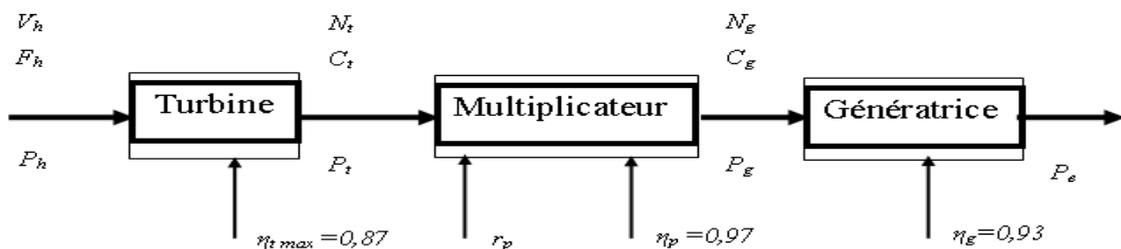


Fig. 8. Transmission de puissance d'une centrale (Crausse & Vieillefosse, 2011)

La rotation de l'arbre qui relie la turbine à l'alternateur crée des perturbations de champ magnétique avec une certaine fréquence, d'où l'établissement de la différence de potentiel (d.d.p) et de l'expression de courant alternatif. Pour la mise en fonctionnement du réseau, un écart entre l'horloge vrai et l'horloge du réseau est maintenu égal à 0,02 seconde sous nos latitudes fixant la fréquence à 50 Hz. Pour la transformation et la distribution, l'énergie produite par la centrale est envoyée sur un jeu de deux barres (Fig. 9) qui comporte trois phases pour une énergie transformé en haute tension-moyenne tension (HT/MT).

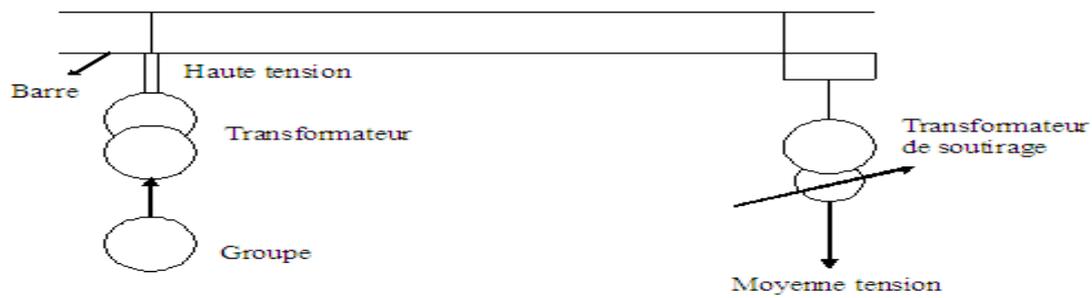


Fig. 9. Jeux de barres (Source : archives d'installation de la centrale d'Édéa)

La Figure 10 représente le relais de la chaîne de transmission de puissance d'une centrale par la chaîne énergétique jusqu'au consommateur final. Pour les barrages au fil de l'eau (cas du barrage d'Édéa), la quantité d'énergie produite est instantanément liée au débit. Le volume d'eau et la hauteur de chute confèrent à la structure une énergie potentielle considérable. A la turbine est associé un équipement (excitatrice) qui établit un champ magnétique et envoie le courant électrique par induction à l'alternateur (Blanchard, 2013).

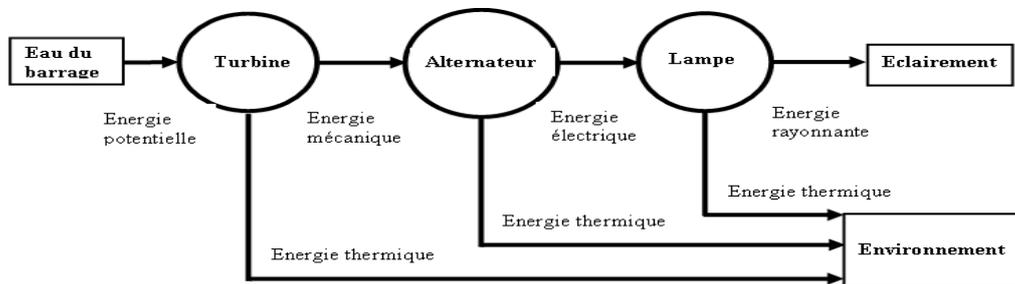


Fig. 10. Exemple de chaîne énergétique (Crausse & Vieillefosse, 2011)

I.1.9. Coût de l'hydroélectricité

Le coût d'hydroélectricité subit l'influence du climat car les pertes par effet joule sont plus importantes en saison sèche. Pour pallier aux déficits d'énergie en saison sèche, l'Etat du Cameroun a adopté une politique tarifaire horo-saisonnière en octobre 2003, revue le 28 mai 2012 dans la décision N°0096/ARSEL/DG/DCEC/SDCT, fixant les tarifs de vente hors taxes d'électricité en vue de rentabiliser la productivité même en période d'étiage. Dans le but de maximiser la production hydro énergétique des barrages, certains dispositifs de suivi et de surveillance (Fig. 11) sont nécessaires pour un contrôle de l'envasement, du comblement et de la préservation des risques.



A



B

I.1.10. Quelques avantages et limites de l'hydroélectricité

L'hydroélectricité, considérée comme une énergie propre et inépuisable vis-à-vis du pétrole ou au gaz naturel, est une énergie à moindre coût d'exploitation et à faibles émissions de gaz à effet de serre. Elle présente néanmoins des inconvénients sociaux et environnementaux particuliers aux barrages implantés dans les régions peu montagneuses (déplacements, réinstallation des populations, inondations des terres, modifications des écosystèmes, alluvionnement). Toutefois, les barrages hydroélectriques peuvent constituer un risque environnemental et socioéconomique dans la mesure où les volumes stockés d'eau présentent un danger en cas de rupture de la digue (Shamin *et al.* 2011 et WWAP, 2021).

I.2. REGIMES HYDROLOGIQUES

L'énergie hydraulique dépend des régimes hydrologiques des cours d'eau dont plusieurs sont répertoriés en Afrique et au Cameroun (Sighomnou, 2004) :

- Le régime tropical sec caractérisé par l'arésisme, les cours d'eau ont un écoulement intermittent (les Mayo) de juin à novembre et une très forte irrégularité interannuelle de trois à six mois de saison pluvieuse ;
- Le régime tropical intermédiaire caractérisé par une période des hautes eaux comme dans le cas précédent, présente une irrégularité interannuelle moins forte (Bénoué, Bini) ;
- Le régime tropical de transition marqué par un écoulement permanent et violent à un pic en août-septembre, un débit spécifique compris entre 5 et plus de 80 l/s/km² (cours d'eau à l'ouest et au nord de la Sanaga) ;

- Le régime équatorial de transition se caractérise par un écoulement abondant et une faible irrégularité interannuelle (Mbam, cours moyen Sanaga) ;
- Le régime équatorial typique se caractérise par deux pics en mai-juin et octobre-novembre et une forte irrégularité interannuelle (Nyong, Ntem, Lobé).

Le régime hydrologique représente le caractère de l'écoulement des eaux des rivières et fleuves. Il dépend des variations saisonnières du débit surtout au niveau des confluences qui exercent une influence sur leur irrégularité, le transport des matériaux et le degré de stabilité du fond. Les écoulements peuvent exercer trois sortes d'actions selon leur capacité et la vitesse du courant (érosion, transport des matériaux, sédimentation). On note des différences dans la nature des substrats suivant les phénomènes qui dominent. Dans les eaux de surface, le courant est turbulent, tourbillonnaire ou laminaire. La turbulence favorise les échanges de substances dissoutes (Carrière & Botosaneanu, 2014). L'allure des écoulements résulte non seulement des caractéristiques des précipitations, mais également des facteurs secondaires ou facteurs conditionnels suivants :

- Les caractéristiques géographiques et morphologiques ;
- Les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques ;
- Les caractéristiques phytogéographiques (végétation) et climatiques ;
- Le réseau des talwegs.

I.2.1. Caractéristiques géographiques et morphologiques

Intervenant par la situation géographique avec les latitudes extrêmes des zones couvertes, la superficie du bassin (ses limites) et la morphologie intègrent l'altitude et les pentes. L'hypsométrie permet d'apprécier les formes du bassin versant. L'altitude moyenne à 50 % est déterminée à partir d'une courbe hypsométrique permettant d'évaluer les pentes du bassin (Olivry, 1986). L'extension permet au bassin de traverser différentes régions climatiques (Sighomnou, 2004 ; Liéno, 2007). En plus de l'extension continentale, la proximité de l'océan et de l'Equateur favorise la formation et le déclenchement des pluies. Les directions prises par les principaux drains dérivent des axes orographiques et tectoniques liés à la configuration du pays. Il s'agit de l'Adamaoua, de la Dorsale camerounaise et de l'ondulation centrale du plateau du Centre-Sud. La tectonique explique les directions prises par les collecteurs principaux hormis des eaux rejoignant le bassin du Lac Tchad.

I.2.2. Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques

La géologie intervient dans la nature lithologique. Elle contribue dans la structure des niveaux aquifères. La nature de roches des terrains qui affleurent, caractérisée par la dureté et la perméabilité, agit sur l'infiltration, le réseau étant inversement proportionnel à la perméabilité, détermine par conséquent l'écoulement. L'altération dépend des propriétés physiques (perméabilité, dureté, granulométrie, structure) et chimiques de la roche préexistante qui influent sur la nature des minéraux néoformés (Sighomnou, 2004 ; Liéno, 2007). Il peut y avoir discordance de structure des niveaux aquifères (bassin versant/bassin hydrogéologique) lorsque ces bassins ne présentent pas toujours les mêmes limites dans une région. Dans ce cas, le ruissellement et l'écoulement souterrain ne correspondent pas à une même source d'alimentation avec un impact direct sur les ressources en eau.

I.2.3. Caractéristiques phytogéographiques et météorologiques

Les branches et troncs d'arbres retiennent une quantité d'eau importante réduisant ainsi celle qui atteint le sol. Le développement du système racinaire atténue le ruissellement et partant l'érosion (Babin *et al*, 1974). La végétation joue un rôle important dans le ruissellement par les phénomènes de rétention, d'infiltration et d'évapotranspiration. Une végétation abondante et arborescente retient une quantité de pluies par le feuillage assez développé. C'est l'une des raisons qui favorise l'abondance des pluies de convection en régions forestières (Letouzey, 1985). Les bassins versants des cours d'eau du Cameroun disposent des caractéristiques bioclimatiques diversifiées (Tableau VII).

La suppression de la végétation crée des déséquilibres importants. Le climat intervient dans le régime des cours d'eau par les précipitations, la température et les vents. Les températures peu élevées atténuent le tarissement des cours d'eau. L'évapotranspiration suit le rythme des vents. L'exposition des surfaces des lacs de retenues amplifie l'évaporation qui intensifie le retour de la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

Tableau VII. Bassins versants et caractéristiques bioclimatiques (Liéno, 2007, modifié)

Cours d'eau	Station	Superficie (km ²)	Caractéristiques bioclimatiques
Dja	Ngbala	19500	Forêt dense
Nyong	Dehane	26400	Forêt dense
Ntem	Nyabessan	26350	Forêt dense
Lobe	Kribi	2035	Forêt dense
Metchum	Gouri	2240	Tropical de transition
Wouri	Yabassi	8250	Forêt dense
Sanaga	Nachtigal	76000	Forêt de transition
Sanaga	Édéa	131500	Forêt, savane
Métchié	Chutes	480	Forêt claire
Birni	Warak	2300	Savane
Benoué	Lagdo	30650	Savane
Benoué	Garoua	60500	Savane

I.2.4. Réseau des talwegs

Le réseau hydrographique du Cameroun duquel Eyong (2019) propose la répartition en quatre principaux ensembles, suivant la densité et la nature des terrains drainés (Fig. 12). La superficie de l'ensemble des bassins versants des fleuves côtiers (y compris la Sanaga) couvre plus de la moitié du territoire. La façade atlantique du Cameroun reçoit treize cours d'eau principaux les plus importants étant du sud au nord : le Ntem, la Lobé, la Kienké, la Lokoundjé, le Nyong, la Sanaga, la Dibamba, le Wouri, le Mungo et la Cross River transitant par le Nigeria (Sighomnou, 2004). La Sanaga, principal fleuve du Cameroun, abrite les principales installations hydroélectriques du pays. Trois barrages de retenues construits sur ses principaux affluents assurent la régulation de ses débits : Mbakaou (2,6 milliards de m³) sur le Djerem en 1969, Bamendjing (1,8 milliard de m³) sur le Noun en 1974 et Magba (3,2 milliards de m³) sur la Mapé en 1987 (Anonyme, 1988).

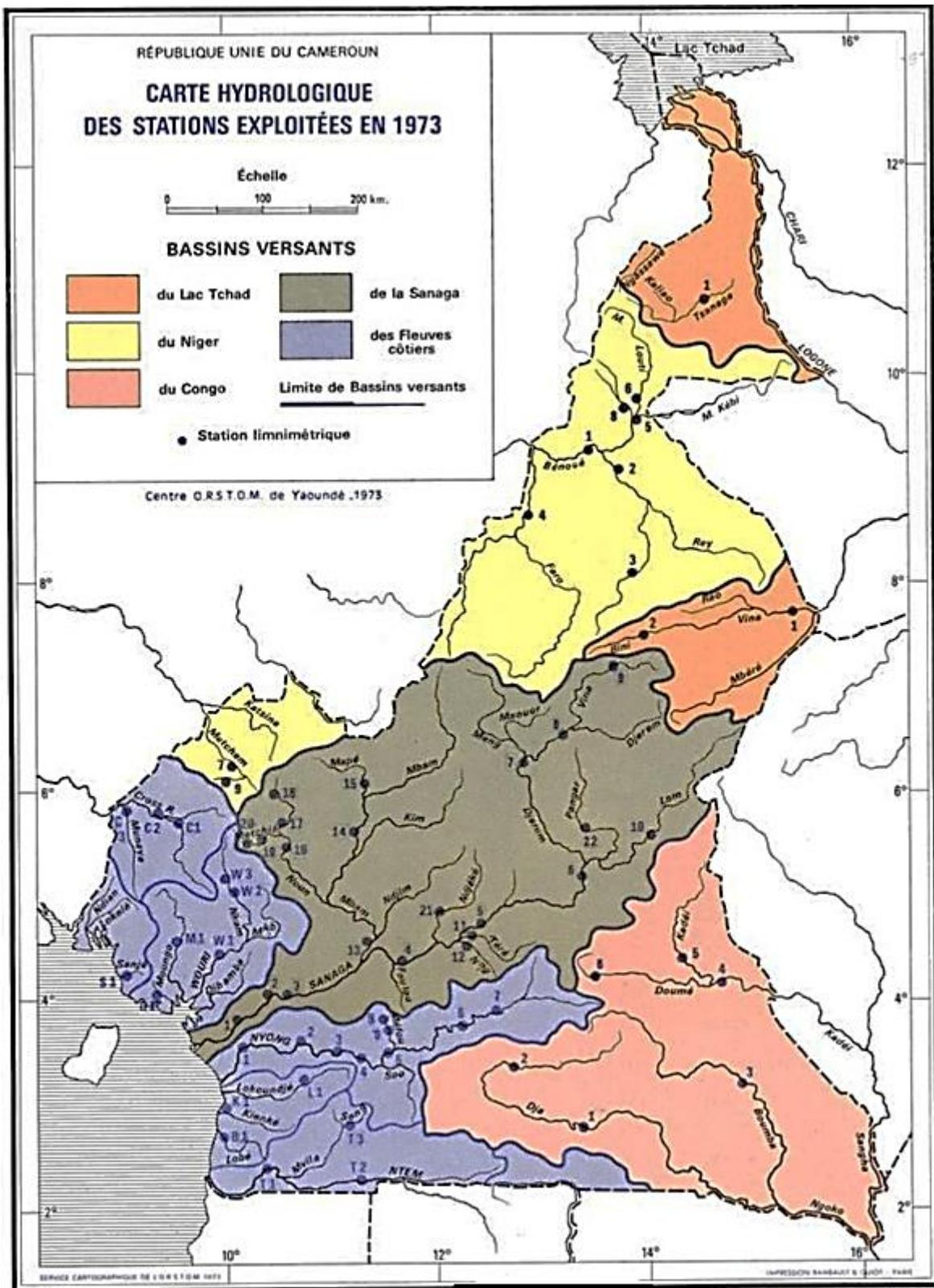


Fig. 12. Bassins hydrographiques du Cameroun (Olivry, 1986).

En raison de la sécheresse récente, la capacité de régulation de ces trois barrages (7,6 milliards de m³) s'est avérée insuffisante ces dernières années. Un quatrième barrage est réalisé à la confluence des fleuves Lom et Pangar. La régulation du débit de la Sanaga par

ces retenues provoque une modification du régime naturel déviant l'interprétation des séries chronologiques.

I.2.5. Apports météoriques et ressources en eau

La dynamique des averses et des facteurs conditionnels, déterminent les ressources en eau. Les précipitations annuelles varient largement suivant les régions. Au pied du Mont Cameroun (Debundscha) on peut enregistrer en un jour plus de pluie qu'en un an aux abords du Lac Tchad (Kousséri) ou mieux un mois plus qu'en un an sur le plateau sud camerounais (Yaoundé).

La répartition spatiale des hauteurs annuelles de précipitations relève de grands écarts territoriaux, par exemple 10 000 mm à Debundscha pour moins de 400 mm dans la cuvette du Lac Tchad (Olivry, 1986). La répartition des pluies journalières dans le temps a plus d'incidence sur les écoulements des cours d'eau qui intéressent dans ce travail. Toutefois, la hauteur maximale de pluie journalière annuelle varie de 60 à 70 mm dans le nord du pays, l'Adamaoua et la région montagneuse de l'Ouest ; de 65 à 80 mm dans le sud et l'Est ; de 90 à 150 mm dans les régions océaniques mais peut dépasser 280 mm sur la façade maritime du Mont Cameroun. La hauteur des pluies journalières de récurrence décennale varie entre 90 et 110 mm dans le nord du pays, l'Adamaoua et l'Ouest ; 100 à 120 mm dans le sud et l'Est ; 120 à 190 mm dans les régions océaniques et atteint 420 mm au pied du Mont Cameroun (Liéno, 2007).

Olivry (1986) dresse un schéma général du développement des unités hydrologiques et de l'organisation détaillée du réseau hydrographique du Cameroun réalisée par Sighomnou (2004). La série des apports annuels sur l'ensemble du pays donne les valeurs caractéristiques (en milliards de m³ ou km³) suivantes (Sighomnou, 2004) :

- Valeur moyenne sur la période (1940-2000) : 842 km³ ;
- Valeur maximale (enregistrée en 1954) : 972 km³ ;
- Valeur minimale (enregistrée en 1983) : 702 km³.

Pour Sigha-Nkamdjou et al, (2002), le volume moyen annuel des eaux précipitées sur l'ensemble du pays est estimé à 800 km³ réparti par bassins versants des principaux cours d'eau :

- ✓ 426 km³ pour l'ensemble des bassins de la façade atlantique dont 222 km³ pour le bassin de la Sanaga (Édéa) à lui tout seul ;
- ✓ 183 km³ pour le bassin du Congo ;

- ✓ 149 km³ pour le bassin du Niger
- ✓ 42 km³ pour le bassin du Lac Tchad.

Les tributaires du fleuve Congo dont les bassins versants couvrent un peu plus de 20% du territoire. Il s'agit essentiellement du Dja, de la Boumba, de la Ngoko et de la Kadéi. On notera que les deux premiers drainent essentiellement des zones forestières, alors que la Kadéi prend sa source sur le rebord sud du plateau de l'Adamaoua.

Les tributaires du fleuve Niger dont les bassins versants couvrent environ 20 % du territoire. Il s'agit principalement de la Bénoué et de ses affluents dont le Mayo Kébi, le Faro et le Birni. La Bénoué offre le plus grand barrage de retenue d'eau du pays dans la localité de Lagdo d'une capacité d'environ 8 milliards de m³. Ce barrage a été mis en service en 1983.

Les tributaires du Lac Tchad dont les bassins versants couvrent moins de 10 % du territoire sont surtout la Vina du Nord et la Mbéré affluents du Logone occidental qui prend sa source sur le plateau de l'Adamaoua au Cameroun. Après son passage en territoire tchadien, cette branche conflue avec le Logone oriental puis sert de frontière entre les deux pays dans la région du « Bec de Canard » en amont de Bongor, jusqu'à la confluence avec le Chari à Kousséri sur environ 250 km. Les autres cours d'eau camerounais intéressant le Lac Tchad sont issus surtout des Monts Mandara. Liéno (2007) a dégagé l'importance et la contribution de chaque bassin hydrographique sur les ressources en eau superficielle du Cameroun (Tableau VIII).

Ainsi le réseau des cours d'eau du Cameroun participe au drainage d'un vaste ensemble couvrant environ le tiers de la superficie du continent africain, partagé par 23 Etats, soit près de la moitié des pays d'Afrique qui partagent des ressources en eau avec le Cameroun (Liéno, 2007). Ce qui a justifié la création d'organismes inter-Etats tels que l'Autorité du Bassin du Niger (ABN), la Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT) et la Commission Internationale du Bassin Congo Oubangui Sangha (CICOS). Malgré cela, seulement 8 % de la superficie des bassins des cours d'eau qui drainent le Cameroun intéressent un autre pays en amont. Il s'agit du Ntem qui prend sa source au Gabon (1/3 de la superficie du bassin se partage entre le Gabon et la Guinée Equatoriale), et de la Bénoué dont une partie du bassin (18 000 km² sur 95 000) intéresse le territoire nigérian (Sighomnou, 2004). Certains bassins ont un intérêt hydroélectrique.

Tableau VIII. Pourcentage d'occupation du territoire par bassin hydrographique (Liéno, 2007)

Bassin hydrographique	Collecteur principal	Superficie (km ²)	% du territoire
Atlantique	Cross-River, drainant la région du Mamfe et rejoignant l'océan à Calabar (Nigéria)	13 313	2,8
	Fleuves côtiers Ouest Sanaga (Ndian, Mémé, Mungo, Wouri)	32 330	6,8
	Sanaga, fleuve le plus important du Cameroun	135 976	28,6
	Nyong et fleuves côtiers sud (Lobe, Lokoundjé, etc.)	41 411	8,71
	Ntem, dont les sources sont au Gabon	18 542	3,9
Congo	Ayina ou haut Ivindo (bassin de l'Ogooué)	8 083	1,7
	Kadéi et Dja, Sangha (bassin du Congo)	96 990	20,4
Niger	Tributaires de la Bénoué inférieure (Metchum, Katsina, Donga)	10 460	2,2
	Bénoué (Nord-Cameroun)	82 251	17,3
Lac Tchad	Logone supérieur (Vina-Nord et Mbéré)	20 444	4,3
	Mayos du Nord-Cameroun, Yaéré et Logone inférieur	15 642	3,29
Superficie totale du Cameroun		475 442 km ²	100

L'océan Atlantique récupère les apports des cours d'eau camerounais du delta du Niger à l'embouchure du Congo sur 1600 km de côtes du golfe de Guinée, dont 400 km de côtes camerounaises (Olivry, 1986). Les rivières issues de l'Adamaoua s'écoulent dans la direction Nord pour le bassin de la Bénoué (Niger), Nord-Est pour le bassin du Logone (Lac Tchad) et Sud pour le bassin de la Sanaga (Atlantique). La Dorsale camerounaise oriente vers le Nord-Ouest la Metchum et la Katsina (Bénoué inférieure), vers l'Ouest la Cross River, vers le Sud et le Sud-Ouest les fleuves côtiers (Mungo, Wouri) et vers l'Est le bassin de la Sangha. Enfin, la ligne de partage des eaux du plateau du centre-sud (orientée SW-NE) impose les directions Sud-Est et Est pour les tributaires du Congo et Ouest pour les bassins du Nyong et du Ntem (Olivry, 1986). Sur ces différentes unités hydrographiques définies s'articule en fonction du réseau hydrométrique, l'étude des régimes hydrologiques du Cameroun qui subissent l'effet de la sédimentation.

I.2.6. Sédimentation

Elle s'intensifie et demeure actuelle. Du Miocène supérieur à l'actuel dans tous les bassins côtiers, ont eu lieu des dépôts détritiques grossiers correspondant à une régression. Au Cameroun, cette période correspond à des formations deltaïques développées sur la surface d'érosion éo-oligocène. La présence des minéraux issus du socle dans ces dépôts, implique une phase de rajeunissement des reliefs continentaux de l'ouest et du flanc sud de l'Adamaoua. La charge solide de la Bénoué augmente sur le flanc nord de l'Adamaoua suite à sa flexuration. Ce détritisme caractérise les dépôts de la Sanaga qui draine le flanc sud de l'Adamaoua et les autres fleuves du territoire camerounais (Nzenti, 1994).

I.3. FACTEURS CLIMATIQUES

Le soleil est le moteur du système climatique de la Terre. Certains facteurs naturels ou d'origine humaine déterminent le climat, lequel dépend de la redistribution de l'énergie solaire suivant les courants atmosphériques et océaniques (Harley et al. 2006). Le système climatique est régi par des facteurs cosmiques, planétaires et géographiques.

I.3.1. Facteurs cosmiques

Ils résultent de la variation de l'activité solaire (Damon & Sonett, 1991 ; Paterno, 1998 ; Harley et al. 2006 ; Malherbe, 2012). Ces facteurs sont :

- Les températures de surfaces des océans, le climat de la Terre est lié à l'interaction entre l'océan et l'atmosphère (Duplessy & Morel, 1990 ; Planton et al, 2012 ; CNRS, 2014 ; Stehly, 2016) ;
- L'activité des centres d'action atmosphériques (Fig. 13) où on note des remontées d'eaux profondes (upwelling) autour des anticyclones et des plongées d'eaux de surface (downwelling) autour des dépressions et l'inverse au centre, à chaque fois (Cassou, 2004 ; Planton et al. 2012 ; Stehly, 2016).

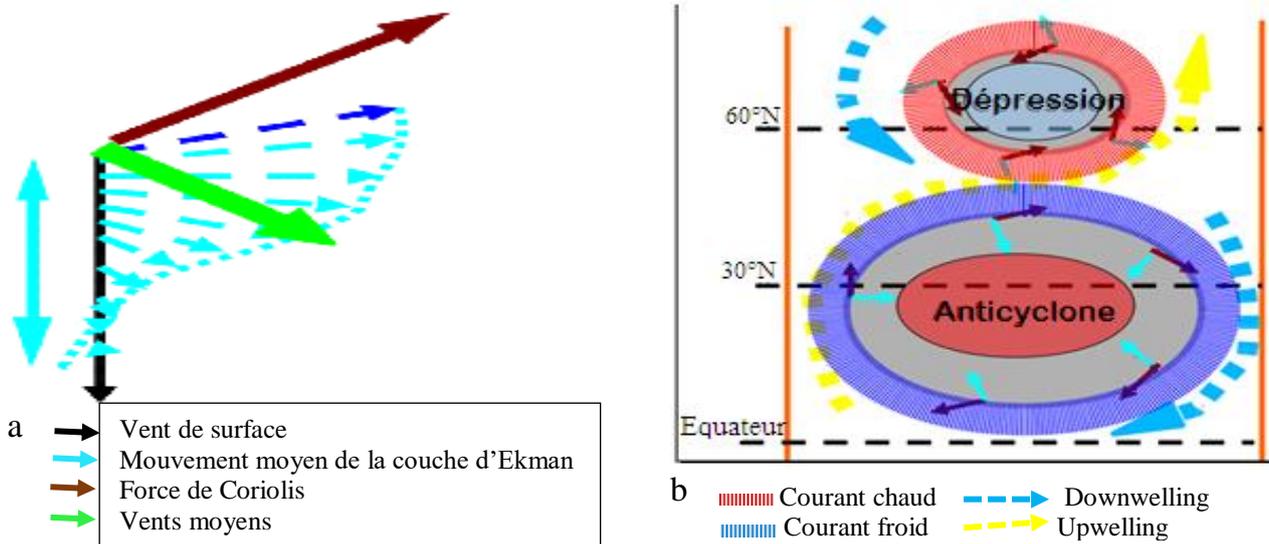


Fig. 13. Pompage d'Ekman (a) et effets des centres d'action atmosphérique (b)
(<http://www.wired.com/wiredscience/2010/08/atlantic-plastic/>)

Cette haute pression est causée par la température et la rotation de la terre (Stehly, 2016). Cet anticyclone influence sur la prévision du temps à l'Est des Etats-Unis, en Europe de l'Ouest et en Afrique ;

- Les phénomènes El-Nino et l'Oscillation australe (ENSO) ;
- L'oscillation nord atlantique (NAO) dérive de la différence des anomalies de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande ;

- La dynamique du front intertropical (FIT), convergence entre la mousson et l'harmattan détermine une zone de contact (Dorot, 1972 ; Olivry, 1986). En zone intertropicale se forme un champ de pression dans le temps et dans l'espace.

Les vents d'Est soufflent des zones de haute pression et convergent vers l'Equateur, donnant la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) au nord de laquelle l'anticyclone des Açores (et/ou égypto-libyen), distribue un flux d'alizé continental chaud et sec (Harmattan). La région balayée par des basses pressions se charge en vapeur d'eau provoquant d'amas nuageux par convection verticale. Les mécanismes climatiques de la zone tropicale africaine sont influencés par le balancement de ce front (Fig. 14).

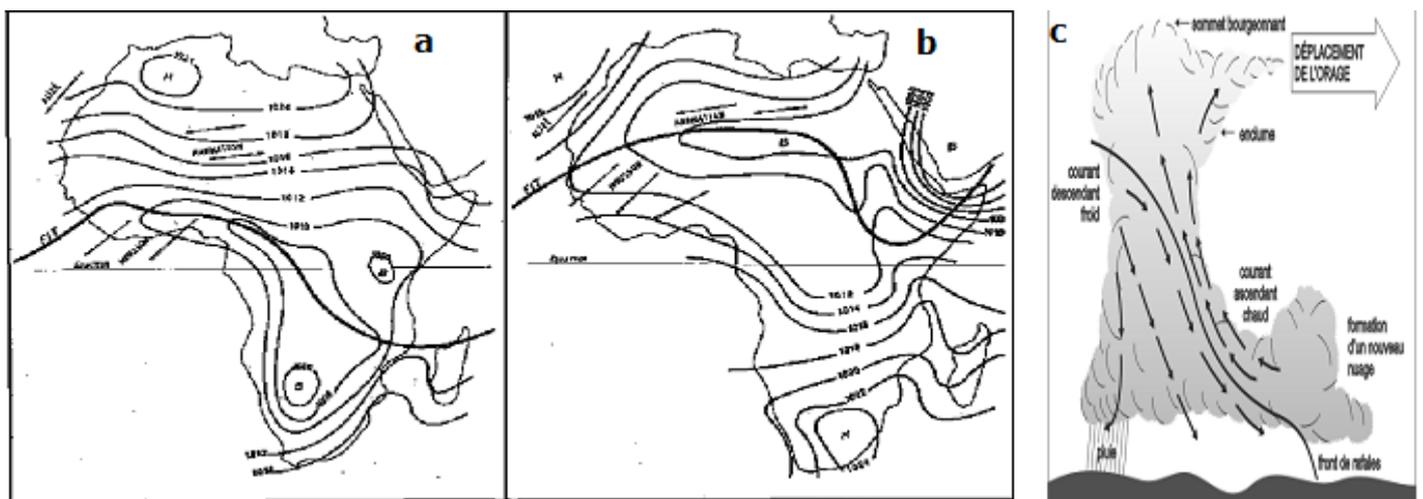


Fig. 14. Isobares moyennes et position moyenne du FIT en (a) janvier, (b) juillet ; déplacement des masses d'air associées aux précipitations (c) (Siraud, 2014).

La dynamique synchrone de la pression moyenne, du FIT et des masses d'air perturbent la troposphère au-dessus du Cameroun (Olivry, 1986). Il s'établit une limite inférieure de l'air équatorial d'altitude, une limite supérieure de la mousson, un Jet d'Est Africain (AEJ), un Jet d'Est Tropical (TEJ) et des principales zones de temps (zone sans pluies ou avec des pluies réduites, zones à orages isolés, zones à dominance des lignes de grains ou celles des pluies de mousson). Il se dégage des flux et mouvements de convection ou de subsidence des masses d'air.

I.3.2. Facteurs planétaires

Ils découlent de la configuration de la Terre face au Soleil et de son balancement au cours de sa révolution. Les facteurs planétaires sont liés :

- A la sphéricité de la terre basée sur l'excentricité ou le caractère elliptique de l'orbite de la Terre estimé à l'extrême (Ribes, 1993 ; Baro, 2017) ;

- A l'obliquité des rayons solaires où il s'agit de la variation régulière de l'attraction du Soleil et de la Lune sur le bombement équatorial. Cette attraction tend à pencher l'axe polaire de la Terre à l'inclinaison maximale au Soleil et à la Lune (Ribes, 1993 ; Baro, 2017) ;
- A la répartition de l'énergie solaire où on peut relever le transfert de l'énergie des moyennes latitudes vers l'Equateur et des hautes latitudes à partir de la cellule de Hadley (Damon & Sonett, 1991 ; Planchon, 2017) ;
- Aux mouvements/précession des équinoxes qui sont les variations saisonnières d'insolation au cours du temps suivant un axe de cône (IERS, 2014 ; Baro, 2017 ; TOPO, 2018) ;
- A la perturbation du champ magnétique terrestre au fil des décennies où ses positions sont toujours renouvelées marquant son déplacement permanent et régulier (Strange, 2016) ;
- A l'état de l'atmosphère ainsi qu'à sa dynamique.

I.3.3. Facteurs géographiques

Contrairement aux deux précédentes catégories de facteurs qui influencent le climat à l'échelle du globe, les facteurs géographiques influencent le climat à l'échelle locale ou régionale. On peut noter :

- La répartition des terres et des mers où la majorité de chaleur sur la Terre est stockée par les océans. Ces étendues d'eau encaissent et perdent lentement la chaleur que le continent et bien plus que l'atmosphère. Les upwellings du fond des océans et les courants marins, provoquent un changement de température de la surface des eaux (Bunett & Olatunde, 1983) ;
- La végétation et la continentalité, si la végétation se développe avec l'abondance des précipitations le long des côtes en zone intertropicale, les surfaces continentales se réchauffent rapidement dans la journée et perdent aussi vite leur chaleur durant la nuit auquel cas les zones de basses pressions et de hautes pressions se stabilisent (Lamb, 1972) ;
- L'attitude à partir de 1000 m, montre deux situations : avant d'atteindre la zone de formation des nuages et après avoir franchi les sommets (effet fœhn). Ce dernier érige un contraste entre l'ascension orographique en abaissant la température de l'air et son augmentation suite au dessèchement après avoir franchi les sommets et

débarassé de son humidité (Arrigo, 2012) et les éruptions volcaniques qui projettent des aérosols dans l'atmosphère, responsable de l'effet de serre ;

- L'influence de l'homme croît avec l'évolution des activités socioéconomiques qui ont apporté des modifications à la végétation qui se présente moins sous une forme climacique. La pression démographique accentue de telles variations en dehors des aires protégées. Tous ces facteurs précités conjugués déterminent les types de climats dans le monde.

I.3.4. Types de climats dans le monde

Les climats de la Terre sont classés suivant différents paramètres (l'humidité, la température, l'ensoleillement, la vitesse du vent). Ceux-ci varient suivant les paramètres géographiques qui affectent le cycle de l'eau. Lamb (1972) fait une classification des climats, reprise par Encarta. (Tableau IX).

Tableau IX. Températures et précipitations des climats du globe en certaines localités de 1931 à 1960 (Encarta, 2009)

Type de climat	Par.	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy.
Climat océanique : Brest	T	6,1	5,8	7,8	9,2	11,6	14,4	15,6	16	14,7	12	9	7	10,8
	P	133	96	83	69	68	56	62	80	87	104	138	150	1 126
Climat océanique de transition : Vienne	T	-1,4	0,4	4,7	10,3	14,8	18,1	19,9	19,3	15,6	9,8	-1,9	-6,8	8,6
	P	40	43	45	45	70	67	83	72	41	56	36	36	660
Climat continental : Moscou	T	-9,9	-9,5	-4,2	4,7	11,9	16,1	19	17,1	11,2	4,5	-1,9	-6,8	4,4
	P	31	28	33	35	52	31	74	74	58	51	36	36	575
Climat continental froid : Iakoutsk	T	-42,7	-36,6	-23,2	-6,9	6,6	16,1	19,5	15,5	6,3	-7,9	-28,4	-39,8	-10,1
	P	7	6	5	7	16	31	43	38	22	16	13	9	213
Climat méditerranéen : Nîmes	T	5,7	6,8	10,1	13	6,8	20,8	23,6	22,9	19,7	14,6	9,8	6,5	14,2
	P	49	36	69	61	68	38	21	42	109	90	82	78	743
Climat tropical humide : Kuala-Lumpur (Malaisie)	T	26,8	27,2	27,4	27,3	27,7	27,7	27,1	27,1	27	26,8	26,7	26,6	27,1
	P	157	209	277	285	207	121	117	157	206	251	289	223	2 499
Climat tropical : Bamako	T	25,5	28	0,9	32,4	31,9	29,1	26,9	26	26,6	27,8	27,2	25,4	28,1
	P	1	0	3	15	60	145	251	334	220	58	12	0	1 099
Climat tropical de haut plateau : Tananarive	T	19,3	19,2	18,9	17,8	15,6	13,9	13	13,5	15,1	17,2	18,6	19,1	16,8
	P	286	218	231	36	13	9	10	10	15	43	143	257	1 271
Climat de mousson : Calcutta (Inde)	T	20,2	23	27,9	30,1	31,1	30,4	29,1	29,1	29,2	27,9	24	20,6	26,8
	P	13	24	27	43	121	259	301	306	290	160	35	3	1 582
Climat de désert chaud : Faya-Largeau (Tchad)	T	20,4	22,7	27	30,6	33,8	34,2	33,6	32,7	32,6	30,5	25,5	21,3	28,7
	P	0	0	0	0	0	2	1	11	2	0	0	0	16
Climat arctique : Coppermine (67° 49' N)	T	28,6	-30,1	-25,8	-17,2	-5,6	3,4	9,3	8,4	2,6	-6,9	19,9	-26,3	-11,3
	P	13	8	15	14	12	20	34	44	29	27	17	13	246

Par. : Paramètre ; T : températures moyennes mensuelles en degrés Celsius ; P : précipitations moyennes mensuelles en millimètres ; Moy=Moyennes

Il ressort que les précipitations et les températures sont éléments capitaux de distinction des climats. On peut relever les variétés telles que : la zone équatoriale, le type à pluie de mousson, le type des hauts plateaux intertropicaux, la zone des alizés, la zone aride, les océans subtropicaux et leurs îles, le méditerranéen, le milieu des steppes et des prairies, les océans et îles tempérées et subpolaires, les continents tempérés (nord) et des îles aux larges altitudes, les terres nordiques, l'océan Arctique, les calottes glaciaires élevées en

Groenland et en Antarctique, les climats de montagne dans les latitudes moyennes et supérieures. Des caractéristiques susmentionnées, on distingue des climats zonaux et azonaux. Les variétés rencontrées au Cameroun influencent sur les régimes hydrologiques.

I.3.5. Cycle de l'eau

Le changement des phases de l'eau dépend de la température, de la pression et du degré de pollution atmosphérique. La figure 15 donne les conditions de température et de pression qui déterminent les phases et les états de l'eau ainsi que les conversions de phases. Les courbes de changement d'état délimitent les domaines de stabilité.

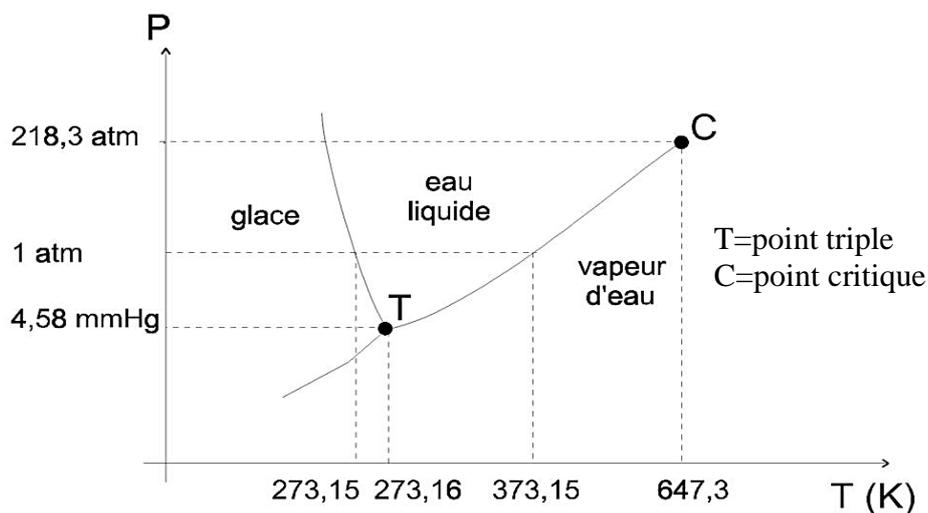


Fig. 15. Diagramme de changement des phases de l'eau (Taillet et al, 2009)

Le point triple T (273,16°K et 0,06 atm) correspond à une coexistence des trois phases (solide, liquide et gaz) de l'eau. La règle des phases indique une variance nulle pour ce point. Au-dessus du point critique C (647,3°K et 218,3 atm), le changement d'état s'effectue sans montrer de discontinuité des propriétés physiques (densité). L'homme intervient depuis des millénaires non seulement dans le cycle de l'eau mais aussi à l'évolution de cette ressource. Liéno (2007) observant les phases de l'eau dans la nature et les mécanismes qui les définissent, présente le schéma simplifié du cycle hydrologique (Fig. 16).

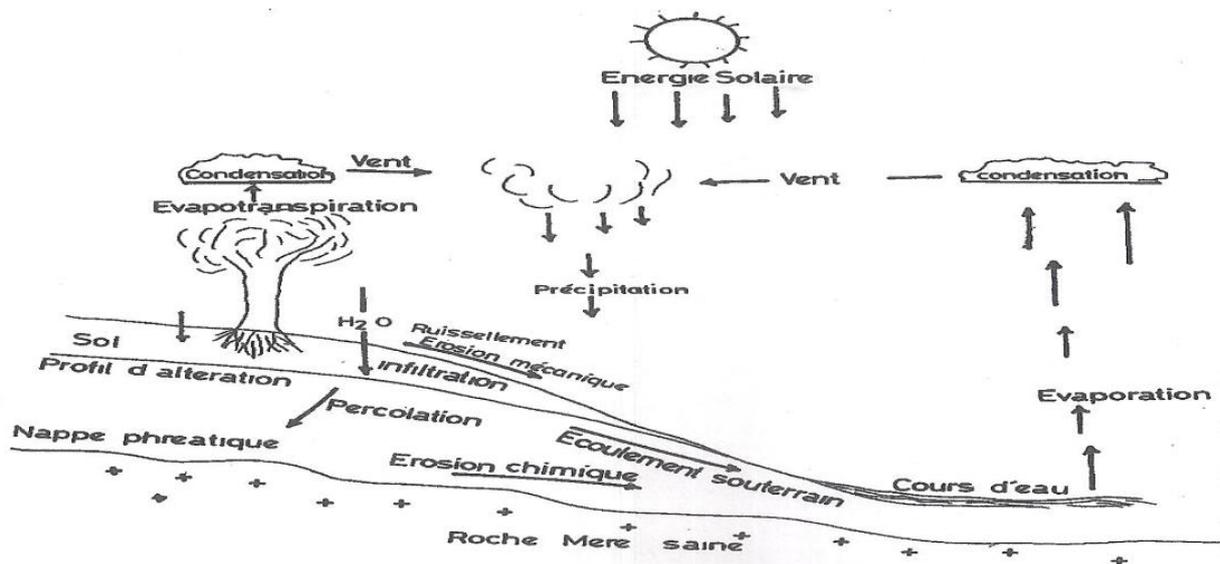


Fig. 16. Schéma simplifié du cycle hydrologique (Liéno, 2007)

Les projets de développement affectent toujours l'environnement et dès lors, se pose le problème de la relation entre l'environnement et le développement. Des canaux d'irrigation sont construits pour amener l'eau dans les régions arides. Des puits sont creusés pour prélever l'eau du sol. Le pompage excessif des nappes à partir des puits a provoqué une chute du niveau hydrostatique, épuisant ainsi de façon irréversible d'anciennes sources d'eau et provoquant la pénétration d'eau salée dans le sol de basses régions côtières à forte densité de population. Des levées sont construites pour guider le cours des rivières, ainsi que des digues pour rendre les rivières navigables, constituer des réserves d'eau et fournir de l'énergie électrique (Samoura, 2011). L'évaporation de l'eau de ces retenues aboutit à des pertes importantes d'eau. L'urbanisation croissante a contribué à aggraver les phénomènes de crues dans la mesure où les eaux de pluie atteignent plus rapidement les cours d'eau et en quantités supérieures suite au revêtement du sol. Ces indices sont parfois qualifiés de nos jours comme manifestations des changements climatiques. Le changement d'état de l'eau détermine les régimes de précipitations et les types de pluies.

I.3.5.1. Dynamique de l'atmosphère et formation des précipitations

La dominance de la surface de la Terre par les océans, principale source de vapeur d'eau à l'atmosphère, constitue un biais d'alimentation des masses nuageuses. L'eau évaporée des surfaces solides et liquides diffuse de façon turbulente dans l'atmosphère. Le taux d'évaporation est proportionnel à la différence entre la tension de vapeur saturante à la température superficielle et la tension de vapeur effective dans l'air ambiant. Les différences de pression atmosphérique occasionnent les déplacements latéraux de l'air. Les masses d'air d'origines différentes présentent une homogénéité relative horizontale en température et en

humidité, à l'échelle synoptique météorologique pour une variabilité de la teneur en eau de l'atmosphère dans l'espace et dans le temps (Dupriez & De Leneer, 1993). L'élévation d'une masse d'air humide provoque la condensation de la vapeur d'eau en gouttelettes formant les nuages et permet le refroidissement nécessaire pour l'amener à saturation en présence des noyaux de condensation. Après évaporation, les phénomènes de la circulation atmosphérique (Fig. 17) conduisent à la formation des précipitations par la coalescence des microgouttes qui se transforment en glace dans l'atmosphère.

Les glaces portées en altitude par des courants ascendants atteignent le palier de passage du jet qui limite leur ascension. Pendant la chute, elles fondent et retournent au sol sous la forme liquide, ou en grêle si la glace n'a pas eu le temps de fondre. La composition de l'atmosphère, le mécanisme en jeu et des manifestations observées déterminent les types de nuages et par ricochet les types de précipitations qui s'abattent dans différentes localités (Camberlin, 2012).

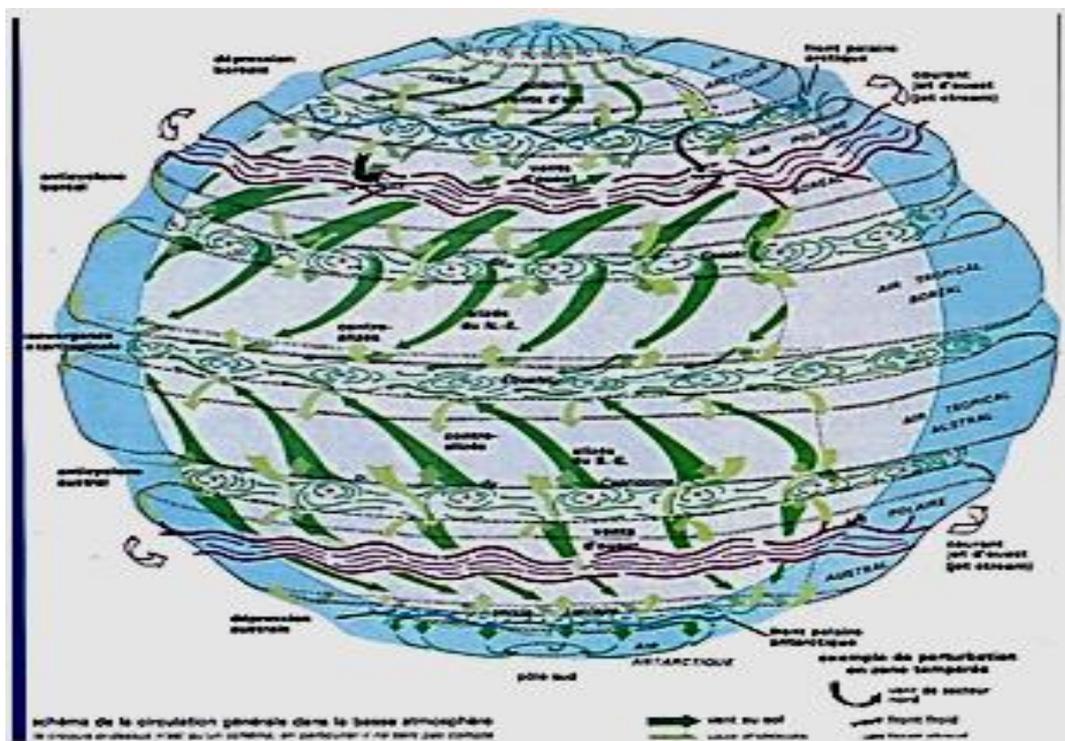


Fig. 17. Circulation atmosphérique générale (<http://www.lmd.ens.fr/legras>)

On distinguera donc les pluies de convection, cycloniques (frontales), orographiques (Bunnnett & Olatunde, 1983) et des saisons. Une bande de chaleur est associée au soleil d'aplomb, mouvement duquel résulte l'alternance des saisons entre les tropiques (Chastenay, 2006). La distribution spatiotemporelle des précipitations est liée à la saisonnalité.

I.3.5.2. Percolation et infiltration

Au cours d'une averse, une fraction d'eau mouille le sol (humidification). Selon l'intensité et la durée, la teneur en eau croît dans les mailles superficielles. Cette augmentation d'humidité dépend des forces de capillarité liées à la gravité. Quand la teneur en eau dépasse une valeur limite (capacité de rétention spécifique), l'eau se propage vers le bas et humidifie une zone profonde du sol (percolation). En cas de prolongement de la pluie, l'humidification de plus en plus importante entraîne une migration verticale de l'eau vers les couches profondes : c'est l'infiltration qui contribue au renouvellement du stock d'eau dans le sol, alimente les eaux souterraines et reconstitue les réserves aquifères. Elle est liée à la perméabilité des sols sablonneux, calcaires ou gréseux et permet une restitution des eaux dans un cours d'eau en saison sèche.

I.3.5.3. Ruissellement

Remenieras (1960) définit le ruissellement comme l'écoulement suivant la pente du terrain et dans le réseau hydrographique, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. Conditionné par l'intensité, la durée et la fréquence des pluies, le ruissellement est affecté par les conditions d'infiltration. Au niveau d'un bassin versant, l'écoulement est évalué par analyse hydrométrique à l'exutoire d'un cours d'eau à des intervalles de temps de quelques minutes à l'année hydrologique.

I.4. HYDROLOGIE ET DEVELOPPEMENT DU CAMEROUN

L'eau constitue un bien économique indéniable pour le Cameroun. La répartition de la ressource en eau sur le territoire est inégale : les zones d'abondance et de rareté, la quantité reflétant de loin la qualité. Elle est une richesse pour les milieux secs et gaspillée en milieu humide. Elle peut être un précurseur de développement et en même temps un frein (Olivry, 1986). Habitat d'une faune spécifique, l'eau est une denrée de breuvage, un produit à usage domestique, agricole, industriel, une voie de communication, une ressource touristique et de recherche, mais aussi un potentiel énergétique. Une multitude de projets a été réalisée et une partie est en cours pour la mise en valeur des eaux du pays. Ces projets sont axés sur l'adduction d'eau des villes, le drainage des vastes espaces agricoles (Yaérés), l'amélioration de la navigation avec ou sans retenues, les implantations industrielles et la dilution des déchets (AMCOW, 2011). Les eaux sont plus utilisées pour l'hydroélectricité.

I.5. CADRE REGLEMENTAIRE ET INSTITUTIONNEL SUR L'HYDROELECTRICITE ET L'ENVIRONNEMENT

Après son indépendance, le Cameroun a engagé des politiques multiformes pour enclencher son développement. C'est ainsi que certaines seront axées sur l'eau, l'énergie et l'environnement.

I.5.1. La politique de l'eau au Cameroun

Les premiers travaux hydrologiques au Cameroun remontent à 1943 se rapportant au potentiel hydroélectrique de la Sanaga à Édéa (Olivry, 1986). Des observations antérieures se contentaient le plus souvent de la gestion quotidienne de voies navigables. A partir de 1947, les hydrologues de l'ORSTOM ont amélioré ou créé des réseaux d'acquisition des données hydrologiques d'abord dans le cadre des structures locales comme les missions, Travaux Publics, parfois de conventions particulières telles que la « Mission Tchad-Cameroun » quelquefois en association avec des ingénieurs d'Electricité de France (Olivry, 1986). L'ORSTOM se constituera alors une base de données hydrométriques, nécessaires aux études ponctuelles liées à des projets d'aménagement. L'eau constitue non seulement un service environnemental, mais aussi un bien économique pour le Cameroun malgré son inégale répartition sur l'ensemble du territoire et l'influence du climat.

La création de l'institut des recherches géologiques et minières (IRGM) marque la mise en place d'une institution dédiée à assurer le relais des tâches de l'ORSTOM. Le caractère holistique de l'eau amène l'IRGM à créer une division à savoir le centre des recherches hydrologiques (CRH) consacré uniquement aux travaux de l'eau. En plus du laboratoire d'hydrologie logé au ministère de l'eau et de l'énergie, l'IRGM en partenariat avec l'institut des recherches pour le développement (IRD), crée le laboratoire d'analyses géochimiques des eaux (LAGE) dont le but est d'étudier les paramètres et caractéristiques de l'eau.

- La loi n°84/013 du 05 octobre 1984 constitue la première loi fixée de façon spécifique sur le régime de l'eau Cameroun. Le comité national de l'eau (CNE) est créé par décret n°085/758 du 30 mai 1985. Le ministère des mines de l'eau et de l'énergie (MINMEE) voit le jour en 1990.
- La loi n°98/005 du 14 avril 1998, portant régime de l'eau stipule que « l'eau est un bien du patrimoine national dont l'Etat assure la protection et la gestion, en facilite l'accès à tous ; sa gestion peut faire en plus l'objet de concessions et d'affermages ».

- La loi n°98/022 du 28 décembre 1998 répartit les missions des acteurs complémentaires et non concurrents du secteur de l'électricité au Cameroun. Le décret n°2001/161/PM du 8 mai 2001 fixe les attributions, l'organisation et le fonctionnement du Comité National de l'Eau (CNE), qui regroupe douze départements ministériels et cinq hautes chambres, l'eau étant la seule matière pour la production de l'énergie hydroélectrique.

En 2004, le ministère de l'eau et de l'énergie (MINEE) est mis à part. Le Décret N°2005/087 du 29 mars 2005 portant création et organisation du Ministère de L'Energie et de l'Eau qui aura pour mission d'élaborer, de mettre en œuvre et d'évaluer la politique du Gouvernement en matière de production, de transport et de distribution de l'énergie et de l'eau. Le MINEE promeut les investissements pour le développement des infrastructures d'eau ; conduit des actions de sensibilisation et de promotion des investissements dans le domaine de l'assainissement liquide et appuie les collectivités territoriales en matière d'assainissement liquide. Le décret n°2005/3089/PM du 29 août 2005 précise les règles d'assiette, de recouvrement et de contrôle de la taxe d'assainissement et de la redevance des prélèvements des eaux.

Dans le DSCE (MINEPAT, 2009), le Gouvernement entend améliorer la situation d'accès limité à l'eau potable et aux infrastructures d'assainissement de base en milieu rural, les ramenant à 75 % en 2020. Un plan d'action national de gestion intégrée des ressources en eau (PANGIRE est élaboré par le Cameroun. Ce plan fait l'état des lieux du secteur eau et environnement (MINEE, 2009).

- La loi de 1998 est complétée par la loi n°2009/019 du 15 décembre 2009 portant fiscalité locale, institue la « taxe de développement local » au profit des communes. Celle-ci est perçue en contrepartie des services de base et des prestations rendues aux populations notamment l'assainissement et l'adduction d'eau.
- La loi n°2011/022 du 14 décembre 2011 régissant le secteur de l'électricité au Cameroun, remplaçant la loi n°98/022 du 24 décembre 1998, précise que « l'utilisation des eaux stockées par le concessionnaire de stockage pour la production d'électricité est conditionnée par le paiement d'une redevance dont le taux ainsi que les modalités de recouvrement sont fixés par voie réglementaire.

- La loi n°2019/024 du 24 décembre 2019 portant code général des collectivités territoriales décentralisées transfère aux communes les compétences en matière d'«alimentation en eau potable», de «lutte contre l'insalubrité, les pollutions et les nuisances». Le conseil municipal délibère sur la création et la gestion des équipements collectifs d'intérêt communal dans les domaines de l'eau et sur le régime et les modalités d'accès et d'utilisation des points d'eau de toute nature. La communauté urbaine est compétente pour toutes actions relevant de l'intercommunalité des grands travaux et des projets structurants. En conséquence, la coordination des réseaux urbains de distribution d'eau potable et la création, l'aménagement, l'entretien, l'exploitation et la gestion des équipements en matière d'assainissement d'eaux usées et pluviales, sont de la compétence exclusive de la communauté urbaine. Aux régions, sont transférées les compétences en matière de la « gestion des eaux d'intérêt régional ».

La SND30 insiste dans le cadre du développement des infrastructures productives sur le sentier de l'émergence, de relever le gap en matière d'eau et d'assainissement.

I.5.2. La politique énergétique du Cameroun

Le développement des infrastructures énergétiques au Cameroun débute pendant la période coloniale, la phase Édéa I dudit barrage étant entrée en exploitation en 1953. Une prospection hydroélectrique a été lancée au Cameroun (République Fédérale du Cameroun, 1967). L'inquiétude portée sur l'intérêt de la construction du barrage (le premier du pays) dans le discours inaugural de l'ex-Président Ahmadou Ahidjo s'est avérée par la retenue de l'entreprise ALUCAM, privilégiée de cette énergie, dans son ambition d'accroître sa production à 200 000 tonnes par an à la fin des années 1980 (MINMEE, 1990). Cette retenue relève du déficit électrique constaté malgré les 40 % qui sont consacrés. Cependant, le système énergétique nécessite généralement des investissements lourds (barrages, réseaux d'électrification, raffineries) dont le poids est considérable dans l'économie la réalisation nécessite souvent une longue période d'attente. Pour la croissance et le développement économiques, une planification énergétique devient un impératif économique et un outil décisionnel et d'implantation.

Face à cette situation, les programmes mis en œuvre concernent des articulations multiples.

- L'adoption d'un plan énergétique national (PEN) (MINMEE, 1990) : l'offre en électricité étant très concentrée sur quelques clients privilégiés industriels (transformation de l'aluminium, raffinage du pétrole, production du ciment, industrie textile), la problématique de l'énergie mise en exergue dans le plan énergétique national (PEN), relève la place de l'énergie dans l'économie du Cameroun à travers cinq indicateurs principaux : la valeur ajoutée, les investissements, les recettes budgétaires, l'emploi et le commerce extérieur.
- La réforme de 1998 et l'amélioration du cadre institutionnel : la loi n°98/022 du 28 décembre 1998 répartit les missions des acteurs complémentaires et non concurrents du secteur de l'électricité au Cameroun. Selon le DSRP mis en œuvre en 2003, en ce qui concerne le sous-secteur d'électricité, la privatisation de la SONEL et l'existence d'un cadre légal et réglementaire consacrant la libéralisation et l'ouverture à la concurrence, l'offre d'énergie électrique de même que la qualité du service public en général, présentent encore des déficits importants. Face à ces difficultés, les autorités ont opté pour une stratégie axée sur deux points :
 - ✓ Développer au maximum le potentiel existant à travers des mécanismes appropriés d'incitation en privilégiant l'hydroélectricité en base, le gaz naturel en appoint et les énergies renouvelables pour les zones isolées non encore reliées au réseau interconnecté ;
 - ✓ Accroître la transparence et l'efficacité dans la gestion du secteur.
- Un plan d'action national énergie pour la réduction de la pauvreté (PANERP) lié aux programmes d'électrification rurale (PER) mis en place par le Cameroun. Le PANERP (MINEE, 2005) engage un vaste programme d'économie d'énergie, encourage l'entrée des PME nationales dans le secteur d'électricité. Le PANERP créé légalement en 2007 par le Gouvernement offre principalement de la fourniture d'énergie électrique pour améliorer le fonctionnement des services sociaux.
- La mise en œuvre d'un plan de développement du secteur de l'électricité à l'horizon 2030 (PDSE-30) (MINEE, 2006) qui vise la création de trois barrages hydroélectriques et d'une centrale thermique pour une puissance cumulée supplémentaire de 800 MW, ainsi que d'un barrage de retenue de 7 milliards de mètres-cube à Lom Pangar. Le PDSE créé en 2006 s'appuie sur les ressources importantes du Cameroun. Outil d'aide à la décision et de stratégie macroéconomique, il identifie les scénarii de demande et des stratégies de l'offre,

donnant la meilleure visibilité aux différents acteurs et investisseurs potentiels sur les moyens de production et de réseau à engager pour le pays. L'enjeu du PDSE-2030 consiste d'une part à promouvoir l'émergence d'une telle demande et d'autre part à assurer le développement de l'offre d'électricité correspondante à moindre coût. En projetant une croissance du secteur industriel, l'industrie aluminère en particulier, les pouvoirs publics espèrent faire passer la demande en énergie électrique à 10 000 MW à l'horizon 2025 contre une offre de moins de 1000 MW en 2005. Au moment de l'élaboration du plan en 2005, la production annuelle d'électricité pour le Cameroun était évaluée à 2790 GWh pour le service public et à 1400 GWh pour la haute tension destinée à l'entreprise aluminère ALUCAM. Selon les proportions du plan, cette production se serait selon des hypothèses minimales et celles dites des « Grandes ambitions » entre 6592 GWh et 17174 GWh à l'horizon 2015 pour être estimée entre 9919 GWh et 40628 GWh à l'horizon 2030.

Ces actions ont pour terme d'accroître l'offre d'électricité dans le but d'atteindre les objectifs du millénaire pour le développement (OMD) (MINEE, 2005 ; MINEE, 2008). A travers le DSCE, le Cameroun souligne l'importance cruciale du développement du domaine de l'énergie et présente les défis majeurs que sont : l'accroissement significatif de la production par une valorisation du potentiel hydroélectrique et gazier, des énergies alternatives et la modernisation des réseaux de distribution. Il s'agit pour le pays de toujours satisfaire la demande intérieure et de développer l'exportation vers la région, les interconnexions qui portent sur l'interconnexion Tchad-Cameroun avec la construction du barrage hydroélectrique de Bini à Warak, perspective de l'interconnexion Inga-Lagos avec de nouvelles capacités de production hydroélectrique ; une plus forte mobilisation des recettes hors pétrole et une gestion plus rigoureuse.

L'amélioration de l'offre en énergie électrique est l'une des préoccupations majeures de l'heure, le souci étant non seulement de résorber le déficit énergétique préalable à une croissance économique soutenue mais aussi de faire du Cameroun un pas exportateur d'électricité dans la sous-région. Le plan directeur d'électrification rurale (PDER) ayant eu l'approbation en 1997, a été achevé en 2003. Celui-ci met l'accent sur les énergies renouvelables sur le plan local. En inscrivant les énergies renouvelables au cœur de la planification locale, le Cameroun voulait accélérer sa croissance économique pour la porter à 5,5 % à l'horizon 2020. A cet effet, il doit atteindre une capacité de production d'électricité à 3000 MW. Le pays compte produire 20 % de l'offre électrique nationale à

partir des énergies renouvelables à l'horizon 2035 (PNUD, 2014) Le plan directeur d'électrification rurale (PDER) (MINEE, 2016) prévoit : les acteurs locaux ne peuvent que constater la vétusté, la saturation et la faible disponibilité des équipements de production, de transport et de distribution d'électricité qui entraînent des interruptions fréquentes et le plus souvent prolongées de la fourniture d'électricité dans les villes et village. On estime le déficit en capacité électrique de 50 GWh. Ce déficit marqué par les délestages fréquents et parfois prolongés, désorganise la vie économique et sociale, accentuant ainsi la pauvreté car, seulement 3000 des 13104 localités du pays sont électrifiées.

Les ressources disponibles jugées encore faiblement exploitées, la SND30 entrevoit une amélioration de leur exploitation. Avec l'adoption de la stratégie nationale de développement 2020-2030 (SND30), le Cameroun dispose désormais d'un nouveau cadre de référence pour son action de développement au cours de la décennie en cours. Se situant dans le prolongement des actions de développement engagées par le Cameroun et consignées dans le DSCE (MINEPAT, 2009), la SND30 fait l'évaluation de ce dernier pour la période 2010-2019. Par le DSCE, le Cameroun connaît une augmentation de 750 MW en offre énergétique nationale. La SND30 a fixé quatre objectifs globaux où les deux premiers se focalisent sur les gros et petits consommateurs à savoir :

- ✓ Mettre en place des conditions favorables à la croissance économique et à l'accumulation de la richesse nationale et veiller à obtenir les modifications structurelles pour l'industrialisation du pays,
- ✓ Améliorer les conditions de vie des populations et leur accès aux services sociaux de base en assurant une réduction significative de la pauvreté et du sous-emploi.

Parlant des transformations structurelles de l'économie, le déclenchement du développement industriel du pays est axé sur la modernisation de l'appareil de production à travers des investissements massifs dans les infrastructures de l'énergie notamment. L'industrie de l'énergie est fondée sur son potentiel robuste et dense en ressources énergétiques (MINEPAT, 2020). Le Cameroun s'est fixé pour objectif de produire de l'énergie en quantité abondante pour améliorer la vie de la population, pour satisfaire son industrialisation et devenir un pays exportateur d'énergie. Cette ambition impose une restructuration du secteur national de l'énergie et la mise en cohérence des grands compartiments de l'organisation de ce secteur avec les enjeux et les défis à relever à court, à moyen et à long terme, de la production à la distribution en passant par le nœud critique des

réseaux de transport interconnectés nationaux et régionaux, actuels et futurs. A cet effet, trois orientations ont été retenues : développer l'important potentiel hydroélectrique national ; développer par les énergies alternatives pour mieux répondre aux besoins spécifiques tels que la cuisson des aliments, l'électrification urbaine, les transports urbains, les industries manufacturières ; renforcer et optimiser l'utilisation de la biomasse.

Les institutions en charge de gestion de l'électricité sont :

Le Ministère de l'Energie et de l'Eau (MINEE) est l'institution administrative et gouvernementale chargée de l'inventaire des sources énergétiques et des ressources en eau. Il coordonne les travaux d'aménagements hydroélectriques et assure le suivi des installations. Dans ce sens, le gouvernement du Cameroun a défini dans le PDSE l'objectif d'atteindre la capacité de 6 000 MW en 2030.

ENEO depuis 2014 est née ENELCAM (1948) et devenue SONEL (1974) puis AES/SONEL (2001), dont elle porte l'héritage, est l'entreprise concessionnaire chargée de la production de l'énergie hydroélectrique au Cameroun. Elle vend de l'électricité au public. Les activités réparties par ENEO sont exclusivement accomplies par étape et pas en gamme. Conformément à la loi de 2011, la répartition du réseau de transmission a débuté et a donné le RIS (Réseau Interconnecté Sud), le RIN (Réseau Interconnecté Nord), le RIE (Réseau Isolé Est). Toutes les activités de transmission qui, jusqu'à lors étaient exécutées par ENEO Cameroun S.A., sous son accord de concession sur la transmission a été transféré à un nouveau système d'opérateur de transmission concession publique : la SONATREL (Société Nationale de Transport d'Electricité) créée en 2015. Son rôle est d'assurer le transport de l'énergie et le raccordement aux différents réseaux définis par la concessionnaire.

ARSEL (Agence de Régulation du Secteur de l'Electricité) créée en 2001 en tant qu'institution de régulation non seulement fixe le tarif de l'électricité mais aussi administre des conseils du secteur de régulation.

EDC (Electricity Development Corporation) créé en 2006 a pour missions d'aménager et de développer les infrastructures de l'énergie électrique au Cameroun. Le décret n°2006/406 du 26 novembre 2006 en son article 4, crée au sein de EDC une commission paritaire des eaux du bassin chargée de la gestion des eaux à réguler [...].

AER (Agence de l'Electricité Rurale) créée en 1998 et reorganisée en 2022, est chargée de se concentrer sur la réhabilitation et la construction des mini centrales hydroélectriques et

à diesel. A cet effet, d'autres ressources sont exploitées pour la production de l'énergie électrique telles que du gaz et du pétrole. C'est dans ce sens qu'on peut faire allusion à :

- Loi n°99/013 du 22 décembre 1999 portant code pétrolier revue par la loi n°2019/008 du 25 avril 2019 portant code pétrolier ;
- Loi n°2002/013 du 30 décembre 2002 portant code gazier. Cette loi définit les activités de transport, de distribution, de transformation, de stockage, d'importation, d'exportation et de vente de gaz sur le territoire national. Elle vise entre autres à mettre en place d'un cadre juridique propice à la mise en valeur des ressources gazières ; à garantir la sécurité des installations et la protection de l'environnement.

Ces lois sont appuyées par des décrets appropriés tels que :

- Décret n°2000/465/PM du 30 décembre 2000 fixant les modalités de l'application de la loi n°99/013 du 22 décembre 1999 qui a subi des amendements suivant le décret n°2023/232.PM fixant les modalités d'application de la loi n°2019/008 du 25 avril 2019 portant code pétrolier ;

I.5.3. La politique de l'environnement au Cameroun

Le Cameroun comme la quasi-totalité des pays en développement s'est engagé à la lutte pour la préservation de son environnement et à la conservation de ses ressources naturelles. Sa politique environnementale est guidée par la réglementation internationale et nationale (MINFOF, 2018). Ainsi, certaines conventions multilatérales ratifiées et certaines lois nationales adoptées par le Cameroun sont mentionnées.

- La Convention d'Alger (1968) modifiée en 2003 permet d'améliorer la protection de l'environnement, de promouvoir la conservation et l'utilisation durable des ressources naturelles, d'harmoniser et de coordonner les politiques dans ces domaines.
- L'ordonnance n°74/2 du 6 juillet 1974, fixant le régime domanial définit dans « le domaine public naturel qui comprend : [...] le domaine public fluvial ».
- La Convention de Ramsar (1975) sur les zones humides. En 1992, le Cameroun adhère à la Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement durable.
- La Convention sur la diversité biologique dont l'objectif est de développer les stratégies nationales pour la conservation et l'utilisation durable de la diversité biologique (Ouverte à la signature le 5 Juin 1992, entrée en vigueur le 29 Décembre 1993). Elle a été vite renforcée par la Convention des Nations-Unies sur la lutte contre la désertification (1994) qui contribue à la lutte contre la désertification et à

l'atténuation des effets de la sécheresse dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique, grâce à des mesures efficaces à tous les niveaux, appuyées par des arrangements internationaux de coopération et de partenariat.

- La Déclaration de Yaoundé (1999) ; Sommet des chefs d'Etat d'Afrique centrale sur la conservation et la gestion durable des forêts tropicales.
- Le Traité COMIFAC (2005) relatif à la conservation et à la gestion durable des écosystèmes forestiers d'Afrique centrale.
- Loi N°85/09 du 4 juillet 1985 relative à l'expropriation pour cause d'utilité publique et aux modalités d'indemnisation fixe les conditions d'expropriation en cas de projet d'utilité publique et les dispositions relatives aux expropriations et des modalités d'indemnisations. Le décret N°87-1872 du 18 décembre 1987 portant application de la loi N°85-09 du 04 juillet 1985 relative à l'expropriation pour cause d'utilité publique et aux modalités d'indemnisation stipule que l'expropriation ouvre droit à une indemnisation préalable.
- La loi n°94/01 du 20 janvier 1994 portant régime des forêts, de la faune et de la pêche vise à atteindre les objectifs généraux de la politique forestière, de la faune et de la pêche dans le cadre d'une gestion intégrée assurant de façon soutenue et durable, la conservation et l'utilisation desdites ressources et des différents écosystèmes. Elle fait suite à la politique forestière adoptée en 1993, confirmée par la création du ministère de l'environnement et des forêts en 1994. Les décrets n°95-466-PM du 20 juillet 1995 et n°95-531-PM du 23 août 1995 fixent respectivement les modalités d'application du régime de la faune et celles du régime des forêts.
- D'après la loi n°96/12 du 5 août 1996 portant loi-cadre relative à la gestion de l'Environnement, il incombe au Gouvernement d'élaborer des stratégies, des plans ou programmes nationaux tendant à assurer la conservation et l'utilisation durables des ressources de l'environnement. Le décret n°2005/0577/PM du 23 février 2005 fixe les modalités de réalisation des études d'impact environnemental et social.

Dans le cadre de l'évaluation des objectifs du millénaire pour le développement (OMD) et les objectifs nationaux, le DSCE fixe comme OMD7, assurer un environnement durable. Il est à relever que malgré l'augmentation des aires protégées pour préserver l'environnement, l'objectif que la proportion de la population utilisant les combustibles

solides atteigne environ 42,2 % ne serait vraisemblablement pas atteint. Cet indicateur s'est stabilisé autour de 82 % de 2001 à 2008. Ce qui demande de nombreux efforts pour la mise en œuvre d'une stratégie basée sur les principes de développement durable. Ainsi en 2012, le Cameroun se fixe un plan d'action d'urgence pour la sécurisation des aires protégées. La version 2 de la Stratégie et du Plan d'action nationale pour la biodiversité (SPANB) réitère que l'eau douce est une importante ressource naturelle indispensable à la survie de tous les écosystèmes (MINEPDED, 2012).

Le Code Minier promulgué par la Loi n°2001/001 du 16 avril 2001, modifiée et complétée par la loi n°2010/011 du 29 Juillet 2010 conditionne l'obtention préalable d'un titre minier ou d'une autorisation des autorités compétentes avant toute activité minière. Le décret d'application n°2002/648/PM du 26 mars 2002, conformément au Code Minier, assujettit les sociétés minières à des droits et taxes spécifiques. Ces textes ont été complétés par la loi n°2016/017 du 14 décembre 2016 portant code minier, délimitent les zones d'interdiction ou de protection destinées à assurer la protection des édifices, des agglomérations, des lieux culturels, des sépultures, des lieux d'endémisme, des sites touristiques, des points d'eau, des voies de communication, des ouvrages d'art, des travaux d'utilité publique, des sites archéologiques. Un plan directeur d'industrialisation adopté en 2017 répond au même souci. Les activités d'extraction minière étant très dévastatrices, le Cameroun prend des dispositions pour concilier son environnement et son développement.

Les manifestations exceptionnelles des paramètres météorologiques enregistrés dans certaines localités du monde n'ont pas épargné le Cameroun. Ces manifestations si récurrentes marquées par des inondations, des sécheresses drastiques, les faux démarrages des saisons de pluies, des tornades aiguës, des foudres intensives, attestent les effets des changements climatiques dans notre pays. L'adhésion du Cameroun à la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et suite à la COP13 de Bali en 2007 dont l'objectif était de fixer le calendrier de négociation, le suivi des aléas climatiques interpelle les acteurs du développement. Après ces engagements du Cameroun à l'échelle internationale, le Chef de L'Etat va réitérer ses promesses par le décret n°2009/410 du 10 décembre 2009 portant création de l'Observatoire national des Changements Climatiques (ONACC). L'ONACC participe au développement socioéconomique sobre en carbone et résilient aux changements climatiques.

Dans le but de réduire les émissions des gaz à effets de serre accélérateurs du réchauffement de la planète d'une part et d'adapter nos sociétés aux changements climatiques inévitables pour limiter les dommages d'autre part, le Cameroun adopte la loi n°2011/008 du 6 mai 2011 portant orientation pour l'aménagement et le développement durable. Il adopte un plan national d'adaptation aux changements climatiques (PNACC). Suivant les exigences de le CCNUCC, le PNACC est fondé sur une approche participative qui permet de prendre en compte les informations et observations séculaires accumulées par les communautés locales sur les interactions entre l'Homme, son environnement et les conditions climatiques (MINEPDED, 2015). La mise en œuvre des mesures d'adaptation prévues dans ce PNACC, interpelle une mobilisation nationale (administrations publiques et privées, organisations de la société civile, communautés locales) afin que les atteintes des objectifs fixés dans le cadre de la vision du développement du Cameroun ne soient pas compromises par les effets néfastes des changements climatiques. En 2016, le Cameroun signe l'accord de Paris sur les changements climatiques.

A cet effet, la SND30 dans le cadre de l'environnement et de la protection de la nature, fixe comme objectif : renforcer les mesures d'adaptation et d'atténuation des effets des changements climatiques et la gestion environnementale pour garantir une croissance économique et un développement social durable et inclusif (MINEPAT, 2020). Il s'agit de renforcer les actions relatives à la gestion durable des ressources naturelles et prendre des mesures adéquates d'adaptation et d'atténuation des effets des changements climatiques. Par ailleurs, pour faire face aux conséquences perceptibles des changements climatiques notamment les inondations et les glissements de terrain dont certaines villes et campagnes sont victimes, le Gouvernement s'engage à :

- S'assurer de la prise en compte des préoccupations liées aux changements climatiques dans les stratégies et politiques sectorielles aussi bien dans la formulation que la mise en œuvre ;
- Renforcer les capacités des institutions chargées de la veille climatique ;
- Rendre opérationnel le dispositif de veille, de prévention et de riposte aux effets des changements climatiques ;
- Elaborer et mettre en œuvre une stratégie nationale de gestion des déchets tout en promouvant la responsabilité sociétale des entreprises.

Le développement des infrastructures hydroélectriques est régi par des instruments juridiques durables relatifs à la protection de l'environnement. La faible collaboration de l'ONACC et de la direction de la météorologie nationale (DMN) est un souci véritable.

CHAPITRE II. MATERIEL ET METHODES

II.1. MATERIEL

II.1.1. Site d'étude

Le site d'étude est le bassin versant du fleuve Sanaga de Lom-Pangar à Edéa. Ce dernier d'une superficie de 140 000 km² est situé entre 3°45 et 7°20 de latitude Nord et entre 9°45 et 15° de longitude Est occupant ainsi plus de 25 % du territoire camerounais. Il est le plus important sur le plan économique et draine six régions administratives sur les dix que compte le Cameroun et plusieurs départements du pays. Le substratum est constitué de roches éruptives basiques aux altitudes supérieures à 1200 m et d'un socle granito-gneissique sur lequel se développent les sols ferralitiques et hydromorphes. Il comprend une zone de savane en amont couverte par un climat tropical humide et une zone de forêt en aval couverte par un climat équatorial. Le bassin versant de la Sanaga est occupé par une population active constituée pour l'essentiel des Bantou.

La fleuve Sanaga long de 920,800 km, dont la source n'est pas bien nette reçoit dès l'amont le Lom et Meng qui prennent leurs sources autour de 1300 m d'altitude. En amont, il semble assimilé à son principal affluent le Djerem. Ce dernier prend sa source au flanc de l'Adamaoua vers 1150 m d'altitude (Olivry, 1986). Le Lom reçoit le Pangar autour de l'altitude 800 m avant de se déverser dans la Sanaga. Sortant de la forêt, le fleuve Sanaga franchit un décrochement de 110 m du plateau Sud camerounais, terminé par les rapides de Nachtigal de 8m. Le Mbam, plus important affluent du fleuve Sanaga prend sa source 1850 m d'altitude. Après la confluence de ces deux fleuves à 404 m d'altitude, le fleuve Sanaga traverse plusieurs rapides et chutes pour rejoindre celles de Sackbayémé d'une hauteur de 10 m à l'altitude 200 m. Les chutes de Songloulou d'une hauteur de 22 m se situent à l'altitude 175 m. Ces dernières se trouvent à 55 km en amont de celles d'Edéa d'une hauteur de 14 m à 34 m d'altitude (Olivry, 1986).

II.1.2. Collecte des données

Les données collectées au cours de la présente étude couvrent la période 1932 à 2021. Les données des températures de surface de l'Océan Atlantique (d'une part, entre 5-30° latitude Nord et 30-60° longitude Ouest, et d'autre part 0-30° latitude Sud et 30°-10° longitude Ouest) ; des pressions au niveau des centres d'action atmosphérique et de Pour comprendre davantage cette évolution, les indices d'Oscillation Nord Atlantique (NAO) et les années des épisodes El-Niño ont également servi. Les données des températures de

surface de l'Atlantique, de l'activité des centres d'action atmosphériques et du NAO ont été obtenues de l'Université d'Hydrométéorologie de Saint Petersburg en Russie pour la période allant de 1950 à 2014. Pour les précipitations, les données ont été obtenues de la Direction de la Météorologie Nationale à Douala.

En dehors du matériel utilisé pour des contraintes diverses, les fiches pluviométriques et de températures étaient des relevés annuels des stations météorologiques de certaines localités. Ce sont des documents dans lesquels étaient notées les mesures journalières ou mensuelles des précipitations et des températures, les stations étant disséminées sur l'ensemble du bassin du fleuve Sanaga. Le bassin est divisé en trois zones climatiques : zone tropical humide, zone équatoriale de type guinéen et zone équatorial de type camerounien. Le bassin versant du fleuve Sanaga dispose des installations importantes en son sein et tout autour pour le suivi pluviométrique, des températures et des débits. Non seulement trois grandes variétés climatiques couvrent ce bassin, mais aussi il recoupe quatre zones agro écologiques ou ZAE (Fig. 18).

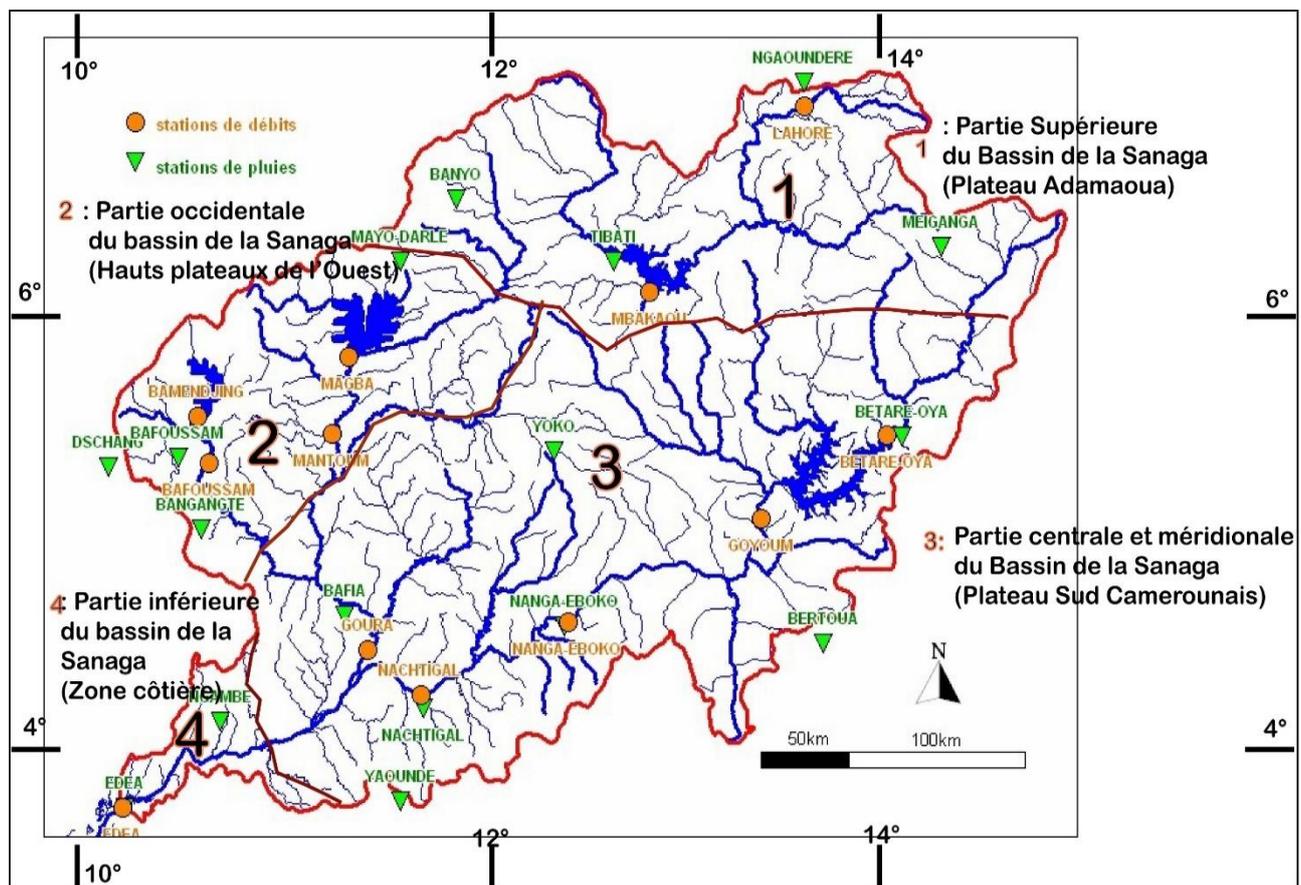


Fig. 18. Réseau hydrographique et hydrométrique du bassin de la Sanaga (Tchindjang et al, 2012).

Le matériel était constitué d'une part des données de production effective des Centrales et d'autre part de celles des matières en suspension (MES) des exutoires.

II.1.3. Stations météorologiques exploitées

Les stations d'observation de la pluviométrie et des températures sont implantées à travers et en bordure du bassin sous le contrôle et la gestion de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Les coordonnées géographiques des stations exploitées se trouvent dans le tableau X où les données couvrent les périodes de 1979 à 2021 pour les températures et de 1932 à 2021 pour les précipitations. La pluviométrie de ces stations ont servi pour l'analyse de l'évolution des précipitations et températures au sein du bassin de la Sanaga. Certaines stations voisines du bassin de la Sanaga ont été exploitées comme différents postes de suivi de la pluviométrie et des températures desquels sont obtenues les données pour le calcul des précipitations moyennes au sein du bassin.

Tableau X. Stations météorologiques exploitées pour les données des précipitations et des températures (ORSTOM)

Station	Longitude E	Latitude N	Altitude (m)	P O T	Nb A	P O P	Nb A
Abong-Mbang	13°18' E	3°96' N	693,0	1979-2021	43	1932-2021	90
Akonolinga	12°25' E	3°80' N	671	1979-2021	43	1932-2021	90
Bafia	11°23' E	4°73' N	501	1979-2021	43	1932-2021	90
Bafoussam	10°41' E	5°46' N	1460	1979-2021	43	1932-2021	90
Banyo	11°80' E	6°73' N	1110	1979-2021	43	1932-2021	90
Bertoua	13°68' E	4°58' N	668	1979-2021	43	1932-2021	90
Dschang	10°06' E	5°45' N	1399	1979-2021	43	1932-2021	90
Edéa	10°13' E	3°80' N	32	1979-2021	43	1932-2021	90
Koundja	05°38' E	10°45' N	1217	1979-2021	43	1932-2021	90
Meiganga	14°28' E	6°53' N	1027	1979-2021	43	1932-2021	90
Nanga-Eboko	12°36' E	4°65' N	624	1979-2021	43	1932-2021	90
Ngambe	10°61' E	4°21' N	650	1979-2021	43	1932-2021	90
Ngaoundéré	13°55' E	7°35' N	1113	1979-2021	43	1932-2021	90
Nkongsamba	9°93' E	4°95' N	816	1979-2021	43	1932-2021	90
Tibati	12°61' E	8°46' N	874	1979-2021	43	1932-2021	90
Yaoundé	11°51' E	3°83' N	760	1979-2021	43	1932-2021	90
Yoko	12°30' E	5°53' N	1031	1979-2021	43	1932-2021	90

POT : période d'observation température ; Nb A : nombre d'années ; POP : période d'observation Pluviométrie

II. 2. METHODES

II.2.1. Evaluation de l'évolution de facteurs climatiques majeurs

II.2.1.1. Validation des données

Ayant constaté de nombreuses lacunes pour certaines séries avec des périodes non observées, on a d'abord essayé de combler ces lacunes puis procédé à une homogénéisation avec la formule de Olivry (1986) : $y_n = \bar{y}_k + r_{kxy}(\bar{x}_n - \bar{x}_k)$ (Eq. 1)

Les valeurs indicées k se rapportent à la période d'observation ; n à la période d'homogénéisation ; les valeurs x concernent la station de référence et y la station à homogénéiser ; r est le coefficient de corrélation entre les relevés correspondants des deux stations.

II.2.1.2. Analyse des températures moyennes de surface de l'Océan Atlantique et de la pression aux mêmes latitudes ainsi que l'indice NAO

Des séries chronologiques (températures de surface de l'Atlantique, indices NAO)), on a évalué les moyennes arithmétiques et l'écart-type en vue de vérifier l'étalement des données. On a calculé les écarts à la moyenne pour détecter les périodes de hausse et de baisse. On a décelé à quel moment les températures de surface de l'Atlantique ont augmenté. Le fait de combiner les pressions au niveau des centres d'action atmosphérique et l'indice de la NAO, a permis de comprendre les raisons de perturbations récurrentes des éléments climatiques dans le bassin du fleuve Sanaga. La proximité des données nous a amené à nous fixer l'idée d'une éventuelle erreur ε_r au sein des séries chronologiques au cours de la validation des données d'expression (Olivry, 1986) : $\Delta \varepsilon_r = \pm 0,67 \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ (Eq.2)

II.2.1.3. Analyse des températures moyennes de certaines stations du bassin de la Sanaga

De la Direction de la Météorologie Nationale à Douala, ont obtenu les données et évalué les moyennes arithmétiques et l'écart-type. On a calculé les écarts à la moyenne pour détecter les périodes de hausse et de baisse. On a décelé à quel moment les températures ont commencé à augmenter au sein du bassin à partir des discontinuités.

II.2.1.4. Détermination des pluies moyennes dans une localité

Dans dix-huit stations à l'intérieur et autour du bassin du fleuve Sanaga et deux stations de moyennes latitudes au-dessus de l'Atlantique, on a procédé à une analyse statistique de ces températures en déterminant la moyenne, l'écart type et la tendance séparément dans les deux hémisphères. On a cherché à relever en quelle année s'est manifestée la variation au sein d'une série. Dans une station, on a distingué les pluies moyennes journalières, mensuelles, annuelles et décennales.

- Pluie mensuelle est une somme des pluies journalières sur un mois.

- Pluies moyennes mensuelles = $\frac{\sum \text{Pluies du mois } i}{\text{nombre de mois } i}$; (Eq.3)

Où i représente un mois de l'année.

Cette caractéristique est à l'origine des régimes pluviométriques dans une région donnée à condition que le nombre d'années d'observation soit supérieur ou égal à 30 d'après l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM).

II.2.1.4.1. Analyse de la variabilité pluviométrique

Les fluctuations climatiques ont été basées sur l'analyse des caractéristiques (moyennes annuelles, indices pluviométriques, ruptures, déficits) des précipitations par station, de la pluie moyenne par espace géographique suivant plusieurs techniques que sont :

- Le calcul des indices pluviométriques et des moyennes mobiles ;
- Les tests de détection des ruptures dans les séries hydro pluviométriques par la méthode de segmentation d'Hubert *et al.* (1989) ou le test de Pettitt (1979) ;
- La détermination des déficits pluviométriques.

Pour détecter une rupture au sein d'une série chronologique, l'IRD a mis au point le logiciel Khronostat qui regroupait les tests de vérification du caractère aléatoire de l'échantillon étant le test de Buishand et de l'ellipse de bois, les méthodes d'Hubert et de Pettitt selon Sighomnou (2004). La procédure de segmentation des séries chronologiques proposée par Hubert *et al.* (1989) était appropriée à la recherche des multiples changements de la moyenne.

Quant au test de Pettitt, il est non paramétrique et dérive de celui de Mann Whitney. L'absence de rupture dans la série (X_i) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$ par : $U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$ (Eq.4)

Où $D_{ij} = \text{Sgn}(X_i - X_j)$ avec : $\text{sgn}(x) = 1$ si $x > 0$ et -1 si $x < 0$. La mise en œuvre de ce test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N , les séries chronologiques $(X_i)_{i=1}^t$ à t et $t+1$ à N appartiennent à la normale. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$. Le principe du test de Pettitt (1979) consiste à diviser la série étudiée d'effectif N en deux sous échantillons de tailles m et n respectivement. On calcule alors la somme des rangs des éléments de chaque sous échantillon dans l'échantillon total. Une étude statistique est ensuite réalisée à partir des deux sommes ainsi déterminées, puis tester selon l'hypothèse qu'il n'y aurait aucune appartenance des deux sous échantillons à la même population.

II.2.1.4.2. Détermination des déficits hydro pluviométriques

On utilise cette méthode pour relever le pourcentage de variations de la moyenne de la série du paramètre étudié d'une sous période T_i autour de la période T considérée. Pour les variables pluviométriques dont la série chronologique présente une rupture, cette méthode a permis de préciser le pourcentage de variation de la moyenne autour de la date de rupture par la formule :

Déficit (D) = (moyenne après la rupture – moyenne avant la rupture) /moyenne avant la rupture : $D = (x_j/x_i) - 1$; (Eq. 5)

x_j = moyenne de la période après la rupture, x_i : moyenne de la période avant la rupture.

Cette méthode a aussi permis de suivre l'évolution des variations au cours du temps sur une période de référence prédéfinie. On a déterminé le coefficient d'irrégularité interannuelle ($CI = E_T / Moy$), (Eq. 6)

Où E_T est l'écart type ; l'irrégularité saisonnière (plus faible débit mensuel/module ; plus fort débit mensuel/module, puis on les a comparé au module et dégagé le nombre de mois ou durée où le débit $Q > \text{module}$).

Les pluies annuelles = \sum pluies journalières durant l'année considérée = \sum pluies mensuelles durant l'année considérée.

Les pluies moyennes décennales = \sum pluies annuelles enregistrées pendant 10 ans consécutifs /10.

Dans l'analyse des paramètres, il a été question de ressortir la tendance linéaire après traçage des courbes pour apprécier la donnée étudiée en dégagant d'éventuelles ruptures au sein de la série chronologique. Connaissant l'écart-type σ et le moment centré d'ordre 1 $(x - \bar{x})$, (Eq. 7).

On a décrit les caractéristiques des distributions statistiques (indices, écarts à la moyenne), pour expliquer la forme, l'aplatissement ou la symétrie, la tendance centrée ou la dispersion selon Lethielleux (2005) $(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma})$ (Eq. 8)

Ces indices pluviométriques ont permis de différencier les années ou les décennies sèches (déficitaires) et humides (excédentaires).

Afin d'étudier la variation dans l'évolution des paramètres (températures, pluviométrie, débits) on a évalué l'indice de Barakat selon Barakat & Handoufe (1998). Cet indice est un élément d'identification et d'inventaire des valeurs de la série chronologique

suisant trois classes (faible, normale et forte). La classe faible regroupe les valeurs inférieures à la moyenne ôtéée de l'écart type ($x_i < \bar{X} - \sigma$). (Eq. 9)

La classe normale comprend des valeurs incluses dans l'intervalle de la moyenne ôtéée ou majorée de l'écart type ($\bar{X} - \sigma < x_i < \bar{X} + \sigma$). Quant à la classe forte, elle comprend des valeurs supérieures à la moyenne majorée de l'écart type ($x_i > \bar{X} + \sigma$). (Eq.10)

La méthode de Barakat ne donnant que des intervalles globalisants du paramètre étudié, on a estimé l'intervalle de confiance (IC) à 95 puis à 99 % par la relation de Lethielleux (2005) : $IC = \bar{x} \pm t_n S_n$ (Eq. 11)

Où t est la variable de la loi normale pour les grands effectifs ($n \geq 60$) ou t de Student pour les petits échantillons ($n \leq 30$) ; $S_n = \frac{\delta}{\sqrt{n-1}}$ (Eq. 12)

n étant l'effectif de la population à étudier.

Par ailleurs, on a déterminé l'indice de Nicholson à partir de Nicholson *etal*(1988). L'indice de Nicholson ou méthode par six gradations de Nicholson s'appuie sur le rapport des écarts à la moyenne sur l'écart type (Tableau XI) selon la relation [$SPI = (Xi - Xm) / \sigma$] où SPI indique « Serial Parameter Index » ou Indice de la Variable de la série ; Xi la valeur d'une année du paramètre ; Xm la moyenne de la série chlorotique ; σ l'écart type.

Tableau XI. Attitude du paramètre (Nicholson et al, 1988).

Classes de SPI	Degré du paramètre	Pourcentage (%)
$SPI < -2$	Très faible	
$-2 < SPI < -1$	Faible	
$-1 < SPI < 0$	Modérément faible	
$0 < SPI < 1$	Modérément fort	
$1 < SPI < 2$	Fort	
$SPI > 2$	Très fort	

II.2.1.4.3. Calcul de l'évapotranspiration potentielle et son impact sur la ressource en eau

Les températures retenues en termes de moyenne ont permis de tracer des courbes classées. A partir des températures moyennes, on a calculé l'évapotranspiration potentielle (ETP) en utilisant des méthodes empiriques de Thornthwaite (1955) :

$$ETP = 16 \left[\frac{10T}{I} \right]^\alpha \times F(\lambda) \quad (\text{Eq. 13})$$

Avec ETP= évapotranspiration potentielle mensuelle ;

$$\alpha = 0,49239 + 1,792 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 \quad (\text{Eq.14})$$

Où $F(\lambda)$ = facteur de corrélation de Marsilly qui varie avec les mois de l'année et les latitudes ; I = somme de l'année des indices mensuels $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$ (Eq.15)

T = température moyenne du mois considéré en °C.

Selon Thornthwaite, cette relation est nette dans les régions équatoriales et peut aller jusqu'à 15° de latitude. Une fois l'évapotranspiration potentielle déterminée, on a évalué l'influence des températures sur la ressource en eau dans le bassin du fleuve Sanaga. La température ayant permis de déterminer l'évapotranspiration potentielle qui affecte la ressource en eau, la disponibilité en eau (R) a été évaluée dans chaque station suivant la relation de Turc (1958) : $R = P - ETP$ (Eq.16)

où P représente la pluie moyenne annuelle enregistrée dans une localité et ETP l'évapotranspiration potentielle déterminée par Thornthwaite (1955) pendant le même temps.

II.2.2. Mise en relation entre les variations des facteurs climatiques et les ressources en eau pour la production de l'énergie hydroélectrique

Pour atteindre cet objectif, on a eu besoin des données des précipitations, celles des températures de l'air, des débits, des valeurs moyennes de MES, dont les valeurs indépendantes sont la pluviométrie et les températures de l'air et les valeurs dépendantes sont les débits, des valeurs moyennes de MES.

On a calculé la pluie moyenne \bar{P} tombée dans le bassin du fleuve Sanaga. C'est une démarche qui prend aussi en compte des stations situées autour du bassin dite méthode de Thiessen (Remenieras, 1960). Elle attache un facteur de pondération à chaque pluviomètre. Les stations sont pointées sur une carte et jointes entre elles par une ligne droite. Les médiatrices desdits segments déterminent un polygone autour de chaque station. Les côtés des polygones et la ligne de partage des eaux représentent les limites de l'aire accordée à chaque station. L'aire de chaque polygone A_i est déterminée par planimétrie. La précipitation moyenne pondérée \bar{P} pour le bassin versant se calcule en effectuant la somme des précipitations P_i de chaque station i multipliées par son coefficient de pondération (aire A_i), puis on divise par la surface totale A du bassin. Cette pluie moyenne est donnée par la formule : $\bar{P} = \frac{\sum A_i P_i}{A}$. (Eq. 17)

La hauteur d'eau moyenne P tombée dans le bassin est la somme des hauteurs d'eaux tombées dans chaque section élémentaire.

II.2.2.1. Relation entre la température de l'air et la pluviométrie

Pour caractériser l'hydrologie annuelle (Tableau XII), on a calculé d'une part l'indice d'aridité (I_a) de De Martonne selon Bagnouls et Gaussen (1957) au niveau des stations par la relation : $I_a = \frac{12p_i}{T_i+10}$, (Eq.18)

Où p_i =précipitations moyennes mensuelles ; T_i =température moyenne mensuelle.

Tableau XII. Caractérisation hydrologique mensuelle (Bagnouls et Gaussen, 1957)

	Intervalle	Statut hydrologique du mois
Indice d'aridité (I_a)	$I_a \leq 20$	Sécheresse
	$20 < I_a \leq 50$	Sub-sécheresse
	$I_a > 50$	Humidité

II.2.2.2. Relation entre la pluviométrie et l'écoulement

Par les données annuelles et/ou mensuelles, la distribution des modalités des caractères a été dégagée et des représentations graphiques obtenues. On s'est appuyé sur l'équation classique du bilan de l'eau pour évaluer la variation du déficit d'écoulement (D) par la relation $D = P - H_e$ (Eq.19)

Où P est la pluie moyenne d'une année dans le bassin versant et H_e la lame d'eau moyenne écoulée évaluée pour la même période à l'exutoire.

Le logiciel Excel a été utilisé pour le traçage des courbes et le calcul de certaines valeurs statistiques caractéristiques.

II.2.3. Comparaison de l'évolution de l'énergie hydroélectrique potentielle à celle de l'énergie hydroélectrique réelle

II.2.3.1. Estimation de l'énergie hydroélectrique potentielle de certains barrages et chutes du bassin du fleuve Sanaga

Pour évaluer l'énergie hydroélectrique potentielle d'une chute, des paramètres hydrologiques du cours d'eau correspondant, de la hauteur de chute (escarpements) de l'eau (Tableau XIII), de la masse volumique de l'eau (1000kg/m^3) et de l'accélération gravitationnelle ($g=9,81 \text{ kg/N}^2$) ont été utilisés. Les données hydrologiques dans les bassins versants concernaient les débits aux exutoires et celles des matières en suspension. Les données de débits liquides étaient des relevés obtenus des stations de suivi hydrométriques

tirées du CRH, de l'IRGM, du CRU, de GWP-Caf, de l'IRAD, de l'IRD, des travaux de Olivry, (1986), de Sighomnou (2004), de Liéno (2007), de SOGREA *et al*, 2011 et de AES-SONEL de la Sanaga à Édéa, à Sackbayémé, à Nachtigal et Lom-Pangar à leur confluence pour la période comprise entre 1950 à 2018.

Tableau XIII. Caractéristiques de certaines chutes exploitées dans le bassin de la Sanaga (Dubreuil *et al*, 1975 ; Olivry, 1986)

Cours d'eau	Chute	Superficies (km ²)	Hauteur moyenne de chute (m)
Lom-Pangar	Confluence	16100	14
Sanaga	Nachtigal	76 000	8
Sanaga	Kikot	103 000	30
Sanaga	Eweng	129 000	7
Sanaga	Song-Mbengue	129 500	10
Sanaga	Song-Loulou	130 000	22
Sanaga	Song-Ndong	131 000	16*
Sanaga	Edéa	131 500	22,5

* = ensemble de dénivellation de rapides

Certaines stations sont des exutoires en aval des barrages de production d'énergie hydroélectrique (Song-Loulou, Édéa, Lom-Pangar) ou de retenue (Mbakaou, Bamendjing, Mapé, Lom-Pangar). Des phénomènes géodynamiques internes étaient retenus des travaux de Dubreuil *et al*, (1975) et Nangé (2007). Les hauteurs des chute et rapides étaient la conséquence de la tectonique qui avait mis en place des pentes abruptes et de vastes plateaux basaltiques selon Olivry (1986). On a procédé à l'observation des affleurements de terrain sur les massifs de gneiss. On a considéré que les décrochements des linéations matérialisaient les failles dont le rejet a été évalué sur le terrain. Le profil en long du fleuve Sanaga et ses affluents d'une part et la répartition de la pente longitudinale des cours d'eau d'autre part selon Dubreuil *et al* (1975), on a étudié la topographie des lits des cours d'eau (bathymétrie) à travers Google-Earth. Des travaux de Nangé (2007), on a procédé à l'inventaire des épisodes sismiques récents au sein et autour du bassin versant de la Sanaga. Cette démarche a permis d'analyser les endroits d'escarpements foyers de chutes et rapides, précurseurs potentiels de l'énergie hydroélectrique ; des zones de rétrécissement du lit où s'accélèrent les courants d'eau ; des zones d'élargissement du lit où la vitesse de l'eau baisse au profit des dépôts de la charge des eaux

Les débits journaliers dans une station hydrométrique donnée étaient obtenus par une lecture préalable des hauteurs d'eau (surface de l'eau par rapport à une cote de référence) à l'aide des échelles limnimétriques installées à cette station. Ces échelles limnimétriques étaient les échelles de jaugeage-étalonnage. Les débits mensuels, moyens mensuels, annuels

et moyens décennaux ont été calculés comme dans les cas des précipitations. De la série des données, on a déterminé le régime hydrologique des débits moyens mensuels à la confluence de Lom-Pangar et du fleuve Sanaga à Nachtigal, à Song-Loulou et à Édéa. Les corrélations de station à station ont été établies à partir des débits moyens mensuels de la période commune d'observation ordonnés autour d'une droite moyenne. Par la méthode de la variabilité pluviométrique, on a analysé la variabilité hydrométrique.

On a déterminé la pluie efficace (P_e) dans la mesure où l'écoulement de l'eau était conditionné par la quantité d'eau tombée et son rythme selon la relation de Deleau (2007) :

$$P_e = \frac{(P_b - I_a)^2}{(P_b - I_a) + S}; \quad (\text{Eq.20})$$

Où I_a désignait les pertes intervenant en début de l'évènement, P_b cumul de la pluie brute et S la capacité de rétention en eau du sol (infiltration cumulée), I_a et S étaient liés par la relation $I_a = 0,2 * S$, (Eq. 21)

Les paramètres atteignaient parfois des valeurs critiques minimales (étiages ou sécheresses) ou maximales (crues ou inondations), le débit de pointe ($Q_{max\ 0,5}$) a été déterminé suivant la relation de Olivry (1986) : $Q_{max\ 0,5} = 0,03 * S$; (Eq. 22)

Q en m^3/s et S en km^2 . Le temps de décharge (nombre de jours après le débit de pointe) a été évalué par l'expression de Gray et Wigham (1972) : $N = A^{0,2}$ (Eq. 23)

Où N =nombre de jours et A =superficie du bassin versant en kilomètres carré.

Par ailleurs, on a déterminé selon Perrin (2000) :

- Le BFI (Base Flow Index) ou indice d'écoulement de base défini comme le rapport entre le volume d'écoulement de base et le volume d'écoulement total ;

- Le NCRU ou nombre de pics de crues, situation à laquelle le débit excédait quatre fois le module des débits ($4\bar{Q}$ en m^3/s) ; (Eq.24)

- Le BETI ou nombre annuel de jours d'étiage, situation à laquelle le débit était inférieur au quart du module des débits ($\frac{\bar{Q}}{4}$ en m^3/s) ; (Eq. 25)

- Le coefficient d'écoulement K_e (ou rendement) du bassin versant par la relation : $K_e = \frac{H_e}{\bar{P}}$ (Eq. 26)

Où H_e est la lame d'eau écoulee en mm et \bar{P} la pluie moyenne en mm.

La crue absolue a été déterminée par la méthode d'Olivry (1986) dans la relation $Q \left(\frac{m^3}{s}\right) = 0,22S^{0,86}$. (Eq. 27)

Grâce au même auteur, on a déterminé l'étiage absolu médian par $Q = 4,45 \cdot 10^4 S^{1,14}$ (m^3/s) ; (Eq. 28)

La fréquence (F) d'apparition des épisodes selon Carrière et Botosaneanu (2014) a été déterminée suivant l'équation : $F = \frac{r-1/2}{N}$ (Eq. 29)

Où r désigne le rang de la valeur dont on détermine la fréquence et N la taille de l'échantillon. De cette fréquence, on a déterminé la récurrence éventuelle T (période de retour) des valeurs critiques par l'expression : $T = \frac{1}{1-F}$ (Eq. 30)

On a calculé l'énergie hydroélectrique potentielle qui est la puissance hydraulique d'une turbine (P_{hyd} en W) fournie par l'eau de chute qui l'alimente. Cette puissance est dite utile et exprimée par Shamin *et al*, (2011) comme $P = Q\rho gH$; (Eq. 31)

ρ : masse volumique de l'eau ($1000kg/m^3$) ; g : accélération de la pesanteur ($9,81 m/s^2$) ; H : hauteur de chute nette (m) ; Q : débit (m^3/s).

- La Puissance Maximale Brute (PMB) ou « puissance légale » correspond à l'énergie hydraulique maximale susceptible d'être fournie retenue par les services de l'État par Albagnac *et al*, (2014) : $PMB = 9,81 \times Q_{max} \times Hb$ (Eq. 32)

Où PMB est en kW, Q_{max} débit en m^3/s , Hb hauteur de chute brute en mètres.

II.2.3.2. Détermination de la production hydroélectrique réelle de la Centrale d'Édéa

II.2.3.2.1. Données de production de la Centrale d'Édéa

C'étaient des données secondaires de la production interannuelle de l'énergie à la Centrale hydroélectrique d'Édéa de 1974 à 1991 obtenues à AES-SONEL. Les relevés de production de l'énergie étaient des documents sur la production de la Centrale et la distribution entre les grands abonnés consignées sur des fiches annuellement ou par mois pour certaines années. Les relevés mensuels étaient des cumuls journaliers de production de la Centrale hydroélectrique d'Édéa. La production et la consommation annuelle étaient des cumuls mensuels.

II.2.3.2.2. Données des matières en suspension (MES)

Des résultats de prélèvements des eaux de certains travaux sur les fleuves du pays ont permis de déterminer le flux des matières en suspension (MES). Ces données sont de la Sanaga à Nachtigal (Dubreuil *et al*, 1975) ; de la Sanaga à Ebebda (Ndam Ngoupayou, 1997 ;

Kpoumié, 2007) ; du Lom à Bétaré-Oya (Sigha-Nkamdjou, 1998) ; de la Sanaga à Edéa (Bessoh, 2012). Les modes et périodes des prélèvements effectués dans le temps et dans l'espace sont consignés dans le Tableau XIV. Les résultats issus de ces travaux constituent des données de base pour des analyses spatiales du transport de matières dans les rivières et l'évaluation de la sédimentation.

Tableau XIV. Quelques caractéristiques des données antérieures sur le bassin versant de la Sanaga provenant des travaux de divers auteurs entre 1994 et 2012.

Bassin versant	Superficie (km ²)	Période de mesure de MES	Méthode de mesure	Mesure dans le temps	Auteurs
Lom (Bétaré-Oya)	11 100	1997, 1998	Jaugeages complets	Trois mesures en 2 Années	Sigha Nkamdjou et al. 1998
Sanaga (Ebebdà)	13 555	1994	Prélèvements de surface	Hebdomadaire , bimensuelle et mensuelle	Ndam Ngoupayou, 1997
Sanaga (Ebebdà)	129500	2010 à 2012	Prélèvement de surface	Mensuelle	Kpoumié, 2007
Sanaga (Édéa)	131 500	2009 à 2010	Prélèvement de surface	Mensuelle	Bessoh, 2012

MES : matières en suspension

II.2.3.2.3. Analyse de la production effective de l'énergie hydroélectrique

Avec les données secondaires obtenues à AES-SONEL, on a tracé la courbe et dégagé la tendance. Pour analyser l'évolution de la production, on a calculé les indices de production de 1974 à 1991 afin de mieux apprécier ses variations. On a rapproché les productions extrêmes à la capacité de production des machines installées. Pour cerner le facteur climat, on a procédé à la juxtaposition des données de certaines années afin de dégager l'effet de la saisonnalité.

II.2.3.2.4. Détermination des paramètres physico-chimiques de l'eau

Le flux des matières transportées a été calculé par les méthodes F4 et F5 selon Ndam Ngoupayou (1997).

- La méthode F4 consistait à calculer le flux en utilisant la concentration moyenne pondérée aux débits. $F4 = Q_{ma} \left(\frac{\sum(C_i Q_i)}{\sum Q_i} \right)$ (Eq. 33)

Avec C_i = concentration de l'échantillon ; Q_i = débit lors du prélèvement ; Q_{ma} = débit moyen annuel (m³/s).

- La méthode F5 permettait de calculer des flux instantanés et de les rapporter à l'échelle mensuelle. $F5 = \sum (C_{mm} \times Q_{mm})$, (Eq. 34)

C_{mm} = concentration moyenne mensuelle ; Q_{mm} = débit moyen mensuel (m³/s).

Des échantillons d'eau prélevée mensuellement, la concentration moyenne annuelle de MES a été déterminée. On a évalué le flux des débits solides au niveau des exutoires compte tenu de la relation entre les flux de matières en suspension et les débits selon Dubreuil *et al*, (1975), estimé l'évolution de la sédimentation par simulation du cumul de ces MES selon Tchindjang *et al*, (2012). On a mis en relation la sédimentation et la disponibilité en eau afin de relever le degré du comblement du barrage d'Édéa. Des flux de matières solides évalués au niveau des exutoires, on a déterminé la dégradation du bassin versant (lame de sol érodé).

II.1.4. Analyse de la dynamique des écosystèmes du bassin versant de la Sanaga

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la dynamique naturelle et anthropique des écosystèmes en vue de connaître non seulement comment le couvert végétal a évolué, mais aussi d'apprécier l'interaction entre les précipitations et ce couvert végétal. On s'est servi de quatre images satellites de 2000 à 2020. Les données de base sont les images SPOT, niveau 1, pour la zone d'étude, Image de télédétection « Spot 5m ».

II.2.4.1. Prétraitements

II.2.4.1.1. Segmentation

La segmentation facilite beaucoup l'interprétation thématique de l'image en se rapprochant du mode de fonctionnement de la vision humaine, qui ne perçoit pas une image en pixel mais en zones homogènes. C'est une Segmentation multi-échelle basée sur l'algorithme de Watershed. Le Paramètre d'échelle est une valeur qui permet d'influencer la résolution de l'image donc la taille et la forme de l'objet.

II.2.4.1.2. Identification des classes

On a réalisé une classification par identification des segments d'intérêt (Tableau XV)

Tableau XV. Caractéristiques des images SPOT utilisées.

Classes d'occupation du sol	Année 2000-2010	Année 2010-2015	Année 2015-2020	Année 2000-2020
Forêt dense	-6142	-2187	-2872	-11201
Forêt dégradée	-1937	-5041	-7001	-13979
Mosaïque de culture	2522	-1390	3334	4466
Savane	5557	8618	6539	20714
Classes d'occupation du sol	Année 2000-2010	Année 2010-2015	Année 2015-2020	Année 2000-2020
Forêt dense	-4,39	-1,56	-2,05	-8,00
Forêt dégradée	-1,38	-3,60	-5,00	-9,98
Mosaïque de culture	1,80	-0,99	2,38	3,19
Savane	3,97	6,15	4,67	14,79
Classes d'occupation du sol	Année 2000-2010	Année 2010-2015	Année 2015-2020	Année 2000-2020
Forêt	-5,77	-5,16	-7,05	-17,98
Mosaïque de culture	1,80	-0,99	2,38	3,19
Savane	3,97	6,15	4,67	14,79

II.2.4.2. Traitements

II.2.4.2.1. Caractérisation des objets

Le traitement d'images satellitaires est une étape qui permet de choisir les attributs qu'on veut intégrer dans notre classification. On a retenu les attributs :

- Spatiaux : surface, élongation, compacité...
- Spectraux : minimum et écart type sur les bandes.
- Texturaux : entropie, variance...
- Color space : intensité...
- Bande ratio : NDVI...

II.2.4.2.2. Classification

On a réalisé la classification d'objets selon le principe (Fig. 19) et des segments d'intérêts identifiés, on a pu classifier les bandes recueillies (Fig. 20).

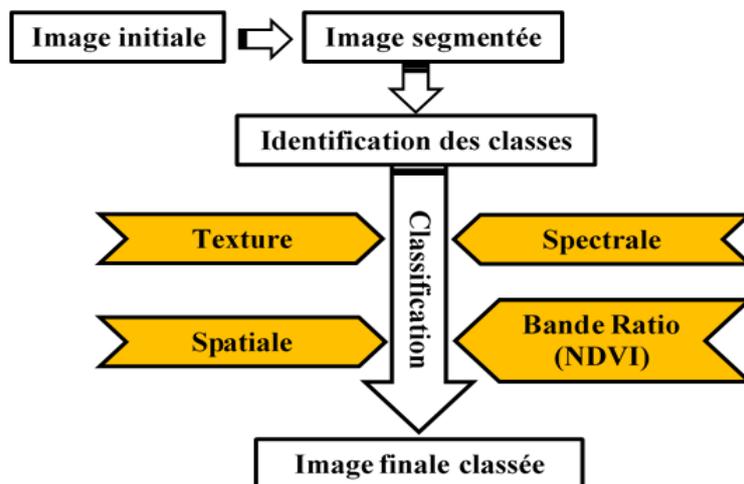


Fig. 19. Principe de classification (Layelman & Lacaze, 2008)

II.2.4.2.3. Validation

Les éléments suivants ont orienté sur la validation : les points d'apprentissage ; les points de validation sans confusion et les points de validation avec confusion. Ce qui a donné une Précision de la classification = 75.00% pour un Coefficient Kappa = 0.6255

Au moment de l'extraction du masque, l'image SPOT a subi un masque provenant de la classification d'objets qui matérialise les zones couvertes par les arbres, les cultures et les herbes. Les techniques de filtrage ont été procédées selon le schéma de la figure 20. L'arbre est représenté par 5 pixels ; par 9 pixels ; par un seul pixel.



Fig. 20. Techniques de filtrage d'images

La méthodologie de traitement d'images satellitaires peut être résumée par les étapes suivantes : une segmentation, un choix des attributs et une classification représentée par le schéma ci-après (Fig. 21).

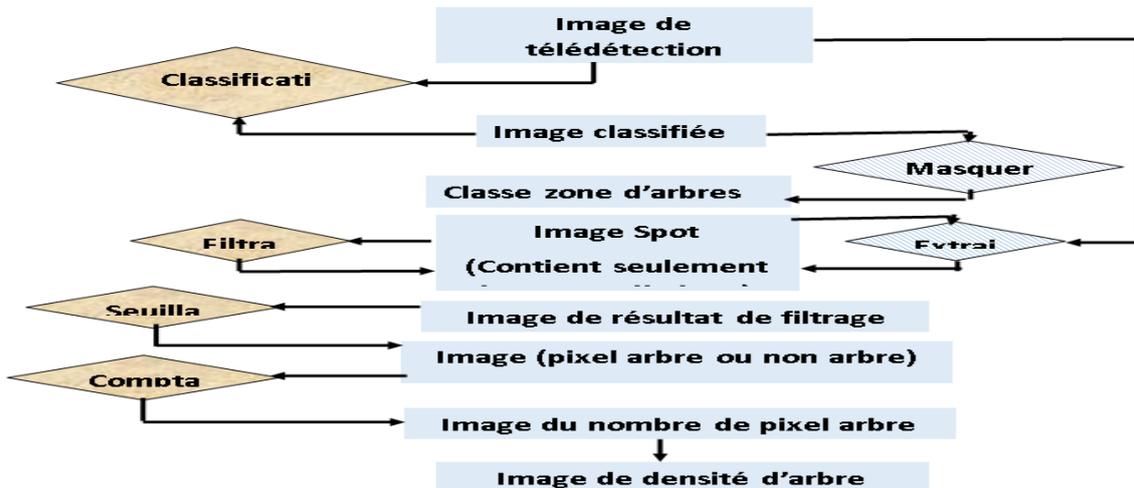


Fig.21. Schéma de segmentation, du choix des attributs et de classification d'images

Cette méthodologie a permis de cartographier l'occupation de l'espace en vue d'identifier la densité des arbres et les surfaces d'herbes en mettant en relief leur différence par rapport aux autres cultures. On a identifié l'occupation du sol sur les aspects végétation/paysage.

II.2.4.3. Analyse des interactions entre la dynamique des écosystèmes et celle des précipitations du sein du bassin

A partir des valeurs de précipitations et des températures moyennes calculées des stations regroupées par zone agroécologique et ramenées à l'année moyenne. Du bassin du fleuve Sanaga réparti en différentes zones agroécologiques couvertes, on a procédé à une analyse parallèle des paramètres climatiques non seulement dans le but de connaître comment ces paramètres se comportés, mais aussi de cibler le moment propice au développement du couvert végétal à partir des abaques. Une analyse du comportement

conjugué des précipitations et des températures dans les différentes zones agroécologiques que couvre le bassin a permis d'étudier l'origine naturelle de la dégradation du couvert végétal.

II.2.5. Détermination des corrélations entre les paramètres étudiés

Les données annuelles et/ou mensuelles ont contribué aux combinaisons pour l'établissement des corrélations, aux relations de causes à effets. On a ainsi déterminé le coefficient de corrélation par la formule de Lethielleux (2005) :

$$r = \frac{\sum(x_i y_i - n \bar{x} \bar{y})}{\sqrt{\sum x_i^2 - n \bar{x}^2} \cdot \sqrt{\sum y_i^2 - n \bar{y}^2}} \quad (\text{Eq. 35})$$

Où x_i = valeur des précipitations, des températures ou des débits d'une année particulière et \bar{x} la moyenne ; y_i = production de l'énergie hydroélectrique de la même année et \bar{y} sa moyenne.

La corrélation linéaire ne pouvant résulter que d'une simple coïncidence, il convient de déterminer le coefficient de détermination qui mesure la qualité de l'ajustement linéaire obtenu par la relation : $r^2 = \frac{\text{Variance des } x_i}{\text{Variance des } y_i}$. (Eq. 36)

Pour mesurer la dépendance statistique des variables deux à deux, on a déterminé le coefficient rho de Spearman selon Lethielleux (2005) par la relation : $R_S = \frac{\text{Cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y}$ (Eq. 37)

$$\text{Cov}(x,y) = \frac{1}{n} \sum n_{ij} (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y}) = \frac{1}{n} \sum n_{ij} x_i y_j - \bar{x} \bar{y} . \quad (\text{Eq. 38})$$

Au-delà du rythme annuel, on a également établi des corrélations entre les paramètres susmentionnés de manière mensuelle afin de dégager l'effet des régimes hydrologiques sur la production de l'énergie hydroélectrique. De la grille de tarification horosaisonnaire mise en vigueur en 2003 et révisée en 2012 par l'ARSEL, on a évalué les variations du coût du kWh de l'énergie selon les périodes de l'année d'une part, et les dépenses supplémentaires engendrées auprès des abonnés d'autre part. Pour montrer les effets réciproques entre la production hydroélectrique et l'environnement, on a identifié les impacts éventuels et on a procédé à une évaluation caractérielle au cas par cas suivant la matrice de Fecteau afin de déterminer leurs effets sur les composantes cibles. Il s'agissait d'analyser le degré de vulnérabilité de chaque impact.

La méthodologie utilisée cette étude basée sur la démarche hypothético-déductive, a permis d'obtenir des résultats présentés dans le chapitre III.

CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION

III.1. RESULTATS

III.1.1. Evolution des principaux facteurs climatiques

III.1.1.1. Variations des températures relevées au niveau de la surface de l'Océan Atlantique

Les températures prises à la surface de l'Atlantique de 1950 à 2014 d'une part dans les secteurs 5 à 30° latitude Nord et 30 à 60° longitude Ouest, puis d'autre part entre 0 à 30° latitude Sud et des longitudes 30° Ouest à 10° Est, ont donné des moyennes respectives de $26,95 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,34$ et $24,77 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,32$. Dans le premier secteur (hémisphère Nord), le minimum a été de $22,11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en 1992, le maximum de $27,68 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2010. Dans le deuxième secteur (hémisphère Sud), le minimum a été de $24,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en 1958 et le maximum de $25,33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en 2010. La rupture s'est établie en 1983 dans l'hémisphère Sud alors qu'elle survient dans l'hémisphère Nord un an plus tard (Fig. 22). Les équations de trend correspondantes ont été respectivement $y = 0,0071x + 26,513$ et $y' = 0,0106x' + 24,418$.

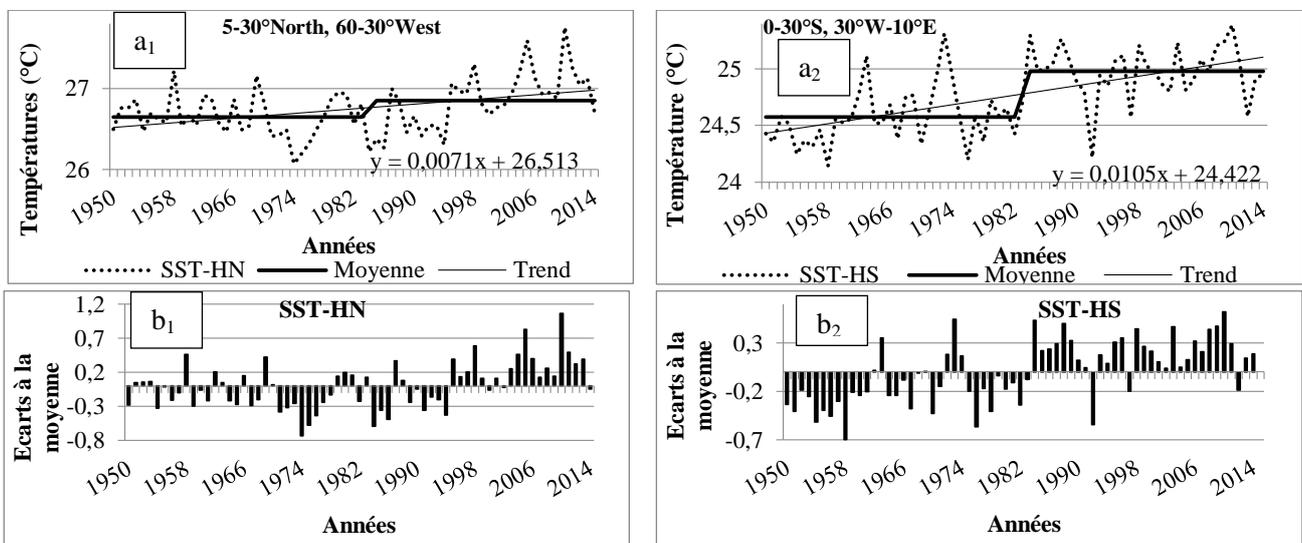


Fig. 22. Evolution (a) et écarts à la moyenne (b) des températures sur la surface de l'Océan Atlantique (5-30°North, 60-30°West ; 0-30°S, 30°W-10°E)

Il a été noté que l'amplitude dans l'hémisphère Nord était plus élevée ($5,57 \text{ }^{\circ}\text{C}$) que celle de l'hémisphère Sud ($1,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$). La température a fluctué donc plus en surface de l'Atlantique Nord et moins en surface de l'Atlantique Sud, quoique se trouvant de part et d'autre presque aux mêmes latitudes. Les tendances ont marqué une augmentation des températures en surface de l'océan dans le temps et dans l'espace. Celles de l'hémisphère Sud croissaient plus vite où on a noté une augmentation de $16,25 \%$ à partir de 1983 avec une pente de la tendance plus importante. Par contre, les températures de l'Atlantique Nord ont faiblement augmenté au cours de la période ($0,76 \%$ à partir de 1984). Dans cette partie,

les températures ont évolué plus en deçà de la moyenne jusqu'en 1994. Cette situation était similaire dans l'autre hémisphère depuis 1982. La rupture s'est établie avec des différences respectives de 0,4 °C (Atlantique Sud) et 0,2 °C (Atlantique Nord) d'où une augmentation plus rapide des températures dans l'hémisphère Sud. Ceci est confirmé par des coefficients de variation légèrement plus grands dans le même ordre (Tableau XVI).

Tableau XVI. Variation des températures de surface de l'Atlantique

Paramètres	Moy	Ec. T	Er. Ev.	Max	Méd	Min	Cv	Max/Min
Hémisphère Nord	26,75	0,326	±0,028	27,68	26,81	22,11	0,0122	1,252
Hémisphère Sud	24,77	0,317	±0,026	25,33	24,42	24,16	0,0128	1,048

Moy=moyenne ; Ec.T=écart type ; Er.EV=erreur éventuelle ; Max=maximum ; Min=minimum ; Méd= médiane ; Cv=coefficient de variation.

III.1.1.2. Les anticyclones de l'océan Atlantique

Les pressions relevées de 1950 à 2014 d'une part au niveau de l'anticyclone Noed (Açores) et d'autre part au niveau de l'anticyclone Sud (Sainte-Hélène) ont donné des moyennes respectives de 1024,68 hPa \pm 0,736 et 1020,48 hPa \pm 0,633. Dans le premier, le minimum a été de 1023,17 hPa en 1974, le maximum de 1027,02 en 2010. Dans le deuxième, le minimum a été de 1019,12 hPa en 1958 et le maximum de 1021,72 hPa en 2010. Les équations de trend correspondantes ont été respectivement $y = 0,016x + 1024,0$ et $y' = 0,020x' + 1019,0$ (Fig. 23).

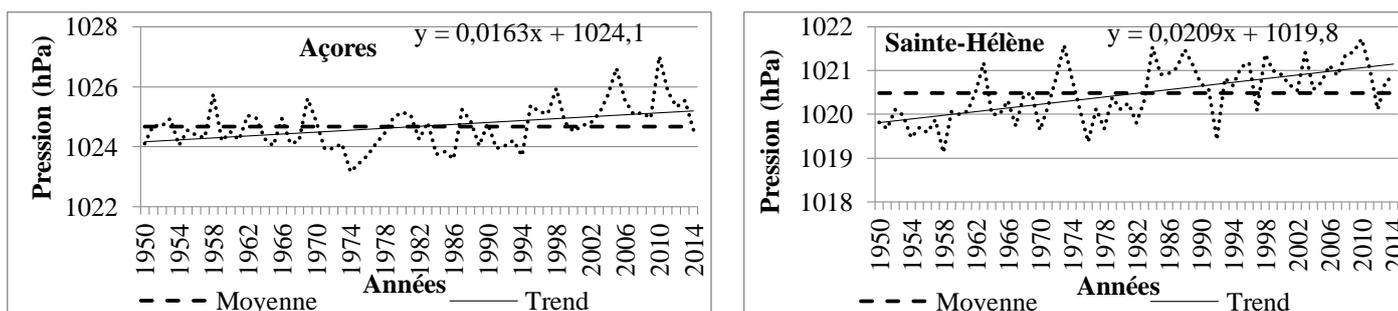


Fig 23. Evolution de la pression aux niveaux des anticyclones de l'Atlantique

Il s'établit régulièrement une différence de champ de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande dont la variation détermine le jeu des masses d'air et le déclenchement des précipitations. On a remarqué que l'indice de la NAO était compris entre -2,4 et +2,5. De 1950 à 2013 soit 64 ans, il a varié de -2,4 en 1970 à 2,5 en 1989. La moyenne était de -0,077 pour un écart-type de 1,07. Le coefficient de variation était donc de -13,8. L'équation du trend était $y = 0,017x - 0,621$ (Fig. 24) avec une légère hausse. De 1950 à 1973, les indices évoluent plus en dessous de la moyenne. A partir de 1974, l'indice NAO tend à augmenter davantage. Les écarts à la moyenne négatifs de la NAO sont dominants et plus intenses entre 1950 et 1970 pour une situation presque inverse à partir de

1988. Par ailleurs, il advient que les événements exceptionnels (épisodes El-Niño/La Niña et Oscillation Australe/ENSO) se mettent en place simultanément. La fréquence de ces événements n'a pas de périodicité régulière.

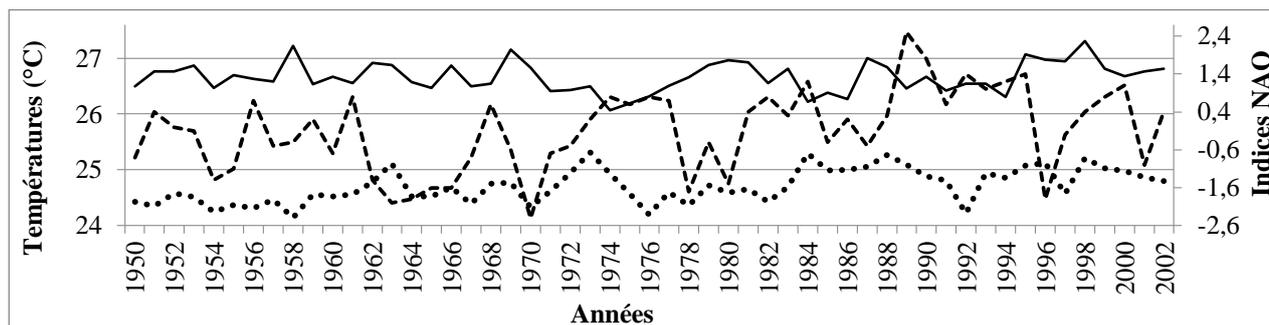


Fig. 24. Combinaison des pressions des anticyclones atlantiques et la NAO

— TSO-AN TSO-AS - - - - NAO

Pour le phénomène El-Niño, les données ci-dessous ont montré qu'à défaut que La-Niña le substitue, il se répète l'année suivante ou après un nombre d'années quelconque (1 à 6). Il peut remplacer La-Niña ou revient 3 ans plus tard (Tableau XVII).

Tableau XVII. Les cycles d'apparition des événements El-Niño et La Niña

Evènements	Années
La-Niña	1950, 1955, 1956, 1964, 1970, 1971, 1973, 1975, 1988, 1996, 2000, 2008, 2011
El-Niño	1951, 1953, 1957, 1958, 1965, 1969, 1972, 1976, 1982, 1986, 1991, 1997, 1998, 1999, 2002, 2004, 2009, 2014, 2016

La-Niña substitue El-Niño ou revient plus tard après un nombre impair (3, 5, 7) d'années, tantôt après un nombre pair (2, 6). Elle peut se répéter. De 1950 à 2016, on note plus de phénomènes El-Niño (19 fois) que La-Niña (13 fois). L'écart moyen de ces événements est respectivement de 3,52 ans et 5,15 ans. Les éléments sus-évoqués constituent des facteurs indirects mais déterminants à la production de l'énergie hydroélectrique potentielle tandis que ceux développés par la suite, constituent des facteurs directs.

III.1.1.3. Variations des températures de l'air dans le bassin du fleuve Sanaga

Les températures sont relativement basses avant l'année 1993 dans l'ensemble du bassin. Elles ont augmenté à partir de l'année 1998 (Fig. 25). La moyenne est de $23,7 \pm 0,27$ °C La tendance montre une augmentation progressive des températures depuis 1979. Les températures sont assez fluctuantes sur l'étendue du bassin. L'amplitude thermique varie de 1,5 °C à Dschang à 9,7 °C à Edéa au cours de la période d'étude (1950 à 2018). On remarque que depuis 1979, les températures ont commencé à augmenter.

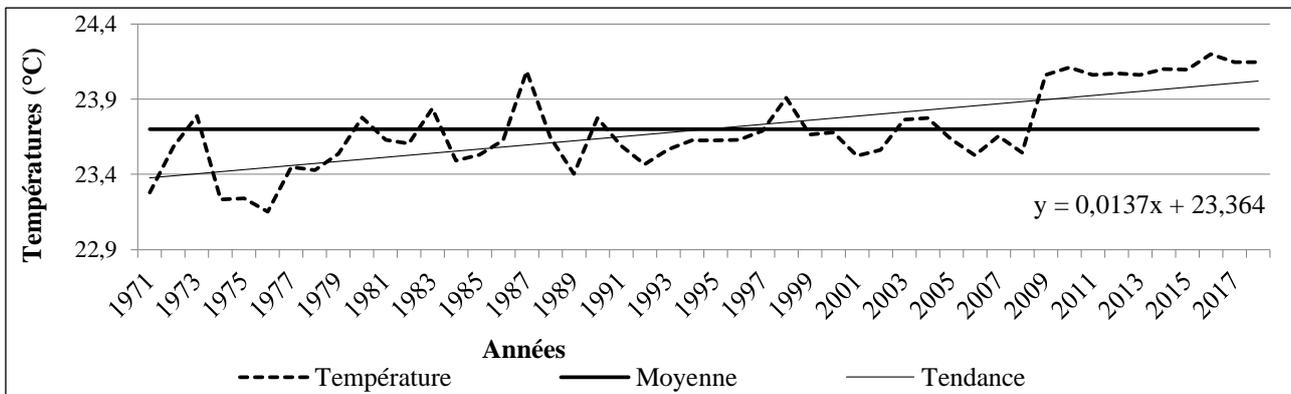


Fig. 25. Températures moyennes annuelles au-dessus du bassin de la Sanaga

Les températures moyennes interannuelles se sont comportées indifféremment dans les différentes zones agroécologiques que traverse le bassin du fleuve Sanaga (Fig. 26). Dans la partie supérieure (Adamaoua) du bassin, elle est de $23,33 \pm 0,38$ °C ; le minimum est de 22,54 °C en 1984 et le maximum de 24,13 °C en 2017. L'écart absolu entre la température la plus haute et la plus basse est de 1,59 °C pour un coefficient de variation de 0,01. Dans la partie occidentale (Hauts Plateaux de l'Ouest), la température moyenne est de $20,79 \pm 0,45$ °C ; le minimum est de 21,7 °C en 2020 et le maximum de 20,3 °C en 2000. L'écart absolu est de 1,4 °C pour un coefficient de variation de 0,01. Sur le plateau sud camerounais (parties centrale et méridionale), la température moyenne est de $24,33 \pm 0,43$ °C ; le minimum est de 23,6 °C en 1985 et le maximum de 25,1 °C en 2020. L'écart absolu est de 1,5 pour un coefficient de variation de 0,01. Dans la partie inférieure (zone côtière) du bassin, la température moyenne annuelle est de $26,79 \pm 0,63$ °C ; le minimum est de 25,93 °C en 1996 et le maximum de 28,2 °C en 2021 pour un écart absolu de 2,25 °C.

Les températures ont augmenté de manière exponentielle sur tous les compartiments du bassin du fleuve Sanaga (Fig. 26). Sur l'Adamaoua, on note une évolution à deux temps à savoir de 1979-1997 avec une moyenne 23,064 °C et 1998-2021 avec une moyenne de 23,559 °C soit une augmentation de 0,495 pour une moyenne de la période de 23,33 °C et une tendance $y = 0,0245x + 22,79$. Sur les hauts plateaux de l'Ouest, le premier temps va de 1979 à 2002 dont la moyenne est 20,48 °C, puis 2003-2021 pour 21,173 °C. Ce qui correspond à une hausse de 0,693. La moyenne est de 20,79 °C et la tendance est $y = 0,0305x + 20,116$. Les températures augmentent graduellement sur le plateau Sud camerounais de 1979 à 2007 malgré un sursaut de 1995 à 2000 pour une moyenne de 24,055 °C et 24,778 °C de 2008 à 2021. Cette augmentation est de 0,723. La moyenne de la série est de 24,3°C et la tendance est $y = 0,0276x + 23,679$.

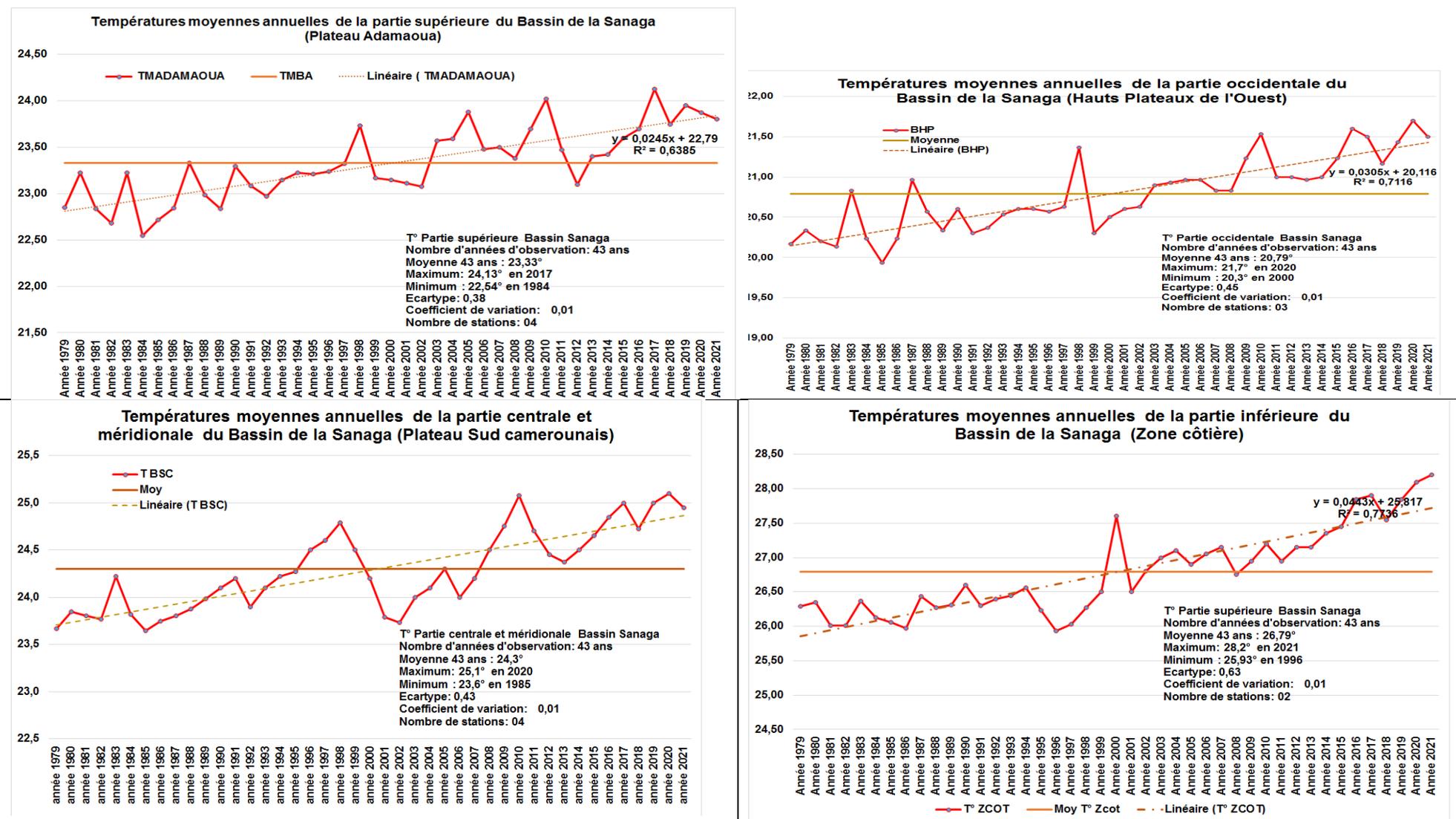


Fig. 26. Températures moyennes interannuelles dans les différentes zones agroécologiques du bassin du fleuve Sanaga

La moyenne de la série est de 24,3°C et la tendance est $y = 0,0276x + 23,679$. Bien que la hausse de températures soit plus importante dans la zone côtière (1,04°C), leur évolution est similaire à celle de l'Adamaoua. La moyenne de 1979-1999 est de 26,26 °C tandis que celle de 2000-2021 est de 27,30 °C. La moyenne de la période d'étude est de 26,79°C et la tendance est $y = 0,0443x + 25,817$. Les températures moyennes annuelles varient de 20,8 °C à Dschang, à 28,9 °C à Edéa. Les températures moyennes annuelles les plus élevées ont été enregistrées à Edéa (33,7 °C, localité à basses altitudes affectées par la proximité de la mer. La température la plus basse a été observée à Dschang (19,4 °C), localités à hautes altitudes (Tableau XVIII). A l'échelle globale du bassin du fleuve Sanaga, les températures moyennes annuelles évoluent de 23,1 °C en 1976 à 24,2 °C en 2016. La température moyenne annuelle dans la partie tropicale humide du bassin est de 23,23±0,46 °C ; la température minimale est de 22,4 °C (1976), la température maximale est de 24,08 °C (2017).

Tableau XVIII. Variation des températures annuelles (en °C) dans certaines stations du bassin de la Sanaga de 1970 à 2018

Station	Tmoy	Tmax	Tmin	ET	Tmax-Tmin	Cv
N'Gaoundéré	22,0	24,2	20,6	1,3	3,6	0,059
Banyo	23,3	25,6	22,1	1,14	4,5	0,049
Meiganga	23,0	25,4	22,0	1,28	3,4	0,056
Tibati	24,0	26,2	22,9	1,32	3,3	0,055
Yoko	22,8	25,3	21,1	1,5	4,2	0,066
Dschang	20,8	22,1	19,4	1,06	2,7	0,051
Bafoussam	20,9	23,1	20,2	0,87	2,9	0,042
Nkongssamba	22,9	24,1	21,6	0,86	2,5	0,037
Bertoua	24,4	26,0	23,4	0,89	2,6	0,036
Nanga-Eboko	24,4	25,7	23,6	0,74	2,1	0,030
Abong-Mbang	23,9	25,1	23,1	0,85	2,0	0,035
Akonolinga	24,5	25,8	23,4	0,89	2,4	0,036
Bafia	25,4	27,0	24,3	1,13	2,7	0,044
Yaoundé	24,2	25,7	23,1	0,94	2,6	0,039
Ngambè	24,1	26,0	22,1	1,26	3,9	0,052
Édéa	26,9	28,2	24,9	1,12	3,3	0,042

Tmoy=température moyenne ; Tmax= température maximale ; Tmin= température minimale ; ET=écart type ; Cv=coefficient de variation

Au sein d'une même station, les variations annuelles semblent assez importantes, marquant ainsi des discontinuités (Tableau XIX). Ce tableau laisse entrevoir que le bassin subit l'influence des microclimats malgré la diversité climatique quelquefois complexe. Cependant, les changements ont été relevés à Dschang, Édéa, Nanga Eboko, N'Gaoundéré, bien que le changement au niveau d'Édéa soit noté à l'intervalle de confiance le plus étendu.

Tableau XIX. Discontinuités des températures dans certaines stations du bassin de la Sanaga

Intervalle confiance Stations	Test de Pettitt					Segmentation de Hubert				Test N
	99 %	95 %	90 %	Probabilités dépassement valeur critique du test	Année de rupture	Début	Fin	Température moyenne	Ecart -type	
N°Gaoundéré	Rupture	Rupture	Rupture	2,6 E-04	1989	1970 1990	1989 2008	21,82 22,42	0,412 0,263	Non vérifié
Dschang	Rupture	Rupture	Rupture	2,00 E-02	1988	1971 2008	1988 1989	20,7 21,0	0,26 0,37	Non vérifié
Nanga-Eboko	Rupture	Rupture	Rupture	2,97 E-03	1975	1970 1976	1975 2008	24,75 23,16	0,388 0,87	Vérifié
Édéa	Pas de rupture	Pas de rupture	Rupture	3,64 E-02	1999	1970 2000	1999 2004	26,86 27,2	0,183 0,187	Vérifié
	Rupture	Rupture	Rupture		2004	2005 2008	2004 2008	26,27 0,222		

Test N : test de normalité

Les données révèlent que sur le plateau de l'Adamaoua, la valeur moyenne mensuelle des maxima (Fig. 27) est de 25,66 °C, celle des minima de 18,4 °C. Les températures très fluctuantes, ne sont pas très éloignées car les courbes se côtoient. Ces températures ne reflètent pas quatre mois de sécheresse au moins par an dans cette région du fait de la fraîcheur de l'altitude. En zone centrale et méridionale, les températures moyennes mensuelles sont presque superposables sur celles de l'Adamaoua, mais elles sont élevées. Dans cette partie comprenant le plateau sud camerounais, les relevés révèlent que la valeur moyenne des maxima est de 28,3°C et celle des minima est de 20,1 °C (Fig. 27). La petite saison sèche est marquée en juillet-août par la moyenne. Sur les Hauts Plateaux de l'Ouest, les températures enregistrées révèlent que la valeur moyenne des maxima est de 22,06 °C ; celle des minima est de 20,09 °C. En zone côtière, la valeur moyenne des maxima est de 27,5 °C ; celle des minima est de 26,17 °C. On peut relever de ce qui précède la chaleur couvre tout le bassin de février à mai même si ce temps se raccourcit d'un mois vers la plaine côtière.

L'analyse des moyennes de températures décennales (Annexe 10) ressort que celles-ci ont augmenté progressivement dans la partie tropicale humide. Elles ont accru graduellement dans la zone équatoriale de type guinéen de la décennie 1970-1980 jusqu'à la décennie 1990-2000 pour chuter légèrement la décennie suivante. Dans la zone équatoriale de type camerounien, les températures ont augmenté au cours des décennies 1980-1990 puis ont fléchi cours de la décennie 1990-2000 après laquelle elles ont repris une hausse.

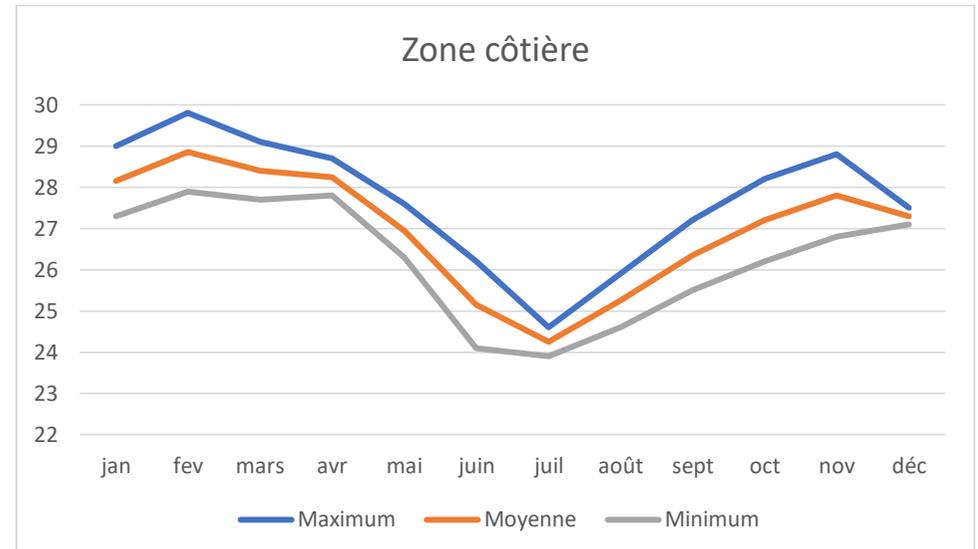
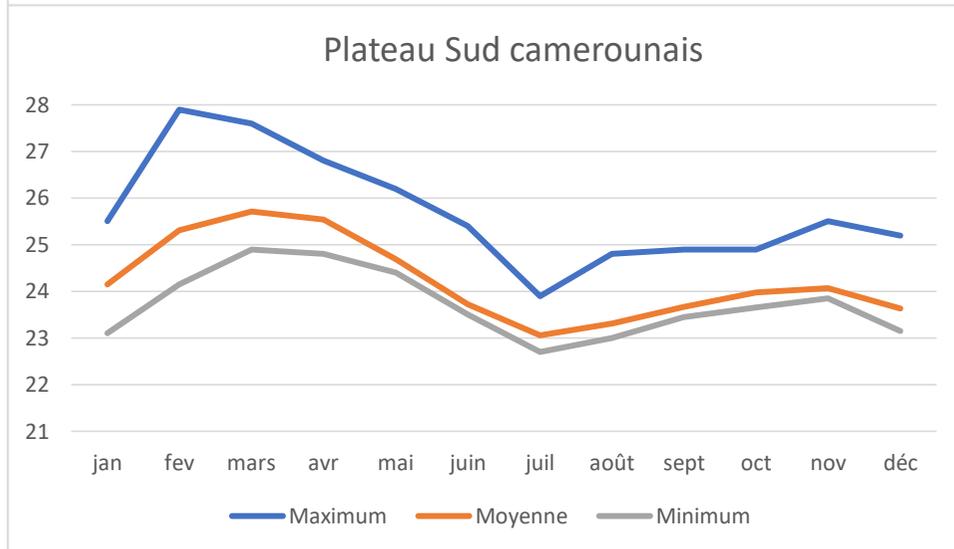
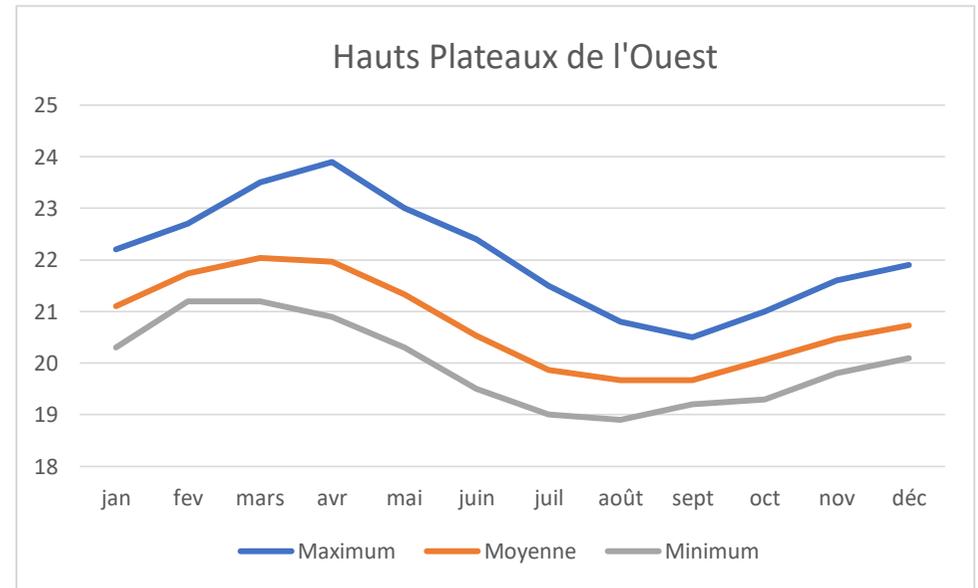
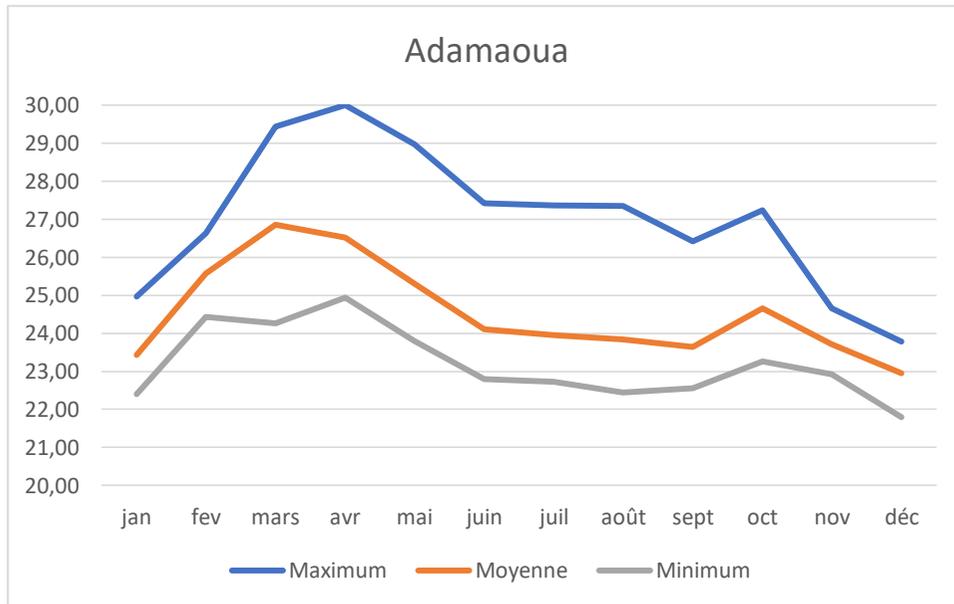


Fig. 27. Températures mensuelles dans les différentes zones agroécologiques couvertes par le bassin du fleuve Sanaga

III.1.1.4. Variations des précipitations moyennes annuelles dans certaines stations du bassin

La pluviométrie moyenne dans la partie supérieure du bassin est de $1489,5 \pm 157,86$ mm. On a remarqué dans le cours supérieur du bassin de la Sanaga, partie tropicale humide que la majorité des valeurs pluviométriques de 1950 à 1982 étaient supérieures à 1500 mm. De 1982 à 2018, on a noté l'inverse. La moyenne évolue en deux périodes (1571,6 mm de 1950 à 1982 et 1450,7 mm de 1983 à 2018 soit 7,69 % en valeur relative). Le maximum est de 1862,9 mm atteint en 1956 et le minimum est 1151,1 mm observé en 1984. Ce qui correspond à une amplitude de 1036,7 et un rapport K3 de 1,9. L'équation de tendance $y = -2,447x + 1617$ traduit une régression dans le temps (Fig. 28). La situation observée dans la zone équatoriale de type guinéen est similaire à celle relevée sur la partie tropicale humide (soudanienne).

Cependant, les scénarii sont plus marquants car, les quantités de pluies sont plus faibles. La moyenne observée est de 1494,4 mm avec un écart type de 234,9. Le minimum de 900,5 mm a été enregistré en 1986. Le maximum est de 1970,9 enregistré en 1955. Ce qui correspond à une amplitude de 736,6 et à un rapport K3 de 1,59. La tendance marque une régression ($y = -0,941x + 1523$). Les précipitations moyennes annuelles dans la partie équatoriale de type camerounien ont diminué aussi dans l'ensemble. Cette diminution est marquée par l'équation de tendance $y = -3,122x + 2672$. La moyenne est de 2518,8 mm avec un écart type de 443,2. Le maximum est de 4813,5 mm enregistré en 1978, le minimum est de 2769,4 mm en 1991 (Fig. 28). Ce qui correspond à une amplitude de 2044,1 mm pour un rapport K3 de 1,74. Il a été constaté que de 1950 à 1982, la majorité de valeurs est comprise entre 2281,7 et 3386,4 mm. Les valeurs de 2001 à 2018 ont biaisé le résultat à cause du non enregistrement total de l'année 2002 et l'enregistrement partiel de l'année 2003 pour certaines stations où les données ont été complétées par le procédé d'homogénéisation. On note un écart de 2351,6 mm entre les valeurs extrêmes.

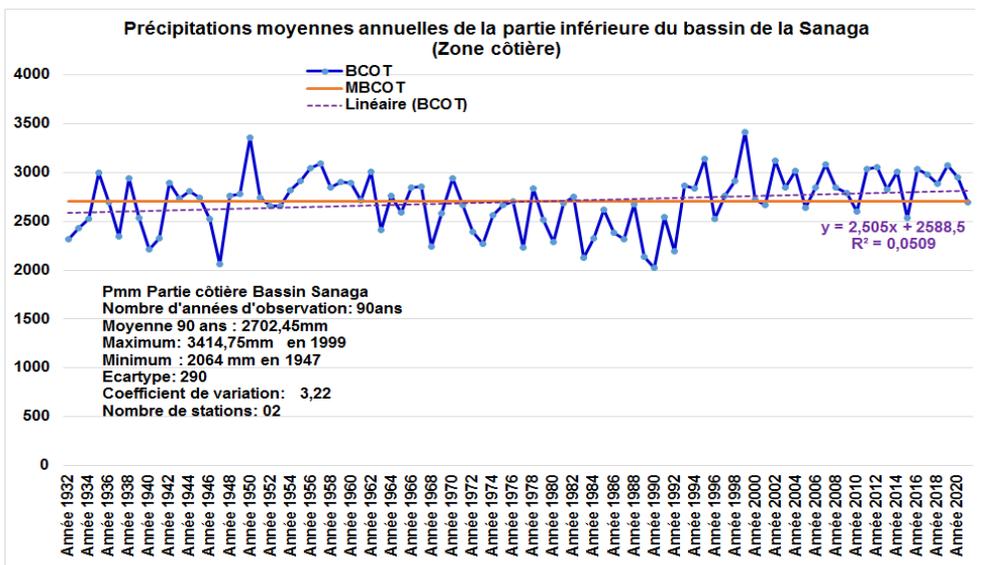
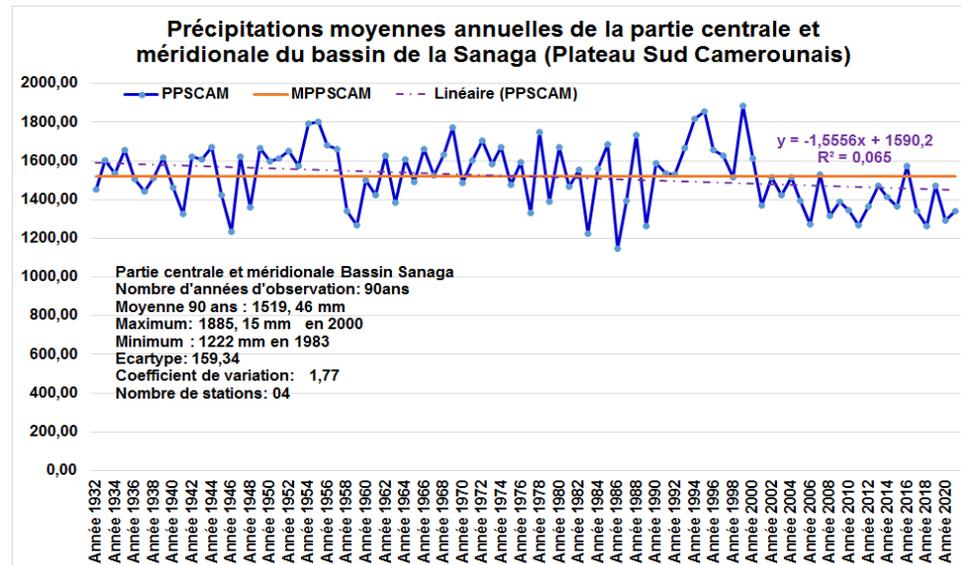
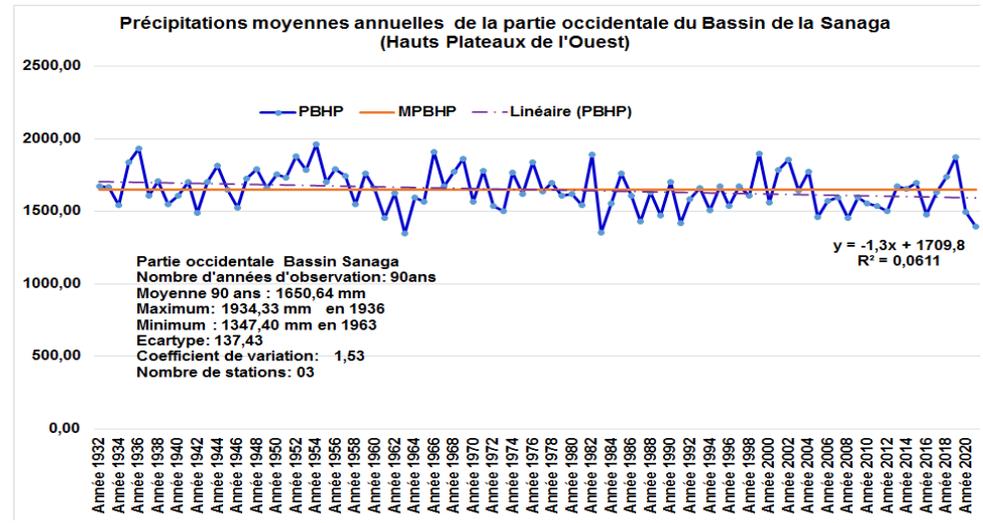
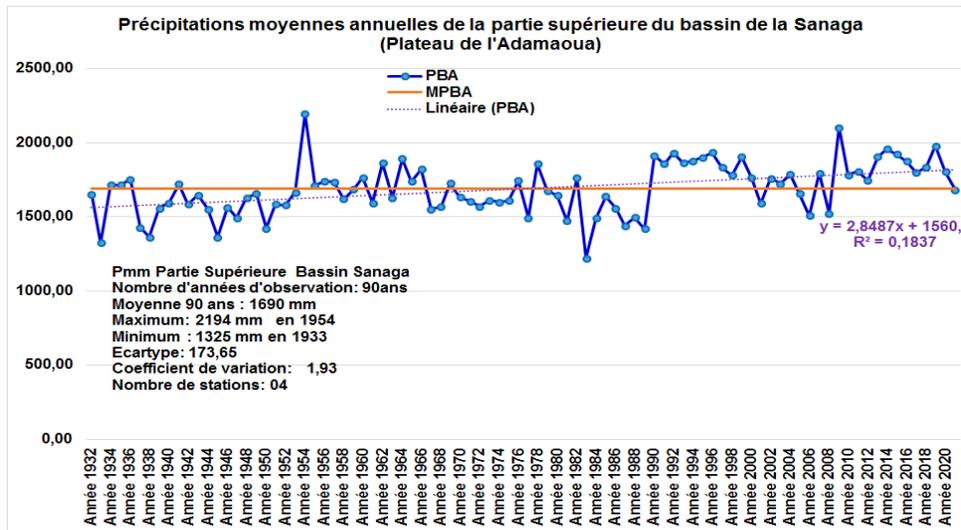


Fig. 28. Evolution des précipitations moyennes annuelles dans les zones agroécologiques du bassin de la Sanaga

Quelques phases peuvent néanmoins être distinguées : une hausse de 1950 à 1977 et de 1991 à 2000, puis une chute de 1978 à 1990 et de 2001 à 2021. Sur la plaine côtière, les précipitations se comportent indifféremment jusqu'en 1970 bien qu'une chute soit observée de 1971 à 1993 et une hausse de 1994 à 2021. Les précipitations présentent deux types de comportements : une tendance à la hausse sur le plateau de l'Adamaoua et sur la plaine côtière avec des coefficients directeurs positifs, et une tendance à la baisse sur les hauts plateaux de l'Ouest et sur le plateau Sud camerounais avec des coefficients directeurs négatifs. Ce qui montre deux allures antagonistes des précipitations en amont, au nord et à l'ouest du bassin.

Le constat est similaire vers l'aval c'est-à-dire entre le plateau Sud camerounais et la plaine côtière. Les précipitations semblent plus stables sur les hauts plateaux de l'Ouest malgré une faible régression, et plus fluctuantes sur la plaine côtière. Le rapport K3 de 1,65 est identique entre le plateau de l'Adamaoua et la plaine côtière, malgré des quantités très différentes. Les moyennes décennales dans les ZAE présentent des tendances similaires de l'évolution mensuelle à savoir : la chute des précipitations sur les hauts plateaux de l'Ouest et le plateau sud camerounais d'une part et d'autre part, une augmentation sur le plateau de l'Adamaoua et sur la plaine côtière.

III.1.1.5. Ecarts à la moyenne des précipitations

Les écarts à la moyenne des précipitations dans la partie tropicale humide du bassin sont peu marquants. De 1950 à 1982, on a compté sept années déficitaires contre vingt-six années excédentaires et trente années déficitaires contre six années excédentaires de 1983 à 2018. Dans le milieu équatorial de type guinéen, les écarts à la moyenne des précipitations ont diminué davantage en intensité. On a constaté que de 1950 à 1982, les valeurs négatives sont moins fréquentes sur le graphique alors qu'elles reviennent fréquemment de 1983 à 2018. Ces écarts qui varient entre 1384,5 mm et 560,5 mm, sont très grands. De 1950 à 1982, on compte cinq années déficitaires contre vingt-huit années excédentaires et de 1983 à 2018, on compte vingt-trois années déficitaires contre treize années excédentaires. En milieu équatorial de type camerounien en 1950 à 1982, il y a eu douze années déficitaires contre vingt et une années excédentaires et de 1983 à 2018, on a eu vingt-quatre années déficitaires contre douze années excédentaires (Fig, 29).

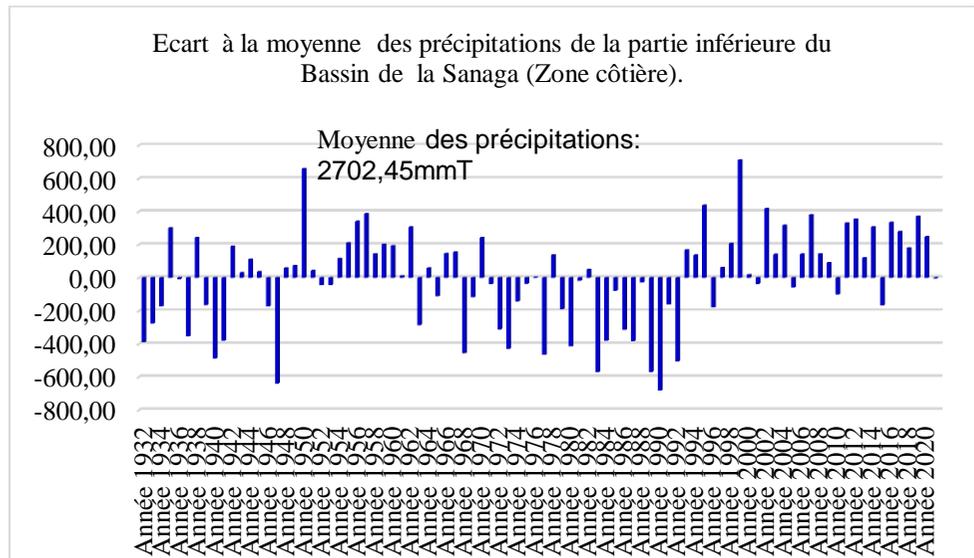
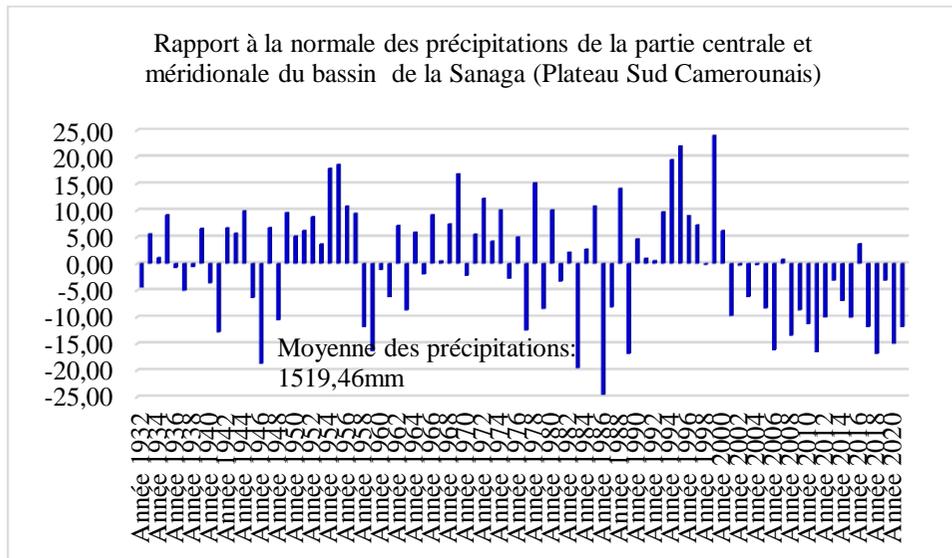
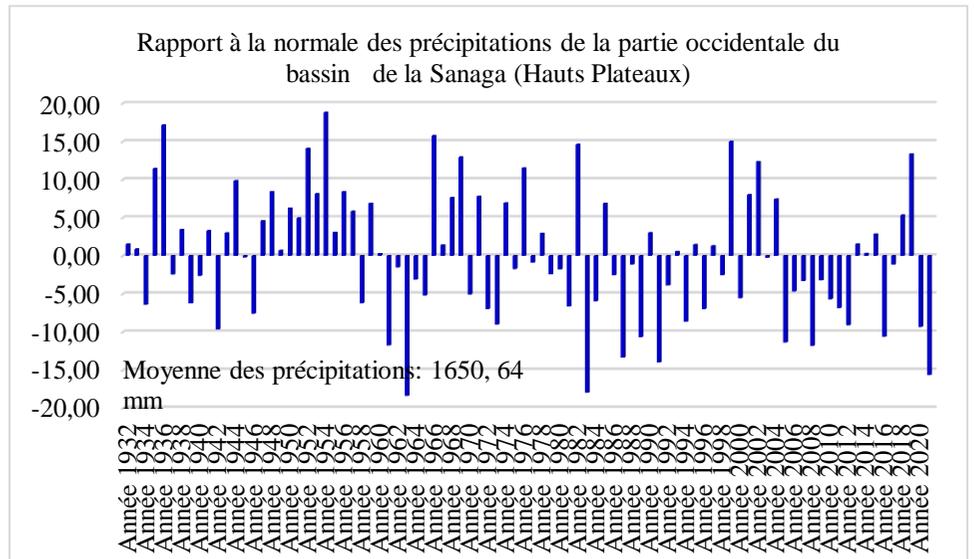
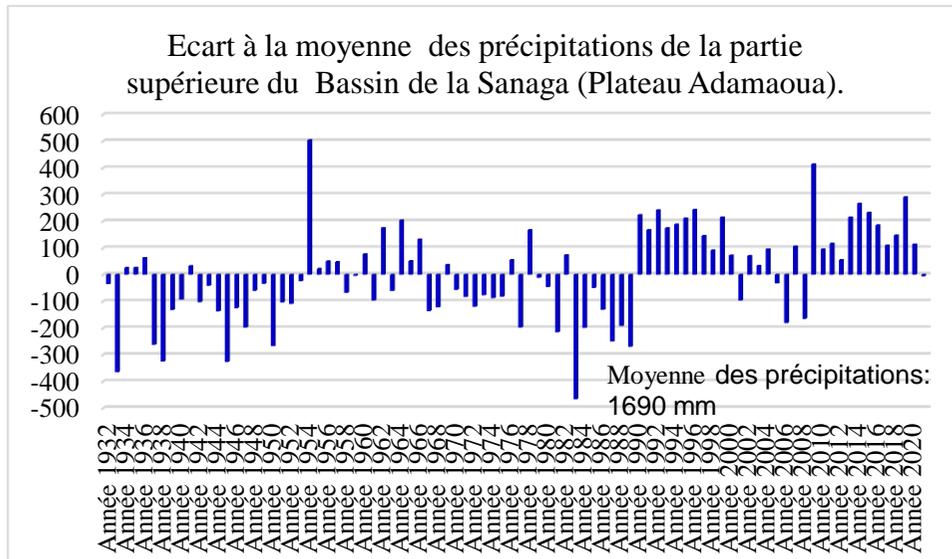


Fig. 29. Ecart à la moyenne des précipitations dans les différentes zones agroécologiques du bassin de la Sanaga

III.1.1.5. Comportement des précipitations moyennes mensuelles

III.1.1.5.1. Typologie pluviométrique dans les stations observées

Des pluviogrammes à un pic aux pluviogrammes à cinq pics sont observés. Le faible pourcentage revient aux pluviogrammes à cinq pics, puis à un pic (Tableau XX). Le type bimodal est secondé par le type trimodal.

Tableau XX. Typologie et régime pluviométrique au cours mois de la période d'observation

Station	% 1 pic	% 2 pics	% 3 pics	% 4 pics	% 5 pics	Régime pluviométrique
N'Gaoundéré	15,2	60,7	22,8	1,3	0	Monomodal : Août
Banyo	14,1	42,2	40,8	7,0	0	Bimodal : Juillet, Septembre
Meiganga	14,5	38,1	32,9	13,1	0	Monomodal : Septembre
Tibati	13,1	42,1	34,2	9,2	1,3	Bimodal : Juillet, Septembre
Yoko	0	34,1	34,1	31,7	0	Bimodal : Mai, Septembre
Koundja	8,9	44,6	41,1	5,3	0	Monomodal : Août
Foumbot	2,4	38,1	38,1	21,4	0	Monomodal : Septembre
Dschang	5,1	26,6	50,6	15,2	0	Bimodal : Juin, Septembre
Bafoussam	8,0	32,0	52,0	6,7	1,3	Monomodal : Septembre
Bertoua	0	30,4	44,3	17,7	7,6	Bimodal : Juillet, Octobre
Nanga Eboko	0	31,2	54,5	11,7	2,6	Bimodal : Mai, Octobre
Nkongsamba	11,4	43,0	36,7	7,6	1,3	Monomodal : Août
Abong-Mbang	0	36,7	35,4	20,2	0	Bimodal : Mai, Octobre
Akonolinga	0	43,6	50,0	6,4	0	Bimodal : Mai, Octobre
Bafia	1,3	31,1	51,3	16,2	0	Bimodal : Mai, Octobre
Yaoundé	0	38	54,4	7,6	0	Bimodal : Mai, Octobre
Ngambè	2,6	33,3	53,8	10,2	0	Monomodal : Septembre
Édéa	0	34,2	44,3	15,2	5,1	Bimodal : Mai, Septembre

D'après la typologie, les mois les plus pluvieux au cours des années de la période d'étude sont septembre (50 %) et mai (38,88 %). Le régime monomodal survient en août ou en septembre. Le régime bimodal survient majoritairement en mai et octobre, parfois en juillet et septembre ou une autre situation différente. Néanmoins, le développement d'un pluviogramme bimodal (58,82 %) de l'année moyenne domine l'ensemble des stations observées. De l'analyse typologique de la pluviométrie au niveau des stations sus citées, les classes de Nicholson permettent d'apprécier son état actuel. Le comportement de la pluviométrie est dominé par une attitude modérément humide à tendance modérément sèche (43,59 %) secondé par une attitude modérément aride à tendance modérément humide (25,64 %) considérant les pourcentages moyens de chaque classe. La divergence entre la typologie des précipitations et leurs phases a suscité un autre raisonnement, celui de l'attitude des précipitations selon un classement plus distinctif d'après les indices de Nicholson (tableau XXI).

Tableau XXI. Attitude de la pluviométrie des stations du bassin de la Sanaga et environs

Station	Classes de Nicholson en %						Qualification
	1	2	3	4	5	6	
N'Gaoundéré	2,53	10,12	40,50	31,64	15,19	0,00	MA avec tendance à MH
Banyo	1,30	10,39	35,06	38,96	13,00	1,3	MH avec tendance à MS
Meiganga	5,26	10,52	34,21	30,26	14,47	5,26	MA avec tendance à MH
Tibati	2,56	10,25	38,46	34,61	11,54	2,56	MA avec tendance à MH
Yoko	19,48	15,58	11,68	18,18	18,18	16,88	Quelconque (très fluctuante)
Koundja	0,00	0,00	42,86	57,14	0,00	0,00	MH
Foumbot	2,77	11,11	27,77	38,88	19,44	0,00	MH avec tendance à MS
Dschang	1,26	15,19	32,91	35,44	11,39	3,79	MH avec tendance à MS
Bafoussam	4,00	10,66	36,00	29,33	18,66	1,33	MA avec tendance à MH
Bertoua	1,30	19,48	27,27	37,66	11,61	2,59	MH avec tendance à MS
Nkongsamba	3,84	10,25	33,33	34,61	15,38	2,56	MH avec tendance à MS
Nanga Eboko	1,30	11,70	40,25	29,87	15,68	1,30	MA
Abong-Mbang	2,53	12,66	36,71	32,91	12,66	2,53	MA avec tendance à MH
Akonolinga	2,56	11,54	41,02	35,64	16,66	2,56	MA avec tendance à MH humide
Bafia	1,26	17,72	24,05	45,57	10,12	1,12	MH
Yaoundé	4,00	16,00	30,64	36,00	16,00	0,00	MH avec tendance à MS
Ngambè	0,00	15,25	33,90	35,59	11,86	3,40	MH avec tendance à MS
Édéa	1,26	10,12	36,71	40,50	10,12	1,26	MH avec tendance à MS

Attitude dominante en italique ; MA : Modérément aride ; MH : Modérément humide ; MS : Modérément sec

En plus de la typologie et de l'attitude de la pluviométrie dans certaines stations du bassin, les phases des précipitations et leurs hauteurs dans les intervalles de confiance sont présentées dans le Tableau XXII où il est noté qu'au niveau des stations situées à l'intérieur du bassin versant, les précipitations annuelles à 99 % de confiance sont comprises entre 1491,4 mm à Nanga-Eboko et 2831,9 mm à Ngambè.

Tableau XXII. Estimations de la dynamique des précipitations (phase et intervalles de confiance) dans le bassin de la Sanaga

Station	Phases des précipitations (en %)			Intervalles de confiance (IC)		
	Faible	Normale	Forte	IC 90 %	IC 95 %	IC 99 %
N'Gaoundéré	16,45	72,16	11,39	[1319,8 ; 1711,2]	[1131,9 ; 1899,1]	[1014,5 ; 2016,5]
Banyo	15,58	74,03	10,39	[1736,2 ; 1747]	[1735,2 ; 1748]	[1733,2 ; 1750]
Meiganga	22,37	60,53	17,10	[1549,8 ; 1558,4]	[1549 ; 1559,2]	[1547,4 ; 1560,8]
Tibati	14,47	73,69	11,84	[1692,8 ; 1703,2]	[1691,8 ; 1704,2]	[1689,8 ; 1706,2]
Yoko	17,07	63,48	19,51	[1616,3 ; 1620,7]	[1615,8 ; 1621,2]	[1615 ; 1622]
Koundja	1,78	96,44	1,78	[1977,2 ; 2014,6]	[1973,6 ; 2018,2]	[1966,6 ; 2025,2]
Foumbot	16,66	66,66	16,66	[1725,5 ; 1741,9]	[1723,9 ; 1743,5]	[1720,8 ; 1746,6]
Dschang	13,92	72,16	13,92	[1834,5 ; 1844,1]	[1833,6 ; 1845]	[1831,8 ; 1846,8]
Bafoussam	20	65,34	14,66	[1776,4 ; 1785]	[1775,5 ; 1785,9]	[1773,9 ; 1787,5]
Nkongsamba	17,72	68,35	13,92	[2601,8 ; 2614,2]	[2600,6 ; 2615,4]	[2598,3 ; 2617,7]
Bertoua	13,92	65,83	20,25	[1496,7 ; 1506,1]	[1495,9 ; 1506,9]	[1494,1 ; 1508,7]
Nanga Eboko	16,88	70,13	12,99	[1494,4 ; 1505,2]	[1493,4 ; 1506,2]	[1491,4 ; 1508,2]
Abong-Mbang	15,19	70,89	13,92	[1613,0 ; 1623,6]	[1612,0 ; 1624,6]	[1610,0 ; 1626,6]
Akonolinga	19,23	66,67	14,10	[614,1 ; 622,5]	[613,3 ; 623,3]	[611,8 ; 624,8]
Bafia	11,39	69,62	18,99	[1479,4 ; 1488,4]	[1478,5 ; 1489,3]	[1476,8 ; 1491]
Yaoundé	15,19	65,82	18,99	[1577,2 ; 1586,6]	[1576,3 ; 1587,5]	[1574,6 ; 1589,2]
Ngambè	25,42	64,41	10,17	[2794,5 ; 2823,7]	[2791,7 ; 2826,5]	[2786,3 ; 2831,9]
Édéa	11,39	77,21	11,39	[2532,6 ; 2552]	[2530,8 ; 2553,8]	[2527,1 ; 2557,5]

A 90 % de confiance, elles sont comprises entre 1494,4 mm à Nanga-Eboko et 2823,7 mm à Ngambè. Toutefois, la station de N’Gaoundéré sur l’Adamaoua reçoit une quantité de précipitations peu consistante.

III.1.1.5.2. Analyse de la pluviométrie des stations du bassin du fleuve Sanaga et ses environs

La quantité pluviométrique maximale est de 1813,1 mm en 1965 à N’Gaoundéré pour un écart type 195,7. De manière mensuelle, les écarts-types varient de zéro (novembre à avril) à 142,3 en août. Le coefficient de variation à l’échelle annuelle égal à 0,15 illustre une faible variation. A l’échelle saisonnière, ce coefficient compris entre 1,32 au mois de janvier et 0,52 au mois d’août témoigne d’une fluctuation sérieuse de la pluviométrie au courant de l’année (Annexes A5). L’indice d’aridité de De Martonne à N’Gaoundéré est compris entre 0,5 et 12,6 de novembre à mars, pour passer subitement à plus de 50 de mai à octobre.

La pluviométrie minimale observée par an a été de 684,7 mm en 1994 à Abong-Mbang et la quantité maximale a été de 4803,5 mm à Édéa en 1978, ce qui correspond à une amplitude considérable de 4118,8 mm. La variabilité annuelle a été faible avec des coefficients de variation compris entre 0,06 et 0,31. Sur le plan mensuel, on a évalué la rareté des précipitations de novembre à mars allant parfois à avril. Par l’indice de De Martonne, la station de Bertoua s’est révélée sèche en décembre-janvier-février et sub-sèche en mars, avril et novembre.

La sécheresse se répartit de décembre à février avec des reflets en mars et novembre à Nkongsamba. Dschang se trouve plus sèche de novembre à février pouvant aller jusqu’à mars. Les précipitations moyennes annuelles sont de 1581,9 mm. Le minimum est de 684,7 mm en 1994 à Abong-Mbang et le maximum de 4575,6 mm en 1998 à Kribi. L’écart type oscille entre 195,7 à Akonolinga et 510,1 à Kribi. La sécheresse est marquée en décembre à Yaoundé, à Akonolinga tandis qu’elle décale pour janvier à Abong-Mbang. L’aridité se manifeste sur ces localités de décembre à février et se répercute en novembre et mars.

La quantité minimale de précipitations annuelles dans le bassin de la Sanaga est de 755,1 mm en 1986 à Nanga-Eboko et la quantité maximale est de 2453,1 mm en 1962 à Koundja pour des écarts types entre 103,3 à Yoko et 624,9 à Koundja. Mensuellement, les écarts types varient entre 4,5 en janvier à Meiganga et 553 en août à Koundja. Plusieurs stations sont sujets à la sécheresse de novembre à mars, d’où l’utilité des barrages de

retenues dans ce bassin. L'indice d'aridité de De Martonne est inférieur à 20 pour toutes les stations de décembre à février marquent ainsi une sécheresse. Cependant, on peut relever des particularités à propos des stations situées sur le plateau de l'Adamaoua. La sécheresse s'anticipe à Banyo dès novembre et se répand parfois en mars. A Meiganga et à Tibati, non seulement elle débute au mois de novembre, elle prolonge en mars pour se répandre quelquefois jusqu'en avril. Pour les autres stations du bassin, cet indice compris entre 20 et 50 au cours des mois de novembre et mars, marque une sub-sécheresse sauf à Ngambè où le mois de mars est déjà humide.

III.1.1.5.3. Régime pluviométrique dans les zones climatiques du bassin versant du fleuve Sanaga de 1950 à 2018

Les précipitations mensuelles pendant la période d'étude (Fig. 30) atteignent les maxima en août (39,28 % de cas) ou en juillet (28,57 % de cas).

A l'échelle fine, il ressort qu'à N'Gaoundéré, les précipitations atteignent les maxima en août (37,97 % de cas), à Tibati les pics sont atteints en septembre (37,66 %) ; à Banyo en juillet ou en septembre (29,87 %) ; à Meiganga en septembre (28,95 %) ou en août (27,63 %). Les données des stations soumises au climat équatorial guinéen et continental stipulent une complexité du comportement des précipitations (Annexe 5). Les précipitations mensuelles atteignent les maxima en octobre (57,69 % de cas). Elles sont faibles voire quasi-rares de décembre à février. Cependant, l'analyse typologique permet d'observer des années à deux pics (59,18 %) ou à trois (34,69 %). Ce comportement des précipitations marque l'influence de la situation de transition dans cette zone géographique. Ainsi à Bertoua, les maxima apparaissent en octobre (64,55 %) et au cours du même mois, on peut relever les pics à Yaoundé à 54,43 % ; à Abong-Mbang 48,10 % ; 30,38 % ; à Akonolinga 51,9 % ; à Nanga-Eboko (51,95 %) ; et à Bafia (49,37 %).

Dans la partie équatoriale type camerounien (Hauts Plateaux de l'Ouest), les précipitations mensuelles (Fig. 30) atteignent les maxima en septembre (51,02 % de cas). Elles sont faibles de décembre à février, période marquant la grande saison sèche. Cependant, l'analyse typologique permet d'observer des années à deux pics (57,45 %) à trois pics (38,3 %).

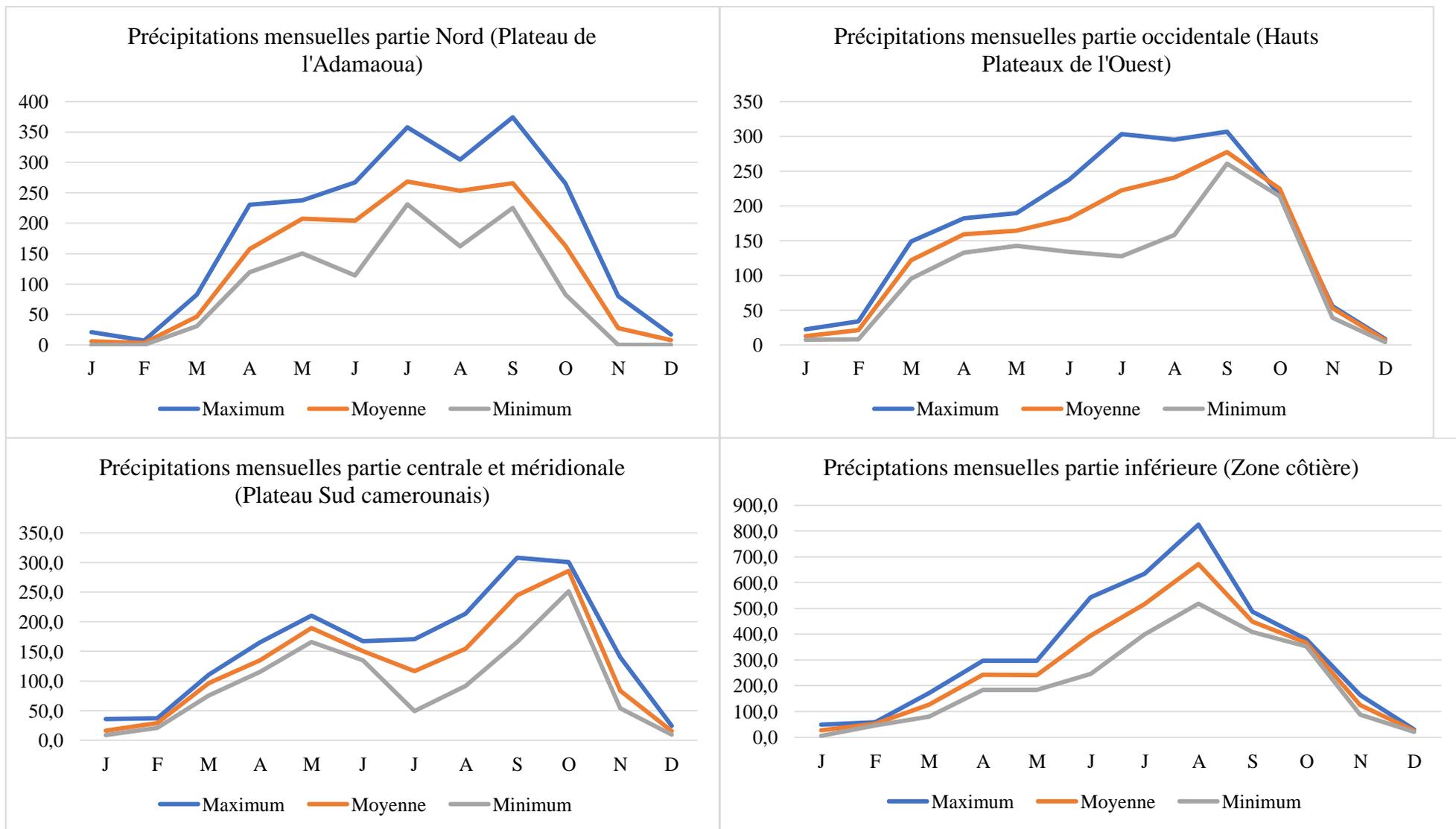


Fig. 30. Précipitations moyennes mensuelles dans les aires agroécologiques du bassin de la Sanaga

Les stations (Bafoussam, Foumbot, Koundja) localisées en altitude et à proximité de la mer (Édéa) permettent de déceler que les pics sont atteints à Bafoussam en septembre (30,66 %) ou en août (26,66 %), à Koundja (48,21 %), à Foumbot en septembre (50 %) ou en août (21,43 %). Les pics sont atteints à Dschang à 39,47 % en septembre, 21,05 % en août, à Nkongsamba 50,65 % en août, 31,17 % en septembre. En zone côtière (climat équatorial type côtier) à Ngambè en septembre (49,15 %), en août (35,59 %) ; à Edéa en septembre (45,57 %), en octobre (30,38 %).

En somme, le bassin du fleuve Sanaga est couvert par trois régimes pluviométriques qui influencent sur les écoulements dans les cours supérieur, moyen et inférieur de la Sanaga. La limite entre le climat tropical humide et le climat équatorial guinéen se situe vers la ligne de Tibati-Garoua-Boulaï autour de la latitude 6° Nord. Celle entre ce dernier et le climat équatorial de type camerounien se trouve au niveau de la bordure Sud des Hauts plateaux de l'Ouest. La limite entre le climat équatorial de type guinéen et le climat équatorial de type côtier se situe à Nkong-Kwala c'est-à-dire environ à 4°05' de même latitude et vers l'ouest au niveau de Fouban, Loum, Basse Sanaga jusqu'à Kribi.

La saison pluvieuse dans la partie tropicale humide du bassin couvre les mois de mars à octobre. On a noté également des variations au cours de la grande saison sèche qui va d'octobre à février dont les précipitations mensuelles sont parfois inférieures à 60 mm. Les pluies se raréfient de décembre à février quelquefois même de novembre à mars, le mois d'août est le plus humide. Ce qui favorise le développement d'un autre type de végétation constituée en majorité de hautes savanes guinéennes du plateau de l'Adamaoua.

Dans la partie équatoriale de type guinéen, la saison pluvieuse couvre les mois de mars à octobre avec un léger relâchement au mois de juillet représentant la petite saison sèche. La grande saison sèche qui va de novembre à février quelquefois arrosée par des précipitations isolées. On peut enregistrer quelques précipitations. La saison pluvieuse dans la partie équatoriale de type camerounien (Hauts plateaux de l'Ouest) du bassin couvre les mois de mars à octobre au cours desquels il n'y a presque pas de relâchement des précipitations. La grande saison sèche va de novembre à février avec parfois des précipitations de faible intensité. Cela provient de l'effet conjugué de la continentalité et de l'altitude considérable. Les températures varient aussi très peu. Dans la zone côtière, la saison pluvieuse dans la couvre les mois de mars à octobre. On a des précipitations assez

faible au cours de la grande saison sèche qui va d'octobre à février. La petite saison des pluies a presque disparu.

La régression des précipitations est plus marquée dans les hautes terres de l'Ouest. Les températures ayant augmenté de 1971 à 1989, ont commencé à chuter en 2001, malgré un sursaut exceptionnel en 2000. Dans la zone forestière à pluviométrie bimodale comprenant le plateau Sud camerounais, les précipitations ont baissé progressivement. Le trend plonge faiblement mais sa pente est abrupte que sur les Hauts plateaux. Les températures ont augmenté brutalement. Les précipitations dans la zone côtière ou forestière à pluviométrie monomodale sont plus élevées bien que deux stations uniquement soient exploitées. Ces précipitations ont commencé à chuter depuis 1978, année à partir de laquelle elles évoluaient en dessous de la moyenne. La chute est plus brutale que dans la zone forestière à pluviométrie bimodale. La reprise se fait remarquer en 2006. La baisse est notée entre 1950-1987 et 1987- 2015. Les températures bien que plus croissantes, évoluent en trois phases : 1961-1969 ; 1969-2003 ; 2003-2015.

Les précipitations ont diminué progressivement dans la quasi-totalité des stations pluviométriques observées de 1950 à 2018. On a relevé par endroits des ruptures pluviométriques (Tableau XXIII).

Tableau XXIII. Discontinuités pluviométriques des stations observées

Intervalle confiance Stations	Test de Pettitt				Segmentation de Hubert					Test de normalité
	99 %	95 %	90 %	Probabilités dépassement valeur critique du test	Année de rupture	Début	Fin	Moyenne	Ecart- type	
N°Gaoundéré	Rupture	Rupture	Rupture	2,6 E-04	1969	1950 1970	1969 2008	1557 1457	45 85	Vérfifié
Dschang	Pas de rupture	Pas de rupture	Rupture	2,01 E-02	1965	1950 1966	1965 2008	1859,7 1822,2	242,1 217,1	Vérfifié
Nkongsamba	Pas de rupture	Pas de rupture	Rupture	1,16 E-01	1972	1950 1973	1972 2005	2753,3 2434,5	262,5 233	Vérfifié
Bertoua	Rupture	Rupture	Rupture	6,16 E-02	1991	1932 1992	1991 2010	1528,5 1434,3	234,4 162	Vérfifié
Nanga-Eboko	Rupture	Rupture	Rupture	2,56 E-03	1975	1950 1976	1975 2008	1513 1361	102 201	Vérfifié
Akonolinga	Pas de rupture	Pas de rupture	Rupture	-1,94 E-02	1994	1954 1995	1994 2008	1525,2 1473,6	190,8 191,8	Non vérfifié
Yaoundé	Pas de rupture	Pas de rupture	Rupture	-2,22 E-02	1999	1972 1999 2000	1972 1999 2008	1597,7 1538,9 1635,5	221 216,9 242,9	Non vérfifié
Édéa	Rupture	Rupture	Rupture	3,64 E-02	1981	1950 1982	1981 1987	2684 2287	284 154	Vérfifié

III.1.1.6. Evolution des précipitations moyennes au niveau de certains exutoires du bassin

La figure 31 présente les courbes résultantes des précipitations recueillies au sein du bassin versant. Les graphiques présentent pour la plupart une allure à deux périodes où l'une évolue plus au-dessus du module et l'autre en dessous. Les points ne s'éloignent pas trop de la moyenne. La moyenne des précipitations moyennes dans le bassin de la Sanaga est de 1641,7 mm à Lom-Pangar, 1507,9 mm à Nachtigal, 1663,4 mm à Songloulou et 1837,8 mm à Edéa. La moyenne à Edéa au cours de la première sous-période d'étude (1950-1982) est de 1881,4 mm tandis qu'elle est 1773,8 mm pour la deuxième (1983-2018) soit un écart absolu de 107,6 mm (5,7 % en valeur relative).

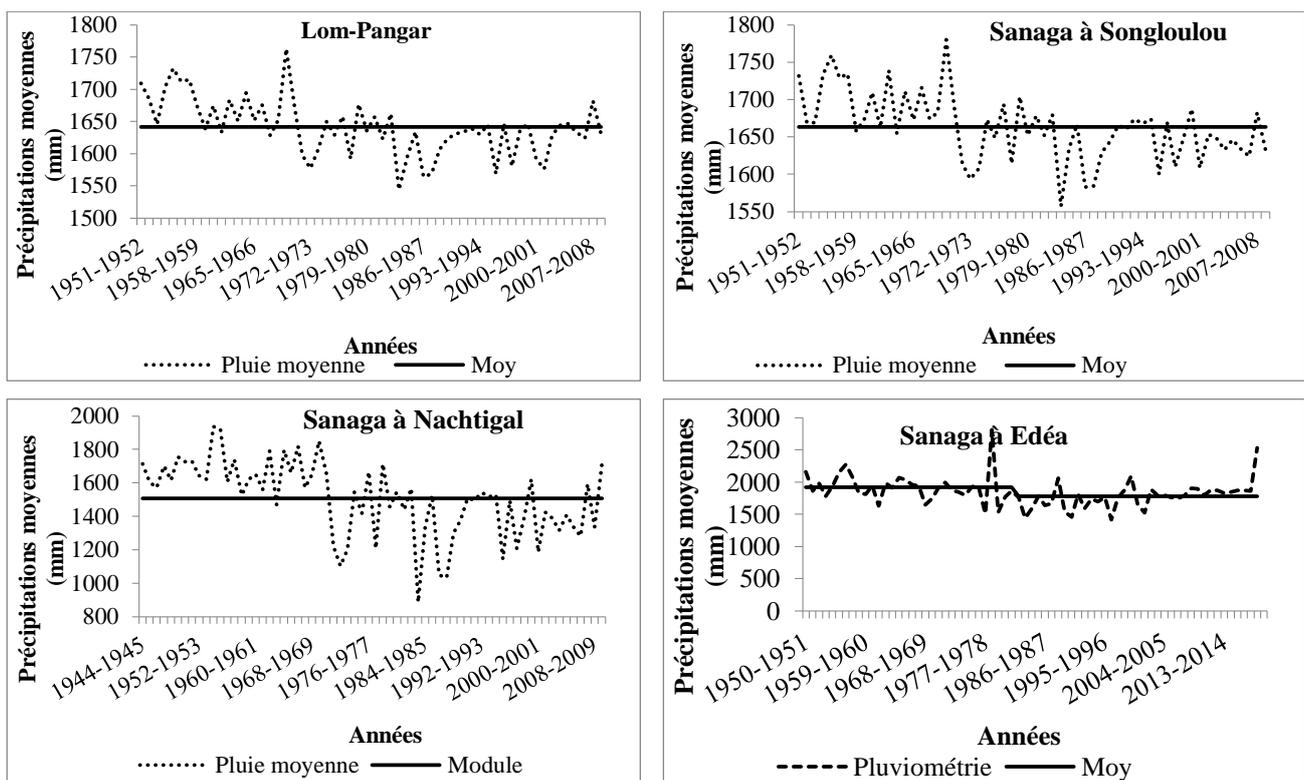


Fig. 31. Précipitations moyennes tombée à l'échelle des sous bassins du fleuve Sanaga de 1950 à 2018.

Le module des précipitations moyennes interannuelle évaluée dans le bassin de la Sanaga à l'exutoire d'Edéa au cours de la période d'étude est de $1837,8 \pm 214,8$ mm, le maximum est de 2812,6 mm en 1978, le minimum est de 1414,4 mm en 1996. Cette moyenne (vu la quantité) reflète uniquement un climat équatorial de type guinéen qui domine le bassin. La courbe montre une disparité de valeurs mais qui, jusqu'en 1973, ne sont pas inférieures à 1700 mm. Ces valeurs sont des grandeurs éparses mais proches par moment à 2 ou 3. Les précipitations efficaces (P_e) calculées dans le bassin sont de 380 mm.

La tendance (trend) d'équation $y = -0,641x + 1866$, montre une régression. Le rapport entre l'année décennale pluvieuse (1954-1964 avec 1956,83 mm) et l'année décennale sèche (1994-2003 avec 1520,87 mm) est de 1,28. Ce qui montre une faible irrégularité interannuelle. Ce rapport est très variable au sein du bassin, soit de 1,35 à Édéa ; 1,55 à Nanga-Eboko et 1,19 à N'Gaoundéré.

Les précipitations moyennes mensuelles tombées dans le bassin de la Sanaga atteignent les maxima en septembre (44,61 % de cas), en octobre (29,23 % de cas) pendant la période d'étude. L'année moyenne montre plutôt le maximum au mois d'octobre. Les précipitations moyennes sont faibles de décembre à février (Fig.32), période marquant la grande saison sèche. Cependant, l'analyse typologique permet d'observer des années à deux pics uniquement. Néanmoins, le comportement des précipitations moyennes témoignent de la dominance de la zone d'étude par le régime pluviométrique tropical.

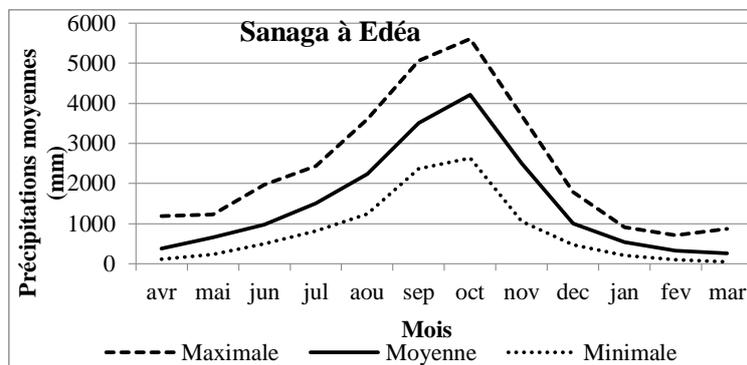


Fig. 32. Précipitations moyennes mensuelles recueillies dans le bassin du fleuve Sanaga de 1950 à 2018.

III.1.1.5.4. Moyennes décennales des précipitations au bassin du fleuve Sanaga

En observant les précipitations décennales, il ressort que la décennie la plus humide dans la zone soudanienne du bassin est 1950-1959 avec 1591,1 mm de précipitations, la moyenne par rapport aux moyennes décennales est de 1504,8 mm. On assiste à une réduction progressive des précipitations de 1980-1989 jusqu'à la décennie la plus sèche est 2010-2019 avec 1432,4mm soit une chute relative de 13,89 %. On observe une alternance de hausse précédée de baisse (Fig. 33).

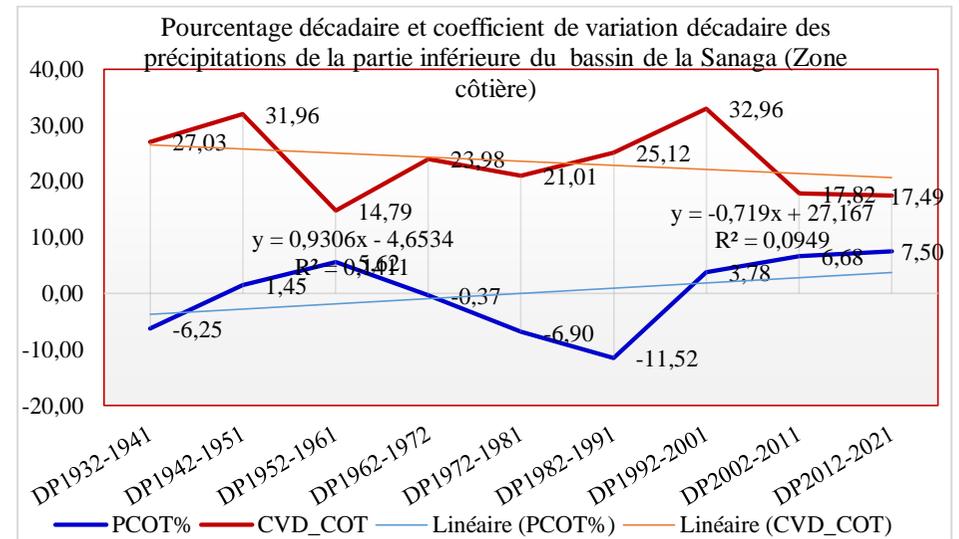
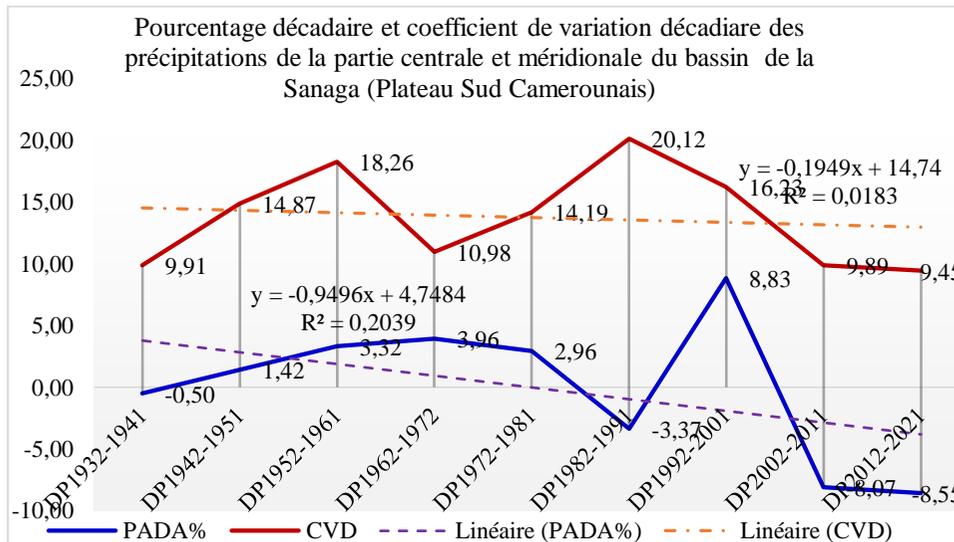
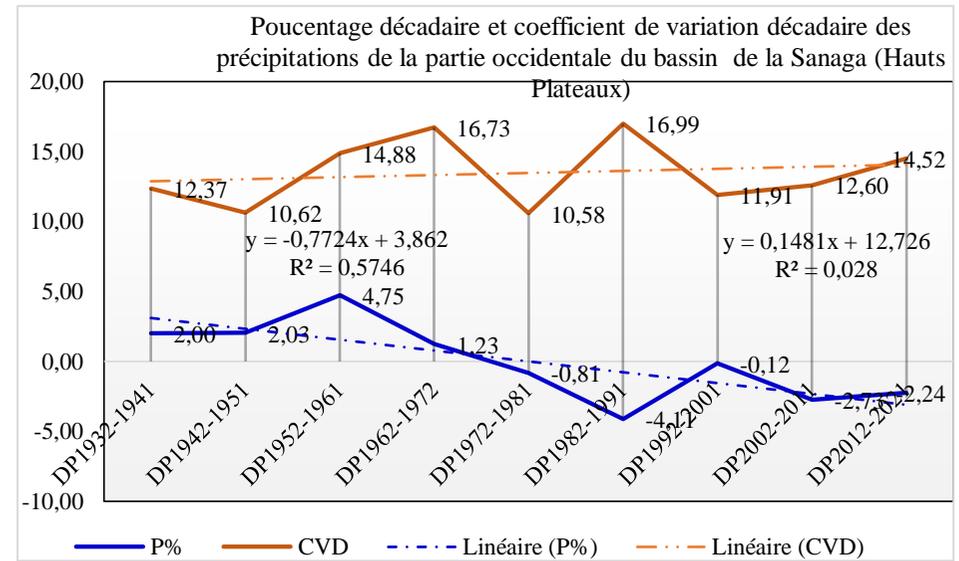
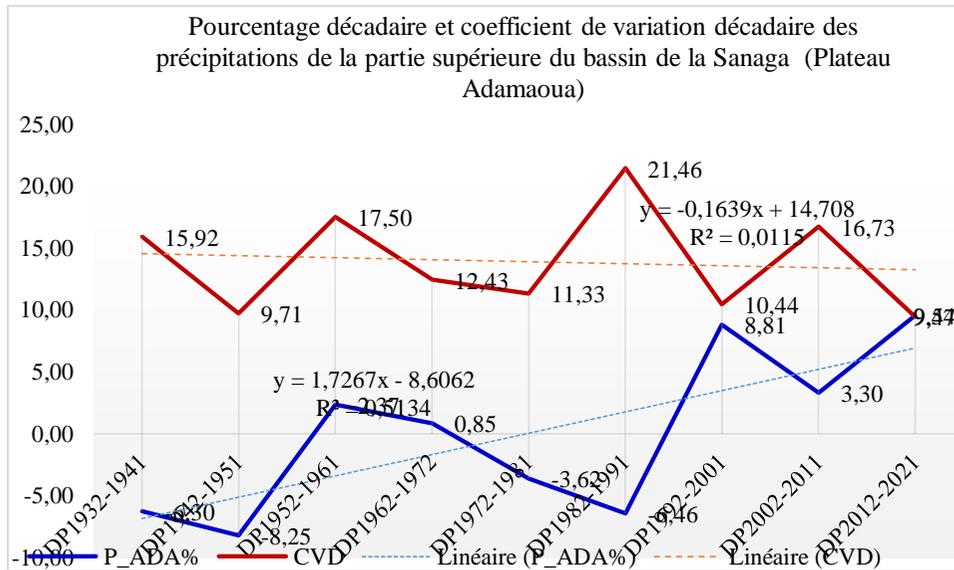


Fig. 33. Pourcentage décennal et coefficient de variation décennal des précipitations de la dans les zones agroécologiques du bassin du fleuve Sanaga

On assiste à une légère réduction des précipitations jusqu'à la décennie la plus sèche qui est 1990-1999 avec 1363,4 mm (soit une baisse de 14,97 %), pour une reprise de l'augmentation au cours de la décennie 2000-2009. En faisant l'analyse de l'évolution décennale des précipitations dans la partie équatoriale guinéenne (Fig. 34), il ressort que la décennie la plus humide dans la zone est 1950-1959 avec 1603,4 mm de précipitations, la moyenne par rapport aux moyennes décennales des précipitations est de 1484,4 mm.

De l'évolution décennale des précipitations dans la partie équatoriale type camerounien (Fig. 33), il ressort que la décennie 1950-1959 avec 2755,9 mm de précipitations est la plus humide dans la zone. On assiste à une réduction des précipitations à la décennie la plus sèche de 1980-1989 avec 2285,9 mm soit une chute relative de 17,05 %. Cette partie du bassin malgré les tendances à la baisse confirmées par les écarts et les moyennes décennales, présente une augmentation des précipitations. Ce qui pourrait être mieux perceptible sur le graphique des écarts à la moyenne (Fig. 29 ci-dessus), mais peu significative sur celui des moyennes décennales. L'analyse décennale des précipitations moyennes à l'échelle du bassin (Fig.34), montre que la décennie la plus humide est 1992-2001 avec 12,35 %, relayée par 1952-1961 avec 10,2 % mm, comportement différent de chacun des régimes climatiques. La décennie 1972-1981 s'avère plus critique pour ce bassin avec 6,23 % suivie par la décennie 1932-1941 avec 6,75 %. A partir de l'année 2000, on constate une reprise de l'augmentation des précipitations au sein du bassin.

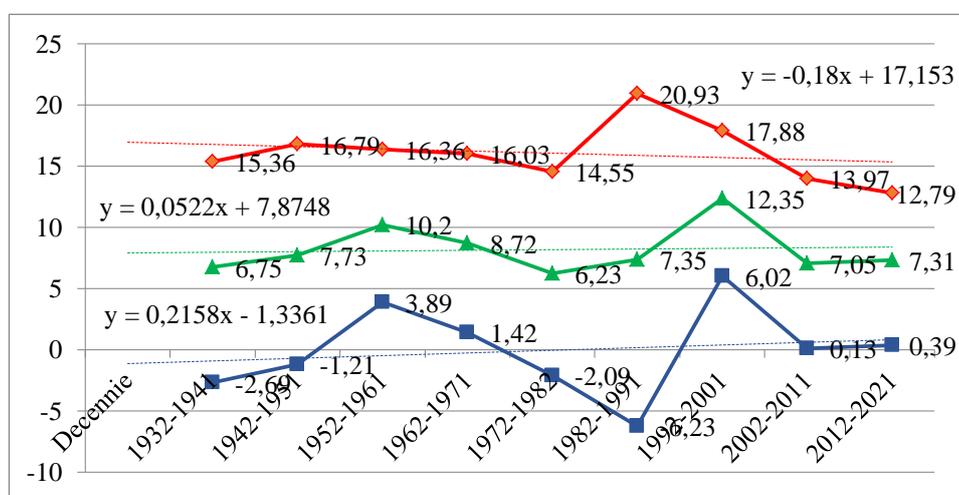


Fig. 34. Moyennes décennales des précipitations moyennes tombées dans le bassin du fleuve Sanaga.

On peut relever trois types de digrammes avec un à trois pics représentant quatre variétés climatiques :

- Le régime monomodal de l'Adamaoua de 6 à 7 mois humides, la subsècheresse sur l'Adamaoua, observée l'ensemble des stations en dehors de Tibati. Cette exception relève de l'humidité fournie par l'évaporation de l'étendue de la retenue de Mbakaou ;
- Le régime monomodal des hauts plateaux influencé par des facteurs locaux, la subhumidité sur les hauts plateaux de l'Ouest, qui semble découler de l'effet Foehn subi par les stations étudiées ;
- Le régime bimodal du plateau Sud canerounais, l'humidité dans la partie centrale résultant de la forêt dense ;
- Le régime monomodal de la zone côtière, la forte humidité sur la plaine côtière liée à la conjugaison de l'évapotranspiration libérée par la forêt dense et le vent tiède de l'océan.

III.1.2.2. Evapotranspiration potentielle dans le bassin du fleuve Sanaga

L'impact de l'élévation des températures est l'intensification de l'évapotranspiration.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) présente trois paliers :

- Le cours supérieur marqué par le climat tropical humide où l'ETP varie de 936,6 mm en 1976 à 1219,9 mm en 1998, pour une moyenne de 1138,2 mm et une tendance d'équation $y = 2,549x + 1088$;
- Le cours moyen influencé par le climat équatorial guinéen avec une ETP comprise entre 1069,8 mm en 1975 et 1393 mm en 1987 et une moyenne de 1299,1 mm de tendance $y = 3,136x + 1237$;
- Le cours inférieur influencé par le climat équatorial type camerounien où l'ETP oscille entre 1016,8 mm en 1976 et 1324,2 mm en 1987 1219,7 mm de droite de tendance $y = -1,338x + 1245$. On peut constater que de 1971 à 1989, l'ETP dans cette partie se rapproche du cours moyen et se rabat subitement proche du cours supérieur de 1991 à 2008 (Fig. 36). A l'échelle globale du bassin versant du fleuve Sanaga, l'ETP est comprise entre 1047,9 mm en 1976 et 1336,6 mm en 1987 avec une moyenne de 1261,5 mm. Elle représente 64,74 % de la moyenne des précipitations recueillies. L'équation du trend est $y = 0,748x + 1246$. L'ETP est plus élevée dans le cours moyen du bassin et plus faible dans le cours supérieur. Dans l'ensemble du bassin, l'ETP évolue entre celles du cours moyen et du cours inférieur. L'analyse de tous les paramètres climatiques pouvant influencer la disponibilité des ressources en eau ont permis de réaliser une carte climatique du bassin de la Sanaga (FIG.37).

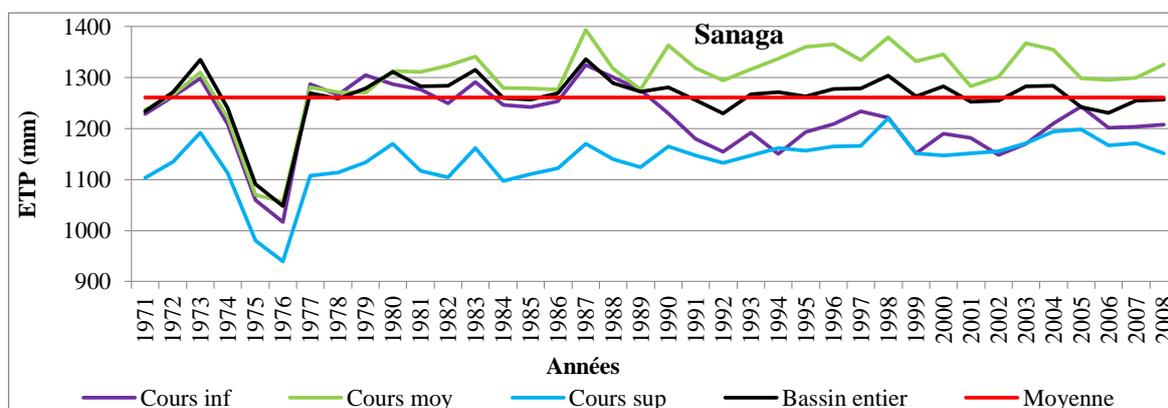


Fig. 36. Evapotranspiration potentielle moyenne dans le bassin de la Sanaga

III.1.2.3. Disponibilité en eau évaluée par des stations météorologiques étudiées

La disponibilité de l'eau (Tableau XXIV) évaluée de l'année moyenne dégage une crise de la ressource en eau au niveau des stations de Nanga-Eboko, d'Abong-Mbang et de Yaoundé en juillet. Située sur le plateau sud camerounais comme les toutes précédentes, la station d'Akonolinga se présente comme un paradoxe. Elle dégage un déficit des ressources en eau tout au long de l'année moyenne. Elle constitue une localité dans le grand sud Cameroun où le bilan hydrique annuel est négatif. Certaines localités (Bafia, Bertoua, Nanga-Eboko, Yaoundé, Abong-Mbang, Meiganga, Tibati, N'Gaoundéré) méritent une attention particulière car, la colonne d'eau disponible annuellement n'atteint pas 500 mm. Les résultats obtenus montrent une diminution presque générale des ressources en eau sur l'ensemble du bassin de novembre à mars, à l'exception faites de quelques localités situées en altitude (Bafoussam, Nkongsamba). Pour ces dernières, la durée de cette diminution se raccourcit d'un mois. La disponibilité en eau se limite aux mois de décembre-janvier pour la station de Dschang.

Tableau XXIV. Disponibilité mensuelle de l'eau (en mm) de l'année moyenne au niveau des stations du bassin de la Sanaga.

Station	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Annuelle
N'Gaoundéré	-71,3	-78,8	-74,9	33,1	99	134,8	171,9	192,4	151,5	47,3	-62,1	-69,3	473,2
Banyo	-91	-91,9	-58,2	43,1	111,1	138	199,9	178,4	191,7	111,9	-61,8	-86,1	584,7
Meiganga	-83,1	-86,66	-75,3	-3,4	65,9	102,1	170,7	173,6	180,8	100,8	-46,6	-74,8	423,8
Tibati	-94,3	-96,1	-84	1	71,7	117,4	185,1	177,6	202	128,6	-50,5	-90,8	467,5
Dschang	-8	12,2	97,5	146,8	161,3	215,1	215,3	251,9	297	197	22,3	-8,6	1599,1
Bafoussam	-66,5	-52,4	2,6	77,8	92,6	122,6	162	173,6	212,6	184,2	-16,5	-64,2	824
Bertoua	-79,62	-74,8	-26	13,1	42,1	55,9	10,1	42,7	128,1	164,3	-1,2	-67,3	207,38
Nkongsamba	-84,7	-60,8	18,1	73,5	111,1	152,3	333,4	427,2	365,5	235,7	-0,2	-80,9	1484,4
Nanga Eboko	-86,9	-77	-24,7	44	89,5	39	-5,7	120,7	136,1	176,6	-18,1	-82,7	217,3
Abong-Mbang	-74,8	-49,7	7,7	52,1	104,2	68,4	-6,6	17,4	141,8	176,8	7,9	-55,2	389,8
Akonolinga	-85,3	-86,9	-78,9	-60,1	-50,7	-50,4	-48,1	-37,4	-16,6	-29,9	-53,8	-83,6	-682
Bafia	-111,4	-110,8	-45,2	16,8	57,4	20,9	11	53,2	134,6	165	-30,2	-98,6	62,4
Yaoundé	-93,2	-70,5	9,2	67	94,2	62,7	-18,8	4,1	135,1	195,2	8,3	-79,6	313,4
Ngambè	-100,9	-73,5	22,7	62,7	119,2	159,9	261,2	430,7	436,1	323,5	8	-91,87	1557,6
Édéa	-128	-105	-33,3	69,4	124,3	104,2	124,4	247,5	323	231,3	-6,9	-123,2	827,3

III.1.2.4. lame d'eau écoulée à Édéa

La lame d'eau moyenne écoulée est de 491,1 mm, le minimum est de 264,74 mm en 1983-1984 et le maximum de 1417,2 mm en 2017-2018. La moyenne au cours de la première sous- période (1950-1982) est de 477,7 mm alors que celle de la deuxième sous-période (1982-2008) est 505,3 mm (Fig. 38). On peut souligner que pendant la période d'étude, le bassin versant de la Sanaga a connu une baisse des quantités d'eau écoulée d'une valeur relative de 13,1 %, soit une valeur absolue de 71,6 mm. L'équation du trend est $y=1,918x+419,2$. Toutefois, on a constaté une chute de la lame d'eau écoulée à partir de 1971-1973 où celle-ci évolue en deçà de la moyenne, situation qui a été inversée dès l'année hydrologique 2008-2009.

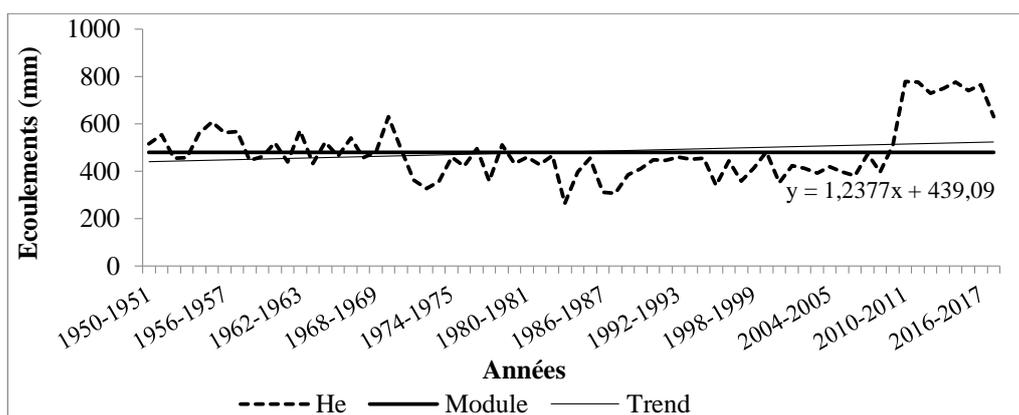


Fig. 38. lame d'eau écoulée à Édéa

III.1.2.5. Déficit d'écoulement

Il suit les mêmes apparences que la pluviométrie, les débits et la lame d'eau écoulée. Le déficit moyen est de 1340,8 m³/s avec un écart type de 157,6. Le minimum est de 444 mm en 2017-2018 et le maximum de 2302,9 m³/s en 1978-1979 (Fig. 39). Les mailles vidées pendant la saison sèche doivent d'abord être remplies par infiltration, avant que le ruissellement commence. Ce ruissellement est accentué par les aménagements au sein du bassin.

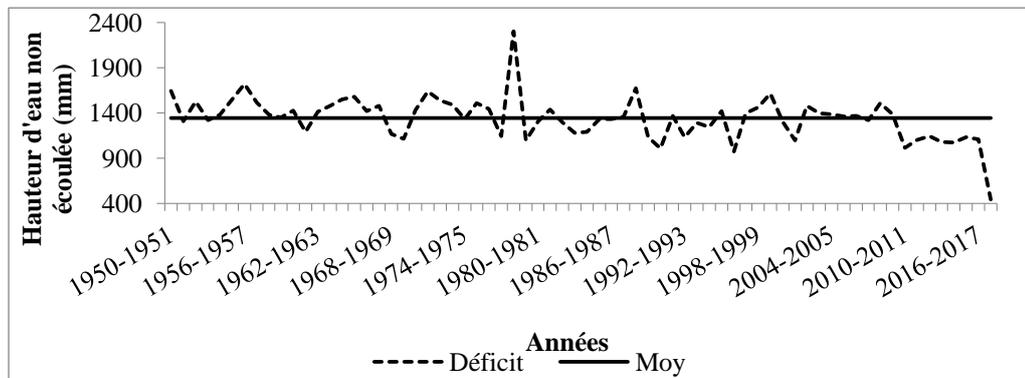


Fig. 39. Variation du déficit d'écoulement de la Sanaga à Édéa.

III.1.2.6. Coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement (Fig. 40) varie de 18,31 % en 1983-1984 à 76,14 % en 2017-2018, la moyenne étant de $26,97 \pm 4,5$ %. Ce coefficient a varié entre 23,90 % en 1950-1951 et 23,62 % en 1968-1969. Il est allé de 20,85 % en 2008-2009 à 76,14 % en 2017-2018. La capacité de rétention des roches présentes en amont (basaltes de N'Gaoundéré et des Hauts-plateaux de l'Ouest, grès du Djérem) permettent d'alimenter l'écoulement par restitution en absence des précipitations. Les eaux gravifiques réalimentent ainsi le réseau hydrographique du bassin en absence de ruissellement. Cette eau est évaporée fortement en période d'été.

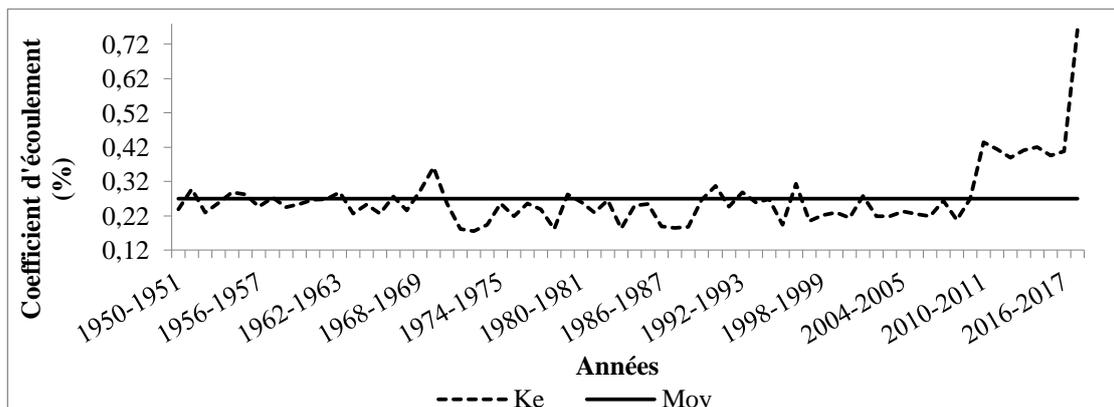


Fig. 40. Coefficient d'écoulement de la Sanaga à Edéa.

Il ressort de tous les graphiques des précipitations et des écoulements que, les coefficients des équations des trends sont négatifs et décroissants dans le bassin de la Sanaga. L'analyse des paramètres du bilan de l'eau (Tableau XXV) montre que, de la partie tropicale humide à l'exutoire, les précipitations ont progressivement chuté. Les écoulements suivent également la même tendance.

Tableau XXV. Bilan hydrologique tel que recueilli par des stations identifiées

Bassin et station	P (mm)	qs (l/s/km ²)	Le (mm)	DE (mm)	Ke (%)
Lom-Pangar/Confluence	1472,6	14,29	451	1021,6	30,62
Mbam à Goura	1622	16,8	531,2	1090,8	32,75
Sanaga à Nachtigal	1641,7	13,03	411,2	1230,5	25,05
Sanaga à Songloulou	1528,8	13,96	440,5	1088,3	28,81
Sanaga à Édéa	1664,8	14,22	448,7	1088,5	29,3

P=pluie moyenne ; Le=lame d'eau écoulée ; DE=déficit d'écoulement ; Ke=coefficient d'écoulement ; qs=débit spécifique

Le bilan hydrologique recueilli par des stations étudiées ressort que les écoulements plus forts dans le cours supérieur du bassin chutent dans le cours moyen avant d'augmenter encore un peu dans le cours inférieur. Par contre, l'indice d'écoulement de base est franchi au cours des étiages de Nachtigal à Édéa mais pas encore à Lom-Pangar (Tableau XXVI). On a pu donc relever que la pluie efficace varie de 50 mm à Lom-Pangar à 380 mm à Édéa. Les crues centennaires évaluées ne sont atteintes au niveau d'aucun exutoire.

Tableau XXVI. Paramètres de variabilité hydrologique

Station	Sanaga à Édéa	Sanaga à Songloulou	Sanaga à Nachtigal	Lom-Pangar	Mbam à Goura
Pluie efficace : Pe (mm)	380	375	219	50	228
Debit de pointe : Qmax0,5 (m ³ /s)	3945	3900	2280	504	1269
Temps de décharge : N (jours)	10,56	10,53	9,46	7	8,42
NCRU : crue centenaire (m ³ /s)	7475	7389	4320	955	2847,6
BETI (m ³ /s)	471,6	466,2	272,5	60,2	178
BFI (m ³ /s)	105,3	104	60,8	13,4	74
Crue absolue (m ³ /s)	5555,2	5500,6	3466,7	946,6	3051,4
Étiage median absolu (m ³ /s)	304,7	300,7	163,1	29,2	1,98

BETI : débit inférieur au quart du module des débits ; BFI : Base Flow Index ou indice d'écoulement de base.

Même si le coefficient d'écoulement suit la même tendance, les précipitations ont une allure différente. Ce qui traduit une irrégularité du réseau de la Sanaga (Tableau XXVII).

Tableau XXVII. Irrégularité interannuelle et saisonnière

Bassin/Station	DSM	DS Med	CI	Max	Min	K3	Min/Mod	Max/Mod	ÉAM	Durée Qeff
Lom-Pangar/Confluence	14,29	14,44	0,166	21,03	9,34	1,207	0,06	3,745	1,81	Juillet-Novembre
Mbam/Goura	16,83	16,82	0,157	20,89	12	1,74	0,7	1,24	1,98	Juillet-Novembre
Sanaga/Nachtigal	13,03	12,92	0,18	19,21	7,7	1,256	0,052	3,837	2,14	Juillet-Novembre
Sanaga/Songloulou	13,96	14,1	0,184	19,96	8,3	2,39	0,598	1,43	2,31	Juillet-Novembre
Sanaga/Édéa	14,22	14,24	0,17	19,96	8,35	1,336	0,031	3,718	2,32	Août-Novembre

DSM : débit spécifique moyen ; DS Med : débit spécifique médian ; CI : Coefficient d'irrégularité ; EAM : étiage absolu médian ; Qeff : durée où Q > module ; K3 : moyenne décennie humide/moyenne décennie sèche ; Mod : module ; débits spécifique et étiage absolu sont exprimés en l/s.km² 4,45x10⁻⁴S^{1,14}

III.1.3. Comparaison de la production de l'énergie hydroélectrique potentielle des barrages et chutes à celle des centrales installées au sein du bassin du fleuve la Sanaga

III.1.3.1 L'énergie hydroélectrique potentielle des barrages et chutes

III.13.1.1. Evènements tectoniques contemporains

Le bassin versant du fleuve Sanaga et ses environs sont sujets aux épisodes sismiques importants en nombre. De 1950 à 2019, 15 épisodes ont été inventoriés dont 8 au sein du bassin et 6 autour de ce dernier (Tableau XXVIII).

Le résultat de ce tableau correspond à une fréquence événementielle de 8ans 273jours 22h 30mn. En tenant compte également de ses environs, cette fréquence est de 5 ans. Le constat qui se dégage est que ces évènements sont concentrés aux encablures du golfe de Guinée. Si la dynamique de la ligne du Cameroun traduit la continuité de l'influence du renouvellement du fond marin et de la dérive des continents sur le pays, on peut relever que les évènements tectoniques de manière chronologique, se propagent indifféremment sur l'ensemble du territoire (Fig. 41). On a inventorié quatorze épisodes sismiques au sein du bassin de la Sanaga et ses environs de 1950 à 2019.

Tableau XXVIII. Inventaire des épisodes sismiques au sein du bassin du fleuve Sanaga et ses environs de 1950 à 2019.

Contrée	Localité	Année	Scénario
Bassin du fleuve Sanaga	Garoua-Boulai	1966	1
	Tibati	1967	1
	Magba	1983	1
	Édéa	1987	1
	Lac Ossa	1988	1
	Monatéle	2005	1
	Yoko	1969 ; 2005	2
Environs	Moloundou	1966	1
	Kribi	1987	1
	Petit Batanga	1987	1
	Kette	1994 ; 1995	2
	Kentzou	1999	1

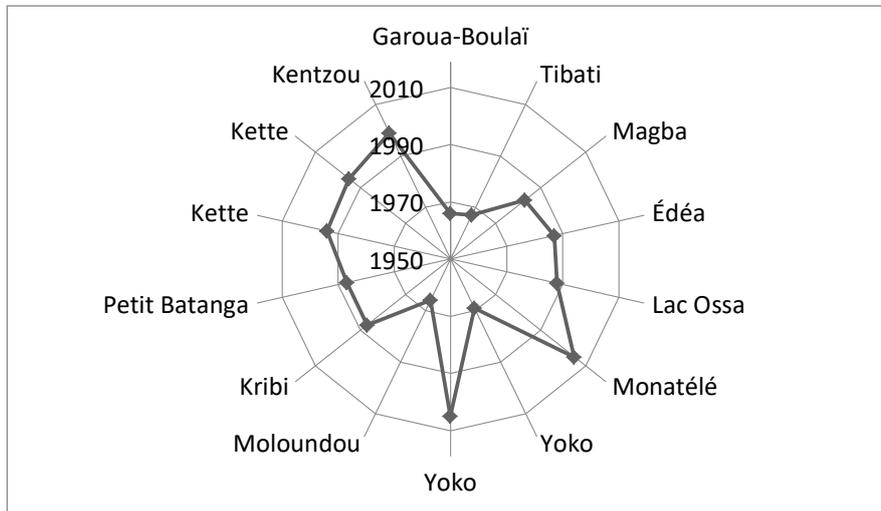


Fig. 41. Propension spatiotemporelle des épisodes sismiques au sein du bassin de la Sanaga et ses environs

Les évènements sismiques enregistrés dérivent de la tectonique cassante. La fréquence et l'intensité de ces évènements (Fig. 42) modifient davantage la topographie des lits des cours d'eau. Le volume de chaque cercle représenté sur le graphique matérialise des vibrations souterraines perceptibles par des sismographes et susceptibles d'engendrer les dommages.

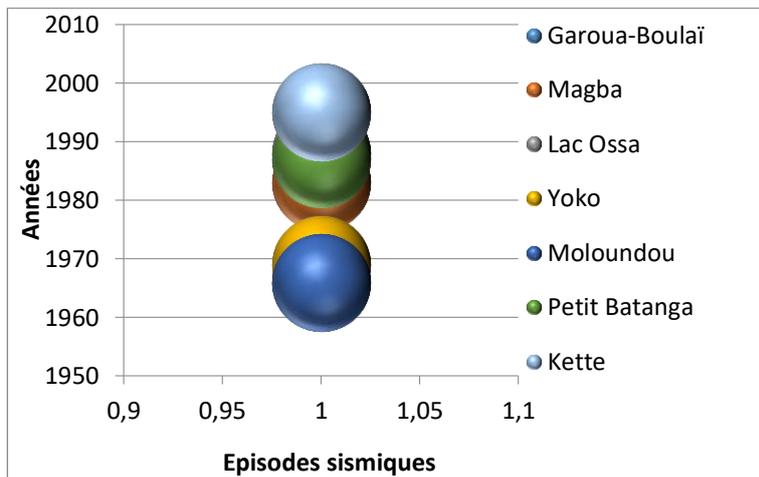


Fig. 42. Comportements cumulés des épisodes sismiques au sein du bassin de la Sanaga

III.1.2.1. Débits interannuels

Les graphiques marquent une chute de la pluviométrie dans le temps et dans l'espace puis que dans le bassin du fleuve Sanaga, la chute est continue de Lom-Pangar à Edéa. Cette chute est illustrée par la droite de tendance (Fig. 43).

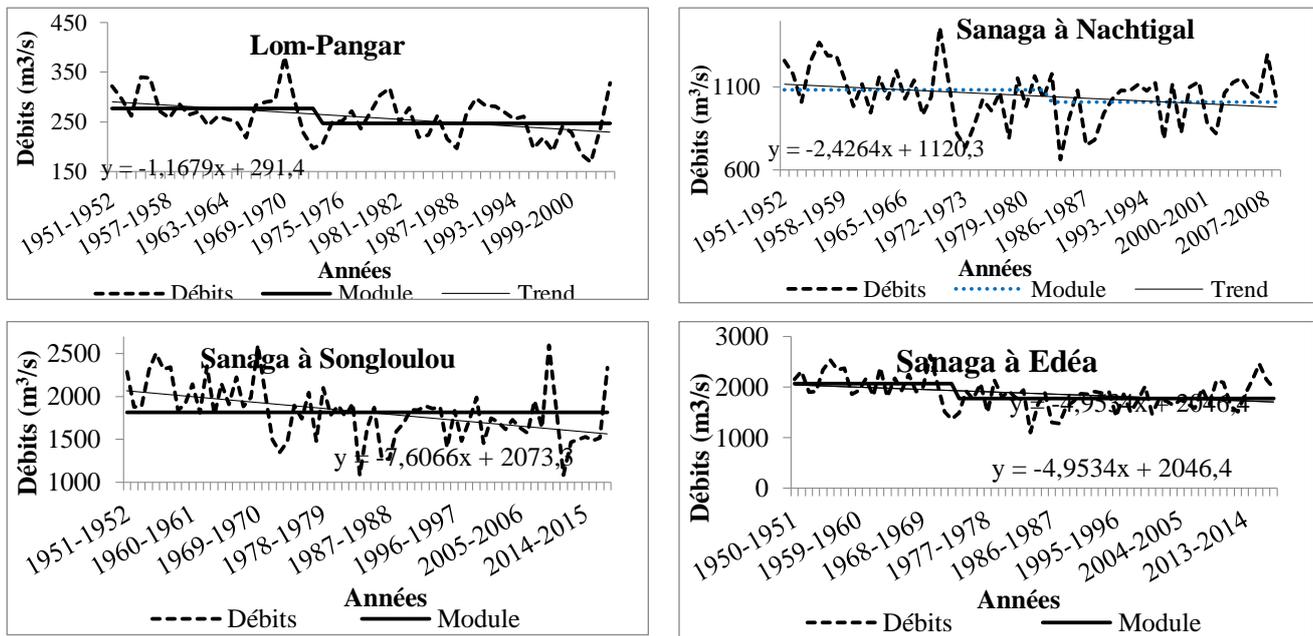


Fig. 43. Evolution des débits naturels interannuels de certains exutoires du bassin du fleuve Sanaga

De manière générale, les débits modulaires fluctuent entre $258,68 \text{ m}^3/\text{s}$ à la confluence de Lom et de Pangar et $1869,8 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la Sanaga à Edéa, bien que les périodes d'observation soient décalées. Les modules interannuels augmentent graduellement de l'amont vers l'aval du bassin grâce à l'apport important des affluents. Par ailleurs les coefficients de variation d'une part et les rapports K3 d'autre part montrent une faible variation interannuelle (Tableau XXIX).

Tableau XXIX. Les débits naturels interannuels (m^3/s) dans le bassin de la Sanaga de 1950 à 2018 et zone climatique

Station	Min	Max	K3	Mod.	Et	Cv	Méd.	Ampl.	Zone climatique
Lom-Pangar	169,1	380,6	2,25	258,7	43	0,166	261,5	211,5	Tropical humide
Mbam à Goura	508	884	1,74	712	111,7	0,157	711,5	376	Tropical de montagne
Nachtigal	585	1460	2,49	990,7	178,2	0,18	982,1	875	Tropical humide et Equatorial
Songloulou	1085,8	2595,1	2,39	1814,7	334,1	0,184	1832,8	1509,3	Tropical humide et Equatorial
Edéa	1098,4	2625	2,39	1869,8	313,6	0,168	1873,3	1526,6	Tropical humide et Equatorial

Mod : module annuel ; Min : minimal ; Max : maximal ; Et : écart type ; Cv : coefficient de variation ; Méd : médiane ; Ampl : amplitude

Les modules interannuels aux stations consignés au tableau ci-dessus permettent de déduire que des débits spécifiques moyens qui sont de $16,8 \text{ l/s/km}^2$ du Mbam à Goura ; 16 l/s/km^2 à la confluence de Lom-Pangar ; 13 l/s/km^2 sur la Sanaga à Nachtigal ; $13,96 \text{ l/s/km}^2$ à Songloulou et $14,22 \text{ l/s/km}^2$ sur la Sanaga à Édéa. On a établi un lien entre les débits (Q) de certaines stations hydrométriques du bassin de la Sanaga :

$$\begin{aligned}
Q_{\text{Edéa}} &= 5,055Q_{\text{Lom-Pangar}} + 551,1 \quad R=0,675 & Q_{\text{Edéa}} &= 1,737Q_{\text{Nachtigal}} + 128,9 \quad R= 0,943 \\
Q_{\text{Edéa}} &= 1,702Q_{\text{Nanga-Eboko}} + 399,1 \quad R=0,845 & Q_{\text{Edéa}} &= 2,561Q_{\text{Goura}} + 186,6 \quad R=0,918 \\
Q_{\text{Nachtigal}} &= 1,094Q_{\text{Nanga-Eboko}} + 19,23 \quad R=0,99 & Q_{\text{Edéa}} &= 13,5Q_{\text{Magba}} + 698,5 \quad R=0,71 \\
Q_{\text{Edéa}} &= 4,081Q_{\text{Mbakaou}} + 347,5 \quad R=0,935 & Q_{\text{Edéa}} &= 17,67Q_{\text{Bamendjing}} + 1111 \quad R=0,535 \\
Q_{\text{Nachtigal}} &= 3,228Q_{\text{Lom-Pangar}} + 200,5 \quad R=0,761 & Q_{\text{Songloulou}} &= 5,425 Q_{\text{Lom-Pangar}} + 445,8
\end{aligned}$$

III.1.2.2. Débits mensuels

Les stations hydrométriques du bassin de la Sanaga présentent une disparité de comportement. Les débits mensuels marquent un quasi tarissement de février-mars illustré par Q_{min} (Tableau XXX). Ce qui détermine des étiages absolus sévères, d'où la difficulté de la disponibilité des ressources en eau au sein du bassin du fleuve la Sanaga.

Tableau XXX. Variations des débits (m^3/s) dans le bassin du fleuve Sanaga de 1950 à 2018

	Avr	Mai	Jui	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mar	Annuel
Sanaga à Edéa													
Qmax	1471,8	1525,8	2436,9	3019	4470,7	6281,7	6952,9	4577	2212,5	1122,8	874	1082,4	2625
Module	468,0	812,1	1203,6	1861,0	2769,3	4345	5231,6	3096,3	1240,4	657,0	392,7	319,6	1869,8
Qmin	136	279,2	609,0	1013	1541,6	2933,7	3268,5	1314	574,2	259,1	121	59	1098,4
ET	225,71	280,96	364,82	427,83	601,45	687,31	919,49	835,95	355,69	222,13	190,13	187,04	314,84
CI	0,482	0,346	0,303	0,23	0,217	0,158	0,176	0,27	0,287	0,338	0,484	0,585	0,168
K3	10,82	5,46	4,00	2,98	2,90	2,14	2,13	3,48	3,85	4,33	7,22	18,34	2,39
Lom-Pangar													
Qmax	145,1	197,7	332,6	531	781	943	968,8	582	454	173,5	125,8	172,2	380,6
Module	72,9	108,9	181,1	292,6	433,1	608,5	616,5	359,4	184,2	109,0	68,8	54,6	258,7
Qmin	23,5	39,2	68,9	120,2	253,1	416,2	332,6	134,5	76,9	47,3	20,4	15,5	169,1
ET	32,11	36,22	60,71	87,48	116,30	120,54	139,30	99,30	64,26	33,65	29,17	32,97	42,56
CI	0,440	0,332	0,335	0,299	0,268	0,198	0,226	0,276	0,349	0,308	0,424	0,603	0,164
K3	6,17	5,04	4,83	4,42	3,08	2,26	2,91	4,33	5,90	3,67	6,16	11,11	2,25

Qmax : débit maximal ; Qmin : débit minimal ; ET : écart type ; CI : coefficient d'irrégularité ; K3 : $Q_{\text{max}}/Q_{\text{min}}$

Pour la Sanaga à Édéa, le débit de pointe ($Q_{\text{max}0,5}$) est de $3945 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce qui correspond à un temps de décharge (N) égal à 10 jours 13 heures 26 minutes. Le débit ci-dessus convient à une averse moyenne de 2049 mm, soit environ $0,27 \text{ km}^3$ d'eau dans l'ensemble du bassin. Quant à Lom-Pangar, ce débit correspond à $483 \text{ m}^3/\text{s}$, à une décharge 6 jours 22 heures 33 minutes.

III.1.2.3. Régimes hydrologiques

Les débits mensuels de l'année hydrologique moyenne fluctuent assez. Ils présentent un régime monomodal de la confluence de Lom-Pangar à Édéa. On a noté des étiages sévères en mars (73,07 % de cas), en février (17,31 %) ou des étiages tardifs en avril (9,61 % de cas) à Lom-Pangar pourtant qu'à Nachtigal les étiages ont été notés en février (57,69 % de cas) ou en mars (42,31 %). Par contre, les crues ont observées en septembre (76,92 %) ou en octobre (15,38 %). Les débits de l'année hydrologique moyenne présentent presque le même type

d'hydrogramme. L'hydrogramme de l'année moyenne ne présente qu'un pic, marquant l'influence du régime tropical (Fig. 44).

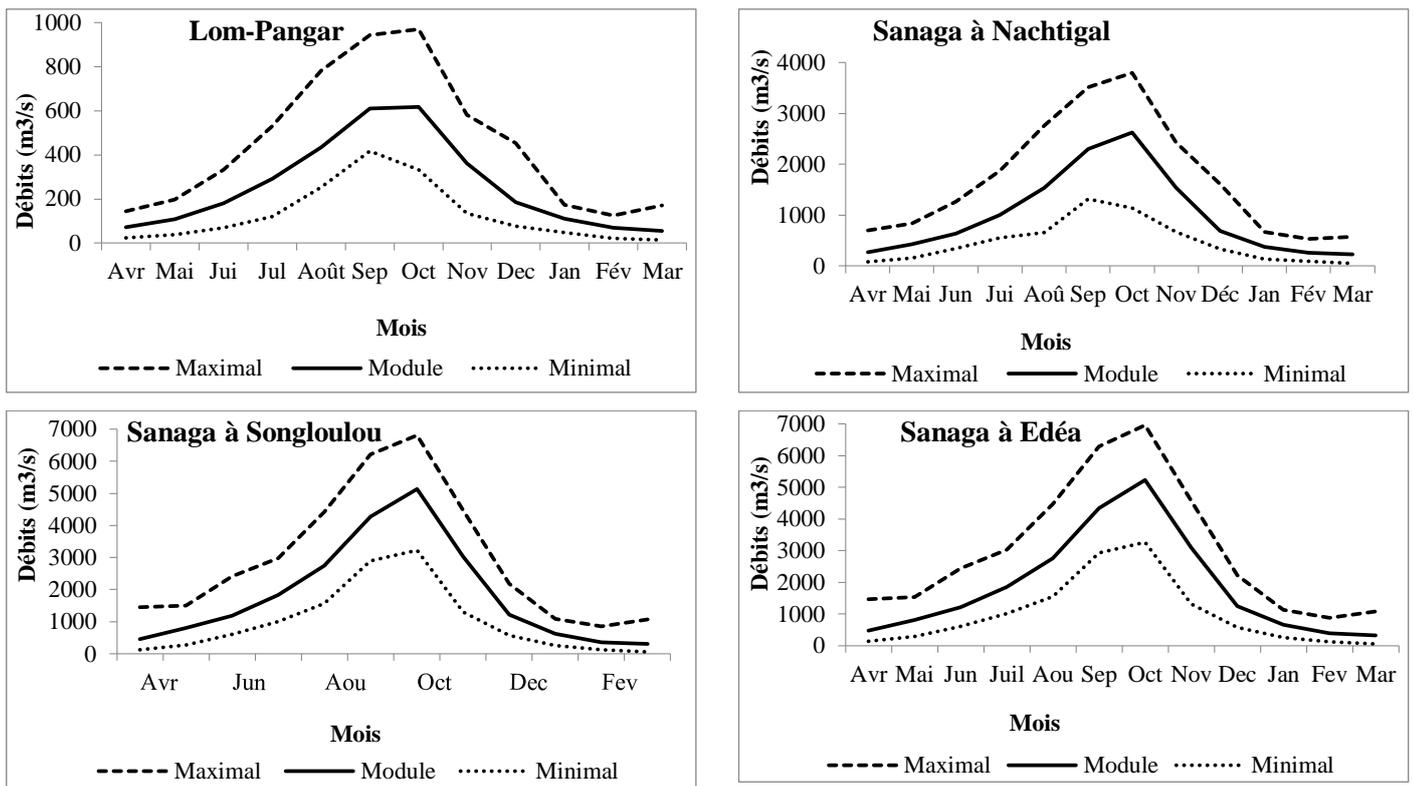


Fig. 44. Débits naturels moyens mensuels de certains exutoires du bassin de la Sanaga de 1950 à 2018

III.1.2.4. Moyennes décennales des débits naturels de la Sanaga à Edéa

On a noté une légère hausse des débits au cours de la décennie 1950-1960, puis une baisse jusqu'en 1990, relayée par un reflux de 1990-2000 pour une légère augmentation des débits naturels au cours de la décennie 2010-2018 (Fig. 45).

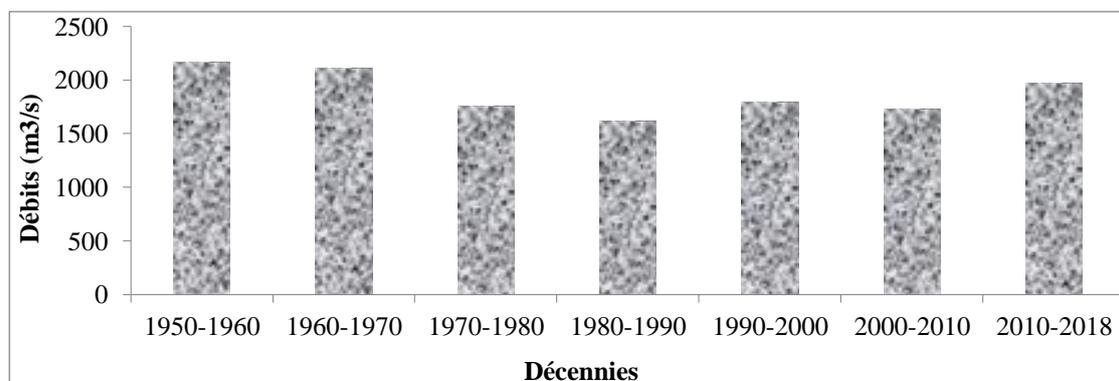


Fig. 45. Moyennes décennales des débits naturels de la Sanaga à Edéa.

III.1.2.8. Energie hydroélectrique potentielle

L'énergie potentielle évaluée ne suit pas la hiérarchisation du bassin du fleuve Sanaga entre Lom-Pangar et Nachtigal (Fig. 46). Cette énergie a varié à Édéa entre $2,458 \times 10^{12}$ Wh

en 2017-2018 et 0,765 en 1983-1984 avec une moyenne de $1,432 \times 10^{12}$ Wh. A Songloulou l'énergie potentielle était comprise entre $0,643 \times 10^{12}$ Wh en 1968-1969 et $0,269 \times 10^{12}$ en 1982-1983 pour une moyenne $0,443 \times 10^{12}$. Pour Nachtigal le maximum a été de $0,285 \times 10^{12}$ Wh en 2009-2010, le minimum 40000000 Wh en 2017-2018 et une moyenne de $0,133 \times 10^{12}$. Le maximum à Lom-Pangar $0,8236 \times 10^{12}$ Wh en 2017-2018, le minimum de $0,449 \times 10^{12}$ en 1982-1983, une moyenne de $0,273 \times 10^{12}$ Wh. Il s'agit de l'évaluation de la puissance hydraulique libérable par les eaux.

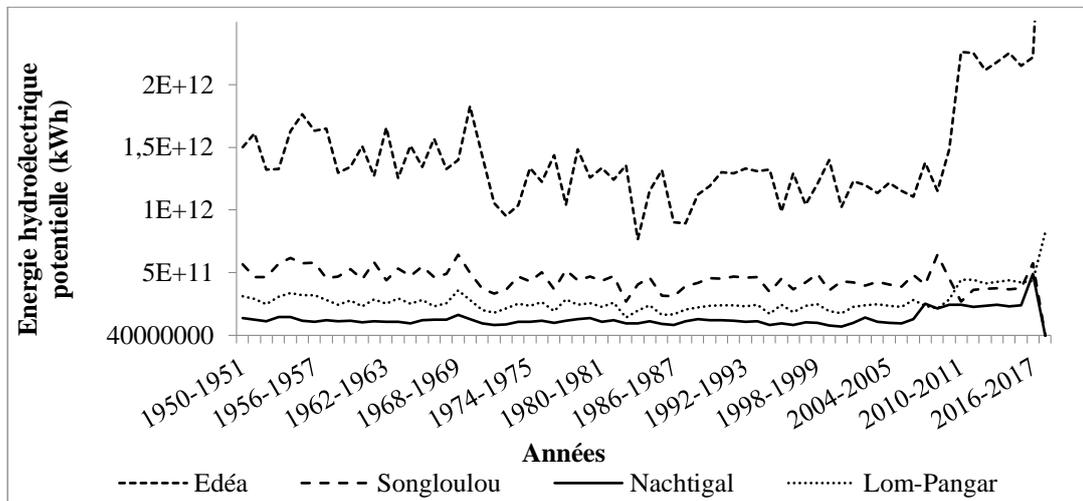


Fig. 46. Evolution de l'énergie hydroélectrique potentielle à certains exutoires du bassin du fleuve Sanaga

Des caractéristiques d'une chute et celles du système turboalternateur, on a déterminé l'énergie hydraulique libérable selon le principe : turbine (0,87) multiplicateur (0,97) alternateur (0,93) les valeurs seuils de chaque chute liée au problème de transmission de puissance dans le cas où la Centrale est constituée d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse (dans certains cas) et d'une génératrice. La charge hydraulique découle de la hauteur nette de chute (Tableau XXXI).

Tableau XXXI. Energie hydraulique libérable par certaines chutes du bassin de la Sanaga

Bassin versant	Station	Superficie (km ²)	Q _{max} (m ³ /s)	HC (m)	PL (MW)	FC en Wh	CH (J/kg)	PHT (10 ³ MW)
Lom-Pangar	Confluence	16100	662,8	14	130,0413	54,5	196,2	102,02751
Sanaga	Nachtigal	76000	3466,7	8	272,0666	21,8	78,48	213,472944
Sanaga	Kikot	103000	4502,6	30	1325,1152	81,75	294,3	1039,974258
Sanaga	Éweng	129000	5464,2	7	375,2266	19,075	68,67	294,4670904
Sanaga	Kan	129000	5464,2	8	428,8304	21,8	78,48	336,5338176
Sanaga	Sackbayémé	129500	5482,4	10	537,8234	27,25	98,1	422,0799606
Sanaga	Song-Loulou	130000	5500,6	22	1187,1395	59,95	215,82	931,6681317
Sanaga	Édéa	131500	5555,2	22,5	1226,1715	61,3125	220,725	962,2763847

Q_{max} : débit maximal ; HC : hauteur de chute ; FC : facteur convertisseur ; CH : charge hydraulique ; PL : puissance légale ; PHT : puissance hydraulique transmissible

La Sanaga à Eweng présente le facteur convertissant le plus faible. Les chutes de Kikot se révèlent comme les chutes les plus productibles donc plus efficaces du bassin de la Sanaga. L'énergie semble plus faible à Song-Loulou qu'à Édéa alors que Nachtigal ne se présente pas comme un potentiel sur lequel on peut mieux compter vue la hauteur à laquelle laisse croire la simulation. Les nuances de considération peuvent provenir des charges hydrauliques élevées de manière antagoniste.

Le tableau XXXII montre que les évaporations dominent sur les précipitations de décembre en mars. L'évaporation varie de 11,15 %, des précipitations en septembre à 502,5 % en décembre. L'écoulement représente 29,5 % des précipitations et le déficit 70,5 %.

Tableau XXXII. Les phases de l'eau au sein du bassin du fleuve Sanaga

Mois	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars
Précipitations (mm)	226,9	278,0	245,5	243,3	358,3	439,2	354,2	137,9	27,6	35	51,3	142,6
Evaporation (mm)	88,0	69,3	52,3	46,7	48,8	49,0	65,1	102,7	138,7	155	160,5	147,5
Écoulement (mm)	66,93	82,01	72,42	71,77	105,69	129,56	104,48	40,68	8,14	10,32	15,13	42,06
Déficit (mm)	159,97	195,99	173,08	171,53	252,61	309,64	249,77	97,22	19,46	24,68	37,17	100,54

III.1.3. Etude de la production hydroélectrique réelle de la Centrale d'Édéa

III.1.3.1. Production réelle de l'énergie hydroélectrique

La production de la Centrale d'Édéa a atteint le maximum en 1978-1979. Elle varie de 1 384 352,6 MW à 1 048 981 MW et sa moyenne est de 1 231 024 MW au cours de la période 1974-1991 (Fig. 47). Le minimum est atteint en 1982-1983. La production évolue au-dessus de la moyenne jusqu'en 1981-1982. Elle chute brutalement en 1982-1983, évolue en dessous de la moyenne malgré une faible augmentation de la production de l'année suivante de 5220 MW d'écart en valeur absolue et 0,49 % en valeur relative. Elle ne la franchit encore qu'en 1990-1991. On ne peut pas noter de variations fréquentielles car, 47 % des valeurs sont en dessous de la moyenne. La droite de tendance confirme la baisse par le coefficient de régression qui est de -10411.

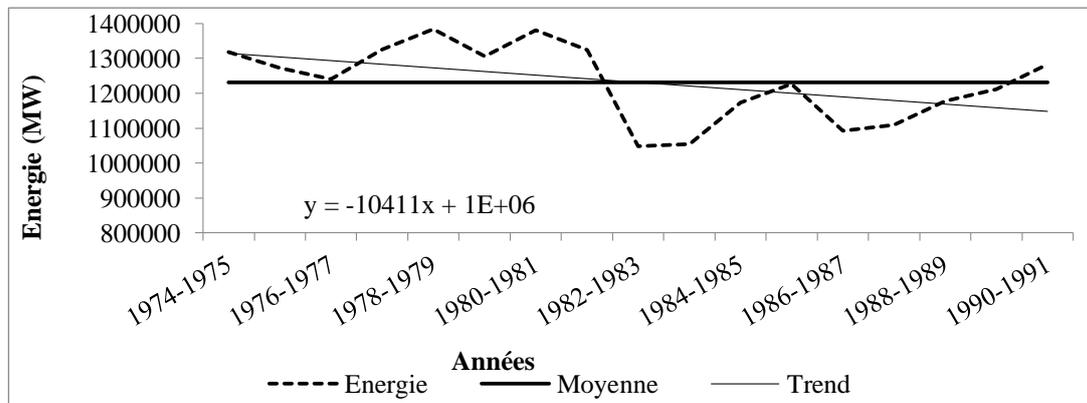


Fig. 47. Production interannuelle de l'énergie réelle à la Centrale hydroélectrique d'Édéa

Sur le plan saisonnier, la production hydroélectrique a connu une chute de novembre à janvier. Cette chute est catastrophique en décembre 1974. Cette chute semble maîtrisée à partir de 1978-1979 puis qu'elle sera moins drastique et légèrement décalée. Ce qui est confirmé par la production de 1984-1985 qui semble constante durant l'année malgré sa relative faiblesse (Fig. 48).

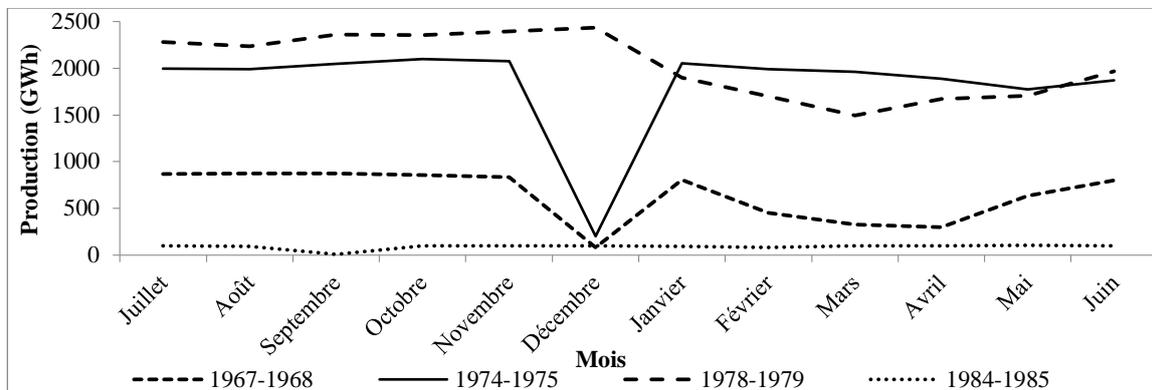


Fig. 48. Production mensuelle de l'énergie hydroélectrique à la Centrale d'Édéa

On peut noter une évolution mensuelle mitigée dans la mesure où l'année 1978-1979 semble exprimer une offre satisfaisante tandis que celle de 1984-1985 frôle même l'arrêt de la Centrale. La production cette année est comprise entre 9,5051 GWh en septembre et 102,3195 en mars. L'offre est inférieure à la demande en énergie qui croît de manière linéaire de 2000 GWh en l'an 2000 à 2221 en 2006 (Fig. 49). Par contre, l'offre est de 1961 GWh en 2000. Elle chute à 1708 GWh en 2001 pour atteindre 1851 en 2003 et 2116 GWh en 2004. Elle atteint enfin 2221 GWh en 2006, c'est-à-dire qu'elle satisfait la demande.

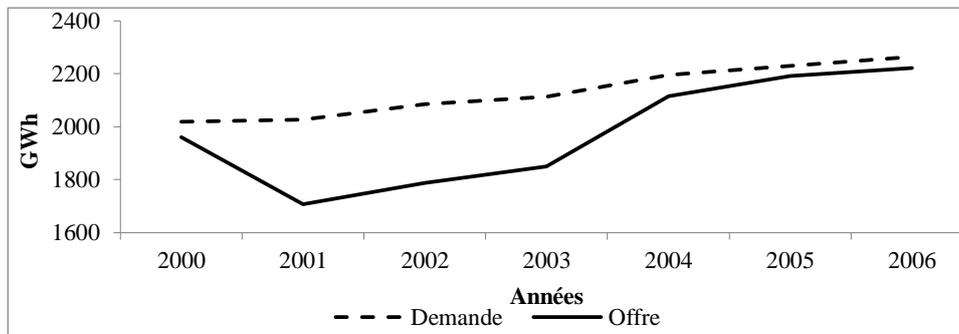


Fig. 49. Evolution de l'offre et de la demande des années 2000 à 2006

III.1.3.5. Corrélation énergie potentielle-et énergie réelle

La mise en relation à l'échelle interannuelle de l'énergie hydroélectrique potentielle (E_p) et l'énergie hydroélectrique réelle (E_r) donne la droite d'équation $E_r = 0,1937 E_p + 831100$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,3769$ (Fig 50a). A l'échelle mensuelle, cette droite devient $E_r = 0,083 E_p + 302859$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,0416$ (Fig 50b). Les coefficients de détermination obtenus ci-dessus correspondent respectivement aux coefficients de corrélation de 61,39 et 0,0416 et 20,39. Ils montrent un lien peu significatif. Ce fait relève du renforcement des débits d'étiage par les barrages de retenus d'une part et d'autre part suite à l'arrêt momentané des machines.

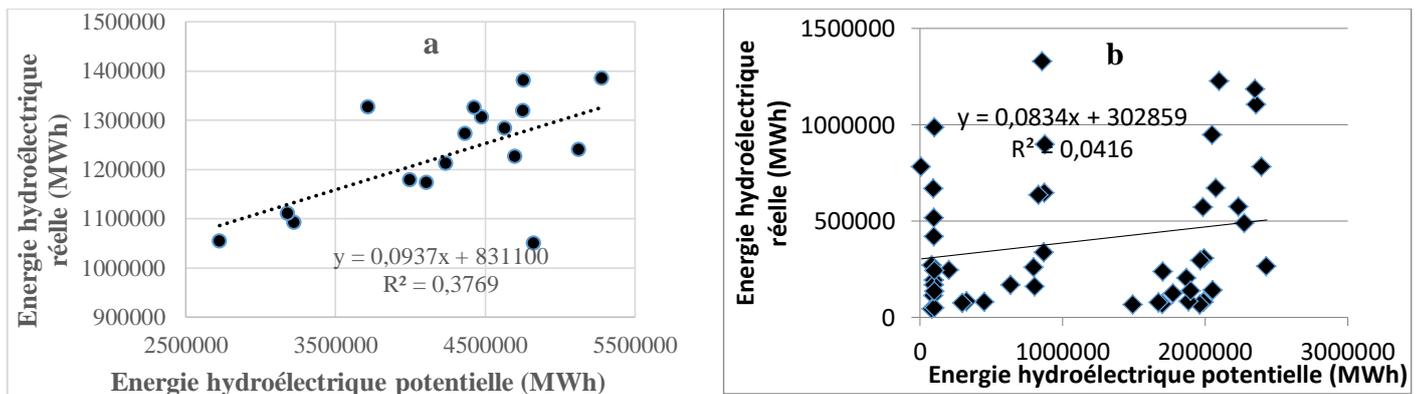


Fig. 50. Corrélation interannuelle (a) et mensuelle (b) entre énergie potentielle et énergie réelle

III.1.3.5. Impact de la sédimentation sur la disponibilité en eau

Le cumul de matières en suspension (MES) représente la sédimentation qui a lieu aux différents exutoires (Fig. 51). Ce cumul de MES affecterait Lom-Pangar dès l'année hydrologique 1983-1984 et intensifié à partir de 1993-1994, Cette situation serait anticipée à Nachtigal en 1967-1968 et aggravée en 1970-1971. Le barrage de Songloulou subit l'effet du cumul de MES depuis 2003-2004 tandis qu'à Edéa, c'est depuis 1982-1983. Le débordement de la courbe du cumul sur celle des débits marque le comblement et l'envasement des barrages qui diminuent leur profondeur et réduisent leur capacité

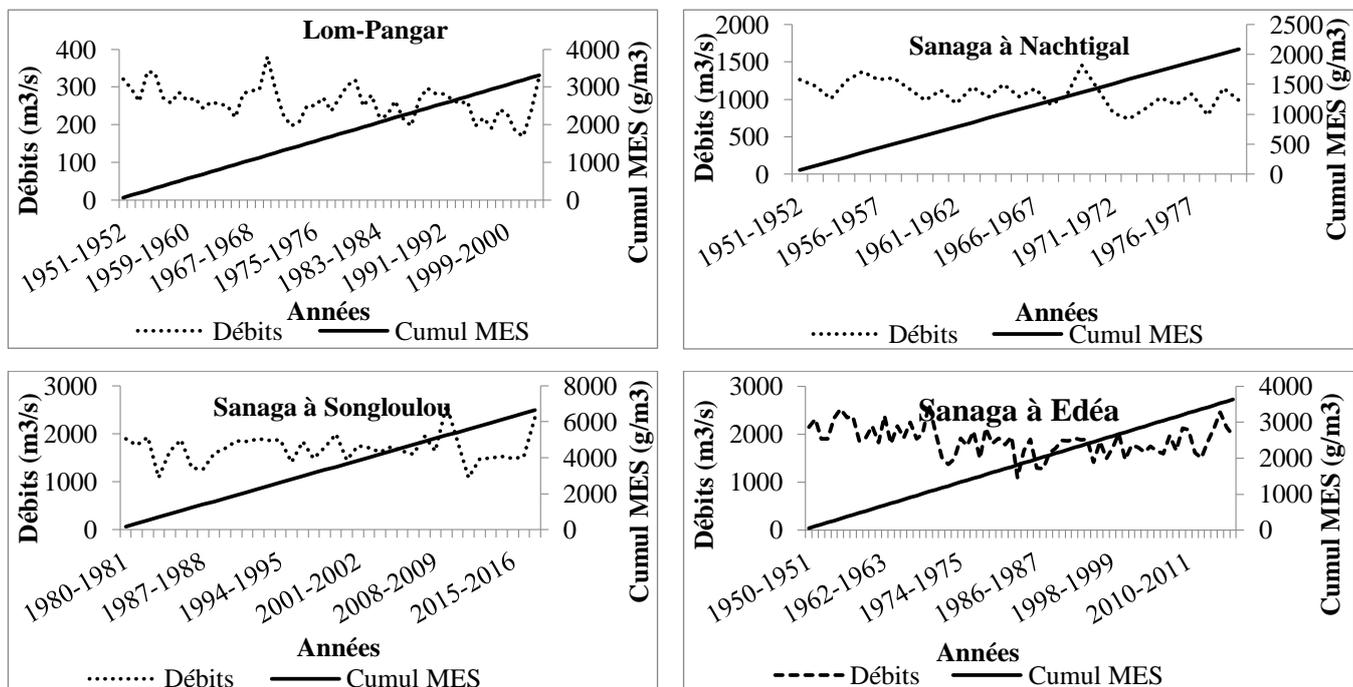


Fig. 51. Effet du cumul de MES sur les débits

Les débits solides varient au cours de l'année avec l'optimum en octobre, permettent d'établir la variation saisonnière des débits solides... Leur variation induit également celle de la quantité de matières emportées par km^2 . Calculés à partir de l'année moyenne de la période d'étude, les débits solides croissent progressivement de février en mars, l'optimum étant atteint en octobre (Tableau XXXIII).

Tableau XXXIII. Variation saisonnière des débits solides et de la dégradation spécifique du bassin versant de la Sanaga

Mois	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars
Débits solides (kg/s)	30,4	51,6	76,8	116,7	174,1	278,6	331,8	195,5	76,9	42,7	20,6	20,2
Dégradation ($\text{Tonnes}/\text{km}^2$)	0,59	1,05	1,51	2,38	3,55	5,49	6,76	3,85	1,56	0,87	0,49	0,41

La lame d'eau qui s'écoule s'amincit au point où elle devient très fine en saison sèche. Au début des pluies, le barrage donne l'impression d'un remplissage anticipé.

III.1.4. Analyse de la dégradation des écosystèmes du bassin versant de la Sanaga

III.1.4.1. Dynamique des écosystèmes au sein du bassin de la Sanaga de 1950 à 2018

La végétation originelle du bassin du fleuve Sanaga au contact de la mer est formée de mangrove caractérisée par *Rhizophora racemosa*, *Rhizophora mangle*, *Avicennia nitida*, *Nyssa fuciflora*. Après ces espèces géantes, se développent une autre formation saumâtre à salinité réduite où on a inventorié *Rhizophora barrisonnii*, *Pandanus candelalorm*, *Pandanus lunatus*. En arrière mangrove, ce sont *Drepanocarpus lunatus*, *Ormocarpum verrucosum* et des palmiers (*Phoenix reclinata*, *Raphia palma-pina*). A côté des mangroves dans la zone côtière de basse

altitude se rencontrent des essences telles que *Lophira alata* (azobé), plus abondant, *Saccaglottis gabonensis* (bidou ou ozouga), *Cynometra bankei* (nkokom), *Coula edulis* (éwoumé). Dans les zones de base et moyenne altitudes, se rencontraient des Sterculiacées (*Trplocbiton scleroxylon*, *Sterculia oblonga*, *S. rhinopetale*, *S. tragocantha*, *Pterygota kamerunensis*), des ulmacées (*Celtis*) des moracées et diverses espèces de *Fucus* (*Terminalia superba*). Les marécages sont occupés par des *Pandamus*, *Raphia*, *Mitragyne*, *Uapaca*.

Les formations d'altitude présentent deux physionomies tant sur les hautes terres de l'Ouest que sur le plateau de l'Adamaoua. Sur les flancs montagnards de l'Ouest, on observe des Guttifères, des Entendrophragma, des *Abizzia*, des *Fucus* alors que les des *Podocarpus*, *Cyathea*, *Raphia*, colonisent certaines zones humides. Au-dessus des plateaux Bamiléké et Bamum, les espèces caractéristiques sont *Albizzia gummifera*, *Carepa grandiflora*, *Syzigium standii*. Le fond des vallées est colonisé par des galeries de palmiers (*Raphia vinifera*, *R. humilis*). Sur les sommets de l'Adamaoua, on a *Sporobolus pyramidalis* et *Srporobolus montanus*.

Les savanes herbeuses et arbustives sont constituées d'un paysage graminéen à base d'andropogonées à *Hyparrhenia rufa*, *Loudetia glebra*, *Pennisetumm perpereum* (sissongo). Les arbres et arbustes sont *Baubinca rhonengii*, *Annoma senegalis*, *Albizzia sp.*, *Entenda abussinica*, *Hymemocardia acida*, *Lannea sp.*, *Lophira lanceolata*, *Psosospermum febrifugum*, *Terminalia glauscens*.

L'analyse texturale, spectrale et spatiale suivant les bandes images NDVI, a favorisé la détermination de quatre formations au total (Fig. 52) à des proportions non négligeables

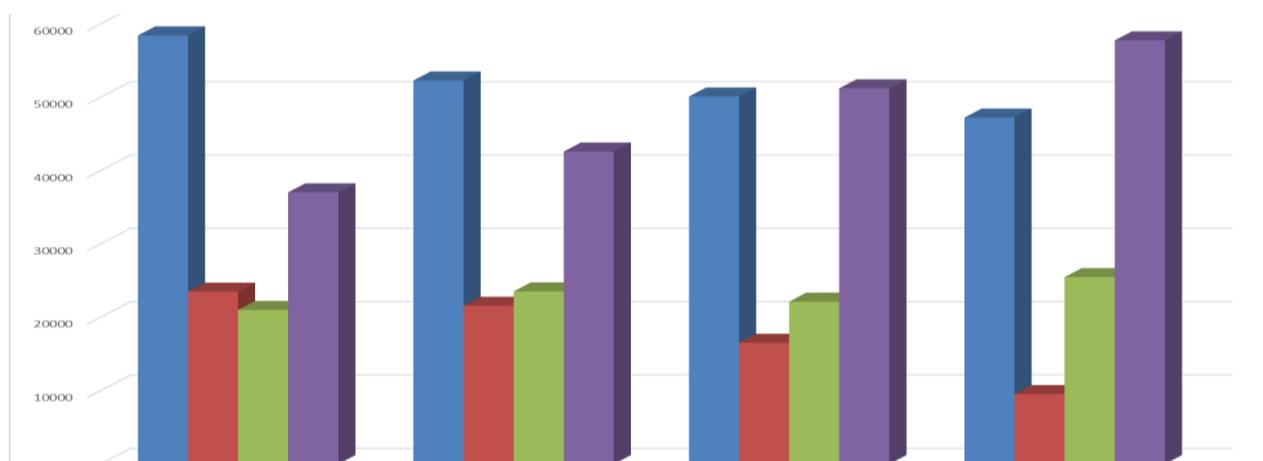


Fig. 52. Classification des images utilisées à 9 pixels, à 5 pixels et à 1 pixel.

■ Forêt dense ■ Forêt dégradée ■ Mosaïque de cultures ■ Savane

Le traitement des images satellitaires a permis de dégager trois formations végétales essentielles qui couvrent le bassin. La formation forestière se présente sous deux états, la mosaïque de culture et les savanes (Fig. 53).

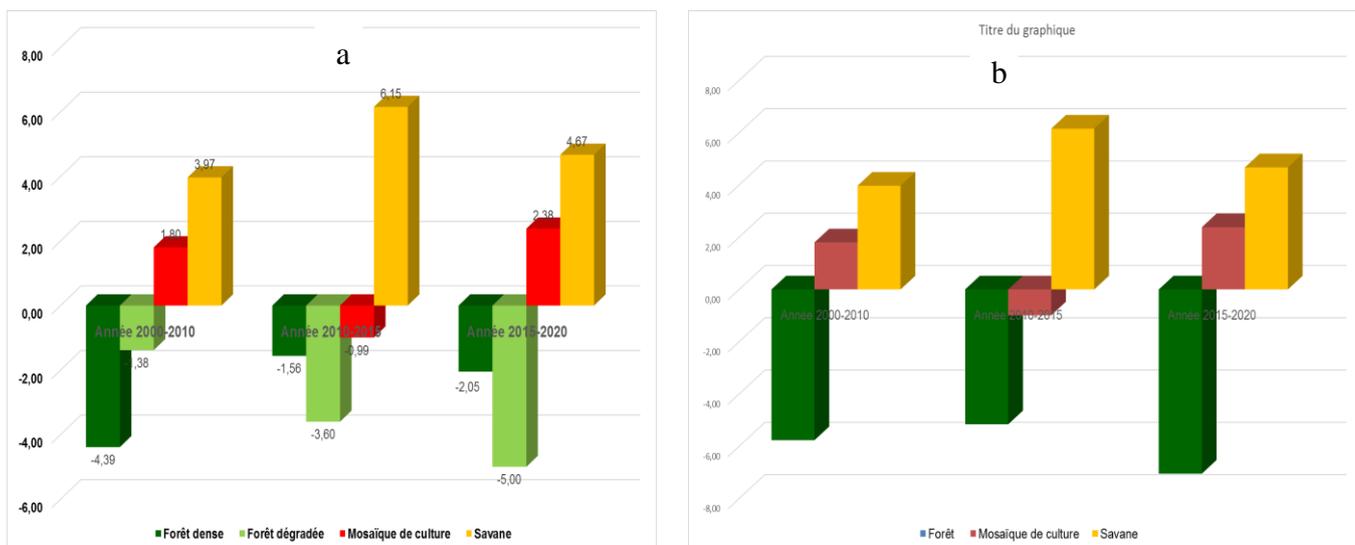


Fig. 53. Indices de représentations des écosystèmes dans le bassin de la Sanaga

L'analyse des images pour quatre épisodes de 2000 à 2020 a permis d'évaluer quantitativement les superficies disparues des forêts et celles régénérés des savanes et de la mosaïque des cultures (Tableau XXXIV). On a pu estimer de manière relative, la proportion de chaque type de formation végétale en place.

Tableau. XXXIV. Résultats d'interprétation des images satellitaires du bassin versant de la Sanaga

	Classes d'occupation du sol (en km²)	Proportion d'occupation (en %)	Evolution ou recul/avancée (en km²)	Proportion de dégradation (en %)	Résultante par épisode d'observation (en %)
Année 2000					
Forêt dense	58452	41,7341387	-6142	-4,39	-5,77
Forêt dégradée	23521	16,7937569	-1937	-1,38	
Mosaïque de culture	21026	15,012352	2522	1,80	1,80
Savane	37059	26,4597524	5557	3,97	3,97
Année 2010					
Forêt dense	52310	37,3488126	-2187	-1,56	-5,16
Forêt dégradée	21584	15,4107584	-5041	-3,60	
Mosaïque de culture	23548	16,8130346	-1390	-0,99	-0,99
Savane	42616	30,4273944	8618	6,15	6,15
Année 2015					
Forêt dense	50123	35,7873167	-2872	-2,05	-7,05
Forêt dégradée	16543	11,8115352	-7001	-5,00	
Mosaïque de culture	22158	15,8205886	3334	2,38	2,38
Savane	51234	36,5805595	6539	4,67	4,67
Année 2020					
Forêt dense	47251	33,7367376	-11201	-8,00	-17,98
Forêt dégradée	9542	6,8128918	-13979	-9,98	
Mosaïque de culture	25492	18,201031	4466	3,19	3,19
Savane	57773	41,2493396	20714	14,79	14,79

Les quatre épisodes d'observation du bassin versant de la Sanaga illustrent des nuances du développement du couvert végétal dans l'espace et dans le temps. Toutefois, d'un épisode à un autre, sont mises en évidence des disparités de formations écologiques (Fig.63). Le constat qu'on peut relever de la figure 54 est celui du recul de la forêt de 2000 à 2020. Ce processus se passe par étape à savoir la substitution de la forêt dense par la forêt secondaire qui fait place à la savane, plus tard remplacée par la mosaïque de cultures et d'autres formations d'espèces banales. De l'année 2000 à 2020, le couvert végétal a subi des modifications au sein du bassin. Si en l'an 2000 la savane était présente en amont du bassin c'est-à-dire sur l'Adamaoua et les hauts plateaux de l'Ouest ainsi que quelques lambeaux isolés de mosaïque de cultures, en 2010, la trouée de savane des encablures de Bafia s'est étendue au nord de Yaoundé et dans la Haute Sanaga. La mosaïque de cultures s'est développée davantage. La situation s'est aggravée en 2015 au point où en 2020, la surface occupée par la forêt dense a considérablement diminué, celle de la forêt secondaire presque disparue. Ces formations forestières font progressivement place à la savane et à la mosaïque de cultures.

On peut remarquer deux grandes formations végétales à savoir la forêt de basse et de moyenne altitudes et la savane arbustive des hauts plateaux de l'Ouest et de l'Adamaoua qui est dégradée proches des villes de l'Adamaoua. De l'embouchure du fleuve Sanaga au plateau de l'Adamaoua selon l'orientation SW-NE, on passait en 2000 de la forêt verte littorale à la savane quelquefois dégradée par endroits dans les environs de N'Gaoundéré, au Nord de Meiganga et de Banyo. La forêt littorale va de l'embouchure, aux encablures de Nkong-Kwala. Cette formation végétale est contiguë à la forêt caducifoliée qui domine le bassin de Nkong-Kwala (en aval de Bafia) à Bétaré-Oya, malgré une trouée de forêt toujours verte d'altitude observée au niveau des Monts Linté d'une part et de savane arbustive dégradée sur les Monts Mbapit et Nkogam d'autre part. De l'amont de Bétaré-Oya à la limite septentrionale du bassin, se rencontre une forêt toujours verte d'altitude pénétrée par une savane arbustive.

Environ dix années plus tard (2010), la végétation s'est dégradée davantage avec la formation de la forêt secondaire et de la savane au Nord-Est de Yaoundé.

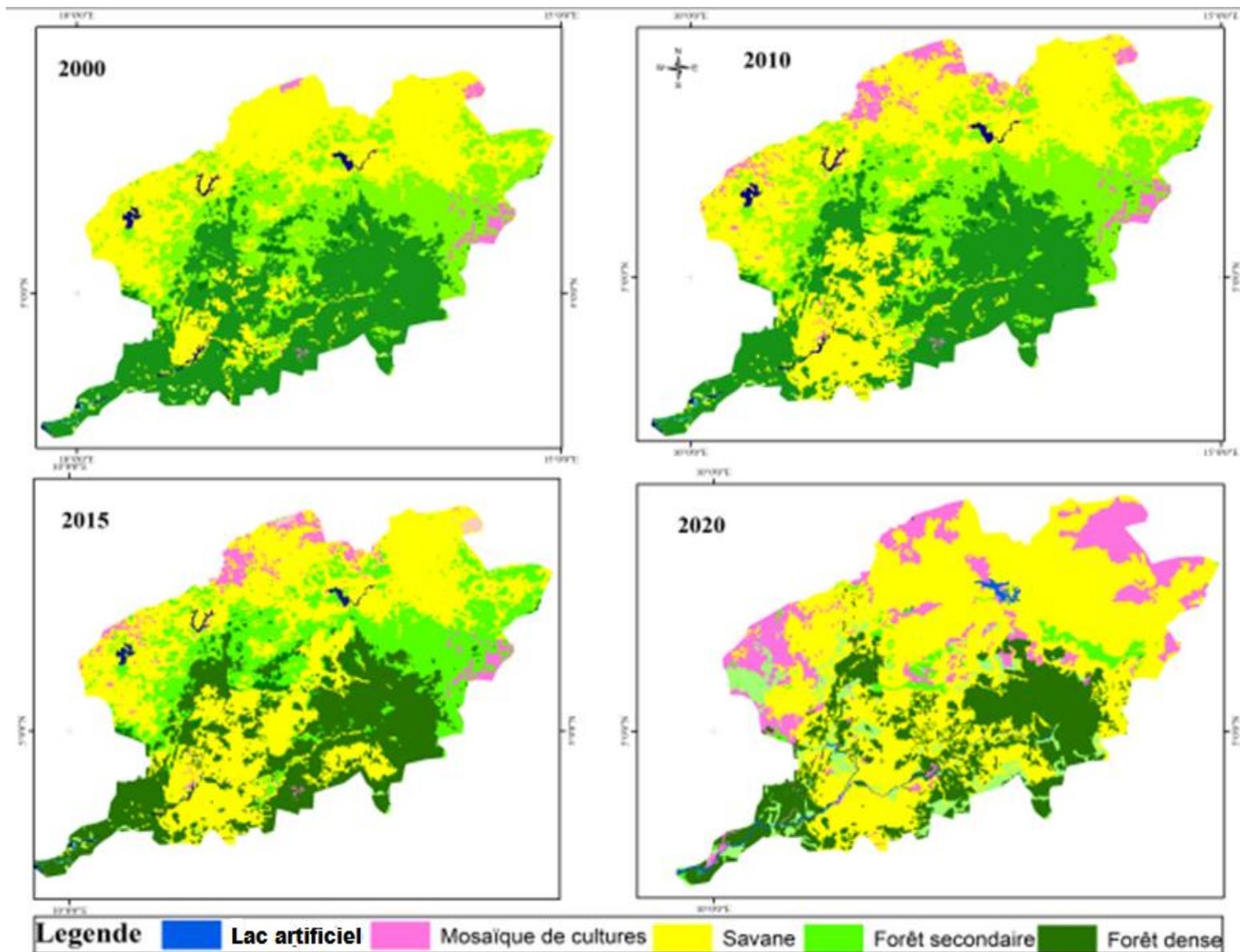


Fig. 54. Dynamique du couvert végétal dans le bassin du fleuve Sanaga

Vers l'embouchure, se sont formées des trouées par endroits de forêt secondaire entre l'embouchure et Édéa. Une partie de savane a fait place à la mosaïque de cultures au Nord de Banyo aux pieds des monts Mambila et Tchabal et une autre s'est mise en place non loin de Bétaré-Oya. Cette formation a progressé vers l'aval. Cinq ans après (2015) l'épisode précédent, la végétation s'est dégradée. La forêt toujours verte ne se présente que sous forme de forêt communautaire ou d'aire protégée (réserve Édéa-Douala). Les forêts originelles ont cédé la place à la forêt secondaire, aux jachères ou à la régénération forestière.

En 2020 c'est-à-dire cinq ans après l'épisode antérieur, les formations végétales tendent à la disparition totale. Le bassin se dénude progressivement. L'étendue des retenues se rétrécit. On peut trouver des forêts galeries, des forêts sempervirentes de basses et de moyennes altitudes développées autour des forêts communautaires et des aires protégées (réserve Douala-Édéa, parc de Deng-Deng). On note des savanes de vastes étendues parsemées d'arbres et même d'eau constituant des lacs de retenue pour la régulation du cours inférieur de la Sanaga. On peut alors retenir l'avancée de la savane dans la forêt et le développement de la mosaïque de cultures. Du comportement du couvert végétal dans l'espace et dans le temps au sein du bassin de la Sanaga, une analyse du comportement des précipitations et des températures dans les différentes zones agroécologiques que couvre le bassin est nécessaire afin d'étudier l'origine naturelle de cette dégradation.

De 2000 à 2020, on a évalué à 25172 km² de forêt détruite soit -17,98 % de la forêt préexistante. Cependant, la mosaïque de culture a progressé de 4466 km² soit 3,19 % tandis que la savane a gagné 20706 km² soit 14,79 % (Tableau XXXIV).

La figure 54 renseigne que la végétation du bassin de la Sanaga se développe des formations forestières de basse et de moyenne altitudes, aux paysages savaniques de la côte vers le plateau de l'Adamaoua. Ainsi, deux grandes formations peuvent être dégagées à savoir la forêt dense humide d'une part et la zone soudano-graminéenne à formations mixtes de forêt et de graminées, avec quelques particularités relevées dans des contrées d'altitude. La perte de la forêt dans zone côtière de basse altitude, traduit la réduction de la population des essences préexistantes qui ont fait place à *Coco nucifera*, *Nype fucticans* en zone de mangrove, à *Imperata cylindrica* en basses et moyenne altitude, le fromager (*Ceiba pentandra*) et le parasolier (*Musanga smithii*) marquant la présence humaine. Les activités menées en zone d'altitude des hautes terres de l'ouest ont favorisé le remplacement de la végétation originelle par des *Sporobolus* des bambous (*Arundinaria alpina* et

Adrenocarpus manni. Par contre, le remplacement des savanes herbeuses et arbustives originelles des suites d'agriculture et d'élevage ont permis la mise en place des *Sporobolus*.

La création des plantations de palmiers à huile, de bananiers d'hévéa, de cacaoyers, de caféiers, de tabac, de canne à sucre la conquête des espaces fonciers et le développement des villes constituent les principales raisons de dégradation du couvert végétal. La forêt semi-décidue subit la diminution des *Celtis* et *Sterculiacées* qui la peuplaient. Ceci a également pour conséquence la rareté des *Marantacées* du sous-bois.

III.1.4.2. Régulations et contrastes climatiques en montagne

L'étude des précipitations et des températures sur le bassin du fleuve Sanaga selon les régimes pluviométriques a tendance à masquer l'influence des zones agroécologiques (ZAE) traversées. Le bassin du fleuve Sanaga recoupe quatre aires agroécologiques du Cameroun pour trois nuances climatiques (Fig. 37). L'analyse des séries chronologiques de la figure 60, permet de relever des épisodes de chute et de relèvement des précipitations. Sur le plateau de l'Adamaoua, on peut observer une alternance de chute (1932-1953 ; 1970-1990) et de hausse (1954-1969 ; 1991-2021). Sur les hauts plateaux de l'Ouest, on ne peut qualifier avec exactitude le comportement des précipitations jusqu'en 1966. De 1967 à 1985, une légère hausse est marquée après laquelle la chute continue est observée exceptées quelques situations isolées. Sur le plateau Sud camerounais, on ne peut qualifier le comportement des précipitations avant 1950.

Abordant l'analyse du comportement de la température par zone agroécologique, l'écart à la moyenne des températures révèle que si les autres parties du bassin du bassin l'élévation des températures a commencé à se manifester en début des années 1990, c'est plutôt en début des années 2000 qu'on peut la remarquer sur les Hauts Plateaux. Ce comportement est bien illustré par les écarts à la moyenne (Fig. 55).

Le rapport à la moyenne des températures moyennes mensuelles suit la même tendance que les écarts à la moyenne des températures. Les moyennes décennales montrent une augmentation progressive et continue des températures dans toutes les zones agroécologiques qui couvrent le bassin de la Sanaga (Fig. 55). Seulement, au sein du plateau de l'Adamaoua, les températures moyennes décennales ont tendance à se stabiliser.

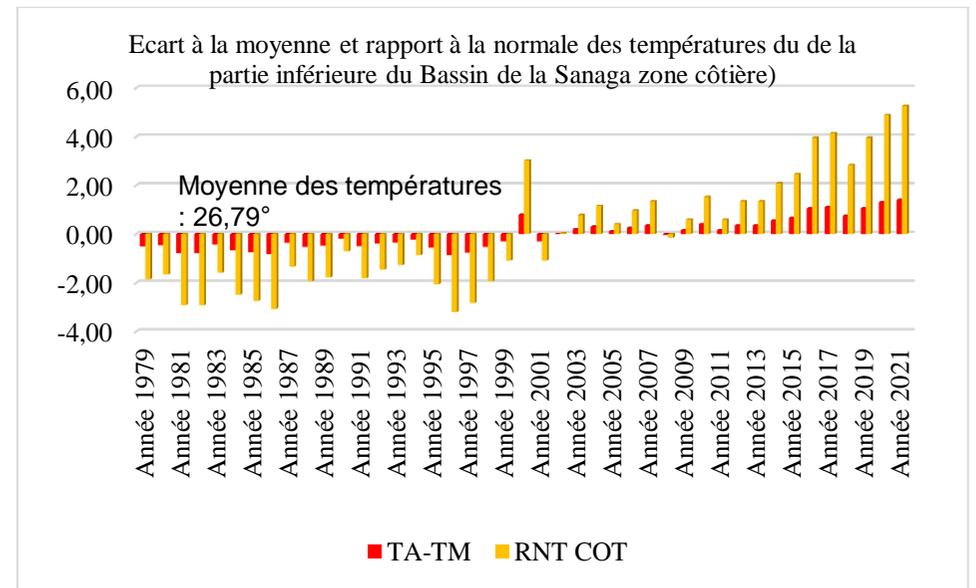
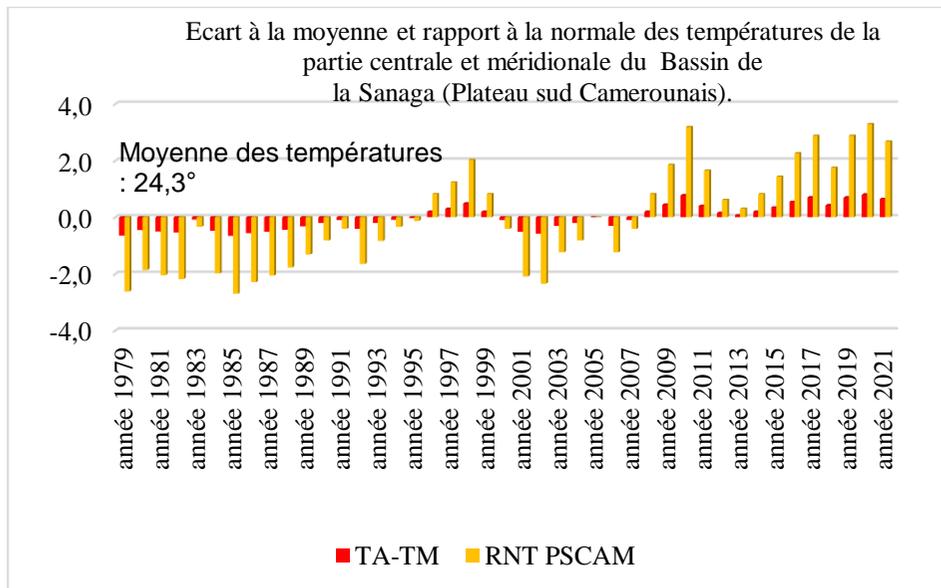
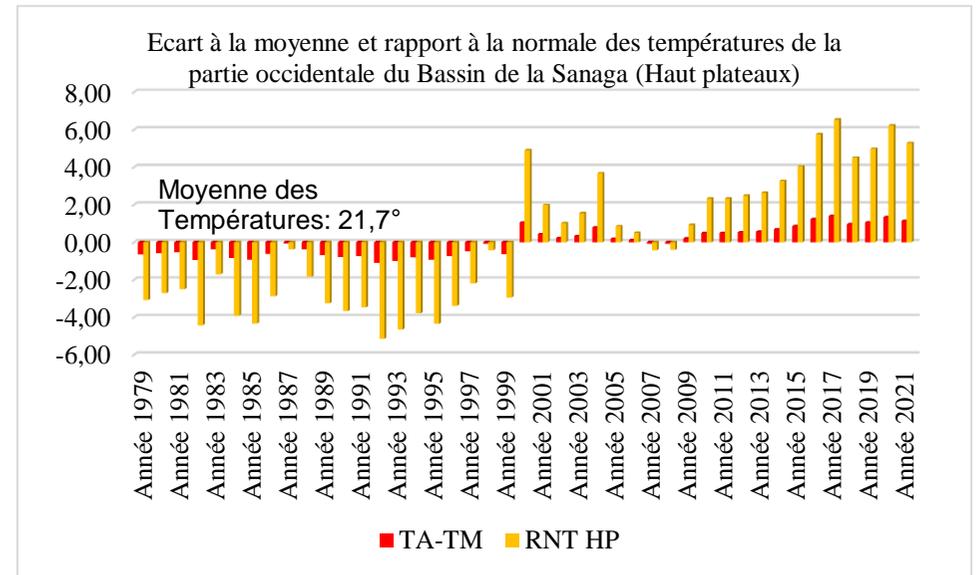
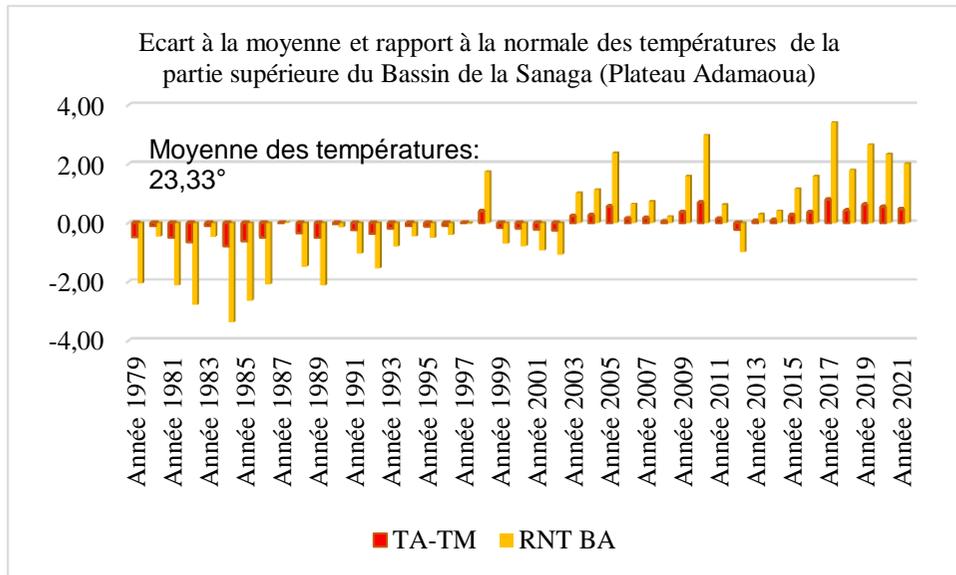


Fig. 55. Ecart à la moyenne et rapport à la normale des températures du bassin du fleuve Sanaga

L'augmentation des températures sur l'ensemble des zones agroécologiques est associée plutôt à la baisse assez remarquable des précipitations sur la majeure partie du bassin versant de la Sanaga.

Les moyennes décennales des précipitations tendent à la chute dans les Hauts Plateaux de l'Ouest et le plateau Sud camerounais, tendance à la hausse dans le plateau de l'Adamaoua et une tendance plus ou moins constante sur la plaine côtière (Fig. 56).

La construction des abaques hydrothermiques des zones agroécologiques qui couvrent le bassin de la Sanaga a permis de déceler huit temps au courant de l'année dans chacune des zones agroécologiques, malgré la disparité des facteurs locaux qui peuvent influencer le climat (Fig. 57). En affinant l'analyse des conditions déterminantes de la disponibilité de l'eau dans chaque domaine, on a pu distinguer.

- A1 et C1 : période où $P < ETP/2$;
- A2 et C2 : période intermédiaire pour $P > ETP/2$;
- A2 : période subsèche ;
- B1 : période pré-humide pour $ETP/2 < P < ETP$;
- B2 : période où $P > ETP$
- C2: période post humide pour $ETP < P < ETP$;
- B1-B2 : période humide pour $P > ETP$
- A2-C2 : période active pour la végétation pour $P > ETP/2$

Les abaques dans chacune des ZAE présentent sept situations hydrothermiques d'importance variable d'un milieu à un autre au cours de l'année moyenne. Ces abaques montrent qu'il ne se passe de mois sans pluie sur l'ensemble du bassin, même comme les quantités de précipitations tombées sur le plateau de l'Adamaoua sont faibles de décembre à février. Les montagnes jouent le triple rôle de régulateur thermique, moteur pluviogène et îlot de fraîcheur. La forte diversité orographique du pays influence les régimes bioclimatiques, en raison de son extension en latitude, de sa localisation au contact des domaines climatiques ouest et centre africains, des édifices orographiques ainsi que de sa situation au creux du Golfe de Guinée. Les observations des abaques hydrothermiques (figure 70) montrent qu'il pleut assez en montagne et beaucoup sur la côte.

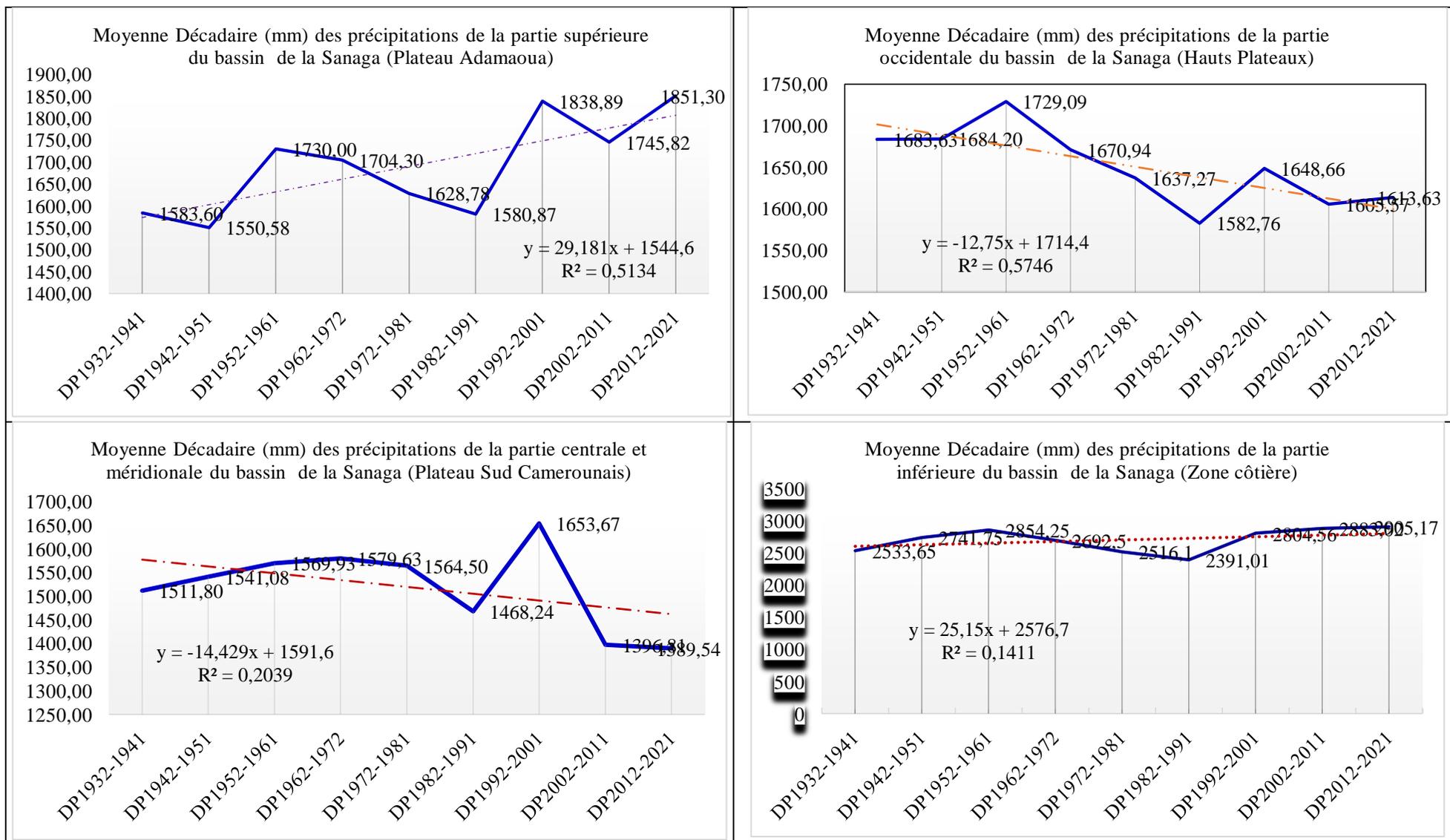


Fig. 56. Moyenne décadaire (mm) des précipitations du bassin du fleuve Sanaga

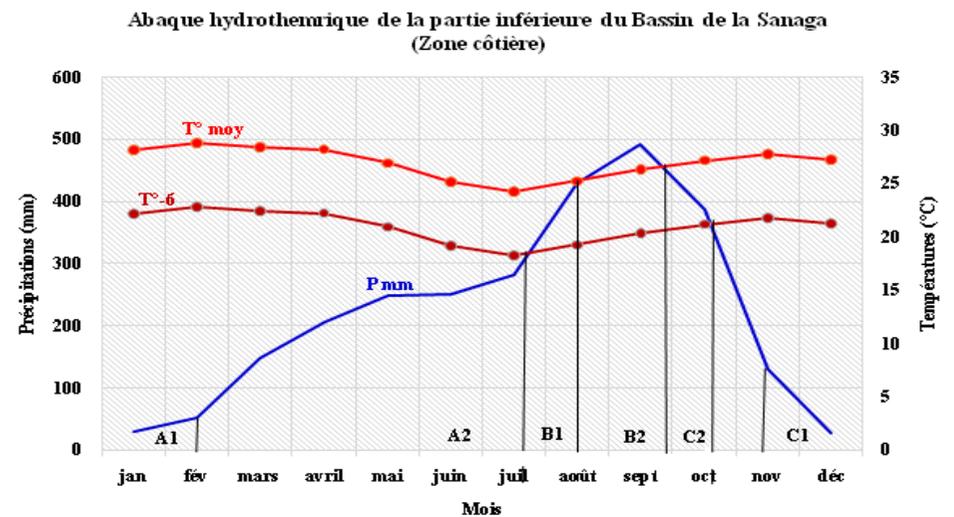
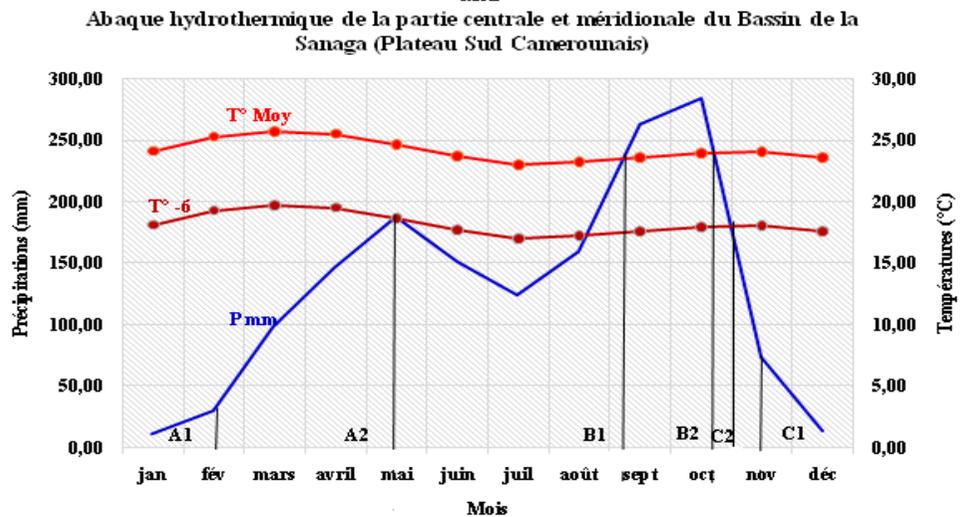
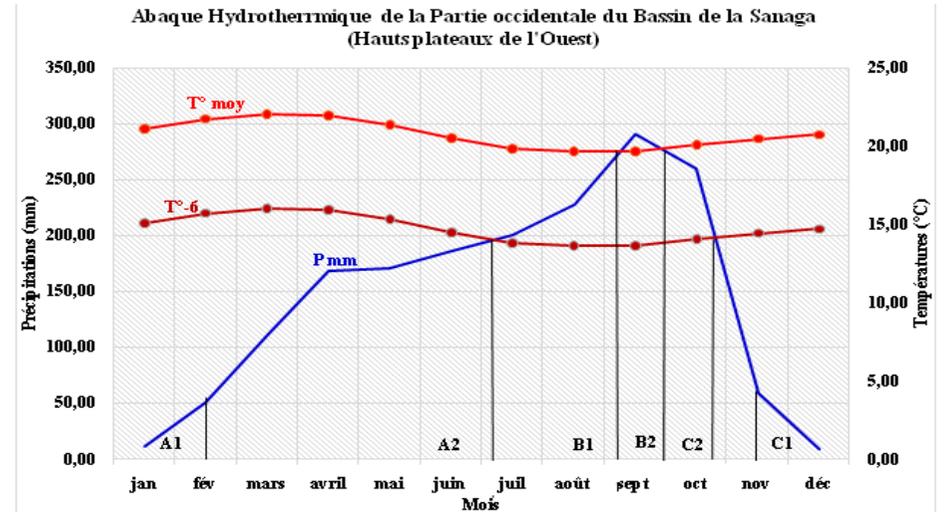
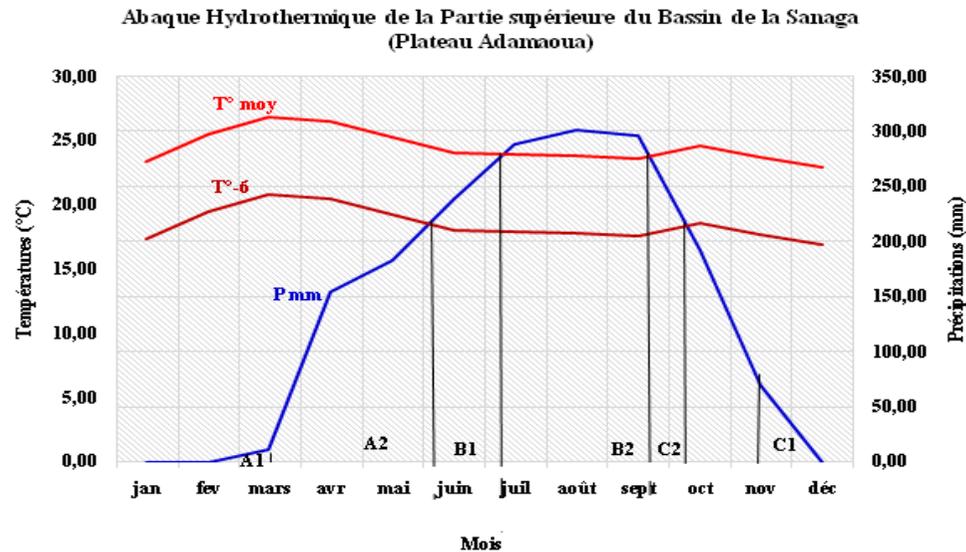


Fig. 57. Abaques hydrothermiques des zones agroécologiques du bassin de la Sanaga.

A1 et C1 : période où $P < ETP/2$; A2 et C2 : période intermédiaire pour $P > ETP/2$; A2 : période subsèche ;
 B1 : période pré-humide pour $ETP/2 < P < ETP$; B2 : période où $P > ETP$
 C2 : période post humide pour $ETP < P < ETP$; B1-B2 : période humide pour $P > ETP$
 A2-C2 : période active pour la végétation pour $P > ETP/2$

La période active pour la végétation est plus longue sur le plateau sud camerounais (mai à novembre), assez réduite sur l'Adamaoua (juin-octobre), plus courte sur les hauts plateaux sud de l'Ouest et sur la plaine côtière (septembre-octobre).

Une fois les précipitations et températures moyennes annuelles étudiées, nous avons procédé à la combinaison des mêmes paramètres à l'échelle mensuelle de l'année moyenne afin de déceler les conditions climatiques propices au développement de la végétation au cours de l'année (Fig. 37). Des quatre abaques construits, trois présentent un régime tropical. Seul le plateau sud camerounais illustre un régime équatorial.

III.1.4.2. Corrélations facteurs climatiques et écoulements au sein du bassin du fleuve Sanaga de 1950 à 2018

Les températures moyennes mensuelles ont varié de 22,9 °C en août 1950-1975 à 26,2 °C en mars 1985-2000 (Fig 71). L'amplitude thermique par épisode varie de 2,6 à 2,8 °C. Les minima ont progressé : 22,9 °C (Fig. 71a) ; 23,1°C (Fig. 71b) ; 23,5°C (Fig. 71c). Les maxima ont suivi la même tendance de 25,5°C à 26,2 °C en passant par 25,9°C. L'épisode illustré par la figure 71d, revient sur l'épisode de la figure 71b, avec les mêmes extrema de 23,1°C et 25,9 °C. Cependant, l'écart des températures de novembre à janvier est faible ou constant. Les quantités de précipitations varient très peu dans le temps en milieu tropical humide (TH). Elles y présentent une même allure. En milieu équatorial type camerounien, le pic des averses bascule de juillet (Fig.71a) à septembre (Fig. 71b). Ce pic recule en août-septembre (Fig. 71c et Fig. 71d). En milieu équatorial type guinéen, l'allure des précipitations est similaire dans le temps, mais des particularités peuvent être relevées dans la série à chaque épisode. En comparant le pluviogramme de 1975 à celui de 1985, on relève un changement de comportement des précipitations illustré par la position des pics.

III.1.4.3. Influence anthropique

La figure suivante montre un champ aménagé à la suite d'une cacaoyère plantée derrière les cases. Cette cacaoyère est protégée par l'ombrage des grands arbres. Ce champ est un mélange de cultures saisonnières et annuelles. La pratique culturale est une agriculture itinérante sur brûlis basée sur le labour à la houe (Fig. 58). Arrosé par une pluviométrie abondante (comprise entre 1313,35 mm et 3335,9 mm, le bassin versant du

fleuve Sanaga subit à la fois l'influence de la mousson, de l'altitude (hautes terres de l'ouest) et de la continentalité.



Fig. 58. Brûlis et houage au sein du bassin de la Sanaga.

Cette photo montre comment les activités agricoles contribuent à la fragilisation des sols et à la dégradation du bassin de la Sanaga par leur apport à l'érosion.

On a relevé trois domaines biogéographiques (Tableau XXXV) : la zone forestière faiblement peuplée sans élevage bovin (plateau Sud camerounais et aval du bassin) ; la zone sensible de contact forêt-savane vers l'Adamaoua, faiblement peuplée où se développe l'élevage bovin (Sud du plateau de l'Adamaoua) et les hautes terres de l'ouest densément peuplée où coexistent l'élevage bovin et l'agriculture (plateau Bamoun).

Tableau XXXV. Domaines biogéochimiques dans le bassin du fleuve Sanaga

Caractéristiques	Zone forestière	Contact forêt-savane	Hautes terres de l'ouest
Influence des précipitations	Mousson	Continentalité	Altitude
Sols	Ferrallitiques	Latéritiques	Volcaniques
Topographie	Plane	Ondulée	Montagneuse
Ressources en eau	Abondante	Moyenne	Faible
Densité de population	Faible	Faible	Forte
Habitude alimentaires	Base tubercules	Base céréales	Tubercules et céréales
Activité économique dominante	Agriculture	Élevage	Agriculture et élevage

Le choix des cultures dépend des localités, des habitudes alimentaires, mais aussi des conditions géoclimatiques. La pratique culturale est liée au type de sol, à la topographie et aux ressources en eau. Les activités humaines sont plus intenses dans les localités à fortes concentrations démographiques du bassin. L'élevage se développe un peu en altitude tandis que l'agriculture rejoint les plateaux et les zones encaissantes. La disponibilité de l'eau est importante pour l'installation et la répartition des populations. La variabilité de l'eau induit une certaine perception du milieu.

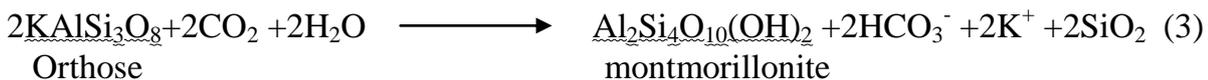
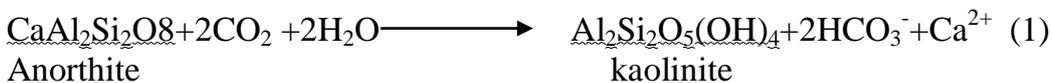
III.1.4.5. Processus d'érosion

Le bassin de la Sanaga présente deux grandes formations géologiques presque d'égale extension, une série magmatique en amont et une série métamorphique en aval (Tableau XXXVI).

Tableau XXXVI. Géomorphologie et processus d'érosion

Séries	Sommets	Altitude (m)	Formations	Type d'érosion
Intrusives et effusives	Nkogam	2263	Basaltiques	Sélectif
	Mbapit	1989		Sélectif
	Ngoro	1885		Régressif
	Yangha	1475	Granites intrusifs	Régressif
	Adamaoua	1250		Pédogénétique
Cristallophylliennes	Linté	1293	Gneiss et micaschistes	Régressif
	Dépressions	Variable	Sédimentaires	Hydromorphie

Les roches magmatiques mises en place en altitude sont couvertes par les trois grandes zones climatiques. Par contre dans les dépressions, se développent des nappes d'eau permanentes où se déposent les roches sédimentaires. Sur les plateaux sans écoulement, l'érosion pédogénétique a conduit à la formation des pseudogleys. Elle a mis en place des sols caractéristiques (tourbes et gleys, sols à argiles blanchâtres ou grises du Djérem) dans les zones dominées par l'hydromorphie. La présence des sommets importants accélère le ruissellement et accentue l'érosion. La roche riche en minéraux facilement altérables comme la biotite donnera des sols plus épais que celle contenant plus d'orthose par exemple. Les principaux minéraux dont l'altération chimique produit les cations majeurs dans le site sont les minéraux silicatés (feldspaths) et les ferromagnésiens. Ces réactions d'hydrolyse peuvent se schématiser comme suit :



Les matières dissoutes qui migrent (flux), marquent l'altération chimique du bassin versant suivant l'équation :



L'équation (5) montre que les cations sont produits essentiellement au cours de l'altération chimique. Sous les climats tropical et équatorial, les roches à l'origine des sols subissent une hydrolyse acide qui peut être totale ou partielle suivant les températures et précipitations.

III.1.4.6. Nature du substratum (géologie) et des sols

Le bassin du fleuve Sanaga est constitué par divers types de sols et de formations géologiques. Les sols ferrallitiques sont bordés à l'Est par des sols faiblement ferrallitiques qui se limitent à la série du Lom (à schistes et micaschistes). Ils sont continus et imbriqués par des sols indurés jusqu'aux limites des hautes terres de l'ouest (Tableau XXXVII).

Tableau XXXVII. Types de sols et substratum selon les localités

Localités	Nature du substratum	Type de sols
Bafoussam	Cendres volcaniques	Ferrallitiques fortement développés
Bamenda	Basaltes	Sols ferrallitiques humifères
Foumban	Basaltes	Epais caillouteux
Koundem	Basaltes	Sols ferrallitiques humifères
Mambila	Rhyolites	Sables grossiers

Toutes ces formations pédologiques sont ceinturées du côté Ouest par des sols modaux sur des cendres volcaniques (Bafoussam, Foumbot), des sols organiques (Koundem) et des sols humifères noirs qui longent les Monts Mambila et Bamenda. Les sols ameublissent favorisent le départ des matières particulaires et dissoutes. Les matières particulaires sont d'ailleurs observées par la turbidité de l'eau et évaluées par les MES. Les sédiments piégés au niveau des barrages au fil des ans se tassent.

III.1.4.7. Dégradabilité du bassin de la Sanaga et problème de ressources en eau

Les facteurs topographiques (inclinaison et longueur des pentes, répartition longitudinale et spatiale des pentes) et hydrologiques (nature et résistance des sols) déterminent l'apparition du ruissellement en nappe, un déficit d'infiltration et l'apparition des ravines qui se ramifient et s'allongent par l'érosion régressive, contribuant au comblement et à l'envasement des réservoirs, couplés au déficit d'écoulement pour provoquer en aval du bassin versant, des dépôts de matériaux (galets, sables grossiers, alluvions). La dégradation du couvert végétal, la mise en place des cultures, la densité des pistes de piétinement des animaux, la répartition de croûtes de surface impactent sur le régime hydrologique et hydrogéologique. Les aménagements au sein du bassin ont détruit des espaces forestiers non négligeables (Fig. 59).



a

b

Fig. 59. Destruction des espaces considérables de végétation de forêt au cours du montage des aqueducs (a) et la construction de l'autoroute Yaoundé-Douala (b) (Photos de terrain)

Les études menées au sein du bassin permettent de relever l'évolution des matières particulaires et dissoutes. Le tableau XXXVIII contribue à l'estimation de la concentration de MES à l'entrée des barrages de Songloulou et d'Edéa c'est-à-dire qui franchit la station de Songmbengue.

Tableau XXXVIII. Variation des concentrations des matières particulaires et dissoutes dans le bassin de la Sanaga

Point d'échantillonnage	Date	MES (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	TDS (mg/l)	
Sanaga à Nachtigal (1)	1973	Min	1,6	0,7	1,56	1,84	0,35	0,48	-	11,6	11	29,13	
	-	Max	6	1,4	3,13	4,37	1,77	1,92	-	21,35	17	56,94	
	1974	Moy.	72	3,2	1,0	2,2	2,85	0,72	0,91	-	16,41	14,5	41,79
N	-	-	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
Mbam à Goura (1)	1973	Min	2,6	1	1,56	1,84	0,35	0,48	-	13,42	14	35,25	
	-	Max	6	3,4	3,13	4,37	1,77	1,92	-	45,75	20	86,34	
	1974	Moy	155	4	1,8	2,2	2,85	0,72	0,91	-	21,16	16,5	50,14
N	-	-	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	
Sanaga à Ebebdà (2)	1994	Min	5,8	1,4	0,6	1,05	1,49	0,11	0,1	0	12,66	11,7	29,11
	-	Max	72,1	2,8	1,1	2,07	2,14	0,57	0,67	1	22,12	15,4	47,87
	1996	Moy	42	1,85	0,8	1,45	1,79	0,25	0,3	0,2	15,14	14,2	35,98
Mbam à Ebebdà (2)	1994	Min	6	1,6	0,85	1,33	1,54	0,21	0,1	0	15,43	14,2	35,47
	-	Max	309	3,5	1,9	2,0	3,1	0,4	0,67	1,24	26,96	20	59,77
	1996	Moy	152	2,2	1,2	1,52	1,86	0,28	0,34	0,37	18,45	16,9	43,12
Sanaga à Ebebdà (3)	2005	48,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mbam à Ebebdà (3)	-	141,54	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2006												
Sanaga à Edéa*	2009	Min	1,4	1,8	0,12	2,74	3,68	0,03	0,5	0,03	3,2	-	24
	-	Max	262,6	21,4	11,8	9,03	53,13	2,05	0,77	4,65	37,45	-	140,28
	2010	Moy	53,4	2,03	1,1	1,65	2,3	0,71	0,73	1,64	16	15,6**	41,76

(1) Olivry et Naah, 1975 ; (2) Ndam Ngoupayou, 1997 ; (3) Kpoumié, 2007 ; * Cette étude, ** Silice estimée à partir de (1) et (2).

La courbe de l'évolution de la charge solide (Fig. 60) ne suit pas le modèle des cours d'eau des régions tropicales. Elle montre une nuance de flux de MES à l'entrée du système des barrages de Song-Loulou et d'Edéa (Songmbengue) pour les courbes (1) et (2) et à leur sortie (Edéa) pour la courbe (3). Les cours d'eau dans les zones élevées participent à

l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent et pourtant qu'en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où prédomine la sédimentation. En période de montée des eaux, l'érosion des berges intensifie la turbidité de l'eau ainsi que le creusage de sable par les riverains en période d'étiage. Les prélèvements journaliers comme les jaugeages partiels, ne présentent un intérêt que dans la mesure où ils permettent de calculer la turbidité moyenne interannuelle réelle de l'eau. Il est cependant important de déterminer d'autres paramètres.

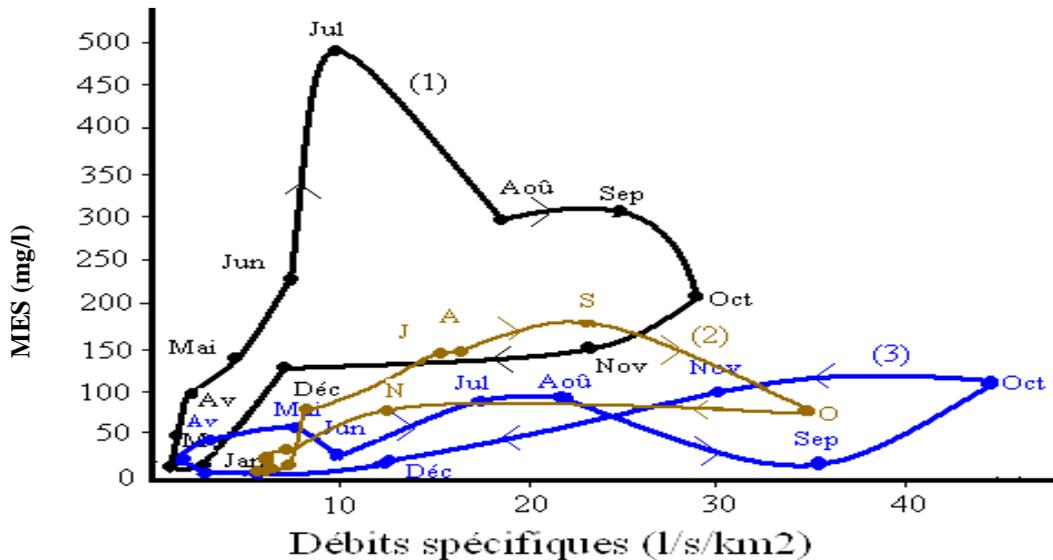


Fig. 60. Evolution de la charge solide moyenne en fonction des débits dans la Sanaga. Sanaga à Ebebdà, 1994-1996 ; (2) Sanaga à Ebebdà 2005-2006 ; (3) Sanaga à Edéa 2009-2010.

Le tableau XXXVIII montre que les eaux du Mbam sont plus chargées en MES et en matières dissoutes que celles de la Sanaga ss. Les roches drainées par le sous bassin Sanaga ss sont moins altérables.

Tableau XXXIX. Evolution de la lame d'eau, des taux d'érosion mécanique et d'altération chimique, lame de sol érodé dans le bassin du fleuve Sanaga entre 1970 et 2010

Bassin versant	Superficie (km ²)	Année hydrologique	LE (mm)	TDS (mg/l)	TAC (t/Km ² /an)	TSS (mg/l)	TEM (t/km ² /an)	LSE (mm)
Mbam à Goura	42300	1970-1972	570	42,96	27,81	158	73,5	0,046
Sanaga à Nachtigal	76000	1968-1969	478	35,94	15,63	57	27	0,017
Mbam à Ebebdà	76000	1994-1996	570	42,67	27,78	152	102,8	0,064
Sanaga à Ebebdà	42300	1994-1996	478	36,03	15,63	42	18,1	0,011
Mbam à Ebebdà	76000	2005-2006	477	-	-	141,54	84,56	0,053
Sanaga à Ebebdà	42300	2005-2006	390	-	-	48,82	14,76	0,009
Sanaga à Edéa	131500	2009-2010	505,9	41,76	21,13	53,4	27,4	0,017

MES : matières en suspension ; LE (mm) : lame d'eau écoulée ; TDS (mg/l) : total des matières minérales dissoutes ; TAC (t/km²/an) : taux d'altération chimique ; TSS (mg/l) : total des matières particulaires ; TEM : taux d'érosion mécanique, LSE : lame de sol érodé,

La chute des droites de corrélation marque une progression de la sédimentation (Fig. 61). Le taux d'érosion mécanique est supérieur au taux d'altération chimique. Cela illustre un véritable problème de déséquilibre entre la formation des sols et leur destruction, donc

celui de dégradation de l'environnement. Les matières dissoutes issues de l'altération chimique des roches permettent de déterminer la qualité des eaux.

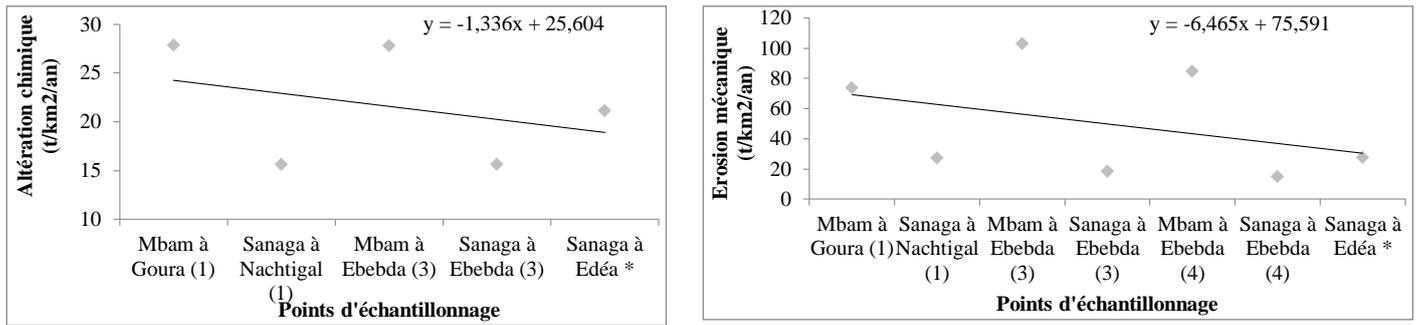


Fig. 61. Evolution de l'érosion fluviale (taux d'altération chimique et d'érosion mécanique) dans le bassin de la Sanaga.

(1) 1972-1973 ; (2) 1972-1973 ; (3) 1994-1996 ; (4) 2005-2006 ; * 2009-2010.

Par contre, les flux de MES résultant de l'érosion mécanique, permettent de qualifier les ressources en eau. Les ressources en eau et leur qualité sont orientées par les précipitations. Les matières particulaires et dissoutes observées à l'exutoire marquent l'érosion fluviale, matérialisant les quantités de matières qui accèdent à l'embouchure. On peut observer une régression des matières en suspension (MES) qui caractérise les dépôts progressifs des particules au cours de leur transit. La hauteur des dépôts particuliers a réduit la colonne d'eau disponible car, ils ont affecté la côte d'étalonnage. Cette situation s'est intensifiée à partir de 1978, au début de la construction du barrage de Song-Loulou et de la retenue de la Mapé.

III.1.5. Corrélations entre valeurs indépendantes (pluviométrie, températures de l'air) et valeurs dépendantes (débits, production réelle de l'énergie hydroélectrique)

III.1.5.1. Relation pluie moyenne et débits

Le graphique de la relation interannuelle entre la pluie moyenne et les débits montre que les débits sont plus fluctuants alors que la courbe de la pluie moyenne semble lissée. Cette dernière évolue en dessous de celle des débits (Fig. 62). Cependant, on a relevé les années où la courbe des débits chevauche celle de la pluie moyenne (1946-1947 ; 1972-1973 ; 1978-1979 ; 1983-1984 ; 1987-1988 par exemple). De manière mensuelle, la pluie moyenne d'une part et les débits à Édéa d'autre part, déduits de l'année moyenne ont des comportements différents.

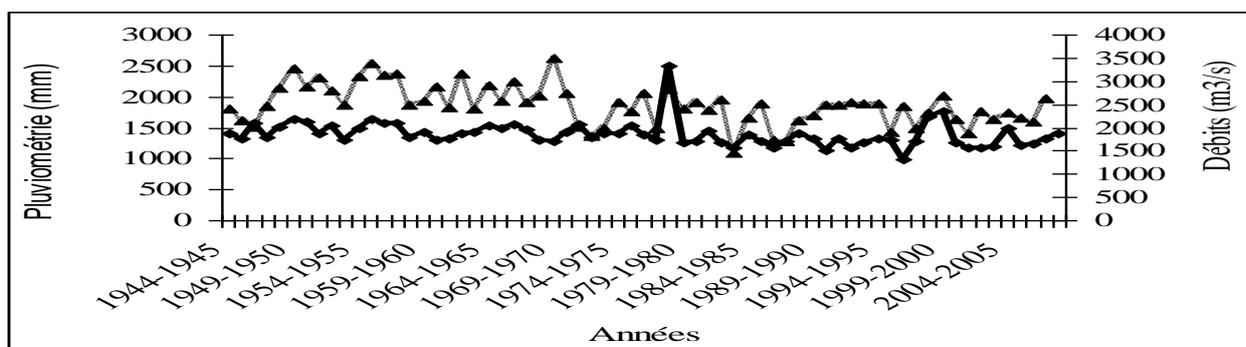


Fig. 62. Relation interannuelle pluie moyenne-débits de la Sanaga à Edéa

— Pluie - - - - - Débits

La courbe de l'évolution mensuelle de la précipitation moyenne est de type bimodal (mai et septembre) d'importance relativement approximative et deux encoches en juin et en décembre tandis que celle des débits est uni-modale avec un optimum en octobre (Fig. 63). La courbe des débits apparaît comme la lissée de la pluie moyenne.

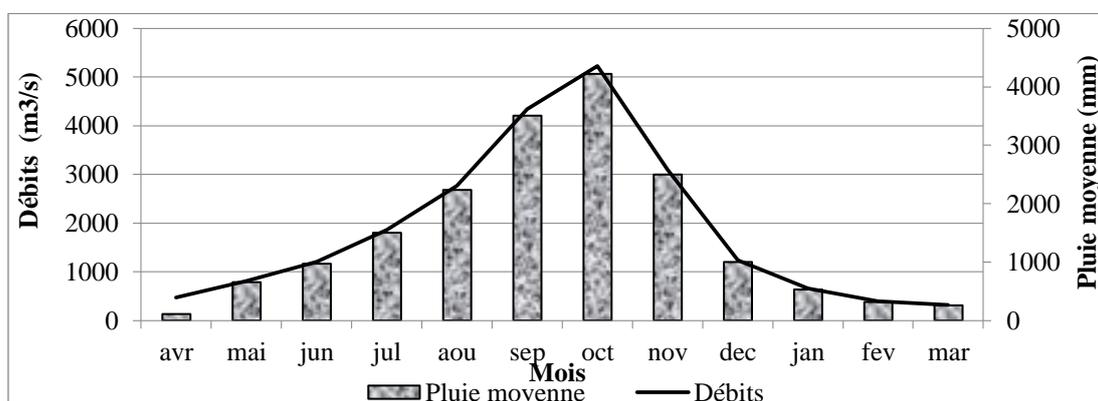


Fig. 63. Relation mensuelle pluie moyenne-débits dans le bassin du fleuve Sanaga

Les corrélations montrent une corrélation concordante de 44 % entre la pluie et les débits et 27 % entre débits et températures à l'échelle interannuelle (Tableau XL). On a évolué une discordance de 56 % entre les facteurs climatiques et les débits de manière interannuelle. De manière saisonnière, cette discordance est respectivement de 41 % entre la pluie et les débits et de 66 % entre les températures et les débits.

Tableau XL. Corrélation entre facteurs climatiques et débits à Edéa

		Interannuelle						Saisonnière					
		Précipitations			Température			Précipitations			Température		
		↘	↔	↗	↘	↔	↗	↘	↔	↗	↘	↔	↗
Débits	↘	<i>0,11</i>	0,06	0,22	<i>0,16</i>	0	0,11	<i>0,21</i>	0	0,25	<i>0,17</i>	0,02	0,23
	↔	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	↗	0,22	0,06	<i>0,33</i>	0,33	0,05	<i>0,11</i>	0,16	0	<i>0,38</i>	0,35	0,02	<i>0,17</i>

Concordance en gras et italique : décroissance, ↘ : constance, ↔ : croissance du paramètre

III.1.5.2. Réajustement de l'hydraulicité en vue de renforcer les débits

Le remplissage des retenues varie de 372,2 (en 1999) à 529,7 (en 2008), de 846 (en 2000) à 309,1 (en 2002) et de 458,4 (en 2000) à 252,6 (en 2001) respectivement à Mbakaou, Mapé et Bamendjing. La retenue de Mbakaou se présente comme la moins fluctuante et celle de Bamendjing comme à réaction intermédiaire (Fig. 64). La retenue de la Mapé s'avère la plus fluctuante malgré sa capacité la plus élevée.

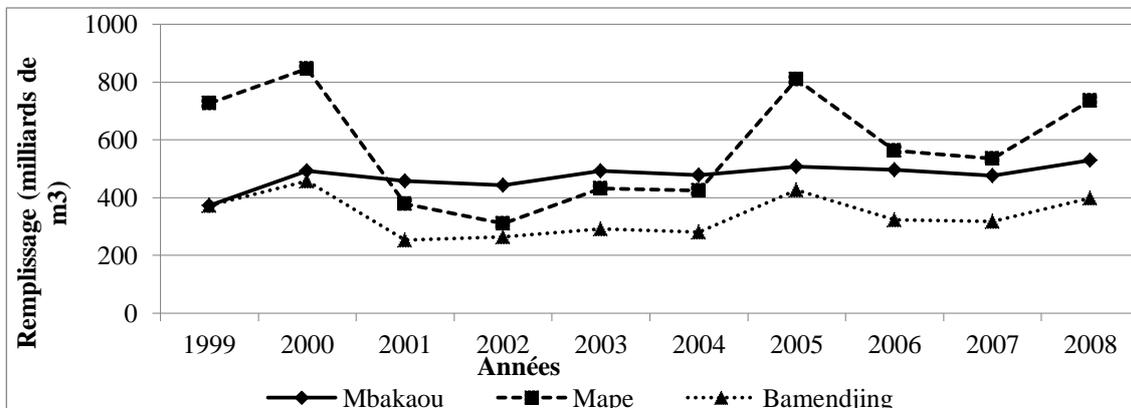


Fig. 64. Remplissage des retenues de régulation de la Sanaga

III.1.5.3. Relation entre les facteurs climatiques et la production de l'énergie hydroélectrique

L'analyse des corrélations des précipitations et de la température suivant l'échelle interannuelle sur la production de l'énergie hydroélectrique relève 75 % et 50 % de concordance respectivement avec la pluie et la température (Tableau XLI). A l'échelle saisonnière, on a noté 51 % et 45 % de concordance des mêmes paramètres.

Tableau XLI. Corrélation facteurs climatiques- production d'énergie

		Interannuelle						Saisonnière					
		Pluie			Température			Pluie			Température		
		↘	↔	↗	↘	↔	↗	↘	↔	↗	↘	↔	↗
Energie hydroélectrique	↘	<i>0,22</i>	0	0,11	<i>0,25</i>	0,06	0,06	<i>0,20</i>	0	0,30	<i>0,25</i>	0,02	0,22
	↔	0	<i>0</i>	0	0	<i>0</i>	0	0	<i>0</i>	0	0	<i>0</i>	0
	↗	0,11	0	<i>0,53</i>	0,37	0	<i>0,25</i>	0,18	0	<i>0,31</i>	0,25	0,02	<i>0,20</i>

Concordance en gras et italique

↘ : décroissance, ↘ : constance, ↗ : croissance du paramètre

Quant au rythme des débits, la production de l'énergie hydroélectrique à la Centrale d'Édéa évolue à 75 % de cas dans le même sens que les débits et 25 % de cas antagonistes à l'échelle interannuelle. Pour mieux cerner les raisons de convergence/divergence, on a relevé à l'échelle mensuelle 59 % de situations analogues et 39 % de cas d'antagonisme (Tableau XLII).

Tableau XLII. Corrélation débits production d'énergie hydroélectrique à la Centrale d'Édéa

		Débits					
		Interannuels			Mensuels		
		↘	↔	↗	↘	↔	↗
Energie	↘	<i>0,25</i>	0	0,12	<i>0,26</i>	0	0,22
	↔	0	0	0	0	0	0
	↗	0,12	0	<i>0,50</i>	0,17	0	<i>0,33</i>

Concordance en gras et italique ↘ : décroissance, ↔ : constance, ↗ : croissance du paramètre

En plus des corrélations linéaires, on a déterminé la corrélation rho de Spearman entre les différents paramètres (Tableau XLIII) pour chercher à affiner le lien entre lesdits paramètres.

Tableau XLIII. Corrélation rho de Spearman (Rs)

Lien	P-T	P-Q	T-Q	P-EHR	T-EHR	Q-EHR
Rs	-0,5291	0,9394	-0,5464	0,5750	-0,3076	0,5778

P : précipitation ; T : température ; Q : débit ; EHR : énergie hydroélectrique réelle

La corrélation de Spearman (Rs) a donné des valeurs négatives pour le lien entre la précipitation et la température ; la température et les débits ou entre la température et l'énergie hydroélectrique réelle. Le signe négatif montre un lien peu significatif. C'est-à-dire une faible dépendance entre les paramètres. Le graphique des courbes cumulées (Fig. 65) présente une évolution concordante d'une part des valeurs indépendantes (précipitations, températures, ETP) et d'autre part des valeurs dépendantes (débits, production hydroélectrique) à 85,71 % de cas où ces valeurs sont exactement en phase.

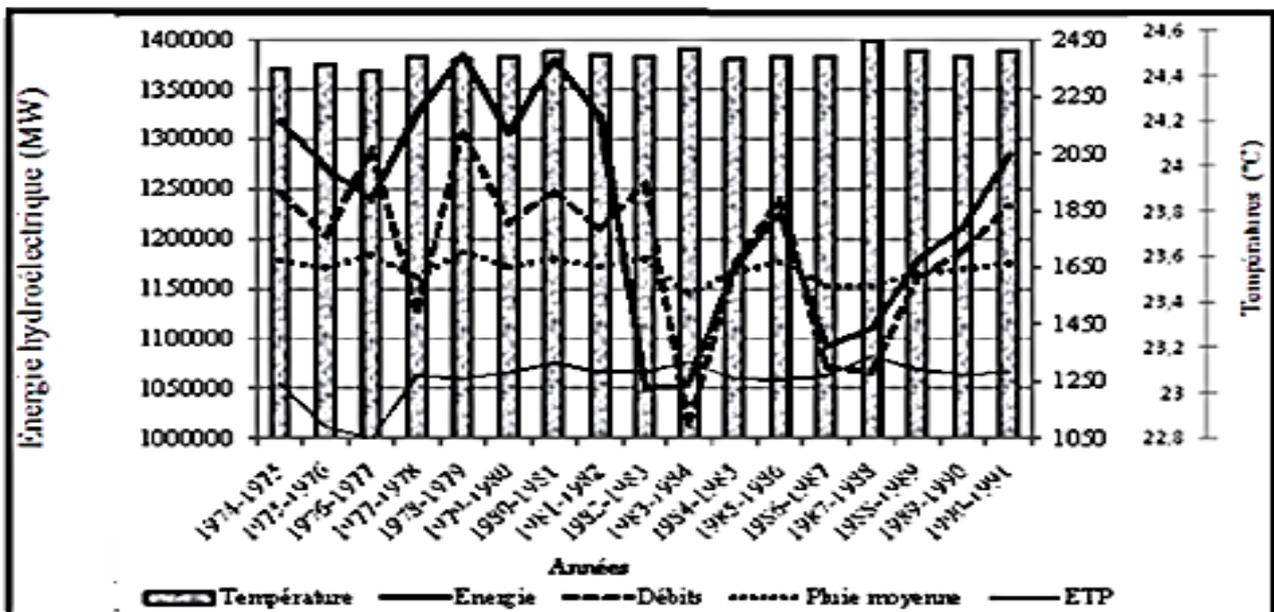


Fig. 65. Courbes cumulées des valeurs indépendantes et des valeurs dépendantes

La production de l'énergie hydroélectrique a chuté au moment où les débits étaient en hausse (1976-1977 ; 1982 à 1984). Par contre, on a noté des situations où les débits avaient chuté de manière drastique, la production de l'énergie hydroélectrique restant considérable (1983-1984 et 1986 à 1988). On a relevé une évolution discordante des paramètres hydrologiques (précipitations, débits). De ce qui précède, on a déterminé les états d'impacts éventuels et des solutions y afférent (Tableau XLIV).

Tableau XLIV. Impacts éventuels des éléments bioclimatiques et solutions y afférentes

Facteurs d'impacts	Manifestations	Conséquences	Solutions
Températures de surface de l'Atlantique	Hausse	Précipitations aux IDF exceptionnelles	Evaluation permanente et continue
Episodes El-Niño/ENSO	Récurrence	Déficit des précipitations	Surveillance
Températures de l'air	Hausse	Forte évaporation et évapotranspiration	Reboisement
Précipitations	Baisse	Diminution des ressources en eau	Reboisement, prévision
Débits	Baisse	Diminution des écoulements	Multiplication des retenues en amont, revégétalisation
Matières en suspension (MES)	Sédimentation	Comblement, envasement	Curage, boisement des berges
Matières dissoutes	Baisse	Corrosion des machines	Reboisement
Anthropisation	Intensification	Destruction du couvert végétal, ruissellement, érosion	Changement de comportement, reboisement

IDF : intensité, durée, fréquence

III.1.5.4. Effets de la variabilité des facteurs climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique

III.1.5.4.1. Sur le plan économique

L'augmentation du niveau d'eau entraîne un accroissement des possibilités d'irrigation donc celui des terres et des pâturages, tandis que l'accroissement potentiel dans la production du poisson entraîne la réduction de l'agriculture. En période de crues, les constituants ayant traversé la grille, bloquent les turbines au point où elles s'arrêtent et l'équipe d'entretien et de maintenance est obligée de se déployer pour le dépannage.

III.1.5.4.2. Variation saisonnière de la tarification de l'énergie électrique au Cameroun

Pour confirmer les effets du climat sur la production de l'énergie hydroélectrique, le Gouvernement a pris en compte non seulement la période journalière de pointe de consommation, mais aussi la saisonnalité. Cette tarification est répartie suivant deux périodes au courant de l'année (Tableau XLV) : période sèche (1^{er} janvier de l'année au 30 juin) et période humide (1^{er} juillet au 31 décembre).

Tableau XLV. Horo-saisonnalité de la tarification (en francs CFA) de l'énergie électrique depuis 2003.

Souscription Période	Basse tension				Moyenne tension			
	Usage domestique (kWh)		Usage professionnel (kWh)		0 à 200 heures		> 200 heures	
	50 à 200	> 250	<180	> 180	23h - 18h	18h - 23h	23h - 18h	18h - 23h
1 ^{er} juil-31 déc.	60	65	63	55	43	54	40	49
1 ^{er} jan-30 juin	67	75	68	60	53,75	67,5	50	61,25
Ecart absolu.	7	10	5	5	10,75	13,5	10	12,25
Ecart relatif (%)	11,60	16,38	7,93	9	25	25	25	25

Le prix de kWh en basse tension subit une hausse de 7 FCFA (soit 11,66 %) de la période humide à la période sèche pour une consommation comprise entre 50 et 200 kWh pour les usages domestiques. Il a varié de 10 FCFA (soit 16,38 %) pour la consommation supérieure à 200 kWh pour la même catégorie. Pour l'usage professionnel en moyenne tension, le prix du kWh subit une augmentation de 11 FCFA de 23 heures à 18 heures d'une part et de 18 heures à 23 heures d'autre part pour une exploitation de 0 à 200 heures ; au-delà de 200 heures, la tarification diffère de 9 FCFA pour les mêmes moments de la journée en période humide ; puis 13,75 FCFA de 0 à 200 heures et 11,25 FCFA au-delà de 200 heures pour les mêmes moments de la journée en période d'été. La variation de la tarification en valeur relative au cours de la journée est de 25 % pour une consommation de 0 à 200 heures et 25 % à plus de 200 heures en moyenne tension.

III.1.5.4.3. Pertes financières probables relatives à la variabilité des facteurs climatiques

Les valeurs relatives matérialisées (Tableau XLVI) représentent les dépenses supplémentaires des abonnés pour la hausse de la facturation de l'énergie hydroélectrique en période d'été.

Tableau XLVI. Coût de revient (en francs CFA) en fonction des facteurs climatiques du kWh d'énergie

Souscription Période	Basse tension				Moyenne tension			
	Usage domestique (kWh)		Usage professionnel (kWh)		0 à 200 heures		> 200 heures	
	50 à 200	> 250	<180	> 180	23h - 18h	18h - 23h	23h - 18h	18h - 23h
1 ^{er} juil-31 déc.	71,55	77,52	75,13	65,59	51,28	64,4	47,7	59,44
1 ^{er} jan-30 juin	82,9	89,44	81,1	71,55	64,1	80,5	59,63	79,1
Ecart absolu	8,35	11,92	5,97	5,96	12,82	16,1	11,93	13,66

En basse tension, la consommation d'un usager de classe moyenne a été fixée à 90 kWh. A 60 FCFA le kWh en période humide, la facture de la consommation en période sèche, hausse de 630 FCFA hors taxe en valeur absolue et 11,66 % en valeur relative. En

appliquant la taxe sur la valeur ajoutée (TVA) qui est de 19,25 % du montant de la consommation, l'Etat gagne 121,275 FCFA par mois et par consommateur moyen en période sèche. Par rapport au nombre d'abonnés les montants gagnés en période sèche sont importants. En moyenne tension exploitée par les industrielles, le kWh connaît une hausse de 25 % d'une période à l'autre et celle de 22,5 % d'un moment de la journée à l'autre au cours de la même période. Pour le cas précis de l'ALUCAM, une cuve consomme en moyenne 5 MWh pour son redémarrage. Ce qui fait pour les 50 cuves en arrêt en saison sèche, 250 MWh. A 40 FCFA le kWh en moyenne tension pendant l'étiage, l'entreprise ALUCAM perd 40 FCFA x 25 000 kWh, soit 10 000 000 FCFA par an seulement pour le redémarrage des cuves.

III.1.5.4.4. Sur le plan environnemental

Les effets de la production de l'hydroélectricité sur l'environnement sont liés à la construction des réservoirs et barrages à travers la sédimentation, la déforestation, l'évaporation (Tableau XLVII).

Tableau XLVII. Effets de la production de l'hydroélectricité sur les composantes environnementales suite à la variabilité climatique

Construction des réservoirs	Effets sur les composantes	
	Physiques	Biologiques
A l'état normal	Modification du milieu écologique Débordement du lit Occupation des espaces avoisinants	Déforestation de la zone du barrage Destruction des espèces vivantes
Période d'étiage	Accélération de l'évaporation	Exposition de la flore et de la faune Développement des pathologies
Période de crues	Erosion des berges Modification de la qualité de l'eau Envasement Risques d'inondations	Renversement des arbres des berges Divagation des espèces animales suite à la destruction des leurs habitats

La constructions des réservoirs et barrages modifie le milieu écologique et l'agrandissement du lit en amont du barrage. L'eau stockée déborde de son lit et occupe les espaces avoisinants dénaturant les écosystèmes. En période d'étiage, l'évaporation prend largement le dessus sur l'évapotranspiration. En période de crues la turbulence de l'eau arrache les plantes qui sont le long des rives à proximité du barrage, suivi de l'érosion. Les barrages réduisent la turbidité de l'eau et le transport des sédiments modifiant ainsi la qualité de l'eau. Le réservoir et l'érosion du lit du fleuve se stabilisent. Les impacts qui concernent les barrages et l'environnement s'appliquent sur l'eau, la végétation, la faune, le

milieu écologique, les activités humaines et la santé. La déforestation est aggravée par l'installation des pylônes de transport de haute et de moyenne tensions.

III.2. DISCUSSION

III.2.1. Fluctuations climatiques

Les températures de la surface de l'Océan Atlantique analysées coordonnent la pression qui anime l'activité des centres d'action atmosphérique (anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène). Les températures de surface de l'Atlantique autour de l'équateur coïncident respectivement avec les anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène. Des pressions au niveau des anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène, établit régulièrement une différence de champ de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande (indice d'Oscillation Nord Atlantique ou NAO) dont la variation détermine le jeu des masses d'air et le déclenchement des précipitations. C'est dans ce sens qu'une combinaison entre les températures de surface de l'Océan Atlantique et les indices de la NAO a été établie. Cassou (2004) avait défini un lien entre certains épisodes atlantiques et l'indice NAO par le fait que lorsque l'indice NAO est égal à +1, la température de surface de la mer est plus froide de l'ordre de $-0,1$ à $-0,2$ °C dans les tropiques.

Par ailleurs, il advient parfois que les variations irrégulières des températures de la surface de l'eau créent des anomalies qui aboutissent aux phénomènes El Nino/La Nina. En rapprochant l'épisode El-Niño et les précipitations des régions traversées, on y relève une sécheresse drastique ou à défaut, des pluies exceptionnelles entraînant des inondations, tandis que c'est l'inverse pour La-Niña. Ces phénomènes exceptionnels provoquent des perturbations climatiques, d'où l'analyse de l'apparition de ces épisodes. L'emphase de la dynamique des températures autour de l'Equateur est à l'origine des phénomènes El-Nino/La-Nina. Ceci corrobore avec Neelin *et al.* (1998) pour qui, l'évènement La-Nina se réfère à la phase froide de l'oscillation australe (ENSO) et se caractérise par un renforcement de la langue d'eau froide équatoriale sur le bassin pacifique. Neelin *et al.* (1998) avaient également relevé qu'ENSO est connu comme le phénomène climatique ayant le plus d'influence à l'échelle planétaire.

La relation entre la température de l'air et la tension de vapeur saturante au-dessus des anticyclones tropicaux, laisse apparaître que la tension de vapeur croît exponentiellement avec la température de l'air au cœur des anticyclones des Açores et de Sainte-Hélène. Cette

tension ne s'annule que lorsque la température est de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. A $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la pression de vapeur saturante est égale à 0,61 millibars. A $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, la tension de vapeur saturante est de 23,4 millibars. Au-delà de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, toute variation de température n'influence que quelque peu l'évolution de la pression de vapeur. Ceci corrobore avec les travaux de Stehly (2016) qui avaient montré le développement du vortex en relation avec la pression sub-océanique et la température atmosphérique. Les perturbations atmosphériques énergiques ont donc lieu à l'intervalle des températures $[-10 ; 40]\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les températures de l'Atlantique augmentent simultanément dans les deux hémisphères avec une intensification dans l'hémisphère Sud. Ces résultats concordent avec ceux de CNRS (2014) qui avaient attesté l'augmentation à l'échelle globale des températures de l'air et des océans depuis 1940, les continents se réchauffant plus vite que les océans.

Le sur-chauffage de l'Atlantique Sud serait lié à la dégradation des deux plus grands massifs forestiers situés de part et d'autre de l'Atlantique Sud. Ce qui augmenterait les précipitations sur l'ensemble du pays. L'augmentation des températures de surface de l'océan induit celle de la pression au niveau des anticyclones atlantiques. L'évolution des pressions aux Açores et à Sainte-Hélène coordonnant la dynamique des précipitations au Cameroun, suppose une sécheresse permanente sur l'étendue du territoire à cause de la domination perpétuelle de la pression des Açores saisonnièrement renforcé par l'anticyclone égypto-libyen sur Sainte-Hélène. L'anticyclone des Açores est affaibli parfois par la dépression d'Islande.

La lente augmentation de température en Atlantique Nord semble résulter d'une part de l'influence du Gulf-Stream qui échange de l'énergie avec les Açores et d'autre part de la dépression d'Islande dont les variations de pression déterminent l'indice de la NAO (Oscillation du Nord Atlantique) tend à rétablir l'équilibre thermique. Ceci va dans le même sens que Cassou (2004) qui a relevé que l'impact des anomalies de SST (Sea Surface Temperature) sur l'atmosphère de la région Atlantique nord-Europe, est quantifié en termes d'occurrence des régimes NAO simulés par le modèle. Il soutient que : plus la différence des anomalies de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande est importante, plus l'indice de NAO est positif. Alors l'Afrique du Nord est plus chaude que la normale et il pleut sur l'étendue du territoire camerounais.

Les fluctuations des précipitations et celles des températures ont été observées dans le temps et dans l'espace avec une baisse généralisée des précipitations à partir de l'année

1973. Ces résultats vont en droite ligne avec ceux de Sircoulon (1992), Briquet *et al.*(1997 & 1999), Paturel *et al.*(1997), Bigot *et al.*(1998), Nicholson(2000), Mason (2001) et Ouédraogo(2001) qui avaient relevé que la chute des précipitations amorcée en Afrique Centrale et en Afrique de l'Ouest en début des années 1970 s'est accentuée en début des années 1980. Ce comportement des précipitations est davantage confirmé par des équations de tendances dans les différentes stations dominées par des coefficients directeurs négatifs des droites de tendance.

La segmentation des séries chronologiques au moyen d'un algorithme spécifique fournit une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui sépare les segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes. Ces ruptures sont des discontinuités. Des discontinuités observées dans les séries chronologiques traduisent des modifications dans le temps, signes du changement climatique au niveau des différentes stations étudiées. Cependant, on a noté de légères disparités d'une station à une autre. Ce constat est analogue aux travaux de Liéno (2007), Tchindjang *et al.*(2012), Amougou *et al.* (2015) qui avaient confirmé la diminution des précipitations dans les bassins hydrographiques en général et celui de la Sanaga en particulier. Il ne corrobore pas avec les travaux de Sighomnou (2004) du fait de la différence des séquences chronologiques étudiées et du critère pris en compte dans le test. Néanmoins, les ruptures sont observées et témoignent d'une variation.

Les précipitations se comportent différemment d'une station à l'autre. Sur le plateau Sud camerounais, une augmentation des précipitations dans le temps est observée, à l'exception de celle d'Abong-Mbang tandis que sur le littoral camerounais, il y a une baisse généralisée des précipitations exprimée par les pentes des équations de tendance. Non seulement cette baisse a affecté la station d'Édéa à basse altitude depuis 1972 et intensifiée en 1980, mais aussi celles situées en altitude comme Ngambè ou Nkongsamba dès l'année 1970. Ce qui veut dire qu'il ne pleut pas abondamment dans l'ensemble du bassin, malgré l'attitude modérément humide à Koundja et à Bafia.

La nouvelle position des pics (sécheresse de décembre à février) atteste le changement climatique du début des années 1970 accentué dans les années 1980. Dans ces dernières, aucune reprise n'a été observée. Cependant, on a relevé une reprise de l'augmentation peu significative à Yaoundé. Hormis la station d'Abong-Mbang soumise à la continentalité, on a pu relever que le littoral est plus sensible aux fluctuations climatiques. Des particularités

notées résultent de l'effet foehn à Nkongsamba. Le bassin du fleuve Sanaga est soumis aux facteurs qui influencent ses précipitations à savoir la continentalité (Abong-Mbang, Akonolinga, Nanga-Eboko), l'altitude (Dschang, Ngambè) et la proximité de la mer (Edéa). De novembre à avril, les précipitations sont peu significatives, sauf au niveau de la station d'Edéa qui a une certaine influence sur le barrage. Les précipitations de mars à avril (début de la saison pluvieuse) ne satisfont pas aux besoins utiles du sol, mais permettent d'humidifier les mailles du sol. Les diagrammes des écarts à la moyenne montrent qu'avant la décennie 1970, les précipitations étaient excédentaires au niveau de la quasi-totalité des stations étudiées, la période d'après 1970 est marquée par une prédominance des années déficitaires avec une reprise quelque peu remarquable à partir de la fin de la décennie 1990-2000 au niveau des hautes terres de l'ouest.

III.2.2. Effets des facteurs climatiques sur les ressources en eau au sein du bassin du fleuve Sanaga

Les précipitations au début de la petite saison pluvieuse reconstituent les nappes souterraines. Les évaporations étant plus élevées en ce moment que les précipitations, toutes les pluies s'évaporent. Le test de Pettitt indique les grandes périodes d'évolution de la pluviométrie ou des débits. Ceci concorde avec Savané (2001) qui avait mentionné que la rupture peut se définir comme le point à partir duquel un changement intervient dans une série chronologique. Olivry (1986) avait estimé que la longueur de la période d'aridité est liée à la continentalité et au déplacement plus ou moins lent parfois perturbé du front intertropical. Les études des flux hydriques au sein du bassin versant ont servi à la conception des aménagements et à la maîtrise des ressources en eau. Une faible hydraulité relevée en 1958-1959 et en 1963-1964, incite à l'aménagement d'un autre barrage de retenue dans le but de surmonter l'étiage en aval. L'hydraulité de 1983-1984 déplore l'insuffisance du réajustement par les barrages de retenues car les déficits de l'étiage ne sont pas palliés. Ceci justifie les travaux d'IGECO (1967) qui avaient consisté en l'estimation de la crue exceptionnelle à l'installation de la salle des machines de la Centrale d'Edéa.

L'augmentation de l'écoulement au cours d'une averse résulte des aménagements divers et surtout de l'urbanisation galopante. Par contre, la diminution de l'écoulement dérive de l'intensification de l'évaporation amplifiée due à la dégradation du couvert végétal au sein du bassin. Le temps qui sépare les précipitations et la réaction des débits (temps de latence) est donc d'un mois (Bessoh, 2005). Les précipitations d'octobre à février ne

parviennent pas à reconstituer les nappes souterraines puis qu'elles alimentent l'évapotranspiration et l'écoulement hypodermique. La faible infiltration d'eau enrichit son ruissellement causant ainsi une hausse rapide en eau dans le fleuve en saison pluvieuse et une baisse fatale en saison sèche. Ce qui traduit l'irrégularité du régime des cours d'eau du bassin. La variabilité de l'eau induit donc une certaine perception du milieu qui conduit à gérer les réservoirs des barrages de manière plus ou moins rationnelle. Ceci amène à renforcer les débits à l'étiage à partir des retenues.

Un déficit caractérisé de la disponibilité en eau a été constaté. Ceci rejoint non seulement les travaux de Liéno (2007), Bessoh (2012), Tchindjang *et al.* (2012) et Amougou *et al.* (2015) définissant l'impact du changement climatique sur les ressources en eau mais aussi ceux de Bessoh (2005), Bessoh *et al.*, (2019a) qui avaient déterminé les effets des fluctuations des ressources en eau sur les activités humaines au sein du bassin de la Sanaga. Ce déficit en eau est lié probablement à la baisse des précipitations couplée à une augmentation des températures avec pour corollaire l'accélération de l'évapotranspiration. Les nuances relevées au niveau des différentes stations découlent de la variabilité des composantes géophysiques et de l'anthropisation.

La déclivité accentue la puissance du ruissellement et son activité mettant en place de nouvelles formations. Les matières particulaires emportées en altitude sont entraînées dans les dépressions puis dans les cours d'eau et pour finir dans les barrages. Ceci concorde avec Grinberg (2003) qui a relevé que la disponibilité de l'énergie hydroélectrique est liée aux barrages de production qui subissent le comblement par des matériaux venant des montagnes. La construction des barrages à réservoirs de Songloulou et de Lagdo a permis de décongestionner celui d'Édéa, favorisant une décentralisation, un meilleur essor industriel, économique et développementaliste. Les réservoirs propres à ces barrages leur permettent d'atténuer la rareté de l'eau. Le cadre physique influence indirectement le comportement de l'eau. L'augmentation des dépôts de MES réduit la colonne d'eau ainsi que la quantité d'eau disponible même en saison pluvieuse dans le canal d'amener. La situation s'empire en saison sèche. Par ailleurs, les eaux de ruissellement sont plus chargées de MES après la saison culturale (activités humaines intenses et dominantes) dont leur sédimentation a masqué la côte d'étalonnage, affectant ainsi une appréciation des échelles limnimétriques. Ce charriage présente un impact sur les débits d'eau qui se répercutent directement sur la production hydroélectrique au niveau d'Édéa.

L'empilement des dépôts de MES exerce une pression sur la digue qui, parfois, subit également l'action de la contrainte maximale. Les travaux de Bouafia *et al.* (2007), Guéi *et al.* (2007) ont relevé les effets de la contrainte maximale sur des installations humaines avec pour corollaire les risques naturels. En climat tropical à subtropical, l'altération d'une roche basique induit la néoformation d'argiles gonflantes en quantité considérable, surtout dans les zones confinées. Ceci confirme les travaux de Murray (1976) qui stipulent que l'altitude et la nature du substratum constituent des facteurs d'érosion fondamentaux. Le lit du fleuve Sanaga reposant sur une faille (Nangé, 2007), même d'intensité infra-luminaire et de manière cumulée, les épisodes sismiques répétés peuvent aboutir aux catastrophes, d'où l'apparition des fissures sur la digue du barrage d'Édéa. Le bassin de la Sanaga dominé par les roches métamorphiques issues du Panafricain (Nzenti, 1994), influence le réseau hydrographique quant à sa plus ou moins grande sensibilité à l'érosion.

Les matières emportées en altitude sont entraînées dans les dépressions. L'équilibre végétation-sol diminue l'érosion au maximum au point qu'il tend à l'annuler parfois. La structure de la roche, la forme des pentes, les failles et les plissements dévient le courant d'écoulement. Carrière & Botosaneanu (2014) ont relevé aussi que le réseau de drainage diffère des régions sédimentaires (plaines) aux régions couvertes des roches éruptives (hauts plateaux). Dubreuil *et al.*, (1975) d'ailleurs ont relevé que la rupture de pente du km 141 au km 117 de la Vina du Nord est due à des coulées de basalte-andésite relativement récentes entraînant la présence d'une chute et d'une plaine marécageuse en amont. Les paysages mis en place par la tectonique, les écosystèmes et le développement humain constituent des sites d'attraction touristique. Les sols se développent respectivement sur les roches éruptives basiques (basaltes) mises en place aux altitudes supérieures à 1200 m, ou acides (granites) ; soit sur des intrusions anciennes telles que les granites d'anatexie, soit sur l'ensemble des roches métamorphiques issues du métamorphisme général comme les migmatites (Embréchites, anatexites) et les ectinites (gneiss, micaschistes, schistes), rencontrées respectivement à partir de la région de Nanga-Eboko, les régions de Sa'a–Ndikiminéki associés aux quartzites. Certaines roches (basaltes, marnes, calcaires, grès) retiennent de l'eau au cours des précipitations et la restituent plus tard.

Les valeurs de MES dans les eaux du Mbam et de la Sanaga dans le temps ont permis d'évaluer la charge solide arrivée à Songmbengue. Elle est 140 mg/l au cours de l'année hydrologique 1995-1996 (Ndam Ngoupayou, 1997) et de 95 mg/l en 2005-2006 (Kpoumié,

2007). Pourtant elle est de 53,4 mg/l à Edéa pour l'année hydrologique 2009-2010 (Bessoh, 2012 ; Bessoh *et al.* 2019b). Ceci marque une rétention de 61,77 % et de 43,8 % par les Centrales de Song-Loulou et d'Edéa, témoignage d'une sédimentation importante. La richesse de l'eau de la Sanaga en Ca^{2+} (2,66 mg/l en moyenne), favorise la synthèse d'argiles gonflantes. Ceci confirme les travaux de Muller *et al.* (1979) qui ont noté que la composition minéralogique de la roche initiale peut définir l'évolution du sol pourtant Nougier (1979) a pensé que les grés du Djérem étaient constitués du matériau originel non différencié.

III.2.3. Effets des facteurs climatiques sur la dynamique du couvert végétal

La dégradation de la végétation dans le bassin est significative. Les formations végétales se dégradent et se développent au cours du temps. En 2017, une reprise du développement du couvert végétal est observable par rapport à l'année 2000. Ceci traduit une reconstitution rapide des écosystèmes au sein du bassin du fleuve Sanaga. Le bassin du fleuve Sanaga traverse quatre des cinq zones prioritaires du point de vue de la désertification (IRAD, 2005). Malgré une tentative de reprise dans le cours moyen du fleuve Sanaga couvert par un climat équatorial de type guinéen, la sub-sécheresse notée de décembre à février en 1975 se réduit de décembre à janvier à partir de 1985 pour s'étendre de novembre à février en 2017.

Dans le cours supérieur où règne le climat tropical humide, l'humidité permanente de mars à septembre est interrompue par la sub-sécheresse d'avril, puis relayée par l'aridité de novembre à mars. Les quantités de précipitations chutées en l'an 2000 ont augmenté en 2017 suivies d'une relative élévation des températures, d'où la disparité des formations végétales. Cependant, trois principaux milieux écologiques composent ledit bassin malgré des nuances localisées qui sont la zone forestière faiblement peuplée du plateau central, la zone savanicole faiblement peuplée vers l'Adamaoua et le « paysage domestiqué agricole » des hautes terres de l'Ouest densément peuplées. Dans le domaine savanicole sensible où il y a le contact forêt savane, se développe l'élevage bovin. Sur les hautes terres de l'ouest coexistent l'élevage bovin et l'agriculture. Ceci corrobore avec les travaux de Mélingui & Gwanfogbe (1986) qui avaient évoqué que les activités économiques étaient liées à la répartition des formations végétales sur l'ensemble du pays.

La variabilité des précipitations semble être influencée par le déboisement et la déforestation. Les précipitations sont totalement retenues par une végétation importante, ou

légèrement infiltrées pour être évaporées quelques heures plus tard. Ceci va en droite ligne avec les travaux de Bessoh *et al.* (2019b) qui avaient déterminé les différentes étapes de rétention par une végétation au cours d'une averse. La prolifération des déficits pluviométriques dans les stations en milieu forestier peut provenir du déboisement intensif entamé dès l'époque coloniale, qui a détruit la canopée avec pour conséquence la perturbation du cycle de l'eau. Le comportement des débits au sein du bassin est analogue à celui des précipitations. Néanmoins, la saison pluvieuse a gagné en intensité, d'où le développement du couvert végétal. En l'an 2000, non seulement le tracé des courbes des précipitations a changé une fois de plus dans le temps, mais aussi en intensité.

Les précipitations accessoirement aux températures qui évoluent très peu car toujours prises en moyenne, déterminent la dynamique du couvert végétal. En retour, un couvert végétal constitué principalement d'arbres plus grands, plus gros et plus denses, adoucit la température et alimente l'atmosphère en vapeur d'eau, précurseur des précipitations. Les courbes ombro-thermiques révèlent que la dynamique du couvert est concordante avec le rapport entre les précipitations et les températures. Il ressort que le cours inférieur du bassin de la Sanaga couvert par un climat équatorial de type guinéen, est marqué par une humidité permanente suivie d'une sub-sécheresse de décembre-janvier à partir de 1985..La végétation et la disponibilité de l'eau conditionnent la pratique culturale alors que les types de sols orientent sur le choix des cultures. La civilisation des peuples qui occupent l'espace intervient également dans ce choix. Ceci va en droite ligne avec les travaux de Beauvilain *et al.* (1986) qui avaient décrit la perception des milieux ruraux et urbains par les populations au Cameroun.

Les activités diverses menées au sein du bassin ont détruit des surfaces considérables de formations forestières, affectant l'équilibre entre les sols et la végétation, la conséquence étant la perturbation du cycle de l'eau dont l'importance est liée aux surfaces déboisées. La substitution des forêts littorale et caducifoliée par la forêt claire de part et d'autre, résulte de la mise en place des plantations agroindustrielles. La forêt boisée décidue a repoussé la forêt sempervirente d'altitude de l'Adamaoua tandis qu'elle a remplacé la forêt caducifoliée de l'Ouest. Onana (2011) a montré aussi que les avancées de la forêt colonisent les savanes péri-forestières induisant la différence de son étendue dans la zone.

Bessoh (2012) avait relevé que les activités humaines étaient plus intenses dans les localités à fortes concentrations démographiques du bassin telles que la zone rurale du

plateau Bamum (Foumbot-Foumban), le domaine Tibati-Meiganga, le domaine Mbandjock-Nkoteng, le secteur Nord-Est/Sud-Ouest de Bafia (Ngoro-Ombessa). Certaines sociétés agricoles logent leurs directions au sein des champs de canne à sucre (SOSUCAM) dans le bassin. Par ailleurs, les barrages de retenues (Mbakaou, Magba, Bamendjing) ont fait développer la pêche et les détritiques de roches sont sollicités en génie civil surtout du sable dont l'extraction est une activité génératrice de revenus tant pour les populations riveraines que pour les recettes municipales. L'impact est la dégradation des berges et la turbidité de l'eau. Lorsque ces activités sont menées sur des surfaces accidentées, la mobilisation des matières par les eaux de ruissellement devient intense. Les retenues de Mbakaou, de Bamendjing et de Magba sont devenues les pôles d'attraction des populations où se développe la pêche qui domine l'agriculture. Aussi, les activités anthropiques affectent l'environnement. En plus, leur intensification découle de l'extension des entrains économiques. Ceci concorde avec les travaux de Melingui & Gwanfogbe (1986), Beauvilain *et al.* (1986) pour qui, le développement des secteurs d'activités sur l'étendue du territoire dépendent de la concentration de la population.

L'intensification des activités humaines sur la rive droite dérive de la densité du réseau hydrographique et de celle de la population. L'élevage en altitude rejoint les zones savaniques ou post-forestières. En forêt, se pratique l'agriculture extensive sur brûlis et en savane, une agriculture intensive utilisant du fumier, des engrais verts ou chimiques. Les peuples voisins peuvent adopter les mêmes cultures par différence d'importance pour une variété. L'agriculture se concentre dans les zones encaissantes et sur les plateaux pour accès facile à l'eau. La pêche se focalise autour des lacs de retenues. L'action humaine marquée par le drainage des terres agricoles, les constructions de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau, modifie continuellement le tracé naturel du réseau hydrographique et la qualité de l'eau. Ceci confirme les travaux de Lemoigne *et al.* (1985) qui avaient mis en relief les inconvénients des stocks d'eau des barrages sur l'homme et son environnement. Les aménagements ont détruit des espaces forestiers considérables, tel que Moore (2016) présente dans son document impact des réalisations et d'extraction minière sur le déboisement au Cameroun.

III.2.4. Estimations de la production de l'énergie hydroélectrique

Les différentes corrélations relevées laissent entrevoir que les liens qui existent entre les facteurs climatiques, les régimes hydrologiques et la production de l'énergie hydroélectrique potentielle sont assez importants suivant les coefficients de corrélation évalués par étape et marquent la dépendance de ces éléments. La production de l'énergie hydroélectrique réelle croît tandis que les débits chutent grâce aux eaux des retenues lâchées pour la régulation en période d'étiage. L'inverse se produit à cause de l'état des machines (vétusté, maintenance) et des matériaux d'érosion.

La Centrale d'Édéa semble combler les attentes de la nation il y a quatre décennies. La production de cette Centrale a atteint le maximum en 1978-1979. Elle varie de 1 384 352,6 MW à 1 048 981 MW et sa moyenne est de 1 231 024 MW au cours de la période 1974-1991. Le minimum est atteint en 1982-1983. En valeur relative, la production maximale ne représente que 61,61 % alors que la production minimale ne vaut que 46,83 % de la capacité de production des machines installées qui est de 2 240 000 MW. Ces proportions marquent une sous-exploitation des installations. La production de l'énergie hydroélectrique à Édéa était déjà considérable en 1974-1975 puis qu'elle frôlait déjà les 2000 GWh.

Sur le plan saisonnier, la production hydroélectrique chute de manière catastrophique de novembre à janvier, moment qui marque presque l'arrêt de la Centrale dans certains cas, avant les mises en eau et en services des deux premiers barrages de retenues. Ces retenues se montrent déjà effectives dans leur rôle. En outre, l'offre légèrement voisine de 2000 GWh entre les années 2000 et 2003, justifie les coupures inopinées et intempestives (délestages) observées sur l'ensemble du Réseau Interconnecté Sud (RIS) d'AES-SONEL en début des années 2000. Le réajustement de l'offre à 2116 GWh en 2004 réaffirme l'atténuation des délestages. Sa hausse à 2221 GWh en 2006, prétend exprimer une satisfaction de la demande.

Le climat intervient de manière directe sur les ressources en eau et indirectement dans la production de l'énergie hydroélectrique. Directement, la variabilité des débits du cours d'eau agit sur la production énergétique. L'énergie produite suit l'évolution des débits jusqu'à certaines valeurs. Les données statistiques montrent que les variations des productions atteignent leurs minima en période d'étiage et leurs maxima en période de crues. Cependant, elles n'évoluent pas jusqu'aux intensités extrêmes (étiage absolu, crue décennale). De manière indirecte, la variabilité hydrologique affecte des réservoirs des

barrages suite à la variabilité climatique. La Puissance transférée est plus importante dans les machines radiales qu'axiales. Les coupures intempestives et inopinées (délestages) connues depuis quelques années proviennent non seulement de la poussée démographique, mais aussi des ambitions développementalistes, particulièrement du secteur de l'aluminium plus demandeur. L'action directe du climat peut être influencée par la végétation, la nature des sols, la nature et la structure des couches géologiques. Certaines formations géologiques retenant de l'eau de pluie la restituent plus tard au réseau hydrologique. Le temps de latence varie selon les types de formations. Tous ces facteurs concourent à la variabilité de la disponibilité en eau.

Le bassin du fleuve Sanaga est soumis aux bouleversements causés par le déficit des ressources en eau résultant du changement climatique. Ce déficit induit une perception du milieu. Les aménagements urbains contribuent à l'accélération du charriage ou du comblement des lits du fleuve et ses affluents. L'urbanisation augmente le pourcentage des surfaces imperméables au sein du bassin versant accentuant l'écoulement de surface. Son effet immédiat est la diminution du temps de concentration des eaux dans les cours d'eau avec les inondations comme répercussions. Ce qui réduit les infiltrations et la recharge des nappes

CONCLUSION

Le bassin versant du fleuve Sanaga est couvert en amont à près de 30 % par un climat tropical humide avec trois à quatre mois secs. Dans sa zone médiane comprenant le plateau Sud Camerounais, le bassin est traversé à près de 50 % par un climat équatorial de type Guinéen à quatre saisons. De la partie Ouest à l'aval du bassin, couvre un climat équatorial de mousson à près de 20 %.

Il ressort que les précipitations qui ont baissé dans le bassin à partir de 1973, excèdent rarement 1700 mm, l'interannuelle 1978-1979 faisant l'exception (2406,1 mm). Les températures ont légèrement augmenté depuis 1982. Les quantités d'eau de pluies ont baissé de 59 % dont 12 % de cas seulement jusqu'en 1973, et les températures ont augmenté en moyenne de 0,53 °C. Ce qui intensifie l'évaporation de décembre en mars. Ces résultats de chute et de hausse ont été confirmés par les ruptures issues du test de Pettitt. La déclivité du bassin versant vers le Sud- Est favorise le ruissellement au profit de l'infiltration. Cependant, la dominance des plateaux témoigne du contraire, d'où l'écoulement représente 29,5 % des précipitations qui ont chuté au fil des décennies. L'écoulement suit l'évolution

des précipitations et le régime de la Sanaga est très irrégulier. La variation des débits suit le rythme climatique à 53 %. Les fluctuations des éléments climatiques (précipitations, températures) influencent la production de l'énergie hydroélectrique.

La production de l'énergie hydroélectrique suit le rythme climatique à 76,5 % de cas, ainsi que l'évolution des débits. La Centrale d'Edéa est sous exploitée, car sa production varie de 46,38 % en 1982-1983 à 61,61 % en 1978-1979 de la capacité des machines installées. On a évalué 23,5 % de discordance dans les corrélations entre le climat et les productions suite aux problèmes techniques tels que le manque de dragage, l'ouverture des déchargeurs de crues en saison pluvieuse, la maintenance et l'entretien. Le prix du kWh de l'énergie hausse de 16 à 25 % des crues à l'étiage selon les souscriptions, dans la journée entre 23 h00 à 18h 00 et entre 18 h00 à 23 h00. Cette stratégie a permis à AES SONEL de réduire ses charges à près de 20 %. Les effets entre les réservoirs et l'environnement sont réciproques. La sécurité montée jusqu'à présent dans l'usine est importante, mais il y a encore des efforts à faire pour la sécurité du travailleur. Le climat cause des pertes très importantes à ALUCAM, au total 1 112 500 000 F CFA pour une saison sèche sévère et assez longue. Les résultats de ce travail constituent une production des services climatologiques et hydrologiques.

Les activités humaines se pratiquent sur des sols variés et évolués qu'elles perturbent, fragilisent, malaxent et exposent à l'érosion. Les variétés des sols au sein du bassin de la Sanaga résultent de la variabilité de sa nature géologique et la diversité des espèces végétales qui couvrent l'ensemble. Les activités intenses au sein du bassin sont plus développées sur la rive droite de la Sanaga suite à sa concentration démographique. On note une érosion intense des traînées aux crevasses. Les eaux de ruissellement entraînent d'importantes quantités de matières qui s'accumulent au niveau des barrages et réservoirs réduisant leur profondeur et leur capacité, provoquant le comblement et empêchant ainsi une bonne appréciation des débits. La hauteur de ces dépôts réduit la quantité d'eau disponible. La dégradation spécifique moyenne du bassin a été évaluée à 25 t/km²/an.

**CHAPITRE IV. CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES**

IV.1. CONCLUSION GENERALE

Le sujet qui a fait l'objet de notre étude portait sur «Facteurs climatiques, régimes hydrologiques et production de l'énergie hydroélectrique au Cameroun : cas du bassin de la Sanaga». Ce thème a étudié l'impact du climat sur les écoulements et par ricochet sur la production de l'énergie hydroélectrique dans ce bassin versant. Les chutes et barrages surplombent le fleuve Sanaga dont le bassin versant subit l'influence des conditions physiques et biologiques des quatre zones agroécologiques qui le couvre.

Les ressources hydriques sont considérées comme une source d'énergie inépuisable. Leur exploitation pour des fins de production d'énergie électrique constitue un défi pour la plupart des pays qui tendent à réduire leur dépendance aux sources d'énergie fossile tels que les hydrocarbures et le charbon. Par ailleurs, les coupures intempestives et inopinées de courant sur le réseau électrique sont notées depuis l'année 2000 avec leurs inconvénients. La raison liée à ces coupures d'après le producteur et vue l'importance de l'énergie dans le développement de toute la nation, ont amené à réfléchir dans ce travail sur les effets des précipitations et des températures dans le bassin du fleuve Sanaga. Le but est de déterminer les conséquences des fluctuations des facteurs climatiques sur la production de l'énergie hydroélectrique à Edéa ainsi que les effets de cette production, liés à la variabilité climatique.

Pour atteindre nos objectifs, on a utilisé la méthode hypothético-déductive qui a consisté à émettre les hypothèses qui ont été vérifiées sur le terrain. Cette méthode a été appliquée en quatre étapes à savoir :

- ✓ La collecte des données secondaires météorologiques, hydrologiques, et celles de la production de l'énergie hydroélectrique réelle par la Centrale ;
- ✓ La cartographie de l'état du couvert végétal dans le temps ;
- ✓ L'établissement des corrélations entre le climat et les productions de l'énergie hydroélectrique ;
- ✓ Évaluation des impacts des productions, liés au climat, par des observations sur le terrain sur les plans social, économique et environnemental.

Au vu de ce qui précède, il ressort que dans son cours supérieur le bassin du fleuve Sanaga est couvert à près de 30 % par un climat tropical humide avec trois à quatre mois secs, une moyenne de précipitations de 1511,1 mm par an, une végétation dominée de

savanes arbustives et de forêt sub-montagnarde dégradée. Dans la zone médiane comprenant le plateau Sud Camerounais, le bassin versant traverser à près de 50 % par un climat équatorial de type guinéen à quatre saisons, reçoit en moyenne 1484,1 mm de précipitations par an. Il s'est formé une végétation de forêt caducifoliée et une mosaïque forêt-savane sous l'action anthropique et la nature des sols. Le cours moyen de la Sanaga est également influencé par la partie occidentale couverte par les Hautes terres de l'Ouest au climat équatorial de type camerounien dont les précipitations moyennes annuelles sont supérieures à 1600 mm par an. La végétation est celle de forêt montagnarde et de savanes, formant un écosystème de Grassland. Le cours inférieur du bassin est couvert par un climat équatorial de mousson à près de 20 % où ne passe presque pas de mois sans pluie. La pluie moyenne dans cette partie est de 2538,6 mm, la végétation est celle de forêts sempervirentes et de groupements montagnards dans les hauts plateaux de l'Ouest.

Le cadre physique influence indirectement le comportement de l'eau. Les nuances relevées découlent de la variabilité des composantes géophysiques et de l'anthropisation. La sismicité au Cameroun n'épargne aucune localité. Si l'instabilité de certaines localités relève de la dynamique de la Ligne Volcanique du Cameroun avec des anciens et récents volcans, celle des autres constitue des phénomènes induits et inattendus (Sud-Est du pays) vue l'altitude à laquelle ces localités se trouvent. Certaines déformations telles que la chaîne de Ngovayang, trouvent leur origine au métamorphisme. Ces résultats la variabilité bathymétrique des fonds de lits des cours d'eau du grand Sud Cameroun.

La déclivité du bassin vers le Sud-Est tend à favoriser le ruissellement au profit de l'infiltration. Cependant, la dominance des plateaux témoigne du contraire. L'écoulement ne représente que 29,5 % des précipitations chutées au fil des décennies. Les précipitations tombées au début de la petite saison pluvieuse reconstituent les nappes souterraines. Les évaporations étant plus élevées que les précipitations, toutes les pluies en cette saison s'évaporent. En ce moment, les écoulements sont rares. Les eaux des cours d'eau (lits, retenues, réservoirs) s'évaporent. C'est l'étiage absolu et dans les secteurs de Banyo, Meiganga, Betaré-Oya, les vents vont plus vite en direction du Nord (décembre). Par contre, les vents de direction Sud-Est de juillet s'accroissent dans le secteur Koundja, Yoko, Nanga-Eboko, Ngambé. Ces vents accélèrent l'évapotranspiration.

Les fluctuations des éléments climatiques (précipitations, températures) influencent considérablement la production de l'énergie hydroélectrique. Les précipitations qui ont baissé dans le bassin à partir de 1973, excèdent rarement 1700 mm, l'interannuelle 1978-1979 faisant l'exception (2406,1 mm). Les températures ont légèrement augmenté depuis 1982. Ce qui intensifie l'évaporation de décembre en mars. L'écoulement tend à suivre l'évolution des précipitations drastiquement influencées par l'évaporation. Le régime du fleuve Sanaga est très irrégulier. Les quantités d'eau de pluies ont baissé de 59 % dont 12 % de cas seulement jusqu'en 1973, et les températures ont augmenté en moyenne de 0,53 °C. La vitesse des vents accélère l'évapotranspiration en juillet (19,2 %) et décembre (502,5 %).

La variation des débits suit le rythme des éléments climatiques à 53 %. La production de l'énergie hydroélectrique réelle suit le rythme de ces éléments à 76,5 % de cas, ainsi que l'évolution des débits. La Centrale d'Édéa est sous exploitée, car sa production varie entre 46,38 % et 61,61 % de la capacité des machines installées. En début de la saison sèche, l'étiage est géré lorsque le débit devient inférieur à 1024 m³/s à Songloulou et 935 m³/s à Édéa. On doit faire appel aux lachures des retenues. L'étiage dure 3 à 6 mois selon les années. Mais exceptionnellement, il n'a duré qu'un mois en 1955 -1956, 7 mois pour les années 1983-1984, 1996-1997, 2002-2003. Les délestages commencent lorsque les débits chutent jusqu'à 724 m³/s à Songloulou et 524 m³/s à Édéa.

Les activités humaines plus intenses et plus développées sur la rive droite du fleuve Sanaga ; ce développement résulte de la forte concentration démographique. Elles se pratiquent sur des sols variés et évolués qu'elles perturbent, fragilisent, malaxent et exposent à l'érosion. Les variétés des sols proviennent de la variabilité de sa nature géologique et la diversité des espèces végétales qui couvrent l'ensemble. Les eaux de ruissellement entraînent d'importantes quantités de matières qui s'accumulent au niveau des barrages et réservoirs réduisant leur profondeur et leur capacité, créant le comblement et empêchant ainsi une bonne appréciation des débits. Cela induit une érosion intense qui va des traînées aux crevasses. La hauteur des dépôts réduit la quantité d'eau disponible, car ils affectent la cote d'étalonnage. Les prélèvements réalisés au cours de l'année hydrologique 2009-2010 ont permis d'évaluer à 21 tonnes par km² par an en moyenne, les quantités de matériaux en suspension entraînés.

Les perturbations des paramètres météorologiques combinées à l'action anthropique agissent sur les populations riveraines aussi bien sur le plan sanitaire que sur les plans économique et environnemental. La baisse des précipitations a entraîné la baisse des débits et par ricochet celle de la production réelle de l'énergie face à une demande beaucoup plus accrue. Cette baisse des précipitations résulte du basculement de la branche Est du FIT vers l'hémisphère Sud. La hausse des températures au sein du bassin provient du réchauffement global, atténué par une abondante végétation et la densité du réseau hydrographique. La discordance de corrélations entre les facteurs climatiques et la production hydroélectrique résulte des problèmes techniques tels que la maintenance et l'entretien, l'envasement et le comblement, l'ouverture des déchargeurs de crues en saison pluvieuse.

Le climat cause des pertes importantes à savoir 875 FCFA de TVA par mois par abonné moyen et plus de 10 000 000 auprès des grands consommateurs tels qu'ALUCAM. Le prix du kWh de l'énergie hausse de 16 à 25 % de la saison humide à la saison sèche selon les souscriptions ou dans la journée de 23h00 à 18h00 et de 18 h00 à 23h00. Cette stratégie a permis à l'entreprise concessionnaire de réduire ses charges à près de 20 %.

Les effets entre les réservoirs et l'environnement sont réciproques. L'eau accumulée produit des maladies hydriques par multiplication des vecteurs. Les terres rendues hydro morphes par les eaux retenues et libérées pendant l'étiage, deviennent cultivables. Les populations les occupent par des cultures saisonnières. L'activité halieutique s'accroît. L'absence d'arbres le long des rives à proximité des barrages est due à la turbulence de l'eau et à la modification du milieu écologique. Après des fortes pluies, les animaux (reptiles, mammifères) sont retenus parfois contre les grilles à l'entrée des conduites forcées. Ce qui traduit la destruction de leurs habitats.

La température de surface de l'Atlantique manifeste une hausse, la conséquence directe étant les épisodes de pluies exceptionnelles (IDF) entraînant des récurrences d'inondations. L'anthropisation a dégradé le couvert végétal et l'érosion s'est accentuée, d'où la sédimentation des matières en suspension. La sédimentation a baissé les débits. Les matières dissoutes ont corrodé les machines, les entraînant à l'arrêt sinon à une maintenance régulière. La récurrence de l'ENSO a baissé les précipitations. Les sous bassins de la Sanaga comprennent la plupart des régimes hydrologiques du Cameroun en dehors de celui des Mayo secs (cours d'eau intermittents). Pour cela, on s'intéressera plus sur ce bassin

d'autant qu'il est le plus important du Cameroun. Les conditions les plus convenables pour la production hydroélectrique sont un approvisionnement régulier en eau lié aux fortes précipitations et à leur répartition régulière le long de l'année, une chute d'eau par le biais d'un barrage et un vaste marché pour l'énergie hydroélectrique.

En définitive, on peut dire que l'objectif de ce travail qui visait à déterminer l'impact des variations des facteurs climatiques sur les ressources en eau pour une production de l'énergie électrique le long du bassin de la Sanaga est atteint.

- ✓ Les perturbations des paramètres météorologiques combinées à l'action anthropique agissent sur la société aussi bien sur le plan sanitaire que sur les plans économique et environnemental. La baisse des précipitations a causé la baisse de la production de l'énergie hydroélectrique face à une demande plus accrue. Cette baisse des précipitations résulte du basculement de la branche Est du FIT vers l'hémisphère Sud conduisant à la diminution de l'hydraulicité de la Sanaga depuis 1973. Cependant la diminution de l'hydraulicité et la baisse des précipitations se sont combinées à la hausse des températures de 0,53 °C au sein du bassin, effet du réchauffement global atténué par une abondante végétation et la densité du réseau hydrographique. Pour le premier objectif où il était question d'évaluer les facteurs climatiques principaux, il ressort d'une part une augmentation de la température de surface de l'océan Atlantique de 1,17°C dans l'hémisphère Sud et de 5,57 °C dans l'hémisphère Nord et d'autre part, celle de l'air au sein du bassin du fleuve Sanaga avec une équation de tendance $y=0,0137x+23,364$. Par contre, les précipitations sont en régression avec une tendance d'équation $y=-0,641x+1866$ et le rapport entre la valeur décennale maximale et la minimale (K3) est de 1,28.
- ✓ Traitant du deuxième objectif où il fallait établir la relation entre les variations des facteurs climatiques et les ressources en eau pour la production de l'énergie hydroélectrique, on remarque une augmentation progressive de l'évapotranspiration potentielle (ETP) a une tendance d'équation $y=0,748x+1246$ bien qu'il y ait contraste dans les différents niveaux du bassin. Cette ETP qui chute dans le cours inférieur, augmente les cours supérieur et moyen avec une intensification dans ce dernier. On a évalué le coefficient d'écoulement (K_e) dont la moyenne est de $26,97 \pm 4,5\%$.

- ✓ S'agissant du troisième objectif tenant à comparer l'évolution de l'énergie hydroélectrique potentielle (E_p) des barrages et chutes et la production réelle (E_r) des Centrales installées au sein du bassin de la Sanaga, on a pu relever que l' E_r et l' E_p sont liées par les relations $E_r=0,1937E_p+831100$ et $E_r=0,983E_p+302859$, respectivement à l'échelle annuelle et mensuelle pour des proportions correspondantes de 61,39 % et 20,39 %.
- ✓ Pour le quatrième objectif, on a relevé un développement des savanes et de la mosaïque de cultures. Les superficies recouvertes par les retenues d'eau, la mosaïque des cultures et des savanes ont augmentées alors que celles des forêts ont diminué. Ce recul des forêts est évidemment conjoint à la disparition de certaines espèces floristiques par endroits.
- ✓ Le cinquième objectif était axé à établir les corrélations entre les variations des facteurs climatiques et la production de l'énergie hydroélectrique, il ressort que cette dernière est liée respectivement aux précipitations et températures à 75 % et à 50 % suivant l'échelle interannuelle. A l'échelle saisonnière, ce rapport est de 51 % et 45 % avec les mêmes paramètres. Quant au rythme des débits, la production de l'énergie hydroélectrique à la Centrale d'Édéa évolue par un lien de 75 % avec débits à l'échelle interannuelle et 59 % à l'échelle.

IV.2. PERSPECTIVES

La sous exploitation de la Centrale d'Édéa amène à croire en une mauvaise appréciation des chutes d'eau. A cet effet, une nouvelle étude bathymétrique des sites potentiels avec les outils d'appoint s'avère inéluctable pour une meilleure appréciation des hauteurs de chutes en vue d'un choix technologique adéquat.

IV.3. RECOMMANDATIONS

Pour surmonter les problèmes environnementaux en faveur d'une gestion durable de l'eau au niveau des réservoirs, de nombreux efforts s'imposent quant à la maximisation de la productivité dans tous les secteurs d'activités. Ainsi, certaines solutions sont proposées.

IV. 3. 1. Au Gouvernement

Afin de surmonter les déficits énergétiques et tirer profit des investissements dans ce domaine, il est suggéré au Gouvernement de :

- Orienter les réalisations des aménagements des sites par ordre d'importance ;
- Recommander une réévaluation topographique de l'escarpement d'une chute au début des travaux ;

- Interpeler chaque partie prenante pour le succès du projet, au respect de ses responsabilités suivant le diagramme organisationnel d'aménagement d'un barrage hydroélectrique ;
- Diversifier la fourniture d'énergie avec les sources alternatives telles que la biomasse, la photovoltaïque.

Pour une gestion efficiente et rationnelle de l'eau, il est suggéré particulièrement au MINEE de :

- S'arrimer aux normes internationales et les mettre en œuvre ;
- Redéfinir les méthodes de contrôle des activités portant atteinte aux ressources en eau ;
- Mettre en œuvre une gestion intégrée des ressources en eau en associant toutes les parties prenantes, afin de maximiser les avantages et minimiser les dangers liés à l'utilisation de l'eau ;
- Créer des mécanismes facilitateurs à la recherche dans le domaine ;
- S'assurer des caractéristiques des machines avant leur installation ;
- Recommander le remplacement des machines devenues vétustes, le problème de maintenance se posant suite à l'évolution de la technologie.

Aux fins de limiter davantage les problèmes des aménagements des barrages, il est proposé au MINEPDED de :

- Opérer le reboisement des berges des bassins d'écoulement ;
- Etablir un calendrier des services environnementaux (taxes, audit) au niveau des barrages ;
- Prévenir les risques hydro-climatiques (les inondations, la nébulosité), sanitaires, sociologiques, technologiques et écologiques découlant des barrages ;
- Utiliser et faire appliquer la série des normes ISO 14 000 qui concernent le management de l'environnement ;
- Mettre en vigueur des mesures facilitatrices à l'accès aux données pour des besoins d'études, gage éventuelle de l'amélioration de gestion des infrastructures.

Dans le cadre d'atténuation du comblement des barrages, il importe au MINEPIA de :

- Pratiquer ou d'encourager l'élevage du poisson dans les barrages pour la consommation des alluvions en vue du retardement de l'envasement ;

- Orienter le choix des espèces favorables conjointement à l'écologie des réservoirs et à la conservation de la biodiversité ;
- Apporter une assistance technique en vue de guider les modes de pêche.

IV. 3. 2. A l'Observatoire National sur les Changements Climatiques (ONACC) et à la Direction de la Météorologie Nationale (DMN)

Dans le but d'éviter les déboires des aléas climatiques, il leur est proposé de :

- Collaborer étroitement pour le suivi des facteurs climatiques et paramètres météorologiques afin de maximiser l'atteinte des objectifs visés ;
- Mettre l'accent sur la prévision du temps ;
- Améliorer la fiabilité des prévisions météorologiques ;
- Faire des simulations des modèles de prévision numérique sous forme de cartes ;
- Renforcer la collaboration avec d'autres structures d'études (ORE-BVET, EDC, ARSEL) ;
- Vulgariser les services climatologiques et hydrologiques ;
- Mettre à profit des ressources utiles en la matière.

IV. 3. 3.A Electricity Development Corporation (EDC)

Il est suggéré à EDC, institution d'aménagement et de développement des infrastructures de l'énergie électrique au Cameroun de :

- Jouer le rôle de bras séculier de l'Etat dans les choix objectifs prioritaires d'agencement des projets à réaliser ;
- Installer des stations d'observations pour le monitoring environnemental et de surveillance de turbidité pour l'évolution des éléments environnementaux, modèle de la Direction des Grands Travaux du Canada (DGTC).

IV. 3. 4. A l'entreprise concessionnaire (ENEO)

L'eau étant la seule matière première de son industrie, il est nécessaire de :

- Mettre en œuvre des mécanismes décourageant la pression anthropique sur les écosystèmes du Cameroun ;
- Appuyer le reboisement des bassins versants à potentiel hydroélectrique ;
- Végétaliser les berges à base des espèces adaptées à la fixation ou à la rétention des matériaux le long des cours d'eau ;

- Curer les réservoirs à une cadence décennale en vue de désengorger les digues et faire recycler les matériaux curés ;
- Valoriser les redevances environnementales susceptibles de compenser les dommages issus des barrages ;
- Financer et encourager une agriculture durable en adoptant les méthodes culturales modernes afin de limiter le départ massif des matières à travers l'érosion ;
- Donner de l'efficacité énergétique des barrages en disposant d'autres sources d'énergie aux populations riveraines
- De vérifier l'offre d'énergie.

IV. 3. 5. A la Société Nationale de Transport d'Electricité (SONATREL)

Certains problèmes énergétiques relevant des pertes d'énergie au cours du transport d'électricité, la SONATREL a intérêt à :

- Revoir les types de câbles à connecter pour le ravitaillement des abonnés ;
- Installer les transformateurs dont les capacités vont avec des prévisions de la poussée démographiques dans les nouveaux quartiers ;
- Renforcer les anciens quartiers par les transformateurs adéquats, les besoins étant généralement croissants :
- Dissocier les abonnés des ménages à ceux des entreprises plus demanderesses sur les mêmes transformateurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS, W. 2000. The Social Impacts of Large Dams: Equity and Distributional Issues. *Working Paper*. The World Commission on Dams. Cape Town www.dams.org/docs/kbase/thematic/tr11main.pdf.
- ADER, 2017. Eclairer l'Afrique et l'alimenter en énergie. Revue annuelle sur l'efficacité du développement 2017. 25-30.
- AES SONEL 2006. Société Nationale d'Electricité « rapport d'activité.
- AIE. 2010. Douzième inventaire 2010 : chiffres de production 2009. *Key World Energy Stats. Observ'ER/EDF*. [online]
- AIE. 2011. Electricité: Production mondiale 2009. *Energy key Statistics* pp18 et 24.
- AIE. 2013. World energy Key statistics [online]
- AIE. 2014. Africa energy outlook: a focus on energy projects in sub-Saharan Africa. Paris
- AIE. 2019. Key world energy statistics, 80p
- ALBERGEL, J., GIODA, A., 1986. Extension des surfaces agricoles et modification de l'écoulement. Analyse sur deux bassins de la savane africaine. 19^{ème} journée de l'Hydraulique, SFH Rep. 9, Paris. 6p
- AMCOW, 2011. Approvisionnement en eau potable et assainissement au Cameroun. Un état des lieux UNICEF-WSP Programme Eau et Assainissement.
- AMELL, N. W. & REYNARDS, N. S. 1996. The effects of climate change due to the global warming on river flows in Great Britain. *J. Hydrol.* 183, 397-424.
- AMOUGOU, J. A., NDAM NGOUPAYOU, J. R., DJOCGOUE, P.-F., BESSOH BELL, S., BATHA, R. A. S., 2015. Variabilité climatique et régime hydrologique dans un milieu bioclimatique de transition : cas du bassin fluvial de la Sanaga. *Afrique SCIENCE11(5) (2015) 51 - 77* 51. ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>
- ANAPI, 2020. Investir dans le sous-secteur de l'électricité. *Cahier sectoriel*. 45p.
- ANONYME, 2010. Atlas du continent africain
- ANONYME., 2005. Variabilité hydrologique : analyses, mécanismes, impacts sur les ressources en eau. P.12 in Sciences au Sud. Le journal de l'IRD N°32 novembre/décembre, 16 p.
- ANONYME., 2008. Adaptation au changement climatique et gestion intégrée des ressources en eau. Comité technique GWP. Elanders. 12 p.
- ANONYME, 2014. Lutter contre la pauvreté et les changements climatiques. Le rôle clé des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique au Cameroun, au Mali et en Côte d'Ivoire. Argumentaire énergie. *Réseau Climat et Développement*. 12p.
- ARRIGO, S., 2012. Distribution spatiale des précipitations dans les environs du glacier de Findelen (vs). Mémoire de Master GG. 0502. Rue François Guillimann 6 1700 Fribourg. 113p.
- ARSEL, 2004. Recensement des producteurs autonomes d'énergie électrique au Cameroun ».
- ARSEL. 2014. Politique nationale, stratégie et plan d'action pour l'efficacité énergétique dans le secteur de l'électricité au Cameroun. Rapport final mars 2014. Agence de Régulation du Secteur d'Electricité-Cameroun.
- AVILA, N., CARVALLO, J.P., SHAW, B., KAMMEN, D.M. 2017. Le défi énergétique en Afrique subsaharienne : Guide pour les défenseurs et les décideurs. Première partie : Produire l'énergie pour un développement durable et équitable. *OXFAM RESEARCH BACKGROUND*. 86 p.
- BABIN, J., BABIN, N., BRUNEL, F., CAR ROUEE, M., FLAGEAT, C., FONTENAY, M., GOUVARD, C., MATHIEX, J., 1974. Documents et civilisation : Du moyen âge à 1944, 159 pages. Hachette/Paris
- BAGLO, A. M. 1980. Les conséquences géographiques de la construction du barrage de Cotonou sur la zone lagunaire du sud-est béninois. Mémoire de maîtrise en géographie, UNB, 28 p.
- BAGNOULS & GAUSSEN, 1957. Les climats biologiques et leur signification. *Ann. Géol.* XXVI, 355, 193-220.

- BANQUE MONDIALE, 2009. Stratégie énergétique du Groupe de la Banque Mondiale-Synthèse sectorielle-Réseau développement durable
- BANQUE MONDIALE, UNDP, ADB, ET MINISTÈRE FRANÇAIS DE LA COOPÉRATION, 1992. Evaluation hydrologique de l'Afrique sub-saharienne- Pays de l'Afrique de l'Ouest : rapport de pays : Cameroun. *Banque Mondiale*, Washington DC, 574 p.
- BANQUE MONDIALE, 2014. Electric power consumption (kWh per capital. <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC>.
- BARAKAT, F., & HANDOUFE, A. 1998. Approche agroclimatique de la sécheresse au Maroc. *Sciences et changements planétaires. Sécheresse*, 9(3), 201-208.
- BARD, E., 2010. Influence du soleil sur le climat. Conférence prononcée le 2 décembre 2010 dans le cadre du partenariat entre le Collège de France et le Collège Belgique. p. 32-35.
- BATAILLER, G., TOSSER, A., 1972. *Electrotechnique. Du cours aux applications technologiques*. 2 vol. A. Colin/Paris.
- BEAUVILAIN, A., DONGMO, J.L., PABA SALE, M., PAHAI, J., ROUPSARD, M., SEIGNOBOS, C., 1983. Atlas aérien du Cameroun : Campagnes et villes. Université de Yaoundé. 138 p.
- BEN YAHMED, D. (Ed.) 2006. Cameroun. *Les Éditions Jeune Afrique*, coll. « Atlas de l'Afrique ». Paris.
- BERTRAND, M.-N. 2013. Hydroélectricité : barrage contre la privatisation.
- BESSOH BELL, S., 2005. L'influence des fluctuations hydroclimatiques sur les productions de l'énergie hydroélectrique et de l'aluminium : cas du barrage d'Édéa. Mémoire Maîtrise Université de Yaoundé I. 84 p.
- BESSOH BELL, S., 2012. Impact de la variabilité climatique et de la sédimentation sur la disponibilité en eau au niveau du barrage sur la Sanaga à Édéa. Mémoire DESS. Université de Yaoundé I. 74 p.
- BESSOH BELL, S., AMOUGOU, J.A., TCHINDJANG, M., BIYE, E.H. 2019a. Hydroclimatic fluctuations and hydroelectric energy production of the Édea dam on the Sanaga River (Southern Cameroon). In *Lambert Academic Publishing* (1). ISBN: 978-613-9-86365-5
- BESSOH BELL, S., NDAM NGOUPAYOU, J.R., AMOUGOU, J.A., BIYE, E.H., TCHINDJANG M. 2019b. Final toll of fluvial erosion on suspended and dissolved materials flux in the Sanaga River basin. In *Lambert Academic Publishing* (2). ISBN: 978-613-9-86365-5
- BIEDERMANN, P., CAZAILLET, D., ARSEL. 2005. Etude environnementale du barrage de Lom-Pangar. Impact hydraulique à l'aval. Thème 14 SOGREAH, 163p.
- BIGOT, S. 1997. Les précipitations et la convection profonde en Afrique Centrale: cycle saisonnier, variabilité interannuelle et impact sur la végétation. Thèse Université Bourgogne, 282p.
- BIGOT, S., MASON, V., MELICE, J.L, SERVAT, E. PATUREL, J.E. 1998. Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique Centrale. In: "Water resource variability in Africa during the XXth century. *Proceeding of Abidjan 98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, novembre 1998*". (Ed. by E. Servat, D. Hugues, J.M. Fritsch, M. Hulme) 71-78. AISH Publ. 252.
- BISWAS, A. R., TORTAJADA. C. 2001. Sustainable development and large dams: a global perspective. *International Journal of Water Resources Development*. Vol. 17(1). pp. 9-21.
- BLANCHARD, D., 2013. D'où vient l'énergie électrique. Production électrique. 9p.
- BOEGLIN, J. L., BOLI BABOULE, Z., BRAUN, J.J., NYOBE, J.B., 1999. Homme et érosion au Cameroun. Compte rendu de l'atelier d'expertise collective MINREST/IRD, Yaoundé, 6-7 mai. 25 p.
- BOEGLIN, J. L., BRAUN, J.J., NDAM, J.R., 2000. Les transferts de matières en zone tropicale humide. Exemple de quelques bassins versants du sud Cameroun. In : Bulletin du réseau érosion n°20 vol 2. IRD/GTZ, pp.38-46.
- BONNEAU, C., SCIAMA, Y. 2010. Climat : le réchauffement est-il sûr ? *Science & Vie*. N°. 1110. 40-64.
- BOUAFIA, A., AMEUR-BOUZID, D., LACHENANI, A., 2007. Fondations sur pieux de la centrale thermique de Jijel-analyse des essais de chargement. In: *Soils of Africa/ Les sols d'Afrique*. M. Bouassida, S. U. Ejezie, E. Rust, P. Nouanga, E. M. Kana, 14th African Regional Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Yaoundé, 26-28 novembre 2007, pp. 225-230.

- BOUCHER, M.A. & LECONTE, R. 2013. Changements climatiques et production hydroélectrique canadienne : où en sommes-nous? *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, volume 38, pp. 196-209.
- BOUM, J.P., SIGHA-NKAMDJOU, L., AYISSI, G., NWALAL, J. 1983. Etudes hydrologiques du Ntem aux chutes de Memve'ele. Rapport de synthèse campagnes 1980-1983.DGRST/IRGM, Yaoundé-Cameroun.
- BOYOGUEMO, S. H., MBESSA, M., TAMO TATIETSE, T., 2012. Prediction of Flow-Rate of Sanaga Basin in Cameroon Using HEC-HMS Hydrological System: Application to the Djerem Sub-Basin at Mbakaou. In *Energy and Environment Research*; Vol. 2, No. 1; pp. 205-216.
- BRICQUET, J.P., BAMBA, F., MAHE, G., TOURE, M., OLIVRY, J.C. 1997. Evolution récente des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Revue des Sciences de l'eau*, 3 : 321-337.
- BUCREP, 2010. Recensement général de la population et de l'habitat 2005. Rapport de présentation des résultats définitifs (Yaoundé, mars 2005). 6 volumes + 1 édition spéciale.
- BUNNETT R.B., OLATUNDE OKUNROFITA P., 1983. *General Geography in Diagrams for West Africa*. Longman, 380p.
- CALDEIRA, K, WICKETT, M.E. 2005. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J Geophys Res* 110:C09S04.
- CAMBERLIN, P., 2012. Climatologie-Météorologie. *L2 Terre-Environnement*. Cyclone sandy. 10p.
- CAMBERLIN, P., JANICOT, S. PICCARD, I. 2001. Seasonality and atmospheric dynamics of the teleconnection between African rainfall and tropical Sea Surface Temperature Atlantic vs ENSO. *International Journal of Climatology*, **21**, 973-1005.
- CARLOS DE ARUJO, J., BRONSTERT, A., GUNTNER, A., 2005. Influence of reservoir sedimentation on water yield in the semi-arid region of Brazil. pp. 301-305. In: *Sediments Budgets 2, 2005* (Arthur Horowitz et Des E. Walling), IAHS Press.
- CARRIÈRE, P., BOTOSANEANU, L., 2014. Fleuves, *Encyclopædia Universalis*
- CARTWRIGHT, A., 2015. Better growth, getter cities: Rethinking and redirecting urbanization in Africa. Working paper. London and Washington, DC: New Climate Economy.
- CASENAVE, A., VALLENTIN, C., 1989. Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, Paris. *Coll Didactiques*. 229 p.
- CASSOTI, 2006. Végétalisation des talus. Séminaire des Travaux Publics sur la reconstitution des écosystèmes après aménagement. Yaoundé, nov. 2006. 126 p.
- CASSOU, C., 2004. Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation Nord Atlantique. *Météorologie théorique*. Prix Prud'homme 2002. *La Météorologie* n°45. 21-32.
- CASTELLANO, A., KENDALL, A., NIKOMAROV, M., SUTEMMER, T. 2015. Brighter Africa: the growth potential of the sub-Saharan electricity sector. McKinsey Report. <http://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/powering-africa>.
- CAUSERET, P., SARRAZIN, L. 2001. Les saisons et les mouvements de la Terre. Paris : Belin Pour la Science. 127p.
- CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec), 2014. Guide d'interprétation de la fiche technique d'un barrage. *Direction de la sécurité des barrages*. 22p.
- CEPMAE, 1976. Géographie du Cameroun. 288p.
- CHASTENAY, P. 2004. Un tour d'horizon du système solaire : formation générale en science et technologie. Centre de développement pédagogique, Mise à jour : octobre 2006- Planétarium de Montréal. 28p.
- CIEH, 1978. Précipitations journalières de l'origine des stations à 1972. République du Cameroun. Tome1. ORSTOM. 612p.
- CNRS, 2014. Changement climatique : des données alarmantes. <http://www.cnrs.fr>.
- CONWAY, D. & JONES, P. D. 1999. Assessing the impact of future climatic change on the water resources and the hydrology of the Rio de la Plata basin, Argentina. Climatic Research Unit, University of East Anglia, UK. FAO-UNESCO (1974-1981) *Digitized Soil Map of the World*. FAO, Rome, Italy.

- CRAUSSE, P., & VIEILLEFOSSE, F., 2011. De l'eau à la lumière, un siècle d'énergie hydroélectrique en France, *Nouvelles Éditions Loubatières*, Toulouse, [ISBN](#) 978-2-86266-649-5.
- DAMON, P. E., SONETT, C. P. 1991. Solar and terrestrial components of the atmospheric ¹⁴C variation spectrum. *The Sun in Time*, ed. C. P. Sonett, M. Giampapa and M. S. Matthews, The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 360-388.
- DAVOC (Draw A Vision Of Cameroon). 2011. La problématique de l'électricité au Cameroun. 11p.
- DELEAU, A. (2007). Modélisation pluie-débit sur le bassin versant du Lez pour la prévision des crues. Master Géorisques, Maison des Sciences de l'Eau. Université de Montpellier. 18p.
- DESCROIX, L. E., GAUTIER, E., BESNIER, A. L., OKECHUKWU AMOGU, VIRAMONTES, D., GONZALEZ BARRIOS, J. L., 2005. Sediments budget as evidence of land-use changes. pp. 262-263. In: *Sediments Budgets 2, 2005* (Arthur Horowitz & Des E. Walling), IAHS Press.
- DHONNEUR, G. 1985. *Traité de météorologie tropicale*. MétéoFrance. Paris, 151 p.
- DJOUFACK-MANETSA, V. 2011. Etude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun: analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. Thèse de Doctorat Université Bourgogne, 321p.
- DOROT, M., 1972. Contribution à l'étude des interactions Océan atmosphère sur les côtes de l'ouest Africain. D.E.M/ ASECNA N°24. 82 p
- DUBREUIL, P., GUISCAFRE, J., NOUVELOT, J.F., OLIVRY, J.C., 1975. Le bassin de la rivière Sanaga. *Monographies hydrologiques*. Tome 3. Ed. ORSTOM, Paris, 350 p.
- DUME, I. 2006. Un champ électrique crée un vortex dans l'eau, *Science & Vie*, N° 1061, p. 20.
- DUPLESSY, J.-C., MOREL, P., 1990. Gros temps sur la planète. *Odile Jacob*.
- DZANA, J. G., NDAM NGOUPAYOU, J. R., TCHAWA, P., 2010. The Sanaga discharge at Édéa catchment outlet (Cameroon): an example of hydrologic responses of a tropical rain-fed river system to changes of precipitation and ground water inputs and to flow regulation. *River Research applications/Wiley InterScience*. 18p.
- EDF, 2000. Production de l'électricité. 10p.
- EVANS, T., 1994. History of Nile flows in P.P. Howell and J. A. Allan (Eds) *The Nile: sharing a scare resource*. Cambridge, Univ.Press. pp 27-63.
- EYONG, G. 2019. Atelier national sur la convention d'Helsinki de 1992. Contributions de Centre des Recherches Hydrologiques (CRH) dans l'évaluation des ressources en eau au Cameroun. IRGM/CRH. 14p.
- FONDJA-WANDJI, Y.D. 2007. *Le Cameroun et la question énergétique : analyse, bilan et perspectives*, Editions L'Harmattan, 141 p. ISBN 9782296024939.
- FONDJA-WANDJI, Y.D. 2012. Énergie, économie et environnement : contradiction ou co-développement : le cas du Cameroun, *L'Harmattan*, 296 p. ISBN 9782296965577.
- GIEC, 2001. Bilan 2001 des changements climatiques: les éléments scientifiques. Rapport du groupe de travail I du GIEC, contribution du groupe de travail I au 3^e rapport d'évaluation du GIEC : www.ipcc.ch/pub/reports.htm
- GIEC, 2015. Changements climatiques 2014. L'atténuation du changement climatique. Résumé à l'intention des décideurs et résumé technique. Contribution du Groupe de travail III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 179p.
- GLEICK, P. H. 1986. Methods for evaluating the regional hydrology impacts of global climatic changes. *J. Hydrol.* 88., 97-116.
- GRAMME, 2006. Les barrages. Henrad Dominique, Yilmaz Jonathan, Jidovtseff Denis, Daenen Guillaume. 52p.
- GRAY, D.M., & WIGHAM, J.M. 1972. Etude générale du ruissellement et de la précipitation. 27p.
- GRINBERG, I. 2003. L'aluminium. Un si léger métal. Découvertes Gallimard. 128 p.
- GUEI, A., DON, O., MENIN, M., 2007. Désordres des fondations du pont Houphouët-Boigny à Abidjan, Côte d'Ivoire. In *Soils of Africa/Les sols d'Afrique*. M. Bouassida, S. U. Ejezie, E. Rust, P. Nouanga,

- E. M. Kana, 14th African Regional Conference for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Yaoundé, 26-28 novembre 2007, pp. 429-433.
- GUISCAFRE, J., NOUVELOT, J.F., 1972. Les facteurs conditionnels du régime. Monographie de la Sanaga. Première partie, ORSTOM, Paris, 113 p.
- HAMON, C, 2014. Conditions météo en temps réel à Plévenon, dans les Côtes-d'Armor. Théorie sur le calcul d'ensoleillement. www.plevenon-meteo.info
- HARLEY, CDG & al. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol Lett* 9:228–241.
- HEURAUX, C., 2010. L'électricité au cœur des défis africains-Manuel sur l'électrification en Afrique. Editions Khartala.
- HUBERT, P., CARBONNEL, J.P., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries des précipitations et des débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology* 110, 349-367.
- HULME, M. 1994. Global change in precipitation. In "The instrumental period. Global precipitation and climate change" M. Dubois & F. Désalmond, Eds. Springer-Verlag, 387-405.
- HUMBEL, F.X. 1972. Initiation à la pédologie et aux sols camerounais. ORSTOM, Yaoundé, 159p.
- HURRELL, J.W., 2003. An overview of the North Atlantic Oscillation. Eds. Geographical monograph series, **134**, 1-22.
- HYDRO-QUEBEC, 2009. *Plan stratégique 2009-2013 : Efficacité énergétique, énergies renouvelables et innovation technologique*, Montréal, juillet 2009 [ISBN 978-2-550-56206-1](https://doi.org/10.1007/978-2-550-56206-1). p. 20.
- IDAF, 1995. Enquête cadre et étude socioéconomique de la pêche artisanale maritime au Cameroun. Rapport technique n°75. Department of international development cooperation of Denmark. Food and Agricultural Organization of the United Nations. 104p.
- IGECO (Electricité de France) 1967. Etude générale de l'électrification – prospection hydroélectrique. République Fédérale du Cameroun août 301 p + 1HT. ORSTOM.
- IGECO (Electricité de France) 1968. Etude de la Crue exceptionnelle en vue du calage du plancher de la salle des machines à Édéa Diapositives ORSTOM. 156p..
- INOUSSAH, M.M., ADOLPHE, M.I., and DANIEL, L. 2017. Assessment of Sustainability Indicators of Thermoelectric Power Generation in Cameroon Using Exergetic Analysis Tools. *Energy and Power Engineering*, **9**, 22-39.
- ISNARD, H., 1952. La mécanique du climat de l'ouest africain. *L'information géographique*. Persee, vol. 16, n° 3, p. 98-100.
- ITIE, 2016. Initiatives pour la transparence dans les industries extractives. Rapport 2014.
- JAUMOTTE, A.-L., DECOCK, P., MEGNINT, L., VERDURAND, G., 2014 Turbines hydrauliques- Description et évolution. B4 407. Techniques de l'ingénieur, traité Génie mécanique. 19p.
- JENNY, M. 2016. Turbomachines. Energies hydraulique et éolienne. *Minesnancy, ARTEM*. Département Énergies & fluides. 187p.
- JONES, P.D, NEW, M., PARKER, M., RIGOR, E.G. 1999. Surface air temperature and its change over the 150 years. *Reviews of Geophysics*. **37**. 173-199.
- JUBELIN, F., 2000. Anatomie d'un orage, meteorology, *Science & Vie* N° 994. 114-117.
- KAMDEM, K., M. 2012. La contribution de l'énergie à la réduction de la pauvreté en milieu rural au Cameroun. ICBE-RF Research Report n°08/12. Investment Climate and Business Environment Research Fund. 37p.
- KAMGANG, G. R., 2003. Flux de matières particulaires en zone de savane arbustive, exemple du Lom à Bétaré-Oya (Est-Cameroun). Mémoire DEA. Univ. Yaoundé I. 78 p.
- KANE, A., 2005. Régulation du fleuve Sénégal et flux de matières particulaires vers l'estuaire depuis la construction du barrage de Diama. pp.279- 290. In: *Sediments Budgets 2, 2005* (Arthur Horowitz & Des E. Walling), IAHS Press. 933 p.
- KIMANI, M. 2008. De l'électricité pour les économies africaines. *Afrique Renouveau*. 7p.

- KOUSSA, M., MALEK, A., HADDADI, M., 2007. 'Apport Energétique de la Poursuite Solaire Sur Deux Axes Par Rapport Aux Systèmes Fixes. Application Aux Capteurs Plans', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 515 – 537.
- KPOUMIE A., 2007. Transport solide en suspension et analyse des sédiments de la zone de contact forêt savane : cas du bassin versant de la Sanaga à Ebebdá Cameroun. Mém.DEA.Fac.Sci. Univ. Yaoundé I, 74 p.
- LADURIE, E. LE R. 1971. Times of Feast, Times of Famine. New York (Doubleday). 426p.
- LAMB, H.H. 1972. Climate: Present Past and Future, *fundamentals and climate now*, volume 1. Barners & Noble. London, 613 p.
- LAMB, H.H. 1977. Climate: Present Past and Future, *Climatic history and the future*, Methuen, volume 2. London. 835 p.
- LANDSEA, C., 2009. Qu'est-ce qui détermine la trajectoire des cyclones. Foires aux questions sur les cyclones. [Météo-France](#) (Nouvelle-Calédonie), (consulté le 23 octobre 2013)
- LAPERCHE, D. 2013. Hydraulique : à quand la libéralisation des concessions ? Actu-Environnement ; novembre 2013.
- LAPERCHE, D. 2014. Changement climatique : l'acidification des océans s'accélère ; Le rapport sur les effets de l'acidification des océans sur la biologie marine, présenté lors de la 12^e réunion de la CDB en Corée, alerte sur la perte de biodiversité et ses impacts socio-économiques ; Actu-Environnement 08 octobre 2014
- LARAMEE DE TANNENBERG., V. 2013. Pourquoi faut-il lutter contre l'acidification des océans. In : Le journal de l'environnement. 15 novembre 2013.
- LARAQUE A., MAHE G., ORANGE D., MARIEU B., 2001. Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the twentieth century. Journal of Hydrology, 245, 1-4, 104-117.
- LARCHER, C. 2003. Les aurores polaires. *CLEA*. CC N°103. 10p.
- LAVY, P. 2011. Mini-centrales hydroélectriques. Ed : Eyrolles 2011-03-24, 110 p.
- LAYELMAM, M., SMIEJ, M. F., EL ABOUDI, A., LACAZE, B. 2008. Les techniques de traitement d'images de télédétection pour la détermination de la densité d'aérogels. Conférence paper ; TIF, IEEE ; CRTS. 18p.
- LE TREUT, H. JANCOVICI, J.-M. 2004. Evolution climatique : les modèles et leurs limites. Comment je vois le monde. Effet de serre : allons-nous changer le climat ? Editions Champs Flammarion pp 27-32
- LEDUC, R., GERVAIS, R., 1985. Connaître la météorologie. Presses de l'Université du Québec. Montréal. 320 p. (section 3.6 Les grands traits de la circulation générale).
- LEMOIGNE, G., BARGHABI, S., PLUSQUELLEC, H., 1985. Dam Safety and Environment World Bank Technical Paper N° 155
- LETHIELLEUX, M. 2005. Statistique descriptive, *coll. Express*, 4^e édition, Dunod. 154 p.
- LETOUZEY, R., 1985. Notice de la carte phytogéographique du Cameroun au 1/500 000. (Yaoundé, Institut des Recherches Agronomiques et Institut de la Carte Internationale de la Végétation, Toulouse.
- LETOUZEY, R. 1979. Végétation. *Les atlas Jeune Afrique, République Unie du Cameroun*. Editions J-A. 72p.
- LIENOU, G., MAHE, G., OLIVRY, J.C., NAAH, E., PATUREL, J. E., SERVAT, E., LUBES-NIEL, H., SIGHOMNOU, D., SIGHA N, L., EKODECK, G. E., DEZETTER, A., 2005a. Changements des régimes hydrologiques des rivières du sud Cameroun : un impact de la variabilité climatique en zone équatoriale. In Regional Hydrological impacts of climatic change-hydroclimatic variability. *Proceedings of symposium S6 held during the seventh IAHS. Scientific assembly at Foz do Iguaçu. Brazil, April 2005*(Ed. By : Franks S., Wagener T, Bogh E, Gupta H. V., Bastidas L., &Oliveira Galvão C.), 158-168, IAHS publ. 296.
- LIENOU, G., MAHE, G., OLIVRY, J.-C., NAAH, E., SIGHA NKAMDJOU, L., SIGHOMNOU, D., SERVAT, E., NDAM NGROUPAYOU, J. R., EKODECK, G. E.,PATUREL, J. E., 2005b. Régimes des flux de matières solides en suspension au Cameroun : revue et synthèse à l'échelle des principaux

- écosystèmes ; diversité climatique et actions anthropiques. *Hydrological Sciences Journal des Sciences hydrologiques*.50 (1). 111-123.
- LIENOU, G., MAHE, G., PATUREL, J. E., SERVAT, E., SIGHOMNOU, D., EKODECK, G. E., DEZETTER, A., DIEULIN, C., 2008. Evolution des régimes hydrologiques en région équatoriale camerounaise : un impact de la variabilité climatique en Afrique équatoriale pp.789-801 in *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*.
- LIENOU, G., MAHE, G., SERVAT, E., TEGOFACK, R., SAHAGU, J., NWALAL, J., ISSA, OLIVRY, J.C., EKODECK, G. E., 2005c. Transport de matières au Cameroun dans un contexte hydroclimatique déficitaire. In: Sediments Budgets I. *Proceedings of symposium S1 held during the seventh IAHS. Scientific assembly at Foz do Iguaçu. Brazil, April 2005*(Ed. By: Walling D E., Horwitz A. J.), 161-171, IAHS publ. 291.
- LIENOU, G., SIGHOMNOU, D., SIGHA N, L., MALOU, R., SAOS, J. L., 2003. Variabilité des écoulements à travers le territoire camerounais et le sud du Tchad au cours des trois dernières décennies. Séminaire FRIEND-AOC, Yaoundé 30 nov 2003.
- LIU, Q., BOURDIN, V., HOANG, P., CARUSO, G., ARCHAMBAULT, V., 2013. « Coupling optical and thermal models to accurately predict PV panel electricity production », Photovoltaic Technical Conference - Thin Film & Advanced Silicon Solutions 22th to 24th of May 2013 Aix-en-Provence
- LOUIS, G., 1975. L'électrotechnique aux BEP. Tome II. Dunod /Bordas/ Paris. 183 p.
- MADI, A., HUUB, P., SALI, B. 2003. La demande urbaine en bois-énergie et la nécessité d'une gestion rationnelle des ressources naturelles : le cas de Maroua à l'Extrême Nord du Cameroun. 9p.
- MAHE, G., DRAY, A., PATUREL, J.E., CRES, A., KONE, F., MANGA, M., CRES, F.N., DJOUKAM, J., MAÏGA, A.H, OUEDRAOGO, M., CONWAY, D., SERVAT, E., 2002. Climatic and anthropogenic impacts on the flow regime of the Nakambe River in Burkina. IAHS Pub. N° 274, 69-76.
- MAHE, G., OLIVRY, J. C., 1999. Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, séries IIa, vol. 328, pp 621-628.
- MAHÉ, G., PATUREL, J.E., SERVAT, E., CONWAY, D., DEZETTER, A., 2005a. Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, 300, 1-4, 33-43.
- MAHÉ, G., RESCAN, M., DEZETTER, A., ARDOIN, S., DIEULIN, C., 2005b. Water resources prediction in West and Central Africa for the 21st century. Poster. Abstracts book. First International, AMMA conference, Dakar.
- MAKHLOUF, Z. 1994. Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, France.
- MALEY, J. 1981. Etudes polynologiques dans le bassin du Lac Tchad et paléoclimat de l'Afrique du Nord tropicale, de 30000 ans à l'époque actuelle. Travaux et documents ORSTOM 129, 586p.
- MALEY, J. 1989. L'importance de la tradition orale et des données historiques pour la reconstitution paléoclimatique du dernier millénaire sur l'Afrique nord tropicale. In : Sud-Sahara-Sahel Nord, Centre Culturel Français, Abidjan, p53-57.
- MANLEY, G. 1974. Central England temperatures: monthly means 1659 to 1973, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 100, 389-405. London.
- MASON, S.J. 2001. El-Nino climate change and southern African climate. *Environmetrics* 2001; 12: 327-345.
- MELINGUI, A., GWANFOGBE, M., 1986. Géographie du Cameroun. Hachette/Paris. 120 p.
- MEYBECK, M., 1979. Bilan hydrochimique et géochimique du lac Léman. *Verh. Int. Ver Limnol.*, 18, 442-453.
- MEYBECK, M., 1984. Les fleuves et le cycle géochimique des éléments. Th. Doc-Sc. Géologie Université Paris VI. 558 p.
- MINADER, 2007. Le MINADER en chiffres. 42p. accordé

- MINEE (Ministère de l'énergie et de l'eau), 2006. Assistance au Ministère de l'énergie et de l'eau dans l'élaboration du plan de développement à long terme du secteur de l'électricité horizon 2030 (PDSE 2030). *Rapport final* volume 3 – Etude de l'offre de production. Version provisoire. 108p.
- MINEE, 2009. Etat des lieux du secteur Eau et Environnement. Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PANGIRE), 235p.
- MINEE. 2014. Statistical yearbook of Cameroon's water and energy. Collection of series of water and energy sub-sector statistical information up to 2013. Ministère de l'Eau et de l'Energie. Yaoundé.
- MINEF, 1997. Communication Nationale Initiale du Cameroun. 160p.
- MINEPAT, 2010. Atlas national de développement physique du Cameroun. INC.DATZF, République du Cameroun, 71p.
- MINEPAT, 2020. Stratégie nationale de développement. Pour la transformation structurelle et le développement inclusif. Cameroun émergent. 1^{ère} édition. ISBN : 978-9956-26-085-0. 214p.
- MINEPDED. 2015. Plan national d'adaptation aux changements climatiques au Cameroun. 154p.
- MINFOF, 2018. Recueil des textes juridiques relatifs à la forêt, la faune, et aux aires protégées. 216p.
- MINMEE, 1990. Plan Energétique National (PEN). Ministère des Mines de l'Eau et de l'Energie. Rapport final. Volume 1. Projet de politique et plan énergétique pour le Cameroun. 90p.
- MONTAIGNE (I). 2019. Energie solaire en Afrique : un avenir rayonnant. Note février 2019. 102p.
- MOORE, S. 2016. Initiative pour la transparence dans les industries extractives. ITIE Cameroun. Rapport de 2014. 176p.
- MORIN, S, 1979. Carte géomorphologique 1/3250000 les atlas de la République du Cameroun
- MORON, V., 1994. Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *Int. J. Climatol.*, 14, 325-341.
- MRN (Ministère de Ressources Naturelles/Canada). 2001. Numéro de Catalogue: M39-99/2003F
- MULLER, J.-P., GAVAUD, M., 1979. Les sols. In: Les atlas. République unie du Cameroun. Ed. J-A. 72p.
- MUNDAY, P.L, JONES, GP, PRATCHETT, MS, WILLIAMS, A.J. 2008. Climate change and the future for coral reef fishes. *Fish* 9:261–285.
- MURRAY, J., 1976. Soil erosion. In: *Success in biology*. Ed. Jean Macqueen. pp. 171-173.
- NAAH, E. 1990. Hydrologie du Grand Yaéré du Nord Cameroun. Thèse de Doctorat des Sciences. Université Yaoundé-Cameroun, 326p.
- NANGÉ, M.J. 2007. The sismicity of Cameroon. *Sciences et Développement, MINRESI, Cameroun*. 5, pp. 24-25.
- NDAM NGOUPAYOU, J. R., 1997. Bilans hydrogéochimiques sous forêt tropicale humide en Afrique : du bassin expérimental de Nsimi-Zoétéélé aux réseaux hydrographiques du Nyong et de la Sanaga au sud Cameroun. Th. Univ. Pierre et Marie Curie. Paris VI. 214 p.
- NDAM NGOUPAYOU, J. R., 2007. Transports solides et érosion mécanique dans un écosystème tropical d'Afrique : exemple du bassin de la Sanaga au sud Cameroun. *Actes des JRSAUF*. Hanoi, 6 p.
- NDAM NGOUPAYOU, J.R., DZANA, J.G., KPOUMIE, A., TANWI GHOGOMU, R., FOUPE TAKOUNJOU, A., BRAUN, J.J. & EKODECK, G.E. 2014. Present-day sediment dynamics of the Sanaga catchment (Cameroon): from the total suspended sediments (TSS) to erosion balance, *Hydrological Sciences Journal*.
- NDONG, B.F., NTOMBA, M.S., MVONDO ONDOA, J. 2012. Déformation et métamorphisme dans la partie centrale de la chaîne de Ngovayang (Sud-Cameroun). *Afrique Science*. 08 (3) 42-50.
- NEELIN, J. D., BATTISTI, D. S., HIRST, A. C., JIN, F.-F., WAKATA, Y., YAMAGATA, T., et ZEBIAK, S. E. 1998. ENSO theory. *J. Geophys. Res.*, 103, 14261-14290.
- NEW, M. G., HULME, M. & JONES, P. D. 2000. Representing 20th century space-time climate variability. II: Development of 1901-1996 monthly terrestrial climate fields. *J. Climate* 13, 2217-2238.
- NFOR TANSI, B. 2012. An Assessment of Cameroons Wind and Solar Energy Potential: A Guide for a Sustainable Economic Development, *Diplomica Verlag*, 2012, 120 p. ISBN 9783842870284.
- NICHOLSON, S.E. 1980. The nature of rainfall fluctuations in subtropical West Africa. *Mon. wea. Rev.* 108, 473-487.

- NICHOLSON, S.E., & GRIST, J.P. 2001. A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales. *International Journal of Climatology*, 21 (14) pp. 1733-1757.
- NICHOLSON, S.E., KIM, J., IIOPIGARNER, J. 1988. Atlas of African rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology. Florida State University. Tallahassee, Florida, USA.
- NICHOLSON, S.E., SOME, B., KONE, B. 2000. An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy season of the 1997 El-Nino and the 1998 La-Nina years. *Journal of climate*. 13(14), 2628-2640.
- NICHOLSON, S.E., SOME, B., KONE, B., 2000. An analysis of recent rainfall condition in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Nino and the 1998 La-Nina years. *Journal of climate*, vol. 2623-2639.
- NKUE, V., NJOMO, D., 2009. Analyse du système énergétique camerounais dans une perspective de développement soutenable. *Revue des énergies*. Vol. 588.
- NKUTCHET, M. 2004. L'énergie au Cameroun, *L'Harmattan*, 440 p. ISBN 9782296377882.
- NTSAMA, J. 2007. Plan d'action national Energie pour la réduction de la pauvreté (PANERP). Atelier sur l'électrification rurale. 25p.
- NZENTI, J.P. 1987. Pétrogenèse des migmatites de Yaoundé (Cameroun). Eléments pour un modèle géodynamique de la chaîne panafricaine nord équatoriale. Thèse de Doctorat Univ. Nancy I. 147 p.
- NZENTI, J.P. 1994. L'Adamaoua panafricain (region de Banyo, Cameroun). Une zone clé pour un modèle de la chaîne panafricaine au Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop. Faculté des Sciences, Département de Géologie.
- OLIVRY, J. C., MAHE, G., BRICQUET, J. P., 1998. Variabilité de la puissance des crues des grands cours d'eau d'Afrique intertropicale et incidence de la baisse des écoulements de base au cours des dernières décennies. Pub. IASH n°252, pp 189-197.
- OLIVRY, J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. MESRES/ORSTOM. Paris, 733 p.
- OLIVRY, J.C., SIRCOULON, J. 1998. Evolution des recherches hydrologiques en partenariat en Afrique subsaharienne : l'exemple des pays francophones. *Revue des Sciences de l'eau*, numéro spécial, 61-75.
- OMBOLO, J.-P. Afrique-Cameroun : un potentiel géant industriel <http://www.monde-economique.ch/>
- ONANA, J.M. 2018. Cartographie des écosystèmes du Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 12(2): 940-957, ISSN 1997-342X (Online), 1991-863I (Print).
- ORANGE, D., WESSELINK, A., MAHÉ, G., FEIZOURÉ, C., 1997. The effects of climate changes on river base-flow and aquifer storage in Central Africa. *IAHS Publ.* 240, 113-123.
- ORIOLI, G., SABBATINI, M., MARCHENA, J., VAQUEZ, R., 2008. Impact de l'occupation agricole des sols sur la chimie de l'eau de rivière entrant dans un réservoir continental : cas de la rivière Sauce Grande, Argentine. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*. pp. 834-843.
- OUEDRAOGO, M. 2001. Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau de l'Afrique de l'Ouest—Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques du Languedoc (Montpellier II), France.
- PACER (Programme d'action Energies renouvelables). 1995. Office fédéral des questions conjoncturelles : Petites centrales hydrauliques-Turbines hydrauliques. *Journées de formation pour ingénieurs*. 129 p.
- PATUREL, J. E., OUEDRAOGO, M., SERVAT, E., MAHE, G., DEZETTER, A., BOYER, J.F., 2003. The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 1, 125-137.
- PATUREL, J. E., SERVAT, E., KOUAMÉ, B., LUBÈS, H., OUEDRAOGO, M. & MASSON, J. M. 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* 191.16-36.

- PATUREL, J.E., BARRAU, C., MAHE, G., DEZETTER, A., & SERVAT, E. 2007. Modeling the impact of climatic variability on water resources in West and Central Africa from a non-calibrated hydrological model. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1), 37-48. DOI : 10.1623/hysj.52.1.38.
- PERRIN, C. 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat. INPG Grenoble, Cemagref. 291p.
- PETTITT, A. N., 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* 8 (3): 126-135.
- PHILIPPON, N., FONTAINE B., 2002. The relationship between the sahelian and previous 2nd guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness? *Annales Geophysicae*, 20, 575-582.
- PIALOT, D. 2016. Afrique et électricité : la grande mobilisation
- PLANCHON, O. 2017. Climatologie comparée des planètes : un bref état des connaissances. *Climatologie*, vol. 14 Association Internationale de Climatologie pp 18-47
- PLANTON, S. 1999. Réchauffement global et El-Nino : une revue des connaissances actuelles. *Médecine et maladies infectieuses*, 29(5), 267-276.
- PLANTON, S., CAZENAVE, A., DELECLUSE, P. DORTLIGER, N., GAUFRÈS, P., IDIER, D., JAMOUS, P., LE COZANNET, G., LE TREMT, H., PEINGS, Y. 2012. Evolution du niveau de la mer. Le climat de la France au XXI^e siècle. Vol. 3. Sous la direction de Jouzel, P. 51p.
- PNUD, 2014. Cameroun-contribution à la préparation du rapport national pour la formulation du livre blanc régional sur l'accès universel aux services énergétiques intégrant le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ; Rapport final 245 p.
- PNUD, 2015. Le travail au service du développement humain. Présentation Rapport sur le développement humain 2015. 25 ans de développement humain. 45p.
- REMENIERAS, G., 1986. L'hydrologie de l'ingénieur. Ed. Eyrolles. 401 p.
- RENAUD, S., 2011. Eaux et sols. La ressource en eau du bassin versant de l'Arroux. Laboratoire Eau, Environnement et systèmes urbains. Rapport de stage ENPC. 56p.
- REPUBLIQUE DU CAMEROUN. 2010. Fonds d'énergie rurale (FED). Manuel de procédures. Principes, organisation et procédures. Voluma 1. 162p.
- REPUBLIQUE DU CAMEROUN. 2012. Stratégie et Plan d'Action Nationale pour la Biodiversité. Version 2. 2012 MINEPDED. 169p.
- REPUBLIQUE FEDERALE DU CAMEROUN. 1967. Etude générale de l'électrification. Prospection hydroélectrique. 801p.
- RETSscreen, 2004. *Centre International d'Aide à la Décision sur les Energies Propres*, Numéro de Catalogue: M39-99/2003F, Logiciel, Ministre de Ressources naturelles Canada 2001
- RIBES, E. 1993. Le message des taches solaires, de Galilée à nos jours : de l'intérieur du soleil au climat terrestre. *Les Cahiers du MURS*. N°30/31 - Observatoire de Paris URA CNRS. 19-36.
- ROGRES, J., 1984. The association between the North Atlantic Oscillation and the southern oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon. Wea. Rev.* 12 1999-2017.
- ROOSE, E., KABORE, V., GUENAT, C., 1999. Zai practice: a West African traditional rehabilitation system for semi-arid degraded lands: a case study in Burkina Faso. In: *Arid Soil Research and Rehabilitation*, vol. 13, 343-355.
- SAMOURA, K., 2011. Contributions méthodologiques à l'évaluation environnementale stratégique de l'exploitation du potentiel hydroélectrique des bassins côtiers en milieu tropical: cas du Konkouré, en Guinée. Thèse Université du Québec à Montréal Service des Bibliothèques
- SANGEN, M., EISENBERG, J., KANKEU, B., RUNGE, J., TCHINDJANG, M. 2010. Preliminary results on palaeoenvironmental research carried out in the framework of the second phase of the ReSaKo-project in the upper catchments areas of the Nyong and Sanaga Rivers in Cameroon. *Palaeoecology of Africa*. 30, 165-188.
- SAVANE, I., 2001. Variabilité climatique et ressources en eau souterraine dans la région semi-montagneuse de Mann. *Bull. Sécheresse* 12 (4) : 231-237.
- SCIAMA, Y. 2006. Climat: l'équilibre est rompu. *Science & Vie*. N° 1061. 48-68.

- SERVAT, E. 2000. Analyse de la Variabilité Hydrologique et Impacts sur les Ressources en Eau - Projet VAHYNE. Document interne, IRD Montpellier, France.
- SERVAT, E., PATUREL, J. E., LUBES, H., KOUAME, B., OUEDRAOGO, M. & MASSON, J. M. 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part one: Detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* 191, 1-15.
- SERVAT, E., PATUREL, J. E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., MASSON, J. M., TRAVAGLIO, M. & MARIEU, B. 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l' Eau* 12(2), 363-388.
- SERVAT, E., PATUREL, J.E., LUBES-NIEL, H., KOUAME, B., MASSON, J.M. 1997. Variabilité des régimes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. Géosciences de surface/Hydrologie-Hydrogéologie. Académie des sciences. Paris t.324, série IIa. 835-838.
- SHAMIN, M., AKBAS, D., BUCCIARELLI, S., LUTAJ, L., CHARPENTIER, E., 2011. Les centrales hydrauliques. Olympiades de Physique. 28p.
- SIE-Cameroun. Situation énergétique du Cameroun : Rapport du Système d'Information Energétique du Cameroun. Ministère de l'Eau et de l'Energie. Yaoundé.
- SIGHA-N.,L., SIGHOMNOU, D., LIENOU, G., BEDIMO, J.P., 1998. Variabilité des régimes hydrologiques des cours d'eau de la bande méridionale du plateau sud Camerounais. Pub. AISH n°252, pp 251-262.
- SIGHA-N. L., SIGHOMNOU, D., LIENOU, G., 2003. Impact des modifications du climat sur l'hydrologie et les transports solides au Cameroun. Projet de recherche CRH/IRD. Rap. d'avancement, Yaoundé, 34 p.
- SIGHA-NKAMDJOU, L., SIGHOMNOU, D., LIENOU, G., NDAM NGOUPAYOU, J. R., BELLO, M., KAMGANG, R., EKODECK, G. E., OUAFO, M. R., MAHE, G., SERVAT, E., PATURET, J. E., 2005. Impacts des modifications climatiques et anthropiques sur le flux des matières de quelques bassins fluviaux du Cameroun pp.291-298 in : Arthur Horowitz et Des E. Walling. Sediments Budgets 2. IAHS Press. 933 p.
- SIGHOMNOU, D., 2004. Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspective d'évolution des ressources en eau. Th. Doc. Etat Univ. Yaoundé I, 289 p.
- SIGHOMNOU, D., SIGHA-NKAMDJOU, L., LIENOU, G., DEZETTER, A., MAHE, G., SERVAT, E., PATURET, J. E., OLIVRY, J. C., TCHOUA, F., EKODECK, G. E., 2007. Impacts des fluctuations climatiques sur le régime des écoulements du fleuve Sanaga, perspectives pour le XXI^{ème} siècle. In: Climatic and anthropogenic impacts on the variability of water resources. Vol. 80: pp 173-181.
- SIRAUD, P. 2014. e front intertropical en Afrique Occidentale 8 p.
- SIRCOULON, J., 1987. Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du 20^{ème} siècle. In: *The influence of Climate change and climatic variability on the hydrologic regime and water resources.* (Proc. of Vancouver Symposium, August 1987). IAHS publ. N° 168, 13 - 25.
- SIRCOULON, J., 1992. Caractéristiques des ressources en eau de surface, zone arides de l'Afrique de l'Ouest. Variabilité et évolution actuelle. In : *L'aridité une contrainte au développement.* Didactique/ORSTOM Editions, 1992.
- SOGREAH, 1976. Inventaire de sites de barrages dans les Mont Mandara - Données de base Carte 1/50.000 Hydrogéologie du périmètre Tsanaga.
- SONEL., 1988. Rapport de la SONEL. 34 p.
- SOW, C. S., 1996. Etude de la variabilité spatiale de la pluviométrie en région sahélienne, Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, *Publication AISH*, n°238, 67 - 75.
- STEHLY, L., 2016. Dynamique des océans. 115 p.
- STRANGE, 2016. La Terre perd le Nord. Eruption solaire. 3p.
- SUCHEL, J.B., 1972. La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Travaux et documents de géographie tropicale n°5. CEGET-CNRS, Bordeaux, 283 p.
- SUCHEL, J.B., 1987. Les climats du Cameroun. Thèse. Doc. d'Etat, Université de Bordeaux III. France, 1186 p.

- SUD, Y.C., ABD MOLOD, D.G., 1988. A GCM simulation study of the influence of Saharan evapotranspiration and surface albedo anomalies on July circulation and rainfall. *Monthly Weather Rev.* 116, 238-400.
- SULTAN, B., JANICOT, S., 2000. Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letters*, 27, 20, 3353-3356.
- SULTAN, B., 2002. Etude de la mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité intra-saisonnière de la convection. Application à la sensibilité des rendements agricoles. Th. Doc. Univ. Paris 7 - Denis Diderot, 283 p.
- SULTAN, B., SERVAT, E., MALEY, J., MAHÉ, G., 2001. Interrelation entre les forêts tropicales et la variabilité climatique : une synthèse des études récentes. *Sécheresse*, Vol. 12; n°4, Dec. 2001: 221-229.
- SUTCLIFFE, J.Y., KNOTT, D.G., 1987. Historical variation in African Water Resources. *IASH Publ.* No 168, pp. 463-75.
- TAILLET, R., FEBVRE, P., VILLAIN, L., 2009. *Dictionnaire de physique*, De Boeck, 754 p. ISBN 2-8041-0248-3
- TCHINANG, M. 2011. L'énergie pour le développement au Cameroun, *L'Harmattan*, 171 p. ISBN 9782296137349.
- TCHINDJANG, M., AMOUGOU, J., A., ABOSSOLO, S. A., BESSOH BELL, S., 2012. Challenges of climate change, landscape dynamics and environmental risks in Cameroun. In *Jürgen Runge. Landscape evolution, neotectonics and Quaternary environmental change in Southern Cameroon. Paleoecology of Africa*. Vol.31. Frankfurt/Germany, pp. 237-286.
- TCHOTSOUA, M., FOTSING, J.-M., MOUSSA, A. 2007. Evaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun). *Actes des JSIRAUF, Hanoi*, 6-9 novembre 2007 ; 9p.
- THIBAUD, U. 2015. Les ouvrages hydrauliques. *Encyclopédie de l'énergie Rubrique Sources renouvelables*. 14p.
- THOM, A.S., OLIVER, H.R., 1977. On Penman's equation for estimating regional evapotranspiration Q.J.R. *Meteorol. Soc.* 193: 345-357.
- THOMAS, M.F. 2000. Late Quaternary environmental changes and the alluvial record in humid tropical environments. *Quaternary International*, 72, 23-36.
- THORNWAITHE, C.W., MATHER, J.R., 1955. The water balance. *Publ. Climatol. Lab. Climatol. Drexel Inst. Technol.* 8 (1), 1-104.
- THRESHER, R.E., 2002. Solar correlates of southern hemisphere mid-latitude climate variability. *Int. J. of Climatology*; 22; 901-915.
- TODOROV, A.V., 1985. Sahel, the changing rainfall and the 'Normals' used for its assessment, *Journal of climate and Applied Meteorology*, 24; pp. 97-107.
- TOPO 2008. Interaction Terre-atmosphère et rotation de la Terre ; *Géomatique Expert* n°63 juin juillet 2008, pp 20-24).
- TURC, L. 1958. Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement, *Soc. Hydrotech.de France : compte rendu des troisièmes journées de l'hydraulique*, Algiers, 36-44.Paris.
- VAN DAM, J.C., 1999. Impacts of Climate Change and Climate Variability on Hydrological Regimes; *International Hydrology Series*, UNESCO, Cambridge University Press, 137 p.
- VANDEWALLE, N. 2015. Changement d'état. Université de Liège.
- VASILIEV, S. S., AND DERGACHEV, V. A., 2002. The 2400-Year Cycle. In *Atmospheric Radiocarbon Concentration: Bispectrum Of 14C Data Over The Last 8000 Years*. European Geophysical Society *Annales Geophysicae* 20: 115–120.
- VIDAL, L., SCHNEIDER, R.R., MARCHAL, O., BICKERT, T., STOCKER, T. F., WEFER, G., 1999. Link between the North and South Atlantic during the Heinrich events of the last glacial period. *Climate dynamics*. 15, pp. 909-919.

- VOIRIN-MOREL, S., 2003. Modélisation distribuée des flux d'eau et d'énergie et des débits à l'échelle régionale du bassin Adour-Garonne. Th. Doct. Univ. Toulouse III (Paul Sabatier). 277p.
- WOOLDRIDGE S.A., FRANKS S.W., KALMA J.D., 2001. Hydrological implications of the Southern Oscillation: variability of the rainfall-runoff relationship, *Journal des Sciences Hydrologiques*, 46 (1), 73-88.
- WWAP (Programme Mondial pour l'Évaluation des Ressources en Eau). 2021. La valeur de l'eau. Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur de ressources en eau 2021. UNESCO. ISBN 97-92-3-200225-9. 224p.
- WWI (World Watch Institute), 2012. Use and Capacity of Global Hydropower Increases.
- YATES, D. N. 1997. Approaches to continental scale runoff for integrated assessment models. *J. Hydrol.* 201,289-310.
- ZAMRANE, Z. 2016. Recherche d'indices de variabilité climatique dans les séries hydroclimatiques au Maroc : identification, positionnement temporel, tendances et liens avec les fluctuations climatiques : cas des grands bassins de la Mouhouya, du Sébou et du Tensift. Sciences de la Terre. Université Montpellier ; Université Cadi Ayyad (Marrakech, Maroc). Faculté des Sciences. Semlalia, 2016. 195p.
- ŽIVOJINOV, J.M.1955. Relation entre la pression et la température d'ébullition et détermination de l'entropie moléculaire d'ébullition. *J. Phys. Radium*, 16 (8-9). 693-694.
- Encarta, 2009.

ANNEXES