AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT
WASHINGTON, D. C. 20523

BIBLIOGRAPHIC INPUT SHEET

FOR AID USE ONLY

1. SUBJECT CLASSIFICATION

A. PRIMARY: Food production and nutrition AP10-0000-G100

B. SECONDARY: Water resources and management--Africa

2. TITLE AND SUBTITLE

L'utilisation des ressources en eau et des terres des regions de savane; ressources des regions de savane. Vol. 1: Rapport

3. AUTHOR(S)

(101)Tippetts-Abbett-McCarthy-Stratton, Engineers and Architects, New York

4. DOCUMENT DATE	5. NUMBER OF PAGES	6. ARC NUMBER
1978	315p.	ARC AFR333.91096.T595a

7. REFERENCE ORGANIZATION NAME AND ADDRESS

TAMS

8. SUPPLEMENTARY NOTES *(Sponsoring Organization, Publishers, Availability)*

(In cooperation with CIEH [Comite Interafricain d'Etudes Hydrauliques])
(In French and English. English, 285p.: PN-AAG-643)

9. ABSTRACT

10. CONTROL NUMBER

PN-AAG-644

11. PRICE OF DOCUMENT

12. DESCRIPTORS

Water resources
Land use
Hydrology
Savannas
Ground water
Human resources
Climatology
West Africa
Central Africa
Sahel

13. PROJECT NUMBER

625071200; 698041500

14. CONTRACT NUMBER

AID/afr-C-1041

15. TYPE OF DOCUMENT

AID 590-1 (4-74)

AFR
333.91096
T595a

PN-AAG-644

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES

OUAGADOUGOU
HAUTE VOLTA

L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU ET DES TERRES DES REGIONS DE SAVANE

RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE

VOLUME 1
RAPPORT

CIEH-USAID
Accords de Subvention
625-11-120-712
et 698-0415

TAMS
DG
345 Park Ave.
New York 10022

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES

OUAGADOUGOU
HAUTE VOLTA

L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU ET DES TERRES DES REGIONS DE SAVANE

RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE

VOLUME 1
RAPPORT

CIEH-USAID
Accords de Subvention
625-11-120-712
et 698-0415

TAMS DG
345 Park Ave.
New York 10022

La présente Etude sur les RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE comprend 4 Volumes:

VOLUME 1. RAPPORT

VOLUME 2. DOSSIER DES CARTES

VOLUME 3. ANNEXES

VOLUME 4. RECOMMANDATIONS POUR DES ETUDES

TABLE DES MATIERES

VOLUME 1. RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE - RAPPORT

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. REGIONS DE SAVANE	
1.1 INTRODUCTION	1-1
1.2 DEFINITION DES REGIONS DE SAVANE	1-1
1.3 SUPERFICIE ET SUBDIVISION DES REGIONS DE SAVANE	1-4
1.4 CARTOGRAPHIE	1-6
CHAPITRE 2. RESSOURCES CLIMATIQUES	
2.1 INTRODUCTION	2-1
2.2 DEFINITIONS ET DOCUMENTS ETUDIES	2-1
2.2.1 Définitions	2-1
2.2.2 Documents étudiés	2-4
2.3 RESULTATS	2-5
2.3.1 Eléments climatiques	2-5
2.3.1.1 Précipitations annuelles moyennes	2-6
2.3.1.2 Début des pluies	2-8
2.3.1.3 Fin des pluies et fin de la période de croissance	2-10
2.3.1.4 Rayonnement et régimes thermiques	2-12
2.3.1.5 Evapotranspiration	2-14
2.3.2 Climat et agriculture pluviale	2-16
2.3.2.1 Facteurs physiques	2-16
2.3.2.2 Facteurs biologiques	2-17
2.3.3 Régions bioclimatiques	2-23
2.3.3.1 Bioclimat du Sahel	2-32
2.3.3.2 Le bioclimat du Soudan	2-35
2.3.3.3 Le bioclimat de la Guinée septentrionale	2-35
2.3.3.4 Le bioclimat de la Guinée méridionale	2-36
2.3.4 Production biomassique nette et rendement des récoltes	2-37

Page

CHAPITRE 3. BILAN HYDRIQUE

3.1 INTRODUCTION 3-1

3.2 PROGRAMME POUR L'EVALUATION ET L'ANALYSE FREQUENTIELLE DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE: SYSTEME ORBVCR 3-4

3.2.1 Caractéristiques du système 3-6

3.2.1.1 Réserve utilisable (RU) croissante 3-6

3.2.1.2 Entrées du système 3-7

3.2.1.3 Sorties du système 3-13

3.2.2 Analyse statistique de l'information 3-16

3.2.3 Informations de base 3-17

3.2.3.1 Pluies 3-17

3.2.3.2 Evapotranspiration potentielle 3-18

3.3 RESULTATS DU SYSTEME ORBVCR 3-19

3.3.1 Contrôle et validité du modèle 3-19

3.3.2 Période de ruissellement/drainage attendue une année sur deux 3-20

3.3.3 Alimentation en eau pluviale pour un couvert végétal gramineen 3-21

3.4 LES APPLICATIONS DU SYSTEME ORBVCR 3-22

3.4.1 L'agronomie 3-23

3.4.2 Phytoécologie 3-25

3.4.3 Hydrologie et hydrogéologie 3-25

CHAPITRE 4. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

4.1 DESCRIPTION DE LA REGION 4-1

4.1.1 Bassin du Tchad 4-2

4.1.1.1 Lac Tchad 4-4

4.1.2 Bassin du Niger 4-5

4.1.3 Bassin de la Volta 4-9

4.1.3.1 Volta Noire 4-9

4.1.3.2 Volta Blanche 4-10

4.1.3.3 Oti 4-11

4.1.3.4 Volta 4-11

Page

CHAPITRE 4. RESSOURCES EN EAU DE SURFACE (suite)

4.1.4 Bassin du Sénégal 4-11

4.1.5 Bassin de la Gambie 4-12

4.1.6 Bassins de moindre importance 4-13

4.2 DOCUMENTS ETUDIES 4-14

4.3 METHODES ET RESULTATS 4-18

4.3.1 Débits annuels des cours d'eau 4-18

4.3.1.1 Période de référence 4-19

4.3.1.2 Variabilité 4-19

4.3.1.3 Hauteur équivalente de la lame d'eau écoulée 4-20

4.3.1.4 Bilan hydrique 4-20

4.3.2 Débits mensuels des cours d'eau 4-26

4.3.3 Débits de crue 4-28

4.3.3.1 Evaluation des débits de crue 4-29

4.3.3.2 Crues décennales 4-30

4.3.3.3 Crues centennales 4-37

4.3.3.4 Conclusions à propos des débits de crue 4-39

4.3.4 Débit d'étiage et sécheresse 4-39

4.3.4.1 Séquences des débits de crue et des débits d'étiage 4-43

4.3.5 Ecoulement des petits bassins versants 4-44

4.3.6 Transport des sédiments 4-46

4.3.7 Qualité de l'eau 4-51

4.4 SOMMAIRE 4-55

CHAPITRE 5. RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

5.1 INTRODUCTION 5-1

5.2 GEOLOGIE 5-2

5.2.1 Cadre géologique et structural 5-3

5.2.1.1 Le socle 5-3

5.2.1.2 Les bassins sédimentaires 5-3

5.2.1.3 Géologie historique 5-4

Page

CHAPITRE 5. RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES (suite)

5.2.2 Lithostratigraphie 5-5

5.2.2.1 Le socle 5-5

5.2.2.2 Les bassins sédimentaires 5-6

5.3 LES AQUIFERES 5-8

5.3.1 Classification 5-8

5.3.2 Le socle 5-11

5.3.2.1 Horizons aquifères 5-13

5.3.2.2 Débits et profondeurs des ouvrages d'exploitation 5-14

5.3.3 Les bassins sédimentaires 5-16

5.3.3.1 Terrains primaires 5-17

5.3.3.2 Continental intercalaire 5-18

5.3.3.3 Crétacé 5-18

5.3.3.4 Maestrichtien 5-19

5.3.3.5 Paléocène (et Eocène) 5-19

5.3.3.6 Continental terminal 5-20

5.3.3.7 Plio-Quaternaire et Quaternaire 5-20

5.3.3.8 Résumé 5-21

5.3.4 Conclusion 5-22

5.4 HYDROGEOLOGIE 5-23

5.4.1 Profondeur du niveau de l'eau 5-24

5.4.2 Circulation des eaux souterraines 5-25

5.4.3 Ressources renouvelables 5-26

5.4.4 Réserves statiques (exploitables) 5-30

5.4.5 Qualité des eaux souterraines 5-38

5.4.6 Conclusion 5-40

5.5 CONCLUSIONS 5-43

GLOSSAIRE 5-48

CHAPITRE 6. RESSOURCES DES TERRES

6.1 INTRODUCTION 6-1

6.2 METHODES UTILISEES ET DOCUMENTS ETUDIES 6-2

Page

CHAPITRE 6. RESSOURCES DES TERRES (suite)

6.2.1 Les données de base sur les sols 6-2

6.2.2 Méthode d'interprétation 6-11

6.2.3 Etudes de cas 6-17

6.3 RESULTATS 6-17

6.3.1 Légende de la carte 6-17

6.3.2 Facteurs limitatifs 6-22

6.3.3 Cartographie des sols principaux et des sols associés 6-23

6.4 INTERPRETATION ET UTILISATION DE LA CARTE DES POTENTIALITES DES SOLS 6-24

6.5 CONCLUSIONS 6-27

6.5.1 Superficie des classes de potentialité des sols 6-27

6.5.2 Superficie et répartition des sols dans chaque classe de potentialité 6-29

CHAPITRE 7. RESSOURCES HUMAINES

7.1 INTRODUCTION 7-1

7.2 METHODES ET DOCUMENTS ETUDIES 7-2

7.2.1 Choix des sources de données 7-2

7.2.2 Indicateurs démographiques 7-6

7.3 RESULTATS ET CONCLUSIONS 7-8

7.3.1 Profil social général de la Savane 7-8

7.3.2 Profil démographique 7-11

7.3.3 Migration 7-15

7.4 CONCLUSIONS 7-17

REFERENCES

Iere. Partie Livres, périodiques, cartes, rapports et études (indiqués par ordre alphabétique) R-I

IIeme. Partie Annuaires Hydrologiques (indiqués selon le pays et l'année) R-29

LISTE DES TABLEAUX

			Page
Tableau	1-1	Subdivisions politiques de la région de savane	1-5
	1-2	Cartes topographiques de la région de savane	1-7
	2-1	Adaptabilité des groupes de cultures en fonction des points comparables de leurs mécanismes d'assimilation et de photosynthèse	2-19
	2-2	Bioclimat du Sahel Méridional et adaptabilité des cultures	2-24
	2-3	Soudan: Bioclimat et adaptabilité	2-26
	2-4	Bioclimat de la Guinée Septentrionale et adaptabilité des cultures	2-28
	2-5	Bioclimat de la Guinée Méridionale et adaptabilité des cultures	2-30
	2-6	Caractéristiques climatiques des régions bioclimatiques	2-33
	2-7	Production biomassique nette totale pendant la saison de croissance et taux moyen de production biomassique nette par jour pour cinq emplacements de l'ouest africain	2-39
	2-8	Production biomassique nette totale et rendement de cultures choisies	2-40
	3-1	Liste des stations pluviométriques utilisées	3-2
	4-1	Annuaires hydrologiques disponibles au CIEH	4-16
	4-2	Débit annuel - Bassin du Chari	4-21
	4-3	Débit annuel - Bassin du Logone	4-22
	4-4	Débit annuel - Bassin de la Volta	4-23
	4-5	Débit annuel - Bassin du Niger	4-24
	4-6	Débit annuel - Bassin du Sénégal	4-25
	4-7	Débit annuel - Bassin de la Gambie	4-25
	4-8	Débits moyens mensuels à des stations sélectionées	4-27
	4-9	Débits de la crue décennale dans le bassin du Chari	4-31
	4-10	Débits de la crue décennale dans le bassin du Logone	4-31
	4-11	Débits de la crue décennale dans le bassin du Niger	4-32
	4-12	Débits de la crue décennale dans le bassin de la Volta	4-34
	4-13	Débits de la crue décennale dans le bassin du Sénégal	4-36
	4-14	Débits de la crue décennale dans le bassin de la Gambie	4-36

LISTE DES TABLEAUX (suite)

			Page
Tableau	4-15	Relation moyenne entre le débit de la crue décennale et la superficie du bassin versant	4-36
	4-16	Débits maximum enregistrés et crues centennales estimées	4-38
	4-17	Comparaison des estimations de la crue centennale ($m^3 s^{-1}$)	4-37
	4-18	Débit d'étiage - période de retour	4-40
	4-19	Quantités annuelles de sédiments en suspension	4-48
	4-20	Quantités annuelles de sédiments en suspension transportés au lac Tchad selon jaugeages pris de N'Djamena	4-50
	4-21	Analyses des eaux de rivières de l'Afrique Occidentale	4-52
	5-1	Lithostratigraphie de l'Afrique Occidentale/Centrale	5-9
	5-2	Superficies d'affleurement des aquifères dans la zone du projet	5-12
	5-3	Débits et profondeurs des ouvrages dans le socle	5-16
	5-4	Débits et profondeurs des ouvrages dans les terrains primaires	5-17
	5-5	Estimation de l'alimentation des nappes selon le type de roche et d'aquifère	5-28
	5-6	Estimation des ressources renouvelables par aquifère, pays et bassin	5-31
	5-7	Estimation des réserves statiques selon le type de roche ou d'aquifère	5-34
	5-8	Estimation des réserves statiques par aquifère, pays et bassin	5-35
	5-9	Qualité des eaux souterraines du socle	5-39
	5-10	Qualité des eaux souterraines des aquifères sédimentaires	5-41
	6-1	Présentation synoptique de la classification française des sols de l'ouest africain	6-4
	6-2	Présentation synoptique des unités de cartographie 1/5.000.000ème de la FAO utilisées dans les régions de savane de l'ouest africain	6-9
	6-3	Tableau donnant la correspondance entre la classification française des sols et les principales unités cartographiques de sols de la FAO dans les régions de savane de l'ouest africain	6-16

LISTE DES TABLEAUX (suite)

			Page
Tableau	6-4	Présentation synoptique de la classification CIEH de potentialités des sols pour les 72 unités de sols de la carte des sols de l'atlas de l'ouest africain (OUA, 1971)	6-18
	6-5	Pourcentage de la superficie totale de la savane occupé par chaque unité cartographique, et pourcentage du total occupé par chacune des classes de potentialité des sols 1, 2, 3, 4 et 5	6-28
	6-6	Rapport entre les superficies des unités cartographiques où dominent des sols de chacune des cinq classes de potentialité	6-27
	6-7	Etendue des classes de potentialité	6-29
	7-1	Indicateurs démographiques sélectionnés des pays de la Savane	7-12

LISTE DES FIGURES

			Page
Figure	1-1	Les régions de savane de l'Afrique Occidentale et Centrale	1-1
			Après la page
	2-1	Relation entre la précipitation annuelle moyenne et la durée moyenne de la période de croissance	2-8
	2-2	Relation entre la précipitation annuelle moyenne, le début des pluies et la fin de la période de croissance	2-10
	2-3	Relation entre la période de croissance et les valeurs moyennes quotidiennes du rayonnement incident à faible longueur d'onde	2-12
	2-4	Relation entre la période de croissance et la quantité de rayonnement incident reçu pendant cette période	2-14
	2-5	Relation entre la période de croissance et les températures sous abris maximales et minimales, la température diurne et la température nocturne	2-14
	2-6	Relation entre l'excès des précipitations par rapport à la demande en évapotranspiration pendant la saison de croissance et la durée de la période de croissance	2-16
	2-7	Relation moyenne entre le taux maximal de photosynthèse et la température	2-18
	2-8	Relation entre la photosynthèse sur les feuilles, à une température optimale, et le rayonnement de photosynthèse actif	2-18
	3-1	Détermination de la période de croissance végétale	3-10
	3-2	Comparaison entre le bilan hydrique simulé et les mesures in situ (sonde à neutrons)	3-20
	4-1	Distribution chronologique des modules	4-20
	4-2	Débits moyens mensuels selon leurs fréquences - Ouham à Bozoum	4-28
	4-3	Débits moyens mensuels selon leurs fréquences - Logone à Bongor	4-28
	4-4	Débits moyens mensuels selon leurs fréquences - Niger à Koulikoro	4-28
	4-5	Débits moyens mensuels selon leurs fréquences - Niger à Gaya	4-28
	4-6	Débits moyens mensuels selon leurs fréquences - Volta Noire à Lawra	4-28

LISTE DES FIGURES (suite)

			Après la page
Figure	4-7	Débits moyens mensuels selon leurs fréquences - Bafing à Dibia	4-28
	4-8	Précipitation ponctuelle - relation hauteur-durée - Ouagadougou	4-30
	4-9	Fréquence de crue - Sénégal à Bakel	4-30
	4-10	Fréquence de crue - Niger à Gaya (Crue Malienne)	4-30
	4-11	Fréquence de crue - Niger à Koulikoro	4-30
	4-12	Fréquence de crue - Logone à Moundou	4-30
	4-13	Fréquence de crue - Chari à N'Djamena	4-30
	4-14	Fréquence de crue - Niger à Dire	4-30
	4-15	Fréquence de crue - Sénégal à Kayes	4-30
	4-16	Relation entre le débit Q_{10} de la crue décennale et la superficie du bassin versant	4-36
	5-1	Esquisse géologique de l'Afrique Occidentale et Centrale	5-4
	5-2(A)	Esquisse hydrogéologique de l'Afrique Occidentale et Centrale	5-12
	5-2(B)	Coupes hydrogéologiques	5-12
	5-3	Coupes schématiques de l'altération et des horizons aquifères dans le socle	
		(A) Altération des granites et gneiss	5-14
		(B) Altération des schistes	5-14
	5-4	Coupe typique des zones aquifères dans le socle	5-14
	5-5	Circulation des eaux souterraines et relations aquifères-fleuves	5-26

TABLE DES MATIERES

VOLUME 2. RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE - DOSSIER DES CARTES

Carte No.

1	Carte administrative
2-1	Isohyètes de précipitation annuelle
2-2	Isolignes de la saison de croissance
2-3	Nomographe du commencement et de la fin de la saison de croissance
2-4	Régions bioclimatiques
3-1	Périodes de ruissellement/drainage en profondeur
3-2	Alimentation de la couverture végétale par la pluie
4-1	Réseau hydrométrique
4-2	Modules des cours d'eau
4-3	Lame d'eau écoulée
4-4	Crues décennales
* 5-1	Géologie
5-2	Hydrogéologie
5-3	Débits des ouvrages Feuille 1: Nappes libres Feuille 2: Nappes profondes
* 5-4	Profondeur du niveau de l'eau
5-5	Ressources renouvelables
5-6	Réserves statiques Feuille 1: Nappes libres Feuille 2: Nappes profondes
* 5-7	Qualité des eaux souterraines
6-1	Potentialités des sols
7-1	Population

---

*Carte inédite, mais disponible pour consultation au CIEH, à Ouagadougou.

TABLE DES MATIERES

VOLUME 3. RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE - ANNEXES

Annexe du Chapitre 3. Analyses fréquentielles des principaux termes du bilan hydrique pour onze pays de la région de Savane

Annexe du Chapitre 4. Stations hydrométriques et données hydrologiques

Annexes du Chapitre 6. Ressources des terres

6 - 1 Liste des 390 unités cartographiques de la carte des sols OUA/IFAN, montrant les unités de sol contenues dans chaque carte ainsi que leurs potentialités.

6 - 2 Liste des 166 unités cartographiques de la carte des sols au 1:5.000.000 de la FAO, couvrant le Tchad, le Cameroun, l'Empire Centrafricain, et montrant les unités de sol contenues dans chaque carte ainsi que leurs potentialités.

6 - 3 Etude du cas No. 1 : Haute-Volta

6 - 4 Etude du cas No. 2 : Nigeria

VOLUME 4. RESSOURCES DES REGIONS DE SAVANE - RECOMMANDATIONS POUR DES ETUDES

INTRODUCTION

OBJET ET PLAN DU RAPPORT

Les études présentées dans le présent rapport et les cartes et annexes qui les accompagnent sont un premier pas dans l'étude d'un programme de mise en valeur de l'eau dans les régions de savane de l'Afrique Occidentale et Centrale. Elles font une synthèse des informations existantes sur les ressources naturelles de la Savane et sont destinées à servir de base à des travaux subséquents de planning intégré à réaliser au C.I.E.H. (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques).

Exécutées au C.I.E.H., à Ouagadougou au titre de "Projet du CIEH pour l'utilisation des ressources en eau et des terres des régions de Savane", ces études ont été financées aux termes des Accords d'Aide 625-11-120-712 et 698-0415 intervenus entre l'U.S.A.I.D. (Agence Américaine de Développement International) et le C.I.E.H.

Dans l'étude du programme de travail, devant être réalisé par la suite, on devra procéder à des évaluations de l'usage fait actuellement de l'eau et des terres ainsi que des besoins en eau de ces régions de savane. L'étape suivante, consistant à déterminer et étudier les projets propres à l'exécution d'un programme d'ensemble de développement rationnel des ressources hydrauliques de ces savanes, deviendra alors possible.

CONTENUS DU RAPPORT

Les conclusions de ces études forment quatre volumes. Volume 1 - Ressources des Régions de Savane - Rapport, est un examen et une analyse des informations disponibles sur les terres et les ressources

hydrauliques et humaines des régions de savane. Les références utilisées pour ce travail figurent à la fin du Volume 1. Toutes les références peuvent être consultées au Centre de Documentation du C.I.E.H. de Ouagadougou, en Haute-Volta.

Volume 2 - Ressources des Régions de Savane - Dossier des Cartes, forme une série et vient confirmer les conclusions du Volume 1. Ces cartes sont à l'échelle de 1 : 5.000.000. Au C.I.E.H. toutes ces cartes sont aussi disponibles à l'échelle de 1 : 2.500.000 au cas où d'autres travaux de planning suivraient.

Volume 3 - Ressources des Régions de Savane - Annexes, contient les données détaillées relatives au Volume 1.

Volume 4 - Ressources des Régions de Savane - Recommandations pour des études, présente une série de propositions à étudier par la suite. Ces projets d'études sont recommandés pour combler certaines lacunes existant dans les informations scientifiques relevées au cours du travail de synthèse réalisé au Volume 1.

ORGANISATION DES ETUDES

Ces études ont été entreprises par une équipe d'experts pluridisciplinaires mis à la disposition du C.I.E.H. par le Groupement TAMS de Mise en Valeur Agricole, aux termes du Contrat AID-afr-C-1041 de l'Agence Américaine pour le Développement International. Cette équipe a été renforcée par des missions spéciales d'experts et de cadres complémentaires fournis par le C.I.E.H. Des consultants particuliers, des sociétés et organisations d'experts-conseils ont été engagés pour exécuter certaines parties de cette étude : experts en agroclimatologie,

PROJET DU CIEH POUR L'UTILISATION DES RESSOURCES EN EAU
ET DES TERRES DES REGIONS DE SAVANE

Personnel technique et administratif affecté au projet

COMITE INTERAFRICAIN D'ETUDES HYDRAULIQUES
M. M.G. Gagara
Secrétaire-Général

DIRECTEUR DU PROJET
Dr. John Buursink

CADRES COMPLEMENTAIRES ET DE SUPERVISION DE TAMS ADG
N.W. Philip*
K.M. Roberts
E.E. Evans
S.K. Guthrie

ADMINISTRATION COMPTABILITE/PERSONNEL
D.K. Mathias

RECHERCHES

RESSOURCES CLIMATIQUES
Dr. J.M. Kowal

BILAN HYDRIQUE
F. Forest (CIEH/FAC)
P. Franquin (ORSTOM)
P.W. Roark

RESSOURCES EN EAU DE SURFACE
P.W. Roark
J.C. Henry
J.O. Robertson
G. Williams

RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES
Dr. M.A. Saint-Pé
BURGEAP, Paris
BRGM, Orléans

RESSOURCES DES TERRES
Dr. P. Ahn
Dr. J. Buursink

RESSOURCES HUMAINES
C. McDavid

DOCUMENTATION
A. Krissiamba (CIEH)
R.P. Koester
E. Candelmo

CARTES ET PLANS
E. Paré (CIEH)
E. Garcia Prieto
D. Isasi Diaz

INFORMATIQUE
T. Sergi
ORSTOM, Paris

*Décédé

études de bilan hydrique, hydrologie, hydrogéologie et ressources des terres.

Les cadres d'étude des savanes ont été organisés suivant le schéma joint. Ces études se sont poursuivies de janvier 1976 à janvier 1978 et toutes les conclusions présentées se rapportent aux conditions existantes à cette époque, à moins d'avis contraire.

ASSISTANCE ET COOPERATION FOURNIES PAR D'AUTRES ORGANISATIONS

Plusieurs organismes ont coopéré étroitement avec le C.I.E.H. et ont apporté un précieux concours. Ce sont la Division de Mise en Valeur de l'Eau et des Terres de la FAO à Rome, en Italie, la BURGEAP et l'ORSTOM à Paris, et la BRGM d'Orléans, en France. (liste des abréviations à la page 8.)

De nombreux organismes gouvernementaux et privés d'Afrique Occidentale ont largement contribué à cette étude. Ce sont :

Bénin	-	Ministère de l'Equipement
Cameroun	-	Ministère de l'Agriculture
	-	Ministère des Mines et de l'Energie
	-	ONARES, ORSTOM, SNEC
Côte-d'Ivoire	-	Ministère de l'Agriculture
	-	Ministère du Plan
	-	Ministère des Travaux Publics et des Transports
	-	Forexi, AVB, BNETD, ORSTOM, SODEMI, Université d'Abidjan

Empire Centrafricain	- Ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Chasse - Ministère du Développement - ENERCA, ORSTOM
Gambie	- Ministry of Agriculture and Natural Resources - Ministry of Economic Planning
Ghana	- Ministry of Agriculture - Ministry of Lands and Natural Resources - Ministry of Works - FAO Regional Office - Ghana Institute of Engineers - Volta River Authority
Haute-Volta	- Ministère du Développement Rural - Ministère du Plan - AVV, CILSS, Liptako-Gourma, Programme de la Lutte contre l'Onchocercose
Mali	- Ministère du Développement Industriel, de l'Hydraulique et du Tourisme - Ministère du Plan - Energie Mali, IRAT, ORSTOM
Mauritanie	- Ministère de l'Equipement - SONELEC - FAO
Niger	- Ministère du Développement - Ministère de l'Economie Rurale

Niger (suite)	- Ministère des Mines et de l'Hydraulique - Centre Nigerien de Recherches en Sciences Humaines, CFN, CTFT, ENA, IEMVT, OFEDES, ORSTOM, OUA
Sénégal	- Ministère du Développement Rural - Ministère des Travaux Publics - ASECNA, BRGM-Dakar, Centre de la Recherche Agricole de Bambey, CTFT, EBAD, IDEP, IFAN, OMVS, ORSTOM, SAED
Tchad	- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Habitat - Ministère du Plan - CBLT, Institut National des Sciences Humaines, ONAREST, ORSTOM, SODELAC, Université du Tchad
Togo	- Ministère des Mines, de l'Energie et des Ressources Hydrauliques - Ministère du Plan - ORSTOM

Un concours précieux a été apporté, particulièrement en Afrique Occidentale, par les missions de l'Agence Américaine pour le Développement International, le Ministère de la Coopération (France), le FED (Belgique) et le Ministère du Développement Outre-Mer (Royaume Uni).

Aux Etats-Unis, la Banque Mondiale, la Division de la population des N. U., le G.E. Tempo, L'Institut de la Population, l'USAID et le Bureau de Recensement des U.S.A. ont fourni de précieuses informations pour l'étude des ressources humaines, tandis qu'en France l'OCDE et le Club des Amis du Sahel ont également apporté leur concours.

Sans l'assistance et la coopération apportées par de nombreux membres de tous les organismes susmentionnés, il aurait été impossible d'entreprendre ces études. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Liste des abréviations

ASECNA	=	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
AVB	=	Autorité pour l'Aménagement de la Vallée du Bandama
AVV	=	Autorité des Aménagements des Vallées des Voltas
BNETD	=	Bureau National d'Etudes Techniques et de Développement
BRGM	=	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BURGEAP	=	Bureau d'Etudes de Géologie Appliquée
CBLT	=	Commission du Bassin du Lac Tchad
CFN	=	Commission du Fleuve Niger
CIEH	=	Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
CILSS	=	Comité Permanent Interétats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel
CTFT	=	Centre Technique Forestier Tropical
EBAD	=	Ecole des Bibliothécaires, des Archivistes, et des Documentalistes
ENA	=	Ecole Nationale d'Administration
ENERCA	=	Energie Centrafricain
FAC	=	Fonds d'Aide et de Coopération
FAO	=	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FED	=	Fonds Européen de Développement
IDEP	=	Institut de Développement Economique et de la Planification
IEMVT	=	Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux
IFAN	=	Institut Fondamental d'Afrique Noire
OCDE	=	Organisation de la Coopération et du Développement Economique
OFEDES	=	Office de Développement de l'Energie Solaire
OMVS	=	Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal
ONARES	=	Office National de la Recherche Scientifique et Technique
ONAREST	=	Office National de la Recherche Scientifique et Technique
ORSTOM	=	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
OUA	=	Organisation de l'Unité Africaine
SAED	=	Société d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta
SNEC	=	Société Nationale de l'Electricité

Liste des abréviations (suite)

SODELAC	=	Société de Développement du Lac Tchad
SODEMI	=	Société pour le Développement Minier de la Côte d'Ivoire
SONELEC	=	Société Nationale de l'Electricité
USAID	=	United States Agency for International Development

CHAPITRE 1

REGIONS DE SAVANE

1.1 INTRODUCTION

Les régions de savane de l'Afrique Occidentale et Centrale, recouvrant une superficie d'environ 4,5 millions de kilomètres carrés, s'étendent en une large bande entre le désert du Sahara et la forêt des pluies tropicales, et dans une direction allant de l'océan Atlantique à l'ouest, au Soudan à l'est (Figure 1-1)

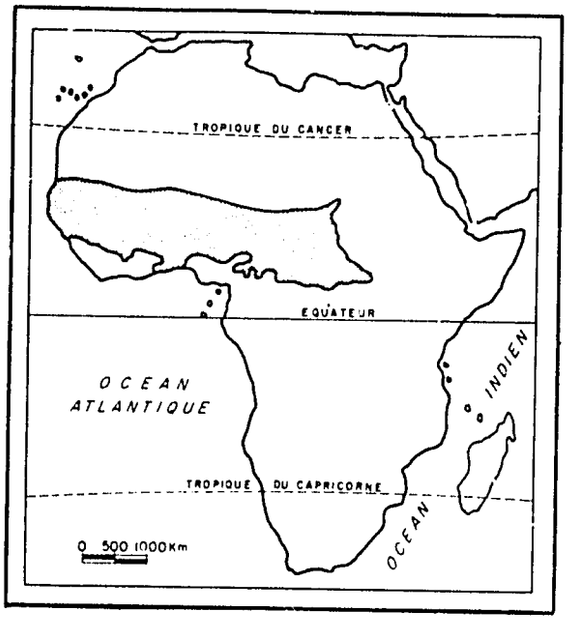


Figure 1-1. Les régions de savane de l'Afrique Occidentale et Centrale.

1.2 DEFINITION DES REGIONS DE SAVANE

Selon Lanjouw (1936) le terme "savane" a été utilisé pour la première fois en 1535 par Oviédo pour décrire les llanos du Venezuela: "les savanes sont des plaines de l'Amérique du Sud et des Antilles couvertes d'herbes et de buissons

résistant à la sécheresse, également de certains arbres et arbustes". En Afrique tropicale, le terme savane a été appliqué aux formations végétales ressemblant à celles de l'Amérique du Sud.

Différentes hypothèses ont été émises à propos de l'origine et de l'évolution de la savane. La majorité des premiers auteurs, puis quelques uns plus tard ont considéré que la savane était d'origine climatique (Goulissachvili, 1963). Certains envisagent que les sols de la savane sont trop pauvres pour supporter la forêt (Beard, 1963), tandis que d'autres, comme Aubreville (1949) et Walter (1963) concluent que la savane résulte directement de l'activité humaine. Par ailleurs, selon une autre supposition, la savane viendrait de changement paléoclimatique (Schnell, 1971).

Ces considérations d'ordre génétique ne donnent pas malheureusement de définition non équivoque des régions de savane. Bien que les définitions fondées sur les observations réelles soient surtout fonction de la végétation dans la savane, il n'en demeure pas moins que même à ce compte là divers points de vues ont été émis. A sa conférence de Yangambi en 1956, le Conseil Scientifique pour le Sahel a essayé de concilier les diverses positions. Cependant, une multiplicité d'autres opinions ont été formulées depuis lors, dépendant dans une large mesure du centre d'intérêt des auteurs (voir également Hills, 1965).

C'est ainsi que l'on constate l'approche du forestier dans les travaux de Vigne (1936), Sillans (1958), Keay (1959), et Taylor (1960) qui ont basé leur description des différents peuplements de la savane essentiellement sur des arbres et des arbustes, se contentant de ne mentionner qu'incidemment les herbes et plantes herbacées. Par contre, une autre attitude se reflète chez des écologistes des pâturages, comme Beard et Brammer (1956), Rattray (1960), et Hall et Denik (1968), qui tendent à considérer la savane simplement comme un terrain de parcours, donc à définir les différentes unités de végétation en termes des espèces herbacées constituant ces dernières. Quant aux botanistes, leurs travaux se

situent entre les extrêmes ci-dessus vu qu'ils ont recours à des classifications faisant plus ou moins appel à des détails se rapportant aux fleurs (Adjanohoun, 1964; Trochain, 1940).

Plus récemment, Collins (1975) a considéré la savane comme l'un des principaux écosystèmes ou biomes à la surface de la terre, mais il a encore défini le système en termes de sa végétation "qui est essentiellement herbacée, avec quelques espèces arbustives".

Dans la plupart des définitions, même dans celles exprimées uniquement en termes de la végétation, il se manifeste une tendance visant à prendre en compte des paramètres climatiques, le dénominateur commun étant ici représenté par un concept dans lequel la savane correspond à un écosystème tropical caractérisé par des périodes distinctes d'humidité et de sécheresse au cours de l'année (Eyre, 1968).

Une excellente contribution à la solution du problème de la délimitation des régions de savane en Afrique Occidentale a été apportée par Swami (1973) qui a établi une carte montrant l'importance des similitudes et des différences dans les limites de la savane telles que données par Shantz (1923), Church (1957), Molard (1956), Keay (1959), Philips (1959), et Rattray (1960).

La convenable définition du planning pour la mise en oeuvre des ressources hydrauliques devrait mettre l'accent sur ces aspects semi-arides de la savane, par opposition à l'humidité prévalant toute l'année dans la forêt équatoriale et par opposition à l'aridité de l'écosystème du désert du Sahara dans le nord. Dans le présent rapport, donc, la frontière nord de la région de savane est prise comme correspondant à l'isohyète 250 mm, soit la bordure du Sahara et la limite de l'exploitation agricole en sec. Quant à la limite sud, elle est celle de la forêt tropicale telle qu'indiquée sur les cartes de navigation mondiale "A & O" pour l'Afrique (voir également Jones et Wild, 1975).

Les facteurs climatiques prévalant dans cette région semi-aride de savane se caractérisent par des profils le long d'un axe nord-sud. En conséquence, la savane en Afrique Occidentale et Centrale constitue une bande allongée s'étendant presque parallèlement à l'équateur. La limite ouest en est l'océan Atlantique, tandis que celle à l'est, pour les fins du présent rapport, est considérée comme déterminée par la position la plus à l'est d'un des pays observateurs du CIEH*, c'est-à-dire la frontière du Soudan. Cependant, la région de savane, en tant que telle, traverse la corne de l'Afrique dans les environs des montagnes de l'Ethiopie jusqu'à l'océan Indien.

1.3 SUPERFICIE ET SUBDIVISION DES REGIONS DE SAVANE

L'ensemble de la superficie des régions de savane en Afrique Occidentale et Centrale, tel que défini ci-dessus, se chiffre à 4.562.547 kilomètres carrés, ou à peu près 25% du total des 18 millions de kilomètres carrés de savane recouvrant la surface de la terre (Budowski, 1956). C'est une bande de terre de quelque 4.500 kilomètres de long avec une largeur moyenne d'approximativement 1.000 kilomètres, et la taille de la région est à peu près égale à 60% de la superficie du territoire continental des Etats-Unis.

Dix-sept pays, en totalité ou partiellement, font partie de cette région (voir carte 1-1). La moitié de la région en question est occupée par quatre pays, le Nigeria, l'Empire Centrafricain, le Tchad, et le Mali, tandis que cinq autres états se trouvent situés complètement dans la région de savane, soit la Haute-Volta, le Sénégal, le Togo, la Guinée-Bissau, et la Gambie.

Un aperçu des nations constituant la région de savane est donné dans le Tableau 1-1 qui indique la superficie totale de savane occupée par chaque pays, le pourcentage correspondant par rapport à l'ensemble de la savane, et le pourcentage de savane entrant dans la superficie totale de chaque pays concerné.

S'agissant des détails ayant trait à la taille des différents bassins

*Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

Tableau 1-1 SUBDIVISIONS POLITIQUES DE LA REGION DE SAVANE

PAYS	SUPERFICIE DE SAVANE (Km^2)	% DE LA SUPERFICIE TOTALE DE LA SAVANE	% DE SAVANE DANS LE PAYS CONCERNE
Nigeria	780.402	17,1	84,4
Empire Centrafricain	612.182	13,4	97,7
Tchad	560.062	12,3	43,6
Mali	526.561	11,5	43,7
Niger	349.729	7,7	27,6
Haute-Volta	274.539	6,0	100,0
Cameroun	254.393	5,6	53,6
Guinée	233.631	5,1	95,0
Sénégal	196.839	4,3	100,0
Mauritanie	187.230	4,1	17,3
Côte d'Ivoire	175.792	3,9	54,3
Ghana	170.463	3,7	71,5
Bénin	109.407	2,4	94,5
Togo	56.980	1,2	100,0
Guinée-Bissau	36.260	0,8	100,0
Sierra Leone	27.717	0,6	38,4
Gambie	10.360	0,2	100,0
TOTAL	4.562.547	100,0	-

versants faisant partie des régions de savane, ils font l'objet d'un exposé dans le Chapitre 4.

1.4 CARTOGRAPHIE

Les régions de savane de l'Afrique Occidentale et Centrale sont couvertes par de nombreuses cartes et séries de cartes à des échelles variées. Le Tableau 1-2 ci-dessous énumère les principales cartes topographiques à petite échelle, toutes faisant partie de la collection du CIEH.

D'autres cartes essentielles sont contenues dans les atlas disponibles au CIEH. Nombre de ces cartes constituent un appréciable supplément à celles regroupées dans le Volume 2 du présent rapport, au moment où l'on prend en compte les données de base des ressources intégrées de la savane en vue du planning des ressources hydrauliques. Par ailleurs, des atlas régionaux clés ont été publiés par l'Organisation de l'Unité Africaine (1968), Davies (1973), Thompson (1965), Jeune Afrique (1973), et l'Organisation Mondiale de la Santé (1973). De plus, le CIEH détient des atlas à l'échelon national pour des pays comme le Cameroun (Institut de Recherche Scientifique du Cameroun, 1957), la Côte-d'Ivoire (Ministère du Plan de la Côte-d'Ivoire, 1971), le Tchad (Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines, 1972), le Ghana (Service des Levés du Ghana, 1969), et la Haute-Volta (Jeune Afrique, 1975).

Tableau 1-2 CARTES TOPOGRAPHIQUES DE LA REGION DE SAVANE

Echelle	Titre	Editeur
2.000.000	Afrique	Service cartographique du Ministère de la Défense (USA)
1.000.000	Carte internationale du monde, Afrique	Institut Géographique National (France)
1.000.000	Carte de navigation mondiale "A. & O."	Service cartographique du Ministère de la Défense
500.000	Cartes de l'Afrique de l'Ouest	Institut Géographique National
500.000	Cartes de l'Afrique Centrale	Institut Géographique National
250.000	Graphique des Opérations Combinées	Service cartographique de l'Armée (USA)
200.000	Cartes topographiques	Institut Géographique National

CHAPITRE 2

RESSOURCES CLIMATIQUES

2.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'analyse, du point de vue du développement agricole, des éléments climatiques de la savane de l'Ouest Africain, dont la pluviométrie, l'ensoleillement, la température et l'évapotranspiration. C'est l'eau disponible qui constitue, l'année durant, le problème critique limitant la production de récoltes dans les régions de savane de l'Ouest Africain. La présente étude agroclimatologique repose sur une analyse de la période pendant laquelle la disponibilité en eau doit ne pas limiter la croissance des plantes.

On a distingué dans la savane plusieurs régions bioclimatiques dont l'étude se fonde sur les cartes de la végétation et sur la durée de la période de croissance. Ces régions bioclimatiques sont évaluées en termes de production agricole potentielle.

2.2 DEFINITIONS ET DOCUMENTS ETUDIES

2.2.1 Définitions

La <u>période de croissance</u> est définie comme la période continue de l'année où les précipitations sont supérieures à la moitié de l'évapotranspiration (0,5 Et) calculée par la méthode de Penman, période prolongée du nombre de jours nécessaires à l'évaporation d'une réserve d'eau dans le sol supposée de 100 mm après la fin des pluies. La période de croissance doit en outre présenter une période humide, c'est-à-dire une période au cours de laquelle les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration.

La <u>période humide</u> est nécessaire non seulement pour satisfaire à la demande totale en évapotranspiration de cultures constituant un couvert végétal complet, mais aussi pour reconstituer les réserves en eau déficitaires du profil du sol. Les régions ne présentant pas de période humide dans leur cycle hydrique ne peuvent pas être considérées, en cas d'exploitation normale, comme convenant à des cultures arrosées par la pluie. Ces régions peuvent cependant être considérées comme marginales pour des exploitations en sol sec ou des pâturages de nomades.

La <u>saison des pluies</u> est définie comme le nombre des jours séparant le début et la fin des pluies.

Le <u>début des pluies</u> est défini comme la première de dix jours de l'année au cours de laquelle les précipitations sont supérieures ou égales à la moitié de la vitesse d'évapotranspiration calculée par la méthode de Penman. Les premières pluies de la saison tombent sur un sol desséché en surface et présentant un profil fortement déficitaire en humidité. Ces pluies ne se produisent pas régulièrement et on ne peut pas compter sur le volume des précipitations pour assurer la croissance de cultures en l'absence de réserves du sol en eau. Elles peuvent être suffisantes pour la préparation des semis. Cependant, dès que les précipitations dépassent la moitié de l'évapotranspiration en dix jours environ, l'humidité présente est suffisante pour assurer la croissance après la germination des plantes. D'autre part, l'évaporation et la transpiration d'une terre cultivée à couvert végétal germant ou incomplet sont très inférieures à l'évapotranspiration totale normale; pendant les phases initiales de la croissance, l'évapotranspiration est environ la moitié de la valeur Et de Penman (Kowal et Kassam, 1977). C'est pourquoi des précipitations égales ou supérieures pendant cette période de dix jours à la moitié de Et peuvent être considérées comme suffisantes pour satisfaire, même en l'absence de réserves substantielles d'humidité dans le sol, aux besoins en eau des cultures.

La fin des pluies, qui intervient assez brusquement dans les régions de savane, entraîne des changements marqués dans l'environnement et dans le comportement physiologique des cultures. Les plantes venant à maturité, la transpiration diminue. Bien que l'importance de la transpiration varie considérablement à cette période selon les cultivars, certaines expériences (Kowal et Kassam, 1977) suggèrent que les plantes commencent à tirer notablement sur les réserves en eau du sol pendant la période de diminution des pluies jusqu'à un niveau d'environ moitié de l'évapotranspiration.

La fin des pluies se définit donc comme la dernière période de dix jours de la saison pendant laquelle les précipitations sont inférieures à 0,5 Et.

Pour la plupart des cultures, la période de croissance se poursuit après la saison des pluies. De manière plus ou moins importante, les cultures mûrissent pendant la période postpluviale en prélevant l'eau sur les réserves du profil du sol. Cependant, la quantité d'humidité emmagasinée dans le sol et disponible pour les cultures varie avec la profondeur du profil et les caractéristiques physiques du sol, les structures radiculaires des différentes cultures ainsi que d'autres facteurs. De plus, des changements dans les réserves du sol en humidité entraînent des changements dans son potentiel en eau, modifiant ainsi la quantité d'eau disponible dans le sol pour les cultures et, par là-même, la vitesse d'évapotranspiration.

Pour éviter ces problèmes et se conformer à la définition initiale de la période de croissance comme "la période pendant laquelle la disponibilité en eau ne limite pas la croissance des cultures", on considère que la contribution des réserves en humidité du sol pendant la durée de la période de croissance dure le nombre de jours nécessaires à l'évaporation de 100 mm d'eau au taux maximal d'évapotranspiration (Et). Ce choix de

100 mm est fondé sur les expériences de Samaru (Kowal et Kassam, 1977) qui suggèrent que les cultures à racines peu profondes telles que le maïs et le sorgho appauvrissent les réserves en humidité du sol au moment de la moisson d'une quantité approximativement équivalente à 100 mm de pluie. La <u>période postpluviale</u> se définit donc comme le nombre des jours suivant la fin de la saison des pluies nécessaires à l'évaporation de 100 mm d'eau et des précipitations supplémentaires se produisant pendant cette période.

2.2.2 Documents étudiés

La détermination des possibilités climatiques des régions de savane de l'Ouest Africain quant à la production de cultures arrosées par la pluie est fondée sur les archives climatologiques à long terme (30 à 50 ans de chutes de pluie) de quelque 179 stations. Les sources des données disponibles au C.I.E.H.* comprennent :

1. FAO (Division du développement des terres et de l'eau), Rome : 143 stations; archives climatologiques complètes.
2. ASECNA : 104 stations; états par ordinateur des chutes de pluie et de l'évaporation. Ces données ont été utilisées pour l'évaluation de la période de croissance par la méthode graphique.
3. COCHEME & FRANQUIN (1967) : 30 stations; ces données ont été utilisées pour l'évaluation de la période de croissance par la méthode graphique.
4. KOWAL & KNABE (1972) : 20 stations au Nigeria.

Les renseignements ne sont pas homogènes en ce qui concerne les périodes de mesures, en particulier pour l'estimation de Et. Pour permettre une meilleure précision, toutes les données disponibles ont été incluses dans l'analyse. Il en résulte un recouvrement considérable et, pour quelques

*Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

stations, des mesures provenant de plusieurs sources.

Les analyses portent sur les informations suivantes :

1. Les numéros codés pour le début et la fin de la période de croissance et leur répartition dans l'ensemble de la région. Les dates codées représentent les périodes suivantes :

1 : 1-10 janvier

2 : 11-20 janvier

3 : 21-31 janvier

4 : 1-10 février, etc.

2. La durée de la période de croissance (en jours) et ses relations avec les chutes de pluie annuelles et les régions bioclimatiques de savane de l'Ouest Africain.

3. Les valeurs moyennes suivantes des paramètres climatiques pendant la période de croissance :

a) Le rayonnement global moyen de la saison (cal cm^{-2} $jour^{-1}$)

b) Les températures sous abri maximales et minimales moyennes de la saison (^{o}C)

c) Les températures diurnes et nocturnes moyennes de la saison (^{o}C)

d) Les précipitations (annuelles et de la saison) en mm

e) L'évapotranspiration en mm par saison.

2.3 RESULTATS

2.3.1 Eléments climatiques

La caractéristique climatique dominante de la savane de l'Ouest Africain est le mode de répartition des élements climatiques par rapport à l'axe nord-sud de la région. Ce point est représenté graphiquement sur les cartes 2-1, 2-2 et 2-3. Pour tous ces éléments, les lignes d'égales valeurs

ont tendance à être presque parallèlles et présentent un gradient régulier de distribution dans le sens nord-sud. Il en résulte que la répartition et la valeur spatiales et temporelles des paramètres climatiques se prêtent à une analyse utilisant de simples régressions linéaires. Cela facilite l'interprétation des données fondamentales et constitue une base commode de comparaison entre les exigences physiologiques des cultures et les caractéristiques climatiques.

2.3.1.1 Précipitations annuelles moyennes

Dans la savane, les chutes de pluies sont principalement caractérisées par leur variabilité saisonnière et annuelle. L'atmosphère du tropique contient une quantité importante d'humidité et les orages en général violents déversent de grandes quantités d'eau. Ces orages durent rarement longtemps, la moyenne étant de 1 à 2 heures. Des précipitations violentes de 5 cm ou davantage, atteignant 20 cm/h pendant de courtes périodes, ne sont pas rares. Le résultat en est que l'eau gicle, le sol devient compact, forme une croûte, s'érode par plaques et se ravine. Il est donc nécessaire d'exploiter le sol et les terrains selon des méthodes spéciales bien méconnues dans les pays à précipitations moins violentes des climats tempérés et méditerranéens.

De même que les autres caractéristiques climatiques de la savane, l'importance des précipitations présente un gradient nord-sud net et assez régulier, la précipitation annuelle moyenne augmentant du nord vers le sud. Les isohyètes sont presque parallèles dans la plus grande partie du nord de la région (voir carte 2-1).

Kowal et Kassam (1977) ont décrit la précipitation annuelle moyenne (Pa) en mm à l'aide d'une équation de régression multiple fonction de la latitude (LA) et de la longitude (LO). L'équation de régression déduite des moyennes à long terme de 52 stations de la région conduit à la relation approximative

suivante :

$$Pa = 2470 - 130,9\ (LA) - 8,6\ (LO)\ mm\ (r^2 = 0,91)$$

Cette équation de régression indique ce qui suit :

(i) Il y a une diminution moyenne des précipitations annuelles de 131 mm par degré de latitude vers le nord, soit de 131/111 = 1,18 mm de pluie par km. Cela suggère que l'éloignement des sources d'humidité est le facteur dominant. La masse d'air méridionale amenant l'eau en déverse progressivement moins en pénétrant dans les terres. En se déplaçant vers le nord, elle perd constamment de l'humidité et la durée de son influence décroît du sud au nord.

(ii) Les courbes isohyètes données par l'équation ci-dessus indiquent une diminution moyenne des précipitations de 8,6 mm par degré de longitude vers l'est. Les stations situées à la même latitude présentent donc des variations égales de durée du jour mais des précipitations annuelles différentes. A titre d'exemple, l'isohyète 600 mm de l'ouest du Sénégal correspond à une variation annuelle de 100 minutes de la durée du jour tandis que, autour du Lac Tchad, soit deux degrés plus au sud, elle est de 70 minutes.

(iii) La valeur à l'origine de la courbe de régression indique que, s'il n'y avait pas d'autre facteur affectant les précipitations, il tomberait environ 2470 mm d'eau à l'endroit de la source d'humidite.

La plus grande partie de la région s'étendant au nord de l'isohyète 1300 mm présente une pluviométrie saissonière caractérisée par un maximum unique (à un seul mode). La fréquence des pluies augmente progressivement pour atteindre son maximum en août, période de l'influence maximale de la la ligne de convergence intertropicale (C.I.T.). Après ce maximum, les précipitations diminuent relativement rapidement jusqu'à la fin de la saison des pluies.

Au sud de l'isohyète 1300 mm, il y a une zone de transition présentant un ou deux maximums annuels de précipitations. Le premier maximum se produit en juin-juillet et le deuxième en septembre, tandis que le mois d'août est relativement sec.

La distribution des précipitations à un seul maximum présente, de manière significative, une reproductibilité bien supérieure à celle à deux maximums. En outre, il est plus difficile avec une distribution des précipitations à deux maximums qu'avec une à un seul d'établir des corrélations avec les besoins en eau des cultures.

Pour terminer, un aspect important de la détermination des possibilités climatiques de production de récoltes arrosées par la pluie est la relation entre la précipitation annuelle (Pa) et la durée de la période de croissance (Ng). En utilisant les données disponibles pour Pa et Ng, une analyse de régression indique une corrélation linéaire très marquée ($r^2 = 0,968$) ($n = 201$) entre les moyennes des précipitations annuelles et les durées moyennes des périodes de croissance (voir fig. 2-1).

L'équation de régression est . $Ng = 0,17\ Pa - 4,0$
Elle peut servir à déterminer la durée de la période de croissance par l'utilisation des valeurs, plus couramment connues, des précipitations annuelles de la région. L'équation montre qu'il y a une augmentation moyenne de 17 jours de la période de croissance tous les 100 mm d'augmentation de la précipitation annuelle. Elle montre également que la période de croissance est nulle lorsque la précipitation annuelle moyenne est d'environ 24 mm.

2.3.1.2 Début des pluies

Une estimation sûre du début de la saison des pluies est très importante en agriculture tropicale. Le début des pluies coincide avec la

RELATION ENTRE LA PRECIPITATION ANNUELLE MOYENNE (Pa) ET LA DUREE MOYENNE DE LA PERIODE DE CROISSANCE (Ng)

RELATIONSHIP BETWEEN THE AVERAGE ANNUAL PRECIPITATION (Pa) AND THE AVERAGE LENGTH OF THE GROWING PERIOD (Ng)

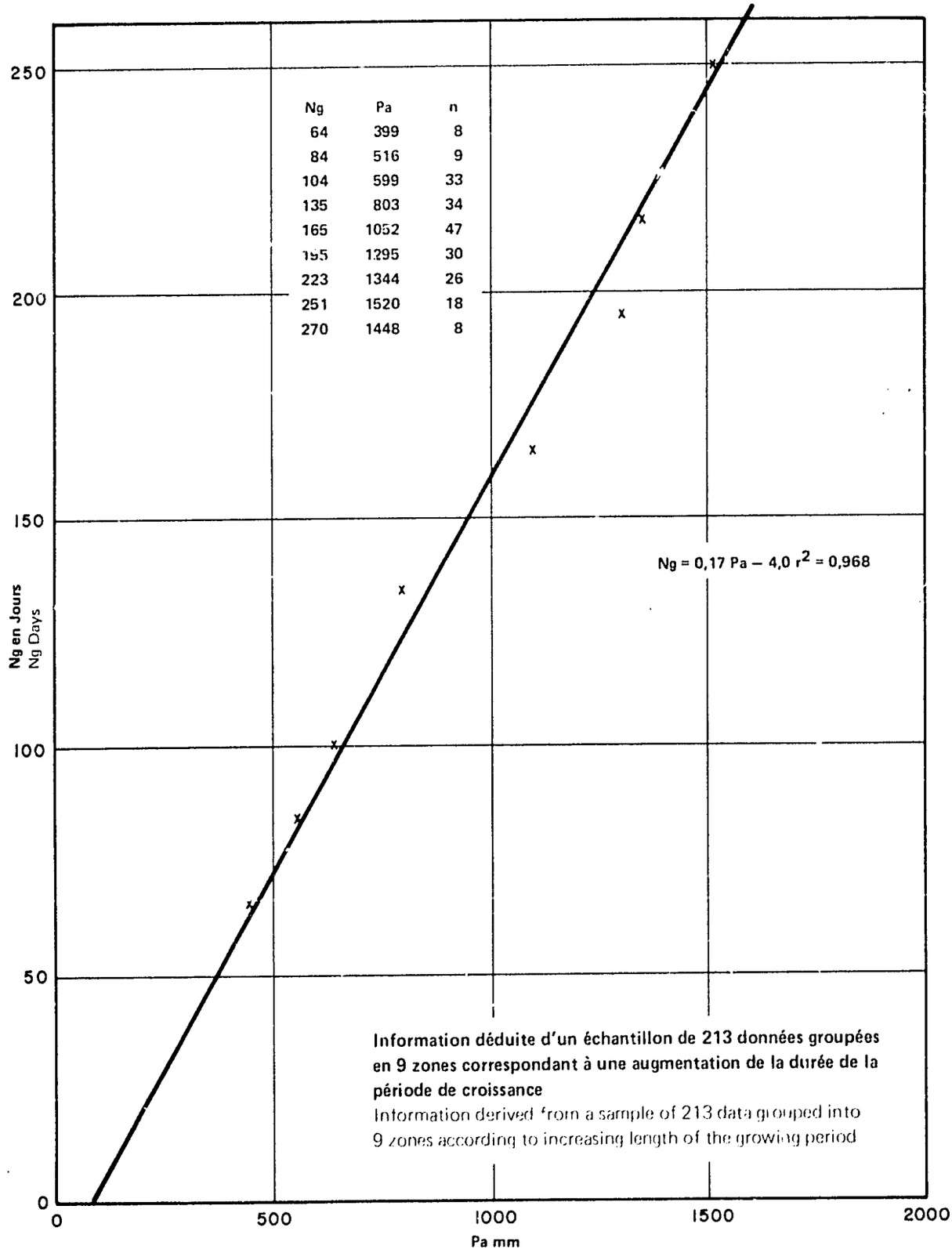


Fig. 2-1

demande la plus forte en main-d'oeuvre et en matériel, ce qui pose des problèmes sérieux aux responsables. En outre, la mise en place des cultures tôt en saison signifie des rendements plus élevés; dans les bonnes exploitations agricoles, on a tendance à commencer tôt. Une connaissance sûre de la date du début des pluies évite le risque d'une mauvaise mise en place ou d'une perte des cultures lorsque des semis précoces sont nécessaires.

Le moment du début des pluies peut être déterminé avec une précision correcte par une analyse de régression reliant les codes de dates du début des pluies à d'autres paramètres connus tels que la latitude, la longitude et la précipitation annuelle.

Le début des pluies (Ps) a été déterminé en associant, à intervalles de temps arbitrairement choisis de 30 jours, la durée de la période de croissance (Ng) et les valeurs correspondantes Pa et Ps de chaque station. Les valeurs moyennes de Ng, Pa et Ps pour chaque intervalle de 30 jours ont alors été soumises à une analyse de régression.

Cette analyse faite entre Pa et Ps (fig. 2-2) et entre Ps et Ng montre une corrélation fortement négative avec respectivement $r^2 = 0,933$ et $r^2 = 0,986$. Cela signifie que le début des pluies se produit proportionnellement plus tard dans les régions caractérisées par une précipitation annuelle plus faible et une période de croissance plus courte.

Les équations de régression respectives sont :

$$Ps = 25,28 - 0,0107\ Pa$$

$$Ps = 25,15 - 0,0637\ Ng$$

L'analyse de régression indique que, en moyenne, le début des pluies a lieu début mars dans les régions méridionales de la savane (correspondant à l'isohyète de précipitation de 1550 mm ou à la période de croissance de

270 jours). Dans les régions nord de la savane (correspondant à l'isohyète de précipitation de 400 mm ou à la période de croissance de 64 jours), les pluies commencent au milieu de juillet. Il y a ainsi une différence d'environ 4 mois entre les moments de début des pluies de l'extrême sud du pays (voir Fig. 2-2).

2.3.1.3 Fin des pluies et fin de la période de croissance

La fin de la saison des pluies annonce la fin prochaine de la période de croissance; elle est importante dans la prévision des activités agricoles telles que la récolte des arachides, l'enterrement des résidus végétaux, la mise en jachère, etc., avant que le sol ne soit devenu trop sec. La fin de la saison des pluies se produit brusquement, en moyenne 30 à 40 jours avant la fin de la période de croissance. Les récoltes non-venues à maturation au moment de la fin des pluies doivent s'en remettre partiellement ou totalement à l'humidité résiduelle du sol pour leur rendement et leur maturation. Les sorghos et les millets, sensibles à la lumière, terminent leur croissance et leur maturation avec l'humidité résiduelle du sol car ils risquent les attaques des champignons et des insectes s'ils viennent à maturation avant la fin des pluies. Pour le coton, le premier égrenage doit se faire à la fin des pluies pour éviter l'action des parasites et une mauvaise qualité de la fibre. Une partie importante de la production totale de coton fait donc ainsi appel à l'humidité résiduelle du sol. Les cultures telles que l'arachide, le pois chiche, le mais et le millet non-photosensible Gero, lorsque semé à temps, n'ont en général pas besoin de l'humidité résiduelle du sol pour venir à maturité dans les régions de savane de Guinée. Là où la saison des pluies est courte, par exemple dans certaines régions de savane du Soudan, ou lorsque les semis sont tardifs, ces cultures peuvent avoir besoin de l'humidité résiduelle du sol pour mûrir. Le millet Gero résiste aux champignons et les épis de maïs sont protégés de la pluie par leurs enveloppes. Pour une bonne récolte d'arachides, la

RELATION ENTRE LA PRECIPITATION ANNUELLE MOYENNE (Pa), LE DEBUT DES PLUIES ET LA FIN DE LA PERIODE DE CROISSANCE

RELATIONSHIP BETWEEN THE AVERAGE ANNUAL PRECIPITATION (Pa), THE ONSET OF THE RAINS AND THE TERMINATION OF THE GROWING PERIOD

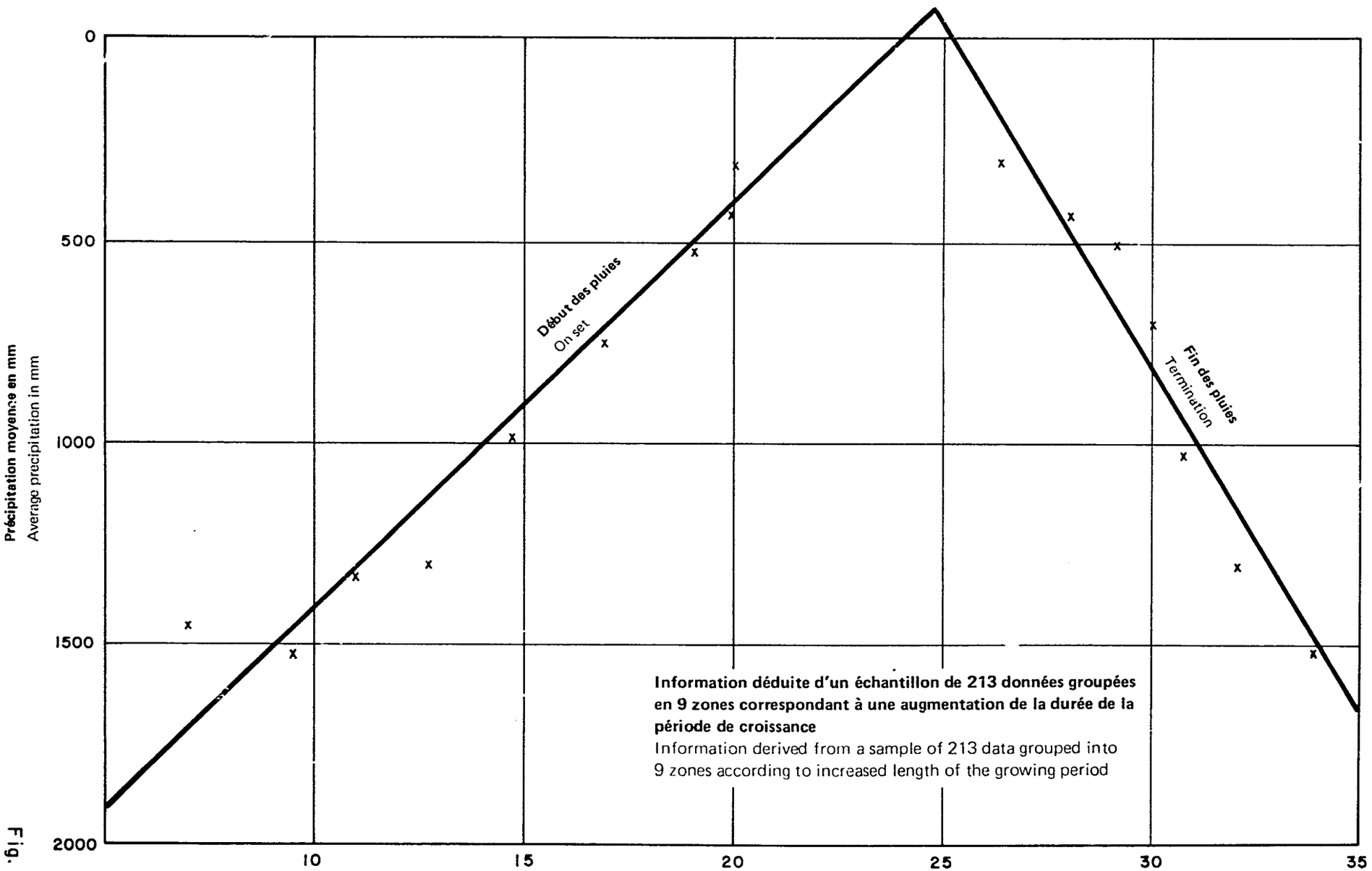


Fig. 2-2

maturation doit intervenir à la fin des pluies. Si elle doit compter de manière importante sur l'humidité résiduelle du sol, l'arrachage de la récolte pose un problème.

Une analyse de la fin de la période de croissance est basée sur une méthode comparable à celle décrite précédemment pour la détermination du moment du début des pluies. Les résultats indiquent des corrélations positives importantes entre la fin de la période de croissance (Tg) et Pa (voir figure 2-2) ou Ng. Les valeurs de r^2 sont respectivement de 0,962 et 0,986. Les équations de régression respectives sont :

$$Tg = 0,00637\ Pa + 24,71$$

$$TG = 0,0373\ Ng + 24,87$$

Les résultats montrent que la fin de la période de croissance se produit aux environs de la mi-septembre dans les régions septentrionales de la savane, ce qui correspond à l'isohyète de précipitation de 400 mm ou à une période de croissance de 64 jours. La période de croissance se termine début décembre dans les régions correspondant à l'isohyète de 1450 mm ou à la période de croissance de 270 jours. Il y a ainsi une différence de 90 jours entre les fins des périodes de croissance des régions sud et nord extrêmes de la savane (voir figure 2-2).

La disparition des pluies et la fin de la période de croissance sont un phénomène beaucoup plus rapide que celui de l'avance du front pluvieux. Selon Kowal et Kassam (1977), la vitesse du front de fin des pluies est d'environ un degré de latitude tous les 5,7 jours, tandis que l'avance du front pluvieux demande en moyenne 13,4 jours par degré de latitude.

2.3.1.4 Rayonnement et régimes thermiques

Le rayonnement solaire incident doit être considéré comme l'un des éléments climatiques les plus importants dans la production de récoltes. La température, le rayonnement et la durée du jour conditionnent de manière importante l'adaptabilité des cultures et la succession chronologique de leur développement. La connaissance du rayonnement et des régimes thermiques est donc essentielle pour un choix rationnel des cultures. Lorsque leur adaptation climatique est satisfaite (y compris les exigences chronologiques de croissance), les renseignements quantitatifs sur la valeur moyenne du rayonnement reçu pendant la période de croissance ainsi que sur les températures diurne et saisonnière moyennes constituent la base du calcul de la limite supérieure du rendement de la récolte.

Une analyse des données montre que, lorsque la durée de la période de croissance augmente, il y a une diminution marquée du rayonnement incident de faible longueur d'onde (Rg), de la température moyenne sous abri (TØ) et de la température diurne (Td) (voir fig. 2-3).

L'équation de régression reliant la durée de la période de croissance et le rayonnement incident de faible longueur d'onde est la suivante:

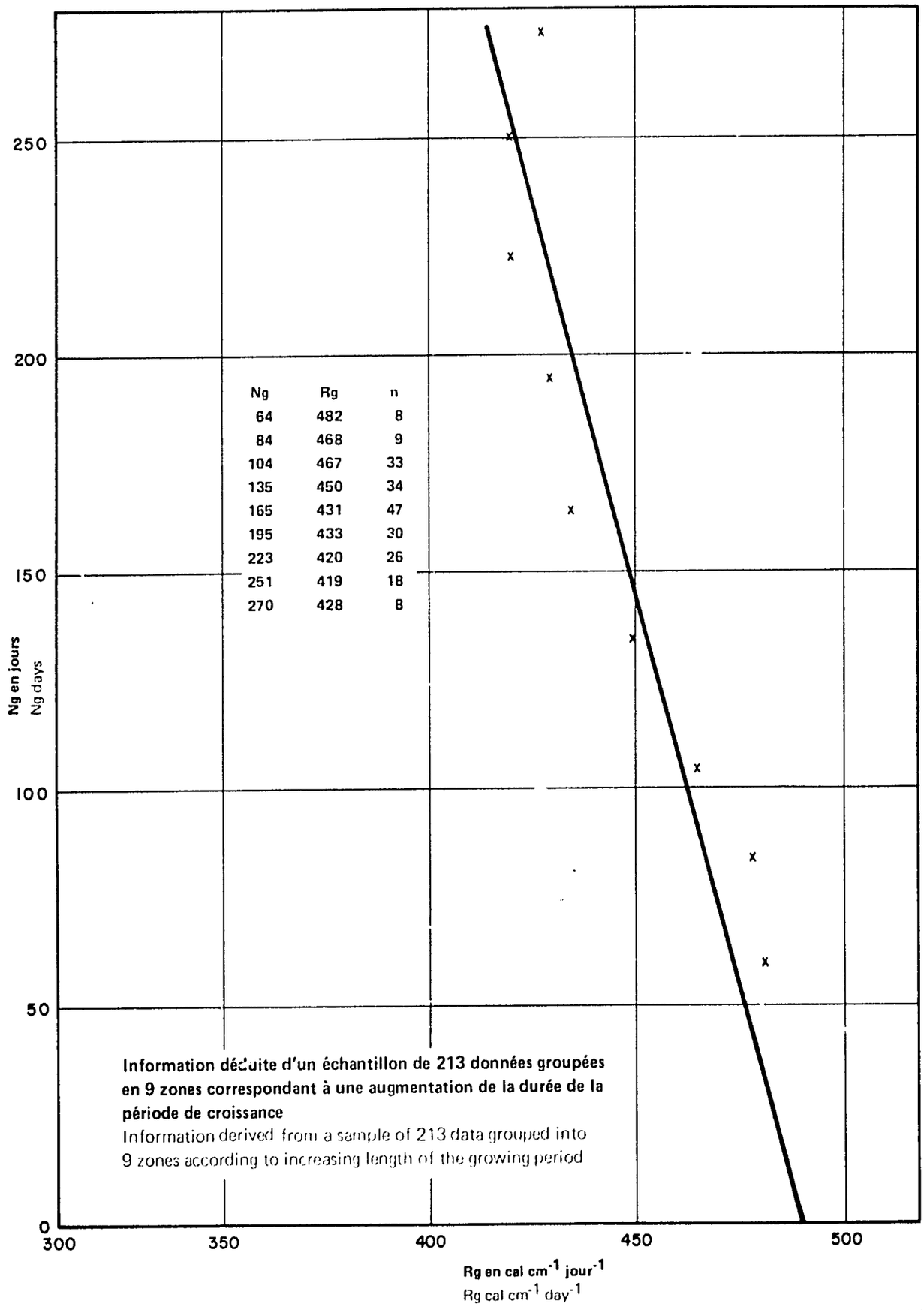
$$Rg = 493 - 0,2932\ Ng \text{ cal cm}^{-1} \text{ jour}^{-1}$$
$$(r^2 = 0,874)$$

Les valeurs moyennes quotidiennes du rayonnement vont d'environ 482 cal cm^{-2} $jour^{-1}$ à l'extrémité nord de la savane, le long de l'isohyète 400 mm ou de la ligne de période de croissance 64 jours, jusqu'à environ 414 cal cm^{-2} $jour^{-1}$ dans les régions sud de la savane correspondant à l'isohyète 1600 mm ou à la période de croissance de 270 jours.

Les différences dans le rayonnement reçu dans les régions extrêmes nord et sud peuvent sembler faibles mais correspondent en fait à des

RELATION ENTRE LA PERIODE DE CROISSANCE ET LES VALEURS MOYENNES QUOTIDIENNES DU RAYONNEMENT INCIDENT A FAIBLE LONGUEUR D'ONDE

RELATIONSHIP BETWEEN THE GROWING PERIOD AND THE AVERAGE DAILY VALUES OF INCOMING SHORT WAVE RADIATION



Ng	Rg	n
64	482	8
84	468	9
104	467	33
135	450	34
165	431	47
195	433	30
223	420	26
251	419	18
270	428	8

Fig. 2-3

différences d'insolation marquées. Le rayonnement incident intégré reçu pendant la période de croissance présente un intérêt tout particulier en agriculture. Comme le montrent la Figure 2-4 et l'équation suivante il y a une corrélation certaine entre ce rayonnement et la durée de la période de croissance :

$$Rg \text{ de la période } = (0.400 \text{ Ng } 5,9) \times 10^3 \text{ cal cm}^{-2} \text{ durée}^{-1}$$
$$(r^2 = 0,999)$$

Le rayonnement total reçu pendant la durée de la période de croissance va d'environ $31,5 \times 10^3$ cal cm^{-2} $durée^{-1}$ sur la ligne de période de croissance de 64 jours à environ 114×10^3 cal cm^{-2} $durée^{-1}$ sur la ligne de période de croissance de 270 jours. Ces valeurs sont indicatrices de la productivité potentielle des cultures de la savane arrosées par la pluie. Si l'on suppose que le rendement de la photosynthèse par le rayonnement solaire est de un pour cent en termes de production, les rayonnements reçus sur les lignes de périodes de croissance de 64 et 270 jours correspondent à des productions potentielles respectivement de 7,88 et 28,5 tonnes de matière sèche.

Le régime thermique est caractérisé par des températures constantes présentant un coefficient de corrélation négatif pour la durée de la période de croissance ce qui signifie une légère diminution de la température lorsque la durée de la période de croissance augmente (voir Fig. 2-5). La température sous abri moyenne de la saison va de 28,6°C sur la ligne de période de croissance de 64 jours à 25,6°C sur celle de 270 jours. L'équation de régression donnant, pour la région, les valeurs moyennes saisonnières des températures sous abri est la suivante :

$$T\emptyset = 29,5 - 0,01457 \text{ Ng } (r^2 = 0,89)$$

La variation diurne de température pendant la période de croissance est en moyenne de 10°C. Les équations de régression donnant les valeurs des températures sous abri maximales (TM) et minimales (Tm) moyennes sont

les suivantes :

$$TM = 34,89 - 0,01673\ Ng\ (r^2 = 0,76)$$

$$Tm = 24,16 - 0,01272\ Ng\ (r^2 = 0,98)$$

Les températures TM et Tm correspondant aux régions nord et sud du pays sont les suivantes :

- Sur la ligne 64 jours de période de croissance, TM = 33,8°C et Tm = 23,4°C
- Sur la ligne 270 jours de période de croissance, TM = 30,4°C et Tm = 20,7°C

Les températures diurnes de la saison (Td), qui conditionnent directement le volume de la photosynthèse, vont de 31,2°C sur la ligne 64 jours à 28,0°C sur la ligne 270 jours.

L'équation de régression donnant la température diurne saisonnière moyenne de la région est :

$$Td = 32,18 - 0,01538\ Ng\ (r^2 = 0,81)$$

Les plages de températures ci-dessus excluent la possibilité de cultures telles que le blé qui est adapté à des températures beaucoup plus basses.

Les températures nocturnes moyennes sont relativement élevées. Elles vont de 26°C sur la ligne de période de croissance de 64 jours à 23,2°C sur la ligne 270 jours. L'équation de régression donnant dans la région les températures nocturnes est la suivante :

$$Tn = 26,96 - 0,01394\ Ng\ (r^2 = 0,95)$$

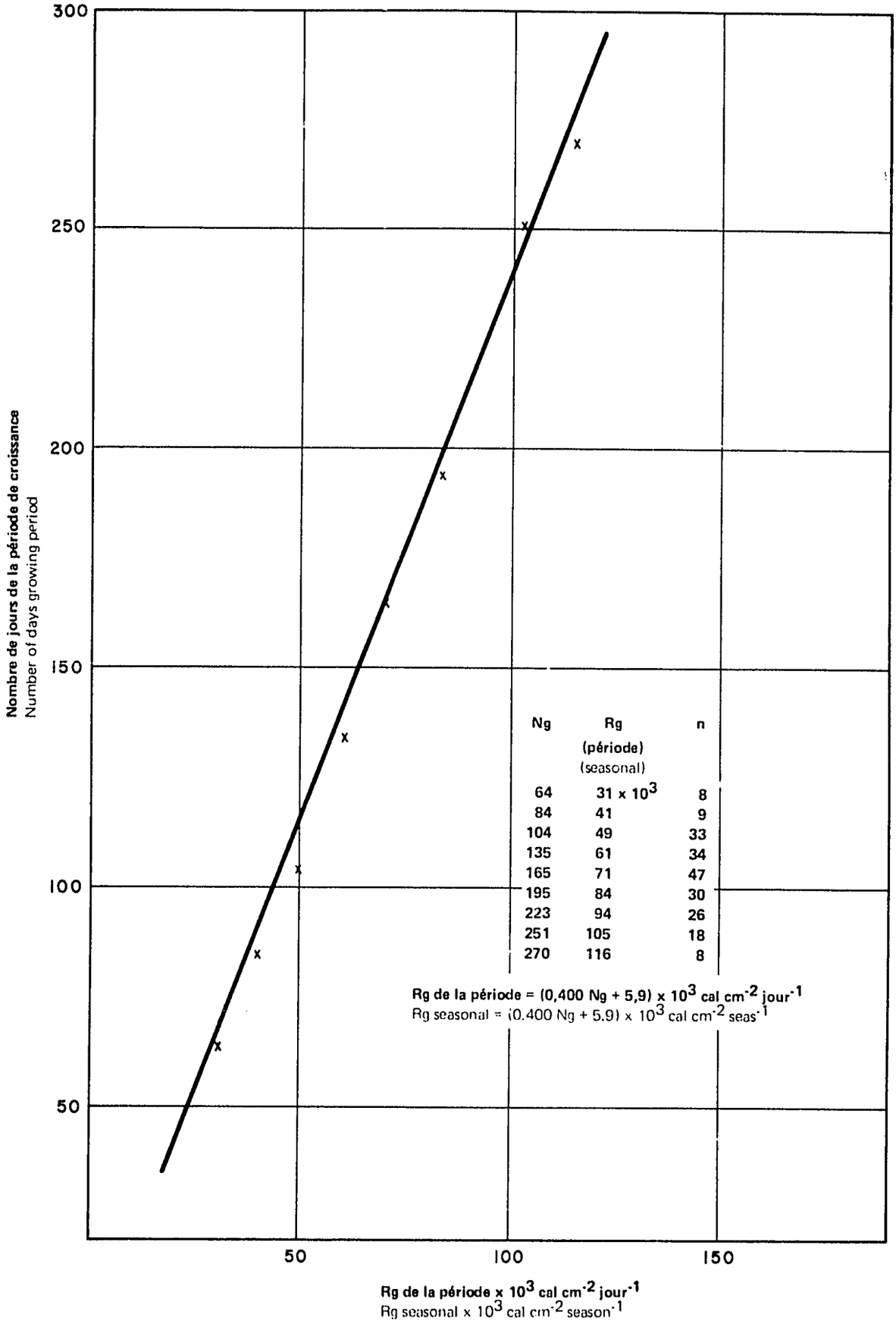
Ces températures nocturnes élevées sont responsables d'une perte considérable de matière sèche dans les récoltes résultant d'une respiration importante.

2.3.1.5 Evapotranspiration

Il y a un coefficient de corrélation fortement négatif entre la vitesse d'évapotranspiration potentielle quotidienne moyenne pendant la

RELATION ENTRE LA PERIODE DE CROISSANCE ET LA QUANTITE DE RAYONNEMENT INCIDENT RECU PENDANT CETTE PERIODE

RELATIONSHIP BETWEEN THE GROWING PERIOD AND THE AMOUNT OF INCOMING RADIATION RECEIVED DURING THE SEASON



Ng	Rg (période) (seasonal)	n
64	31 x 10^3	8
84	41	9
104	49	33
135	61	34
165	71	47
195	84	30
223	94	26
251	105	18
270	116	8

Fig. 2-4

RELATION ENTRE LA PERIODE DE CROISSANCE ET LES TEMPERATURES SOUS ABRIS MAXIMALES (TM) ET MINIMALES (Tm), LA TEMPERATURE DIURNE (Td) ET LA TEMPERATURE NOCTURNE (Tn)

RELATIONSHIP BETWEEN THE GROWING PERIOD AND THE MAXIMUM (TM) AND THE MINIMUM (Tm) SCREEN TEMPERATURES, DAY TIME TEMPERATURE (Td) AND NIGHT TIME TEMPERATURE (Tn)

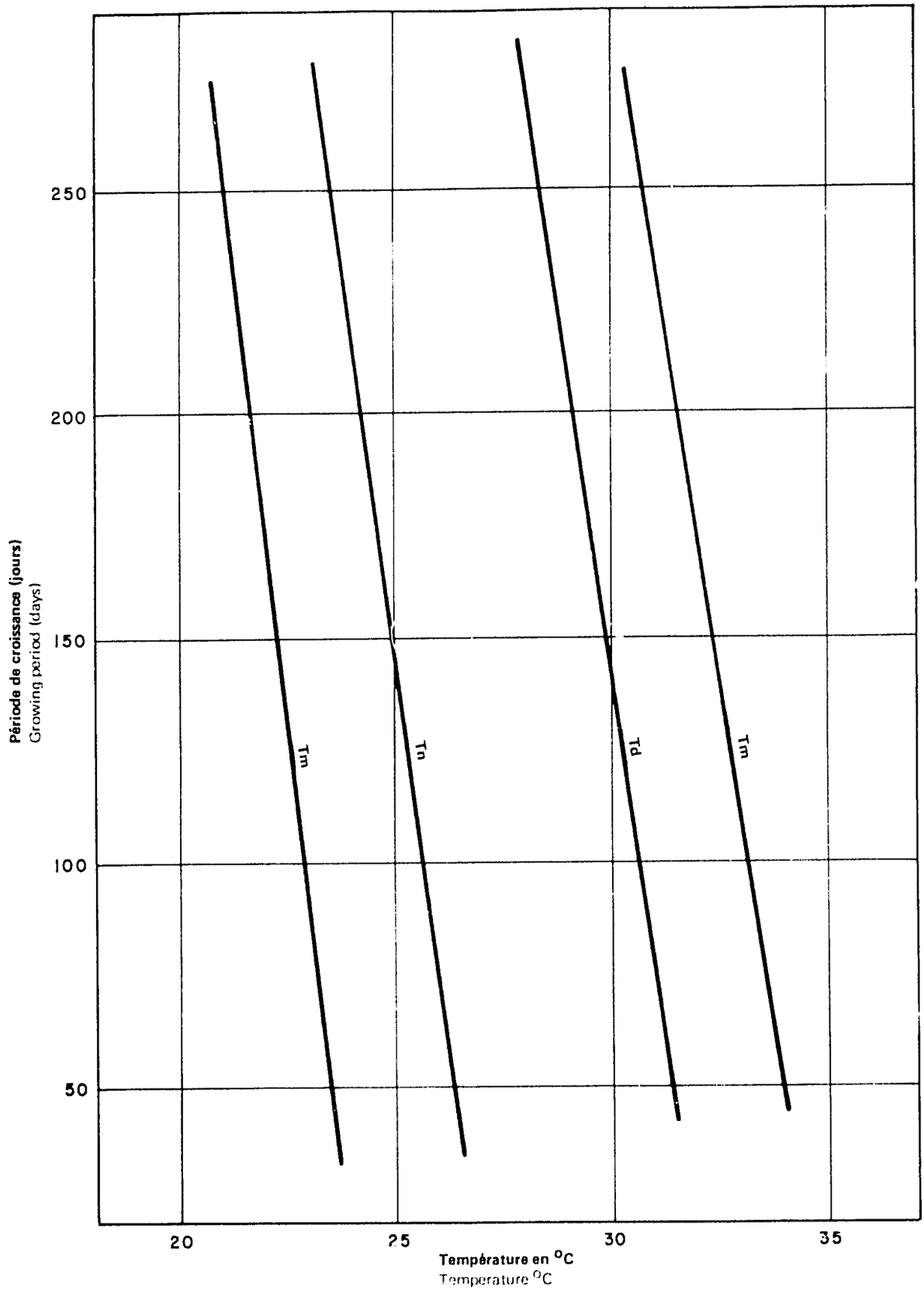


Fig. 2-5

période de croissance (Etg/jour) et la durée de la période de croissance. L'équation de régression est la suivante :

$$Etg/jour = 5,49 - 0,0062\ Ng\ mm\ jour^{-1}\ (r^2 = 0,9)$$

Les vitesses d'évapotranspiration quotidienne potentielle vont d'environ 3,8 mm par jour sur la ligne de 270 jours de période de croissance à environ 5,1 mm sur la ligne de 64 jours. Ce n'est pas excessif. Pendant les périodes de sécheresse, cependant, la transpiration est beaucoup plus importante, entraînant temporairement pour les récoltes un manque d'eau, la fermeture des stomates et le manque d'assimilation en résultant.

Il est extrêmement intéressant de comparer les précipitations et l'évapotranspiration pendant la période de croissance. La différence Pg-Etg est négative dans les régions où la durée de la période de croissance est inférieure à 110 jours. Lorsque ces périodes sont plus longues, l'excès des précipitations par rapport à l'évaportranspiration augmente rapidement en même temps que la durée de la période de croissance pour atteindre un maximum de 420 mm lorsque la durée de la période de croissance est de 200 jours. La différence Pg-Etg est donc toujours positive en saison mais diminue lorsque la durée de la période de croissance augmente (voir Figure 2-6).

La différence Pg-Etg reflète, pour les régions ayant des périodes de croissance inférieures à 110 jours, l'importance ou la nécessité d'une conservation de l'humidité du sol par des pratiques agricoles telles que le buttage, le paillage, etc. Pendant les années sèches, les précipitations peuvent ne pas suffire à compléter à 100 mm le stock supposé d'humidité du sol raccourcissant ainsi les périodes de croissance et entraînant des rendements moindres ou des pertes de récoltes. En revanche, les régions ayant une période de croissance supérieure à 110 jours disposent d'un environnement suffisamment humide et ne requièrent pas de mesures de conservation de l'eau. En effet, la lixiviation et le ruissellement superficiel augmentent avec la durée de la période de croissance et deviennent un

facteur important dans le bilan nutritif et dans l'entretien du sol.

2.3.2 Climat et agriculture pluviale (carte 2-3)

Les possibilités climatiques de la savane de l'Ouest Africain sont discutées ci-dessous en ce qui concerne la production de récoltes arrosées par la pluie.

2.3.2.1 Facteurs physiques

Le début de la saison des pluies et la fin de la période de croissance ont été décrits et leurs implications agricoles commentées en détail. Les relations entre la durée de la période de croissance d'une part et, d'autre part, le début des pluies, la fin de la période de croissance et les précipitations annuelles ont été commentées ci-dessus. Ces corrélations démontrent, à grande échelle, la régularité exceptionnelle de la distribution dans le temps et l'espace des facteurs climatiques.

Pour mieux mettre l'accent sur cet aspect de la savane de l'Ouest Africain, nous joignons à ce rapport un abaque donnant les gradients et identifiant, spatialement et temporellement, la période de croissance (voir carte 2-3). Cet abaque peut être utilisé pour (1) déterminer la période d'activité agricole intense de la région; (2) relier la durée des cycles de croissance des cultures et de leur cultivars à la durée de la période de croissance; (3) déterminer les cultures pouvant pousser dans un endroit particulier, compte tenu des niveaux de rayonnement et de température; enfin, (4) choisir un système d'exploitation agricole tenant compte de l'état des sols, de la topographie du terrain, des types de parasites et de maladies, ainsi que des considérations relatives aux questions sociales et économiques.

RELATION ENTRE L'EXCES DES PRECIPITATIONS PAR RAPPORT A LA DEMANDE EN EVAPOTRANSPIRATION PENDANT LA SAISON DE CROISSANCE (PG - ETG) ET LA DUREE DE LA PERIODE DE CROISSANCE

RELATIONSHIP BETWEEN THE EXCESS OF PRECIPITATION OVER EVAPOTRANSPIRATION DEMANDS DURING THE GROWING SEASON (PG - ETG) AND THE LENGTH OF THE GROWING PERIOD

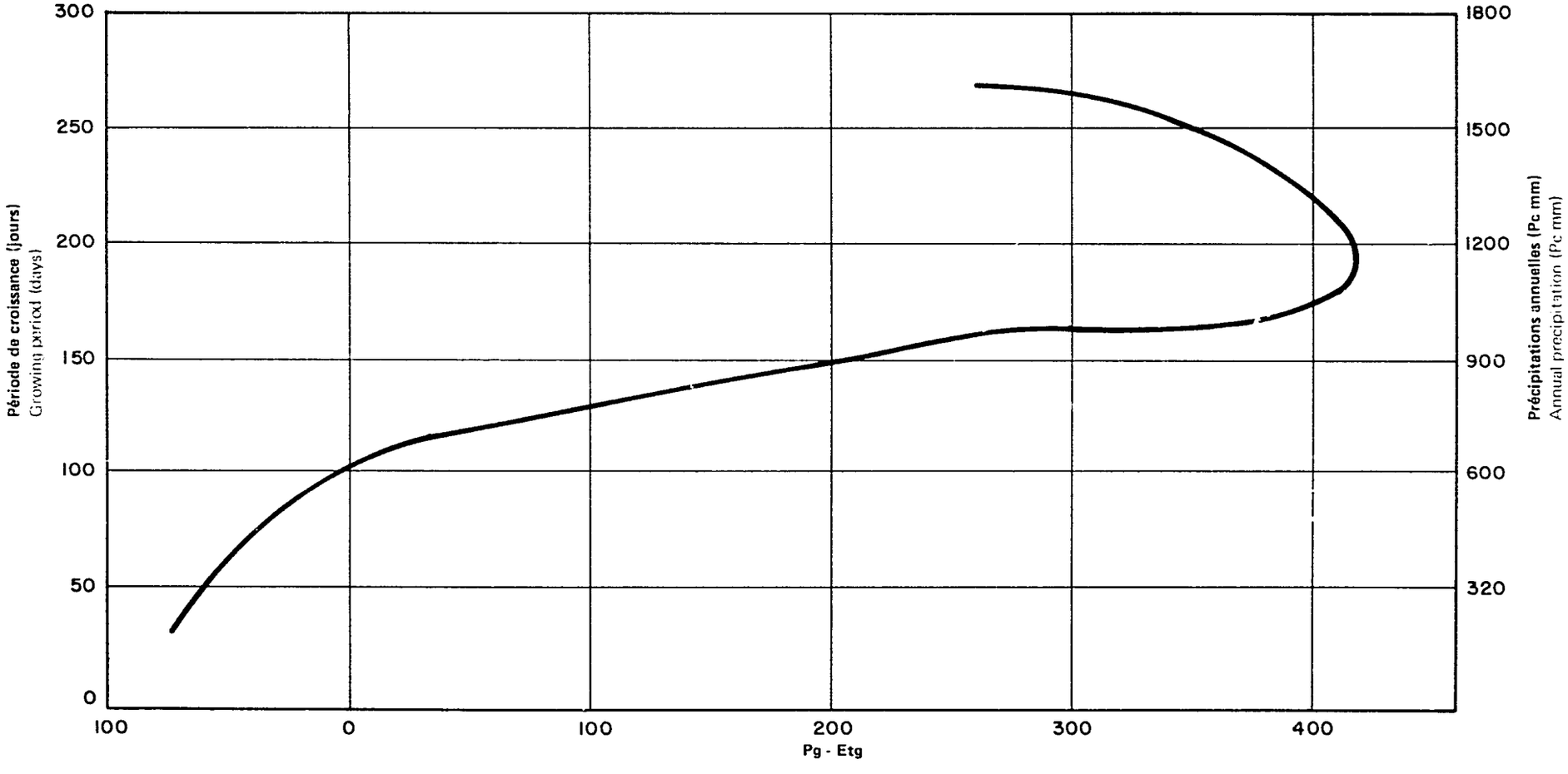


Fig. 2-6

Il y a lieu ici de souligner la diversité extrêmement marquée des caractéristiques climatiques de la région lorsqu'on y inclut la saison sèche. Les régimes de températures et le rayonnement sont complètement différents pendant la saison sèche, ce qui permet à un grand nombre de cultures d'être produites sous irrigation. Les cultures de valeur élevée, en particulier celles requérant une main-d'oeuvre importante telles que les tomates, les oignons, etc., présentent dans la savane des rendements exceptionnellement bons moyennant une politique correcte d'irrigation.

2.3.2.2 Facteurs biologiques

Il existe trois éléments principaux à examiner quant aux relations entre les exigences biologiques des cultures et l'environnement : 1) la vie de la culture, 2) les exigences photosynthétiques de la culture et 3) les exigences chronologiques de la culture.

Il est nécessaire de déterminer si la vie de la culture peut être assurée jusqu'au bout pendant la période de croissance et si elle est capable d'utiliser au mieux la saison favorable pour donner du rendement. Des semis précoces ou faits en temps utiles sont essentiels pour les rendements car des températures et des rayonnements plus importants se produisent tôt dans la saison et entraînent ainsi une croissance et une formation du couvert rapides. Les cultures ayant une durée de vie ne correspondant pas exactement à celle de la période de croissance, le rendement excepté, sont souvent de mauvaise qualité et peuvent souffrir des attaques des insectes, des maladies, d'une nutrition insuffisante ainsi que du manque ou de l'excès d'humidité.

Les cultures ont un processus physiologique dont l'optimum ne se trouve que dans certaines plages de températures et de rayonnement.

Il en résulte qu'il est possible de relier les régimes de températures et de rayonnement à la productivité des cultures en se fondant sur la réponse photosynthétique à la température et au rayonnement (fig. 2-7, 2-8) ainsi que sur les effets connus de la température et de la respiration. Etant donné que la réponse photosynthétique à la température et au rayonnement dépend du mécanisme de la photosynthèse, on peut classer les différentes espèces de cultures en fonction de leurs mécanismes d'assimilation et de leurs aptitudes photosynthétiques (voir tableau 2-1).

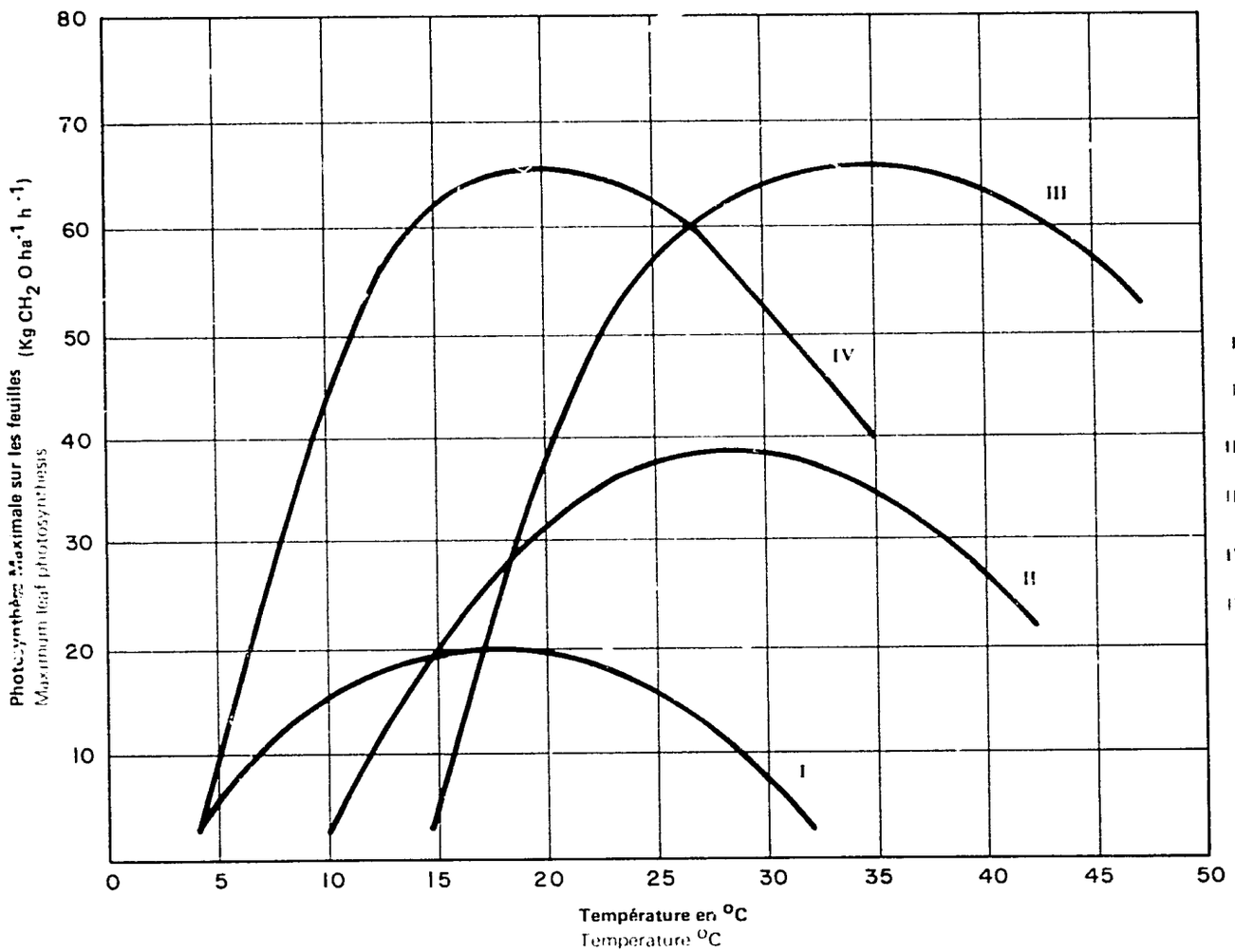
Les deux mécanismes principaux de la photosynthèse sont :

(a) le mécanisme d'assimilation C_3 qui est adapté au développement en présence de températures basses (15-20°C) et caractérisé par des échanges relativement faibles en CO_2 (dans la plage de 15-30 mg CO_2 dm^{-2} h^{-1} avec saturation légère à raison de 0,2-0,6 cal cm^{-2} min^{-1});

(b) le mécanisme d'assimilation C_4 adapté au développement en présence de températures élevées (30-35°C) et caractérisé par des échanges importants de CO_2 (dans la plage de 70-100 mg CO_2 dm^{-2} h^{-1} avec légère saturation à 1,0-1,4 cal cm^{-2} mn^{-1}). La culture et la sélection des espèces ont cependant modifié les réponses en température de certaines espèces C_3 et C_4; il en résulte qu'il existe des espèces C_3 (par exemple, le coton, les arachides) dont la température optimale se situe au milieu de la plage haute (de 25 à 30°C). De même, certaines espèces C_4 (par exemple, le maïs, le sorgho) se sont trouvées adaptées à d'autres températures et à des cultivars en hautes terres présentant des températures optimales dans le milieu de la gamme basse (de 15 à 25°C).

RELATION MOYENNE ENTRE LE TAUX MAXIMAL DE PHOTOSYNTHESE ET LA TEMPERATURE

AVERAGE RELATIONSHIP BETWEEN MAXIMUM PHOTOSYNTHESIS RATE AND TEMPERATURE



I **Cultures à niveau d'assimilation C_3 adaptées à des températures basses**
I Crops with C_3 assimilation pathway adapted to low temperatures

II **Cultures à niveau d'assimilation C_3 adaptées à des températures élevées**
II Crops with C_3 assimilation pathway adapted to high temperatures

III **Cultures à niveau d'assimilation C_4 adaptées à des températures élevées**
III Crops with C_4 assimilation pathway adapted to high temperatures

IV **Cultures à niveau d'assimilation C_4 adaptées à des températures basses**
IV Crops with C_4 assimilation pathway adapted to low temperatures

Fig. 2-7

RELATION ENTRE LA PHOTOSYNTHESE SUR LES FEUILLES, A UNE TEMPERATURE OPTIMALE, ET LE RAYONNEMENT DE PHOTOSYNTHESE ACTIF

RELATIONSHIP BETWEEN LEAF PHOTOSYNTHESIS RATE AT OPTIMUM TEMPERATURE AND PHOTOSYNTHETICALLY ACTIVE RADIATION

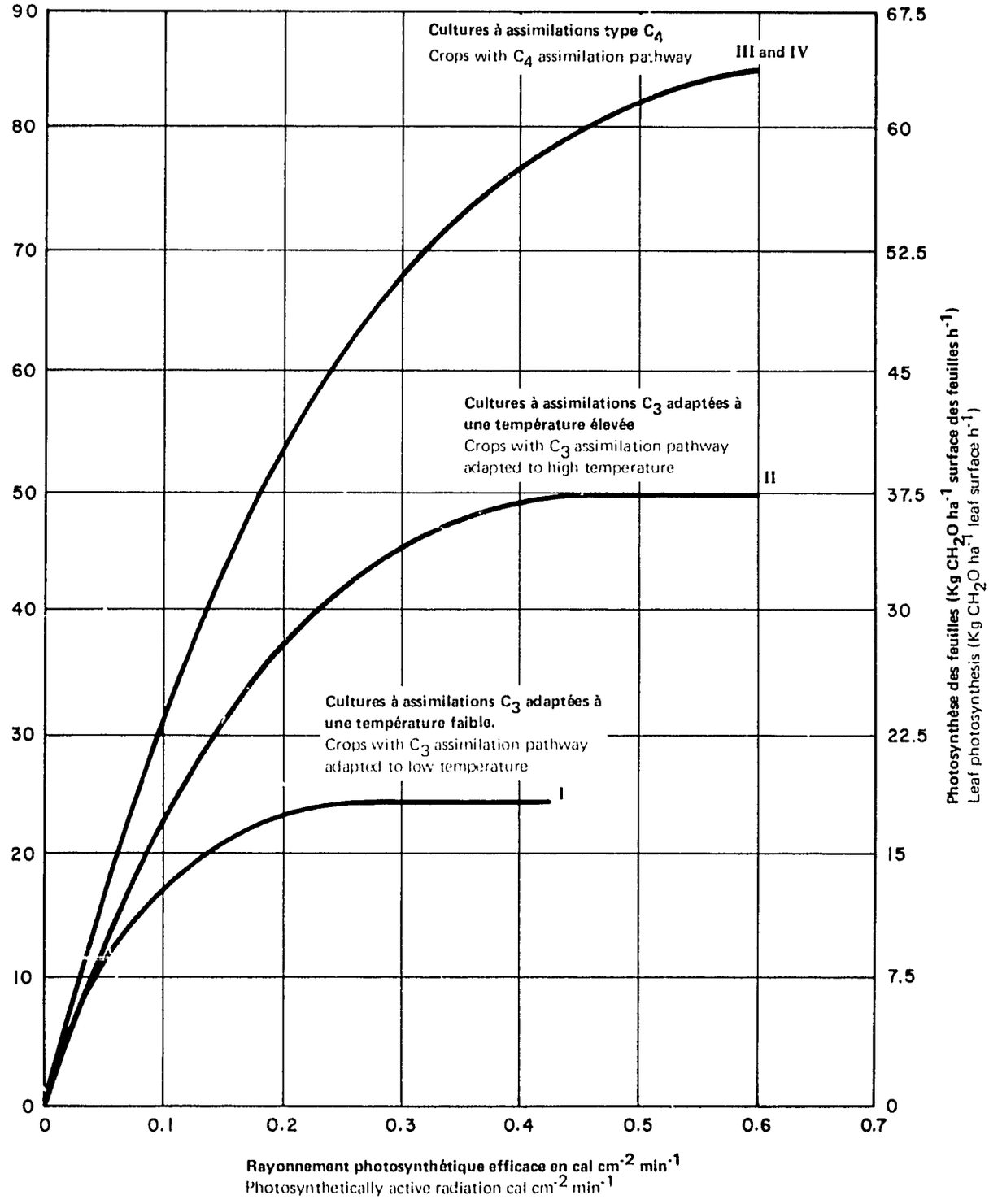


Fig. 2-8

Tableau 2-1

ADAPTABILITE DES GROUPES DE CULTURES EN FONCTION DES POINTS COMPARABLES DE LEURS MECANISMES D'ASSIMILATION ET DE PHOTOSYNTHESE

CARACTERISTIQUES	ADAPTE AUX TEMPERATURES BASSES	ADAPTE AUX TEMPERATURES ELEVEES	ADAPTE AUX TEMPERATURES ELEVEES	ADAPTE AUX TEMPERATURES BASSES	ADAPTE AUX TEMPERATURES ELEVEES
MECANISME DE PHOTOSYNTHESE	C-3	C-3	C-4	C-4	CAM
Taux de photosynthèse pour une saturation lumineuse à la température optimale mg CO_2 dm^{-2} h^{-1} kg CH_2O ha^{-1} h^{-1}	20-30 15-22.5	45-55 33,75- 41.25	70-100 52,5-75	70-100 52,5-75	20-50 15 - 37,5
Température optimale (°C) pour une photosynthèse maximale cal cm^{-2} mn^{-1}	15-20	25-30	30-35	15-30	25-35

Tableau 2-1 (suite)

ADAPTABILITE DES GROUPES DE CULTURES EN FONCTION DES POINTS COMPARABLES DE LEURS MECANISMES D'ASSIMILATION ET DE PHOTOSYNTHESE

Intensité du rayonnement pour une photosynthèse maximale cal cm^{-2} mn^{-1}	0,2-0,6	0,3-0,8	1,0-1,4	1.0-1.4	0,6-1,4
Rendement d'utilisation de l'eau g eau / g mat. s.	350-900	400-600	150-350		50-200
Cultures principales	Blé, Pomme de terre, Haricot "phaseolus" (cultivars des hautes terres tempérées et tropicales)	Haricot "phaseolus" (cultivars tropicaux) Soja, Riz Coton, Manioc, Igname, Patates douces	Millet "pennisetum" Maïs, Canne à sucre, Sorgho. Cultivars tropicaux	Sorgho, Maïs, (cultivars des hautes terres tempérées et tropicales)	Sisal Ananas

En outre, il existe un autre groupe de cultures présentant, dans des conditions xérophytiques, un métabolisme C.A.M. Ces espèces C.A.M. peuvent recevoir la lumière pendant la période diurne et fixer le CO_2 pendant la nuit. Il en résulte que, en comparaison des espèces C_3 et C_4, leurs besoins en eau sont très importants. Il n'existe que deux espèces agricoles présentant de l'importance dans ce groupe : l'ananas et le sisal..

Les caractéristiques physiologiques des plantes décrites ci-dessus figurent, pour plus de commodité, au Tableau 2-1.

La température et le rayonnement saisonniers, compte tenu de l'environnement de la savane (plage de température diurne de 31 à 28°C et rayonnement important de 480 à 410 cal cm^{-2} $jour^{-1}$ pour une durée diurne relativement courte) correspondent bien aux exigences de température et de rayonnement des espèces C_4 (30-35°C de température et rayonnement de 1,0-1,4 cal cm^{-2} min^{-1}). Les principales espèces présentant un mécanisme d'assimilation C_4, dont on attend qu'elles soient prospères dans les régions de savane, sont le millet, le sorgho, le maïs, le "tef", la canne à sucre (dans les régions les plus humides de la savane) ainsi qu'un certain nombre de fourrages verts et de légumes, annuels ou vivaces.

En outre, il existe un grand nombre de cultures C_3 adaptées à une plage de température moyenne-haute (25-30°C). On peut leur prévoir d'être prospères dans les conditions climatiques de la savane. Ces cultures comprennent: l'arachide, le coton, les niébes, le soja, le riz, le sésame, le tournesol, le tabac, la patate douce, le jute, le kénaf et la roselle.

La plupart de ces cultures ont une horloge biologique interne déterminant le développement chronologique de leur cycle de vie : ce sont par exemple la durée de la croissance végétative, le moment de la floraison, la fructification ou la production des semences, la chute des feuilles, etc.

Cette chronologie en terme de calendrier de la croissance des cultures s'appelle la phénologie. Les différentes étapes de la phénologie dépendent des conditions climatiques et, en particulier, de la durée du jour. La température peut également déterminer le commencement ou non d'un mécanisme de développement particulier (par exemple, la tubérisation des pommes de terre), l'instant de son début, la vitesse ultérieure de développement et le moment de l'arrêt du processus. Pour certaines cultures, la durée du jour et la température peuvent toutes deux stimuler la croissance et déterminer le moment de la floraison, alors que, pour d'autres cultures, seule la durée diurne peut stimuler la floraison.

Les plantes présentent un schéma de développement impératif que l'on doit respecter si l'on veut transformer les produits de la photosynthèse en récoltes rentables d'utilisation et en quantité et qualité correctes. Il est donc nécessaire de tenir compte, en plus des exigences de la photosynthèse, de celles spécifiques au climat quant à la qualité de la récolte afin d'adopter pour chaque culture les conditions climatiques optimales. Les différentes cultures accumulent de la matière sèche rentable à différentes étapes de leur existence ou utilisent des fractions variables de cette existence pour la constituer. Botaniquement, elles entrent dans trois classes phénologiques principales.

Plantes à croissance déterminée : Rendement produit lors de l'inflorescence finale ou tardive constituant la dernière étape de la vie d'une plante annuelle ou l'évènement normal d'une plante vivace. Pour ces cultures, aucune feuille supplémentaire ne peut se former tant que les bourgeons épiques des pousses ne sont pas venus à reproduction; d'autre part, la formation des graines dépend des feuilles formées les dernières. Les principaux membres de cette catégorie sont les céréales et les cultures telles que le bananier et le plantanier.

Plantes à croissance indéterminée : Croissance des tiges, des branches et des rejetons non limitée ni arrêtée par le développement du bourgeon terminal. Le rendement résulte d'une fraction plus ou moins importante de la vie de la culture, ainsi que des fruits et semences produits sur les inflorescences latérales pouvant s'être formées tôt dans la vie de la plante. Cette classe comporte la tomate, le coton, les plantes arborescentes cultivées pour leurs fruits, les légumineuses et les graines oléagineuses.

Plantes à croissance déterminée ou indéterminée : Rendement se constituant pendant tout ou partie principale de la période de croissance possible, en raison d'une accumulation, dans les parties végétatives, d'éléments vivaces ou bisannuels de longévité suffisante. Cet ensemble de cultures comprend les cultures fourragères ainsi que d'autres plantes de fourrage et destinées à l'ensilage, la canne à sucre, les plantes cultivées pour leurs racines ou leurs tubercules, les patates douces, le manioc, les ignames et le tabac.

Les quatre tableaux ci-après (2-2, 2-3, 2-4, 2-5) regroupent schématiquement les espèces végétales importantes dans la Savane, ainsi que les caractéristiques de photosynthèse, la période de croissance et la classification phénologique. Chacun de ces tableaux est lié à l'une des régions bioclimatiques de la Savane.

2.3.3 Régions bioclimatiques

Les éléments écologiques principaux de l'Ouest Africain ont été déterminés, décrits et mentionnés en terme de végétation naturelle (pour les détails, voir Swani, 1973). Une description quantitative et qualitative des principaux ensembles écologiques, en termes d'éléments climatiques divers et en tenant compte de l'existence de régions bioclimatiques de la savane

Tableau 2-2 BIOCLIMAT DU SAHEL MERIDIONAL ET ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES BIOCLIMATIQUES DU SAHEL MERIDIONNAL	INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES				
	CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	CLASSIFICATION PHENOLOGIQUE*		ESPECES DES CULTURES
			Sensibilité photopériodique	Croissance	
Période de croissance : 75-90 jours	Mécanisme de la photosynthèse	50-90	Diurne neutre	Déterminée	Echinochloa frumentacea (millet de basse-cour japonais)
Température diurne moyenne : 30,8 - 31,0°C	C-4 Réponse de la photosynthèse à la température : Température optimale : 30-35°C	70-90	Diurne neutre	Déterminée	Setaria italica (millet vulpin)
Rayonnement moyen de la saison : 467-471 cal cm^{-2} $jour^{-1}$	Plage utile : 15-45°C	70-90	Diurne neutre	Déterminée	Eleusine coracana (millet "finger")
Durées diurnes moyennes : 761-775 mn	Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 1,0-1,4 cal cm^{-2} mn^{-1}	70-90		Déterminée	Panicum miliacum (millet commun)
Intensité moyenne du rayonnement : 0,60-0,62 cal cm^{-2} mn^{-1}	Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 70-100 mg dm^{-2} h^{-1}	70-90	Diurne neutre	Déterminée	Pennisetum typhoides (millet perlé) (Gero)
Précipitation annuelle moyenne : 450-550mm		90	Diurne neutre	Déterminée	Digitaria exilis (riz maigre)
	Taux de croissance maximal des cultures : 30-60 g m^{-2} $jour^{-1}$	90	Diurne neutre	Déterminée	Sorghum bicolor (sorgho)
		80-90	Diurne neutre	Déterminée	Maïs zea pour cultivars précoces
	Rendement de l'utilisation de l'eau : 150-300 g/g	50-90	Diurne neutre	Déterminée ou Indéterminée	Fourrages et légumes annuels récoltés principalement au stade de la (à suivre)

Tableau 2-2 (suite) BIOCLIMAT DU SAHEL MERIDIONAL ET ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES BIOCLIMATIQUES DU SAHEL MERIDIONNAL	INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES				
	CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	CLASSIFICATION PHENOLOGIQUE		ESPECES DES CULTURES
			Sensibilité photopériodique	Croissance	
					(suite) végétation: par exemple, épinards africains "amaranthus"
	Mécanisme de la photosynthèse C-3 adapté à un climat à haute température Réponse de la photosynthèse à la température : Température optimale : 25-30°C Plage utile : 10-35°C Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 0,3-0,8 cal cm^{-2} mn^{-1} Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse: 40-50 mg $dm^{-2}h^{-1}$/Taux de croissance maximal des cultures : 30-40 g $m^{-2}jour^{-1}$ Rendement de l'utilisation de l'eau: 300-700 g/g	90	Diurne neutre	Indéterminée	Arachis hypogaea (arachide précoce)
		90	Diurne neutre	Déterminée	Vigna uniquiculata (pois chiches précoces)
		90	Diurne neutre	Déterminée	Glycine max (soja précoce)
		90	Diurne neutre	Déterminée	Phaseolus vulgaris (haricot vert précoce)
		jusqu'à	Diurne neutre ou courte	Déterminée ou Indéterminée	Fourrages et légumes annuels récoltés au stade de la végétation
			*Toutes les espèces ci-dessus sont des espèces annuelles.		

Tableau 2-3

SOUDAN : BIOCLIMAT ET ADAPTABILITE

CARACTERISTIQUES BIOCLIMATIQUES

Période de croissance :	Température diurne moyenne :	Rayonnement moyen de la saison :	Longueur moyenne du jour :	Valeur moyenne du rayonnement :	Précipitations annuelles moyennes :
90-165 jours	29,6-30,8°C	445-467 cal cm^{-2} $jour^{-1}$	756-760 mn	0,59-0,61 cal cm^{-2} mn^{-1}	530-1000 mm

INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	CLASSIFICATION PHENOLOGIQUE			ESPECES DES CULTURES	REMARQUES
		Sensibilité photopériodique	Croissance	Longévité		
Mécanisme de la photosynthèse	50-90	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Echinochloa frumentacea (millet de basse-cour japonais)	
C-4 Réponse en température de la photosynthèse : Température optimale : 30-35°C	70-90	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Setaria italica (millet vulpin)	
Plage utile : 15-45°C	70-90	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Eleusine coracana (millet "Finger"	
	70-100	?	Déterminée	Annuelle	Panicum miliacum (millet commun)	
Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 1,0-1,4 cal cm^{-2} mn^{-1}	75-100	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Pennisetum americana (millet perlé)	Ne peut tolérer un sol détrempé. En raison du tallage important, on peut avoir plus d'une récolte.
	120-165	Diurne courte	-		cultivars saison courte (Gero)	
					cultivars saison longue (Maiwa)	
Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 70-100 mg dm^{-2} h^{-1}	90-130	?	Déterminée	Annuelle	Digitaria elixis (riz maigre)	
	90-110	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Sorghum bicolor (Sorgho)	Pour que le grain soit de bonne qualité, la floraison doit coïncider avec la fin des pluies.
	120-130	Diurne neutre/ courte			cultivars saison courte	
Taux de croissance maximal des cultures : 30-60 g m^{-2} $jour^{-1}$					cultivars saison moyenne	
	140-165	Diurne courte			cultivars saison longue	
Rendement de l'utilisation de l'eau : 150-300 g/g	80-100	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Zea mays (maïs), cultivars saison courte/moyenne	Les rendements expérimentaux du maïs sont 2 à 3 fois plus importants que les rendements moyens des cultures améliorées de sorgho ou de millet. Une bonne fertilité du sol est cependant essentielle.
	110-130	Diurne neutre				
	90-165	Diurne neutre/ courte	Déterminée/ Indéterminée	Annuelle	Fourrages et légumes annuels récoltés au stade végétatif	
	90-110	Diurne neutre	Indéterminée	Annuelle	Arachis hypogaea (arachide)	Pour que les graines soient de bonne qualité, la récolte doit coïncider avec la fin des pluies. Le traitement contre la cercosporiose augmente beaucoup les rendements. Tolère bien le climat chaud et relativement sec de la savane du Soudan.
	90-120	Diurne neutre				
	140-165	Diurne courte	Déterminée	Annuelle	Vigna sinensis (pois chiche) cultivars saison courte/longue	

Tableau 2-3 (suite)

	90-130	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Glycine max (soja)	
	140-165	Diurne courte	-		cultivars saison courte/longue	
	90-140	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Phaseolus vulgaris (haricot vert)	Au Nigeria, on a obtenu des rendements supérieurs
	160-165	Diurne courte/f.	Indéterminée		cultivars buissons/ramés	à 3 tonnes/ha.
	100-130	Diurne courte/f.	Déterminée	Annuelle	Nicotiana tabacum (tabac)	
	100-120	Diurne courte/f.	Déterminée	Annuelle	Helianthus annus (tournesol)	
	130-160	Variable			cultivar rameux/saison longue	
					cultivar non-rameux/cultivar précoce	
	100-130	Diurne courte/	Indéterminée	Amuelle	Sesamum indicum (sésame) cultivar	
		longue			non-rameux/précoce/rameux/saison	
	140-165				longue	
	110-130	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Lycopersicum esculentum (tomate)	
	120-140		Déterminée/ Indéterminée		cultivar de tomates vertical cultivar feuille de pomme de terre	
Mécanisme de la photosynthèse C-3 adapté à un environnement à haute température : Réponse en température de la photosynthèse : température optimale : 25-30°C	110-130	?	Déterminée	Annuelle	Carthamus tinctorius (safran bâtard)	
					cultivars précoces/saison longue	
	140-165				Oryza sativa (riz)	
	110-130	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	cultivar précoce	
	140-165	Diurne courte			cultivar saison longue	
Plage utile : 10-35°C	110-130	Diurne courte/l.	Indéterminée	Annuelle	Lablab purpureus (haricot "Hyacinth")	
Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 0,3-0,8 cal cm^{-2} mn^{-1}	140-165				cultivar précoce	
					cultivar saison longue	
	120-150	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Hibiscus sabdarifa (roselle)	
Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 40-50 mg dm^{-2} h^{-1}	120-150	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Hibiscus cannabinus (kenaf)	
	130-140	Diurne courte/f.	Indéterminée	Annuelle	Gossypium hirsutum (coton)	
Taux de croissance maximal des cultures : 30-40 g m^{-2} $jour^{-1}$	160 utilisable marginalement				cultivar coton feuille ocre	
					cultivar coton feuille normale	
Rendement de l'utilisation de l'eau : 300 - 700 g/g	130-160	?	Indéterminée	Annuelle	Ricinus communis (ricin)	
					cultivar précoce	
	90-165	Diurne neutre/ courte	Déterminée/ Indéterminée	Annuelle	Fourrages et légumes annuels récoltés au stade végétatif.	

Tableau 2-4

BIOCLIMAT DE LA GUINEE SEPTENTRIONALE ET ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES BIOCLIMATIQUES	INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES					
	CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	Sensibilité photopériodique	Croissance	Longévité	ESPECES DES CULTURES
	Mécanisme de la photosynthèse C-4					Espèces et cultivars énumérés pour le bioclimat du Soudan ayant une saison de croissance supérieure à 110 jours, et plus particulièrement :
	Réponse de la photosynthèse :					
	Température optimale : 30-35°C	70-100	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Pennisetum americana (millet perlé) cultivars saison courte (Gero)
	Plage utile : 15-45°C	120-210	Diurne courte			cultivars saison longue (Maiwa)
	Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 1,0-1,4 cal cm^{-2} mn^{-1}	90-110	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Sorghum bicolor (sorgho) cultivars saison courte
		120-130	Diurne neutre/courte			cultivars saison moyenne cultivars saison longue
	Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 70-100 mg dm^{-2} h^{-1}	140-210	Diurne courte			
		110-130	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Zea mays (maïs)
Période de croissance : 165 - 210 jours						Note : La grande reproductibilité des pluies et la durée très favorable de la saison de croissance ainsi que les régimes thermiques donnent un potentiel biomassique très élevé pour la production de grains dans cette région.
Température diurne moyenne : 29,0 - 29,6°C						
Rayonnement moyen de la saison : 431 - 444 cal cm^{-2} $jour^{-1}$						Espèces et cultivars énumérés pour le bioclimat du Soudan ayant une saison de croissance supérieure à 110 jours mais inférieure à 210 jours.

Tableau 2-4 (suite)

BIOCLIMAT DE LA GUINEE SEPTENTRIONALE ET ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES BIOCLIMATIQUES	INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES					
	CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	Sensibilité photopériodique	Croissance	Longévité	ESPECES DES CULTURES
	Mécanisme de la photosynthèse C-3 adapté à un climat à haute température	105-135	Diurne neutre	Indéterminée	Annuelle	Arachis hypogaea (arachide)
		90-120	Diurne neutre	Déterminée		Vigna unquiculata (pois chiches)
		140-180	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	cultivar précoce
	Réponse de la photosynthèse à la température :	90-130	Diurne neutre	Déterminée		cultivar tardif
		140-180	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Glycine max (soja) cultivars précoces/tardifs
	Température optimale :	100-120	Diurne neutre	Déterminée		
	25-30°C Plage utile :	130-160	Diurne courte	Déterminée	Annuelle	Helianthus annuus (tournesol) cultivar précoce/tardif
	10-35°C	140-180	Diurne courte/longue	Indéterminée	Annuelle	Sesamum indicum (sésame)
	Valeur du rayonnement pour	140-180		Déterminée	Annuelle	Cartamus tinctorius (safran bâtard)
	une photosynthèse maximale : 0.3-0,8 cal cm^{-2} mn^{-1}	140-180	Diurne neutre	Déterminée	Annuelle	Oryza sativa (riz)
		140-210	Diurne courte/longue	Indéterminée	Annuelle	Lab-Lab pupureus (haricot "hyacinth")
				Indéterminée	Annuelle	Hibiscus sabdarifa (roselle)
	Taux maximal d'échange de	120-150	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Hibiscus cannabinus (kenaf)
	CO_2 à saturation lumineuse	120-150	Diurne courte/neutr.	Indéterminée	Annuelle	Gossypium hirsutum (coton)
	40-50 mg dm^{-2} h^{-1}	160-180				Ricinus communis (ricin)
	Taux de croissance maximal	170-210	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Ipomoea batatas (patates douces)
	des cultures : 30-40 g m^{-2}	150-210	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Manihot esculenta (manioc)
Durées diurnes moyennes :	jour^{-1}	180-210	Diurne courte/neutr.	-	-	Fourrages et légumes annuels et vivaces
742 - 760 minutes	Rendement de l'utilisation	jusqu'à				récoltés au stade végétatif.
Intensité moyenne du rayonnement : 0,57 - 0,60 cal cm^{-2} mn^{-1}	de l'eau : 300-700 g/g	210				
Précipitation annuelle moyenne : 1000 - 1250 mm						

Tableau 2-5 BIOCLIMAT DE LA GUINEE MERIDIONALE ET ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES BIOCLIMATIQUES :	Période de croissance : 210-270 jours	Température diurne moyenne : 28,0-29,0°C	Rayonnement moyen de la saison : 414-431 cal cm^{-2} $jour^{-1}$
	Durées diurnes moyennes : 738-742 mn	Précipitation annuelle moyenne : 1250 - 1400/1600 mm	Intensité moyenne du rayonnement : 0.56-0.58 cal cm^{-2} mn^{-1}

INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	CLASSIFICATION PHENOLOGIQUE			
		Sensibilité photopériodique	Croissance	Longévité	ESPECES DES CULTURES
Mécanisme de la photosynthèse					
C-4 : Réponse de la photosynthèse à la température : Température optimale : 30-35°C	270	Diurne courte/ neutre	Déterminée	Annuelle/ Bisannuelle	Saccarum officinarum (canne à sucre)
	210-240	Diurne courte	Déterminée	Annuelle	Sorghum bicolor (sorgho)
Plage utile : 15-45°C	210-240	Diurne courte	Déterminée	Annuelle	Pennicetum americana (millet perlé)
Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 1,0-1,4 cal cm^{-2} mn^{-1}					Espèces et cultivars énumérés pour le bioclimat du Soudan et ayant une croissance convenant à la distribution des pluies à deux maximums (voir 2)
Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 70-100 mg dm^{-2} h^{-1}					
Taux de croissance maximal des cultures : 30-60 g m^{-2} $jour^{-1}$					Par alternances, en raison de la saison de croissance prolongée, on atteint les productions les plus élevées en termes de biomasse grâce à des cultures qui sont récoltées au stade végétatif.
Rendement de l'utilisation 150-300 g/g					

Tableau 2-5 (suite) BIOCLIMAT DE LA GUINEE MERIDIONALE ET ADAPTABILITE DES CULTURES

INVENTAIRE DE L'ADAPTABILITE DES CULTURES

CARACTERISTIQUES DE PHOTOSYNTHESE	JOURS DE MATURATION	CLASSIFICATION PHENOLOGIQUE			ESPECES DES CULTURES
		Sensibilité photopériodique	Croissance	Longévité	
Mécanisme de la photosynthèse C-3 adapté à un climat à haute température	210-270	Diurne courte	Indéterminée	Annuelle	Manihot esculenta (manioc)
Réponse de la photosynthèse à la température : Température optimale : 25-30°C Plage utile : 10-35°C Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 0,3 - 0,8 cal cm^{-2} mn^{-1} Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 40-50 mg dm^{-2} h^{-1} Taux de croissance maximal des cultures : 30-40 g m^{-2} $jour^{-1}$ Rendement de l'utilisation de l'eau : 300-700 g/g	210-270	Variable	Indéterminée	Annuelle	Dioscorea alata (igname)
	minimum-240		Indéterminée	Vivace	Citrus Sinensis (orange douce)
	minimum-240		Indéterminée	Vivace	Citrus limon (citron)
Mécanisme de la photosynthèse C.A.M. Réponse de la photosynthèse à la température: Température optimale : 25-35°C Plage utile : 10-45°C Valeur du rayonnement pour une photosynthèse maximale : 0,6-1,4 cal cm^{-2} mn^{-1} Taux maximal d'échange de CO_2 à saturation lumineuse : 20-50 mg dm^{-2} h^{-1} Taux de croissance maximal des cultures : 20-30 g m^{-2} $jour^{-1}$ Rendement de l'utilisation de l'eau : 50-200 g/g	270		Déterminée	Bisannuelle	Agave sisalana (sisal)

Espèces et cultivars énumérés pour le bioclimat de savane de la Guinée septentrionale et convenant à la durée de la période de croissance correspondant à la distribution des pluies à deux maximums (voir 2)

de l'Ouest Africain, comporte plusieurs implications importantes.

En premier lieu, il r utile, pour les questions de prévision, de présenter, en valeur relative, les ressources climatiques, les diverses formes de contraintes et la productivité potentielle prévue.

En deuxième lieu, le choix des cultures, leur adaptabilité à des assolements donnés ou leur introduction dans des systèmes agricoles peuvent être traités de manière plus rationnelle et plus commode si on se réfère aux conditions d'environnement correspondant à un bioclimat spécifique.

Kowal et Kassam (1977) ont montré que les zones de végétation peuvent permettre la description d'un certain nombre de régions bioclimatiques. Dans leur rapport, les régions bioclimatiques de savane de l'Ouest Africain sont identifiées et décrites à l'aide de cartes de végétation et de la durée de la période de croissance.

Nous résumons, dans le tableau 2-6, les caractéristiques climatiques des diverses régions bioclimatiques. La carte 2-4 donne l'implantation géographique de ces régions. Chacune d'elles est décrite en détail ci-dessous.

2.3.3.1 Bioclimat du Sahel

On ne peut mieux définir ce climat que comme une transition entre le désert et la savane. La frontière sud de cette région est difficile à définir avec précision car elle change en fonction des cycles météorologiques et est affectée par les années pouvant être plus sèches ou plus humides que la moyenne. Cependant, selon la plupart des cartes de végétation, la frontière sud du Sahel correspond approximativement à la ligne d'égale période de

TABLEAU 2-6

CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DES REGIONS BIOCLIMATIQUES

Région bioclimatique	(jours)	Précipitation annuelle (mm)	Rayonnement (cal cm^{-2} $jour^{-1}$)	TEMPERATURE MOYENNE DE LA SAISON (°C)					Production potentielle de matière sèche	CARACTERISTIQUES DE LA VEGETATION	
				Diurne	Moyenne	Nocturne	Valeur maximale	Valeur minimale		Pâturages	Arbres
Sirl septentional	0-75	0-450	470-500	31,0-32,2	28,4-29,3	25,9-27,0	33,6-34,9	23,2-24,2	A calculer	Aristidia	Acacia et arbustes
Sirl méridional	75-90	450-550	467-470	30,8-31,0	28,2-28,4	25,7-25,9	33,3-33,6	23,0-23,2		Cenchrus	Acacia dominant
Soudan	90-165	550-1000	445-467	29,6-30,8	27,1-28,8	24,7-25,7	32,1-33,4	22,0-23,0	A calculer	Andropogon	Baobab et arbre à beurre les plus caractéristiques
Guinée septentrionale	165-210	1000-1250	431-444	29,0-29,6	26,4-27,9	24,0-24,7	31,4-32,1	19,8-21,5	A calculer	Andropogon dominant	Isoberlinia spp. la plus caractéristique
Guinée méridionale	210-270	1250-1400/1500	414-431	28,0-29,0	25,6-26,4	23,2-24,0	30,4-31,4	20,7-21,5	A calculer	Hyparrhenia spp. et Imperata cylindrica	Isoberlinia - Brachystegia Bois

croissance de 90 jours ou à l'isohyète 550 mm de précipitations annuelles.

Du point de vue de l'agriculture, le bioclimat du Sahel peut commodément être divisé en deux sous-régions distinctes : le Sahel septentrional et le Sahel méridional.

Le Sahel septentrional comprend des régions à la limite du désert où les précipitations et la saison de croissance sont insuffisantes en importance et en durée pour la production de récoltes. L'agriculture pastorale (nomade) est la principale forme d'utilisation de la terre. Cependant, le couvert végétal est très épars, la croissance des plantes est saisonnière et la terre ne peut donc faire vivre qu'un nombre limité de bestiaux. C'est pourquoi cette région doit être considérée comme présentant un intérêt agricole marginal.

Le Sahel méridional comprend des régions bordant la savane boisée et où l'agriculture sédentaire est la principale source d'activité. La frontière séparant les régions d'agriculture sédentaire et d'agriculture pastorale est basée sur les caractéristiques climatiques nécessaires à la production du millet, c'est-à-dire une longueur minimale de la période de croissance de 75 jours, correspondant approximativement à l'isohyète de précipitation de 450 mm.

Des précipitations faibles et irrégulières limitent le nombre et la diversité des cultures ainsi que leur rendement. Le risque de cultures perdues est élevé en raison de la fréquence des sécheresses. Le millet et le sorgho constituent les principales spéculations de la région. Dans certaines parties de cette dernière, les arachides et le coton sont cultivés pour être vendus, mais avec un risque élevé d'échec.

2.3.3.2 Le bioclimat du Soudan

Cette région s'etend au sud du Sahel, entre les isohyètes 550/600 et 1000 mm de précipitations annuelles. L'importance des pluies, leur meilleure fiabilité et la durée de la période de croissance (allant de 90 à 165 jours) permettent de faire pousser une grande diversité de cultures. Les risques de sécheresse sont relativement faibles. La plus grande partie de la région fait l'objet d'une agriculture plutôt intensive, en particulier au Nigeria où l'on pratique la culture continue de la terre. La fertilité du sol est faible. Les rendements peuvent être améliorés par des semis en temps utiles et précoces, l'utilisation d'engrais et le choix de cultivars adaptés dont le cycle de vie correspond à la durée plutôt courte de la période des pluies.

La végétation naturelle consiste dans ce pays en vastes herbages et des arbres à feuilles caduques dispersés comprenant un mélange d'espèces à grandes feuilles et à petites feuilles. Dans les parties plus sèches du Soudan, le baobab et le tamarinier sont les plus caractéristiques tandis que l'arbre à beurre domine les parties plus humides de la région.

Les caractéristiques climatiques du pays conviennent à la production de récoltes à saison courte (grains et légumes). La principale association de culture de la région est millet-sorgho-arachides-pois chiches.

2.3.3.3 Le bioclimat de la Guinée septentrionale

C'est la région la plus intéressante sur le plan agricole car elle dispose du potentiel de photosynthèse le plus élevé pour une seule récolte par saison. Les précipitations y sont reproductibles, avec une distribution à un seul mode, dans la plage des isohyètes 1000-1250 mm, et elle ne présente pratiquement pas de risque de sécheresse. L'eau est largement en

excès et les sols sont donc fortement lixiviés. La durée moyenne de la saison de croissance est comprise entre 165 et 210 jours, ce qui permet un large choix de récoltes et une production agricole intensive.

Il semble que les régimes de rayonnement de température de la région sont en faveur de récoltes type C_4 et également de récoltes type C_3 adaptées aux températures élevées. Elle convient particulièrement pour la production de maïs, de sorgho, de soja, d'arachides, de pois chiches et de coton. La région convient également à l'exploitation des forêts comportant des espèces telles que l'eucalyptus et le pinus spp. Il n'y a actuellement pas d'élevage de troupeaux dans cette région en raison de la présence de mouches tsé-tsé. Elle peut cependant présenter un potentiel élevé pour l'élevage· il faudrait pour cela y associer une production intensive de grain et de fourrage ensilé ainsi que le contrôle des maladies des animaux.

2.3.3.4 Le bioclimat de la Guinée méridionale

Contrairement aux autres régions bioclimatiques qui sont caractérisées par une distribution des précipitations à un seul mode, la Guinée méridionale est une région de transition présentant une distribution bimodale marquée, ce qui donne deux saisons sèches et deux saisons humides par an.

Les deux maximums de précipitations de juin et septembre sont séparés, au mois d'août, par une période relativement sèche que l'on appelle souvent la "petite saison sèche". Bien que la petite saison sèche de la Guinée méridionale ne soit pas très longue, elle sépare la saison des pluies en deux saisons de croissance de durées inégale. Ce phénomène est plus prononcé dans les parties sud de la région où il affecte le schéma des cultures labourables. Ni l'importance des précipitations, ni la durée des deux saisons des pluies ne peuvent mises aisément en corrélation avec les besoins en eau des cultures. Etant donné que le rayonnement est plus faible et que les températures nocturnes sont plus élevées, le potentiel journalier de photosynthèse est inférieur à celui de la savane de

la Guinée septentrionale. D'autre part, étant donné que la période totale de croissance est prolongée et que la principale saison sèche est moins sévère, les parasites et les maladies posent des problèmes plus sérieux aux cultures.

La région présente une grande diversité d'activités agricoles. Le régime des températures convient à la production de récoltes du type C_4, que ce soit des récoltes à saison courte telles que le maïs ou des récoltes à saison longue telles que la canne à sucre. En outre, un certain nombre de récoltes C_3 ayant des exigences de température élevée trouvent dans ce pays des conditions optimales ou presque optimales. Parmi ces cultures, il y a des tubéreuses telles que l'igname et le manioc ainsi que des céréales telles que le riz, le soja, le sésame et d'autres, pouvant s'adapter à la distribution bimodale des précipitations. Les plantes à fibres comprennent le coton, le kenaf, le jute et la roselle.

En raison de la saison de croissance prolongée et de la possibilité climatique de produire des récoltes à haut rendement, la région pourrait très bien convenir à l'élevage si les parasites et les maladies étaient correctement maîtrisés.

L'afforestation, en particulier dans les régions moins accessibles ou à sol plus pauvre, présente, moyennant une gestion correcte des plantations, des possibilités de développement économique.

2.3.4 Production biomassique nette et rendement des récoltes

La FAO a récemment mis au point une méthode d'estimation de la biomasse nette et du rendement des récoltes ainsi que de détermination des performances potentielles des cultures tels qu'ils dépendent des paramètres climatiques et de leurs caractéristiques d'adaptabilité. Cette méthode a été utilisée par Kowal et al., en 1977, pour déterminer les performances relatives de cultures en divers endroits d'Afrique. Certains des résultats de cette étude donnent la production biomassique nette et le rendement des

récoltes prévus dans diverses régions bioclimatiques de la savane. Ces résultats sont donnés dans les tableaux 2-7 et 2-8.

On doit souligner le fait que les résultats de l'étude ne représentent pas une limite supérieure théorique du rendement des cultures mais des possibilités de rendement réelles lorsque les contraintes non-climatiques (édaphiques et biologiques) sont minimales. Ces conditions prévalent souvent dans les stations de recherches expérimentales où des rendements de cultures mesurés à partir d'expériences de rendements maximaux spécialement étudiées sont souvent dans la place de valeur prévue par le modèle.

Si on se reporte au tableau 2-7, on notera que la production biomassique de récoltes non-légumineuses est beaucoup plus importante, dans des conditions climatiques semblables, que celle des légumineuses. Il apparaît qu'il est plus coûteux en termes de consommation d'énergie de produire des récoltes riches en protéines (légumes) que des récoltes riches en féculents (non-légumes).

Les cultures ayant un mécanisme d'assimilation C-4 présentent, du point de vue de la production biomassique, une capacité plus élevée dans les conditions climatiques de l'Ouest Africain que les cultures ayant un mécanisme d'assimilation C-3 adapté à un environnement à température élevée. La différence est d'environ 25 pour cent.

D'autre part, les résultats montrent des différences marquées en production biomassique entre les diverses régions bioclimatiques. Les différences les plus frappantes, en particulier dans les taux de production biomassique, sont entre la savane et les bioclimats de forêts. Les bioclimats de la savane présentent des taux plus élevés de production biomassique tant pour les légumineuses que pour les non-légumineuses. Ainsi, par

Tableau 2-7

PRODUCTION BIOMASSIQUE NETTE TOTALE PENDANT LA SAISON DE CROISSANCE ET TAUX MOYEN DE PRODUCTION BIOMASSIQUE NETTE PAR JOUR POUR CINQ EMPLACEMENTS DE L'OUEST AFRICAIN

Emplacement	Groupe de cultures	Biomasse nette tonne/ha/saison		Biomasse nette kg/ha/jour	
		Légume	Non-légume	Légume	Non-légume
Kano (Bioclimat du Soudan)	A	12,9	17,8	93,5	129.0
	B	-	24,4	-	175.4
Samaru (Bioclimat de la Guinée septentrionale)	A	15,7	22,5	84,0	120,3
	B	-	29,6	-	158,3
Minna (Bioclimat de la Guinée méridionale)	A	15.8	23,8	73,0	110.7
	B	-	33,3	-	154.9
Ibadan (Bioclimat de la forêt humide tropicale)	A	16,4	27,5	59,4	99.6
	B	-	35,6	-	129,0
Port-Harcourt (Bioclimat de la forêt avec pluie tropicale)	A	15,7	26,1	47,4	78,9
	B	-	34,6	-	104,5

Groupes de cultures :

A : Cultures à mécanisme d'assimilation C-3 adapté à une température élevée

B : Cultures à mécanisme d'assimilation C-4 adapté à une température élevée

Tableau 2-8

PRODUCTION BIOMASSIQUE NETTE TOTALE ET RENDEMENT DE CULTURES CHOISIES

Emplacement	Production biomassique nette totale (tonne/ha)				Rendement (tonne/ha)			
	P	M	Ca	Ca'	P	M	Ca	Ca'
Kano (bioclimat du Soudan)	10,8	22,0	17,8	42,7	4,3	9,9	-	24,5
Samaru (bioclimat de la Guinée septentrionale)	10,9	21,0	22,5	37,2	4,4	10,5	12,4	20,5
Minna (bioclimat de la Guinée méridionale)	10,3	20,0	23,8	33,6	4,1	9,1	13,1	18,5
Ibadan (bioclimat de la forêt humide tropicale)	9,7	19,5	27,5	31,2	3,9	7,8	15,1	17,1
Port-Harcourt (bioclimat de la forêt avec pluie tropicale)	8,7	17,1	26,1	29,3	3,4	6,8	14,4	16,1

P : Haricot phaseolus 100 jours

M : Maïs 120 jours

Ca : Manioc utilisant toute la saison de croissance

Ca' : Manioc utilisant toute l'année avec irrigation

exemple, le taux de production biomassique d'un légume à Kano est de 93,5 kg ha^{-1} $jour^{-1}$ tandis qu'à Port-Harcourt il est de 47,4 kg ha^{-1} $jour^{-1}$. Les différences dans les taux de production biomassique des différents bioclimats de savane sont moins marquées mais probablement significatives. Elles reflètent la distribution du rayonnement et des températures diurnes dans les régions bioclimatiques de savane.

La production biomassique nette totale est influencée par deux paramètres, le taux moyen de production biomassique nette et le nombre de jours de la saison de croissance. Selon que la période de croissance est bien utilisée ou non, la présence de ces deux paramètres modifie la tendance qui n'est pas donnée avec précision dans le tableau 2-7. Les valeurs déduites supposent une utilisation totale de la période de croissance, ce qui est difficile à faire pratiquement. Néanmoins, les valeurs de production biomassique totale du tableau 2-7 peuvent refléter avec précision la production potentielle de cultures récoltées au stade végétatif. L'obtention de bonnes récoltes nécessite cependant une interprétation soigneuse de ces valeurs.

Si on se reporte au tableau 2-8, on y voit un schéma type de production biomassique nette et le rendement de quelques cultures spécifiques en fonction des régions bioclimatiques. On peut ainsi attendre du haricot phaseolus de 100 jours cultivé à Kano et Samaru un rendement de 4,3 à 4,4 tonnes ha^{-1}, tandis que la même culture à Ibadan et Port-Harcourt ne donnerait que 3,4 à 3,9 tonnes ha^{-1}, soit une différence d'environ 23 pour cent. De même, les chiffres respectifs pour du maïs de 120 jours sont de 9,9 à 10,5 tonnes ha^{-1} et de 6,8 à 7,8 tonnes ha^{-1}, soit une différence d'environ 40 pour cent.

Si on utilise toute la saison de croissance, le rendement du manioc varie de 12,4 tonnes ha^{-1} à Samaru à 14,4 - 15,1 tonnes ha^{-1} à

Ibadan et Port-Harcourt, soit une différence d'environ 33 pour cent. Cependant, la différence est d'environ 63 pour cent entre les durées de la saison de croissance à Samaru et Ibadan/Port-Harcourt. S'il était possible d'utiliser toute l'année en irriguant, les rendements en manioc pourraient être de 21 à 24 tonnes ha^{-1} à Kano/Samaru tandis qu'ils seraient de 16 à 17 tonnes ha^{-1} à Ibadan/Port-Harcourt. Ce qui précède démontre combien les bioclimats de la savane sont supérieurs aux bioclimats de la forêt pour la production intensive d'aliments (en particulier pour la production des grains) et justifie une analyse plus détaillée des régions bioclimatiques de la savane.

CHAPITRE 3

BILAN HYDRIQUE

3.1 INTRODUCTION

Dans les pays de savane les facteurs "pluviométrie décadaire et sol" sont déterminants en matière de développement de la végétation.

La faiblesse de la profondeur possible d'enracinement des plantes liée à l'irrégularité des pluies entraîne très souvent des arrêts de végétation.

Un système ou modèle empirique simulant les relations sol-eau a été conçu pour étudier ces relations.

La tranche de sol correspondant à l'enracinement a été fixée à 1 mètre en moyenne, ce qui correspond aux sols de bonne aptitude culturale. Le modèle présenté dans ce chapitre a trois avantages particuliers.

a) Rédigé pour les stations de la zone de savane, (voir Tableau 3.1) il apporte une série d'informations chronologiques susceptibles d'améliorer la connaissance des relations entre la production végétale et les facteurs climatiques.

b) Les résultats étant traités statistiquement, le modèle constitue un outil de référence permettant de comparer zone par zone les valeurs estimées des variables et ce, à un niveau de probabilité donné. (cf. Listes des résultats en annexe 3-1 à 3-11, Volume 3.)

Tableau 3-1. Liste des stations pluviométriques utilisées

Bénin

Bohicon
Kandi
Natitingou
Parakou
Savé

Cameroun

Garoua
Mamfé
Maroua
Ngaoundéré
Yoko

Côte-d'Ivoire

Bouaké
Bondoukou
Bouna
Boundiali
Ferkessédougou
Man
Odienné

Empire centrafricain

Bambari
Birao
Bossangoa
N'Délé

Haute-Volta

Bobo-Dioulasso
Boromo
Dédougou
Djibo
Dori
Fada N'Gourma
Gaoua
Kaya
Ouagadougou
Ouahigouya
Po

Mali

Bafoulabé
Bamako
Banamba
Bougouni
Diéma
Douentza
Gao
Hombori
Kayes
Kéniéba
Kita
Koutiala
Ménaka
Mopti
Nara
Niafounké
Niono

Tableau 3-1. (suite)

Mali

Nioro du Sahel
San
Ségou
Sikasso
Sokolo
Tombouctou

Mauritanie

Aïoun-El-Atrouss
Boutilimit
Kiffa
Néma
Nouakchott

Niger

Birni-Nkonni
Dogondoutchi
Filingué
Gaya
Gouré
Maïné Soroa
Maradi
Nguigmi
Niamey
Tahoua
Tanout
Tillabéri
Zinder

Sénégal

Bakel
Dakar
Kaolack
Kédougou
Kolda
Koungheul
Linguère
Matam
Podor
Saint-Louis
Tambacounda
Ziguinchor

Tchad

Abéché
Am Timan
Ati
Baibokoum
Bol
Bousso
Moissala
Moundou
N'Djamena
Pala
Sarh

Togo

Anie Mano
Atakpamé
Sansanné-Mango
Sokodé

c) Pour celui qui désire réaliser un aménagement hydroagricole, le modèle peut être modifié en réglant les paramètres de telle sorte qu'ils correspondent aux mesures effectuées sur le terrain. Ainsi, le modèle permet de faire des simulations dont les résultats serviront sur le plan technique, gestionnel et économique.

Ce modèle, mis au point par l'ORSTOM en collaboration avec le CIEH*, a été appliqué à cent stations de la zone d'étude (Franquin et Forest, 1977). Les résultats originaux, ainsi que le listing du programme, peuvent être obtenus auprès de ces organismes. Le modèle est identifié comme ORBVCR (ORSTOM BILAN HYDRIQUE D'UN COUVERT VEGETAL [CROP] EN CONDITIONS VARIABLES DE RESERVE D'HUMIDITE UTILISABLE). Les résultats statistiques sont présentés dans les annexes 3-1 à 3-11.

3.2 PROGRAMME POUR L'EVALUATION ET L'ANALYSE FREQUENTIELLE DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE : SYSTEME ORBVCR

Le système ORBVCR ne peut prétendre rendre compte du bilan hydrologique du bassin versant qui est un complexe de pentes, de sols, de sous-sols, de groupements végétaux et de modes d'utilisation par l'homme et les animaux.

Elaboré pour les besoins de l'agriculture, ce système établit le bilan hydrique de la parcelle cultivée, caractérisée par un sol et par la culture qui l'occupe durant une période définie du cycle annuel. Le bilan hydrique s'écrit :

$$P + (I) \mp R - D \mp \Delta H - ETR = 0$$

P : lame pluviale; (I) : irrigation éventuelle; R : ruissellement; D : drainage; ΔH : variation d'humidité du sol; ETR : évapotranspiration réelle.

---

*Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

Le système évalue les termes de ce bilan pour les intervalles succesifs de temps de 5, 7 ou 10 jours. C'est dire qu'il ne simule pas les phénomènes physiques réels des relations sol/plante/atmosphère, dont certains ont des constantes de temps inférieures même à 24 heures. Empirique, donc en principe peu flexible, il peut néanmoins être adapté par le jeu de coefficient de réglage à des conditions spécifiques de sol et de végétation, observées ou théoriques. Le réglage se fera sur les variations ΔH mesurées de l'humidité du sol dans les intervalles de temps considérés.

Dans le cas présent, qui regroupe les conditions diverses de 100 stations, tout réglage était exclu, faute d'observations et en raison de la nécessité de se placer sous des conditions moyennes.

Par ailleurs, le système a été conçu en considération non de ce qu'est encore généralement aujourd'hui l'agriculture africaine - ce qui n'aurait pas eu de sens - mais en fonction de ce qu'elle devrait devenir pour dépasser son rôle d'agriculture de subsistance et constituer le moteur du développement. Sols travaillés, plantations en temps opportun, à densité convenable, entretien des cultures et, surtout, conservations de l'eau et du sol sont alors de rigueur. En particulier, tous les moyens (techniques anti-érosives, enfouissement des résidus de récolte, travaux superficiels contre la croûte de battance...) doivent tendre à éviter le ruissellement (R), afin de constituer un volant d'humidité, en début de saison principalement, quand les pluies (P) sont le plus aléatoires.

Enfin, bien que l'application du système concerne ici l'agriculture pluviale (culture sèche) qui représente actuellement, et pour assez longtemps encore, l'essentiel de l'agriculture africaine, ORBVCR peut trouver emploi en irrigation complémentaire aux pluies de culture annuelles. Pour l'irrigation de cultures permanentes (canne à sucre, par exemple), un autre système, ORBKCR, qui opère à RU constante, serait mieux indiqué.

On verra en effet que ORBVCR opère à RU croissante, comme il se doit pour des cultures annuelles.

3.2.1 Caractéristiques du Système

3.2.1.1 Réserve utilisable (RU) croissante

Les modèles de bilan opèrent généralement à RU constante, définie pour une profondeur d'exploitation racinaire z dm d'un sol de capacité au champ H_c % (du poids de terre sèche), de point de flétrissement permanent H_f % et de densité apparente d_a :

$$RU\ mm = (H_c - H_f)d_a . z$$

En régions humides, cette tranche de sol z ne se dessèche jamais - si ce n'est pour l'horizon superficiel - jusqu'au point de flétrissement car la saison sèche est courte et non absolue. La formule d'une RU constante peut alors se justifier pour une culture qui occupe le sol en permanence (culture arbustive, culture prairiale, canne à sucre, végétation naturelle...). Elle se comprend moins bien déjà, dans ces mêmes conditions, pour une culture annuelle plantée en sol nu, dont la RU va croître, en fait, avec la progression de son front racinaire.

Dans les régions plus arides où l'humidité du sol atteint le point de flétrissement (et le dépasse pour l'horizon superficiel) au cours de la saison sèche, une RU constante est un non-sens. Végétation permanente, dont le système souterrain survit en équilibre avec l'eau résiduelle, ou végétation annuelle naturelle ou cultivée, la RU est nulle (et même négative) au retour des pluies. Il importe donc nécessairement de simuler son accroissement au fur et à mesure de l'avancement de la saison humide.

Dans le cas d'une végétation annuelle, il conviendrait, en toute rigueur, de simuler la progression du front racinaire, ce qui imposerait

cependant d'établir différents modèles selon les espèces. Pour une végétation permanente, la solution est plus simple si l'on admet le principe suivant lequel un front de réhumectation parvenu à la côte z ne progressera de Δz que si le profil est déjà humecté jusqu'à la profondeur z à la capacité de rétention au chaud. L'humidité du profil étant supposée ajustée à la valeur du point de flétrissement en début de saison pluvieuse, une première pluie, considérée comme entièrement infiltrée et non précipitée en profondeur par la voie de fissures de retrait, déterminera la valeur de la première RU. Après quoi la RU progressera chaque fois que, compte tenu des précipitations et de l'évapotranspiration réelle (ETR), la quantité d'eau disponible dans le sol dépassera la valeur de la RU actuelle. Et ce, jusqu'à une valeur maximale fixée en considération de la profondeur d'exploitation racinaire estimée et des caractéristiques hydriques du sol. A partir de ce moment, l'excédent infiltré, par rapport à cette RU maximale, sera drainé ou ruisselé hors de portée des racines.

C'est sur la base de ce principe qu'est simulée, dans le système ORBVCR, la croissance de la RU, que l'on ait affaire à une végétation permanente ou à une végétation annuelle. Pour ce dernier cas, sans être rigoureux, le procédé représente une amélioration par rapport à la pratique de la RU constante.

3.2.1.2 Entrées du système

Ce sont les pluies (P), les évapotranspirations potentielles (ETP), les coefficients K d'évapotranspiration maximale (ETM) et la valeur maximale de la RU.

Pluies (P)

C'est l'importance numérique de l'échantillon des pluies qui détermine l'intérêt statistique de l'opération. Le système établit une suite

de bilans décadaires (décade = 10 jours) pour chaque année de relevés pluviométriques, rendant possible une analyse fréquentielle ultérieure des pluies elles-mêmes et des variables de sortie. Dans les meilleurs cas, cet échantillon a été limité à 50 années, en comptant à rebours de 1972 ou 1973, qui sont les deux dernières des 5 ou 6 années de sécheresse qu'a éprouvé le Sahel au sud du Sahara.

Les pluies, perforées en hauteurs journalières par la section d'Hydrologie de l'ORSTOM, sont totalisées par périodes calendaires de 10 ou 11 jours (8 ou 9 jours pour la 3ème décade de février). Au total pluviométrique (P) de la décade i s'additionne l'eau résiduelle (RS) de la décade i-1, pour constituer l'eau disponible (HD) en décade i. Si HD en décade i est supérieure à la RU en décade i-1, sa valeur détermine celle de la nouvelle RU, qui ne peut cependant être supérieure à la RU maximale entrée au départ. Une fois celle-ci atteinte, HD ne peut donc lui être supérieure, le surplus étant débité en ruissellement/drainage (RDR).

On verra plus loin que le système donne aussi une analyse fréquentielle des totaux pluviométriques décadaires.

Evapotranspirations potentielles (ETP)

Les ETP ne sont pas calculées par le système. Proposées de préférence par l'intéressé, qui en assume la responsabilité, elles sont entrées directement en valeurs décadaires. Dans le cas présent, elles ont été calculées selon PENMAN pour les stations météorologiques et pour les stations agronomiques qui produisent des données de durée d'insolation, température, tension de vapeur et vitesse du vent. Des interpolations spatiales ont permis d'estimer les ETP pour les simples stations pluviométriques.

Ces valeurs mensuelles ont été obtenues sur la base d'un albedo de 0,20. Les coefficients de la relation d'Angstrom ont été pris égaux à 0,18 pour a et 0,62 pour b. Fait exception la Haute-Volta pour laquelle l'agrométéorologiste détaché par l'OMM avait proposé des ETP calculées avec a = 0,30 et b = 0,50, ce qui donne des valeurs de 5 % à 10 % plus fortes.

Les ETP décadaires ont été finalement interpolées à partir des valeurs mensuelles, ce qui introduit une source d'erreurs supplémentaire. Toutes ces erreurs n'étant pas de même signe se compensent dans une certaine mesure. Elles sont d'ailleurs finalement de peu d'importance au regard de la très grande variabilité des pluies.

Coefficients K d'évapotranspiration maximale (ETM = K.ETP)

L'évapotranspiration réelle ETR est déterminée par la quantité d'eau disponible, le degré de disponibilité de cette eau et par l'ETP d'une part, toutes contraintes que prend en compte la relation de calcul de l'ETR d'EAGLEMAN (1971) intégrée au système. Elle peut d'autre part être limitée par l'importance de la surface foliaire, d'où la nécessité d'introduire un facteur K de modulation de l'ETP, ce facteur étant variable avec le degré de développement de la couverture végétale. Deux cas sont à considérer selon que l'on a affaire à une culture annuelle, plantée en début de saison des pluies, ou à une occupation permanente du sol (culture pérenne ou végétation naturelle).

Le bilan hydrique d'une culture annuelle fait suite, à compter de l'instant du semis, à celui du sol nu. Concernant une culture donnée, le semis procède à une date variable avec l'année. ORBVCR peut initialiser le bilan de la culture à partir de la première décade totalisant une hauteur de pluie fixée à volonté. Dans le cas présent, cette procédure était inapplicable, contraint que l'on était de se placer en situation moyenne pour l'ensemble des

cultures. La solution consistait à se donner une date de semis moyenne fixe.

On admettra, avec certains spécialistes, qu'en régions tropicales l'évaporation d'un sol nu, en début de saison des pluies, alors que celles-ci ne sont pas assez fréquentes pour maintenir humide la surface du sol, est égale en moyenne à 1/3 de l'évaporation d'une surface d'eau libre, évaporation que l'on assimilera à E_o de Penman calculé avec un albedo égal à 0,05. Or $1/3.E_o$ correspond à 0,40-0,45 du E_T de Penman calculé avec un albedo égal à 0,20. Pour prendre une marge de sécurité, on considèrera ici qu'en début de saison des pluies le sol nu évapore en moyenne 1/2.ETP évalué selon Penman. Tout excès étant alors emmagasiné dans le sol nu ou faiblement recouvert de végétation, le semis cesse d'être aléatoire à partir de l'instant où la courbe des pluies passe et reste au-dessus de celle d'ETP/2. (Fig. 3-1).

La décade moyenne pour laquelle P devient supérieure à ETP/2 a été déterminée par intersection des courbes moyennes de P et d'ETP/2. Cette décade a été considérée, quelle que soit l'année, comme celle du semis. Cette approximation serait grossière si l'on se plaçait dans le cas d'une culture particulière, de sorgho ou d'arachide par exemple. Elle l'est moins si l'on tient compte de ce que le cultivateur conduit, en fait, plusieurs cultures, les unes semées plus précocement (vivrières en général), les autres plus tardivement (de rapport le plus souvent) : préparation du sol et semis s'étalent sur deux mois et plus.

A partir de la décade du semis - qui est donc celle où, en moyenne, P devient supérieure à ETP/2 - les K assignés aux décades successives se suivent ainsi : 0,50 - 0 50 - 0,60 - 0,70 - 0,80 - 1.0 - ... La culture, supposée plantée à densité convenable sur un sol suffisamment fertile, évapotranspire à l'ETP après 50 à 60 jours. Les pluies sont alors devenues assez fréquentes pour que le sol, même s'il ne se trouve pas encore parfaitement recouvert (comme il se devrait pour assurer à l'eau la meilleure efficience

DETERMINATION DE LA PERIODE DE CROISSANCE VEGETALE

DETERMINING THE PERIOD OF VEGETATION GROWTH

LIEU LOCATION	OUAGADOUGOU-VILLE	LATITUDE: 12° - 21' N
PAYS COUNTRY	HAUTE-VOLTA	LONGITUDE: 01° 31' W
PERIODE PERIOD	1931 - 1960	ALTITUDE: 304 METRES
MOYENNE PLUVIOMETRIQUE AVERAGE RAINFALL	860 mm.	

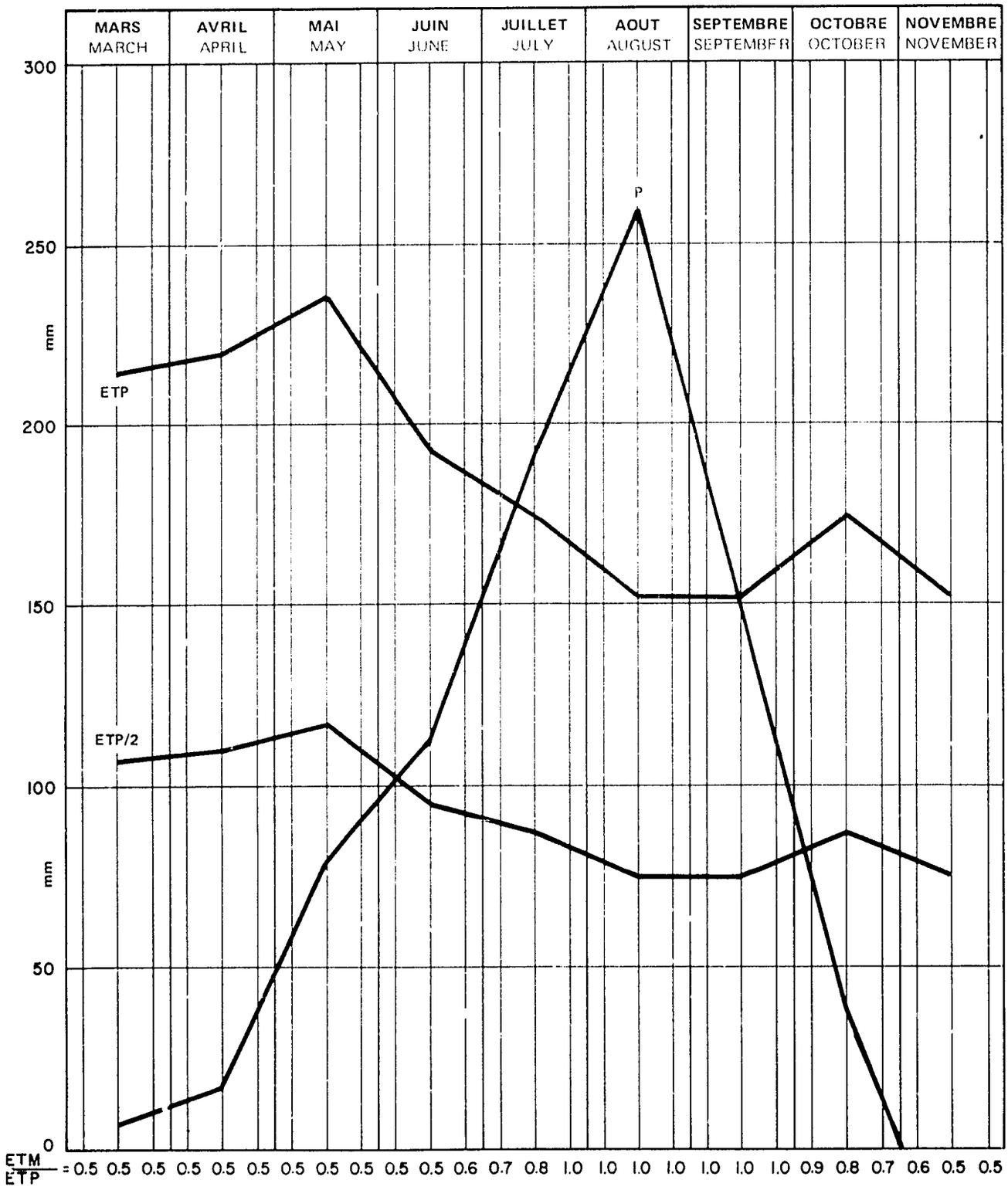


Fig. 3-1

photosynthétique), évapore lui-même à l'ETP (soit environ 0,80.E_o Penman). Le coefficient K reste ensuite égal à 1,0 jusqu'à la décade où, en moyenne, la courbe des pluies redevient inférieure à ETP/2, puis il décroît linéairement jusqu'à 0,50, comme suit : ...- 1,0 - 0,90 - 0,80 - 0,70 - 0,60 - 0,50 -, en rapport avec le processus de maturation de la plante. Pendant le restant de l'année, K reste fixé à 0,50, valeur qui est censée correspondre à l'évaporation du sol nu (soit 1/3.E_o) sporadiquement humecté par les pluies.

Ce schéma général comporte cependant des exceptions en rapport avec les différences de régime pluvial. Dans le cas des stations de MAMFE, N'GAOUNDERE, YOKO au Cameroun, de MAN en Côte-d'Ivoire et de BAMBARI en République centrafricaine, le semis est supposé s'effectuer non pas dans la décade pour laquelle P devient supérieure à ETP/2, cette décade étant trop précoce ou même n'ayant pas d'existence, mais dans la décade pour laquelle P devient supérieure à ETP. Dans le cas des stations de BOUAKE et de BONDOUKOU, en Côte-d'Ivoire, caractérisées par deux maximums pluviaux séparés par une petite saison sèche, ce sont deux cycles successifs de culture qui ont été programmés. Enfin viennent les stations sahéliennes que l'on peut dire présahariennes, pour lesquelles la courbe moyenne des pluies reste inférieure à celle d'ETP et parfois même à celle d'ETP/2 : AIOUN, BOUTILIMIT, KIFFA, NEMA, NOUAKCHOTT en Mauritanie, N'GUIGMI, TAHOUA, TANOUT au Niger, GAO, MENAKA, NIAFUNKE, TOMBOUCTOU au Mali, BOL au Tchad. Durée et position de la période de végétation y sont extrêmement variables, au point que la monoculture pluviale du mil n'y réussit que de façon très aléatoire et que la présente simulation de bilans n'y a guère de sens. Au mieux pouvait-on envisager de programmer une culture irriguée de durée de cycle de végétation arbitraire ou encore le développement d'une végétation naturelle de plantes annuelles constituant des parcours de pâturage. C'est cette dernière solution qui a été adoptée.

Mais le bilan hydrique, considéré ci-dessus dans le cas d'une culture annuelle généralement, peut être envisagé aussi pour une culture permanente ou pour une végétation naturelle pérennante. On pourra admettre alors que antérieurement à la décade pour laquelle P devient supérieure à ETP, la lame pluviale, entièrement consommée, constitue l'ETR; le restant du cycle est inchangé par rapport à une culture annuelle que l'on a supposé épuiser complètement la réserve du sol en fin de saison.

Réserve utilisable maximale (RU)

La RU s'évalue en fonction du type de développement racinaire, de la profondeur offerte par le sol et des caractéristiques hydriques et hydrodynamiques (perméabilité surtout) de ce dernier. En l'absence de ces données, une valeur moyenne souvent retenue est celle de 100 mm, qui correspond à une épaisseur de 80 à 120 cm d'un sol dont l'intervalle d'humidité disponible, $H_c - H_f$, est de 5 % à 10 %, avec une densité apparente de 1,3 à 1,6. Pour un sol de texture moyennement grossière, on aurait : 5 x 1,6 x 12 = 96 mm. Pour un sol de texture moyennement fine (aussi moins perméable) : 10 x 1,3 x 8 = 104 mm.

ORBVCR, on l'a vu plus haut, opère à RU croissante. De ce fait les erreurs qui entachent l'évaluation de la RU n'affectent que sa valeur maximale et donc n'interfèrent qu'à partir de l'instant où celle-ci est atteinte, jouant essentiellement sur la durée de la période de végétation. On verra qu'il est possible d'interpréter ce qu'aurait été un bilan sur la base d'une RU maximale plus forte ou plus faible.

Cela dit, pour tenir compte de ce que l'importance de la RU dépend aussi de celle des pluies, les valeurs retenues sont de 120 mm en régions soudaniennes et de 80 mm en régions sahéliennes, la distinction restant quelque peu arbitraire dans leur zone frontière.

3.2.1.3 Sorties du système

Ce sont essentiellement l'évapotranspiration réelle (ETR), l'eau résiduelle (RS), le ruissellement/drainage (RDR), l'évapotranspiration relative (ETR/ETM) et le déficit hydrique de la culture (ETM-ETR).

Evapotranspiration réelle (ETR)

Alors que les termes d'un bilan auxquels s'intéresse l'hydrologue sont le ruissellement (R) et le drainage (DR) qui composent l'écoulement, le souci majeur de l'agronome est l'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente la consommation de la culture. Le problème fondamental est donc d'évaluer l'ETR sans avoir à procéder à des mesures au niveau du sol ni à celui de la plante (sinon pour vérifications ou réglages) ni à celui de l'atmosphère (hormis les observations météorologiques classiques permettant d'estimer l'ETP). C'est la raison d'être des modèles de bilan hydrique.

Presque tous les modèles empiriques usent pour ce faire d'une fonction :

$$ETR/ETP = f(HR) \qquad HR = HD/RU \qquad 0 \leq HR \leq 1$$

où RU est la réserve maximale d'eau utilisable dans la zone d'exploitation racinaire du sol; HD, l'eau effectivement disponible dans les limites de cette RU. Dans la plupart des modèles, on a même tout simplement :

$$ETR/ETP = HR,$$

avec cette restriction que si l'humidité relative du sol, HR, est supérieure à un certain seuil (0,70 - 0,60 - 0,50...) qui dépend de la structure du sol et qui constitue le plancher de la RFU (réserve facilement utilisable), alors ETR = ETP.

Reste encore à estimer cette RFU, dont on ne peut d'ailleurs donner une définition statique : pour une même RU d'un même sol à même densité

d'occupation racinaire, la RFU décroît avec la vitesse de dessèchement du sol, donc avec l'importance de la demande climatique, ETP. Une solution à cette difficulté peut être trouvée dans la relation d'EAGLEMAN (Agr. Meteorol. 8, 1971), 385-394), relation cubique dont les 4 paramètres sont eux-mêmes des fonctions, généralement décroissantes, d'ETP :

$$ETR/ETP = A + B(HR) + C(HR)^2 + D(HR)^3$$

$$A = -0,05 + 0,732\ (ETP)$$

$$B = 4,97 - 0,661(ETP)$$

$$C = -8,57 + 1,560(ETP)$$

$$D = 4,35 - 0,880(ETP)$$

C'est cette relation d'EAGLEMAN qui constitue la fonction d'évaluation d'ETR du système ORBVCR.

Eau résiduelle du sol (RS)

C'est la quantité d'eau restante après prélèvement de l'ETR sur l'eau disponible HD : $RS = HD - ETR$

Mais on ne peut dire que RS représente l'eau du sol durant la décade considérée. Cette quantité d'eau HS présente dans le sol durant la décade est, en moyenne : $HS = \frac{HD + RS}{2}$

Ruissellement/drainage (RDR)

Le système ne comporte pas de fonction de ruissellement proprement dite. Sauf fortes pentes (imposant d'ailleurs un dispositif anti-érosif), il n'y a pas de ruissellement en bonne agriculture, dans la première partie de la saison, alors que les pluies sont le plus aléatoires et qu'il s'impose donc d'emmagasiner la totalité de la lame pluviale afin de constituer un volant d'humidité.

Plus tard, à dater du moment où la capacité (RU maximale) du réservoir utilisable par la culture est atteinte, l'excédent peut être soit

drainé soit ruisselé. Il semble que la simulation soit meilleure lorsque l'excédent est ruisselé avant prélèvement de l'ETR plutôt que drainé après. C'est donc cette solution qui a été adoptée. Ruisselé ou drainé, l'excédent échappe à la culture, constituant ce que l'on a bloqué ensemble comme ruissellement/drainage (RDR). Ce RDR est cumulé en colonne RDRC.

Cela dit pour ce qui est d'une culture, il est bien certain qu'il n'en va pas de même dans le cas de la végétation naturelle, un ruissellement plus ou moins important selon la pente, la nature du sol, la nature de la végétation (annuelle ou permanente, notamment) affectant les premières pluies.

Déficit relatif du sol

Ce déficit est calculé, en décade i, à partir de la RU actuelle et de RS :

$$D(RS)_i = RU_i - RS_i$$

Mais le déficit moyen est en réalité :

$$D(HS)_i = RU_i - \frac{(HD + RS)}{2}_i$$

Le déficit relatif est le rapport du déficit à la RU :

$$D(HS)_i/RU_i$$

Evapotranspiration relative (ETR/ETM)

ORBVCR peut, au choix, donner l'évapotranspiration relative par rapport à ETP (c'est-à-dire ETR/ETP) ou par rapport à ETM (c'est à dire ETR/ETM)

ETR/ETM est généralement plus intéressant à connaître pour comparer entre eux des bilans annuels, comme dans le cas présent. ETR/ETP s'impose au contraire pour des comparaisons de stations.

Dans un cas comme dans l'autre, c'est un indice de production de la matière sèche, la relation étant considérée comme linéaire, toutes autres choses égales par ailleurs.

Déficit hydrique de la culture (ETM-ETR)

C'est le déficit de consommation de la culture, relativement à son évapotranspiration maximale (ETM), déficit à combler par l'irrigation en intervenant sur le déficit du sol D(RS).

Etant donnée, par exemple, une certaine quantité d'eau d'irrigation disponible, on pourra se proposer de rechercher quelle est sa distribution en colonne I qui minimise ETM-ETR, compte tenu des exigences de la culture lors de ses phases successives de développement, compte tenu aussi, éventuellement, du prix de cette eau.

3.2.2 Analyse statistique de l'information

Données d'entrée et de sortie peuvent être analysées fréquentiellement dans chaque décade de durée. Les lois de distribution étant diverses selon la variable considérée (fonction gamma pour les pluies, bêta pour ETR/ETM, ...), le traitement statistique procède par simple classement fréquentiel par déciles, quartiles et vigintiles.

Dans le cas présent, ont été traités statistiquement : les pluies (P), l'ETR, le ruissellement/drainage (RDR) et le déficit de la culture (ETM-ETR). Les résultats sont présentés dans un tableau particulier pour chaque variable. (Voir Annexes 3-1 à 3-11).

3.2.3. Informations de base

L'ensemble des tableaux de bilans hydriques et d'analyse statistique constitue une banque de données. Cette banque met à la disposition des usagers de la climatologie de certains secteurs d'activité une information de base et une information élaborée.

Les informations de base se rapportent aux pluies et à l'évapotranspiration potentielle (ETP).

3.2.3.1 Pluies (P)

Les données pluviométriques relatives à 100 stations ont été réduites à l'échelle décadaire à partir des relevés journaliers perforés sur cartes par la section d'Hydrologie de l'ORSTOM. Ces données ont été examinées par un spécialiste. Ainsi ont été corrigées les erreurs grossières, faciles à déceler, et éliminées les années de relevés incomplets ou douteux.

On rappellera que pour les mêmes 100 stations - et d'ailleurs pour toutes les autres stations pluviométriques des Etats Africains francophones - les relevés journaliers et leurs totaux mensuels ont été publiés par l'ORSTOM depuis l'origine jusqu'à 1965, le relais ayant été pris par l'ASECNA à dater de 1966. Pour les 100 stations en question, la présente étude reprend donc ces données, réduites à l'échelle décadaire, pour les 50 dernières années (au maximum) se terminant avec 1972, 1973 ou 1974.

Sauf cas rares où l'on s'intéresse aux pluies de quelques années particulières (celles de la sécheresse de 1968 à 1973, par exemple), l'intérêt se porte généralement sur leurs aspects fréquentiels. La pluviométrie décadaire a donc été décrite statistiquement dans les tableaux de classement fréquentiel par déciles, quartiles et vigintiles annexés aux séries

interannuelles de bilans hydriques.

Bien que la qualité de ce mode de traitement statistique soit moins bonne que celle d'un ajustement aux données d'une loi de distribution théorique (la fonction gamma incomplète, en particulier, sur laquelle se fonde le modèle d'analyse fréquentielle des pluies de l'ORSTOM), l'usage que l'on peut, en agriculture, faire des résultats est le même. En particulier :

- Définition du début et de la fin (donc de la durée) de la saison pluvieuse utile, sur la base de seuils, répétés ou non, de hauteur de pluie et de probabilité.
- Estimation de la fréquence du déficit (à combler éventuellement par l'irrigation) ou de l'excédent (à emmagasiner ou à évacuer par drainage ou ruissellement), dans les décades successives, relativement à une fraction quelconque de l'ETP.
- Estimation du risque d'occurrence, en position et durée, de périodes excessivement sèches ou humides, en rapport avec les phases critiques des cultures.
- Construction, compte tenu ou non de l'ETP, de modèles fréquentiels de la période de végétation, aux fins de : calage des cycles de végétation des cultivars, photopériodiques ou non, avec détermination de la date optimale de semis; calage, avec ou sans le secours de l'irrigation, de deux cycles de culture sur une même sole dans une même année; établissement d'indices relatifs climatiques de productivité, compte tenu de l'ETP.

3.2.3.2 Evapotranspiration potentielle (ETP)

Comme indiqué plus haut, l'ETP a été calculé mensuellement selon Penman pour les stations météorologiques, avec un albedo de 0,20 et, pour les coefficients de la relation d'Angström, a = 0,18 et b = 0,62; hormis pour la Haute-Volta, pour laquelle a = 0,30 et b = 0,50, ce qui donne des valeurs de 5 % à 10 % supérieures.

Ces ETP mensuelles de stations météorologiques ont été interpolées spatialement pour les stations pluviométriques. Puis les valeurs mensuelles ont été interpolées dans le temps en valeurs décadaires.

Ce sont des ETP moyennes obtenues à partir de moyennes de durée d'insolation, de température, de tension de vapeur et de vitesse du vent établies sur des périodes de temps aussi longues que possible (les moyennes de température sont des normales). La très grande variabilité des pluies autorise à se contenter, dans l'établissement des bilans, de valeurs d'ETP moyennes.

ORBVCR n'étant qu'un système parmi d'autres, il sera possible à quiconque en a les moyens de réutiliser ces mêmes données de pluies et d'ETP dans des modèles de bilan hydrique plus performants, sur la base d'hypothèses différentes (en matière de ruissellement, par exemple), en rapport avec des cultures bien déterminées pour lesquelles on aurait une connaissance assez précise des K d'ETM et semées à des dates non pas moyennes mais variables, sur des sols de caractéristiques hydriques bien connues.

3.3 RESULTATS DU SYSTEME ORBVCR

3.3.1 Contrôle et validité du modèle

Le système ORBVCR est un modèle (black-box) pour lequel il importe d'injecter des données (inputs) conformes aux observations et expériences réelles.

Le modèle a été testé en comparant les résultats obtenus avec les observations faites par mesures à la sonde à neutrons.

La Figure 3-2 montre qu'il y a une bonne coïncidence entre "Réserves en eau du sol" mesurées et celles calculées par le modèle. Sans avoir apporté de modifications particulières au modèle, il est manifeste que les résultats correspondent d'une manière satisfaisante. Une adaptation précise est alors obtenue en réglant certains paramètres.

3.3.2 Période de ruissellement/drainage attendue une année sur deux (Carte 3-1)

Un des résultats de l'analyse fréquentielle est donné sur la Carte 3-1.

Les courbes réprésentent les périodes (en nombre de jours) de ruissellement/drainage d'égale durée pour un seuil de probabilité de 0,5. On lira par exemple, pour Ouagadougou, une période maximale de 50 jours. Le drainage correspond à la percolation en-dessous de 1 mètre de profondeur sous le sol. Toutefois, il n'est pas possible de distinguer le drainage du ruissellement. Le chiffre inscrit à côté du point figurant la station pluviométrique indique donc la quantité annuelle d'eau (en mm), drainée et/ou ruisselée au cours de la période indiquée par la courbe. On admet que l'essentiel représente du ruissellement de surface en début de saison et qu'ensuite le drainage est plus important à cause de l'effet de protection du sol. Pour Ouagadougou on lira une quantité de ruissellement/drainage de 68 mm pendant une période de 50 jours.

La carte met en évidence les perturbations qu'apportent le delta central du fleuve Niger et la chaîne de l'Atakora au Togo.

Dans le cas du delta central du fleuve Niger, il y a un faible ruissellement/drainage. En effet en raison de l'importance de cette zone lacustre, les phénomènes de convection sont moins importants et entraînent par suite moins de formations nuageuses. En conséquence, les pluies y sont moins élevées, spécialement au mois d'août, durant lequel les conditions d'humidité relative sont élevées dans la région.

Dans le cas de l'Atakora, un autre phénomène a lieu, les pluies étant plus importantes à l'est de la chaîne que sur la chaîne elle-même.

COMPARAISON ENTRE LE BILAN HYDRIQUE SIMULE ET LES MESURES IN SITU (SONDE A NEUTRONS)
COMPARISON BETWEEN SIMULATED WATER BALANCE AND IN SITU MEASUREMENTS (NEUTRON PROBE)

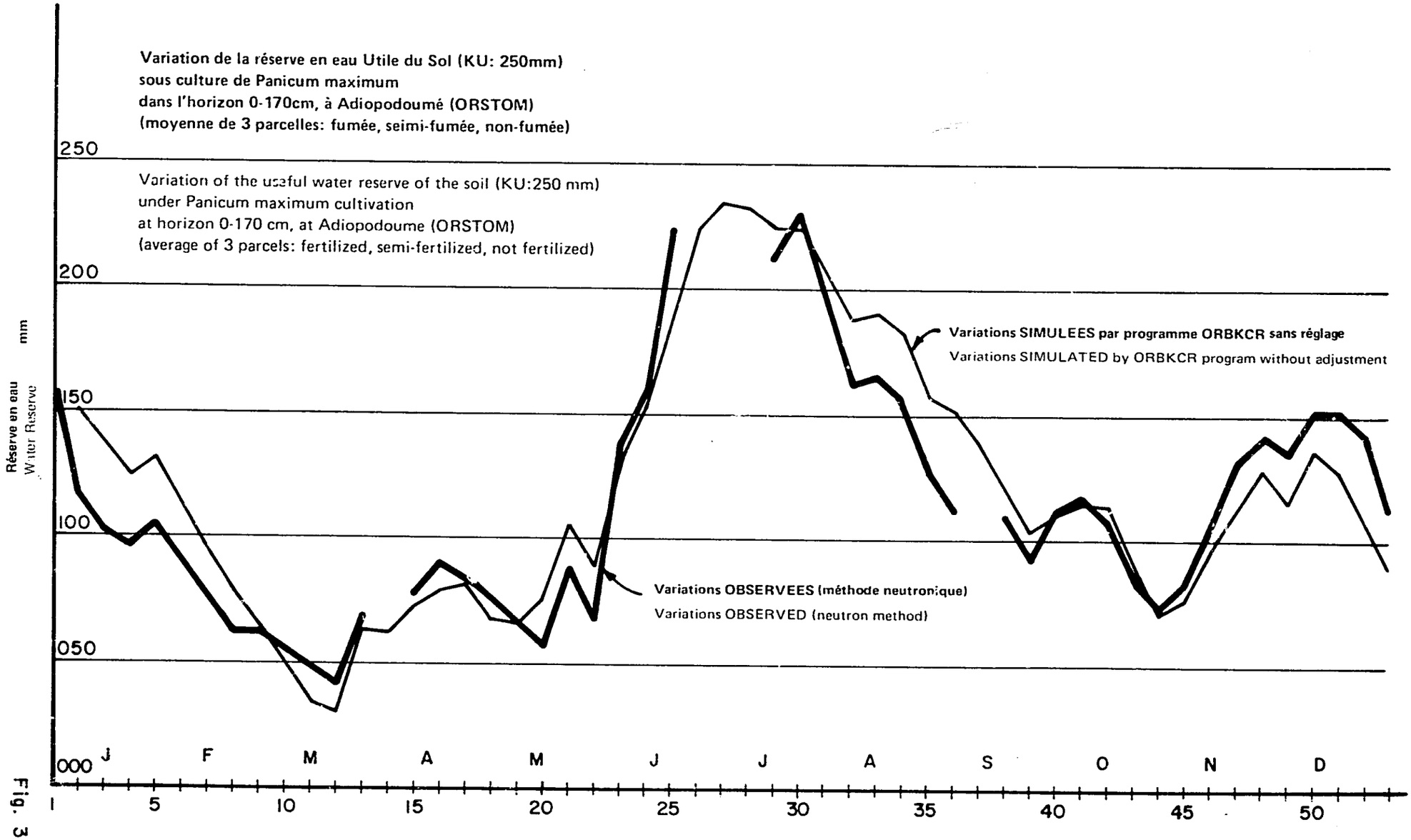


Fig. 3-2

En conséquence le ruissellement/drainage est plus important sur la bordure est de l'Atakora. Ce phénomène découle du fait que des formations nuageuses importantes se déplacent en général d'est en ouest.

3.3.3 Alimentation en eau pluviale pour un couvert végétal graminéen (Carte 3-2)

La Carte 3-2 donne 3 types d'informations de probabilité 0,5 :

a) Les déficits globaux annuels pour maintenir à l'état vivant le couvert végétal au cours de l'année (sa phase de croissance se situe en saison des pluies). Il s'agit là d'un déficit théorique minimal. Les besoins en eau en saison sèche sont estimés à 1/2 ETP, le réservoir sol à 1 mètre de profondeur. L'information est figurée par le chiffre en millimètres de hauteur d'eau.

b) Les doses d'irrigation pour assurer la production maximale à la fois en saison des pluies (irrigation de complément), et en saison sèche (irrigation totale). Dans ce cas par exemple, les espérances de production pour une variété de Panicum maximum peuvent être estimées à 50 tonnes de matière sèche à l'hectare. Les besoins en eau en saison sèche sont estimés à ETP. L'information est donnée dans la carte 3-[illegible] susvisée et exprimée en 1.000 m^3/hectare.

c) La durée observée, une année sur deux, pendant laquelle il n'y a pas, pour les cultures, de déficit d'alimentation en eau

c) (suite)

pluviale. Cette valeur indique donc la durée optimale du cycle végétatif adaptable dans les conditions naturelles du climat local.

Les isolignes caractérisent des zones homogènes pour lesquelles la durée de développement et de croissance de la végétation est assurée, grâce à l'apport pluviométrique d'une part, et par la contribution de l'eau en réserve dans le sol d'autre part. D'une façon générale, le gradient nord-sud est homogène. Au niveau de la planification, les valeurs des périodes permettent donc d'identifier le matériel végétal adaptable aux conditions climatologiques liées à la culture pluviale.

Les doses d'irrigation complémentaires estimées nécessaires sont à mettre en rapport avec les disponibilités locales (bas-fond, nappes, etc.).

Pour obtenir des informations plus précises, l'utilisateur est invité à analyser les résultats chronologiques décadaires des tableaux ETM - ETR calculés pour les 100 stations de la zone des savanes. (cf. Annexes 3-1 à 3-11)

3.4 LES APPLICATIONS DU SYSTEME ORBVCR

Les sorties du système sont des informations susceptibles d'intéresser non seulement l'agronome (généraliste, agroclimatologiste, phytotechnicien, pédologue, etc.) mais aussi le phytoécologiste et, dans une certaine mesure, l'hydrologue et l'hydrogéologue.

3.4.1 L'agronomie

En agronomie, toutes les applications ne peuvent être rappelées de façon exhaustive. D'abord, la séquence des K d'ETM (0,50 - 0,50 - 0,60 - 0,70 - 0,80 - 1,0 - ... - 1,0 - 0,90 - 0,80 - 0,70 - 0,60) est une mesure, en nombre de décades, pour chaque station, de la durée et de la position moyennes de la période physique de végétation, de la longueur maximale des cycles de végétation des cultivars.

La période physique de végétation moyenne se compose de trois sous-périodes :

- une période préhumide, durant laquelle la courbe pluviométrique moyenne passe de ETP/2 à ETP; elle correspond à la phase d'installation de la culture supposée semée dans la décade pour laquelle P devient supérieure à ETP/2 et supposée se développer suivant la séquence : 0,50 - 0,50 - 0,60 - 0,70 - 0,80 - 1,0 -
- une période humide durant laquelle P est en moyenne supérieur à ETP; c'est la période durant laquelle la culture est supposée évapotranspirer à l'ETP (l'excédent étant emmagasiné dans le sol ou partiellement ruisselé/drainé) et au cours de laquelle se déroulent les phénomènes qui aboutissent à la fructification.
- une période posthumide durant laquelle la courbe pluviométrique moyenne passe de ETP/2 à 0, le complément nécessaire pour satisfaire l'ETM étant demandé à l'eau du sol; c'est la phase de maturation d'une culture dont l'épiaison (pour une graminée à type de floraison défini) ou la fin de floraison utile (pour une espèce à type de floraison axillaire (cotonnier, arachide, niébé...) est supposée coincider avec la décade pour laquelle P redevient inférieure à ETP. La séquence des K d'ETM, à dater du début des phénomènes de maturation, est supposée être la suivante :

1,0 - 0,90 - 0,80 - 0,70 - 0,60.

On pourra constater que, dans le cas présent, les coefficients K ont été assez bien calés généralement (quoique de façon quelque peu variable avec les caractéristiques mineures du régime pluvial) par rapport aux dates d'occurrence des évènements remarquables considérés (P devenant supérieure à ETP/2, puis inférieure à ETP, puis inférieure à ETP/2). Par contre la phase de maturation devrait être considérée comme terminée avec le coefficient K = 0,70, comptant donc une quarantaine de jours au total.

La suite variable des ETR, mais surtout celle des indices ETR/ETM et celle des déficits ETM-ETR, permettra alors de se rendre compte dans quelle mesure chaque année particulière s'écarte de l'année normale figurée par la suite invariable des ETM.

Il sera possible ensuite de se livrer à des statistiques sur ces caractéristiques (et en particulier sur ETR/ETM, indice pour lequel il n'est pas donné de tableau de classement fréquentiel), concernant :

- tout évènement particulier considéré comme intéressant (ETM 0,50.ETP; premier ETM = ETP; dernier ETM = ETP; positions moyenne et variable du déficit ETM - ETR le plus faible durant la sous-période humide; dernier ETM (ETM = 0,70) de la phase de maturation...
- toute décade particulière : ETR et ETM-ETR sont analysés statistiquement dans les tableaux de classement annexés, où les décades sont dénombrées de 1 à 36. En culture irriguée, on s'intéressera par exemple aux probabilités de dépassement de tels niveaux de déficit, et notamment à celle du besoin de pointe comme à son importance et à sa position dans le temps.

De façon générale, tous les modes d'utilisation cités plus haut (Informations de base) en ce qui concerne les données pluviométriques, se trouvent applicables ici, mais sur la base d'une information plus élaborée donc plus fine.

Enfin on pourra se représenter ce qu'aurait été la période de végétation en toute année si la RU maximale était estimée plus forte ou plus faible. On constate, si on fait varier la RU, que dans les années où un excédent est susceptible d'être ruisselé/drainé, une augmentation de la RU de 40 mm ne fait guère que prolonger la période de végétation d'une décade environ, en réduisant aussi quelque peu le déficit dans les décades immédiatement antérieures. On remarquera en passant qu'une augmentation de la RU de n mm réduit d'autant la quantité totale qui se trouve ruisselée/drainée (RDRC).

3.4.2 Phytoécologie

Le phytoécologiste est surtout concerné par la végétation naturelle. En conséquence, il pourra considérer qu'antérieurement aux valeurs K= 1,0 toute la lame pluviale, au ruissellement près, a été consommée par cette végétation pour assurer l'évapotranspiration réelle ETR.

Les valeurs de ETR/ETM constituant un indice de production de la matière sèche, leur total annuel pourra être étudié statistiquement comme correspondant très grossièrement aux possibilités d'alimentation des troupeaux, non en valeur absolue mais relative.

3.4.3 Hydrologie et hydrogéologie

Il est bien certain que le système ORBVCR, qui n'a pas été conçu pour ces objectifs, ne peut rendre compte dans l'absolu ni de l'écoulement ni de la recharge des nappes. Mais il n'en va peut-être pas de même dans le relatif.

Dans la perspective hydrologique, le reproche majeur à faire à ce système est qu'il ne ruisselle pas tant que la RU maximale estimée pour les cultures ou pour la végétation naturelle n'est pas atteinte. Or,

sur un sol non cultivé, sur un sol mal cultivé et, dans certaines circonstances (forte pente, très forte pluie, battance de la surface du sol, imperméabilité de masse ...), même sur un sol bien cultivé, le ruissellement opère dès les premières pluies importantes.

A SOKODE (Nord Togo), pour prendre un exemple de station de régime tropical très pluvieux (1450 mm), le début médian des pluies susceptibles de ruisseler se situe vers le 15 mars, tandis que dans notre système, sur la base d'une RU maximale de 120 mm, le début médian du ruissellement/drainage (RDR) se situe vers le 31 mai et sa fin médiane vers le 10 octobre. A DORI (Nord Haute-Volta), station tropicale sèche (540 mm), début médian des pluies vers le 15 mai, début médian du RDR vers le 31 juillet et fin médiane vers le 31 août; il n'y a pas de RDR 5 années sur 45, sur la base d'une RU de 80 mm.

Contre ce reproche, on peut néanmoins avancer qu'une bonne part des précipitations que le système ne ruisselle pas en début de saison s'accumule dans le sol (cela, d'autant plus que le système évapotranspire à l'ETR et non pas à l'ETP comme le font bien des modèles d'écoulement) et se retrouve en fin de saison dans le ruissellement/drainage cumulé (RDRC). A SOKODE, ce RDRC représente en moyenne, sur la base d'une RU de 120 mm, 40 % de la lame pluviale totale à DORI, avec une RU de 80 mm, 20 % seulement. Mais à SOKODE la part du drainage dans le RDRC est plus importante que celle du ruissellement, tandis qu'à DORI c'est évidemment le ruissellement qui domine, sans qu'il soit possible de mieux préciser.

Un autre reproche majeur à faire à ORBVCR est en effet qu'il ne distingue pas entre ruissellement et drainage. Si l'on admet cependant que le RDRC donne une idée grossière de l'écoulement de trop-plein d'un bassin de dimension appropriée, l'hydrogéologue pourra peut-être se faire une opinion sur la fréquence de recharge des nappes, en fonction des

hypothèses qu'il fera concernant la part propre du ruissellement (en % du RDRC), ainsi qu'en fonction des valeurs qu'il donnera à la RU : toute augmentation de la RU de x mm entraînera simplement une diminution de x mm du drainage, hormis dans les années très rares où une longue discontinuité dans la succession des pluies fera que cette diminution du drainage sera de 2x mm.

CHAPITRE 4

RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

4.1 DESCRIPTION DE LA REGION

La Région de Savane de l'Afrique Occidentale est une région qui, en dépit de la grande publicité donnée aux problèmes de la sécheresse, possède des ressources considérables en eau de surface. Bien qu'un gros effort de recherche et d'acquisition des renseignements ait été déjà fait à propos des ressources en eau au sein de ladite région, le présent chapitre vise néanmoins à récapituler et à augmenter les informations en question sur une base régionale à l'effet d'établir un document fondamental pour le planning régional.

Pour les besoins de cette étude, la Région de Savane a été divisée en six principaux bassins versants, soit le bassin du Tchad, avec les sous-bassins du Chari et du Logone; les bassins du Niger, de la Volta, du Sénégal, et de la Gambie. Sauf en ce qui concerne quelques valeurs représentatives, le Bassin de la Bénoué n'a pas pu malheureusement être pris en compte en raison des difficultés liées à l'obtention de données du Nigeria. A l'occasion de l'analyse des renseignements portant sur les ressources en eau de surface de ces bassins, on a veillé à calculer des estimatifs sûrs pour les débits annuels, les débits de crue et les débits d'étiage pour différentes périodes de retour des principaux cours d'eau et de leurs affluents. Les valeurs des débits ont été calculées pour toutes les stations de jaugeage de la Région de Savane dans lesquelles les mesures ont été enregistrées pendant suffisamment de temps.

En général, la plus remarquable particularité des bassins versants de la Savane consiste dans la variabilité du débit dans les cours d'eau et leurs tributaires, non seulement pour une année donnée mais également d'une année à l'autre. Une autre caractéristique de ces bassins est la grande quantité d'eau qui y est perdue par suite de l'évaporation et de l'évapotranspiration. Ci-après

sont donnés une courte description de chaque bassin ainsi qu'un bref exposé au sujet de la lame d'eau écoulée sur un petit bassin versant, également à propos de la sédimentation et de la qualité de l'eau.

4.1.1 Bassin du Tchad

Le bassin du Tchad a une superficie totale de 2.335.000 km^2 et est l'un des plus grands bassins versants fermés dans le monde. Au lieu de se déverser à la mer, l'écoulement de ce bassin est recueilli par le lac Tchad. Le bassin versant du bassin du fleuve et du lac Tchad recouvre partiellement six pays: le Tchad, le Niger, le Cameroun, le Nigeria, l'Empire Centrafricain (CAE), et le Soudan.

La source principale du bassin du Tchad est constitué par le fleuve Chari dont le cours supérieur prend naissance dans les hautes terres humides de l'ouest de l'Empire Centrafricain. Les parties amont du bassin du Chari se trouvent à des altitudes de 600 à 800 mètres et reçoivent une moyenne de plus de 1.400 mm de pluie par an. On estime que le fleuve Chari déverse annuellement un total d'environ 38,4 milliards de mètres cubes ($10^9 m^3$) dans le Lac Tchad.

Le plus grand des affluents du Chari est le fleuve Logone qui rejoint le Chari près de N'Djamena, à quelque 75 km du lac Tchad. Le Logone prend sa source dans les montagnes de l'est du Cameroun. Les parties amont de son bassin s'élèvent à des altitudes allant de 1.100 à 1.900 mètres. Comme dans le cas du Chari, le cours supérieur du Logone reçoit en moyenne une pluviométrie annuelle dépassant 1.400 mm. Il va de soi que cette haute précipitation alliée aux fortes pentes favorise des taux élevés de ruissellement. C'est ainsi que le débit annuel du Logone, selon les mesures prises à Lai, est de $16,1 \times 10^9 m^3$. En aval de Lai, ce débit est augmenté d'environ $0,5 \times 10^9 m^3$ par les volumes apportés par le Tandile. En conséquence, le débit annuel du bassin amont du Logone se chiffre à $16,6 \times 10^9 m^3$ par an.

Un autre important tributaire du Chari est le Bahr Sara. Le Bahr Sara se jette dans le Chari juste en aval de Sarh dans le sud-ouest du Tchad. Les apports annuels du Bahr Sara au Chari, tels qu'enregistrés à Manda, s'élèvent à $16,6 \times 10^9$ m^3.

Les affluents est et sud du Chari lui apportent individuellement une contribution annuelle bien inférieure à celle du Logone ou du Bahr Sara. C'est ainsi que les quatre tributaires est (Salamat, Bahr Keita, Mya et Bahr) n'approvisionnent que $9,3 \times 10^9$ m^3, alors qu'ils drainent approximativement 50% du bassin versant Chari-Logone. Quant à la contribution des affluents sud (Bangoran, Bamingui, et Gribingui), elle se chiffre vraisemblablement à $4,0 \times 10^9$ m^3 par an.

En additionnant les apports de tous les affluents (soit $16,6 \times 10^9$ m^3 pour le Logone, $16,6 \times 10^9$ m^3 pour le Bahr Sara, $9,3 \times 10^9$ m^3 pour les tributaires est, et $4,0 \times 10^9$ m^3 pour les tributaires sud), il semblerait que le débit total annuel du Chari, juste au-dessus de N'Djamena, devrait être de $46,5 \times 10^9$ m^3. Cependant, le volume total d'eau déversé par le fleuve Chari dans le lac Tchad est de $38,4 \times 10^9$ m^3 par an; ce qui donc fait une différence de $8,1 \times 10^9$ m^3 entre les débits prévus et ceux réels. On estime qu'environ $6,0 \times 10^9$ m^3 de ces $8,1 \times 10^9$ m^3 se perdent par évapotranspiration et qu'approximativement $2,1 \times 10^9$ m^3 ruissellent dans le bassin versant avoisinant pendant les périodes des hautes eaux. On pense que le cours d'eau El Beid, situé juste à l'ouest du bassin Chari-Logone dans le nord du Cameroun, reçoit cet apport de $2,1 \times 10^9$ m^3 qu'il déverse ensuite dans le lac Tchad. Les enregistrements des mesures indiquent que le Logone perd à peu près 28 pour cent de son débit entre Lai et Logone Gana, et le Chari 12 pour cent entre la confluence avec le Salamat et N'Djamena.

On est très peu renseigné sur le périmètre qui est submergé par le fleuve Chari ou sur la fréquence et la durée des inondations. Bien qu'aucune

étude affinée n'ait été entreprise des relations entre le niveau d'eau et la superficie inondée, il n'en demeure pas moins que d'une année à l'autre le périmètre total submergé risque de représenter 20 à 30 fois le minimum.

4.1.1.1 Lac Tchad

Le lac Tchad possède des caractéristiques tout-à-fait particulières, en ce sens qu'il est un lac d'eau douce bien qu'il se trouve situé dans un bassin versant apparemment fermé et qu'il soit soumis à une intense évaporation. La salinité de l'eau du lac, telle que déterminée par conductivité électrique, a fait l'objet d'étude de la part de plusieurs chercheurs, dont Bouchardeau en 1958, Carmouze en 1971, 1972 et 1976. La salinité est moindre dans la partie sud du lac en raison de la dilution par le Chari, et elle augmente graduellement vers le nord. De toute façon, la salinité maximale n'excède pas k^{20} 1.000 μmhos ce qui se situe bien dans les limites de l'eau potable. Les salinités des lacs Tanganyika, Albert, Edouard et Rodolphe sont toutes plus élevées que ce chiffre et toutes elles supportent une flore et une faune riches et variées (Beadle, 1974).

Comme exposé ci-dessus, la contribution du Chari au lac Tchad se chiffre à environ $38,4 \times 10^9$ m^3 d'eau par an. Des apports supplémentaires s'élevant respectivement à 2,1, 0,1 et $0,5 \times 10^9$ m^3, sont reçus du El Beid, du Yedseram et du Komadugu Yobe. La quantité d'eau se déversant dans le lac Tchad a considérablement varié au cours des ans. C'est ainsi que pendant le siècle actuel seulement, la superficie maximale du lac Tchad a oscillé entre 10.000 et 25.000 km^2. Aujourd'hui, la profondeur moyenne du lac est d'environ quatre mètres, tandis que sa profondeur maximale va entre 7 et 12 mètres. Les apports venant des affluents et de la pluie sur le lac atteignent une moyenne annuelle de 2.330 mm qui sont du reste largement compensés par un taux d'évaporation de quelque 2.100 mm par an.

Les efforts entrepris à l'effet de déterminer les relations entre la superficie du lac et sa profondeur n'ont pas connu beaucoup de succès. La

difficulté ici vient partiellement du fait que l'on a du mal à définir la ligne de rivage dont la plus grande portion se compose de terres humides marécageuses. De plus, d'inombrables ilôts dans les parties nord et nord-est du lac masquent des portions de la ligne de rivage de ce dernier.

Les études de bilan hydrique (telles que révisées par Roche en 1970), estiment que plus de 90 pour cent des apports dans le lac sont évaporés. Normalement, un pareil taux d'évaporation devrait résulter en un lac avec des eaux très salines.

Le mécanisme d'élimination des sels du lac s'expliquent vraisemblablement de trois façons. On pense qu'une faible quantité de sel se sépare de l'eau par précipitation et est absorbée par des organismes, tout particulièrement des mollusques. Selon une autre éventualité, une certaine quantité de sel, croit-on, est enlevée du lac à l'époque des inondations. Pendant l'accroissement saisonnier du volume du lac, les eaux remplissent les criques et débouchés nord-est; au fur et à mesure que baisse le niveau du lac, ces criques salines deviennent isolées et sont laissées pour s'évaporer. Cependant, la plus grande partie du sel éliminée du lac passe pour être déposée dans les sables désertiques situés au bord nord du lac. Bien que des valeurs quantitatives fassent défaut, on pense qu'il se produit constamment des infiltrations d'eau du lac vers l'argile et les couches sableuses aquifères du pourtour nord du lac. On a trouvé que la salinité des puits dans ce secteur se révélait 10 fois plus élevée que celle des apports déversés par les cours d'eau. Par conséquent, on est amené à admettre que les infiltrations souterraines constituent probablement la voie principale par laquelle le sel est éliminé du lac. Compte tenu de la quantité de sel apportée dans le lac, on estime que vraisemblablement 65 à 165 m^3 par seconde (2 à 5 x 10^9 m^3 annuellement) d'eau saline s'échappent du lac.

4.1.2 Bassin du Niger

Le bassin versant du fleuve Niger comprend une grande partie du

territoire de quatre pays, la Guinée, le Mali, le Niger et le Nigeria, et de faibles parties de cinq autres pays, la Côte-d'Ivoire, la Haute-Volta, le Bénin, le Tchad et le Cameroun.

Le bassin du Niger a une longueur d'environ 4.000 km et une largeur de seulement 300 à 500 km. Il est difficile d'en établir les limites du périmètre vu qu'une appréciable portion du bassin consiste en des cours d'eau intermittents au Mali et au Niger. La superficie de la zone passant pour participer aux apports dans le Niger est estimée à 1.000.000 km^2, bien que l'aire totale du bassin soit d'à peu près 1.900.000 km^2. Du point de vue hydrologique, le bassin se compose de quatre secteurs: le cours supérieur en Guinée et au Mali, le Delta intérieur, la zone du Sahel, et la région humide nigérienne au-dessous de Niamey. Chacun de ces secteurs fait l'objet de l'exposé plus loin.

Quatre cours d'eau, le Mafou, le Niandan, le Milo et le Tinkisso, constituent les sources du fleuve. Ils se jettent dans ce dernier dans les montagnes de Fouta Djallon en Guinée, où la précipitation moyenne annuelle s'élève à 2.500 mm. Bien que tous ces cours d'eau aient été équipés de station de jaugeage, aucune information pour les stations guinéennes n'a été obtenue depuis 1957. Cependant, étant donné que les renseignements des stations guinéennes sont en bonne corrélation, croit-on, avec les données venant des stations maliennes en aval, il a donc été possible de calculer les débits pour la Guinée à partir des lectures des débits disponibles au Mali.

Un autre affluent du Niger est le Sankarani qui prend naissance en Guinée. Il rejoint le Niger en aval de la frontière avec le Mali. La station clé pour le mesurage des débits du haut Niger se trouve à Koulikoro. En effet, avec ses 70 années d'observations continues, cette station offre d'excellents documents permettant de retracer l'historique des caractéristiques des débits dans le haut Niger. Le débit moyen annuel à Koulikoro est de $47,9 \times 10^9$ m^3.

En sus des quatre cours d'eau susvisés constituant les sources du Niger et du Sankarini, il convient de citer le Bani qui représente une autre ressource hydraulique importante dans le bassin du Niger en Guinée et au Mali. Le Bani, qui draine un bassin de 129.500 km^2 situé à l'est du bassin amont du Niger, est formé par le Baoule, le Bagoe, et le Bafing. Son cours supérieur se trouve en Côte-d'Ivoire, dans une région similaire aux montagnes de Fouta Djallon en ce sens qu'elle a une précipitation moyenne annuelle de 2.500 mm. Cependant, comme cette région est située à une plus faible altitude que les montagnes de Fouta Djallon, il en résulte que le potentiel pour les apports dans le Bani est moindre que l'écoulement venant du cours supérieur du Niger. En conséquence, bien que le Bani draine une grande superficie, sa contribution, selon mesurage effectué à la station clé de Douna, est de $18,5 \times 10^9$ m^3. En aval de Douna, le débit de Bani diminue considérablement de volume par suite de l'évapotranspiration.

Le deuxième secteur hydrologique du bassin du Niger, soit le Delta intérieur, a une grande influence sur le débit du fleuve. Ce Delta est un immense réservoir naturel de marécages, et d'une multiplicité de canaux et de lacs. Sa taille varie avec les saisons, et occasionnellement elle atteint une superficie maximale de 80.000 km^2. Le réservoir en question a un effet tant bénéfique que défavorable sur les débits du Niger. En effet, d'un côté le Delta intérieur modère les débits de crue en agissant à la manière d'un vaste bassin de rétention, donc en régularisant utilement les débits en aval. D'un autre côté, la rétention des eaux fluviales favorise considérablement les pertes par évaporation et évapotranspiration. A titre d'illustration, on mentionnera qu'en fonction des mesurages des débits pris tant à Koulikoro qu'à Douna, on estime qu'une moyenne de 49 pour cent ou une gamme de 40 à 50 pour cent du débit total du fleuve sont perdues dans le Delta intérieur.

Le troisième secteur hydrologique, le secteur du Sahel, s'étend de Tombouctou à Niamey. Dans ce secteur, le fleuve Niger coule vers l'est le long de la "courbe", puis se dirige vers le sud. Sur les 700 km entre Tombouctou

et la frontière avec le Niger, le fleuve charrie un débit constant, bien qu'environ 10 pour cent de son volume se perdent par évaporation. Le fleuve Niger constitue l'unique ressource en eau dans cette région aride entre Tombouctou et la frontière avec le Niger.

Au sud de cette frontière, plusieurs affluents, prenant leur source en Haute-Volta, se déversent dans le fleuve et compensent virtuellement les pertes par évaporation. A partir de la frontière nigérienne jusqu'à Niamey, le débit du fleuve reste relativement uniforme. En règle générale, les niveaux maximum d'écoulement (c'est-à-dire le niveau maximum de crue) sont enregistrés à Niamey en janvier ou février, soit donc quelque quatre mois après la fin des pluies locales.

Le quatrième secteur hydrographique allant de Niamey à l'Atlantique, se caractérise par une grande augmentation dans les débits. En effet, au-dessous de Niamey, les affluents venant du Bénin accroissent les écoulements dans le Niger de telle manière qu'à Gaya, dans les environs de la frontière avec le Nigeria, le débit annuel du fleuve Niger est 14 fois plus élevé que celui mesuré à Niamey.

A Gaya, les niveaux maximum de crue survenant dans l'année se produisent d'abord en septembre après les pluies locales, puis en février lorsque les eaux de crue sortant d'autres secteurs hydrologiques atteignent Gaya.

En aval de Sokota, les apports d'eau des pluies locales au fleuve sont plus importants que ceux délivrés par les crues d'amont survenant en février. L'une des raisons expliquant le rapide accroissement du débit en aval vient du fait que le Niger s'écoule à travers le plateau du Jos qui se caractérise par de fortes pentes et d'abondantes précipitations. De plus, dans la partie aval du fleuve, les débits sont augmentés par l'écoulement sortant du bassin de la Bénoué Le débit moyen annuel de la Bénoué est d'ailleurs plus élevé que celui du Niger en amont de la confluence à Lokoja. Bien que le C.I.E.H. ne dispose pas de

données hydrologiques récentes venant du Nigeria et qu'il n'a donc pas été possible d'entreprendre l'analyse affinée de la partie du fleuve qui coupe le Nigeria, il est cependant admis que le Niger déverse quelque 175 x 10^9 m^3 d'eau annuellement dans le Golfe de Guinée.

En 1968, l'implantation du barrage de Kainji était achevée sur le Niger. Ce barrage a 8,3 kilomètres de long et 65,5 mètres de haut. Le lac de Kainji formé par le barrage en question a une superficie d'environ 1.250 km^2, et un volume de 15 x 10^9 m^3. Les apports annuels sont d'au moins trois fois la capacité de stockage de l'aménagement, ce qui résulte en un très rapide écoulement des eaux à travers ce dernier. La retenue accuse en moyenne un rabattement annuel de 10 mètres. La superficie ainsi exposée, lorsque s'abaisse le lac, puis submergée, lorsque celui-ci se remplit à nouveau, est considérable. Cependant, cette superficie n'est pas apte à la culture en raison même de sa caractéristique de dessèchement et de submersion.

4.1.3 Bassin de la Volta

Le bassin de la Volta recouvre une superficie de 398.860 km^2. Quatre-vingt pour cent du bassin sont situés en Haute-Volta et au Ghana, bien qu'il traverse également quatre autres pays: la Côte-d'Ivoire, le Bénin, le Togo et le Mali. Les parties amont du bassin se trouvent en Haute-Volta, tandis que l'embouchure est située dans le Golfe de Guinée. La distance totale séparant les parties amont du Golfe de Guinée est de 1.520 km. Ce bassin comprend plusieurs sous-bassins indépendants: la Volta Noire, la Volta Blanche et son affluent, la Volta Rouge, l'Oti, et le fleuve Volta lui-même.

4.1.3.1 Volta Noire

La Volta Noire prend naissance dans le Plateau de Banfora, dans l'ouest de la Haute-Volta, et s'écoule sur un parcours de 1.105 km avant d'atteindre le lac Volta au Ghana. Comme la plupart des cours d'eau du Sahel, la Volta

Noire se dirige d'abord vers le nord puis tourne en direction du sud, soit dans ce cas spécifique à la confluence avec le Sourou. En sus du fait qu'il sert de tributaire à la Volta Noire tout au long de l'année, le Sourou agit à la manière d'un bassin de rétention pour les eaux qui s'y déversent à partir de la Volta Noire pendant l'époque des crues. Cet apport de la Volta Noire dans le Sourou est estimé à 250 millions de mètres cubes. En raison de la largeur et de la faible profondeur du Sourou, la moitié environ de ce volume s'évapore tandis que l'autre moitié retourne dans la Volta Noire à la jonction entre les deux cours d'eau.

L'une des principales stations de jaugeage sur la Volta Noire est celle installée à Bui, soit à à peu près 130 km du lac Volta. Les enregistrements du débit moyen annuel de la Volta Noire à Bui accusent $7,78 \times 10^9 m^3$, dont approximativement $3,6 \times 10^9 m^3$ viennent de la Haute-Volta. L'écoulement annuel à Bui équivaut à environ six pour cent du volume total des précipitations se produisant dans le bassin de la Volta Noire. Le débit moyen mensuel tel que mesuré à Bui accuse 940 m^3/s pendant les périodes de hautes eaux (généralement en septembre) et 4 m^3/s au cours de l'époque d'étiage (d'ordinaire en mars).

4.1.3.2 Volta Blanche

Prenant sa source dans la Zone Sahélienne, la Volta Blanche ne coule donc qu'après des périodes de fortes pluies. Le lit du cours d'eau s'étend en pente douce, ce qui favorise la formation d'une série de réservoirs de faible profondeur. Ces réservoirs sont remplis d'eau durant l'époque des crues mais sont vides pendant celle de la sécheresse. Les tailles de ces réservoirs varient, pouvant atteindre 1 km de large dans les parties amont du bassin de la Volta Blanche.

Deux importants affluents, le Sissili et la Volta Rouge, rejoignent la Volta Blanche au Ghana et font passer à $7,8 \times 10^9 m^3$ le débit moyen annuel mesuré à Nawuni. Le débit total de la Volta Blanche ne représente qu'environ 10 pour cent de la hauteur de pluie tombant sur le bassin du fleuve Volta.

4.1.3.3 Oti

L'Oti prend naissance dans le nord du Bénin où les altitudes dépassant 600 mètres, associées à de fortes pentes, occasionnent un ruissellement élevé. L'écoulement annuel de l'Oti, tel qu'observé à Sabari, accuse une moyenne de $13,1 \times 10^9$ m^3, soit l'équivalent d'approximativement 16 pour cent du volume total des précipitations de la superficie contributive.

4.1.3.4 Volta

Avant que ne soit implanté le barrage d'Akosombo en 1964 et avant qu'ensuite ne soit créé le lac Volta, le fleuve Volta prenait sa source à la confluence de la Volta Noire et de la Volta Blanche. Depuis 1964, cette confluence ainsi que la plus grande partie du fleuve Volta ont été submergées par le réservoir. En aval du barrage d'Akosombo, le fleuve Volta continue sur une distance de 99 km jusqu'à la mer.

Le lac Volta a 400 km de long et couvre une surface de 8.730 km^2 pour une profondeur moyenne de 17 mètres lorsque rempli. Le lac est essentiellement alimenté par la Volta Noire, la Volta Blanche, et l'Oti, bien que plusieurs tributaires plus petits, comme le Daka, le Pru, l'Afram et le Gbanhou s'y déversent également. La capacité totale du lac a été estimée à 148×10^9 m^3. Environ un quart de l'ensemble de l'écoulement sortant du bassin du fleuve Volta est retenu dans le lac Volta. Quant au reste de cet écoulement, il est déversé dans le Golfe de Guinée, déductions faites des dérivations de l'aménagement d'irrigation d'Asutsuare et des pertes par évaporation et infiltration en cours de route.

4.1.4 Bassin du Sénégal

Le fleuve Sénégal a une longueur de plus de 1.800 km, et il draine un bassin d'une superficie de 290.000 km^2. Le fleuve évacue une moyenne annuelle de 20×10^9 m^3 dans l'Océan Atlantique. Le fleuve Sénégal proprement dit commence à estimativement 1.060 km en amont de l'Océan Atlantique à la

jonction des rivières Bafing et Bakoye. Presque tout le début du fleuve Sénégal, un total de 830 m^3/s au cours du mois de mai, vient de ses principaux affluents, le Bafing, le Bakoye, et la Falémé, ainsi que de ses tributaires secondaires comme le Kolombé et le Karakoro.

4.1.5 Bassin de la Gambie

Le bassin de la Gambie s'étend sur une superficie totale de 77.850 km^2. Environ 77 pour cent du bassin se trouvent au Sénégal, 14 pour cent dans la Gambie, et 9 pour cent en Guinée. Le fleuve Gambie constitue la principale ressource hydraulique du bassin.

Comme le Sénégal et le Niger, le fleuve Gambie prend naissance dans les montagnes de Fouta Djallon. La longueur totale du fleuve est de 1.184 km, dont environ 500 km (à compter vers l'amont à partir de l'embouchure) sont à marées. Au cours de la saison sèche, environ 250 km de cet estuaire sont salins.

Le long de son trajet des montagnes de Fouta Djallon à l'Océan Atlantique, les caractéristiques du fleuve connaissent des changements considérables. En effet, partant d'une altitude de 1.500 m la côte du fleuve, sur une distance de 300 km, tombe rapidement à 75 m à Mako, au Sénégal. Puis, il continue lentement en méandres à travers les 300 km du "bassin continental" jusqu'à Gouloumbo qui se trouve virtuellement situé au niveau de la mer. Finalement, il s'écoule sur 500 km sous des conditions de marées au niveau de la mer, jusqu'à l'Océan Atlantique.

Les rapports de Howard Humphreys (1974) et d'ORSTOM (1974) fournissent les informations hydrologiques de base pour le bassin du fleuve Gambie. Il n'y a qu'une station de jaugeage, Gouloumbo, à compter plus de six années d'observations, et avant 1970 les données y avaient été recueillies de façon très intermittente. Depuis 1970, de nombreuses stations ont été installées dans le bassin, notamment dans le "bassin continental" (voir Carte 4-1). Les renseigne-

ments obtenus jusqu'à présent ont été forcément affectés par la sécheresse et ils ne représentent donc pas des conditions moyennes. Cependant, les analyses préliminaires portent à penser que l'on pourrait utiliser les informations sur le fleuve Sénégal afin d'établir par extrapolation les données sur le débit du fleuve Gambie, ce qui ainsi compenserait pour les lacunes dans ces dernières.

Selon les renseignements obtenus de la station de jaugeage à Gouloumbo, le débit moyen annuel de la Gambie est d'environ 305 m^3/s et son débit de crue fréquentielle décennale est de 450 m^3/s. Environ 95 pour cent du débit annuel mesuré à Gouloumbo surviennent pendant les mois compris entre juillet et novembre.

4.1.6 Bassins de moindre importance

Afin de compléter la description des principaux bassins, il importe de mentionner les relativement petits mais importants cours d'eau qui se jettent au sud et à l'ouest directement dans le Golfe de Guinée et dans l'Océan Atlantique.

Les cours d'eau en question regroupent:

Au Sénégal	- la Casamance
En Guinée Bissau	- le Corubal, le Cacheu
En Guinée	- la Lopa, le St. Paul, le Konkouré, le Sangan
En Côte-d'Ivoire	- le Komoé, le Bandama, le Sassandra

La superficie totale du bassin versant de ces cours d'eau au sein de la savane est d'environ 290.000 km^2

Si on se réfère à la carte 4-2 on constate que tandis que la plupart des cours d'eau s'écoulant vers l'ouest traversent entièrement la région de savane, ceux se dirigeant vers le sud-ouest et le sud laissent la région de savane et entrent dans la zone de forêt de la Guinée avant d'atteindre l'océan.

Bien qu'aucune analyse détaillée de ces zones n'ait été effectuée, il semble cependant que les rendements dans le sud-ouest (Fouta Djallon) sont très élevés, plus de 600 mm par an (19,2 l/s/km^2), alors que ceux dans les régions du Sénégal (Casamance) sont bien plus faibles, probablement moins de la moitié de la valeur susvisée.

Finalement, il convient de signaler les bassins versants s'étendant au sud du bassin du lac Tchad, où la plupart des cours d'eau se jettent dans l'Oubangui. Tous les cours d'eau dans l'Empire Centrafricain sont relativement petits. A l'ouest, un cours d'eau plus important, le Mambéré se dirige directement vers le fleuve Zaïre (Congo) et plus loin encore à l'ouest, ceux qui prennent naissance dans le voisinage des montagnes du Mbang se jettent dans le Golfe de Guinée. La surface totale des bassins versants de ces cours d'eau excède 400.000 km^2.

Davantage à l'est, il y a des cours d'eau à hauts rendements qui se déversent dans le fleuve Zaïre. Les rendements spécifiques type sont provisoirement considérés comme atteignant 500 mm au moins (16,0 l/s/km^2), s'abaissant à 200 mm et moins (6,4 l/s/km^2) dans l'est.

4.2 DOCUMENTS ETUDIES

Les renseignements à propos des eaux de surface ont été essentiellement obtenus de trois sources. En premier lieu les monographies publiées par l'ORSTOM ont été étudiées pour le Chari, le Logone, le Niger, le Sénégal, et la partie du Sénégal du fleuve Gambie. Une monographie du système du fleuve Volta a été également achevée, mais elle n'a pas encore été mise en circulation. La partie amont de la Gambie fait l'objet d'un exposé dans un rapport préparé par Howard Humphreys (1974) pour compte du PNUD. Les études ORMSTOM sont exhaustives et généralement d'excellente qualité. Cependant, exception faite des études pour la Volta et la Gambie, les renseignements consignés ne prennent pas en compte les derniers neuf à treize ans, non plus les récentes années de sécheresse.

Une seconde source d'informations représentée par les récents recueils annuels des débits, publiés par les services hydrologiques nationaux des pays concernés ou par les services hydrologiques en question en collaboration avec l'ORSTOM, a été examinée. Les apports relatifs de l'ORSTOM varient selon les pays. En outre, on a constaté que la qualité des données dans les recueils annuels montrait une grande différence d'un pays à un autre (voir Tableau 4-1). Ces données ont donc été complétées par des rapports publiés par divers organismes à propos de projets spécifiques. Toutes les fois qu'il a été trouvé que les publications fournissaient des informations contradictoires, on a retenu l'information contenue dans la source la plus récente.

En général, la norme de l'ORSTOM pour le jaugeage des cours d'eau est très élevée et est basée sur la pose du moulinet en des points multiples. Le débit moyen quotidien est calculé en mettant en oeuvre un programme informatique dans lequel la courbe des débits jaugés est représentée par une série d'équations du second degré mathématiquement adaptées aux débits mesurés. Cette méthode, mise au point il y a seulement quelques années, a été utilisée dans toutes les récentes publications portant sur les renseignements de débits de cours d'eau, et elle explique dans une certaine mesure les divergences entre ces publications et les données mises en circulation dans le passé.

La troisième source de renseignements au sujet des eaux de surface a été les services hydrologiques nationaux des pays concernés. La disponibilité et l'accessibilité des données ont varié considérablement d'un pays à un autre. Les informations obtenues de ces sources contiennent indubitablement certaines erreurs. Les contrôles de qualité pour les stations concernées se sont clairement révélés justifiés en raison de comptes rendus douteux, mais leur vérification s'est avérée impossible du fait de considérations de temps. Il est vraisemblable que la mise à jour prévue pour les courbes de débits jaugés de certaines stations mettra en évidence certaines différences avec les données utilisées dans la présente étude pour les plus récentes années des observations. On pense néanmoins qu'en dépit d'éventuelles révisions à l'avenir la compilation de tous les renseigne-

TABLEAU/TABLE 4-1

ANNUAIRES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES AU C.I.E.H.

HYDROLOGIC YEARBOOKS AVAILABLE AT C.I.E.H.

PAYS/COUNTRY	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77
FRANCE D'OUTRE MER/ AFRIQUE FRANCOPHONE	X (1)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								
BENIN				X (2)	X (2)	X (2)	X (2)	X (2)												
CAMEROUN					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
COTE D'IVOIRE								X (3)	X X (3)	X X (3)	X X (4)	X X (5)	X X (6)	X X (7)	X X (7)	X X (7)				
EMP. CENTRAFRICAIN		X (8)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X (8)						
GAMBIE																				
GHANA		X (9)	X (9)	X (9)	X	X	X	X	X	X	X									
GUINEE																				
HAUTE-VOLTA								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
MALI												X	X	X						
NIGER									X	X	X	X	X	X	X (10)	X (11)	X (12)	X (13)	X (14)	X (15)
NIGERIA (Kano State)							X	X	X	X	X	X	X	X						
SENEGAL																		X	X	
TCHAD			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X (16)	X (16)	X	X	X	
TOGO		X (17)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X (17)						

Notes pour le Tableau 4-1/Footnotes to Table 4-1

1. CIEH a les annuaires des années 1949 à 1957/CIEH holds yearbooks for the years 1949 - 1957.
2. ORSTOM. Annuaires hydrologique du Dahomey, années 1961, 1962, 1963, 1964, 1965. Cotonou, 1967.
3. ORSTOM. Mesures de débits, années 1965, 1966, 1967. Adiopodoumé, 1969.
4. ORSTOM. Mesures de débits, année 1968. Adiopodoumé, 1969.
5. ORSTOM. Mesures de débits, année 1969. Adiopodoumé, 1970.
6. ORSTOM. Mesures de débits, année 1970. Adiopodoumé, 1971.
7. ORSTOM. Mesures de débits, années 1971, 1972, 1973. Adiopodoumé, 1974.
8. ORSTOM. Annuaire de la République Centrafricaine. (2 vols.). Bangui, 1971, 1972.
9. Ghana. Hydrological Services. The Volta River Basin hydrological data book. Accra, 1966.
10. ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger (le réseau Est-Nigérien). Niamey, 1973.
11. Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologique. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1973.
12. ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger (le réseau Est-Nigérien). Niamey, 1974.
13. Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologique. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1974.
14. Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologie. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1975.
15. Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologie. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1976.
16. ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad, année 1972. N'Djaména, 1973.
17. ORSTOM. Annales hydrologiques du Togo depuis la création des stations jusqu'à l'année hydrologique 1970-71. (2 vols.). Lomé, 1973, 1974.

ments pour les débits, particulièrement la prise en compte des années de sécheresse de 1969 à 1974, s'avère correcte.

On a procédé à l'examen des renseignements obtenus de quelque 340 stations sur les débits (carte 4-1) et on a jugé qu'environ la moitié de ces stations comptait une durée d'enregistrements suffisamment longue pour permettre d'effectuer des dérivations de moyennes sûres et d'entreprendre des analyses fréquentielles.

Les informations sur les débits des cours d'eau sont regroupées dans l'Annexe 4 (Volume 3) sous forme de débits moyens mensuels et annuels pour l'ensemble de la période des observations à toutes les stations présentant des durées significatives d'enregistrements. Par ailleurs, la même Annexe contient des tableaux de la distribution chronologique des modules, de la hauteur correspondante de la lame d'eau écoulée et des débits spécifiques. Ces tableaux donnent également des renseignements sur les débits de crue et les débits d'étiage, lesquels sont traités ailleurs dans le présent Chapitre.

Il importe de souligner ici que ces tableaux visent à fournir une indication d'ensemble pour la distribution dans le temps et l'espace des eaux de surface dans la région et que les tableaux en question n'entendent pas présenter des débits journaliers moyens qui sont essentiels pour les études opérationnelles des projets de mise en valeur hydraulique. Ces données de base doivent être demandées à l'ORSTOM ou aux services hydrologiques nationaux des pays concernés

4.3 METHODES ET RESULTATS

4.3.1 Débits annuels des cours d'eau

Les valeurs des débits annuels à long terme relevés à toutes les stations où les observations ont été faites sur une période de temps suffisamment longue, sont portées dans les Tableaux 4-2 à 4-7 (pages 4-21 à 4-25) avec également les volumes, la hauteur équivalente de la lame d'eau écoulée et les débits spécifiques. Ces tableaux donnent aussi les valeurs des débits susceptibles d'être attendus dans les cours d'eau pendant des années humides et de sécheresse pour des périodes de retour de 5 et 10 ans. De plus, les débits moyens sur des périodes humides de dix ans et sur des périodes sèches de dix ans sont montrés sur la Carte 4-2.

4.3.1.1 Période de référence

Dans le but d'obtenir des statistiques homogènes des valeurs moyennes au sein de chaque bassin versant important, ces valeurs ont été remenées à une base de temps commune au moyen de la régression amont-aval ou au moyen de la régression en fonction de stations dans les bassins versants avoisinants. Les stations pour lesquelles les coefficients de corrélation n'ont pas été trouvés sûrs dans la limite de 95 pour cent n'ont pas été prises en compte dans les Tableaux 4-2 à 4-7 ou sur la Carte 4-2. Cependant, le débit moyen annuel pour la totalité de la période des observations à ces stations peut être trouvé dans l'Annexe. La Figure 4-1 montre la distribution chronologique des débits annuels moyens aux principales stations de jaugeage sur les fleuves Niger, Chari, Sénégal, et Volta Noire.

Les moyennes annuelles à long terme de la série des relevés ont été déterminées en additionnant les débits mensuels moyens. En conséquence, les informations obtenues pendant les années pour lesquelles existent des lacunes dans les enregistrements des débits, sont englobées dans cette analyse.

4.3.1.2 Variabilité

Les valeurs des débits annuels attendus pour des périodes de cinq et

dix ans ont été établies en adaptant les distributions fréquentielles à la série de débits annuels.

Bien que ces distributions se soient généralement révélées normales il n'en demeure pas moins qu'en certains cas un meilleur agencement a été obtenu avec la distribution log-normale. Le coefficient de variation, égale à l'écart-type divisé par la moyenne, a été calculé pour chacune des stations et figure dans les Tableaux 4-2 à 4-7.

4.3.1.3 Hauteur équivalente de la lame d'eau écoulée

La hauteur moyenne équivalente de la lame d'eau écoulée sur l'ensemble du bassin en amont de chaque station de jaugeage est indiquée dans les Tableaux 4-2 à 4-7. Les hauteurs de la lame d'eau écoulée sur les bassins versants situés entre les stations de jaugeage figurent également sur la Carte 4-3 qui donne, en outre, les isohyètes annuelles.

Les valeurs des écoulements sur la Carte 4-3 ont été calculées comme représentant la différence entre les débits des deux stations divisée par la différence dans les superficies des bassins versants. Les valeurs négatives indiquent des secteurs dans les bassins du Chari, du Logone, de la Volta et du Sénégal où les débits passant par-dessus les berges engendrent des pertes par évaporation qui ne sont pas compensées par la pluviométrie et l'écoulement. Les pertes dans les parties aval des bassins du Chari et du Logone ne sont pas portées sur cette Carte 4-3 vu que les valeurs obtenues pour ces secteurs ne se sont pas révélées compatibles avec les bassins versants en amont.

4.3.1.4 Bilan hydrique

Aucune tentative ne sera faite ici dans le but d'assigner des valeurs numériques à l'équation du bilan hydrique, étant donné que dans la majorité des cas cette équation ne peut pas améliorer l'exactitude des données sur les ressources

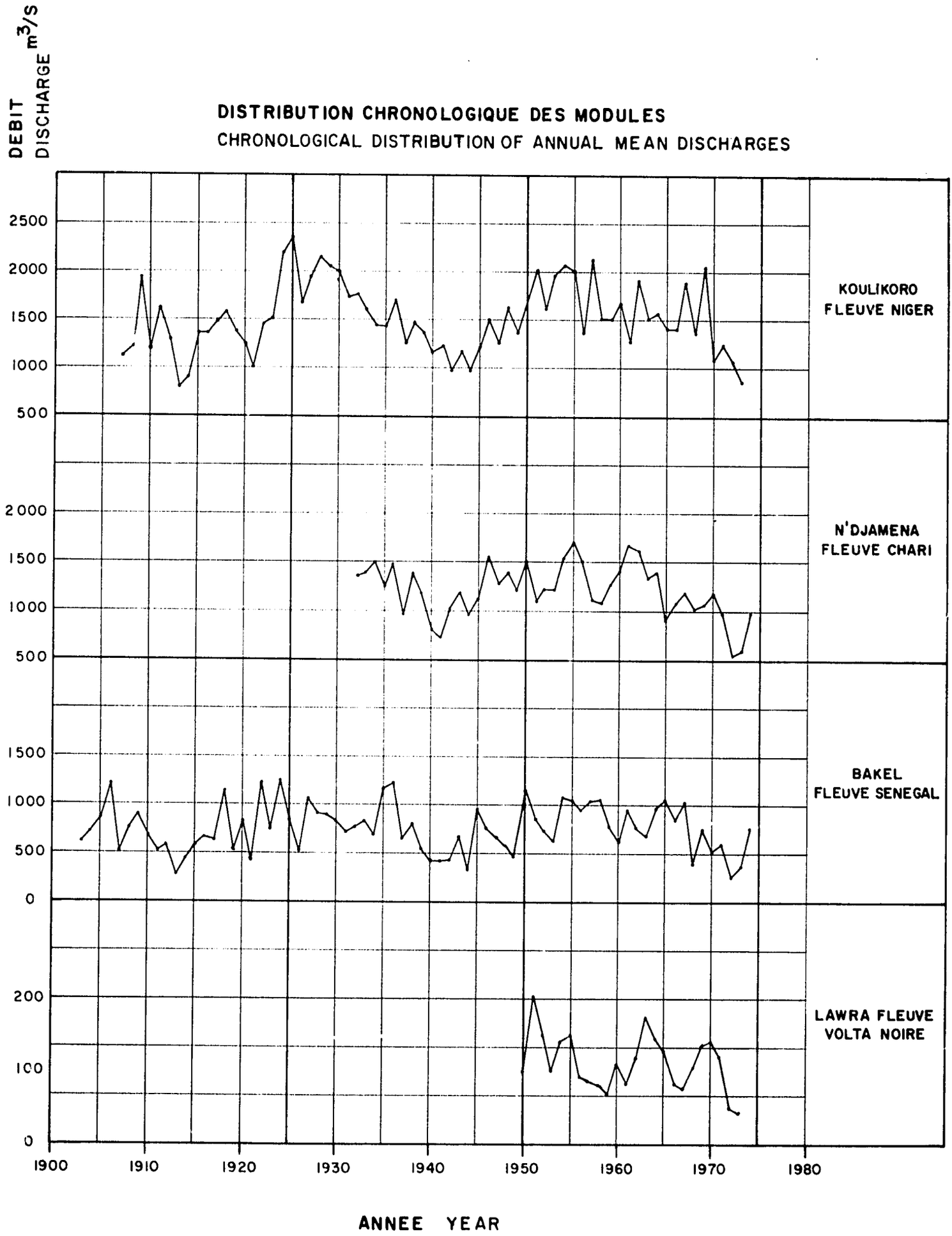

DEBIT
DISCHARGE m3/S
DISTRIBUTION CHRONOLOGIQUE DES MODULES
CHRONOLOGICAL DISTRIBUTION OF ANNUAL MEAN DISCHARGES
2500
2000
1500
1000
500
KOULIKORO
FLEUVE NIGER
2000
1500
1000
500
N'DJAMENA
FLEUVE CHARI
1500
1000
500
0
BAKEL
FLEUVE SENEGAL
200
100
0
LAWRA FLEUVE
VOLTA NOIRE
1900
1910
1920
1930
1940
1950
1960
1970
1980
ANNEE YEAR

Fig. 4-1

Tableau 4-2 — Débit Annuel — Bassin du Chari — 1932 - 1974

Cours d'eau	Station	débit ($m^3 s^{-1}$) période de retour (ans) sec 10	5	moyen	humide 5	10	Volume Mm^3	écoulement moyen mm	débit spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$	Coeff. de var. CV	Superficie Km^2
Bahr Aouk	Golongosso	45	53	75	94	105	2365	25	0,8	0,29	96000
Bahr Azoum	Am Timan	10	15	29	42	50	915	11	0,4	0,39	80000
Bahr Sara	Moissala	260	320	495	610	690	15600	230	7,3	0,34	67700
Bamingui	Bamingui	8	11	21	30	36	662	151	4,8	0,47	4380
	Manda	280	350	525	620	700	16600	209	6,6	0,33	79600
Fafa	Bouca	25	30	46	55	60	1450	215	6,8	0,35	6750
Gzibingui	Crampel	18	21	27	34	38	851	150	4,8	0,25	5680
Ouham	Bozoum	70	76	90	110	120	2840	350	11,1	0,20	8100
	Bossangou	180	195	232	275	300	7320	321	10,2	0,19	22800
	Batangafo	260	270	316	390	440	9970	223	7,1	0,21	44700
Chari	Sarh *	150	190	299	365	400	9430	49	1,6	0,34	193000
	Bousso	550	620	832	1020	1130	26200	58	1,8	0,26	450000
	Guelendeng	670	720	820	1020	1170	25900	55	1,7	0,21	470000
	Mailao	440	550	834	1020	1170	26300	53	1,7	0,34	500000
	N'Djamena *	880	990	1217	1460	1600	38400	64	2,0	0,25	600000

Tableau 4-3 Débit Annuel Bassin du Logone 1932 - 1974

Cours d'eau	Station	débit ($m^3 s^{-1}$) période de retour (ans) sec 10	5	moyen	humide 5	10	Volume Mm^3	écoulement moyen mm	débit spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$	Coeff. de var. CV	Superficie Km^2
Pendé	Begouladge	60	64	72	86	95	2270	402	12,9	0,17	5640
	Gore	55	75	129	165	185	4070	339	10,7	0,41	12020
	Doba C.	60	80	135	165	180	4260	298	9,4	0,37	14300
M'Béré	M'Béré	65	78	109	140	165	3440	463	14,7	0,30	7430
Tandile	Tchoa	7.0	8.7	13.3	17.2	20	419	71	2,3	0,37	5870
Logone	Moundou	260	300	383	440	475	12100	356	11,3	0,21	33970
	Lai	320	375	510	620	690	16100	284	9,0	0,29	56700
	Bongor	365	420	539	620	660	17000	231	7,3	0,21	73700
	Logone G.	240	280	382	430	455	12000	160	5,1	0,23	75000

Tableau 4-4 — Débit Annuel — Bassin de la Volta

Cours d'eau	Station	débit ($m^3 s^{-1}$) période de retour (ans) sec 10	5	moyen	humide 5	10	Volume Mm^3	écou-lement moyen mm	débit spécifique $l s^{-1} Km^{-2}$	Coeff. de var. CV	Superficie Km^2
I. Volta Noire											
Kou	Nasso	3,0	3,7	5,5	6,4	7,0	173	428	13,5	0,24	405
Volta Noire	Samendeni	11	13	19	23	25	599	131	4,1	0,24	4580
	Nwokuy	15	20	36	42	45	1140	77	2,4	0,38	14800
	Kouri	18	22	32	43	50	1010	49	1,5	0,36	20800
	Manimenso	18	21	30	36	40	946	30	0,9	0,29	32000
	Boromo	28	32	43	50	55	1360	27	0,9	0,26	50000
	Ouessa	43	51	72	86	95	2270	37	1,2	0,29	62000
	Lawra	57	72	113	140	160	3560	38	1,2	0,37	93965
	Bui	150	180	243	340	400	7660	61	1,9	0,40	125000
	Bamboi	120	152	254	345	410	8010	60	1,9	0,39	134200
2. Volta Blanche											
	Nawuni	160	185	248	310	350	7820	84	2,7	0,29	92950
	Yapei	180	210	275	340	370	8670	90	2,9	0,26	96320
3. Oti											
Pendjari	Porga	35	45	71	87	100	2240	101	3,2	0,35	22280
Magou	Tiele	2	3	5	7	8	156	187	6,0	0,49	836
Keran	Titira	25	30	42	54	60	1320	357	11,4	0,31	3695
Oti	Mandouri	55	68	102	125	140	3220	111	3,5	0,37	29100
	Sansanne M.	60	80	138	180	210	4350	122	3,9	0,42	35650

Tableau 4-5 Débit Annuel Bassin du Niger 1907-1973 (I)

Cours d'eau	Station	débit ($m^3 s^{-1}$) période de retour (ans) sec 10	5	moyen	5 humide	10	Volume Mm^3	écou-lement moyen mm	débit spécifique $l s^{-1} Km^{-2}$	Coeff. de var. CV	Superficie Km^2
Milo	Kankan	160	170	195	235	260	6150	621	19,7	0,19	9900
Niandau	Baro	180	200	246	300	340	7760	616	19,5	0,20	12600
Baoulé	Bougouni	95	105	128	155	175	4040	257	8,2	0,22	15700
Bagoé	Guinguerini	9	11	15	19	22	473	454	14,4	0,28	1042
	Pankourou	110	150	256	310	350	8070	254	8,1	0,37	31800
Bani	Douna *	320	400	587	780	900	18500	182	5,8	0,32	101600
Niger	Kouroussa	165	185	234	290	340	7380	410	13,0	0,27	18000
	Siguiri	750	810	943	1200	1340	29700	424	13,5	0,20	70000
	Koulikoro *	1060	1200	1520	1800	2000	47900	399	12,7	0,24	120000
	Kirango	1100	1200	1396	1600	1700	44000	321	10,2	0,15	137000
	Tilembeya	700	780	954	1100	1210	30000	208	6,6	0,20	144000
	Mopti *	925	1000	1149	1300	1400	36200	128	4,1	0,14	281600
	Dire *	870	950	1160	1320	1450	36600	108	3,4	0,19	340000
	Tossaye	840	910	1125	1290	1400	35500	100	3,2	0,19	355000
	Ansongo	825	870	1020	1150	1215	32200	71	2,2	0,14	455000
	Niamey *	700	800	1050	1180	1260	33100	47	1,5	0,20	700000
	Gaya	900	1000	1200	1380	1500	37800	38	1,2	0,17	1000000
Gorauol	Alconqui *	3,5	4,3	6,4	8,5	10	202	4,5	0,14	0,38	44850

(I) 1952-1975 pour les affluents au Niger

Tableau 4-6 Débit Annuel Bassin du Sénégal 1903-1974

Cours d'eau	Station	débit ($m^3 s^{-1}$) période de retour (ans) sec 10	5	moyen	5	humide 10	Volume Mm^3	écoulement moyen mm	débit spécifique $l s^{-1} Km^{-2}$	Coeff. de var. CV	Superficie Km^2
Bafing	Dakka Saidou	190	220	272	340	375	8580	546	17,3	0,22	15700
	Dibia	270	320	414	510	560	13100	397	12,5	0,25	33000
Bakoye	Toukoto	50	60	87	120	135	2740	166	5,4	0,33	16500
	Oualia	75	100	162	220	245	5110	60	1,9	0,37	85600
Falémé	Tadougou	65	80	113	150	175	3560	383	12,1	0,31	9300
	Gourbassi	80	100	160	200	225	5050	337	10,7	0,30	15000
	Kidira	100	130	192	250	290	6050	209	6,6	0,34	28900
Sénégal	Galongo *	370	440	593	760	860	18700	147	4,7	0,29	126900
	Kayes	360	440	613	780	870	19300	123	3,9	0,30	157400
	Bakel *	430	540	754	985	1100	23800	109	3,5	0,33	218000
	Matam	425	540	763	1000	1120	24100	105	3,3	0,33	230000
	Dagana	460	540	684	820	890	21600	81	2,6	0,23	268000

Tableau 4-7 Débit Annuel Bassin de la Gambie 1903-1974

Gambie	Gouloumbo	165	210	300	400	450	9460	225	7,1	0,34	42000

* Stations DHI (Décade Hydrologique Internationale)

hydrauliques pour la zone d'un projet. La marge d'erreur impliquée dans l'estimation de la précipitation sur un bassin versant sera généralement plus élevée que l'écoulement total. Cette erreur se manifeste du reste également dans le calcul des pertes réelles par évapotranspiration.

Il est possible qu'une équation de bilan hydrique pourrait être utilisée afin d'estimer l'évapotranspiration d'une superficie de grande envergure. Sur une base annuelle et dans la plupart des bassins versants dans cette région, l'écoulement souterrain est négligeable par rapport à l'importance des autres termes de l'équation du bilan hydrique. En conséquence, les estimations des pertes par évapotranspiration seront toujours davantage réalistes que les estimations basées sur les modèles prenant en compte l'humidité du sol.

On voudra noter que les différences entre la précipitation et la lame d'eau écoulée montrées sur la Carte 4-3 n'indiquent que des estimations approximatives vu que les périodes de référence utilisées pour l'écoulement diffèrent de celles liées à la précipitation et que l'aire de cette dernière ne peut être évaluée que par inspection.

4.3.2 Débits mensuels des cours d'eau

Tous les régimes des cours d'eau dans la région de savane se caractérisent par de grandes variations dans les débits entre la saison humide et celle de la sécheresse. C'est ainsi que dans de nombreux cas il se produit un complet tarissement pendant plusieurs mois. Même les plus grands cours d'eau montrent de larges variations dans leurs débits comme cela est du reste illustré par la variabilité des débits mensuels dans le Tableau 4-8.

Dans le but d'assurer l'uniformité, toutes les données sur les débits présentées dans l'Annexe ont été arrangées de manière que l'année hydrologique commence le premier jour du mois de mai. Ce choix se justifie du fait que la grande majorité des cours d'eau dans la savane transportent des débits minimum

pendant le mois d'avril, exception faite toutefois ici pour le fleuve Niger comme le montrent les relevés des débits de ce dernier.

En raison de la grande longueur du fleuve Niger, les débits maximum prennent plusieurs mois pour couvrir le trajet d'amont en aval. C'est ainsi que ces débits dans le fleuve risquent de se produire en septembre à Koulikoro (voir Figure 4-4), en décembre à Dire, et en janvier à Niamey. Plus loin en aval, à Gaya (Figure 4-5), deux pointes de semblable envergure sont observées, la première en septembre et la seconde en février. La première pointe résulte des apports venant des bassins versants tributaires avoisinants, tandis que la seconde pointe prend naissance à 2.500 km en amont.

Les Figures 4-2 à 4-7 donnent des exemples de la variabilité des débits moyens mensuels. Les débits pour les paliers de probabilité choisis (soit les 10, 25, 50, 75, et 90 pour cent de chance de retour) ont été déterminés en ajustant la distribution fréquentielle log-normale à la série des débits mensuels. Comme on peut s'y attendre, les débits mensuels montrent une très large variation, particulièrement au cours des mois humides.

TABLEAU 4-8

DEBITS MOYENS MENSUELS A DES STATIONS SELECTIONNEES

COURS D'EAU	STATION DE JAUGEAGE	MOIS MAXIMUM		MOIS MINIMUM	
		$m^3 s^{-1}$	Mois	$m^3 s^{-1}$	Mois
CHARI	N'Djamena	5.090	Oct.	73,0	Mai
LOGONE	Lai	1.805	Sept.	58,0	Avril
VOLTA NOIRE	Bamboi	941	Sept.	32,0	Mars
NIGER	Koulikoro	5.257	Sept.	66,0	Avril
NIGER	Niamey	1.761	Janv.	106,0	Juin
SENEGAL	Bakel	3.329	Sept.	8,9	Mai
GAMBIE	Goloumbo	1.208	Sept.	5,0	Mars

4.3.3 Débits de crue

Parmi les 340 stations de jaugeage examinées dans le cadre des travaux du présent rapport, environ 120 fournissent des renseignements sur les débits qui sont de qualité, continuité et durée suffisamment satisfaisantes pour permettre d'entreprendre avec grande confiance l'évaluation statistique des débits de crue de la période de retour décennal. Il arrive même que dans certains cas les périodes d'observations se sont étendues assez longtemps pour qu'il soit possible d'obtenir une évaluation de la valeur des débits de crue au niveau fréquentiel centennal. Il va cependant de soi que ces dernières estimations doivent être considérées avec prudence en raison du manque de renseignements historiques à très long terme et d'informations sur les changements survenus dans les lits des cours d'eau dans les endroits où se trouvent situées les stations de jaugeage.

On n'a pas tenté de faire l'évaluation des débits de la crue maximale, évaluation généralement fondée sur l'analyse météorologique des gros orages enregistrés, ce qui mène à déterminer la précipitation maximum probable, ainsi que les apports venant des bassins versants tributaires. Le problème devient extrêmement complexe dans les vastes bassins versants des régions tropicales de savane, là où la pointe de la crue maximale constitue un phénomène saisonnier résultant de l'effet cumulé de nombreux orages sur des superficies partielles, de la contribution d'événements et d'affluents inhabituels. Le stockage dans le lit et la vallée a une évidente incidence sur les hydrogrammes saisonniers, en ce sens qu'il modifie les contributions à court terme et accroit la durée de la submersion saisonnière. Les recherches visant à établir la preuve historique des grandes crues du passé constituent une partie importante de telles investigations.

Les crues les plus courantes sur les bassins de plus grande taille et probablement les crues maximales sur les plus petits bassins, résultent de grains de largeur limitée qui se déplacent de l'est vers l'ouest à travers la zone du projet. Souvent, ces grains ne perdent pas de leur intensité au fur et à mesure de leur déplacement vers l'ouest car l'eau qui a été condensée est continuellement

DEBITS MOYENS MENSUELS SELON LEURS FREQUENCES
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MONTHLY FLOWS

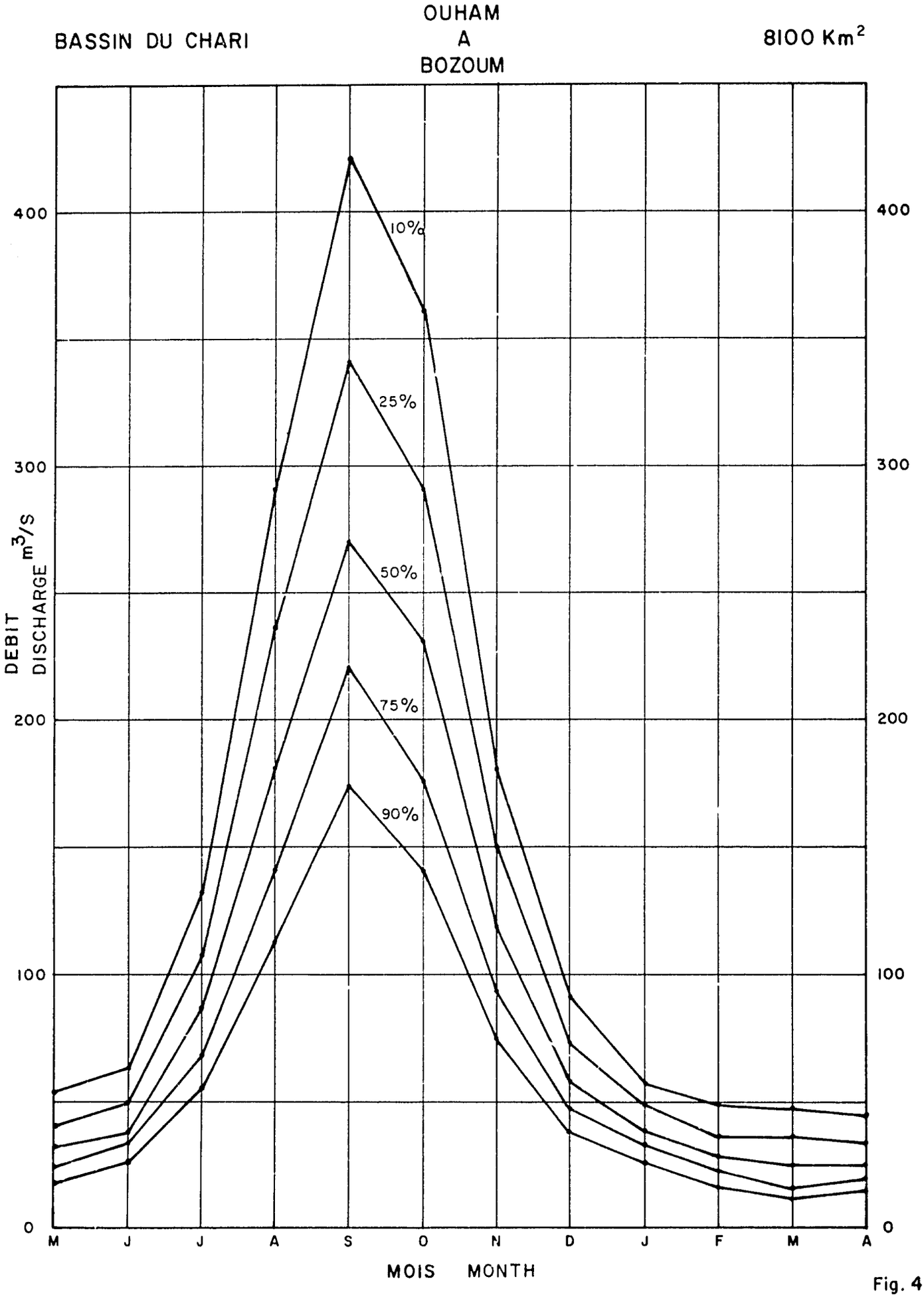


Fig. 4-2

DEBITS MOYENS MENSUELS SELON LEURS FREQUENCES
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MONTHLY FLOWS

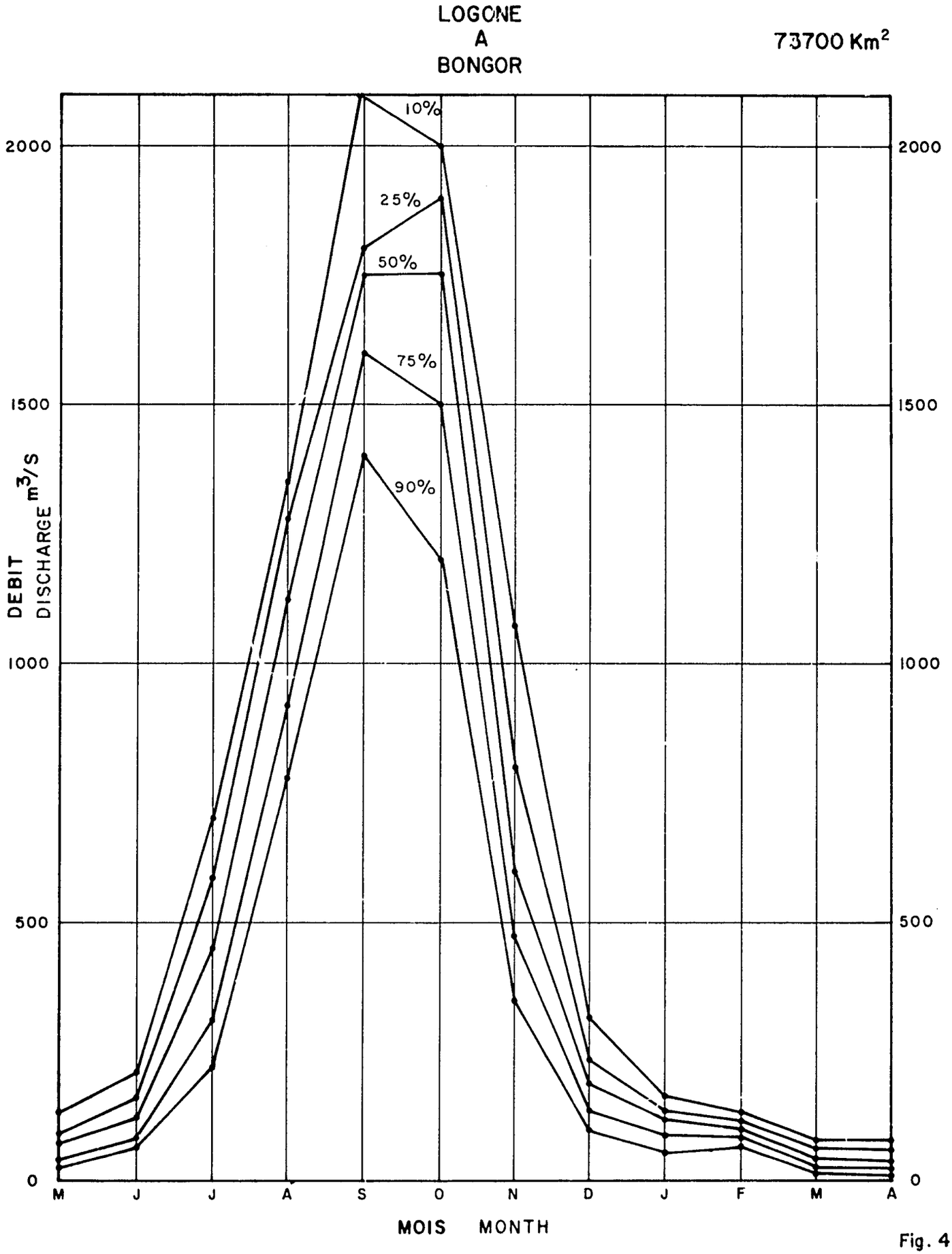


Fig. 4-3

DEBITS MOYENS MENSUELS SELON LEURS FREQUENCES
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MONTHLY FLOWS

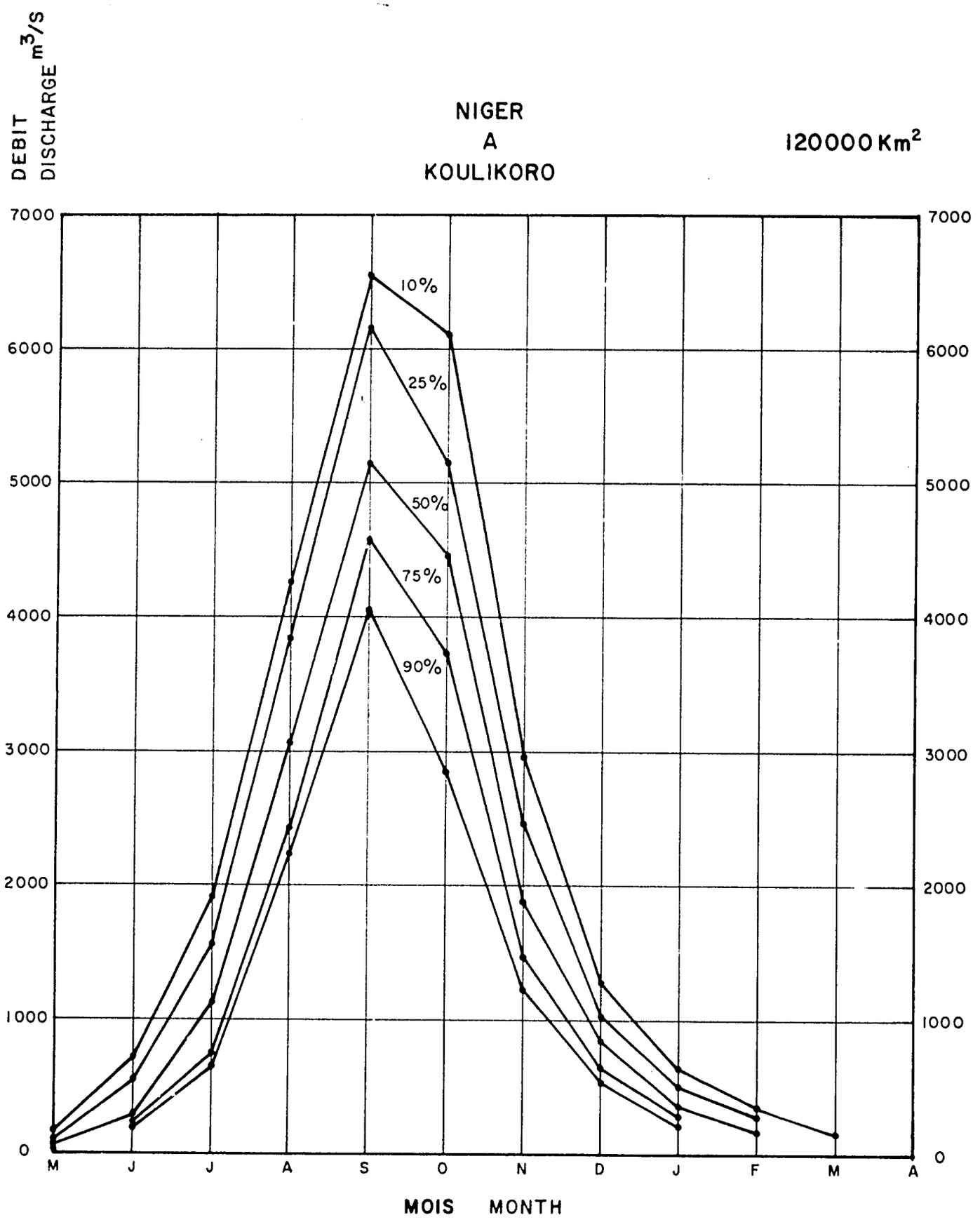


Fig. 4-4

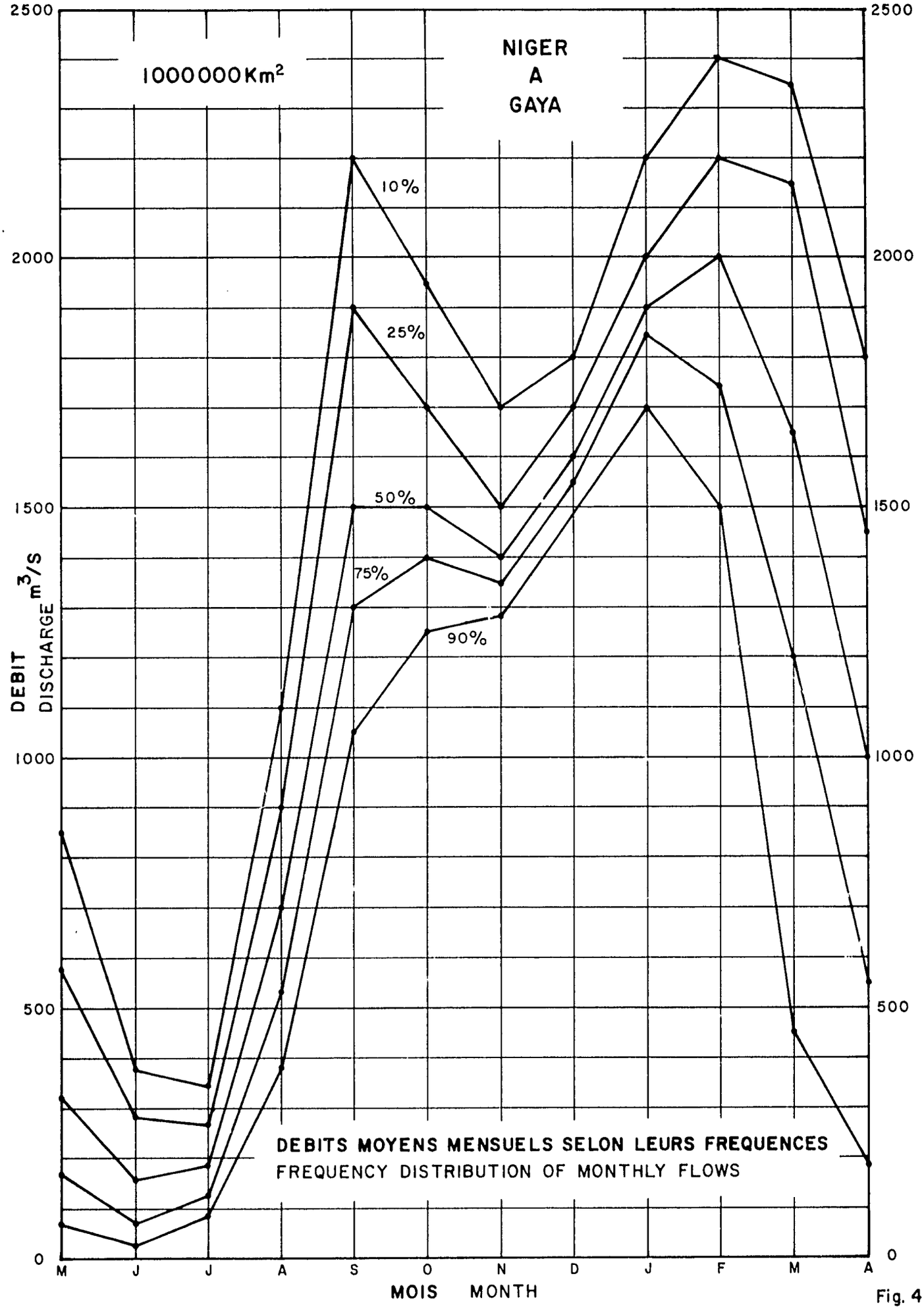

NIGER
A
GAYA
1000000 Km²
10%
25%
50%
75%
90%
DEBIT
DISCHARGE m³/S
2500
2000
1500
1000
500
0
M
J
J
A
S
O
N
D
J
F
M
A
MOIS MONTH
DEBITS MOYENS MENSUELS SELON LEURS FREQUENCES
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MONTHLY FLOWS

Fig. 4-5

DEBITS MOYENS MENSUELS SELON LEURS FREQUENCES
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MONTHLY FLOWS

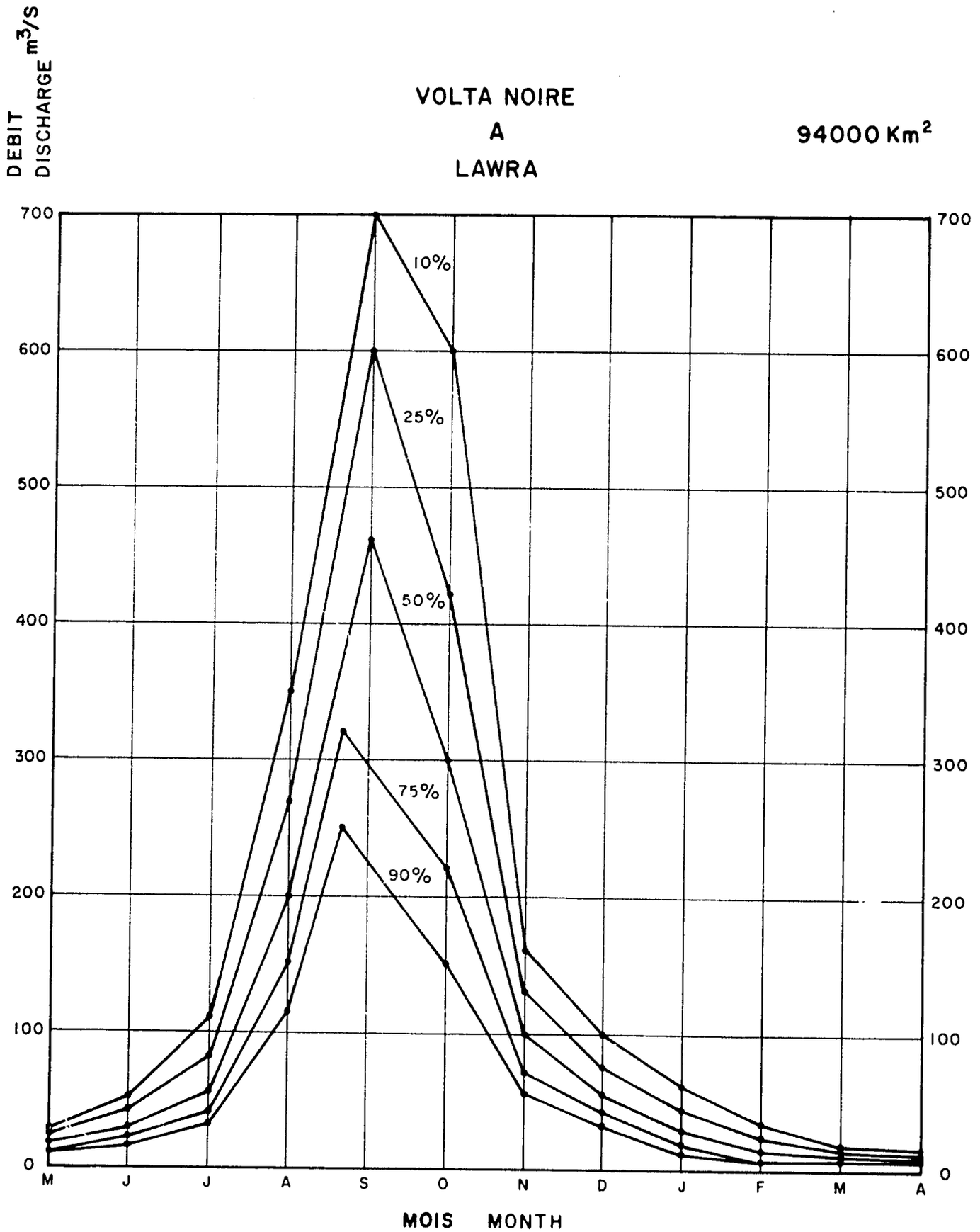


Fig. 4-6

DEBITS MOYENS MENSUELS SELON LEURS FREQUENCES
FREQUENCY DISTRIBUTION OF MONTHLY FLOWS

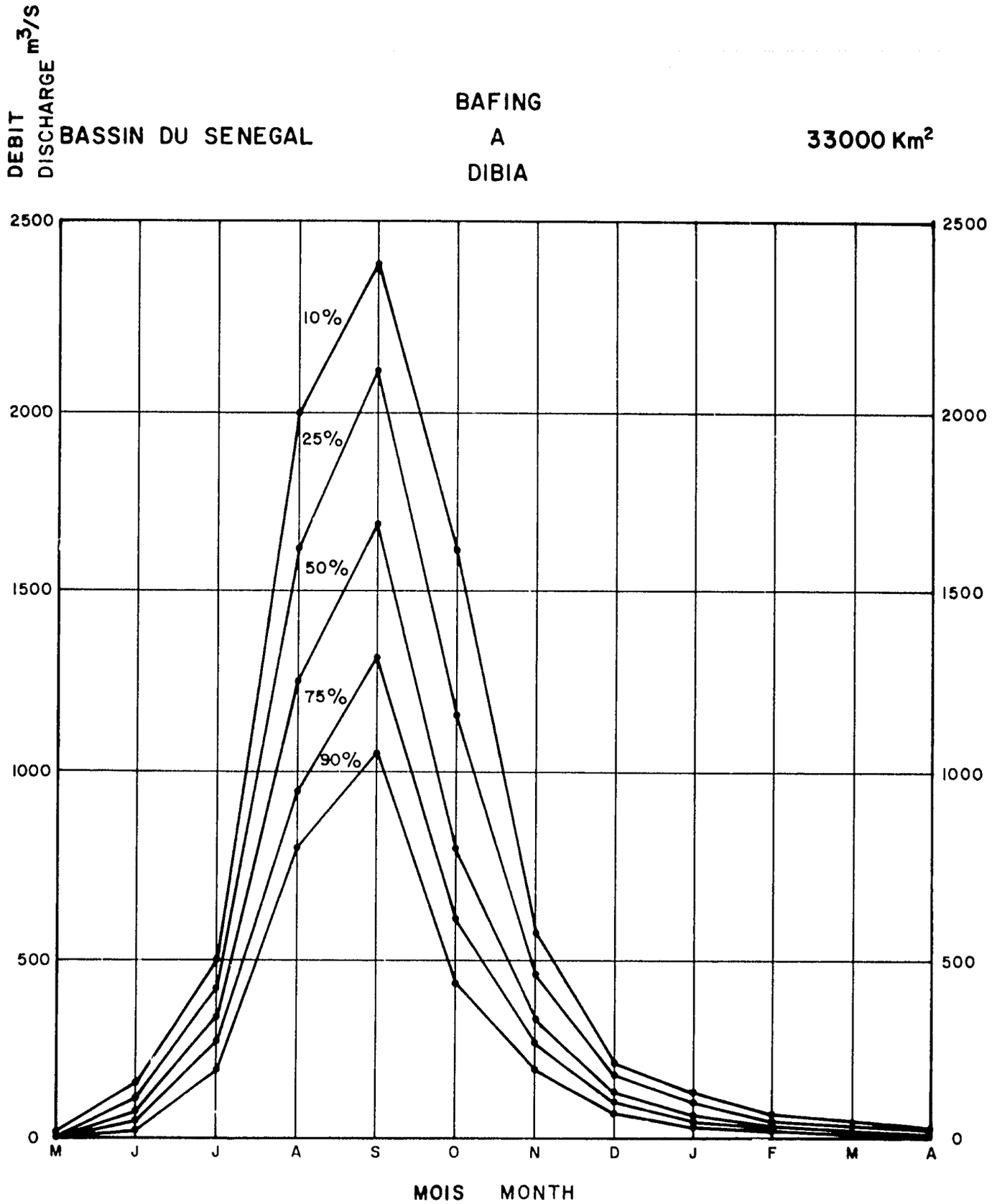


Fig. 4-7

remplacée par des apports d'humidité. Une étude des averses de haute intensité (Mounis, 1975) a révélé que la durée de ces dernières atteignait rarement une heure en Afrique Occidentale (voir les enregistrements pour Ouagadougou dans la Figure 4-8). La courte durée des averses de haute intensité empêche donc à ces événements d'atteindre des hauteurs totales élevées (voir Carte 4-4). De telles précipitations donnent naissance à des crues maximales sur de petits bassins mais n'impliquent à un quelconque moment donné que de petites parties des bassins de plus grande taille. Cependant, il semble qu'en de rares occasions le mouvement général des masses d'air de mousson soufflant d'est en ouest, accompagnées par des grains d'extension latérale limitée, peut être interrompu par l'effondrement de la pression du haut Sahara (ASECNA, 1966). Si cet événement se produit à un moment où le haut Sud empiète sur le continent africain, on peut alors enregistrer d'abondantes précipitations d'une durée de plusieurs jours sur de vastes superficies, ce qui donne lieu à de forts débits de crue sur des bassins versants de large envergure.

Etant donné que les crues maximales des grands bassins versants peuvent être produites par des situations climatiques différentes de celles occasionnant plus souvent des crues plus faibles, il s'ensuit que l'on ne peut se reposer sur les analyses statistiques, prenant seulement en compte une ou deux grandes crues, pour prévoir les crues nominales ayant des périodes de retour de mille ans ou davantage.

4.3.3.1 Evaluation des débits de crue

Les relations débits de crue-fréquence ont été basées sur la série annuelle maximale compilée en partant des enregistrements hydrologiques. Dans tous les cas, le débit de pointe utilisé a été le débit moyen journalier. Ce chiffre différera du débit de pointe instantané en ce qui a trait aux bassins versants plus petits. Bien que des méthodes mathématiques convenant à la dérivation des courbes de fréquence par informatique soient disponibles (Chow, 1964) et, bien entendu, présentées dans l'Annexe 4, on a néanmoins reporté les données de base sur du

papier à échelle fonctionnelle des probabilités totales et on a tracé des courbes graphiques des moyennes. De la sorte, on a pu indiquer le manque d'adaptation des plus fortes crues à la relation théorique.

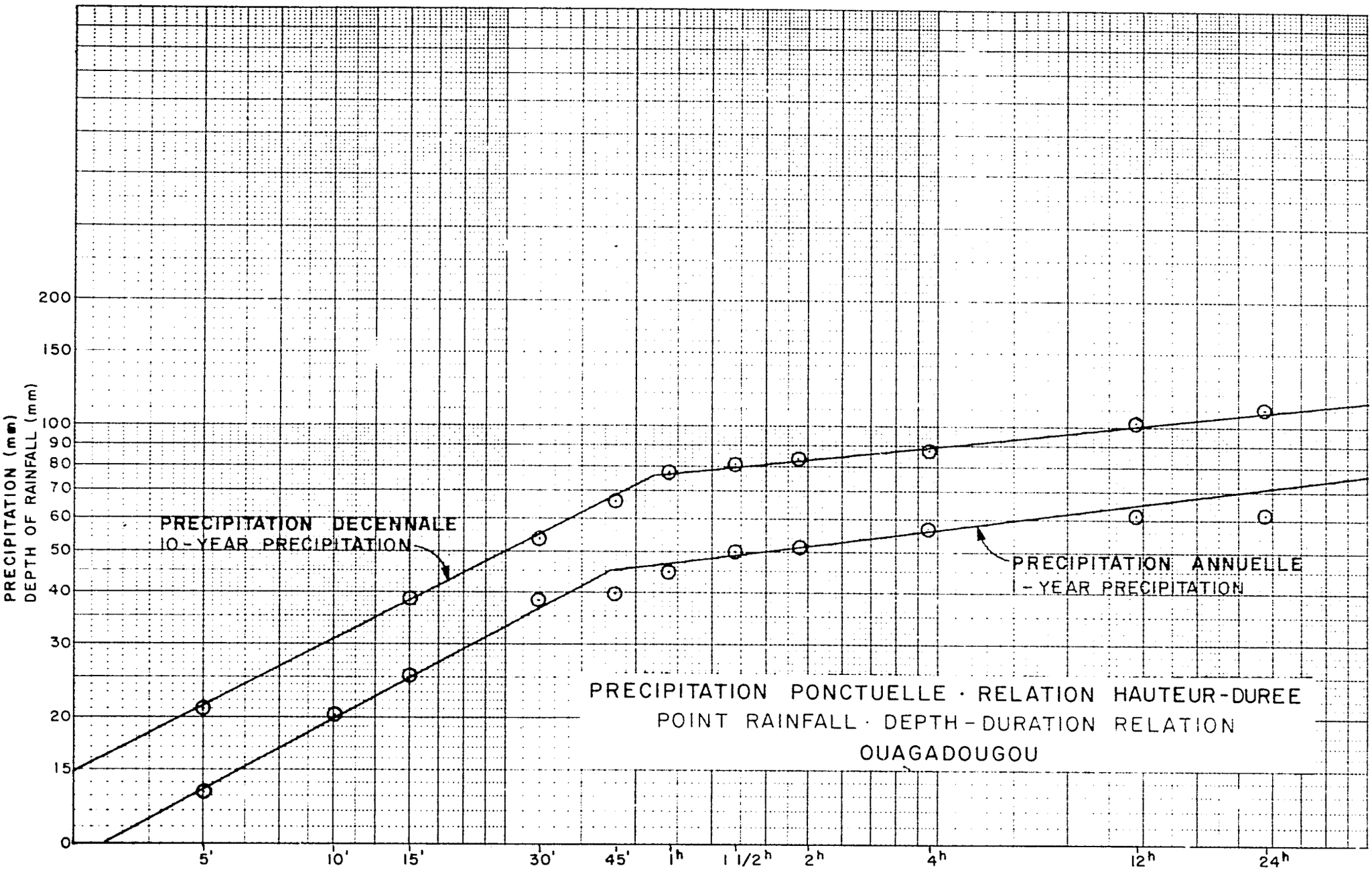
On retiendra qu'en dépit du fait que la mojorité des stations fournit des séries annuelles maximales distribuées suivant la distribution log-normale, les stations présentant des échantillons normalement distribuées ne sont pourtant pas rares dans la zone du projet. Quelques stations, dans les secteurs où des débits considérables passent par-dessus les berges, présentent des distributions hypogaussiennes pour les débits de crue. On a trouvé un cas où il a semblé que la distribution fréquentielle convenant le mieux était log-extrême; ce sont les débits "maliens" ("noirs") du fleuve Niger à Gaya dans le voisinage de l'arrivée du cours d'eau au Nigeria.

Des exemples type de différentes distributions de fréquences adaptées aux séries des débits maximum annuels sont montrés sur les Figures 4-9 à 4-15.

4.3.3.2 Crues décennales

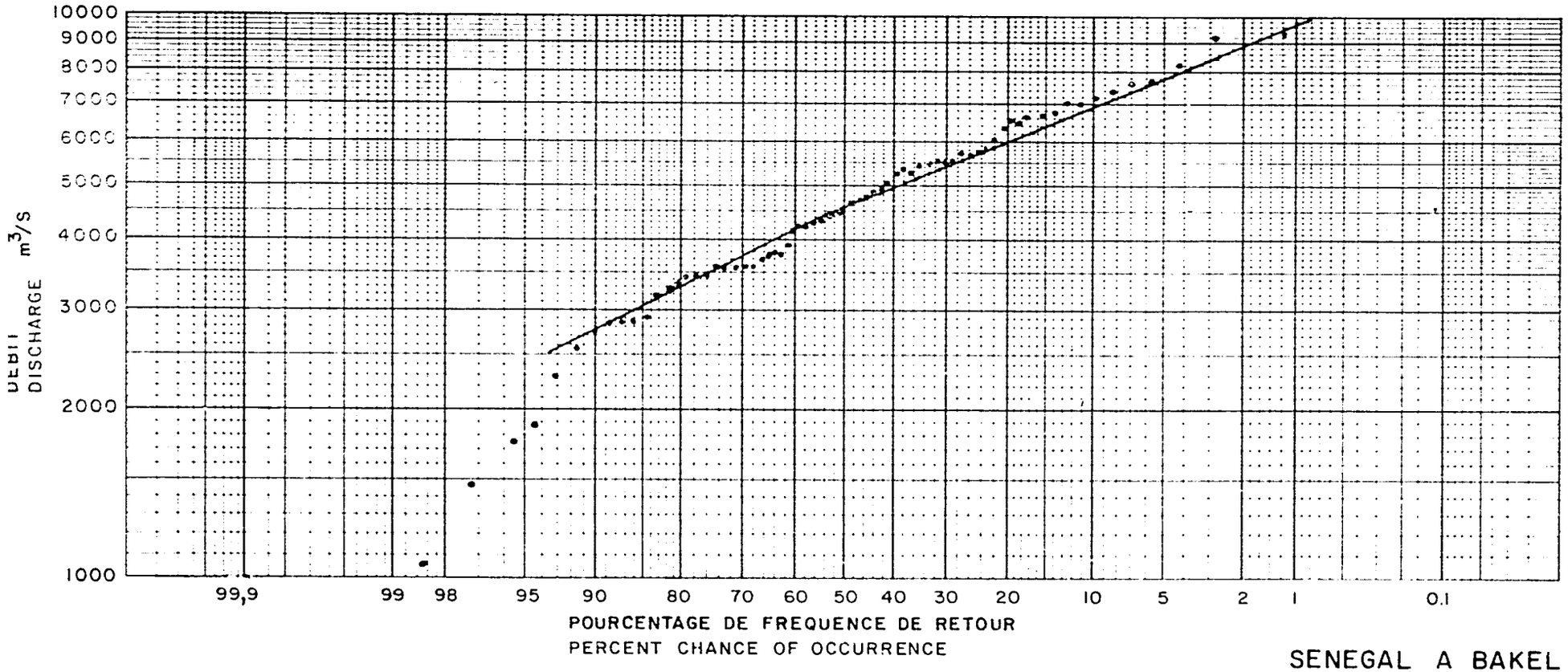
Les Tableaux 4-9 à 4-14 inclusivement fournissent les estimations des crues décennales, compte tenu tant des relations de la fréquence théorique que des interprétations graphiques des renseignements tracés en diagramme. Toutes les valeurs des débits contenues dans ces tables sont reproduites sur la Carte 4-4 avec les valeurs des débits spécifiques. La relation entre l'envergure de la crue décennale et la superficie du bassin versant, (présumée ici pour être de la forme $Q = AS^n$), a été déterminée pour chaque bassin au moyen de la méthode des moindres carrés. Ces relations ainsi que le coefficient de corrélation (r) sont indiqués dans le Tableau 4-15.

Dans le but de définir la plus haute limite probable dans les débits des crues décennales, des courbes enveloppe ont été tracées pour chaque bassin comme montré sur la Figure 4-16, avec également les équations des courbes qui



t = DUREE EN MINUTES OU EN HEURES
DURATION IN MINUTES OR HOURS

Fig. 4-8

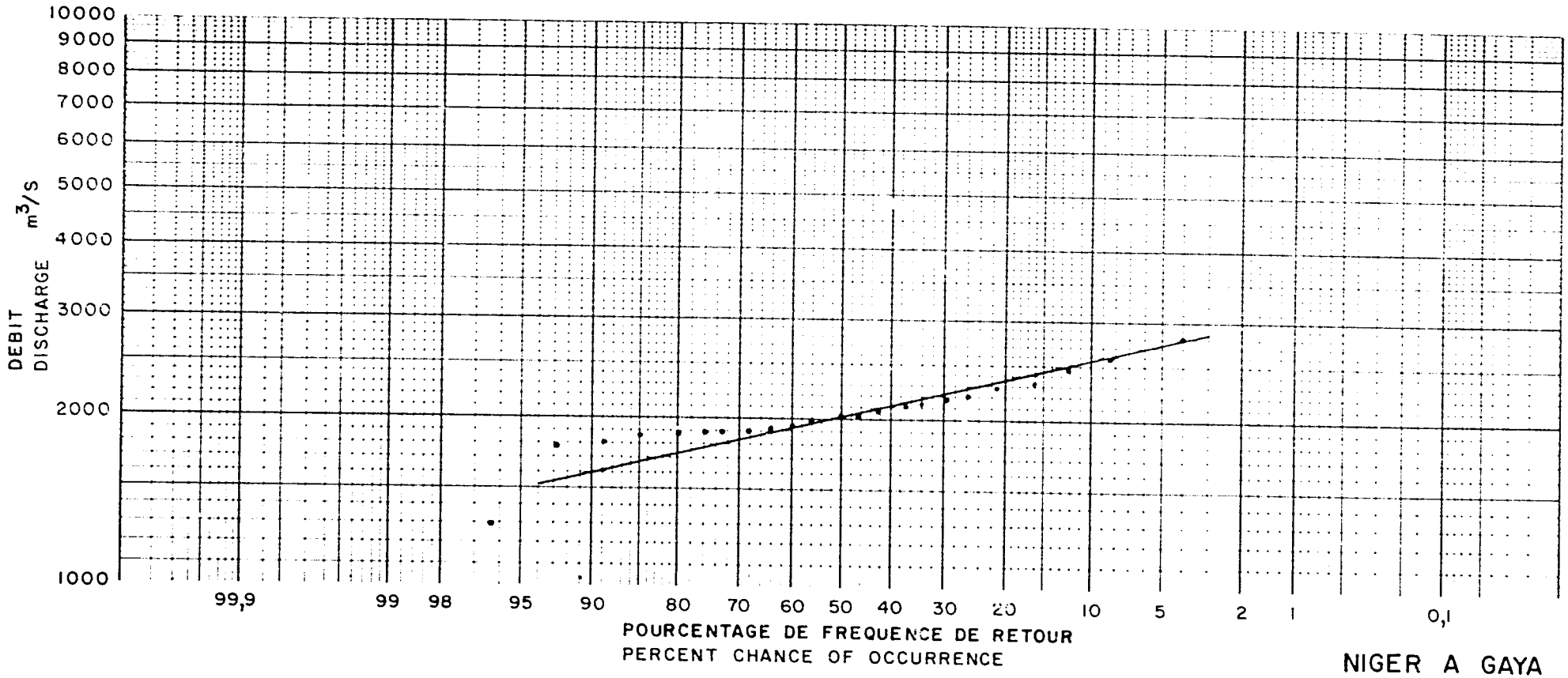


SENEGAL A BAKEL

FREQUENCE DE CRUE

FLOOD FREQUENCY

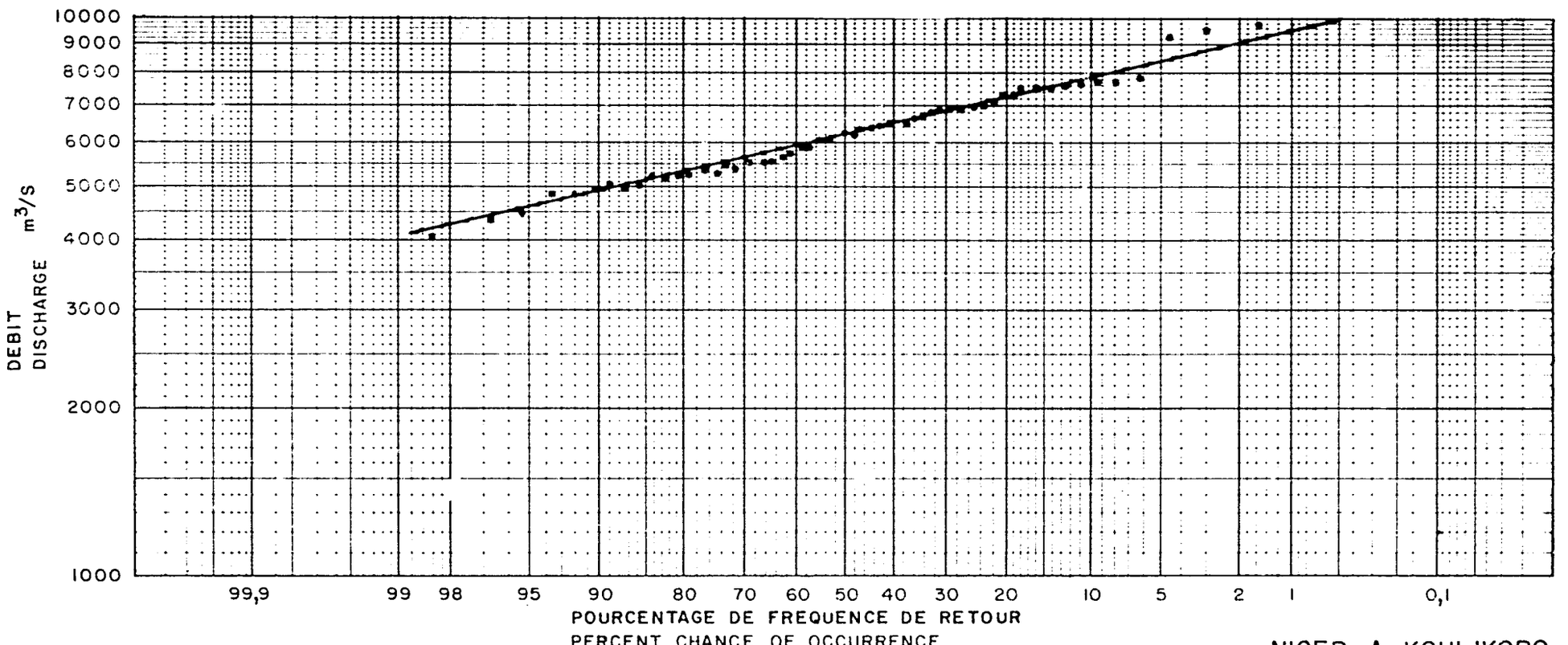
Fig.4-9



NIGER A GAYA
CRUE MALIENNE
MALIAN FLOOD

FREQUENCE DE CRUE
FLOOD FREQUENCY

Fig.4-10

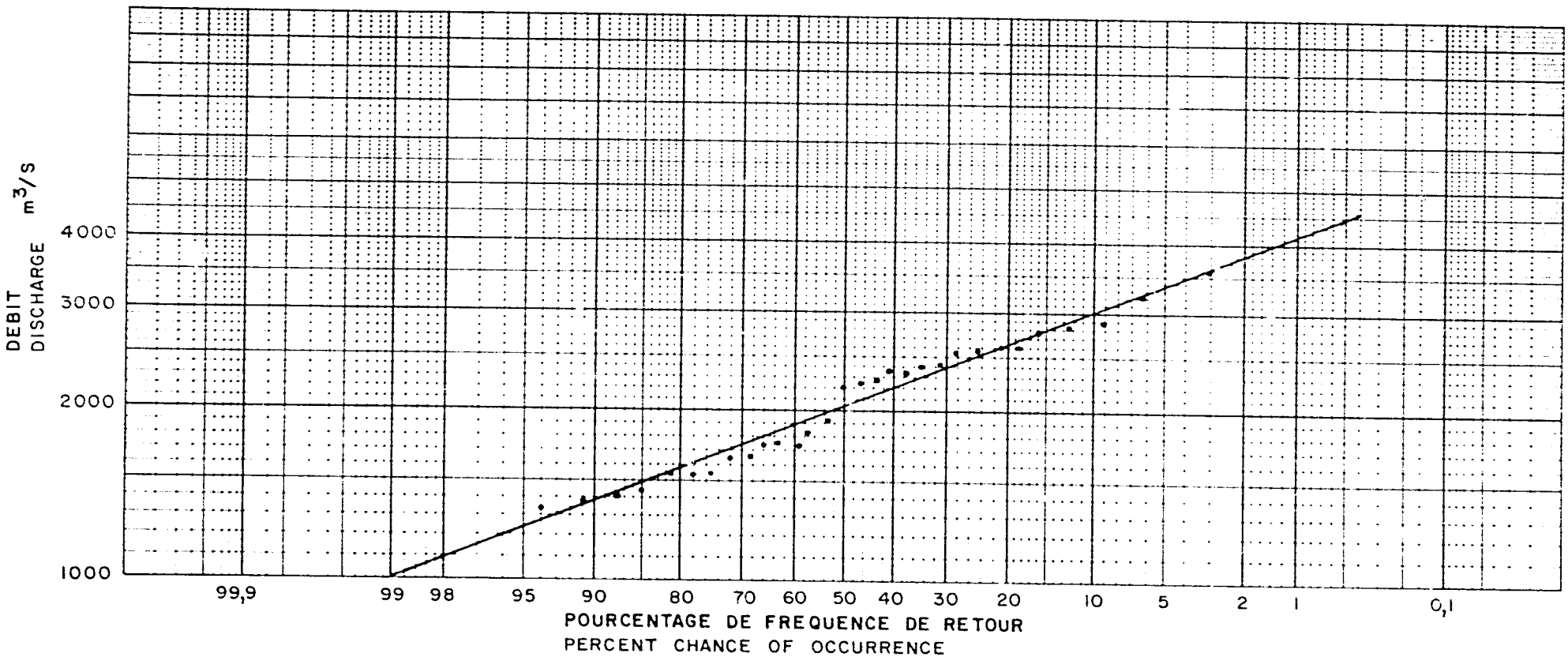


NIGER A KOULIKORO

FREQUENCE DE CRUE

FLOOD FREQUENCY

Fig. 4-11



LOGONE A MOUNDOU

FREQUENCE DE CRUE

FLOOD FREQUENCY

Fig. 4-12

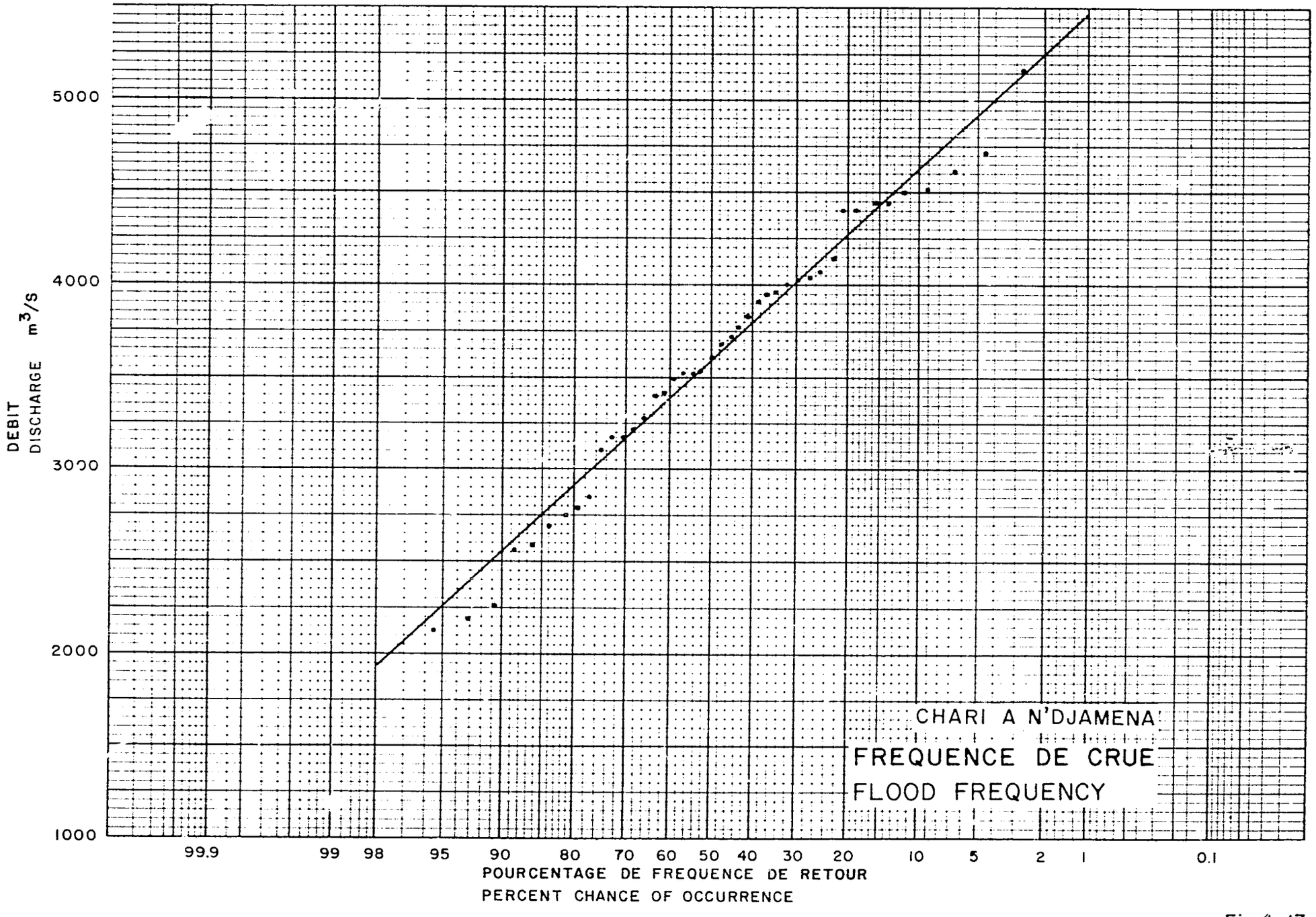
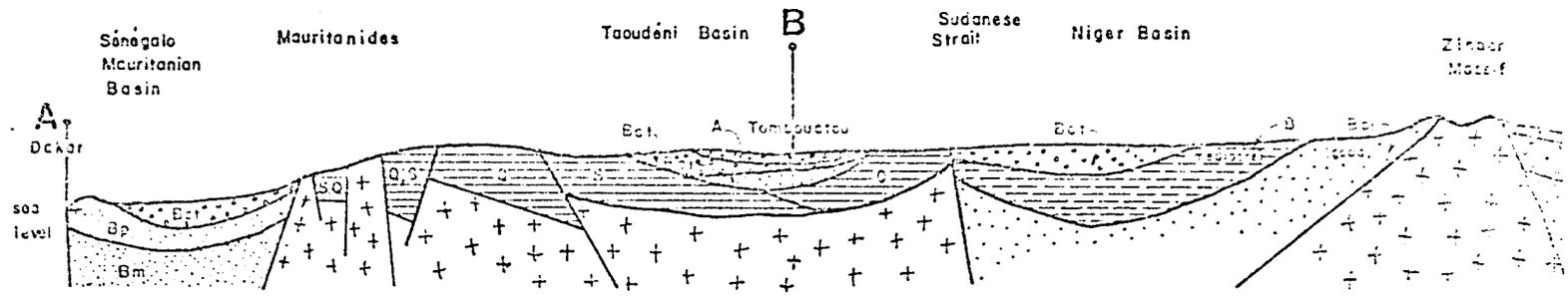
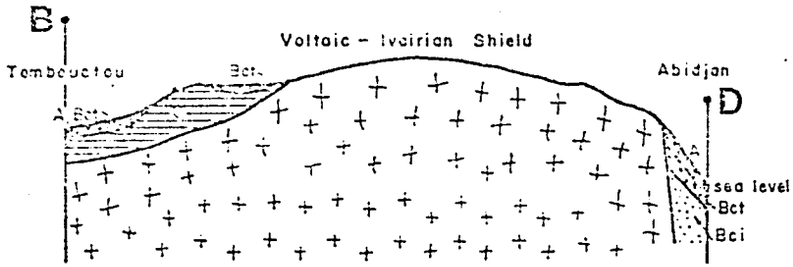
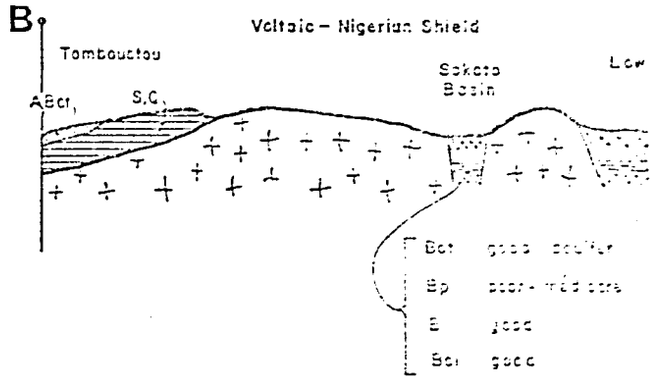
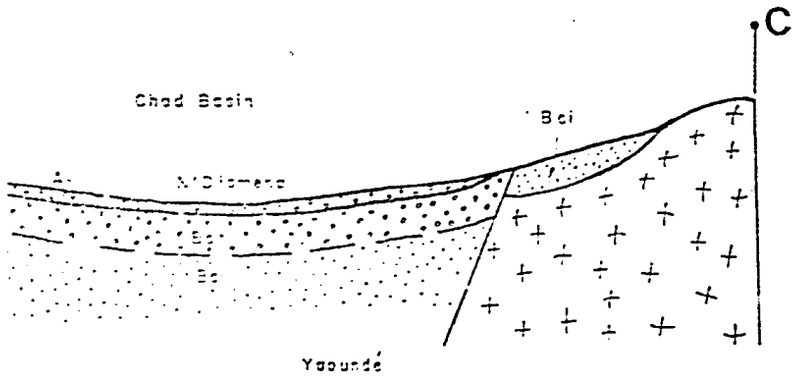

CHARI A N'DJAMENA
FREQUENCE DE CRUE
FLOOD FREQUENCY
DEBIT
DISCHARGE m³/S
5000
4000
3000
2000
1000
99.9
99
98
95
90
80
70
60
50
40
30
20
10
5
2
1
0.1
POURCENTAGE DE FREQUENCE DE RETOUR
PERCENT CHANCE OF OCCURRENCE

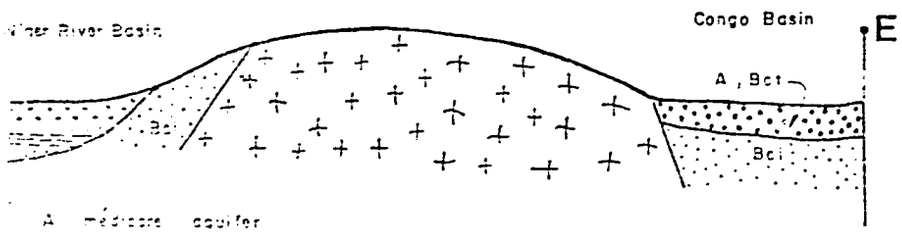
Fig. 4-13


Sénégalo Mauritanian Basin
Mauritanides
Taoudéni Basin
B
Sudanese Strait
Niger Basin
A
Dakar
sea level
Bp
Bct
Bm
SQ
Q,S
Q
S
Tombouctou
Bct
B


B
Tombouctou
Bct
Voltaic – Ivoirian Shield
Abidjan
D
sea level
Bct
Bci


B
Tombouctou
Voltaic – Nigerian Shield
Sokoto Basin
A
Bct
S,C
Bct
Bp
B
Bci

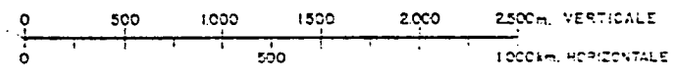




A	médiocre	aquifer
Bct	good	"
Bo	fair	"
B	fair	"
Bci	good	"

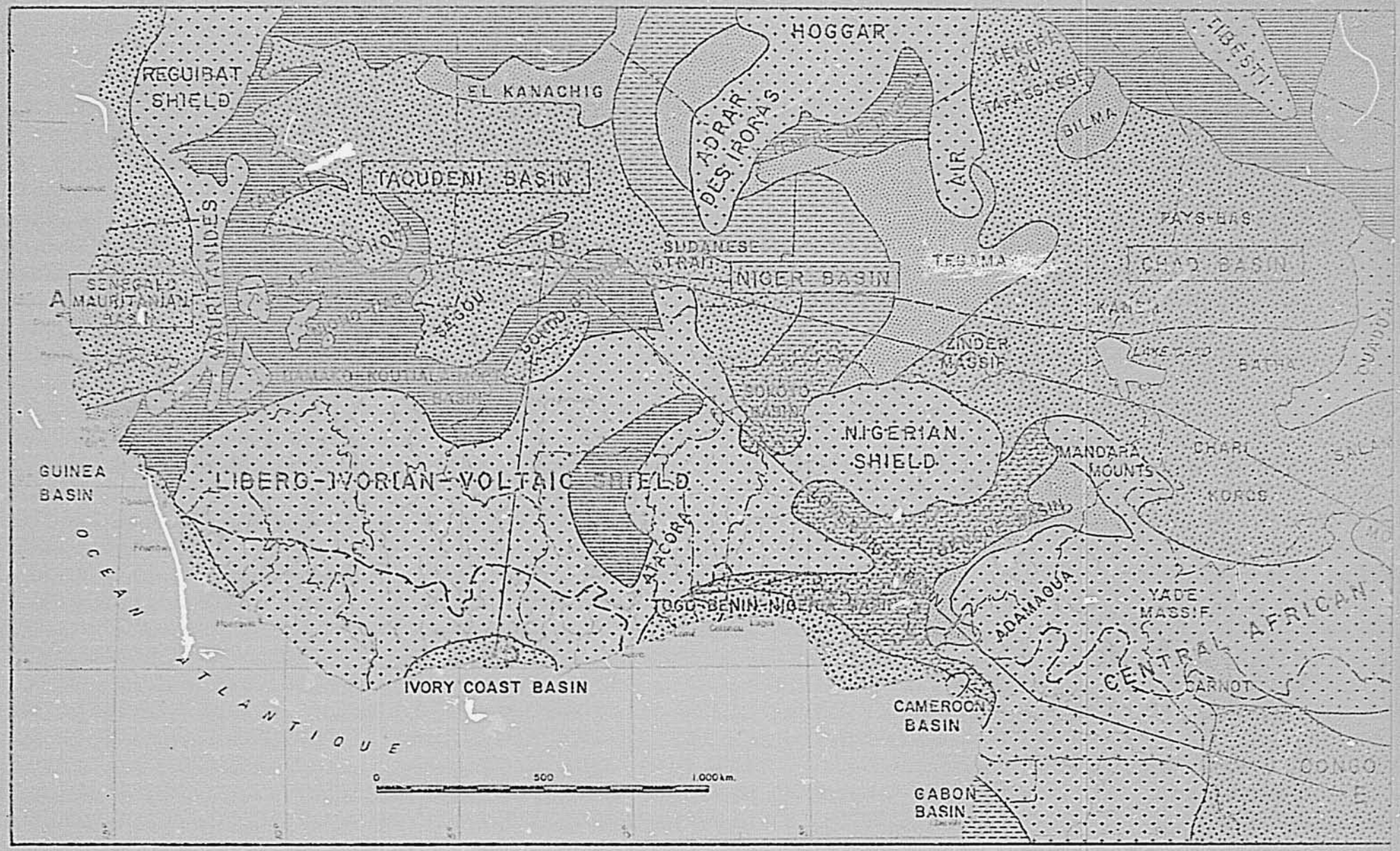
LEGENDE:
LEGEND:

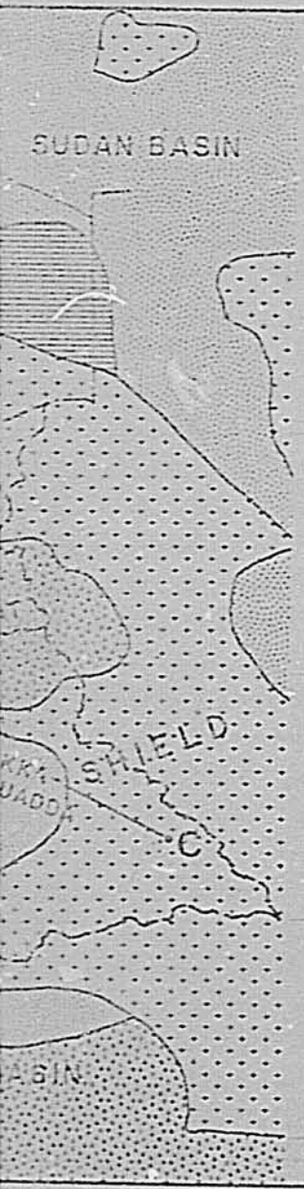
VOIR ESQUISSE HYDROGEOLOGIQUE (FIG. 5-2(A)
SEE HYDROGEOLOGIC SKETCH (FIG. 5-2(A)



COUPES HYDROGEOLOGIQUES
HYDROGEOLOGIC CROSS-SECTIONS

FIG. 5-2(B)


HOGGAR
REGUIBAT SHIELD
EL KANACHIG
TAOUDENI BASIN
ADRAR DES IFORAS
AIR
TIBESTI
TAFASSASSET
BILMA
PAYS-BAS
CHAD BASIN
SUDANESE STRAIT
NIGER BASIN
TEGAMA
SENEGAL-MAURITANIAN BASIN
MAURITANIDES
TAGOU
ZINDER MASSIF
KANEM
LAKE CHAD
BATHA
SOKOTO BASIN
NIGERIAN SHIELD
MANDARA MOUNTS
CHARI
KORGS
GUINEA BASIN
LIBERO-IVORIAN-VOLTAIC SHIELD
ATACORA
OCEAN ATLANTIQUE
TOGO-BENIN-NIGER BASIN
ADAMAOUA
YADE MASSIF
CENTRAL AFRICAN
CARNOT
IVORY COAST BASIN
CAMEROON BASIN
GABON BASIN
CONGO
0
500
1.000 km.



LEGENDE:
LEGEND:

QUATERNAIRE ET CONTINENTAL TERMINAL
QUATERNARY AND CONTINENTAL TERMINAL (A, Aa, Bci)

QUATERNAIRE: AQUIFERE MEDIOCRE A BON
QUATERNARY: MEDIOCRE TO GOOD AQUIFER
2,3-150m3/h (5-50)
10-100m (10-50)
CONTINENTAL TERMINAL: AQUIFERE MOYEN A BON
CONTINENTAL TERMINAL: FAIR TO GOOD AQUIFER
10-[illegible]m3/h (50-100)
25-150m (50-OVER 100)

QUATERNAIRE ET CONTINENTAL TERMINAL, ET CRETACE
QUATERNARY AND CONTINENTAL TERMINAL, AND CRETACEOUS

MAESTRICHTIEN (ET PALEOGENE)
MAESTRICHTIAN (AND PALEOCENE) Bm, Bp

BON AQUIFERE
GOOD AQUIFER
10-300m3/h (50-150)
20-500m (50-2[illegible])

CRETACE
CRETACEOUS (B)

a) AQUIFERE MEDIOCRE DANS LES BASSINS DE TAOUDENI ET DU NIGER
a) MEDIOCRE AQUIFER IN TAOUDENI AND NIGER BASINS 0-100m3/h (2-3)
b) AQUIFERE MOYEN A BON DANS LES BASSINS DU NIGERIA
b) FAIR TO GOOD AQUIFER IN NIGERIA BASINS 10-200m 3/h (50-100)
10-300m (50-150)

CONTINENTAL INTERCALAIRE
CONTINENTAL INTERCALAIRE (Bci)

BON AQUIFERE
GOOD AQUIFER
25-300m3/h (50-100)
50-800m (50-400)

COUVERTURE PRIMAIRE
PALEOZOIC COVER (S, O)

AQUIFERE MEDIOCRE A MAUVAIS
POOR TO MEDIOCRE AQUIFER
0-100m 3/h (1-10)
20-70m (25-40)

SOCLE
BASEMENT COMPLEX (ψ Ψ ɣ ϕ)
(SYMBOLES: VOIR CARTE GEOLOGIQUE 5-1)
(SYMBOLS: SEE GEOLOGIC MAP 5-1)

MAUVAIS AQUIFERE
POOR AQUIFER
0-50m3/h (0.5-6)
15-70m (15-40)

LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE
PROJECT AREA BOUNDARIES

COUPES HYDROGEOLOGIQUES (VOIR FIG. 5-2(B)
HYDROGEOLOGIC CROSS-SECTIONS (SEE FIG. 5-2(B)

PREMIERE LIGNE DE CHIFFRES: INTERVALLE DES DEBITS DES OUVRAGES (MOYENNE)
FIRST LINE OF FIGURES: WELL YIELD RANGE (AVERAGE)
DEUXIEME LIGNE DE CHIFFRES: INTERVALLE DES PROFONDEURS DES OUVRAGES (MOYENNE)
SECOND LINE OF FIGURES: WELL DEPTH RANGE (AVERAGE)

ESQUISSE HYDROGEOLOGIQUE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE
HYDROGEOLOGIC SKETCH OF WESTERN/CENTRAL AFRICA

FIG. 5-2(A)

TABLEAU 5-2 SUPERFICIES D'AFFLEUREMENT DES AQUIFERES DANS LA ZONE DU PROJET (Km^2)

Pays	Socle (mauvais aquifère) a	Bassins Sédimentaires			Total, par pays e(a+b+c)	Pourcentage de la superficie totale couvert par des aquifères bons à moyens
		Couverture Primaire (aquifère médiocre à mauvais) b	Couverture Post-Primaire (aquifères bons à moyens) c	Total, Bassins Sédimentaires d(b+c)		
Bénin	89 000		14 000	14 000	103 000	14
Cameroun	204 000		39 000	39 000	243 000	16
Empire Centrafricain	410 000		152 000	152 000	562 000	27
Tchad	189 000		335 000	335 000	524 000	64
Gambie			10 000	10 000	10 000	100
Ghana	161 000		500	500	161 500	≤0
Guinée	140 000	100 000		100 000	240 000	≤0
Guinée Bissau		16 000	20 000	36 000	36 000	56
Côte d'Ivoire	166 000				166 000	0
Mali	60 000	310 000	135 000	445 000	505 000	27
Mauritanie	77 000	30 000	44 000	74 000	151 000	29
Niger	60 000		245 000	245 000	305 000	80
Nigeria	388 000		351 000	351 000	739 000	48
Sénégal	32 000	45 000	117 000	162 000	194 000	55
Sierra Leone	30 000				30 000	0
Togo	54 000		2 000	2 000	56 000	14
Haute-Volta	225 000	32 000	11 000	43 000	268 000	14
Total	2,546,000	553,000	1,457,500	2,010,500	4,556,500	32

la région à l'étude comporte deux grands types de réservoirs aquifères : (1) les roches cristallines et métamorphiques du socle, un mauvais aquifère caractérisé par des fractures et une zone d'altération irrégulière, et (2) les formations des bassins sédimentaires qui comprennent des aquifères meubles et consolidés avec, en général, des propriétés hydrodynamiques bonnes à moyennes, mais quelque fois médiocres ou mauvaises.

Les aquifères de la zone du projet sont synthétisés sur la Figure 5-2, esquisse cartographique avec coupes et légende résumant leurs caractéristiques principales. Leurs épaisseurs sont indiquées dans le Tableau 5-1 (section Géologie). Leurs superficies d'affleurement approximatives sont résumées ci-après dans le Tableau 5-2. Plus de la moitié de la zone du projet est occupée par le socle, mauvais aquifère. Environ le quart de la partie restante, c'est-à-dire celle occupée par les bassins sédimentaires, est couvert de formations primaires, aquifères médiocres à mauvais. Dans l'ensemble, seulement le tiers de la zone du projet est composé d'aquifères bons à moyens.

L'hydrogéologie de la zone du projet est presentée sur la Carte 5-2 qui comprend des indications synoptiques sur la géologie, l'hydrogéologie, les aquifères, les types de puits et forages, leurs profondeurs et débits, la qualité des eaux souterraines et leur potentiel.

5.3.2 Le Socle

Les roches cristallines et métamorphiques sont imperméables et ont une porosité quasi-nulle, sauf dans les zones fracturées et altérées. L'altération en régions tropicales à climat aride commence généralement à la partie fissurée des roches et se traduit par une couverture latéritique d'épaisseur variable. Dans le Sahel, on trouve des couvertures latéritiques : elles furent formées au cours des temps géologiques anciens lorsque le

Le Tertiaire et le Quaternaire furent caractérisés par une régression générale des mers accompagnée, de l'Eocène au Quaternaire, par le dépôt d'un autre système hydrogéologique bien connu, le Continental Terminal. Cependant, une transgression eut lieu au Miocène, en particulier dans les bassins côtiers. Elle résulta en des dépôts sableux et argileux, sauf dans les Bassins du Taoudéni et du Niger qui comprennent des sédiments marneux, argileux et calcaires. D'importantes phases volcaniques eurent lieu en Afrique à la fin du Tertiaire et au Quaternaire, par exemple dans la région de Dakar et dans la partie centrale du Nigeria. Toutefois, les roches volcaniques récentes ou anciennes n'ont qu'un rôle mineur dans la zone du projet.

5.2.2 Lithostratigraphie

Une grande variété de roches affleure dans la zone du projet (voir Cartes 5-1 et 5-2, Volume 2). La Figure 5-1 montre que les principaux éléments sont: (1) les roches cristallines et métamorphiques du socle, (2) les formations sub-tabulaires primaires formées de quartzites, schistes, grès et dolomies et (3) la couverture sédimentaire secondaire, tertiaire et quaternaire essentiellement composée de roches meubles, de grès et de séries calcaires et argileuses. La plupart des sédiments secondaires, tertiaires et quaternaires sont d'origine continentale, sauf dans le Bassin Sénégalo-Mauritanien et dans les autres bassins côtiers. Uniformité et régularité caractérisent la lithostratigraphie de la région, la plupart des séries s'étendant sur des milliers de kilomètres sans offrir de changements majeurs de nature ou d'épaisseur.

5.2.2.1 Le Socle

Le socle, couvrant plus de la moitié de la zone du projet, est formé : (1) de granites et gneiss archéozoiques très métamorphisés et

quelque peu plissés (le Dahomeien, par exemple), (2) de terrains plissés peu métamorphiques d'âge Pré-cambrien tels que les granites, schistes, quartzites et quelques roches volcaniques de l'Atacorien, du Birrimien et du Tarkwarien, et (3) de formations infracambriennes composées de granites, schistes, grès et roches volcaniques, tels que le Faléminen dans les Mauritanides. L'Archéozoique affleure sur de vastes étendues tandis que le Précambrien affleure principalement dans les boucliers Libéro-Ivoiro-Voltaique et Centrafricain, et que l'Infracambrien a beaucoup moins d'importance. La nature lithologique du socle n'est pas favorable à de bonnes caractéristiques hydrogéologiques mais celles-ci sont rehaussées par sa fracturation et son altération.

5.2.2.2 Les Bassins Sédimentaires

Les vastes formations sédimentaires subtabulaires d'âge primaire et infracambrien se trouvent principalement dans le Bassin du Taoudéni et dans le relativement petit Bassin de Guinée où elles occupent une grande superficie. Elles ont plusieurs centaines de mètres en épaisseur et quelques fois plus de 1000 m. Elles comprennent : (a) un système de grès et quartzites avec des schistes et des séries calcaires, et (b) un système sous-jacent de schistes et des couches dolomitiques, quelques grès, quartzites et roches carbonatées. La lithologie des formations primaires et infracambriennes n'est pas favorable du point de vue hydrogéologique mais ce n'est plus le cas lorsque ces formations sont fracturées.

Les formations sédimentaires secondaires, tertiaires et quaternaires sont largement représentées dans les Bassins du Niger, Taoudéni et Tchad. Elles sont aussi d'importantes formations du Bassin Sénégalo-Mauritanien. Elles sont plus épaisses lorsqu'elles sont d'origine marine (plus de 3000 m) que d'origine continentale (probablement 1000 m environ).

L'épaisse et étendue série du Continental Intercalaire d'âge fin Jurassique à Crétacé est composée de sables, grès, argiles et marnes. Elle est présente dans tous les bassins ci-dessus (et dans les bassins du Nigeria) mais pas dans les bassins côtiers ni dans le Bassin Sénégalo-Mauritanien; toutefois, elle n'est pas très développée dans le Bassin du Taoudéni et elle est mal connue dans celui du Tchad. Les sables et argiles du Maestrichtien (fin Crétacé) forment une importante série marine dans les bassins côtiers, en particulier le Bassin Sénégalo-Mauritanien. Il en est de même pour les calcaires paléocènes (début du Tertiaire). En général, les sédiments marins du Crétacé et du Paléocène (c'est-à-dire post-Continental Intercalaire) sont argileux et marneux dans les Bassins du Taoudéni et du Niger, et sableux au Nigeria et dans les bassins côtiers. Le Continental Terminal, d'âge Eocène à Quaternaire, bien que moins épais (150-200 m, et plus de 400 m au Tchad) mais plus étendu que le Continental Intercalaire, est une série très importante, en particulier au Tchad, composée d'argiles, sables et grès, quelque fois couverte par des dépôts quaternaires ou indifférenciée de ceux-ci. Il y a peu d'alluvions dans la zone du projet.

En résumé, les terrains secondaires, tertiaires et quaternaires comprennent de nombreuses et épaisses couches poreuses et perméables qui offrent de bonnes perspectives hydrogéologiques. Toutefois, ces perspectives sont fortement diminuées lorsque le faciès de ces terrains devient argileux ou marneux.

La lithostratigraphie de la région peut être résumée comme il suit dans le Tableau 5-1. La géologie est présentée sur la Carte 5-1 qui comprend aussi des coupes.

5.3 LES AQUIFERES

Il y a presque partout en Afrique Occidentale et Centrale, y compris dans le socle, suffisamment d'eau souterraine pour l'alimentation en eau villageoise. Les différentes formations géologiques de la région sont caractérisées par une large gamme de propriétés hydrodynamiques, les meilleurs aquifères se trouvant dans les bassins sédimentaires.

Comme le montre la Figure 5-2, le socle est un aquifère très étendu mais mauvais, tandis que les formations primaires et infracambriennes sont généralement de médiocres ou mauvais aquifères. Le Continental Intercalaire est un bon aquifère, souvent profond toutefois, et il en est de même des formations marines du Maestrichtien et du Paléocène. Les autres séries crétacées sont de médiocres aquifères (sauf au Nigeria) en raison de leur faciès marno-argileux. Le Continental Terminal et le Quaternaire sont des aquifères moyens ou bons.

5.3.1 Classification

Pour des raisons pratiques et de classification, les hydrogéologues de l'école française ont défini deux types fondamentaux d'aquifères dans la région. Les aquifères généralisés sont ceux à porosité d'interstices ou de fractures, et de large étendue; ils comprennent des roches sédimentaires meubles et dures d'âge secondaire, tertiaire et quaternaire. Les aquifères discontinus comprennent les roches peu perméables et et les roches originellement imperméables qui ont acquis une perméabilité secondaire à partir de la fracturation ou de l'érosion. Le socle, les roches sédimentaires massives d'âge primaire telles que quartzites, grès, calcaires et dolomies, ainsi que les petites formations alluviales appartiennent à la catégorie des aquifères discontinus. Cette classification a ses mérites mais elle ne sera pas utilisée dans ce rapport. Il a été retenu de considérer que

TABLEAU 5-1 LITHOSTRATIGRAPHIE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE/CENTRALE

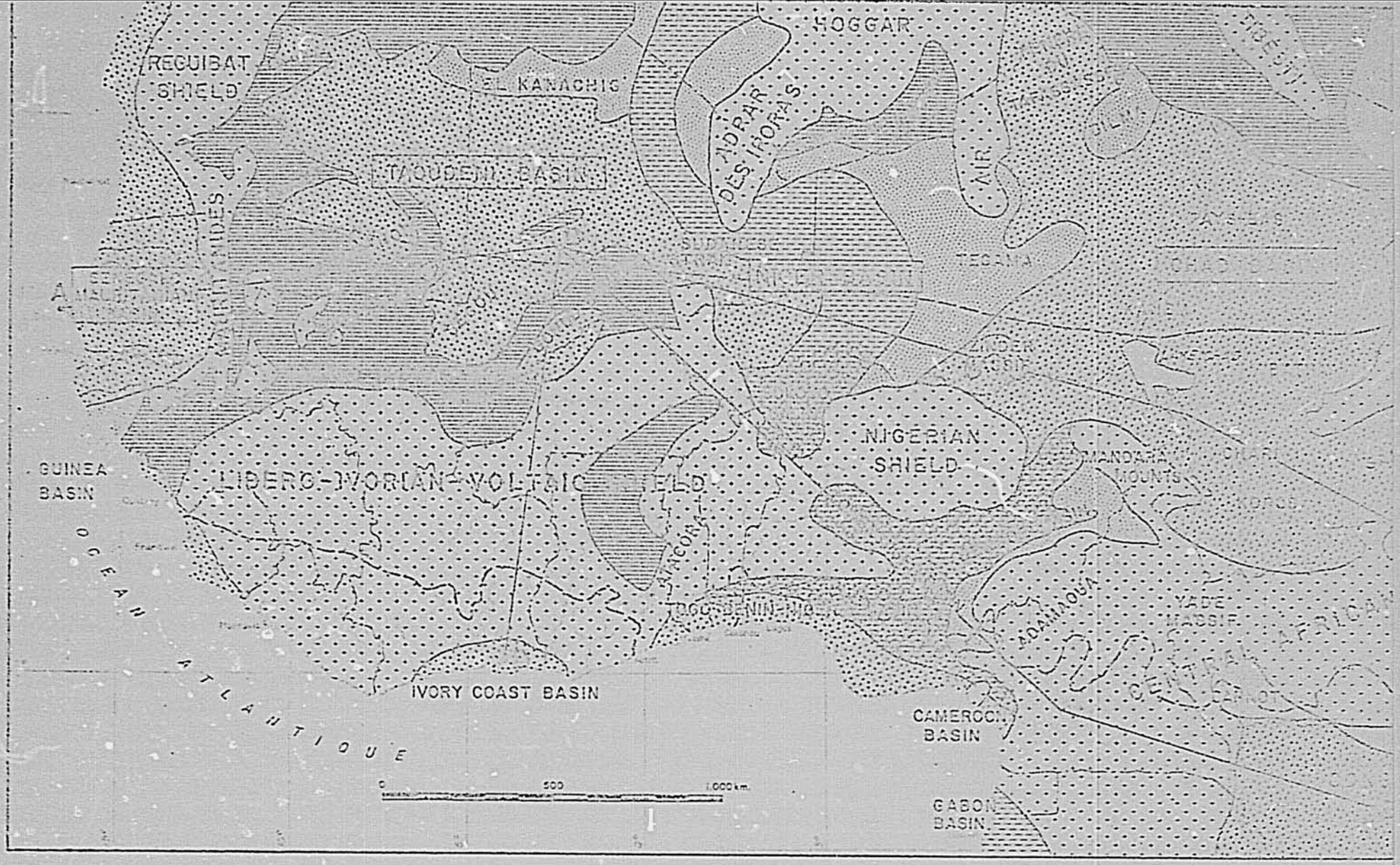
Temps Géologiques		Age (millions d'années) Cumulatif	Absolu	Unité Géologique		Lithologie	Epaisseur (mètre)
	Quaternaire		0,7	Ad, Aa, A	Couverture Sédimentaire Récente	dunes alluvions dépôts fluviaux, lacustres et marins	20- 100 10- 50 ? 5- 150 (Tchad)
TERTIAIRE ET QUATERNAIRE	Tertiaire	55		Bct	Continental Terminal	sables et grès argileux, sables, argiles	50- 200
	Pliocène		(6)				(plus de 400 au Tchad)
	Miocène		(12)				
	Oligocène		(16)				
	Eocène		(20)	Be	Eocène (marin)	argiles, marnes, sables et grès argileux, calcaires et dolomies	70- 200 ?
	Paléocène			Bp	Paléocène (marin)	calcaires et dolomies, argiles, marnes	50- 150
SECONDAIRE	Crétacé	190	(65)	Bm	Maestrichtien (marin)	sables, sables et grès argileux, argiles, marnes	250- 500
	Jurassique		(35)	Bci	Continental Intercalaire	sables et grès argileux, sables, argiles et marnes	200- plus de 400 (davantage au Tchad et Niger)
	Trias		(35)	B	Dépôts Indifférenciés Secondaires	argiles et marnes, sables et grès argileux, sables, grès, calcaires et dolomies	plus de 1000 (3000 ?)
PRIMAIRE	Permien	500+	(25)	Q	Formations subtabulaires Primaires et Infracambriennes	Pg grès, quartzites, calcaires et dolomies, schistes, pélites, argilites. Pq quartzites; grès, calcaires et dolomies, schistes, pélites, argilites	plusieurs centaines; jusqu'à plus de 1.000 m (Guinée)
	Carbonifère		(85)				
	Dévonien		(50)				
	Silurien		(130)				
	Ordovicien			S	Formations subtabulaires Primaires et Infracambriennes	Ps, schistes; grès, quartzites, calcaires et dolomies Pd, dolomies; schistes, pélites, argilites, roches meubles	quelques dizaines; plusieurs centaines; jusqu'à plus de 1.000 m
	Cambrien		(70)				

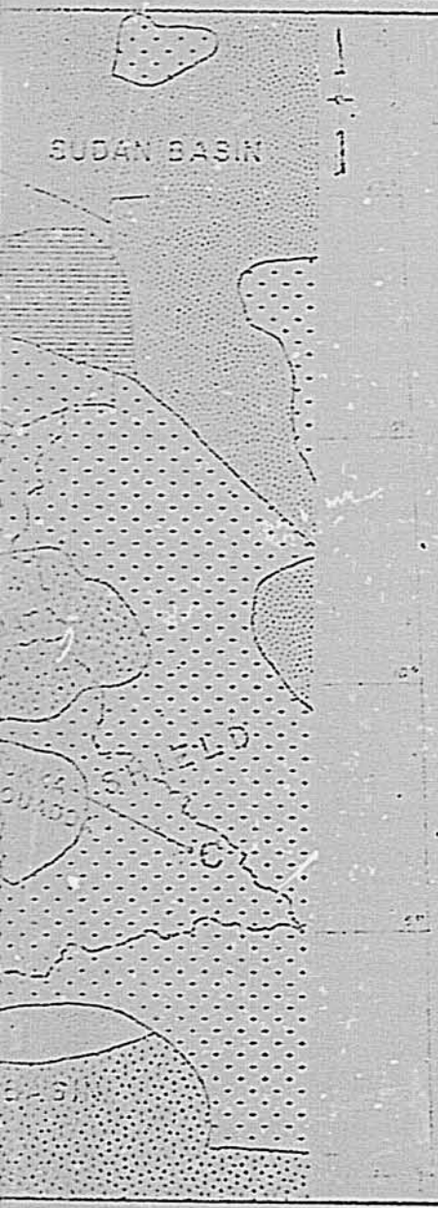
à suivre

TABLEAU 5-1 (suite) LITHOSTRATIGRAPHIE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE/CENTRALE

Temps Géologiques	Age (million d'années) Cumulatif	Absolu	Unité Géologique	Lithologie	Epaisseur (mètre)
Infracambrien	1500	(1000)	Ψ Cambrien et Infracambrien (métamorphique)	schistes, pélites, argilites, roches meubles; grès, quartzites, calcaires et dolomies; roches volcaniques basiques	
Précambrien	plus de 2000		ϵ Terrains peu métamorphiques	schistes, pélites, argilites, roches meubles; grès, quartzites, calcaires et dolomies; roches volcaniques basiques	
Archèozoïque			γ Socle granitique et gneissique	granites et gneisses; altérites (arènes granitiques, cuirasse latéritique)	0 - 50 0 - 10
Temps géologiques variés			β Roches volcaniques variées	dolérites, basaltes, dunites cuirasse latéritique	0 - 10

Source: d'après la sous-traitance au BURGEAP.


HOGGAR
REGUIBAT SHIELD
EL KANACHIC
TAOUDENI BASIN
DES IRORAS
AIR
TIBESTI
TEGAMA
NIGER BASIN
NIGERIAN SHIELD
MANDARA MOUNTAINS
GUINEA BASIN
LIBERO-IVORIAN-VOLTAIC SHIELD
BIRIMIAN
ADAMAOUA
YADE MASSIF
CENTRAL AFRICA
OCEAN ATLANTIQUE
IVORY COAST BASIN
CAMEROON BASIN
GABON BASIN
0
500
1.000 km



LEGENDE:
LEGEND:

QUATERNAIRE ET CONTINENTAL TERMINAL
QUATERNARY AND CONTINENTAL TERMINAL (A, Ac, Bci)

QUATERNAIRE: AQUIFERE MEDIOCRE A BON
QUATERNARY: MEDIOCRE TO GOOD AQUIFER
2,3-150m3/h (5-50)
10-100m (10-50)

CONTINENTAL TERMINAL: AQUIFERE MOYEN A BON
CONTINENTAL TERMINAL: FAIR TO GOOD AQUIFER
10-150m3/h (50-100)
25-150m (50-OVER 100)

QUATERNAIRE ET CONTINENTAL TERMINAL, ET CRETACE
QUATERNARY AND CONTINENTAL TERMINAL, AND CRETACEOUS

MAESTRICHTIEN (ET PALEOGENE)
MAESTRICHTIAN (AND PALEOCENE) Bm, Bp

BON AQUIFERE
GOOD AQUIFER
10-300m3/h (50-150)
20-500m (50-250)

CRETACE
CRETACEOUS (B)

a) AQUIFERE MEDIOCRE DANS LES BASSINS DE TAOUDENI ET DU NIGER
a) MEDIOCRE AQUIFER IN TAOUDENI AND NIGER BASINS 0-100m3/h (2-3)
b) AQUIFERE MOYEN A BON DANS LES BASSINS DU NIGERIA
b) FAIR TO GOOD AQUIFER IN NIGERIA BASINS 10-200m 3/h (50-100)
10-300m (50-150)

CONTINENTAL INTERCALAIRE
CONTINENTAL INTERCALAIRE (Bci)

BON AQUIFERE
GOOD AQUIFER
25-300m3/h (50-100)
50-600m (50-400)

COUVERTURE PRIMAIRE
PALEOZOIC COVER (S, O)

AQUIFERE MEDIOCRE A MAUVAIS
POOR TO MEDIOCRE AQUIFER
0-100m3/h (1-10)
20-70m (25-40)

SOCLE
BASEMENT COMPLEX (ψ ε γ δ)
(SYMBOLES: VOIR CARTE GEOLOGIQUE 5-1)
(SYMBOLS: SEE GEOLOGIC MAP 5-1)

MAUVAIS AQUIFERE
POOR AQUIFER
0-50m3/h (0.5-8)
15-70m (15-40)

LIMITES DE LA ZONE D'ETUDE
PROJECT AREA BOUNDARIES

COUPES HYDROGEOLOGIQUES (VOIR FIG. 5-2(B)
HYDROGEOLOGIC CROSS-SECTIONS (SEE FIG. 5-2(B)

PREMIERE LIGNE DE CHIFFRES: INTERVALLE DES DEBITS DES OUVRAGES (MOYENNE)
FIRST LINE OF FIGURES: WELL YIELD RANGE (AVERAGE)
DEUXIEME LIGNE DE CHIFFRES: INTERVALLE DES PROFONDEURS DES OUVRAGES (MOYENNE)
SECOND LINE OF FIGURES: WELL DEPTH RANGE (AVERAGE)

ESQUISSE HYDROGEOLOGIQUE DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE ET CENTRALE
HYDROGEOLOGIC SKETCH OF WESTERN/CENTRAL AFRICA

FIG. 5-2(A)

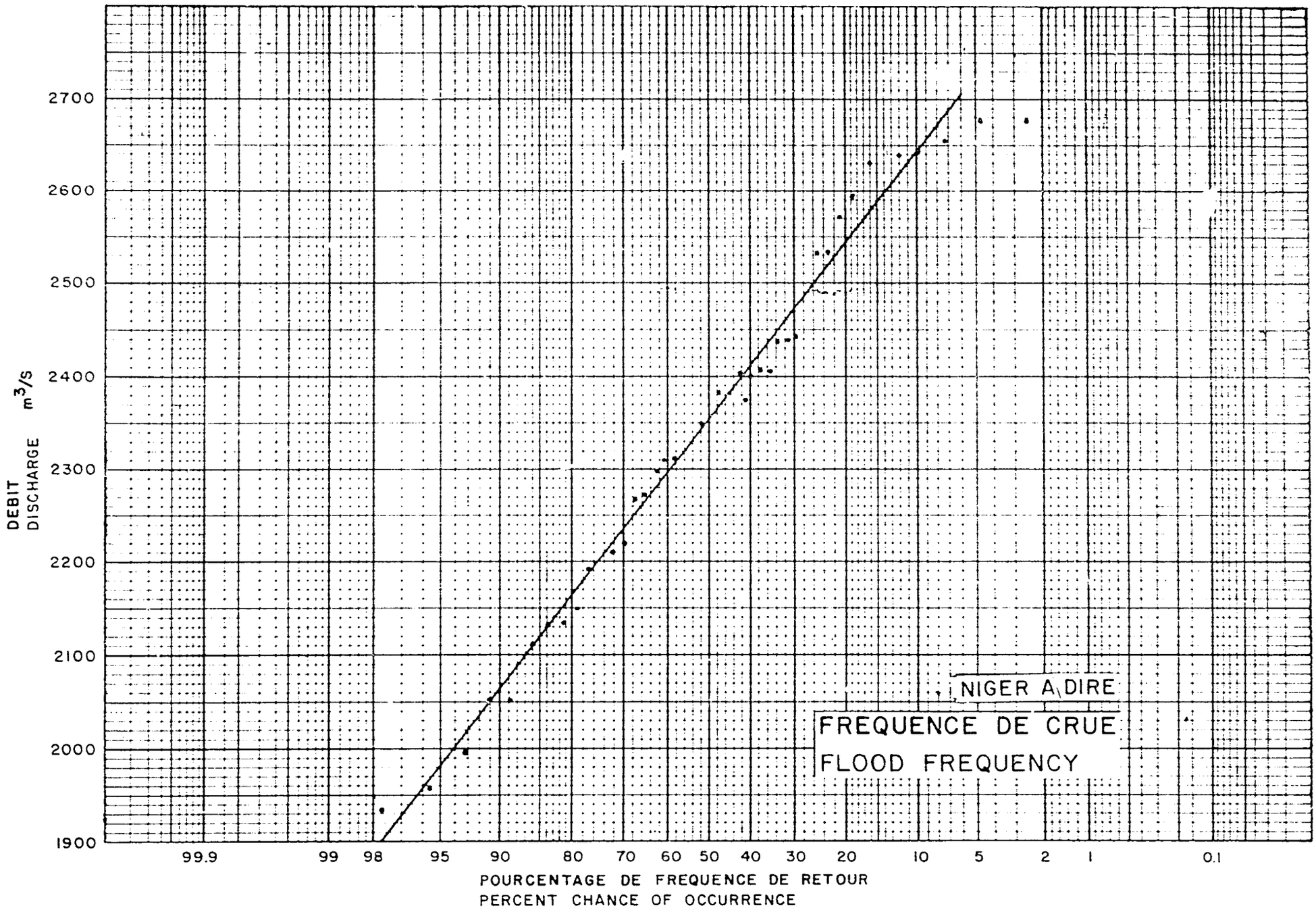

NIGER A DIRE
FREQUENCE DE CRUE
FLOOD FREQUENCY
DEBIT
DISCHARGE m3/S
2700
2600
2500
2400
2300
2200
2100
2000
1900
99.9
99
98
95
90
80
70
60
50
40
30
20
10
5
2
1
0.1
POURCENTAGE DE FREQUENCE DE RETOUR
PERCENT CHANCE OF OCCURRENCE

Fig.4-14

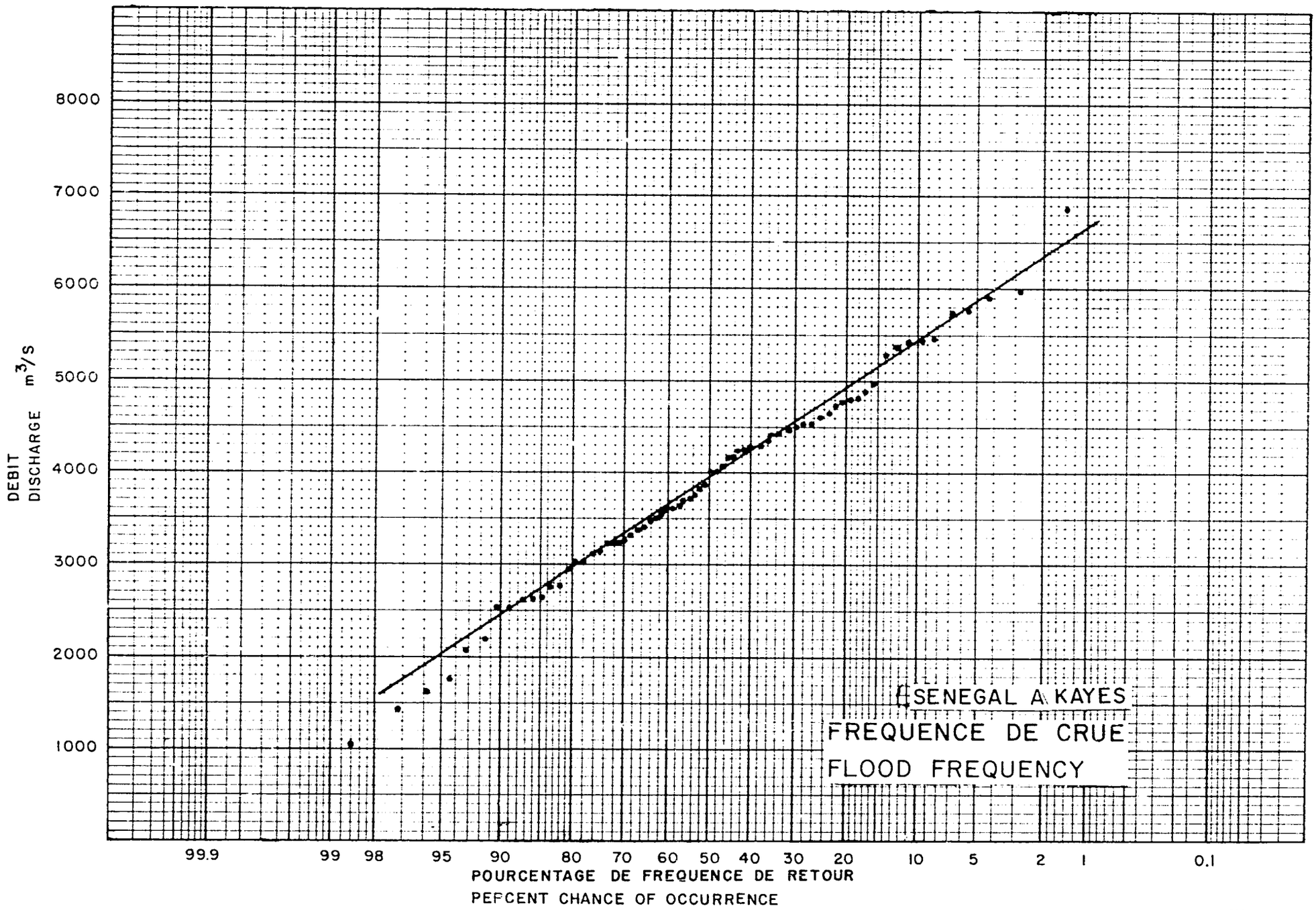

SENEGAL A KAYES
FREQUENCE DE CRUE
FLOOD FREQUENCY
DEBIT
DISCHARGE m³/S
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
99.9
99
98
95
90
80
70
60
50
40
30
20
10
5
2
1
0.1
POURCENTAGE DE FREQUENCE DE RETOUR
PERCENT CHANCE OF OCCURRENCE

Fig. 4-15

Tableau 4-9 Débits de la crue décennale dans le bassin du Chari

Cours d'eau	Station	Superficie Km^2	Années d'obs.	Débit $m^3 s^{-1}$	Débit Spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$
Chari	Sarh	193 000	31	1670	8,6
	Bousso	450 000	25	3600	8,0
	Guelendeng	470 000	9	3640	7,7
	Mailao	500 000	22	3900	7,8
	N'Djamena	600 000	43	4550	7,6
Ouham	Bozoum	8 100	20	620	76
	Bossangoa	22 800	20	1640	72
Bahr Azoum	Am Timan	80 000	21	345	4,3
Bamingui	Bamingui	4 380	18	180	41
Bouca	Fafa	6 750	14	200	30
Gribingui	Crampel	5 680	12	133	23
Bahr Sara	Moissala	67 000	22	2830	42
	Manda	79 600	23	2950	37
Bahr Aouk	Golongosso	96 000	16	350	3,6

Tableau 4-10 Débits de la crue décennale dans le bassin du Logone

Logone	Moundou	33 970	31	3000	88
	Lai	56 700	22	3250	57
	Bongor	73 700	23	2500	34
	Logone G.	75 000	14	1090	14, 5
	Baibokoum	21 360	12	4440	208 (douteux)
Pendé	Begouladge	5 640	14	665	118
	Gore	12 020	12	840	70
	Doba C.	14 300	24	1000	70
M'béré	M'béré	7 430	14	1565	211
Tandile	Tchoa	5 870	16	160	27

Tableau 4-11 Débits de la crue décennale dans le bassin du Niger

Cours d'eau	Station	Superficie Km^2	Années d'obs.	Débit m^3s^{-1}	Débit Spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$	Source
Milo	Konsankoro	1000		300	300	ORSTOM
	Kankan	9900	17	1066	108	
Niandan	Baro	12600	11	1400	111	
Tinkisso	Tinkisso	6400		350	55	ORSTOM
Sankarani	Mandiana	21900		1250	57	ORSTOM
	Gouala	35300		1900	54	ORSTOM
Baoulé	Djirila	3970	8	460	116	
	Bougouni	15700		900	57	ORSTOM
	Dioila	32500		1270	39	ORSTOM
Bagoé	Guinguerini	1042	9	190	182	
	Tombougou	2580	14	400	155	
	Kouto	4740	14	430	91	
	Pankourou	31800	17	1820	57	
Niongoué	Ponondougou	709		39	55	ORSTOM
Bani	Douna	101600	31	3500	34	
	Bénény K.	116000		2550	22	ORSTOM
	Sofaya	129400		1620	12, 5	ORSTOM
Niger	Kouroussa	118000	15	1585	88	
	Siguiri	70000		5000	71	ORSTOM
	Koulikoro	120000	57	7875	66	
	Kirango	137000	23	6900	50	
	Tilembeya	144000	24	3450	24	
	Mopti	281600	36	3050	10, 9	
	Diré	340000	35	2640	7, 8	
	Tossaye	355000	13	2310	6, 6	
	Ansongo	455000	23	1970	4, 4	
	Niamey	700000	41	2140	3, 0	
	Gaya	1000000	23	2560	2, 5	
Diaka	Kara	offtake	17	1750		

à suivre

Tableau 4-11 (suite) Débits de la crue décennale dans le bassin du Niger

Cours d'eau	Station	Superficie Km^2	Années d'obs.	Débit m^3s^{-1}	Débit Spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$	Source
G. Maradi	Goundam	offtake		340		
Gorouol	Alcongui	44850	17	110	2, 4	
	Dolbel	7500	15	116	15	
Dargol	Tera	2750	15	132	48	
	Kakassi	6940	18	123	18	
Sirba	Garbé	38750	17	522	13, 5	
Diamangou	Tamou	4030	14	94	23	
Tapoa	W	5330	13	25	4,7	
Mékrou	Barou	10500	13	352	34	
Alibori	Banikoara	8150	18	570	70	
Sata	Couberi	13200	18	440	33	
Gouroubi	Diongéré	15350	8	107	7,0	

Tableau 4-12 Débits de la crue décennale dans le bassin de la Volta

Cours d'eau	Station	Superficie Km^2	Années d'obs.	Débit m^3s^{-1}	Débit Spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$
1. Bassin de la Volta Noire					
Kou	Nasso	405	14	110	274
Volta Noire	Samendeni	4580	18	310	68
	Nwokuy	14800	15	240	16
	Kouri	20800	11	153	7,3
	Manimenso	32000	17	93	2,9
	Boromo	50000	19	168	3,4
	Dapola	78000	15	860	11
Volta Noire	Lawra	94000	23	915	9,7
	Bui	125000	20	2300	18
	Bamboi	134200	20	2180	16
Tain	Tainso	3480	10	106	30
Pru	Pruso	1212	17	33	27
2. Bassin de la Volta Rouge					
	Nangodi	11570	12	510	44
3. Bassin de la Volta Blanche					
Massili	Lumbila	2120	14	130	61
Volta Blanche	Wayen	20800	12	210	10
	Yakala	33000	16	540	16
	Pwalagu	63350	22	1820	29
	Nawuni	92950	20	2170	23
	Daboya	96320	11	2500	30
	Yapei	102170	15	2740	27
Morago	Nakpandouri	1530	14	180	118
Sissili	Wiasi	9500	8	490	52
Kulpawn	Yagaba	10600	15	480	45
Nasia	Nasia	5175	11	450	87

à suivre

Tableau 4-12 (suite) Débits de la crue décennale dans le bassin de la Volta

Cours d'eau	Station	Superficie Km^2	Années d'obs.	Débit m^3s^{-1}	Débit Spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$
Nabogo	Nabogo	1950	12	210	108
4. Bassin de l'Oti					
Penjari	Porga	22280	21	620	28
Magou	Tiele	836	13	75	90
Keran	Titira	3695	11	1050	284
Oti	Mandouri	29100	15	870	30
	Sansanne M.	35650	21	1680	47
	Saboba	50300	20	3185	63
	Sabari	59550	13	3800	64
Koumangou	Koumangou	6730	15	595	85
Kara	Lama Kara	1560	18	640	410
	Kpesside	2790	11	1030	368
Koimepouaba	Nagbeni	208	11	19	90
Sansorgou	Borgou	2240	14	174	78
5. Bassin de la Volta					
Kama	Bassari	202	11	58	285
Gban Hou	Brouffou	320	8	72	224
Dayes	Hohoe	626	12	56	90
Daka	Yendi	1214	13	158	130
Volta	Yeji	260330	13	5600	21

Tableau 4-13 Débits de la crue décennale dans le bassin du Sénégal

Cours d'eau	Station	Superficie Km^2	Années d'obs.	Débit m^3s^{-1}	Débit Spécifique $l\ s^{-1}\ Km^{-2}$
Bakoye	Toukouto	16500	18	1200	73
	Oualia	85600	20	2350	27
Bafing	Dakka S.	15700	21	2700	172
	Dibia	33000	21	4350	132
Falémé	Fadougou	9300	17	1800	194
	Gourbassi	15000	19	1900	127
	Kidira	28900	38	2700	93
Sénégal	Galougo	126900	41	5200	40
	Kayes	157400	73	5400	34
	Bakel	218000	72	7000	32
	Matam	230000	72	6000	26
	Dagana	268000	71	3250	12

Tableau 4-14 Débits de la crue décennale dans le bassin de la Gambie

Gambie	Goulombo	42000	17	2040	49

TABLEAU 4-15

RELATION MOYENNE ENTRE LE DEBIT DE LA CRUE DECENNALE ET LA SUPERFICIE DU BASSIN VERSANT

BASSIN	EQUATION DE REGRESSION	r	NBE. DE POINTS
CHARI	$Q = 1,42\ S^{0,6}$	0,82	14
LOGONE	$Q = 3,2\ S^{0,6}$	0,63	10
NIGER	$Q = 1,64\ S^{0,68}$	0,95	18
VOLTA	$Q = 1,72\ S^{0,62}$	0,88	39
SENEGAL	$Q = 40,2\ S^{0,4}$	0,79	11

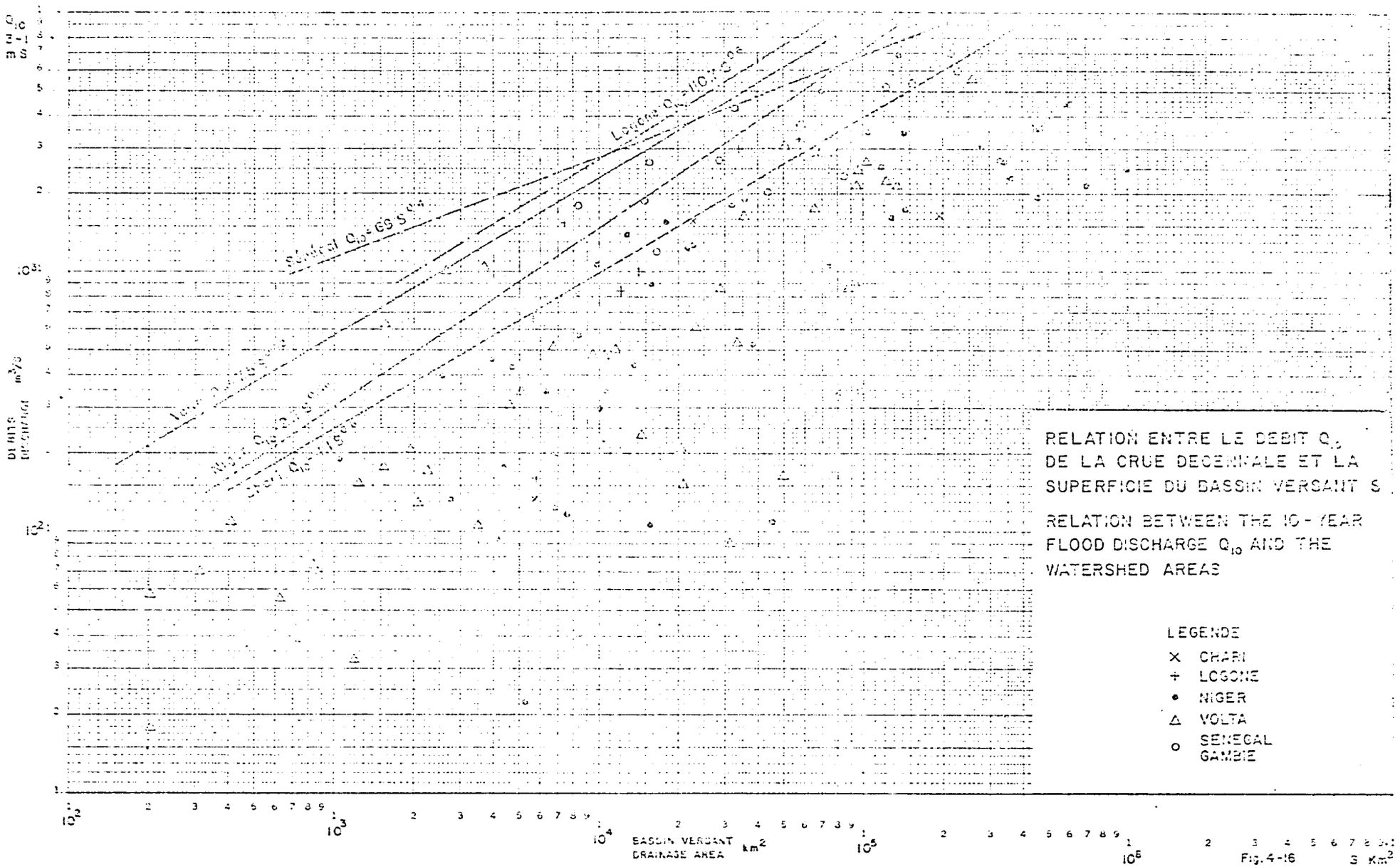

RELATION ENTRE LE DEBIT Q_{10} DE LA CRUE DECENNALE ET LA SUPERFICIE DU BASSIN VERSANT S
RELATION BETWEEN THE 10-YEAR FLOOD DISCHARGE Q_{10} AND THE WATERSHED AREAS
LEGENDE
× CHARI
+ LOGONE
• NIGER
△ VOLTA
○ SENEGAL GAMBIE
BASSIN VERSANT
DRAINAGE AREA km²
S Km²
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6

Fig. 4-16

ont été mises en parallèle avec les relations moyennes portées dans le Tableau 4-15.

Dans le cas du bassin du Niger, les stations en aval de Koulikoro n'ont pas été prises en compte dans les calculs. Il en est du reste de même pour le bassin du bas Sénégal, en raison de l'inconsistance des résultats.

4.3.3.3 Crues centennales

Les débits estimés pour les crues centennales ainsi que les plus forts débits de crue enregistrés sont énumérés dans le Tableau 4-16. Le type de distribution utilisé pour déterminer le débit probable de la crue centennale est également indiqué. Quant à la série complète des crues maximales annuelles, elle peut être trouvée dans l'Annexe 4.

L'utilisation des extrapolations statistiques afin de compléter les séries de crue pour lesquelles des renseignements manquent, ne sont recommandables que si les estimations en résultant sont vérifiées par des tracés graphiques. Dans le Tableau 4-17, les estimations dérivées des relevés sur du papier à échelle fonctionnelle des probabilités totales sont comparées avec celles obtenues par ajustement mathématique des distributions de fréquence de Galton et de Pearson III.

TABLEAU 4-17

COMPARAISON DES ESTIMATIONS DE LA CRUE CENTENNALE ($m^3 s^{-1}$)

COURS D'EAU	STATION	RELEVE	GALTON	PEARSON III
Sénégal	Bakel	9.500	11.500	8.760
	Kayes	6.600	8.170	5.970
Niger	Koulikoro	9.500	9.710	9.760
	Dire	2.700	2.920	2.890
	Gaya	3.300	3.240	3.080
Logone	Moundou	4.000	4.160	3.990
Chari	N'Djamena	5.900	6.250	4.970

TABLEAU 4-16

DEBITS MAXIMUM ENREGISTRES ET CRUES CENTENNALES ESTIMEES

COURS D'EAU	STATION	DEBIT MAX. ENREGISTRE $m^3 s^{-1}$	CRUE CENTENNALE $m^3 s^{-1}$	ANNEES D'OBS.	DISTRIBUTION FREQUENTIELLE
BASSIN DU CHARI					
Chari	Sahr	2.088	2.500	31	Pearson III
	Bousso	3.980	4.500	25	Galton
	N'Djamena	5.160	5.900	43	Galton
BASSIN DU LOGONE					
Logone	Moundou	3.640	4.000	31	Gauss
BASSIN DU NIGER					
Bani	Douna	3.840	4.100	31	Galton
Niger	Koulikoro	9.700	9.500	57	Galton
	Dire	2.677	2.700	35	Gauss
	Niamey	2.365	3.000(1)	41	
	Gaya	2.810	3.250(2)	23	Log-extreme
			3.300(3)	20	Galton
BASSIN DU SENEGAL					
Paleme	Hidira	3.120	3.400	38	Gauss
Sénégal	Galougo	6.880	6.200	41	Gauss
	Kayes	6.840	6.600	73	Gauss
	Bakel	9.340	9.500	72	Galton
	Matam	8.200	9.040	72	Galton
	Dagana	3.570	3.650	71	Gauss

(1) Il est possible qu'en raison de l'évolution du delta intérieur (Rouier, 1970), la forme et l'ampleur de l'hydrogramme des crues subissent actuellement des modifications appréciables.

(2) Crue "malienne", également soumise à des changements progressifs.

(3) Crue "locale".

4.3.3.4 Conclusions à propos des débits de crue

Etant donné que les pluies de haute intensité sont brèves et recouvrent des superficies limitées, il en résulte que les débits des crues spécifiques sont très faibles par comparaison avec d'autres régions climatiques. Aucune des stations examinées dans la zone du projet n'a enregistré de débits atteignant 500 $l\ s^{-1}\ km^{-2}$ au niveau de probabilité de 10 pour cent.

De grosses inondations dues aux débordements des cours d'eau se produisent dans tous les bassins étudiés. Comme, par ailleurs, plusieurs cours d'eau de la savane s'écoulent à travers ou dans des zones à très faible précipitation, il s'ensuit qu'entre des stations de jaugeage successives l'on observe souvent des diminutions dans les débits spécifiques et dans les débits réels de crue. Cette constatation vaut tout spécialement pour les secteurs suivants:

La Volta Noire dans la région de Sourou,
Le Niger dans le delta intérieur,
Le Chari en aval de Sahr,
Le Logone en aval de Moundou, et
Le Sénégal en aval de Kayes.

Compte tenu de la diversité des distributions de fréquence qui ont été calculées pour la savane, on recommande que les relations théoriques basées sur les données existantes ne soient pas utilisées pour calculer des périodes de retour dépassant 10 ans.

4.3.4 Débit d'étiage et sécheresse

Bien que les relevés concernant les débits d'étiage s'avèrent critiques tant pour l'industrie de la pêche que pour le transport fluvial, le mesurage de ces débits n'a pas bénéficié d'un statut prioritaire. Par conséquent, les donnés pour les ressources en eau de surface ne comportent aucun

Tableau 4-18 DEBIT D'ETIAGE

LOW FLOWS ($m^3 sec^{-1}$)

PERIODE DE RETOUR (ANS)/RETURN PERIOD (YEARS)

BASSIN BASIN	STATION	10 ANS SEC 10-YEAR DRY	2 ANS HUMIDE 2-YEAR WET	10 ANS HUMIDE 10-YEAR WET
SENEGAL	TOUKOTO	0	0	1
	OUALIA	0	0	0
	DAKKA SAIDOU	6	10	19
	DIBIA	0	5	13
	GALOUGO	1	3	11
	KAYES	1	3	10
	FADOUGOU	0	1	3
	GOURBASSY	0	0	2
	KIDIRA	0	0	1
	BAKEL	0	2	10
	MATAM	0	2	10
GAMBIE	DONNEES INSUFFISANTES INSUFFICIENT DATA			
NIGER	BARO	8	17	35
	KANKAN	6	14	32
	KOULIKORO	21	35	70
	PANKOUROU	1	2	4
	DOUNA	11	20	36
	MOPTI	38	50	115
	DIRE	22	52	110
	TOSSAYE	45	100	190
	ALGONGUI	0	0	0
	KAKASSI	0	0	0
	GAREL	0	0	0

à suivre

Tableau 4-18 (suite)

BASSIN BASIN	STATION	10 ANS SEC 10-YEAR DRY	2 ANS HUMIDE 2-YEAR WET	10 ANS HUMIDE 10-YEAR WET
	NIAMEY	6	33	155
	BAROU	0	0	0
	GAYA	15	100	240
VOLTA	SAMENDENI	1	2	3
	MANIMENSO	4	6	9
	BOROMO	4	7	9
	LAWRA	6	8	10
	BAMBOI	4	13	35
	NANGODI	0	0	0
	YAKALA	0	0	0
	DABOYA	1	2	4
	PORGA	0	0	0
	SANSANNE MANGO	0	0	1
	SABOBA	1	3	8
LOGONE	BAIBOKOUM	9	16	25
	MOUNDOU	12	23	40
	DOBA	1	3	8
	LAI	28	47	69
	TCHOA	0	1	3
	BONGOR	14	30	58
	LOGONE GANA	19	28	39
CHARI	BAMINGUI	0	1	4
	SAHR	19	24	68
	MOISSALA	19	39	88
	AM TIMAN	0	0	0
	BOUSSO	49	107	232
	MAILAO	44	92	193
	NDJAMENA	68	121	214

renseignement sur les débits d'étiage, ou bien elles ne recouvrent que de courtes séries. Les fréquences des débits journaliers d'étiage sont regroupés dans le Tableau 4-18 pour des stations sélectionnées. Les périodes de retour sont données pour des périodes sèches de 10 ans et pour des période humides de 2 et 10 ans. En raison de la courte longueur du temps des enregistrements pour la plupart des stations, les valeurs observées pendant la récente sécheresse ont donc été les plus faibles relevées.

En règle générale, les débits diminuent de janvier à avril. Dépendant de l'époque d'arrivée des pluies, le minimum absolu risque de survenir entre fin mars et fin mai. La régularisation des débits se fait au moyen des apports venant des secteurs d'emmagasinage naturel des crues, de l'effet de remous dans des rivières à lit alluvial, et de formations hydrogéologiques.

Les cours d'eau qui ne dépendent pas de la recharge de la nappe souterraine ne sont pas outre mesure affectés par plusieurs années d'une pluviométrie se situant au-dessous de la normale. C'est pourquoi dans certains secteurs, notamment dans les petits bassins versants, les incidences de la sécheresse sur le débit des cours d'eau n'ont pas toujours été apparentes. Des exemples éloquents de ces phénomènes ont été les cours d'eau de la rive droite se jetant dans le fleuve Niger, tels que le Dargal et le Goroual.

Il est évident que les cours d'eau qui traversent de vastes zones de marais ou qui sont alimentés par des nappes souterraines se trouvent davantage vulnérables aux insuffisances de précipitation et conséquemment, l'effet de la sécheresse a été bien plus prononcé dans les cours d'eau en question. Le Bahr Azoum au Tchad a enregistré une diminution de 70 pour cent dans les débits annuels en 1968 et en 1972. La sécheresse a montré que pour une région aussi vaste que la savane il se produira toujours des anomalies, comme par exemple des débits au-dessus de la moyenne pour les petits bassins, en dépit d'une précipitation moyenne plus faible pour l'ensemble de la région. Ceci est particulièrement vrai pour la zone sahélienne où l'écoulement, d'une manière carac-

téristique, est irrégulier d'une année à l'autre.

En 1968, parmi les grands cours d'eau de la savane seul le fleuve Sénégal a eu des débits annuels au-dessous de la moyenne, soit un déficit de 45 pour cent. En 1969, les débits annuels de tous les grands cours d'eau ont été normaux ou plus élevés que la normale, sauf en ce qui concerne le Chari. En 1972, les fleuves Sénégal, Chari, Logone et Volta Noire ont accusé les plus faibles débits annuels jamais enregistrés. Le déficit s'est élevé à 66 pour cent à Bakel (fleuve Sénégal), 56 pour cent à N'Djamena (fleuve Logone), et 60 pour cent à Lawra (Volta Noire). De même, les débits de crue se rangent au nombre de ceux les plus faibles qui aient été observés pour ces cours d'eau. C'est ainsi qu'à Bakel (fleuve Sénégal), aucun débit n'a été observé pendant huit jours en avril 1974; et à Niamey (fleuve Niger), pour la même année, en juillet, un débit d'étiage de 5 m^3/s a été relevé par comparaison à un débit minimum moyen annuel de 75 m^3/s. En 1973, l'abaissement des débits du Chari a fait que le lac Tchad s'est rétréci jusqu'à environ le tiers de son volume moyen et a même occasionné qu'il se divise en deux parties.

Il est probablement intéressant de rappeler que ce n'est pas la première fois que la savane a eu à souffrir de la sécheresse. Des débits de valeurs comparativement faibles ont été enregistrés en 1913-14 et 1940-45. De plus les cartes historiques du lac Tchad montrent qu'en 1908 sa superficie a été de la même taille que celle atteinte en 1975. Par ailleurs, la sécheresse survenue vers 1913 a été apparemment d'importance égale à celle enregistrée récemment, tandis que la sécheresse de 1940-45 n'a été que légèrement moins sévère.

4.3.4.1 Séquences des débits de crue et des débits d'étiage

Le retour d'une série d'années de sécheresse succédant à une série d'années humides a conduit à entreprendre des études de cycles (voir Figure 4-1). Bien qu'il ait été beaucoup écrit sur cette question (Baris-Teynac,

1962, 1963) il serait risqué d'extrapoler pour l'avenir étant donné que seulement deux cycles complets (chacun d'une durée de trente ans) ont été enregistrés aux stations de jaugeage. Les observations historiques ainsi que les corrélations avec le Nil et d'autres bassins peuvent permettre d'élargir les données de base et aider à déterminer d'autres périodes de cycle.

On ne trouve que rarement la preuve évidente de la longueur des cycles de sécheresse ou d'humidité. Au cours de la période de 67 années d'enregistrement du fleuve Niger à Koulikoro, on a observé au moins deux cycles d'une durée de 20 à 25 ans au cours desquels on a relevé des débits se situant au-dessous ou en-deça de la moyenne. Il est donc souhaitable de vérifier que de telles séquences se trouvent présentes dans les séries obtenues par des méthodes mathématiques si elles doivent être utilisées dans les études d'exploitation des projets de mise en valeur hydraulique.

4.3.5 Ecoulement des petits bassins versants

S'il est vrai que les petits bassins versants de moins de 1.000 km^2 font rarement l'objet de jaugeage, il n'en demeure pas moins qu'ils justifient un examen critique en raison même de leur rôle dans l'approvisionnement des barrages de faible envergure et dans la recharge des bas-fonds. La plus grande partie des renseignements pour les petits bassins versants est récapitulée dans deux publications, l'une pour l'estimation de la crue décennale (Rodier, 1965) et l'autre, pour l'écoulement annuel dans la région du Sahel (Rodier, 1975).

Le relief de la zone de savane présente certaines caractéristiques qui résultent en débits d'écoulement relativement faibles. Les caractéristiques en question regroupent:

Les systèmes orageux qui se distinguent par leur déplacement dans une direction vers l'ouest et qui recouvrent des superficies comparativement restreintes;

Des pentes longitudinales faibles et des vallées plates;

Des taux très élevés d'évapotranspiration; et

Des cours d'eau s'écoulant généralement du sud au nord (de l'humide vers le sec), exception faite cependant des fleuves Volta et du bas-Niger.

Dans son étude sur l'écoulement annuel, Rodier a éprouvé des difficultés à généraliser les caractéristiques des petits bassins. En effet, la capacité d'infiltration des sols, les pentes, et surtout la dispersion annuelle des précipitations sur le plan superficie et durée (y compris l'insuffisance intrinsèque des relevés pluviométriques pour ce genre d'étude), contribuent toutes à la grande variabilité de l'écoulement. Par ailleurs, les distributions statistiques sont fortement asymétriques et exigent une longue série d'observations, ce qui est rare pour de petits bassins versants. De plus, les débits diminuent fréquemment de volume dans les parties aval des cours d'eau de la savane.

Les valeurs tirées de l'étude Rodier donnent une idée générale du coefficient d'écoulement annuel qui se définit comme le rapport entre le débit d'un cours d'eau et la précipitation. Pour une probabilité médiane d'occurrence, le rapport susvisé pour les petits bassins de moins de 40 km^2 donne une moyenne de 20% avec une variabilité de deux pour cent à 25 pour cent. Pour les bassins de taille moyenne, 40 à 1.000 km^2, le rapport accuse une moyenne de sept pour cent avec une variabilité d'un pour cent à 18 pour cent. Quant aux bassins de 1.000 à 10.000 km^2 la moyenne du rapport est de quatre pour cent et la variabilité va d'un pour cent à 14 pour cent.

L'écoulement annuel des petits bassins n'a pas été compilé sur une base régionale pour les zones avec précipitation plus élevée de la savane, mais l'ORMSTOM mène actuellement des études à ce propos. On s'attend à ce qu'une variabilité moindre et des coefficients d'écoulement un peu plus faibles caractérisent la partie sud de la savane.

4.3.6 Transport des sédiments

Les études sédimentaires dans les régions de savane sont très limitées. L'échantillonnage des solides sur une période de plus de quelques années n'a été entrepris que dans le bassin du Tchad. De même, des études visant à déterminer les effets des charriages et du dépôt des solides sur la mise en valeur des cours d'eau n'ont été menées que dans le bassin du bas-Niger. Quant aux parties hautes du Niger et de la Volta elles n'ont reçu que peu d'attention, alors que des relevés des débits solides sont effectués, rapporte-t-on, dans le bas-Volta au Ghana à des stations sélectionnées. En ce qui concerne le fleuve Gambie, les études sont en cours d'avancement.

Les cours d'eau des régions de savane ne charrient pas de grandes quantités de sédiments. Comme montré dans le Tableau 4-19, les valeurs en grammes par mètre cube pour les cours d'eau en question sont faibles par comparaison avec des cours d'eau comme le Hwang Ho, en Chine (44.000); le Colorado, aux U.S.A. (11.200); le Nil, en République arabe d'Egypte (1.920); le Rhône, en France (1.500); et le Zaire, en Afrique Centrale (400).

Les graphiques de la relation entre le débit et les sédiments en suspension dans les cours d'eau des régions de savane correspondent à une courbe, se caractérisant par une forme bouclée, pour les débits jaugés. Comme prévu, les niveaux de crue transportent de plus fortes concentrations de solides que les niveaux permanents ou décroissants. Au cours de la saison sèche, le soleil, le vent le feu, la culture et le pâturage animal contribuent à laisser la couche superficielle de sol susceptible à l'érosion en nappe. De plus, la terre subit l'érosion par des vents comme le Harmattan.

Les Tableaux 4-19 et 4-20 fournissent les renseignements existant actuellement à propos de la sédimentation. Le charriage total ainsi que les dépôts ultérieurs de solides ne semblent pas devoir mettre en danger les réservoirs existants ou envisagés. La dégradation moyenne sur l'ensemble du

bassin ne s'élève qu'à environ un à cinq millimètres par 100 ans. Des exceptions à ceci se manifestent sur de petits bassins ayant des pentes moyennes à fortes comme par exemple les cours d'eau venant du Plateau Jos au Nigeria. Les sédiments transportés au fleuve Niger dans ce secteur passent d'une couleur noire, connue localement sous le nom de "débit noir", à une couleur claire ou "débit blanc".

Pour les petits bassins versants, le U.S. Bureau of Reclamation (1968) a trouvé des débits solides en suspension aussi élevés que 1.348 tonnes/km^2/an sur un bassin de 7.000 km^2 sur la Challowa au Nigeria pour les années 1967-68. Il ne fait aucun doute que des valeurs aussi fortes existent pour d'autres bassins dans les régions de savane qui se caractérisent par des pentes rapides et des activités réciproquement intensives de l'Homme et des animaux, lesquelles favorisent l'érosion du sol.

Des études entreprises séparément au Nigeria par NEDECO et par le U.S. Bureau of Reclamation ont montré que les sédiments en suspension constituaient la plus grande partie de la charge totale de solides. Les charriages du lit n'ont été estimés qu'à 6,5 à 8 pour cent pour le fleuve Niger et de 13 à 15 pour cent pour le Kano. Les concentrations sédimentaires se révèlent relativement uniformes en profil vertical avec une légère augmentation au fond. Malgré le pourcentage relativement faible attribué aux charriages du lit par rapport au transport total, les caractéristiques des cours d'eau à lit alluvial demeurent entièrement fonction des quantités de charriages du lit, et elles exigent des études plus poussées.

Les mesures de la charge sédimentaire s'avèreront de plus en plus importantes au fur et à mesure que s'accroît la pression sur la terre et qu'inévitablement se produit une plus forte érosion du sol, cela malgré les efforts déployés dans certains pays afin d'introduire des mesures visant à protéger le sol.

Tableau 4-19 Quantités annuelles de sédiments en suspension

Bassin	Cours d'eau	Station	Année	Transports Solides milliers de tonnes/an ($t/Km^2/an$)		Concentration Moyenne annuelle g/m^3
NIGER	Niger	Baro	56	6580		
			57	11640		
SENEGAL	Falémé	Gourbassi	68-69	600	(40)	
	Soukoutaly	Bafing	68-69	1400	(47)	
	Kayes	Sénégal	68-69	2300	(14,6)	
	Bakel	Sénégal	68-69	2900	(13, 3)	
CHARI	Bahr Sara	Manda	68-69	844	(10, 6)	62
		($79.600km^2$)	69-70	132	(1,7)	51
			70-71	132	(1,7)	45
			71-72	326	(4,1)	20
			72-73	549	(6,9)	46
			73-74	478	(6,0)	36
			74-75	995	(12, 5)	56
	Chari	Sarh	68-69	251	(1,3)	39
		($193.000km^2$)	69-70	212	(1,1)	34
			70-71	212	(1,1)	31
			71-72	135	(0,7)	29
			72-73	135	(0,7)	33
			73-74	154	(0,8)	27
	Chari	Chagoua	69-70	1246	(2,4)	57
		($515.000km^2$)	70-71	1346	(2,6)	52
			71-72	1000	(1,9)	49
		N'DJAMENA				
		en amont	72-73	819	(1,6)	62
		à partir	73-74	900	(1,7)	54
		de N'Djamena	74-75	1135	(2,2)	51

à suivre

Tableau 4-19 (suite)

Bassin	Cours d'eau	Station	Année	Transports Solides milliers de tonnes/an ($t/Km^2/an$)		Concentration Moyenne annuelle g/m^3
LOGONE	Logone	Moundou	69-70	2208	(65)	138
		($33.920 km^2$)	70-71	2208	(65)	163
			71-72	2106	(62)	135
			72-73	1665	(49)	143
			73-74	1529	(45)	122
			74-75	1665	(49)	120
	Pende	Doba	69-70	352	(24,6)	78
		($14.300 km^2$)	70-71	313	(26,1)	76
	Logone	Kousseri	69-70	1347	(15,8)	111
		($85.000 km^2$)	70-71	1238	(14,6)	105
		NEAR	71-72	1025	(12)	111
		N'DJAMENA	72-73	1575	(18,5)	174
			73-74	1210	(14,2)	144
			74-75	1180	(13,8)	140

Tableau 4-20 Quantités annuelles de sédiments en suspension transportés au lac Tchad selon jaugeages pris de N'Djamena (en milliers de tonnes).

ANNEE	CHARI à Chagoua	LOGONE à Kousseri	TOTAL
69-70	1246	1347	2593
70-71	1346	1238	2584
71-72	1000	1025	2025
72-73	819	1575	2394
73-74	900	1210	2110
74-75	1135	1180	2315

Bien qu'il semble que les charriages du lit ne représentent qu'un faible pourcentage de la charge totale de sédiments il faudra néanmoins entreprendre davantage de jaugeages dans l'avenir prévisible afin de confirmer le fait ou de fournir des indications différentes. La méthode conventionnelle visant à utiliser des échantilloneurs pour les charriages du lit constituent une perte de temps et ne sont pas très sûres. Cependant, étant donné qu'actuellement davantage de barrages se trouvent en construction il devrait être possible de mesurer les dépôts sédimentaires, c'est-à-dire les charriages du lit aux deltas supérieurs, soit au moyen d'un sondeur accoustique à partir d'un bateau, soit au moyen de procédés modernes d'investigation après que le niveau des eaux se soit abaissé.

4.3.7 Qualité de l'eau

Peu d'attention a été accordée à la qualité de l'eau de surface dans les régions de savane. Dans la plupart des cas, les études traitant des ressources hydrauliques ne réfèrent à la qualité de l'eau que dans de courtes annexes énumérant les résultats obtenus d'une petite quantité d'échantillons. On n'a trouvé aucun programme systématique ou à long terme pour l'échantillonnage de la qualité de l'eau. Cette carence est due en partie au fait qu'il n'a été enregistré aucun problème sérieux quant à la qualité de l'eau. Les études à propos des effets limitants d'ions individuels sur des productions agricoles spécifiques ont été entreprises dans quelques cas.

En 1972, Grove exécuta une étude de reconnaissance de la composition chimique des fleuves Sénégal, Niger, Bénoué et Chari. Les résultats des analyses en question sont reproduits dans le Tableau 4-21. En sus de ses propres analyses, Grove a regroupé les données recueillies d'un certain nombre de sources variées et encore inédites.

En général, on a constaté que les eaux de surface se caractérisaient par un faible taux de dureté, d'alcalinité, et de solides totaux en

Tableau 4-21

Analyses des eaux de rivières de l'Afrique Occidentale (selon A. T. Grove, 1972)
(en parts par million)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cours d'eau	Echantillon No.	Date 1969	Emplacement	Distance Km	pH sous les conditions naturelles	Conductance à 25 C mho	Na	K	Ca	Mg	Cl	SiO_2	Dureté Ca + Mg ppm HCO_3
					St. Louis								
Sénégal	1	10 Oct	Diama	29	7,2	52	4,0	1,6	4,1	2,2	3	12	22
Sénégal	2	10 Oct	Debi	69	7,0	44	3,2	1,3	3,9	2,0	2	11	22
Sénégal	3	11 Oct	Diaouar	90	7,0	45	1,8	1,6	3,8	1,9	<1	5	22
Sénégal	4	12 Oct	Dagana	169	6,9	42	1,7	1,5	4,3	1,9	<1	11	22
Sénégal	5	12 Oct	Podor	268	7,4	40	1,7	1,5	3,6	1,8	<1	7	21,5
Sénégal	7	16 Oct	Guidala	367	7,4	37	1,7	1,5	3,7	1,8	<1	9	20,5
Sénégal	8	16 Oct	Ouala	401	7,5	35	1,7	1,1	3,6	1,5	<1	10	19,5
Sénégal	9	17 Oct	Vinding	492	7,5	36	1,3	1,1	3,4	1,8	<1	8	19,0
Sénégal	11	18 Oct	Tiguéré	610	7,6	33	1,7	1,2	3,5	1,6	<1	11	19,0
Sénégal	13	19 Oct	Waoundé	715	7,6	34	1,7	0,9	0,9	1,6	<1	7	18,5
Falémé	15	20 Oct	Confluence	823	7,5	42	1,7	1,2	4,1	1,9	<1	9	21,0
Sénégal	16	20 Oct	Sénégal	835	7,6	34	1,3	0,8	3,0	1,6	<1	9	18,5
					Koulikoro								
Niger	17	28 Oct	Ségou	180	7,2	26	1,4	1,5	2,4	1,0	<1	10	12,9
Bani	18	29 Oct	Mopti	502	6,8	38	1,6	1,4	3,1	1,4	<1	5	17,8

à suivre

Tableau 4-21 (suite) Analyses des eaux de rivières de l'Afrique Occidentale (selon A. T. Grove, 1972)
(en parts par million)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cours d'eau	Echantillon No.	Date 1969	Emplacement	Distance Km	pH sous les conditions naturelles	Conductance à 25 C mho	Na	K	Ca	Mg	Cl	SiO_2	Dureté Ca + Mg ppm HCO_3
Niger	19	30 Oct	Doua	700	7,2	32	1,4	1,4	2,8	1,3	<1	10	16,7
Niger	20	4 Nov	Gao	1308	7,1	38	1,8	1,8	3,3	1,9	<1	7	18,0
Niger	21	7 Nov	Tillabery	1570	7,1	38	1,9	2,0	3,4	1,8	<1	9	19,0
Niger	22	10 Nov	Lafagu	2370	7,2	49	4,9	2,0	3,7	2,05	<1	10	24,2
Niger	23	12 Nov	en aval de Kainji	2620	7,2	56	4,6	3,8	4,1	2,0	<1	10	24,8
Kaduna	24	14 Nov	confluence	2850	7,3	55	3,8	2,4	5,2	1,7	<1	14	26,0
Gurara	25	14 Nov	confluence	2900	7,4	50	4,3	2,0	4,4	1,6	<1	15	24,7
Niger	26	14 Nov	Koton Karifi	2920	7,4	54	4,1	2,5	5,0	1,8	<1	12	26,2
					Lokoja								
Bénoué	27	15 Nov	en amont de Lokoja	25	7,4	53			5,8	1,8	3,8		29,5
Bénoué	28	15 Nov	en aval de Makurdi	200	7,3	35	3,4	1,4	3,5	1,9	<1	14	18,5
Katsina Ala	29	16 Nov	confluence	250	7,1	26					<1		14,9
Bénoué	30	16 Nov	Ibi	350	7,2	39					<1		19,8
Donga	31	16 Nov	confluence	390	7,1	30					<1		15,6
Gongola	32	16 Nov	confluence	670	7,6	83					<1		40,0
Faro	33	17 Nov	confluence	790	8,0	74					<1		38,0

à suivre

Tableau 4-21 (suite) Analyses des eaux de rivières de l'Afrique Occidentale (selon A. T. Grove, 1972)
(en parts par million)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Cours d'eau	Echantillon No.	Date 1969	Emplacement	Distance Km	pH sous les conditions naturelles	Conductance à 25 C mho	Na	K	Ca	Mg	CI	SiO_2	Dureté Ca + Mg ppm HCO_3
Bénoué	34	17 Nov	Garoua	870	7,6	83	4,6	1,8	8,8	3,1	<1	15	46,5
					A partir du Tchad								
Logone	35	29 Nov	Yagoua	370	7,5	55					<1		28,2
Logone	36	29 Nov	Logone Gana	200	7,4	72	5,0	2,1	6,5	2,5	<1	17	33,5
Shari	37	29 Nov	Chagoua	130	7,2	54	3,4	1,6	5,0	2,0	<1	14	26,0

dissolution. On a trouvé qu'en certains endroits les niveaux de nitrates et d'ammoniac étaient élevés, ce qui indique la possibilité de pollution par des sources organiques.

Pour résumer, il semble que la qualité des eaux de surface convient pour l'agriculture et l'élevage, bien qu'il faille noter qu'en règle générale on ignore si des éléments comme a) le bore, le fer, le manganèse, et b) les ions sulfates et nitrates se trouvent présents. Pareillement, en ce qui concerne l'alimentation en eau potable, il convient que des informations supplémentaires soient obtenues au sujet de la présence ou autre de l'ammoniac, du plomb, du fluor, des nitrites et des nitrates. Il est peu vraisemblable que ces éléments existent en quantités importantes, exception faite peut-être des secteurs situés en aval des villes et des grandes agglomérations urbaines. Bien que de tels lieux ne soient pas appelés à être considérés pour des prises d'adduction d'eau, il conviendrait quand même que les incidences de la pollution potentielle sur la pêche soient prises en compte.

Des adductions d'eau ont été installées sur des rivières comme le Niger et ses affluents au Nigeria, et elles ont été exploitées pendant de nombreuses années en utilisant des traitements conventionnels, et souvent rudimentaires, sans que la population locale ne s'en ressente. La même observation s'applique, du reste, aux adductions d'eau au Ghana.

4.4 SOMMAIRE

La savane possède des ressources considérables d'eau de surface. Bien que ces ressources soient assez mal distribuées dans le temps et dans l'espace, on a accordé une attention toute spéciale à l'implantation de grands barrages à l'effet de régulariser la distribution des eaux. Il est évident que ces aménagements offrent des potentialités immenses pour contrôler une ressource qui limite de façon critique les possibilités de développement de la région. Cependant, il importe d'entreprendre une soigneuse évaluation,

sur le plan technique, socio-économique, et de l'environnement, du barrage envisagé de manière à éviter de déboucher sur des projets inadéquats, prématurés et démesurément onéreux. Il est prudent de rappeler ici que les résultats obtenus d'aménagements d'irrigation de grande envergure se sont révélés, dans certains cas, tout-à-fait décevants. Etant donné le nombre restreint d'agriculteurs en Afrique Occidentale possédant l'expérience voulue en matière d'irrigation, il devient donc difficile de se représenter l'existence, dans la savane et dans le proche avenir, d'une agriculture intensive en irrigué pareille à celle pratiquée le long du Nil.

Il convient de se pénétrer du fait que pour longtemps encore la grande majorité de la population rurale sera astreinte à s'adonner à la culture en sec et à l'élevage et qu'elle continuera de fournir la plus grande partie de la production agricole par de tels moyens. Les grands projets d'irrigation n'atteindront qu'une faible proportion de la population, et leur exécution et fonctionnement s'avèreront difficultueux. C'est pourquoi on recommande qu'une attention toute spéciale soit accordée aux schémas simples d'irrigation de faible à moyenne envergure et aux projets de recharge de la nappe phréatique. Il existe déjà de nombreux barrages en terre au sein de la savane qui pourraient éventuellement être utilisés pour l'irrigation de petites parcelles de terre, moyennant qu'un service de vulgarisation agricole fournisse l'assistance technique appropriée. Par ailleurs, il s'agirait de ne pas négliger les possibilités d'irrigation par les eaux souterraines, d'autant plus qu'il est relativement aisé de financer, d'implanter et d'exploiter ces systèmes d'arrosage.

Finalement, on soulignera la nécessité d'établir des plans plus précis de mise en valeur à l'échelon national et de bassin, tout en prenant dûment en compte tous les secteurs de ceux faisant usage de l'eau, y compris les populations urbaine et rurale, l'agriculture, l'élevage, et l'industrie. Bien que la complète concrétisation de ces programmes représente une somme considérable de travail sur plusieurs décennies, il n'en demeure pas moins que son caractère d'urgence exige qu'elle soit démarrée aussitôt que possible.

CHAPITRE 5

RESSOURCES EN EAUX SOUTERRAINES

5.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre, destiné à servir de document de base pour le planning régional, a été préparé avec l'assistance de deux bureaux d'études possédant une longue expérience des régions de savane. Il s'agit du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), la Société française d'études géologiques, et du Bureau d'Etudes de Géologie Appliquée, la firme française de consultants en hydrogéologie, qui, au titre de marchés de sous-traitance, ont établi les cartes hydrogéologiques préliminaires conçues par l'hydrogéologue de TAMS et du CIEH*. Les cartes en question ainsi que les informations connexes ont constitué le fondement du travail d'élaboration du présent chapitre.

L'hydrogéologue TAMS/CIEH visita la zone du projet et discuta les questions eaux souterraines avec les autorités gouvernementales afin d'arriver à une compréhension globale et à une connaissance spécifique des conditions et problèmes hydrogéologiques de l'Afrique Occidentale et Centrale. En outre, il fit la collecte et l'analyse de données de base ainsi que des examens et des enquêtes, et étudia les documents et rapports pertinents du Centre de Documentation du CIEH et ceux provenant d'autres organismes. Aucune investigation telle qu'inventaires de puits et forages, essais de pompage, analyses chimiques d'échantillons d'eau souterraine, prospections géophysiques ou campagnes de sondages ne furent faites. Ce chapitre est entièrement basé sur les données de base et documents existants, les cartes en minutes préparées par les sous-traitants, et les

---

* Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques

informations obtenues au cours de discussions avec un grand nombre d'hydrogéologues pratiquant en Afrique Occidentale et Centrale. Quelques zones, toutefois, sont insuffisamment décrites en raison des limitations en informations disponibles ou de l'impossibilité de les obtenir.

Bien que la topographie et le climat constituent les principaux facteurs qui affectent l'infiltration, la géologie est le facteur essentiel qui conditionne la présence, répartition, circulation et qualité des eaux souterraines. La nature géologique et la structure du terrain, entre autres choses, influencent le relief qui, à son tour, a un effet important sur le climat. La géologie de sub-surface détermine non seulement le gisement et les limites des aquifères, mais aussi leur aptitude à emmagasiner et transmettre l'eau ainsi que sa qualité. C'est pourquoi une description générale de la géologie de l'Afrique Occidentale et Centrale est esquissée ci-après avant de présenter l'hydrogéologie de la région.

5.2 GEOLOGIE

La géologie de l'Afrique Occidentale et Centrale, région tectoniquement inactive, est relativement simple. Elle est caractérisée par la régularité structurale et l'uniformité lithostratigraphique, traits dominants du reste du continent africain. L'Afrique consiste en un socle ancien, le Bouclier Africain, composé de roches cristallines et métamorphiques qui affleurent largement, et en bassins intérieurs et côtiers constitués de sédiments marins et continentaux. La zone du projet est dominée par ces caractéristiques qui se traduisent par peu d'eau souterraine dans le socle - mais suffisamment pour l'alimentation en eau rurale - et par des aquifères étendus et à productivité variable dans les bassins sédimentaires.

5.2.1 Cadre Géologique et Structural

5.2.1.1 Le Socle

Le Bouclier Africain, ou socle Précambrien, qui doit son existence à la consolidation du magma, subit une fracturation à grande échelle dès les époques géologiques les plus anciennes. Cela se traduisit par la compartimentation du socle en immenses blocs relativement élevés et en vastes bassins de subsidence (voir Figure 5-1). Les roches du socle et des bassins sont caractérisées par l'absence de plissements, à l'exception des Mauritanides et de la la chaîne de l'Atacora, par exemple.

L'énorme Bouclier Libéro-Ivoiro-Voltaique et sa prolongation par le Bouclier Nigérian et le Bouclier Centrafricain à l'Est occupe une grande partie de la zone du projet, en particulier la partie sud. Au Nord, le Tibesti, le Hoggar avec l'Air, l'Adrar des Iforas, et, à l'ouest, le Bouclier Reguibat ainsi que les Mauritanides constituent les limites des bassins sédimentaires mais ils sont hors de la zone du projet. La caractéristique majeure du socle est sa fracturation et son altération bien développées ainsi que sa couverture latéritique, élément typique en Afrique tropicale. Cela est favorable à la présence d'eau souterraine.

5.2.1.2 Les Bassins Sédimentaires

Les bassins sédimentaires sont situés entre les régions de socle ci-dessus. Toutefois, seules leurs parties méridionales se trouvent dans les limites de la zone du projet. De l'ouest vers l'est, les bassins sont : (1) le Bassin Sénégalo-Mauritanien bordé par le Bassin Côtier de Guinée et séparé par les Mauritanides de (2) l'énorme Bassin du Taoudéni qui se prolonge à travers le Détroit Soudanais entre l'Adrar des Iforas et le Bouclier Voltaïque, par (3) le Bassin du Niger qui se continue, au Nigeria par le Bassin de Sokato,

et à l'est à travers le plateau de Tegarna entre l'Air et le Bouclier Nigérian par (4) le vaste Bassin du Tchad. Au sud-est, le Bouclier Centrafricain sépare le Bassin du Tchad de l'immense Bassin du Congo qui se trouve hors de la zone d'étude. Au Nigeria, le Bassin de la Bénoué et le Bassin du Bas-Niger se continuent par le vaste bassin côtier du Nigeria qui se termine au Cameroun ainsi qu'au Bénin, Togo et Ghana. En raison de leur vaste étendue et de la nature de leur remplissage sédimentaire, tous ces bassins ont une grande importance hydrogéologique.

5.2.1.3 Géologie Historique

Les transgressions primaires eurent pour résultat de couvrir les bassins de dépôts marins - maintenant des roches - qui ont généralement de mauvaises caractéristiques hydrogéologiques. Le Bassin du Taoudéni fût le premier bassin intérieur sujet aux transgressions primaires. Dans les autres bassins, les transgressions ont débuté au Jurassique ou plus tard. L'orogénie hercynienne, la seule qui affecta l'Afrique Occidentale et Centrale, se traduisit par des reliefs tels que les Mauritanides (Cambro-Ordovicien) et la chaîne de l'Atacora et contribua à développer les failles et fractures du socle.

Au Secondaire, l'érosion des reliefs (socle) de la région se poursuivit. En même temps, à partir du Jurassique - début Crétacé, d'épaisses couches de sédiments continentaux en particulier le Continental Intercalaire, série et aquifère bien connu dans toute l'Afrique, furent déposées dans tous les bassins intérieurs. La grande transgression du Crétacé (sauf dans le Bassin du Tchad), qui dura jusqu'à l'Eocène, produisit un ensemble de sédiments marins comprennant le Maestrichtien et le Paléocène - aquifères bien connus du Bassin Sénégalo-Mauritanien et des bassins côtiers - ainsi que des dépôts hydrogéologique - ment médiocres (sauf au Nigeria) dans les Bassins du Tacuédini et du Niger.

climat était humide. La couverture latéritique est irrégulière et parfois peu développée, par exemple au Togo.

5.3.2.1 Horizons Aquifères

La Figure 5-3-A montre que l'altération dans les granites et les gneiss se traduit par une zone d'altération de 0-30 m d'épaisseur comprenant du haut vers le bas les horizons suivants : (a) la cuirasse latéritique, de quelques mètres d'épaisseur et pas toujours présente; (b) l'argile kaolinique, d'une dizaine de mètres d'épaisseur maximum, quelquefois absente; (c) les arènes, de quelques mètres d'épaisseur; (d) les sables de base, graviers, blocs et roche fracturée; et (e) la roche-mère plus ou moins fracturée, en général jusqu'à 50-100 m de profondeur, quelquefois moins et exceptionellement davantage. Dans les schistes (Figure 5-3-B), les horizons suivants sont les seuls qui existent : (a) bauxite, pas toujours présente; (b) l'horizon argileux (argile latéritique) qui peut avoir jusqu'à 100 m d'épaisseur; et l'horizon (d) formé dans ce cas de schistes fissurés et fracturés. Dans les quartzites, grès et roches volcaniques, les horizons d'altération sont absents ou très peu développés. Les horizons aquifères sont : (c) les arènes, (d) les sables de base, graviers et blocs, ainsi que l'horizon (e), en particulier quand la fracturation est importante; l'horizon (a), la cuirasse, est quelque fois aquifère.

La présence d'eau souterraine, bien que homogène à l'échelle régionale, l'est beaucoup moins à l'échelle locale ou du site de l'ouvrage d'exploitation (voir Figure 5-4). En fait, elle est discontinue et très variable. Un puits peut être relativement bon dans une zone d'altération et/ou fracturée et extrêmement décevant ou même sec pas loin de là. Cela est dû aux variations en altération et fissuration du socle. Les zones très altérées et celles très fracturées vont généralement de pair étant donné que l'altération se développe au mieux à partir d'une zone déjà fracturée. En conséquence,

les zones d'altération les plus épaisses se trouvent généralement au droit des zones fracturées; ces deux facteurs sont favorables à la présence d'eau souterraine. En fait, la recherche d'eau souterraine dans ce type d'environnement hydrogéologique consiste à localiser les zones fracturées par photo-interprétation, géophysique et observations sur le terrain. Il en résulte l'identification des zones les plus productives, soit à partir de l'horizon d'altération (sables de base et blocs), soit (ou mieux) à partir de la zone fracturée sous-jacente jusqu'à environ 80-100 m de profondeur. Ensuite, il est généralement recommandé de placer l'ouvrage d'exploitation légèrement d'une part ou de l'autre de la fracture (ou de la partie la plus épaisse de la zone d'altération), et non immédiatement à l'aplomb de celle-ci, cela pour des considérations de pendage et parce que des argiles résiduaires se trouvent généralement en ce point-là.

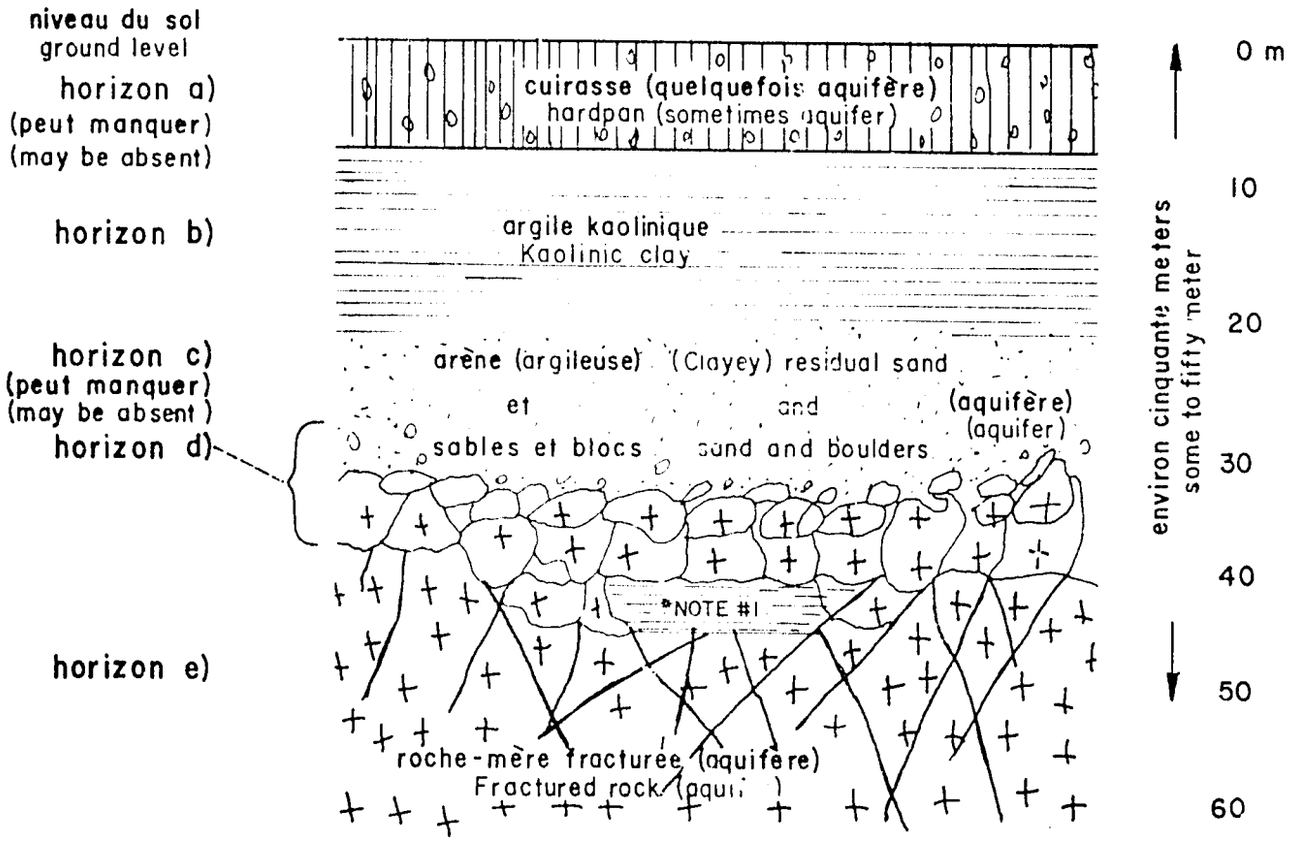
5.3.2.2 Débits et Profondeurs des Ouvrages d'exploitation

Les débits des puits et forages (voir Carte 5-3) varient entre 0 et exceptionnellement 50 m^3/h, par exemple dans la cuirasse latéritique ou dans les schistes très fracturés. En général, ils sont de 0,5 à 8 m^3/h, les valeurs les plus élevées étant typiques des zones fracturées dans les schistes, et les valeurs les plus faibles typiques des arènes des granites et gneiss. Dans les basaltes, de bons débits sont obtenus au Nigeria par exemple (Plateau de Jos) où des sources livrent 400 m^3/h et des puits et forages 10-20 m^3/h. Les transmissivités dans le socle sont généralement de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} m^2/s.

Les profondeurs des puits et forages (voir la légende de la Carte 5-2) varient entre 5 à 70 m et sont le plus souvent de 15-40 m. Les ouvrages les plus profonds sont ceux dans les schistes et dans la zone fracturée des granites et gneiss; ils sont d'environ 15-20 m de profondeur dans la zone d'altération des granites et gneiss.

COUPES SCHEMATIQUES DE L'ALTERATION ET DES HORIZONS AQUIFERES DANS LE SOCLE
SCHEMATIC SECTIONS OF WEATHERING AND GROUNDWATER OCCURRENCE IN THE BASEMENT

A/ Altération des Granites et Gneiss
Weathering in Granites and Gneisses



les meilleurs sites pour puits et forages sont de part et d'autre de l'argile d'altération qui occupe le centre de la zone altérée

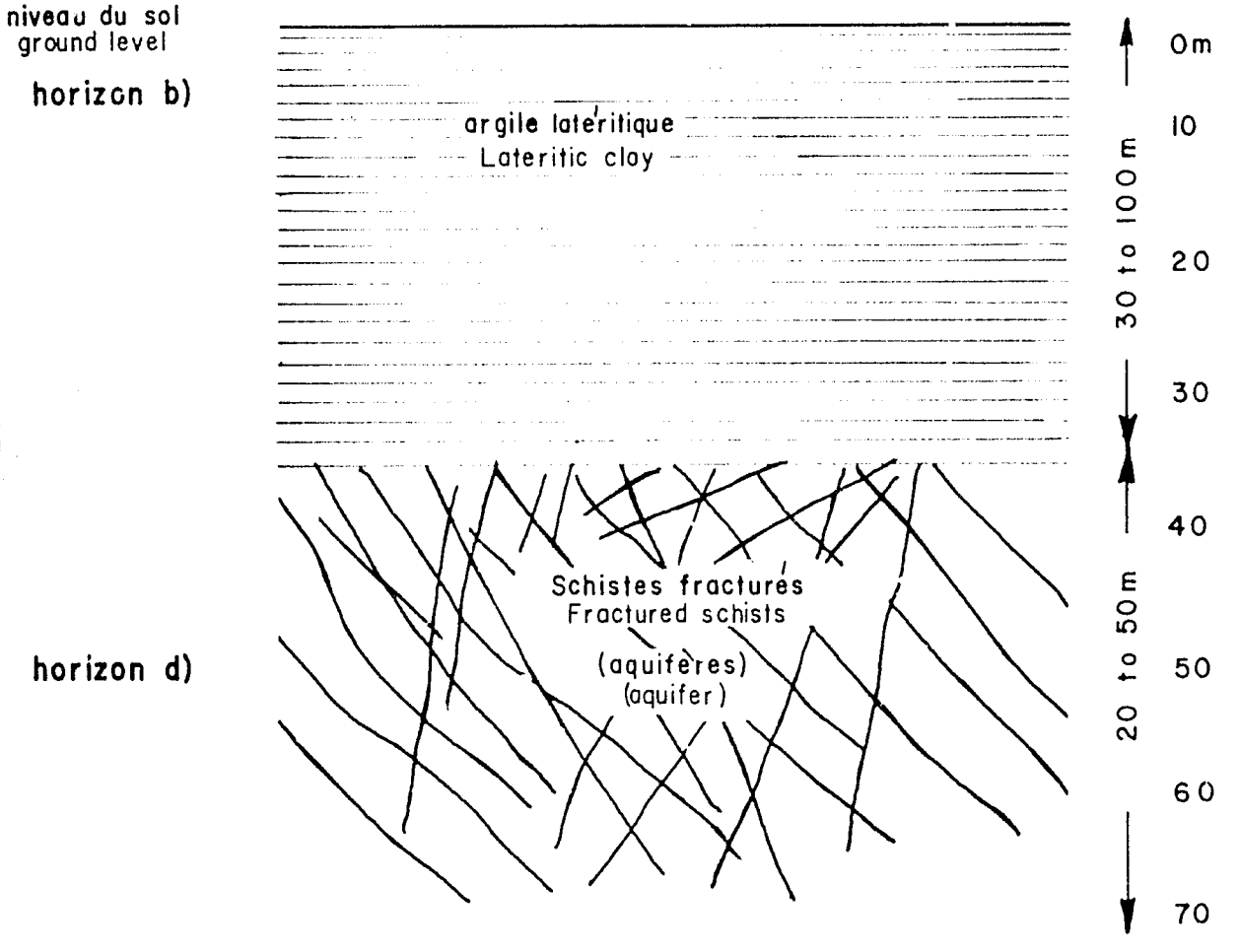
best location for wells is apart from the residual clay (center of alteration through)

NOTE # 1
argile d'altération
Residual clay

Fig. 5-3(A)

COUPES SCHEMATIQUES DE L'ALTERATION ET DES HORIZONS AQUIFERES DANS LE SOCLE
SCHEMATIC SECTIONS OF WEATHERING AND GROUNDWATER OCCURRENCE IN THE BASEMENT

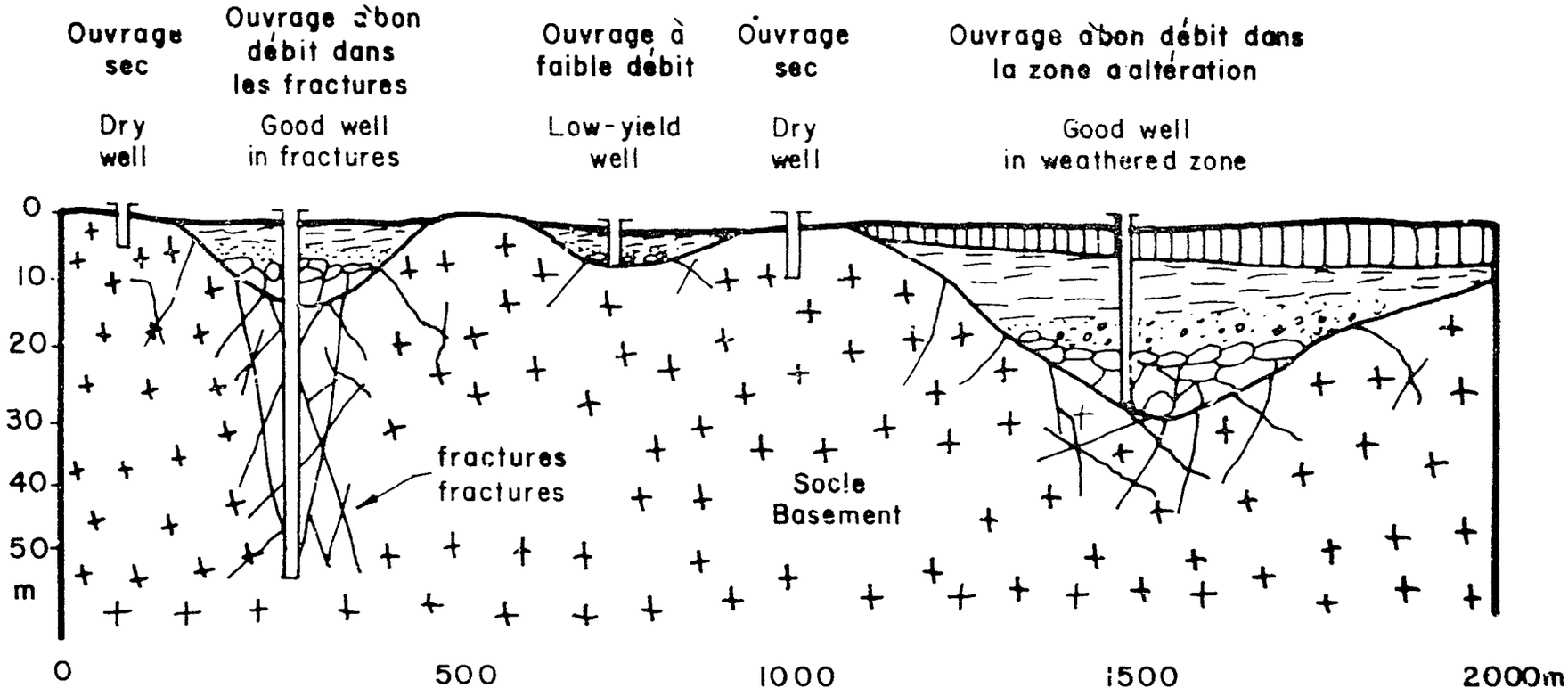
B :/ Altération des Schistes
Weathering in Schists



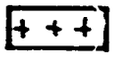
les meilleurs sites pour puits et forages sont dans la zone fortement fracturée
best location for wells is where fracturing is dense

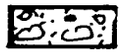
Fig. 5-3(B)

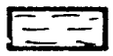
COUPE TYPIQUE DES ZONES AQUIFERES DANS LE SOCLE
GROUNDWATER OCCURRENCE IN THE BASEMENT, TYPICAL CROSS-SECTION



Les zones aquifères sont les arènes et blocs de la zone d'altéraration, et les fractures
Groundwater occurs in basal sands and boulders of weathered zone and in fractures


socle
basement


arènes et blocs
sand and boulders


argile d'altération
residual clay

cuirasse
hardpan

Fig.5-4

Les débits et profondeurs typiques des ouvrages sont résumés dans le Tableau 5-3 ci-dessous (et dans la légende de la Carte 5-2).

TABLEAU 5-3.

DEBITS ET PROFONDEURS DES OUVRAGES DANS LE SOCLE

Aquifère	Débits (m^3/h)			Profondeurs (m)	
	Fourchette	Moyenne	Exceptionnel	Fourchette	Moyenne
- Schistes cambriens et infracambriens	0-20	5		25-70	40
- Schistes précambriens	0-20	8	40	25-70	40
- Granites, gneiss					
. horizons a et c	0-5	0,2	10	5-30	15
. horizons d et e	0-10	4	20	30-70	40
- Roches éruptives	0-20	3	20	15-50	30

5.3.3 Les Bassins Sédimentaires

Les bassins sédimentaires couvrent près de la moitié de la zone du projet. Ils sont caractérisés par une couverture primaire étendue, mais à mauvaises propriétés hydrodynamiques, dans le Bassin du Taoudéni, et par de généralement bons aquifères secondaires, tertiaires et quaternaires, en particulier dans les bassins du Tchad, Niger, Sénégal et Nigeria (voir Figure 5-2). La plupart des aquifères sédimentaires sont formés de sables et grès tandis que les aquifères calcaires sont peu répandus et généralement médiocres (excepté le Paléocène au Sénégal et dans le Bassin de Sokoto au Nigeria, par exemple). L'altération caractéristique du socle n'affecte qu'exceptionnellement les roches des bassins sédimentaires, par exemple les schistes primaires de Guinée. Les débits et profondeurs des puits et forages sont résumés dans la légende de la Carte 5-2, et les débits des ouvrages des aquifères

phréatiques et profonds sont cartographiés sur la Carte 5-3. La profondeur du toit des nappes profondes est cartographiée sur la Carte 5-4, feuille 3.

5.3.3.1 Terrains Primaires

Les terrains primaires de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur et typiques des bassins du Taoudéni et de Guinée, et du Ghana, ont de meilleures caractéristiques hydrogéologiques que le socle. Cependant, ces terrains qui ont une perméabilité de fissures sont de médiocres, voire mauvais, aquifères, mais quelquefois intéressants, par exemple les grès d'Aioun et les pélites du Hodh en Mauritanie. Les débits des ouvrages varient de 0 à 100 m^3/h mais sont en général de 1 à 10 m^3/h. Les dolomies et parfois les grès sont les meilleurs aquifères et les schistes sont les pires, alors que les quartzites et grès donnent généralement des débits de l'ordre de 2-3 m^3/h par ouvrage. Les sources de Kou, dans les grès de Bobo-Dioulasso en Haute Volta, qui débitent environ 2-4 m^3/s mettent en évidence les exceptionnellement excellentes caractéristiques locales des terrains primaires. Les profondeurs des ouvrages sont de l'ordre de 5-70 m, le plus souvent 25-40 m, les ouvrages les plus profonds étant ceux dans les quartzites et les moins profonds ceux dans les dolomies. Le Tableau 5-4 ci-dessous résume les valeurs typiques des débits et profondeurs des ouvrages.

TABLEAU 5-4

DEBITS ET PROFONDEURS DES OUVRAGES DANS LES TERRAINS PRIMAIRES

	Fourchette	Moyenne	Exceptionnel	Fourchette	Moyenne
- Grès	1-5	3	25	10-50	30
- Quartzites	0-5	2	15	25-70	40
- Schistes	0-5	1	10	5-70	30
- Dolomies	0-20	10	100	15-20	25

5.3.3.2 Continental Intercalaire

Les sables et grès plus ou moins argileux du Continental Intercalaire constituent l'un des meilleurs, plus épais (200 à plus de 400 m) et profonds (jusqu'à plusieurs centaines de mètres) aquifères de la région. Cet aquifère se rencontre à travers tout le continent africain. Il est l'un des plus grands aquifères du monde et il est particulièrement intéressant au Sahara, en Egypte, en Libye, au Soudan, au Zaire et dans la partie méridionale de l'Afrique. Dans la zone du projet, on le trouve dans le Bassin du Niger (grès du Tegama), les bassins de Sokoto, de la Bénoué et du Bas-Niger (Nigeria) et dans l'Empire Centrafricain (grès de Moukka-Ouadda et de Carnot, bons aquifères de 200-300 m d'épaisseur); il n'est pas bien développé dans le Bassin du Taoudéni et devrait être exploré dans le Bassin du Tchad. Cet aquifère est libre dans ses parties amont et en général captif ailleurs. Les débits des ouvrages d'exploitation varient de 1 à 250 m^3/h (5 m^3/h en moyenne pour les puits traditionnels, et 100 m^3/h et bien davantage pour les forages), les meilleurs étant dans les bassins du Niger et de Sokoto. Les profondeurs des ouvrages sont le plus souvent de 10 à 100 m dans les zones d'affleurement (puits) et jusqu'à plusieurs centaines de mètres ailleurs. Les transmissivités du Continental Intercalaire sont généralement de l'ordre de 10^{-3} m^2/s et davantage.

5.3.3.3 Crétacé

Les dépôts marins du Crétacé, d'épaisseur maximum de quelques centaines de mètres, comprennent des calcaires et dolomies marneux, des argiles, des schistes, etc, en particulier dans les bassins du Niger et du Taoudéni. Ces dépôts sont de médiocres ou mauvais aquifères et les débits des ouvrages y sont de l'ordre de 0 à 20 m^3/h. Cependant, dans les bassins du Nigeria et côtiers (Bénin, Togo, etc), les dépôts crétacés ont un faciès sableux et sont de bons aquifères, en particulier dans les bassins de la

Basse-Bénoué, du Bas-Niger et de Sokoto où les débits des ouvrages atteignent jusqu'à 100-150 m^3/h (dans le Bassin de la Haute-Bénoué, ils sont beaucoup moindres, l'aquifère y étant médiocre). La profondeur des ouvrages est de l'ordre de 50-150 m et davantage, par exemple dans le Bassin de la Bénoué. Les transmissivités sont bonnes au Nigeria, de l'ordre de 10^{-3} à $10^{-2} m^2/s$ dans le Bassin de Sokoto.

5.3.3.4 Maestrichtien

L'aquifère Mæstrichtien, sableux, généralement captif, et de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur maximum, se trouve dans le Bassin Sénégalo-Mauritanien, en particulier au Sénégal, et dans le Bassin Côtier du Togo-Bénin-Nigeria (voir la section ci-dessus "Crétacé"). Cet aquifère est l'un des aquifères les plus productifs d'Afrique Occidentale, en particulier au Sénégal et aussi en Gambie et Guinée-Bissau. Les débits des ouvrages atteignent 300 m^3/h et sont généralement de 100 m^3/h et davantage, et peu souvent de 10-20 m^3/h seulement. Ces débits décroissent de l'est vers l'ouest au Sénégal et en Mauritanie en raison du changement de faciès (argileux) de l'aquifère. Les profondeurs des puits varient de 100 à 500 m et sont le plus souvent de l'ordre de 250 m. Les transmissivités sont en général de 10^{-3} à $10^{-2} m^2/s$.

5.3.3.5 Paléocène (et Eocène)

Les calcaires et dolomies paléocènes (et eocènes), de quelques dizaines de mètres à 100-200 m d'épaisseur, constituent un aquifère intéressant au Sénégal où le Paléocène est karstique et en continuité hydraulique avec le Mæstrichtien, ainsi que dans le Bassin de la Haute-Bénoué au Nigeria. Ailleurs, les faciès sont généralement marneux ou argileux, et l'aquifère est mauvais à médiocre (bassins de Sokoto, de la Basse-Bénoué et côtiers) alors que les dépôts crétacés ci-dessus sont, eux, un aquifère valable.

Les débits des ouvrages, généralement de l'ordre de 0 à 15 m^3/h (et le plus souvent 3 m^3/h) quand le faciès est argileux, atteignent 100-300 m^3/h au Sénégal et lorsque l'aquifère est calcaire et karstique. Les profondeurs des puits, de 25 à 50 m lorsque l'aquifère est proche de la surface du sol, peuvent atteindre 150-200 m ailleurs.

5.3.3.6 Continental Terminal

Les sables, grès et argiles du Continental Terminal, 50-200 m d'épaisseur et davantage dans le Bassin du Tchad (jusqu'à 1.000 m et plus ?), se rencontrent dans tous les bassins de la zone du projet. Le Continental Terminal est l'aquifère principal du Bassin du Tchad où, cependant, il est nécessaire de le reconnaître davantage. Cet aquifère est souvent libre et quelquefois captif, par exemple dans les bassins du Tchad et de Sokoto où il est composé de deux ou trois unités. Les débits des ouvrages sont en général de 5 m^3/h pour les puits et d'environ 50 m^3/h pour les forages, jusqu'à un maximum de 100-150 m^3/h. Les profondeurs des ouvrages varient de 10 à 150 m et sont généralement de 40 m et davantage. Cependant, elles devraient être supérieures dans beaucoup de cas afin de tirer le meilleur parti de cet intéressant et relativement peu profond aquifère. Les transmissivités sont le plus souvent de l'ordre de 10^{-4}-10^{-3} m^2/s.

5.3.3.7 Plio-Quaternaire et Quaternaire

Les dépôts détritiques du Plio-Quaternaire et du Quaternaire, 5 à 100 m d'épaisseur (et davantage au Tchad) affleurent dans tous les bassins de la zone du projet. Ils constituent de bons aquifères au Nigeria, Niger, Sénégal et surtout au Tchad. Les débits des ouvrages varient de 0 à 150 m^3/h, généralement quelques m^3/h à 5-10 m^3/h, les meilleurs provenant des sables dunaires (Sénégal) et des dépôts fluviaux, lacustres et marins. Les alluvions sont peu développées dans la région mais il arrive qu'elles sont de notables

aquifères (vallée du Sénégal, par exemple). Les vallées fossiles ("dallols" du Niger) telles que celle de l'Azaouak au Niger, du Tilemsi au Mali (Nord de Gao), du Bahr El Ghazal au Tchad, et d'autres en Mauritanie offrent de bonnes perspectives qui devraient être étudiées davantage. Les profondeurs des puits, d'un maximum de quelques centaines de mètres (Bassin du Tchad), sont généralement de 5-20 m et n'ont pas à être de plus de quelques dizaines de mètres le plus souvent. Les transmissivités sont variables, de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-2} m^2/s et particulièrement bonnes dans le Pliocène et la zone du Lac Tchad, par exemple.

5.3.3.8 Résumé

Les aquifères sédimentaires sont situés et caractérisés comme il suit dans la zone du projet :

- Bassin Sénégalo-Mauritanien : alluvions et sables dunaires, moyens a bons, en particulier au Sénégal; Continental Terminal, étendu et moyen à bon, en particulier au Sénégal, et le meilleur aquifère de Mauritanie; Eocène, mauvais à médiocre; Mæstrichtien (et Paléocène), étendu, bon mais relativement profond.
- Bassin de Guinée : Quaternaire, limité; Tertiaire, limité mais peut être moyen à bon; Primaire, mauvais.
- Bassin du Taoudéni : Alluvions du Niger, sans intérêt en raison de la présence du Continental Terminal, aquifère étendu et bon; Crétacé, médiocre; Continental Intercalaire, relativement limité et bon mais quelque peu profond; Primaire, étendu mais pauvre à médiocre, débits parfois exceptionnels, par exemple en Haute-Volta.
- Bassin du Niger : Continental Terminal, étendu et moyen à bon; Eocène, Paléocène, Crétacé, mauvais à médiocre (le Crétacé est bon dans le bassin de Sokoto); Continental Intercalaire, étendu et bon mais profond.

- Bassin du Tchad : Quaternaire, étendu, épais, bon mais hétérogène; Pliocène, relativement étendu et épais, bon; Continental Terminal, étendu, épais et bon; Continental Intercalaire (Empire Centrafricain, probablement bon), à explorer.

- Bassins du Bas-Niger et de la Bénoué : Quaternaire, moyen; Continental Terminal, bon; Paléocène, mauvais, bon à l'amont; Crétacé, médiocre mais épais et bon à l'aval; Continental Intercalaire; épais et bon.

- Bassin du Togo-Bénin : Quaternaire, moyen; Continental Terminal, bon; Paléocène, mauvais à moyen; Mæstrichtien, bon.

5.3.4 Conclusion

Le socle qui occupe plus de la moitié de la zone du projet, en particulier la partie méridionale, est un mauvais mais utile aquifère, en particulier pour l'alimentation en eau rurale à l'aide de puits de 15-40 m de profondeur et 0,5-6 m^3/h de débit. Il couvre presque toute la superficie de pays tels que Côte d'Ivoire, Sierra Leone, Ghana, Guinée, Togo, Haute-Volta, Bénin, Cameroun et Empire Centrafricain qui le plus souvent n'ont pas d'autres aquifères. Toutefois, l'Empire Centrafricain (parties nord, est et sud), le Cameroun (zone du Lac Tchad), le Bénin (parties côtières et nord) le Togo (partie côtière) et la Haute-Volta (parties nord et sud-ouest) comprennent quelques aquifères intéressants, tandis que la Mauritanie, le Sénégal, le Tchad et surtout le Nigeria ont d'importantes superficies de socle.

Les bassins sédimentaires sont de bons réservoirs aquifères mais ils ne se trouvent essentiellement que dans la partie sahélienne de la zone du projet. Les bassins du Tchad, Niger, Sénégalo-Mauritanien, du Nigeria et même du Taoudéni sont particulièrement étendus et intéressants, tandis que les petits bassins côtiers du Bénin et Togo contiennent des aquifères notables et utiles.

Les formations primaires sont de mauvais à médiocres aquifères. Elles sont très développées au Mali et présentes en Guinée, Guinée-Bissau, Mauritanie, au Sénégal et en Haute-Volta (ainsi qu'au Ghana et Togo où les schistes ont été classés comme socle); les ouvrages, en général de 25-40 m de profondeur donnent des débits de 1-10 m^3/h et exceptionnellement jusqu'à 100 m^3/h. Les aquifères du Continental Intercalaire, Maestrichtien et Paléocène sont épais et profonds, en général 150-250 m (et davantage pour Continental Intercalaire), et offrent de bonnes possibilités, avec des débits le plus souvent de 100-150 m^3/h par ouvrage. Le Continental Terminal, le Pliocène et le Quaternaire sont des aquifères moins profonds, généralement 20-100 m, et bons, en particulier le Continental Terminal dont les ouvrages débitent jusqu'à 150 m^3/h. Tous ces aquifères post-primaires se trouvent principalement dans la région du Lac Tchad, au Niger, Nigeria, Mali, Sénégal, en Gambie, Guinée Bissau et Mauritanie.

Les pays particulièrement bien pourvus de bons aquifères sont le Nigeria, Tchad, Niger et Sénégal. Les autres tels que Mali, Gambie, Guinée Bissau, Empire Centrafricain et même Mauritanie sont raisonnablement bien pourvus, tandis que Cameroun, Bénin, Togo et Haute-Volta ont quelques aquifères notables. Dans l'ensemble, les pays avec plusieurs bons aquifères sont le Nigeria, Tchad, Niger, Sénégal, et même le Mali. Les pays avec quelques bons aquifères sont la Gambie, Guinée-Bissau (large superficie), l'Empire Centrafricain, la Mauritanie, le Cameroun, Bénin et Togo. Les pays avec généralement de pauvres aquifères sont la Haute-Volta et surtout la Guinée, le Ghana, la Sierra Leone et Côte d'Ivoire.

5.4 HYDROGEOLOGIE

Le socle est un aquifère libre relativement simple en dépit de son hétérogénéité. Les aquifères des bassins sédimentaires constituent un système complexe comprennant plusieurs nappes, soit libres, soit captives, et un

large éventail de conditions hydrogéologiques. Outre les caractéristiques hydrogéologiques et les ouvrages d'exploitation décrits dans les pages précédentes, la profondeur du niveau de l'eau, la circulation et la qualité des eaux souterraines, les ressources renouvelables et les réserves statiques sont les éléments principaux qui caractérisent les eaux souterraines de la région et conditionnent leur disponibilité et leur intérêt. De plus, l'utilisation actuelle de ces eaux joue un rôle important dans leur évaluation en raison de son impact sur le potentiel supplémentaire disponible et sur la planification.

5.4.1 Profondeur du Niveau de l'Eau

La profondeur du niveau de l'eau dépend des conditions topographiques, hydrogéologiques et climatiques. La Carte 5-4 présente la profondeur de l'eau dans les nappes phréatiques du socle et des bassins sédimentaires (feuille 1) et dans les nappes profondes (feuille 2). La profondeur du toît des aquifères profonds est cartographiée sur la feuille 3. La profondeur des puits et l'épaisseur des aquifères sont décrites dans les pages précédentes et dans la légende de la Carte 5-2.

Dans le socle, le niveau de l'eau se trouve entre quelques mètres et 20-30 m sous le niveau du sol, en général 10-15 m environ. En fait, les puits ont le plus souvent ou devraient avoir 15-40 m de profondeur, avec de préférence environ 5 m de hauteur d'eau sous le niveau de saison sèche.

Dans les bassins sédimentaires, le niveau phréatique est en général à 20-40 m sous le niveau du sol, au maximum à 80-90 m. L'eau souterraine dans les vallées et les alluvions est la moins profonde, 5-20 m sous le niveau du sol; il en est de même pour celle en continuité hydraulique avec les eaux de surface (Sénégal, Gambie, Niger - en particulier au Mali -, Chari et Logone). C'est dans les zones arides (Sahel) que l'eau souterraine est la

plus profonde, généralement 40-60 m et davantage. Les fluctuations du niveau de l'eau sont de l'ordre de 5-10 et plus (en particulier dans les zones arides) entre les saisons sèche et humide. Dans le Sahel, la récente série d'années de sécheresse s'est traduite par un abaissement généralisé du niveau des nappes qui semble prendre plusieurs années pour remonter.

Dans les nappes profondes, en général captives, il y a parfois artésianisme jaillissant (bassins du Tchad et de Sokoto par exemple), mais le niveau de l'eau est généralement à 10 à 50 m sous celui du sol. La profondeur du toit des aquifères varie de 100 à 500-700 m sous le niveau du sol; elle est le plus souvent de 200-300 m. Le Continental Intercalaire est généralement l'aquifère le plus profond.

5.4.2 Circulation des Eaux Souterraines

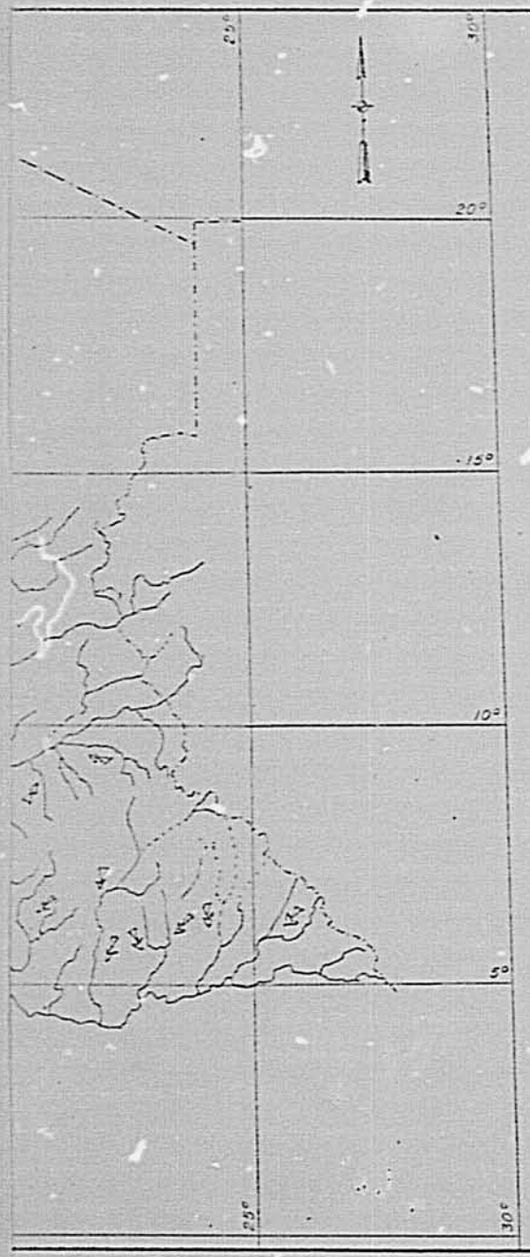
L'alimentation des nappes, facteur pas bien connu, provient principalement de la pluie. Toutefois, elle est presque nulle dans les zones où la pluie est inférieure à 400 mm par an, c'est-à-dire dans le Sahel, mais elle est relativement importante au sud, très probablement jusqu'à 10-20 % et davantage de la pluie. Les importantes fluctuations saisonnières du niveau des nappes phréatiques, comprennant une hausse de niveau de plusieurs mètres après les pluies, démontre l'importance de l'infiltration, tandis que la baisse du même ordre pendant la saison sèche met en évidence l'intensité de l'évapotranspiration. Outre l'évapotranspiration, principal exutoire des nappes, leur vidange se fait par quelques sources et dans les fleuves et rivières auxquels les nappes fournissent un débit de base notable. Dans les bassins côtiers, la vidange a aussi lieu dans l'océan et un mouvement inverse (intrusion d'eau de mer) peut avoir lieu dans les cas de surexploitation des nappes. Le potentiel pour une telle intrusion existe au Togo, Bénin, en Guinée, Guinée-Bissau, Gambie, au Sénégal et en Mauritanie. En ce qui concerne la zone du Lac Tchad, elle est l'exutoire sub-régional des nappes.

Les nappes profondes sont alimentées principalement par drainance à partir des nappes phréatiques et aussi par infiltration dans leurs zones d'affleurement - ce qui est généralement relativement limité. Dans les zones où le niveau de ces nappes est supérieur à celui des nappes phréatiques une drainance vers le haut se produit; c'est le cas dans la zone du Lac Tchad.

La Figure 5-5 montre qu'en général les parties amont des fleuves et rivières drainent les nappes phréatiques, en particulier dans le socle. Leurs parties aval alimentent souvent les nappes du Quaternaire et du Continental Terminal avec lesquelles ces fleuves et rivières, sont en continuité hydraulique, par exemple le Niger au Mali, le Chari et le Logone et le Sénégal; cela est particulièrement vrai pendant la saison pluvieuse. L'ordre de grandeur de la vidange des nappes dans les fleuves et rivières (débit de base) est appréciable comme le montrent les mesures de débit d'étiage aux stations hydrologiques (voir le chapitre Eaux de Surface). Il semble être supérieur à 10 milliards de mètre-cubes par an dans la zone du projet. Cette vidange est particulièrement élevée dans les bassins du Tchad et du Niger (quelques milliards de m^3/ an chacun) et est de plusieurs dizaines de millions de m^3/an dans le Bassin du Sénégal. Cela donne une estimation de l'ordre de grandeur de l'alimentation réelle des nappes auquel toutefois il faut ajouter la drainance vers le haut (évapotranspiration) dans les zones à niveaux phréatiques proches du sol, et la drainance vers les nappes profondes afin d'avoir une estimation totale de l'alimentation des nappes. Ces drainances sont d'un ordre de grandeur plus élevé que celui du débit de base des fleuves et rivières.

5.4.3 Ressources Renouvelables

Les ressources renouvelables (ou alimentation) des nappes dans la zone du projet sont difficiles à calculer en raison de la complexité des conditions hydrogéologiques, de l'immensité de la zone et des lacunes en données



LEGENDE:
LEGEND:

DRAINAGE DES AQUIFERES PAR LES FLEUVES (EN PARTICULIER DANS LE SOCLE ET AU SUD DU PARALLELE 12°; LE LAC TCHAD EST L'EXUTOIRE DU SYSTEME AQUIFERE SUB-REGIONAL)
DRAINAGE OF AQUIFERS BY RIVERS (ESPECIALLY IN THE BASEMENT AND SOUTH OF PARALLEL 12°, LAKE TCHAD IS SUB-REGIONAL GROUNDWATER SYSTEM OUTLET)

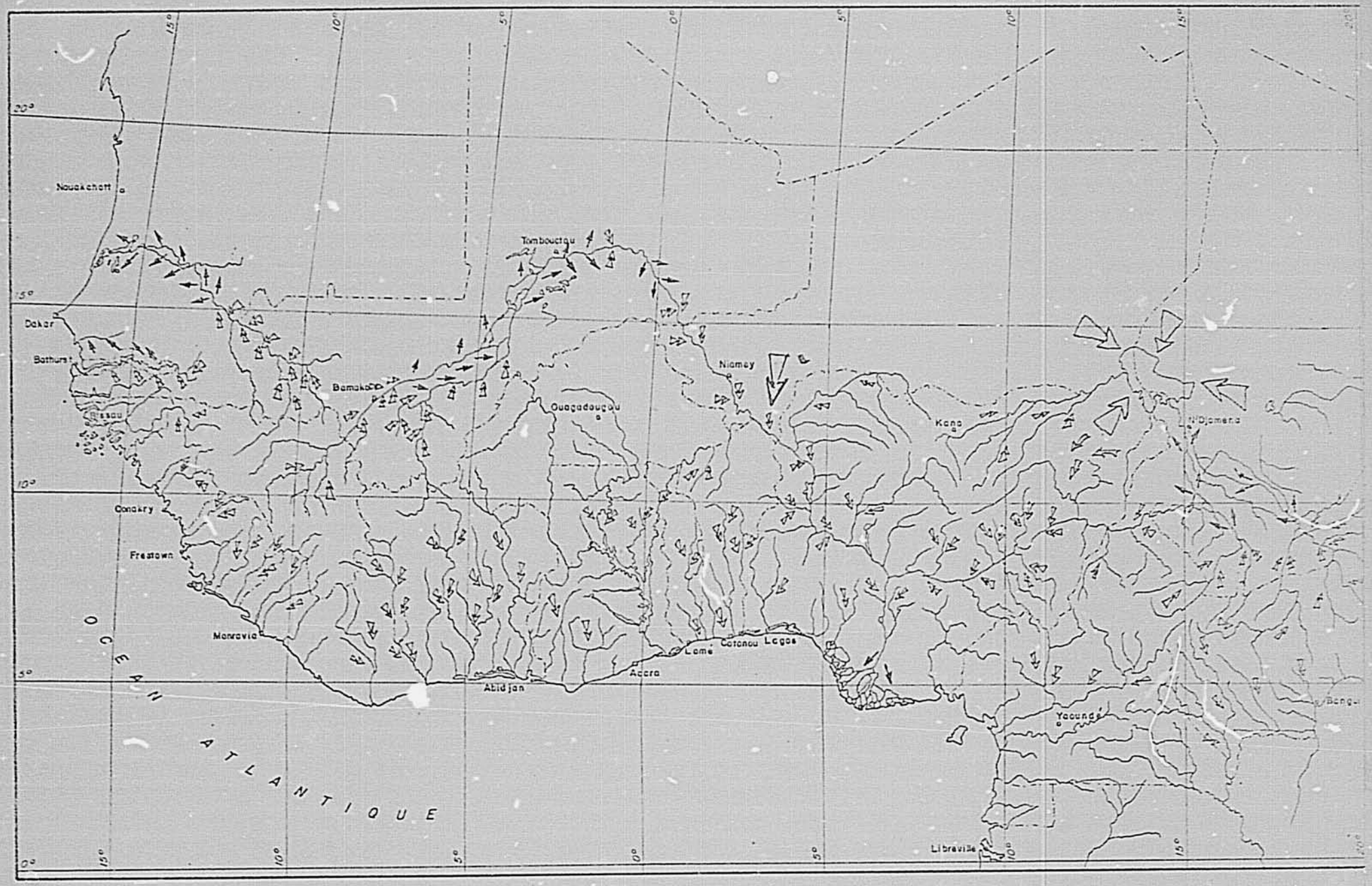
ALIMENTATION DES AQUIFERES PAR LES FLEUVES (EN PARTICULIER, LE SENEGAL DE MATAM ET BOGHE
LE HAUT NIGER DE BAMAKO A TOMBOUCTOU
LE CHARI ET LOGONE DE SAHR ET LAI A N'DJAMENA
RECHARGE OF AQUIFERS BY RIVERS (ESPECIALLY LOWER SENEGAL RIVER FROM MATAM AND BOGHE
UPPER NIGER RIVER FROM BAMAKO TO TOMBOUCTOU
LOWER CHARI AND LOGONE RIVERS FROM SAHR AND LAI TO N'DJAMENA

SOURCE: ADAPTE DU SOUS-CONTRAT BRGM
ADAPTED FROM BRGM SUB-CONTRACT

0 500 1.000 km.

CIRCULATION DES EAUX SOUTERRAINES ET RELATIONS AQUIFERES-FLEUVES
GROUNDWATER MOVEMENT AND AQUIFER – RIVER RELATIONSHIPS

FIG. 5.5


Nouakchott
Tombouctou
Dakar
Bathurst
Bissau
Bamako
Niamey
Ouagadougou
Kano
N'Djamena
Conakry
Freetown
Monrovia
Abidjan
Accra
Lomé
Cotonou
Lagos
Yaoundé
Libreville
OCEAN ATLANTIQUE
20°
15°
10°
5°
0°

de base. Cependant, un ordre de grandeur, ce qui est ce qui compte dans ce rapport, fut estimé à l'aide de deux méthodes, l'une par le B.R.G.M., l'autre par le B.U.R.G.E.A.P. De plus, il faut noter que (1) dans les nappes du Sahel, les ressources renouvelables se chiffrent probablement à quelques milliards de m^3/an, en estimant le coefficient d'infiltration à moins de 1 % de la pluie, et que (2) dans le reste de la zone du projet, ces ressources pourraient bien se chiffrer à plusieurs dizaines de milliards de m^3/an en raison de l'importance des pluies et du coefficient d'infiltration. Les résultats des méthodes B.R.G.M. et B.U.R.G.A.P. décrites ci-dessous sont des chiffres encore plus élevés.

La méthode B.R.G.M. (méthode A) est basée sur le calcul de la différence entre la pluie mensuelle mesurée et l'évapotranspiration mensuelle réelle calculée (méthode de Turc), c'est-à-dire la pluie efficace (ou ruissellement total) dont une part s'écoule dans les fleuves et rivières et l'autre part s'infiltre dans les nappes. Cette dernière part fut estimée entre 5 % (sur le socle) et 100 % (sur les sables dunaires) de la pluie efficace. Cela fut fait par tâtonnements en tenant compte de la lithologie, topographie, fissuration, végétation, du débit de base et des fluctuations des nappes. La méthode B.U.R.G.E.A.P. (méthode B) est quelque peu similaire excepté que l'écoulement de surface fut mesuré dans environ 25 bassins représentatifs. La différence entre la précipitation mesurée, l'écoulement de surface et l'évapotranspiration calculée représente l'infiltration dans les réservoirs d'eau souterraine. La méthode B.U.R.G.E.A.P se traduit souvent par des résultats deux fois (ou plus) élevés que ceux provenant de la méthode B.R.G.M. Les chiffres présentés dans ce texte et dans les tableaux suivants sont ceux provenant de la méthode la plus conservatrice, c'est-à-dire la méthode B.R.G.M. Toutefois, il ne faut pas négliger les chiffres (plus élevés) de la méthode B.U.R.G.E.A.P. d'autant plus qu'ils sont basés sur davantage de mesures (au lieu d'hypothèses et estimations) que ceux de la méthode B.R.G.M.

Les résultats de la méthode B.R.G.M. (méthode A) sont présentés sur sur la Carte 5-5 (feuille 1) qui montre aussi les lignes d'égale pluie efficace. Ceux de la méthode B.U.R.G.E.A.P. (méthode B) sont présentés sur la Carte 5-5 (feuille 2). Ces cartes montrent la répartition géographique, dans la zone du projet de l'alimentation (ressources renouvelables) des nappes phréatiques. Une partie de cette alimentation - dans les bassins sédimentaires - draine dans les nappes profondes (tandis que, dans les bassins et dans le socle, une autre partie s'écoule dans les fleuves et rivières). Ces cartes mettent en évidence l'influence de la géologie et surtout du climat sur l'infiltration. L'alimentation est en général comprise dans les limites suivantes comme indiqué au au Tableau 5-5.

TABLEAU 5-5.

ESTIMATION DE L'ALIMENTATION DES NAPPES SELON LE TYPE DE ROCHE ET D'AQUIFERE

Roche ou Aquifère	Alimentation*		
	Millimètre/an		$m^3/an/km^2$
	Fourchette	Moyenne	Moyenne
-Socle			
.granites et gneiss	0-200	(50)	50.000
.schistes	0-200	(50)	50.000
-Bassins Sédimentaires			
. Formations primaires			
grès et quartzites	0-200	(75)	75.000
dolomies et schistes	0-100	(50)	50.000
.Continental Intercalaire, Crétacé	0-200	(150)	150.000
.Continental Terminal et Quaternaire	0-300	(150)	150.000

*Ces valeurs sont nettement inférieures dans le Sahel, en général moins de 25 mm (25.000 $m^3/an/km^2$) et jusqu'à zéro mm.

Le Tableau 5-6 présente une estimation préliminaire des ressources renouvelables par aquifère, pays et bassin. Les valeurs présentées ne doivent toutefois pas être prises à la lettre mais considérées comme des ordres de grandeur approximatifs.

L'ordre de grandeur de l'alimentation des nappes (ressources renouvelables) dans la zone du projet est de plus de 150 milliards m^3/an, à peu près également répartis entre le socle (80 milliards) et les bassins sédimentaires (85 milliards). A l'évidence, il y a une énorme quantité de ressources renouvelables pour faire face à n'importe quel besoin en eau. Toutefois, il faut bien garder présent à l'esprit que l'eau souterraine n'est pas toujours disponible et mobilisable à l'endroit demandé et à un débit suffisant en tête d'ouvrage d'exploitation, ou que la demande en eau est quelquefois trop élevée par rapport aux possibilités locales des aquifères et des puits et forages. Cela est particulièrement vrai dans le cas du socle et dans celui des aquifères sédimentaires médiocres. Ainsi donc, seule une partie des énormes quantités ci-dessus en ressources renouvelables est récupérable, c'est-à-dire la partie que les ouvrages d'exploitation peuvent délivrer (à des coûts acceptables). Cette partie est particulièrement importante dans le cas des aquifères sédimentaires à bonne perméabilité et plutôt faible dans celui du socle et des aquifères à faible perméabilité (formations primaires, etc.).

En résumé, les nappes et les pays situés dans la partie méridionale de la zone du projet sont généralement pourvus d'importantes ressources renouvelables en raison d'une bonne infiltration (climat humide), ce qui est particulièrement vrai quand les aquifères ont de bonnes caractéristiques hydrodynamiques. Les nappes situées dans la partie septentrionale de la zone du projet et dans le Sahel ne sont pas aussi bien pourvues, l'infiltration étant faible, voire nulle, si bien que les ressources renouvelables sont beaucoup moindres mais tout-à-fait notables dans le cas d'aquifères

à bonne perméabilité.

Les meilleurs bassins sédimentaires sont (par ordre d'importance décroissante) : Tchad (près de la moitié des ressources renouvelables), Bénoué et Bas-Niger (20 %), Sénégalo-Mauritanie (15 %), Niger et Taoudéni; les bassins côtiers sont aussi de notables et utiles ressources renouvelables. Les meilleures nappes sont : Continental Terminal (et Quaternaire) - plus de la moitié des ressources renouvelables -, Continental Intercalaire (15 %), Crétacé (au Nigeria seulement) - 12 % -, et Maestrichtien (10 %); les ressources renouvelables des formations primaires, bien qu'abondantes, ne sont que partiellement récupérables en raison de la faible perméabilité de ces formations. Les pays les mieux pourvus en ressources renouvelables récupérables sont : Nigeria (environ 25 % des ressources renouvelables), Tchad (20 %), Sénégal (10 %), Niger, Mali, Cameroun, Empire Centrafricain, Guinée-Bissau, Gambie, et même Bénin. Les autres pays sont plutôt mal pourvus, en particulier Sierra Leone, Togo et Ghana, et ceux avec des régions de Sahel tels que Mauritanie et Haute-Volta.

5.4.4 Réserves Statiques (Exploitables)

Les réserves statiques représentent le volume d'eau emmagasiné dans les aquifères. Il dépend de la porosité efficace, de l'épaisseur d'aquifère saturée et de sa superficie. Les chiffres de réserves statiques présentés dans ce rapport représentent moins que le volume d'eau total emmagasiné dans les aquifères de la zone du projet. En raison de la méthode de calcul - méthode B.R.G.M., classique dans la région et les pays de langue française - ils représentent des ordres de grandeur des volumes d'eau qui peuvent être réalistiquement extraits des nappes libres et une partie de l'eau sous pression des nappes captives (la partie qui peut être extraite dans des conditions prudentes) c'est-à-dire des ordres de grandeur conservateurs des réserves exploitables.

TABLEAU 5-6 ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES PAR AQUIFERE, PAYS ET BASSIN (Mm^3/an)*

Bassin	Pays	Bassins Sédimentaires								Socle	Total
		Primaire	Continental Intercalaire (CI)	Crétacé	Maestrichtien (M)	Paléocène-Eocène	Continental Terminal (CT)	Quaternaire	Total (sédimentaire)		
Sénégalo-Mauritanien									12606	835	
	Mauritanie	>60			compris dans CT	0 ?	0 ?	36	96	15	111
	Sénégal					750	7460	260	8470	820	9290
	Gambie				dito		1040		1040		1040
	Guinée-Bissau	1000			2000		compris dans Maestrichtien	compris dans Maestrichtien	3000		3000
										5500	
	Guinée	3000							3000	4000	7000
	Sierra Leone									1500	1500
Taoudéni									12548	5570	
	Mali	9380	0 ?				778	compris dans CT	10158	1800	
	Haute-Volta	1960					430		2390	3770	6160
	Côte d'Ivoire									6600	6600
Côtier									720	7900	
	Ghana			compris dans le Maestrichtien	30		compris dans M.		30	3200	3230
	Togo				40	20			60	1600	1660
	Bénin				30	100	400	100	630	3100	
Niger									4311	21380	
	Mali (Sud Adrar)						53		53	1800	
	Niger		compris dans Cont. Term.				1628	compris dans CT	1628	180	
	Nigeria (Sokoto)		1200	300		100	500		2100	19400	
	Bénin (")		500				30		530		
Bas-Niger et Basse-Bénoué									16500		
	Nigeria		2700	10200		2000	100	200	15200		
	Cameroun		1300						1300		

(à suivre)

TABLEAU 5-6 (suite) ESTIMATION DES RESSOURCES RENOUVELABLES PAR AQUIFERE, PAYS ET BASSIN (Mm^3/an)*

Bassin	Pays	Bassins Sédimentaires								Socle	Total
		Primaire	Continental Intercalaire (CI)	Crétacé	Maestrichtien (M)	Paléocène-Eocène	Continental Terminal (CT)	Quaternaire	Total (sédimentaire)		
Tchad									35890	33500	
	Tchad		compris dans Cont. Term.				12800	4100	16900	2800	19700
	Niger (Koramas)							1890	1890		
	Nigeria							3700	3700		
	Cameroun							1000	1000	10200	
	Emp. CentrAfricain		6200				6200		12500	20500	33000
Total pour les 5 pays dans 2 ou plus de 2 bassins	Mali	9360					831	0	10211	1800	12011
	Bénin		500		30	100	430	100	1160	3100	4260
	Niger						1628	1890	3518	180	3698
	Nigeria		3500	10500		2100	600	3900	21000	19400	40400
	Cameroun		1300					1000	2300	10200	12500
TOTAL		15400	12000	10500	2100	2970	31419	17486	85875	79485	165060

* Source: d'après les données de base de la sous-traitance au BRGM.

En ce qui concerne les nappes libres, la méthode B.R.G.M. ne prend en compte que le tiers d'une épaisseur maximum de 100 m d'aquifère pourvu que ce tiers soit situé à moins de 100 m sous le niveau du sol. Pour ce qui est des nappes captives, la méthode consiste, en utilisant le coefficient d'emmagasinement (et non la porosité efficace), à calculer le volume d'eau qui peut être pompé sans dénoyer l'aquifère et avec un rabattement maximum de 100 m.

En ce qui concerne le socle, une évaluation tentative des réserves statiques fût faite en estimant que les horizons fracturés et altérés (arènes, sables de base et blocs) ont 0 à 20 m d'épaisseur, soit une moyenne de 10 m, et une porosité efficace moyenne de 0,5 % à 1 %. En fait, cette épaisseur moyenne correspond presque à l'ordre de grandeur des fluctuations saisonnières du niveau des nappes. Il en résulte des réserves statiques maximum de 50.000 à 100.000 m^3/km^2, c'est-à-dire un total de 125 à 250 billion m^3 dans la zone du projet. Le même chiffre maximum serait obtenu en considérant une épaisseur de 20 m et une porosité efficace de 0,5 %, ou bien 5 m d'épaisseur et 2 % de porosité efficace (ou le contraire). En utilisant des estimations encore plus prudentes (10.000-25.000 m^3/km^2), on obtiendrait des réserves statiques de plusieurs dizaines de milliards de m^3 pour toute la région de socle dans la zone du projet.

Les estimations des réserves statiques sont présentées sur la Carte 5-6 qui montre leur répartition à travers toute la zone du projet. Ces estimations peuvent être résumées comme il suit dans le Tableau 5-7.

TAB:

ESTIMATION DES

SELON LE TYPE DE ROCHE OU D'AQUIFERE

Roche ou Aquifère	Réserves Statiques (m^3/km^2)
Socle	50.000 (et moins)
Couverture primaire	25.000
Continental Intercalaire	supérieur à 1.000.000 (jusqu'à 5 millions)
Crétacé	50.000 à quelques millions
Maestrichtien	supérieur à 1.000.000 (jusqu'à 5 millions)
Paléocène	supérieur à 1.000.000
Continental Terminal	50.000 à 1.000.000
Quaternaire	(jusqu'à 5 millions)

Le Tableau 5-8 présente une estimation approximative des réserves statiques par aquifère, pays et bassin. Ces chiffres ne doivent pas être pris à la lettre et pourraient en réalité être augmentés ou diminués de un tiers par exemple.

L'ordre de grandeur des réserves statiques (exploitables) dans la zone du projet est de 1.500 à 2.000 milliards de m^3, dont environ 80 % dans les bassins sédimentaires et le reste dans le socle. Ceci représente environ dix fois les resscurces renouvelables. Le rapport ressources renouvelables/ réserves statiques est d'environ 6 % pour les nappes des bassins sédimentaires et de 34 % pour celles du socle (et du Primaire). Cela suggère que le temps de résidence des eaux souterraines dans le socle (et le Primaire) est faible - ce qui n'est pas le cas des eaux souterraines des bassins sédimentaires. Les eaux souterraines du socle se renouvellent relativement rapidement, ce qui n'est pas du tout le cas de celles des bassins sédimentaires d'autant que ces bassins sont généralement situés dans des régions de moindre infiltration et alimentation des nappes. Tout cela est particulièrement vrai dans les régions

TABLEAU 5-3 ESTIMATION DES RESERVES STATIQUES PAR AQUIFERE, PAYS ET BASSIN (en million de m^3)*

Bassin	Pays	Bassins Sédimentaires								Socle	Total
		Primaire	Continental Intercalaire	Crétacé	Maestrichtien	Paléocène-Eocène	Continental Terminal (CT)	Quaternaire et/ou Pliocène	Total (sédimentaire)	(total du socle)	
Sénégalo - Mauritanien									193 900		
	Mauritanie	3 000				1 700	7 000	7000(dunes)	18 700	7 700	26 400
	Sénégal				60 400	5 900	69 000	4600(")	139 500	3 200	142 700
	Gambie				4 100		9 600		13 700		13 700
	Guinée-Bissau	2 000			20 000	compris dans le		Maestrichtien	22 000		22 000
	Guinée	10 000							10 000	14 000	24 000
	Sierra Leone									3 000	3 000
Taoudéni									67 060		
	Mali	25 430	?				36 400	compris dans	61 830		
	Haute-Volta	3 230					2 000	CT	5 230	22 500	27 730
	Côte d'Ivoire									16 600	16 600
Côtier									16 875		
	Ghana			(compris dans le Maestrichtien)	750				750	16 100	16 850
	Togo				750				750	5 400	6 150
	Bénin				375		15 000		15 375		
Niger									376 775		
	Mali (Sud Adrar)						4 600		4 600		
	Niger		100 100				65 600	26 600	192 300		
	Nigeria (Sokoto)		101 000	41 000			7 500		149 500		
	Bénin (")		30 000				375		30 375		
Bas-Niger et Basse-Bénoué									350 750		
	Nigeria		120 000	166 250		10 500	750	750	298 250		
	Cameroun		52 500						52 500		
Tchad									363 600		
	Tchad		important				64 500	93 000	157 500	18 900	>176 400
	Niger (Koramas)							2 600	2 600		
	Nigeria							47 000	47 000		
	Cameroun							16 000	16 000		
	Emp. Centrafricain		112 000				28 500		140 500	41 000	181 500

à suivre

TABLEAU 5-8 (suite) ESTIMATION DES RESERVES STATIQUES PAR AQUIFERE, PAYS ET BASSIN (en million de m^3)

Bassin	Pays	Bassins Sédimentaires								Socle	Total
		Primaire	Continental Intercalaire	Crétacé	Maestrichtien	Paléocène-Eocène	Continental Terminal (CT)	Quaternaire et/ou Pliocène	Total (sédimentaire)	(total du socle)	
otal pour les	Mali	25 430	?				41 000		66 430	11 500	77 930
pays dans 2	Bénin		30 000				15 375		45 750	8 900	54 650
u plus de 2	Niger		100 100				65 600	29 200	194 900	5 000	200 900
assins	Nigeria		221 000	207 250		10 500	8 250	47 750	494 750	38 800	533 550
	Cameroun		52 500				28 500	16 000	68 500	20 400	88 900
otal		43 660	515 600	207 250	85 975	18 100	310 825	197 550	1 378 960	234 000	1 612 960

Source: d'après les données de base de la sous-traitance au BRGM.

septentrionales de la zone du projet et dans le cas des aquifères profonds dont le rapport ressources renouvelables/réserves statiques est d'environ 2 % à 5 % (et moins dans le Sahel).

Les énormes valeurs de réserves statiques ci-dessus, bien qu'approximatives, sont sous-estimées par rapport à celles qui auraient été obtenues en utilisant la méthode américaine de calcul des réserves statiques, en particulier dans les bassins sédimentaires. En fait, ces réserves pourraient bien être deux fois plus élevées dans le socle, et probablement disons quatre ou cinq fois plus élevées dans les bassins sédimentaires si les calculs étaient faits en prenant en compte la totalité de l'épaisseur aquifère et la porosité efficace, au lieu de l'épaisseur partielle et, dans le cas des nappes captives, du coefficient d'emmagasinement et d'un rabattement maximum de 100 m sans dénoyer l'aquifère.

Cela suggère que les volumes d'eaux souterraines emmagasinés dans la zone du projet sont sans nul doute énormes. La partie exploitable représente des milliards de m^3 d'eau par an, et ce pour des centaines d'années. Comme déjà indiqué, il n'y a pas de problème de disponibilité en eaux souterraines dans la région, sauf aux endroits où la productivité des ouvrages d'exploitation est faible et/ou la demande en eau excessive; par exemple, les régions de socle, les grandes villes dans les bassins côtiers, ou bien une demande en eau d'irrigation trop élevée par rapport aux possibilités locales des nappes et des forages.

En résumé, les bassins sédimentaires, en particulier ceux qui comprennent une forte proportion de roches meubles, contiennent l'essentiel des réserves statiques de la zone du projet, tandis que le socle contient seulement une partie - difficilement récupérable - de ces réserves. Les bassins sédimentaires les mieux pourvus en réserves statiques sont (par ordre d'importance décroissante) : Tchad, Niger, Bénoué-et-Bas-Niger (chacun d'eux

contenant environ 25 % des réserves), Sénégalo-Mauritanien (environ 20 %), Taoudéni (environ 5 %) et enfin les bassins côtiers. Les aquifères les meilleurs sont : le Continental Intercalaire (près de la moitié des réserves), le le Continental Terminal (environ 20 %), le Crétacé (environ 15 %) et le Quaternaire (environ 15 %); le Maestrichtien contient environ 5 % des réserves, et le Primaire et le Paléocène-Eocène sont négligeables. Les pays les mieux pourvus sont : Nigeria (environ le tiers des réserves), Niger (environ 15 %), Tchad, Sénégal et Empire Centrafricain (environ 10 % chacun). Cameroun, Mali et Bénin contiennent chacun environ 5 % de ces réserves tandis que Guinée-Bissau, Mauritanie et Gambie ont des volumes appréciables. Haute-Volta et surtout Ghana et Togo sont mal pourvus. Guinée, Côte d'Ivoire et Sierra Leone n'ont presque rien, ce qui cependant représente plusieurs milliards de m^3 de réserves statiques.

5.4.5 Qualité des Eaux Souterraines

La qualité des eaux souterraines est généralement bonne à travers toute la zone du projet, et même exceptionnellement bonne pour un tel environnement. La Carte 5-7 présente cette qualité en trois classes : bonne-excellente, admissible-médiocre, mauvaise. Ces classes (pour l'aptitude à l'irrigation) sont celles définies par le Laboratoire de la Salinité des Etats-Unis à partir du taux d'absorption du sodium (SAR) et de la conductivité électrique de l'eau. Dans l'ensemble, les eaux souterraines des nappes suivantes sont aptes à l'irrigation : Maestrichtien, Continental Terminal et Quaternaire du Bassin Sénégalo-Mauritanien; Continental Terminal du Bassin du Taoudéni (vallée du Niger); Continental Intercalaire, Crétacé, Continental Terminal et Quaternaire du Niger, Nigeria et Tchad (région du Lac Tchad, bassins de la Bénoué et du Bas-Niger).

Dans le socle, les eaux souterraines sont particulièrement peu minéralisées, le résidu sec étant fréquemment de 250 mg/l et moins,

exceptionnellement 1 ou 1,5 g/l au maximum. Les eaux des granites et des gneiss sont généralement meilleures que celles des schistes. Des résultats typiques d'analyses des eaux souterraines du socle sont présentés dans le Tableau 5-9 ci-dessous.

TABLEAU 5-9

QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DU SOCLE (mg/l)

Aquifère	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO_4	HCO_3	Résidu Sec	pH
Socle au Sénégal	26,7	20,2	25,5	4,2	7,3	3,8	73	203	
Socle au Nigeria	2-223	0,1-12,7	3,2-52,4	3,2-76	1,5-102		3,9-117,4	60-946	6,1-9,2
Socle au Cameroun	3-184	1-66	8-77	10-40	1-40			76-821	6-76
Roches volcaniques au Nigeria	18-41	0-30	4-34	2-6	2-7		39,7-205	112-500	7,3-7,9

Dans les bassins sédimentaires, la qualité des eaux souterraines est moindre bien que généralement bonne. Le résidu sec varie de quelques centaines à quelques milliers de mg/l, étant le plus souvent de 500-1.000 mg/l. Il est plutôt constant dans les aquifères d'origine marine et beaucoup plus variable dans ceux d'origine continentale. D'autre part, il augmente généralement en fonction du contenu argileux des aquifères et vers l'aval des nappes. Cela est le cas, par exemple, de la partie occidentale du Bassin Sénégalo-Mauritanien (Continental Terminal, et Mæstrichtien - qui est caractérisé là par une haute teneur en fluor -), et du pourtour du Lac Tchad où les eaux souterraines sont de mauvaise qualité. En général, les eaux des aquifères sédimentaires sont corrosives. Dans les bassins côtiers, il y a des problèmes actuels ou potentiels d'intrusion d'eau de mer en raison de la trop forte densité des ouvrages d'exploitation en certains endroits ou de la

surexploitation des eaux souterraines.

Dans les nappes du Primaire, les eaux des grès et quartzites sont très bonnes et meilleures que celles des schistes et dolomies. Dans les nappes du Secondaire, Tertiaire et Quaternaire, la qualité des eaux est plus variable. Elle est en général bonne dans le Quaternaire et moyenne à bonne (bien que parfois médiocre ou mauvaise) dans les autres terrains.

Des résultats typiques d'analyses d'eaux souterraines des aquifères sédimentaires sont présentés dans le Tableau 5-10 suivant. Les valeurs élevées en nitrates sont généralement dûes à la pollution des puits. D'autre part, on remarquera certaines valeurs élevées en ion Fe.

5.4.6 Conclusion

Le socle offre des ressources renouvelables et des réserves statiques en quantité suffisante pour faire face aux besoins en eau ruraux. Les eaux souterraines du socle sont relativement peu profondes, généralement à 15-40 m environ sous le niveau du sol, et sont de très bonne qualité. Presque tous les pays de la zone du projet comprennent des terrains de socle, ce qui permet de résoudre la question de l'alimentation en eau rurale. Les ressources renouvelables peuvent être estimées à environ 80 milliards m^3/an, et les réserves statiques à 200-250 milliards.

Les bassins sédimentaires sont particulièrement riches en eaux souterraines de qualité satisfaisante pour la plupart des besoins. Le niveau de l'eau dans les nappes phréatiques est généralement à 20-40 m sous le niveau du sol et quelques fois plus profond (cas du Sahel), et les ouvrages d'exploitation peuvent le plus souvent satisfaire les besoins en eau ruraux, pastoraux, municipaux, industriels, et même agricoles. Les nappes profondes,

TABLEAU 5-10 QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DES AQUIFERES SEDIMENTAIRES (mg/l)

Aquifère	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	Nitrates	Fer	Résidu Sec	pH
-Phréatrique, Sénégal oriental	43.7	20.3	40.4	4.95	42.9	18.2	95			388	
-Alluvions, Cameroun	34-149	15-39	2-272	3-55					0.3	298-902	
-Alluvions, Nigeria	0-17	0-3	3.1-19	0-16	1-40		12.2-41.2	0.01-8.8	0.04-3	134-184	5.8-8
-Quaternaire, Bassin du Lac Tchad	16-200	2.67-13.36	10.1-655	3.5-66	1.8-155	64.8-1860	92.7-361			85-3121	6.5-7.9
-Pliocène, Bassin du Lac Tchad au Nigeria	4-70	0-27.7	13.9-218	5-23.2	1-122		47.3-360	0.1-55	0-8	180-5970	6.1-9.2
-Pliocène inférieur, dito	1-68.1	1.21-24.3	23.9-322	2.03-15.2	3.54-92	16.8-653	174-372		0.1-7	169-1375	6.6-8.1
-Continental Terminal, Bassin du Lac Tchad	2-26	1.2-10.9	126.5-266	2.8-10.5	17.7-73.4	4.8-218	238-549			269-748	7-8.6
-Continental Terminal, Bassin du Niger (Sokoto)	4.1-136	0.4-55.8	2.4-98	0.2-22.8	2-15.3	3-588	3-246	0.3-99		61-1088	6.4-7.5
-Continental Terminal, Bassin du Taouéni, Mali	8-130	0-99.7	0.84-274.8		3.44-75.76	4.33-607.4	36.6-488				
-Mæstrichtien, Sénégal	0.49-59.2	0.15-70.1	0.18-1060	0.05-28	0.11-1460	0.2-250	0.1-390	0.05-70	0.16-10.7	144-2882	6-8.2
-Crétacé, Cameroun	2.5-63	1-22	12-39		1-19					61-315	5.8-7.6
-Crétacé, Bassin du Niger (Sokoto)	0-137	0-12	2-200	7.2-38	1-37		3-167	1.5-110	0.04-3.2	151-628	4.9-7.6
-Crétacé, Bassin du Bas-Niger, Nigeria	7-44	0.4-7.1	0.7-9-4	0-20.2	1-12.7		3.1-172	0-3	0.06-12	31-217	5.6-7
-Crétacé, Bassin de la Haute-Bénoué, Nigeria	2.6-76.5	2.8-54.6	4.4-184	1-56	2.7-16		14-413	0.1-13.2		240-3982	5.3-7.1

(A suivre)

5-41

TABLEAU 5-10 (suite) QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES DES AQUIFERES SEDIMENTAIRES (mg/l)

Aquifère	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	Nitrates	Fer	Résidu Sec	pH
-Crétacé, Bassin de la Basse-Bénoué, Nigeria	16-112	4-61	5.4-71	2-9.2	3-19		1.5-169	0.5-3.3	0.08-0.5	26-1438	4.9-7.3
-Continental Intercalaire, Bassin du Lac Tchad	58	1	449	10	745		152			1339	7.3
-Primaire, Mali	14.03-334.66	0-370.9	5.3-253		6.9-96.4	3.3-761.2	42.7-2830				

en général de 100 à 300 m de profondeur et parfois jusqu'à plusieurs centaines de mètres, sont souvent captives, le niveau de l'eau étant fréquemment à 10-50 m sous celui du sol. Les ressources renouvelables des nappes phréatiques et profondes sont de l'ordre de 85 milliards m^3/an, leurs réserves statiques de près de 1.500 milliards m^3. Ces chiffres pourraient, en réalité, être bien plus élevés, en particulier celui des réserves statiques (en fait il s'agit des réserves exploitables) qui seraient plusieurs fois plus élevées si la totalité de l'épaisseur des aquifères était prise en considération.

Les ressources renouvelables ne sont pas aussi élevées dans le Sahel que dans la partie méridionale de la zone du projet. Elles sont particulièrement élevées dans le cas du Continental Terminal et du Quaternaire (près de 50 milliards m^3/an) du Continental Intercalaire (12 milliards m^3/an) du Crétacé au Nigeria (10 milliards m^3/an) et du Mæstrichtien (plus de 2 milliards m^3/an). Cela est particulièrement vrai au Nigeria, Tchad, Sénégal, Niger et Mali.

Les réserves statiques sont importantes dans le Continental Intercalaire (environ 500 milliards m^3), le Continental Terminal (environ 300 milliards m^3), le Crétacé et le Quaternaire (environ 200 milliards m^3 chacun) et même le Mæstrichtien (environ 100 milliards m^3). Les pays les mieux dotés en réserves statiques exploitables sont le Nigeria, Niger, Tchad et Sénégal. Les autres pays sont beaucoup moins bien pourvus, en particulier ceux de la partie sud de la zone du projet.

5.5 CONCLUSIONS

La géologie de la zone du projet est caractérisée par un socle ancien qui occupe plus de la moitié de sa superficie, en particulier la partie

méridionale, et par des bassins sédimentaires qui s'entendent surtout dans les pays du Sahel mais aussi sur la côte (Guinée-Bissau, Bénin, Togo).

Le socle est un mauvais aquifère qui, cependant, est très utile pour l'alimentation en eau rurale. Les bassins sédimentaires sont d'énormes réservoirs aquifères capables de satisfaire la plupart des besoins en eau, y compris ceux en irrigation, en maints endroits.

Les meilleures nappes dans les bassins sédimentaires sont : (1) au Sénégal, en Gambie et Guinée-Bissau; (2) dans la région du Lac Tchad (Niger, Nigeria, nord Cameroun, ouest et sud du Tchad); (3) au Niger; (4) au Nigeria (bassins du Niger et de la Bénoué, nord-est et nord-ouest du Nigeria); et (5) au Mali (région du Niger). Elles se trouvent dans diverses formations géologiques, essentiellement le Continental Intercalaire, le Crétacé (au Nigeria), le Mæstrichtien - Paléocène, le Continental Terminal et le Quaternaire.

Les pays tels que Empire Centrafricain, Bénin, Cameroun, Mauritanie et même Haute-Volta ont des ressources en eaux souterraines notables. Les autres, c'est-à-dire Guinée, Ghana, Côte d'Ivoire et surtout Togo et Sierra Leone sont mal pourvus. Cependant ils ne sont pas totalement dépourvus et peuvent au moins faire face aux besoins en eau ruraux, et parfois aux besoins urbains et industriels (zones côtières du Togo, Ghana, de la Côte d'Ivoire et Guinée).

L'eau souterraine dans le socle se trouve généralement à 15-40 m sous le niveau du sol et jusqu'a 70-100 m de profondeur. Elle est de très bonne qualité mais les débits des puits et forages sont faibles, le plus souvent quelques m^3/heure et très fréquemment beaucoup moins.

Dans les bassins sédimentaires, l'eau souterraine se trouve dans des nappes phréatiques peu profondes, ce qui nécessite des puits et forages de 20 à 150 m (généralement 30-50 m), et dans des nappes captives profondes, de 700-800 m de profondeur maximum (généralement 100-300 m). Le niveau de l'eau dans ces nappes profondes est fréquemment à 5 à 50 m sous celui du sol, et il y a quelquefois artésianisme jaillissant. Les débits des puits et forages sont de 300 m^3/h au maximum (et plus ?), en particulier dans les nappes du Mæstrichtien-Paléocène, Continental Terminal, Continental Intercalaire et Crétacé. Cependant, des valeurs de 50 à 100 ou 200 m^3/h sont beaucoup plus fréquentes. Dans les nappes phréatiques, elles sont de 5-150 m^3/h, les meilleurs débits étant ceux des ouvrages dans le Continental Terminal et les moins bons ceux des formations primaires.

La qualité de l'eau des aquifères sédimentaires n'est pas aussi bonne que celle des eaux du socle. Toutefois, le résidu sec est généralement de 0,5 a 1 g/l, ce qui est exceptionnellement bon dans un tel environnement.

Les ressources renouvelables du socle dans la zone du projet peuvent être estimées à environ 80 milliards m^3/an. Dans les bassins sédimentaires, elles sont d'environ 85 milliards m^3/an et sont plus abondantes dans la partie méridionale de la zone du projet que dans le Sahel, en particulier au nord de l'isohyète 400-500 millimètres où l'infiltration est faible à nulle.

Les réserves statiques du socle peuvent être estimées à environ 250 milliards m^3. Dans les bassins sédimentaires, elles sont de près de 1.500 milliards m^3, dont la majeure partie est exploitable; un volume additionnel de plusieurs milliers de milliards m^3 est emmagasinné au-dessous de ces 1.500 milliards m^3 exploitables.

L'utilisation actuelle des eaux souterraines dans la zone du projet est faible (sauf à Dakar, Lomé, Cotonou et dans le nord du Nigeria), de l'ordre de quelques centaines de millions m^3/an. Des problèmes d'intrusion d'eau salée peuvent se présenter dans les régions côtières ci-dessus (et dans quelques autres) mais pourraient être maitrisés par des techniques telles que recharge artificielle des nappes et autres.

Les coûts des puits et forages sont excessifs; il en est de même de ceux de leur utilisation et entretien et de ceux des pompes qui, de plus, laissent fortement à désirer. La pollution des puits est très répandue en raison de l'utilisation des moyens d'exhaure traditionnels. Tous ces problèmes devraient être résolus afin que les programmes de mise en valeur des eaux souterraines, si nécessaires pour l'alimentation villageoise, pastorale, urbaine, industrielle et agricole, soient des réussites, d'autant plus que ces programmes devraient être de l'ordre de 200 à 500 milliards F.C.F.A. (plusieurs centaines de millions à deux milliards de dollars) durant les prochaines 10 ou 20 années.

Le potentiel d'utilisation supplémentaire des eaux souterraines est énorme dans la zone du projet. Dans les régions de socle, il y a généralement suffisamment d'eau souterraine de bonne qualité pour faire face aux besoins en eau ruraux.

Dans les bassins sédimentaires, y compris les pays du Sahel, il n'y a généralement pas de problème pour fournir une alimentation en eau souterraine suffisante et de bonne qualité pour couvrir les besoins villageois, pastoraux, urbains et industriels. Cependant, les possibilités des forages et des nappes peuvent parfois être inférieures à la demande, en particulier si elle est très élevée et concentrée dans l'espace et le temps.

L'irrigation à partir des eaux souterraines semble prometteuse et factible sur une grande échelle essentiellement au Sénégal, Tchad, Niger, Nigeria et Mali où une superficie de 500.000 à 1.000.000 km^2 offre des perspectives encourageantes. Probablement, environ un demi million d'hectares et peut-être davantage pourraient être irrigués à partir des eaux souterraines au cours des prochaines deux décades en utilisant des unités de quelques hectares à 10-40 hectares chacune. Cela complèterait harmonieusement l'irrigation à partir des grands aménagements hydro-agricoles et des eaux de surface et devrait être commencé au plus tôt d'autant que de tels petits projets sont relativement faciles à financer, réaliser, faire fonctionner et entretenir, et sont tout à fait compatibles avec les conditions sociologiques et écologiques de la région.

Des programmes pour étudier ce potentiel pour l'irrigation et la factibilité de sa réalisation sont nécessaires et devraient être lancés rapidement. Ils devraient aussi aborder la gestion de la planification et de la factibilité de la mise en valeur des eaux souterraines au niveau sous-régional, national et local. En outre, une approche moderne comprennant la simulation des nappes (modèles, banques de données et réseaux piezomètriques) et l'alimentation artificielle des nappes est nécessaire à la mise en valeur et gestion optimales des eaux souterraines de la région. L'applicabilité de ces méthodes devrait être étudiée et, si nécessaire, des programmes démarrés aussitôt que possible. De même, les programmes en cours devraient être poursuivis et intensifiés pour collecter et synthétiser les données hydrogéologiques des pays de la région et des études et investigations générales, régionales et détaillées devraient être faites pour tirer le meilleur parti des exceptionnelles ressources en eaux souterraines de la région.

GLOSSAIRE

Alluvions	Terme général pour les sédiments déposés par les eaux de surface au cours des temps géologiques récents.
Anticlinal	Pli convexe avec les couches géologiques les plus anciennes au centre. Le contraire d'un synclinal.
Aquiclude	Formation géologique, groupe de formations ou partie de formations qui n'est pas suffisamment perméable pour fournir une quantité appréciable d'eau souterraine.
Aquifère	Formation géologique, groupe de formations ou partie de formations qui peut fournir une quantité substantielle d'eau souterraine. Un aquifère peut être libre (nappes phréatiques, par exemple) ou captif (nappes artésiennes), selon que le niveau de l'eau est à la pression atmosphérique, (nappes libres) ou à une pression plus élevée (nappes captives) en raison de la présence d'une couche géologique confinante (acquiclude).
Ardoise	Roche métamorphique provenant d'argiles et shales.
Calcaire	Roche sédimentaire composée essentiellement de carbonate de calcium.
Chenaux	Joints ou fractures dans les roches carbonatées élargis par l'action dissolvante des eaux et capables de transmettre de larges quantités d'eau.
Coefficient d'emmagasinement	Volume d'eau qu'un aquifère libère ou emmagasine par unité de surface et par unité de changement de niveau d'eau. Pour les nappes captives, il s'agit de l'eau souterraine sous pression (ce qui est bien moins que le volume total d'eau accumulé dans l'aquifère et qui serait

	récupérable si celui-ci était totalement dénoyé). Dans le cas des nappes libres, il s'agit de la porosité efficace.
Colluvions	Matériaux meubles ou fragments de roches déposés par gravité, généralement à la base de pentes ou de falaises.
Consolidées	Roches qui sont rigides en raison de l'imbrication des minéraux qui les composent ou de la cimentation de leurs composants. Le contraire de roches meubles.
Débit de base	La part du ruissellement de surface qui provient du drainage des nappes; généralement, les débits d'étiage des fleuves et rivières sont constitués de ce drainage.
Doline (Sinkhole)	Dépression à la surface du sol, généralement en terrain calcaire, produite par l'action dissolvante des eaux et généralement connectée avec des chenaux et cavités sous-jacents.
Dolomie	Roche sédimentaire composée de carbonate de calcium et de magnésium.
Eau souterraine	Eau située sous le niveau phréatique des nappes.
Evapotranspiration	Les deux phénomènes, évaporation et transpiration, par lesquels l'eau retourne dans l'atmosphère; la transpiration provient des plantes.
Extrusives	Roches volcaniques qui se solidifient après épanchement à la surface de la terre, soit sur le sol ou sous l'eau.
Faciès	Nature lithologique d'une couche ou formation géologique.
Faille	Fracture au long de laquelle il y a eu mouvement parallèle de deux masses de roche l'une par rapport à l'autre. Le mouvement peut être de quelques centimètres ou de plusieurs kilomètres, horizontal ou vertical.

Forage artésien	Forage dans lequel le niveau de l'eau s'élève au-dessus du toit de l'aquifère mais pas nécessairement au-dessus de la surface du sol (dans ce cas, il s'agit d'un forage artésien jaillissant).
Formation	Ensemble de couches géologiques groupées en une unité.
Fracture	Cassure dans les roches.
Granite	Roche cristalline consistant de quartz, feldspath et autres minéraux.
Imperméable	Roche de nature telle que l'eau ne peut pas les traverser.
Intrusives	Roches cristallines qui se sont solidifiées avant d'atteindre la surface du sol.
Joint	Fracture dans les roches au long de laquelle il n'y a pas eu mouvement. Les joints sont généralement perpendiculaires aux plans de strarification.
Karst	Terrain calcaire dont le modelé résulte de la dissolution de la roche, et qui généralement comprend des dépressions fermées et une circulation souterraine des eaux.
Lithologie	Nature des roches.
Niveau de pompage	Profondeur de l'eau sous le sol dans un puits ou forage quand il est en pompage.
Niveau phréatique	Niveau ou surface de la première nappe rencontrée sous le niveau du sol.
Niveau statique	Niveau de l'eau dans un puits ou forage lorsqu'il n'est pas en cours de pompage.
Percolation	Mouvement de l'eau à travers les interstices des roches ou du sol, excepté le mouvement dans les chenaux et fractures.
Perméabilité	Aptitude d'une roche ou d'un sol à transmettre l'eau.

Plaine inondable	Bande de terrain, relativement plate, adjacente au lit d'un fleuve ou cours d'eau et constituée d'alluvions transportées par les crues. Elle est inondée lorsque le fleuve ou cours d'eau est en crue.
Pli	Courbure dans les couches géologiques.
Porosité	Pourcentage de vides ou pores dans un volume de roche ou sol.
Porosité efficace	Volume d'eau dans une roche qui peut être extrait par pompage ou drainage; exprimé en pourcentage du volume de roche. Voir Porosité et Coefficient d'emmagasinement.
Puits, Forage	Excavation artificielle dans le sous-sol, généralement cylindrique et souvent cuvelée ou tubée, réalisée pour capter l'eau souterraine.
Quartzite	Grès massif plus ou moins métamorphique.
Rabattement	La différence entre le niveau statique et le niveau de pompage dans un puits ou forage, c'est-à-dire l'abaissement du niveau de l'eau dû au pompage.
Recharge	Alimentation en eau naturelle ou artificielle des nappes.
Régression	Récession générale des mers (baisse du niveau des mers et océans).
Ressources renouvelables	Quantité d'eau souterraine qui peut être prélevée annuellement des nappes sans produire de résultat indésirable. Il s'agit de l'alimentation annuelle des nappes.
Roches carbonatées	Roches consistant principalement de carbonates, telles que les calcaires et dolomies.

Roches clastiques	Roches sédimentaires composées de fragments provenant de roches pré-existantes, par exemple, les grès, conglomérats, shale, etc.
Roches cristallines	Roches formées en profondeur à partir du magma.
Roches métamorphiques	Roches formées à partir des roches pré-existantes sous l'effet de forts changements de température, pression et conditions chimiques.
Roches sédimentaires	Roches formées généralement par consolidation de couches de sédiments sous l'eau.
Runoff	Ruissellement dans les fleuves et cours d'eau, y compris la partie drainée à partir des nappes (débit de base).
Stratigraphie	Arrangement historique des couches géologiques.
Subsidence	Abaissement local de la surface du sol.
Substratum	Substratum rocheux affleurant ou couvert de dépôts détritiques.
Surface piézométrique	Niveau de l'eau des nappes (en particulier, des nappes captives).
Synclinal	Pli concave avec les couches géologiques les plus récentes au centre. Contraire d'anticlinal.
Système aquifère	Groupe d'aquifères (ou nappes).
Terrasse	Terrains sédimentaires plats ou légèrement inclinés en bordure d'un fleuve ou cours d'eau et qui représentent un niveau ancien de ce fleuve ou cours d'eau. Les terrasses sont composées d'alluvions fluviales.
Transgression	Avancée générale des mers sur les continents (hausse du niveau des mers et océans).

Transmissivité	Aptitude des aquifères à transmettre l'eau souterraine. C'est le produit de la perméabilité de l'aquifère par son épaisseur.
Zone de saturation	Partie du sous-sol sous le niveau phréatique dans laquelle tous les vides sont remplis d'eau.

CHAPITRE 6

RESSOURCES DES TERRES

6.1 INTRODUCTION

Ce chapitre et la carte des potentialités des sols (carte 6-1 du Volume II) ont pour objet de donner une synthèse commode des renseignements existant sur les sols des régions de savane de l'Ouest Africain et sur leurs potentialités relatives à la production des récoltes.

Ce chapitre décrit les méthodes utilisées pour l'établissement de la carte des potentialités et discute en particulier:

a) les informations existantes disponibles sur les sols des régions de savane de l'Ouest Africain,

b) l'interprétation à donner de ces informations de base pour pouvoir arriver à une carte des potentialités des sols.

Nous pensons que les renseignements obtenus sur ces sujets aideront le lecteur à comprendre comment la carte des potentialités a été compilée, quelles en sont les limitations et, en conséquence, ce qu'on peut et ne peut pas en attendre.

Deux cartes des sols récemment publiées à l'échelle de 1/5.000.000ème fournissent déjà une synthèse commode des informations de base existant sur les sols de l'Ouest Africain. Les renseignements sont cependant classés d'une manière différente sur chaque carte, la classification étant, sur la première, faite selon la méthode française tandis que, sur l'autre, c'est la cartographie assez différente de la FAO qui est utilisée.

Les renseignements de base existant sur les sols nécessitent une interprétation soigneuse si l'on doit en déduire des informations sur leurs

possibilités pouvant être intégrées avec efficacité dans une planification et une gestion des ressources naturelles. Dans une étude axée principalement sur une utilisation efficace des ressources en eau, les informations sur l'eau disponible doivent être associées à une connaissance de la potentialité des sols à produire des récoltes. Une planification efficiente des ressources en eau, ayant pour objet final de prévoir avec certitude une production agricole accrue et soutenue des terres, doit logiquement tenir compte du potentiel de ces terres; ce qui varie considérablement d'un sol à l'autre ainsi qu'en fonction du climat.

Dans la présente interprétation des données de base sur les sols, l'accent a été mis sur l'examen et l'évaluation des caractéristiques des sols qui affectent la production des récoltes, cela tout en utilisant les techniques agricoles actuelles. Les sols sont répartis en cinq classes de potentialité. La carte indique les possibilités, d'une part, des sols principaux de chaque groupe et, d'autre part, des sols associés moins importants.

6.2 METHODES UTILISEES ET DOCUMENTS ETUDIES

6.2.1 Les données de base sur les sols

Les premiers travaux d'étude et d'examen des sols de l'Ouest Africain et de leur cartographie à diverses échelles ont commencé, pour la plupart des pays, après la Seconde Guerre mondiale; ils se sont poursuivis depuis, à un rythme en général croissant, et nous disposons donc aujourd'hui de nombreuses informations de base. Elles sont cependant très inégales en couverture et en qualité. Certaines régions ont été étudiées en détail à grande échelle et d'autres à peine. D'autres incohérences résultent de l'utilisation de méthodes différentes d'examen et de classification des divers sols, ce qui rend parfois difficile le raccordement de cartes de régions voisines ayant été établies et répertoriées de manières différentes. Il y a dans

l'Ouest Africain des différences notables entre les classifications des pays francophones et anglophones et les contacts professionnels ont été insuffisants entre les deux groupes.

Une première tentative de corrélation et d'assemblage de ces informations sur les sols a été faite par le SPI (Service pédologue interafricain) dont l'aboutissement a été la publication en 1964 d'une carte des sols au 1/5.000.000ème (D'Hoore, 1964). Plus récemment, un travail important a été mené à bien par un groupe de spécialistes des sols dont la responsabilité portait sur la synthèse des informations en nombre considérablement accru sur les sols et l'établissement de deux cartes distinctes des sols de l'Ouest Africain, toutes deux au 1/5.000.000ème mais différant quant au système de classification utilisé.

La première de ces cartes, désignée ci-après dans ce rapport comme la carte IFAN (Institut Français d'Afrique Noire) a été publiée en 1971 dans l'Atlas International de l'Ouest Africain édité par l'OUA (Organisation de l'Unité Africaine) et imprimé par l'IGN (Institut Géographique National) à Paris. Cette carte couvre l'Ouest Africain jusqu'à 24°N de latitude et 14°E de longitude; elle donne une classification des sols selon les dix catégories du système français (Aubert, 1965) en les subdivisant en 72 unités différentes (Tableau 6-1) dont chacune est représentée sur la carte à l'aide de couleurs différentes. Des renseignements complémentaires sur les sols sont donnés dans les tableaux détaillés publiés avec la carte et subdivisant à nouveau les 72 groupes en 390 unités ou associations, les sols associés étant indiqués pour chacune (Volume Annexe 6-1).

La deuxième carte des sols, à l'échelle de 1/5.000.000ème, est celle publiée par la FAO dans le cadre de ses travaux de cartographie mondiale des sols, trois feuilles en étant consacrées à l'Afrique. Les cartes des sols de l'Ouest Africain comprennent l'Afrique du Nord et vont environ 10° en

TABLEAU 6-1

PRESENTATION SYNOPTIQUE DE LA CLASSIFICATION FRANCAISE DES SOLS DE L'OUEST AFRICAIN

Ce qui suit est la classification adoptée par l'IFAN dans son Atlas international de l'Ouest Africain (OUA, 1971) :

1. SOLS MINERAUX BRUTS

Sols désertiques d'origine climatique, d'apport

- sur sables éoliens d'ablation 1A
- sur roches diverses 1B

Lithosols non climatiques

- sur roches diverses 1C
- sur cuirasses 1D
- sur matériaux non différenciés 1E

2. SOLS PEU EVOLUES

Sols subdésertiques, modaux

- sur roches diverses 2A
- sur sables éoliens 2B

Sols peu évolués d'érosion, régiques

- sur matériau gravillonnaire 2C
- sur matériau caillouteux 2D
- sur grès argileux du Continental terminal et sur quartzites 2E

Sols peu évolués d'apport, modaux

- sur sables éoliens hydromorphes 2F
- sur matériau sableux à niveau grossier sur granite 2G
- sur matériau sablo-argileux à argilo-sableux 2H

2. SOLS PEU EVOLUES (suite)

- sur alluvions sableuses à argilo-sableuses 2I
- sur dépôts marins ou lacustres à texture variée 2J

3. ANDOSOLS

Andosols des régions chaudes sur matériaux basiques issus de roches éruptives 3A

4. VERTISOLS

Vertisols topomorphes, grumosoliques, modaux 4A
non-grumosoliques, modaux 4B
hydromorphes 4C
alcalisés 4D

Vertisols lithomorphes, non grumosoliques, modaux 4E
alcalisés 4F

5. SOLS ISOHUMIQUES SATURES

Sols bruns subarides, modaux
- sur matériau sableux 5A

vertiques
- sur matériau argilo-sableux 5B
- sur alluvions argileuses 5C
- sur matériau argileux issu de marnes 5D

légèrement alcalins
- sur matériau argilo-sableux 5E

Sols brun-rouge subarides, peu différenciés
- sur sables éoliens 5F

modaux
- sur sables éoliens 5G

6. SOLS A MULL

Sols bruns euthrophes, modaux
- sur matériau argileux, parfois graveleux 6A

vertiques
- sur matériau argileux 6B

ferruginisés 6C

7. SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX RICHES EN SESQUIOXYDE

Peu lessivés, peu différenciés		- sur sables éoliens	7A
	modaux	- sur sables éoliens	7B
	hydromorphes	- sur matériau sableux	7C
Lessivés, modaux			7D
	concrétionnés		7E
	remaniés		7F
	hydromorphes		7G
	indurés		7H

8. SOLS FERRALLITIQUES

Faiblement déssaturés, typiques,		modaux	8A
		indurés	8B
	appauvris,	modaux	8C
		indurés	8D
	remaniés,	modaux	8E
		indurés	8F
Moyennement déssaturés, typiques,		modaux et jaunes	8G
		faiblement rajeunis	8H
		faiblement appauvris	8I
	humifères		8J
	appauvris,	modaux	8K
		jaunes	8L
	remaniés,	modaux	8M
		indurés	8N
		rajeunis	8O
		peu évolués	8P
Fortement déssaturés, typiques,		modaux	8Q
		jaunes	8R
		indurés	8S
	humifères		8T
	appauvris, lessivés,	modaux et jaunes	8U

8. SOLS FERRALLITIQUES (suite)

remaniés, modaux et jaunes	8V
faiblement rajeunis	8W

9. SOLS HYDROMORPHES

Humiques à gley et anmoor, acide	9A
Minéraux à gley d'ensemble	9B
à gley de profondeur	9C
à pseudogley, à tâches et concrétions	
- modaux	9D
- vertiques	9E

10. SOLS HALOMORPHES

Structure non dégradée, salins, à encroûtement	10A
salins acidifiés, sur sédiments fluvio-marins	10B
A structure dégradée, solonetz à structure en colonette de l'horizon B	10C
prismatique ou massive de l'horizon B	10D

longitude plus loin vers l'est que la carte de l'IFAN. La collaboration entre les spécialistes des sols de la FAO et les autres a eu pour résultat que les limites de chaque carte sont, dans presque tous les cas, les mêmes que celles de la carte IFAN; mais la classification des sols et les légendes correspondantes sur les cartes restent cependant différentes. Les cartes pédologiques de la FAO utilisent un système cartographique à deux catégories, de préférence à une classification hiérarchisée, comportant 26 unités cartographiques (ayant les symboles A à Z) qui sont toutes, sauf trois, subdivisées en sous-unités, 55 de ces dernières figurant sur la carte de l'Ouest Africain (Tableau 6-2).

La classification française utilisée pour la carte IFAN est une classification détaillée, hiérarchisée et taxonomique, fondée principalement sur la genèse des sols telle qu'indiquée par la morphologie de leurs profils. La légende des cartes FAO, au contraire, ne prétend pas constituer un système de classification en tant que tel, mais tente simplement d'adapter à une carte des sols déjà cartographiés et classés selon d'autres systèmes, les désignations couramment adoptées. Dans la pratique, le système cartographique de la FAO semble faire bien davantage appel à certains aspects du système taxonomique américain tel que présenté dans l'ouvrage "Taxonomie des sols: Système de base de classification des sols pour l'exécution et l'interprétation des études de sols" (USDA, Ministère américain de l'agriculture, 1975), plutôt qu'au système français.

Par suite de la mise en oeuvre des systèmes de classification de la FAO et de ceux des Etats-Unis, nous disposons maintenant d'au moins trois systèmes distincts de classification des sols largement utilisés dans l'Ouest Africain, d'autres systèmes associés à Charter (1957) et D'Hoore (1964) étant également utilisés plus localement, respectivement au Ghana et au Nigeria. Il n'y a cependant pas eu de carte publiée selon le système américain et couvrant tous les sols de l'Ouest Africain. Quant au système D'Hoore, il est quelque peu périmé.

TABLEAU 6-2

PRESENTATION SYNOPTIQUE DES UNITES DE CARTOGRAPHIE 1/5,000,000ème DE LA FAO UTILISEES DANS LES REGIONS DE SAVANE DE L'OUEST AFRICAIN

Les unités cartographiques sont énumérées selon l'ordre alphabétique des symboles. Les unités estimées absentes dans les zones ont été omises.

A	ACRISOLS	f	ferriques
		o	orthiques
		p	plinthiques
B	CAMBISOLS	d	dystriques
		e	eutriques
		f	ferraliques
		g	gleyiques
		h	humiques
		k	calciques
F	FERRALSOLS	h	humiques
		o	orthiques
		p	plinthiques
		r	rhodiques
		x	xanthiques
G	GLEYSOLS	c	calcaires
		d	dystriques
		e	eutriques
		h	humiques
		p	plinthiques
H	PHAEOZEMS	h	hapliques
I	LITHOSOLS	(sans subdivisions)	
J	FLUVISOLS	c	calcaires
		d	dystriques
		e	eutriques
		t	thioniques
L	LUVISOLS	c	chromiques
		f	ferriques
		g	gleyiques
		p	plinthiques
N	NITOSOLS	d	dystriques
		o	eutriques
		h	humiques
O	HISTOSOLS	d	dystriques
Q	ARENOSOLS	c	cambiques
		f	ferraliques
		l	luviques
R	REGOSOLS	c	calcaires
		d	dystriques
		e	eutriques
S	SOLONETZ	g	gleyiques
		m	molliques
		o	orthiques

TABLEAU 6-2 (Suite)

T	ANDOSOLS	h	humiques	Y	YERMOSOLS	h	hapliques
		m	molliques			y	gypsiques
		v	vitriques	Z	SOLONCHAKS	g	gleyiques
V	VERTISOLS	c	chromiques			o	orthiques
		p	pelliques			t	takyriques
W	PLANOSOLS	d	distriques				
		e	eutriques				
		s	solodiques				

Il en résulte que c'est sur les informations synthétisées dans les cartes publiées par l'IFAN et la FAO que l'on peut aujourd'hui s'en remettre pour classer les potentialités des sols. Compte tenu du travail très volumineux et soigneux entrepris dans la synthèse de ces deux cartes, le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) pense que, bien que disposant d'éléments de base suffisants pour procéder à une nouvelle synthèse, il serait peu justifié au stade actuel de reprendre le travail déjà fait. L'effort principal a donc porté sur l'interprétation de ces données de base en termes des potentialités des sols, bien que les cartes de base et les conclusions des interprétations aient été vérifiées à l'aide de documents complémentaires publiés à plus grande échelle.

6.2.2 Méthode d'interprétation

Au cours de l'établissement de la carte des potentialités des sols, le CIEH a procédé aux opérations suivantes:

a) examen des notions actuelles sur l'évaluation des potentialités des sols et sur leur classification en général;

b) examen des données de base et des cartes des sols pour les zones du Sahel et de savane de l'Ouest Africain ainsi que pour les pays et régions distincts appartenant à ces zones;

c) étude des tentatives et propositions existantes relatives à l'interprétation des informations de base disponibles sur les sols, en termes d'évaluation du potentiel agricole de ces sols et d'établissement de cartes de leurs potentialités;

d) établissement d'une classification des sols de l'Ouest Africain en cinq catégories en se fondant sur les caractéristiques de profils des sols cartographiés et en les interprétant en termes d'aptitude à produire des récoltes selon les méthodes actuelles;

e) établissement de sa propre carte des potentialités des sols de l'Ouest Africain en se fondant sur ces nouvelles interprétations des potentialités des sols cartographiés et en comparant ensuite certaines parties de la carte à d'autres éléments d'information disponibles à plus grande échelle à propos des potentialités en question.

Dans les travaux ci-dessus, le CIEH a fait largement appel aux ressources de son propre centre de documentation en utilisant son importante collection de rapports et de cartes sur les sols.

Dans son étude des tentatives actuelles de classement des sols de l'Ouest Africain quant à leurs potentialités de production de récoltes, le CIEH a utilisé le travail de nombreux spécialistes des sols; on doit cependant mentionner plus particulièrement les études détaillées de J. Riquier, maintenant à la FAO à Rome. M. Riquier a publié plusieurs études sur des méthodes paramétriques de classification des sols (Riquier et autres, 1970; Riquier, 1971, 1972, et 1974). Le CIEH lui est particulièrement redevable de lui avoir communiqué une étude inédite sur les potentialités des sols du Sahel et intitulée "Carte des aptitudes et potentialités à la culture et au pâturage des sols du Sahel". Bien que la classification finale adoptée par le CIEH soit différente de celle utilisée par M. Riquier, le CIEH désire

exprimer ses vifs remerciements pour l'aide apportée par l'étude non-publiée de M. Riquier dans ce domaine.

Il est cependant évident que toute carte donnant une synthèse des connaissances existantes sur les potentialités des sols de l'Ouest Africain doit s'appuyer sur le travail de nombreux pédologues et agronomes, de langue anglaise ou française, trop nombreux pour être cités ici. La présente mission a donné l'occasion aux compilateurs de réunir et de comparer les travaux de ces deux groupes de chercheurs, ce qui est bien en effet l'un des objectifs du centre de documentation du CIEH.

C'est ainsi que, comme exposé plus loin, on s'est servi tout particulièrement des cartes de sol au 1/5.000.000 publiées par la FAO et l'OUA. A ce propos, on a pensé que l'étude affinée des deux systèmes de classification, suivie de la minutieuse comparaison des deux cartes correspondantes, fournirait davantage d'informations sur les potentialités des sols qu'une étude entreprise uniquement de l'un ou l'autre des systèmes, bien qu'il faille toutefois noter que la carte définitive a reposé essentiellement sur les 72 unités de la classification française telle que représentée sur la carte OUA/IFAN.

Pour chacune de ces 72 unités, on a déterminé les propriétés des sols suivantes:

1. Saturation en cations

2. Salinité

3. Profondeur réelle du sol

4. Drainage et perméabilité

5. Présence de croûtes

6. Texture de la couche superficielle et du sous-sol

7. Consistance

8. Présence de graviers et de pierres

9. Matière organique

10. Capacité d'échange

11. Réserves en minéraux attaquables par les intempéries

12. Structure de la couche superficielle

La potentialité globale de chaque unité de sol a été déterminée tout en accordant une attention particulière aux terres très impropres susceptibles de limiter la possibilité du sol à produire des récoltes, mais également en prenant dûment en considération les caractéristiques favorables des sols.

La méthode décrite ci-dessus a été suivie pour toutes les régions cartographiées à l'exception des territoires du Tchad, du Cameroun et de l'Empire Centrafricain. Ces territoires ne sont que partiellement ou pas couverts par la carte OUA/IFAN et, pour ces régions, l'interprétation devait prendre comme point de départ la carte des sols au 1/5.000.000ème de la FAO. Dans le cas de ces territoires, le mode opératoire a été le suivant :

a) Etablissement, pour les trois territoires, des unités cartographiques FAO et des sols y figurant;

b) Conversion, dans la mesure du possible, des sols de ces unités dans les groupes correspondants de la classification française (Tableau 6-3), en utilisant les connaissances acquises par l'étude des régions de savane du reste de l'Ouest Africain et celles des publications sur les sols de ces trois territoires;

c) Les éléments de la classification française considérés comme équivalents de ceux de la cartographie des sols FAO ont alors reçu les indices de classification des potentialités des sols déjà attribués conformément aux méthodes décrites ci-dessus et on a préparé un schéma de classification à deux symboles des propriétés de chaque unité cartographique de sols.

Les différentes unités cartographiques indiquées sur la carte des sols FAO au 1/5.000.000ème pour ces trois territoires sont données dans le Volume 3, Annexe 6-2 qui indique également la classification française lorsqu'elle

TABLEAU 6-3

TABLEAU DONNANT LA CORRESPONDANCE ENTRE LA CLASSIFICATION FRANCAISE DES SOLS ET LES PRINCIPALES UNITES CARTOGRAPHIQUES DE SOLS DE LA FAO DANS LES REGIONS DE SAVANE DE L'OUEST AFRICAIN

		1 SOLS MINERAUX BRUTS	2 SOLS PEU EVOLUES	3 ANDOSOLS	4 VERTISOLS	5 SOLS BRUNS ET BRUNS-ROUGES	6 SOLS BRUNS EUTROPHES	7 SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX	8 SOLS FERRALITIQUES	9 SOLS HYDROMORPHES	10 SOLS HALOMORPHES	
A	ACRISOLS							x	x			(2)
B	CAMBISOLS					x	x		x	x		(4)
F	FERRALSOLS								x			(1)
G	GLEYSOLS									x		(1)
H	PHAEOZEMS			x								(1)
I	LITHOSOLS	x										(1)
J	FLUVISOLS		x					x		x	x	(4)
L	LUVISOLS						x	x	x	x		(4)
N	NITOSOLS								x			(1)
O	HISTOSOLS									x		(1)
Q	ARENOSOLS		x			x		x	x			(4)
R	REGOSOLS		x									(1)
S	SOLONETZ										x	(1)
T	ANDOSOLS			x								(1)
V	VERTISOLS				x							(1)
W	PLANOSOLS									x		(1)
Y	YERMOSOLS	x	x									(2)
Z	SOLONCHAKS										x	(1)
		(2)	(4)	(2)	(1)	(2)	(2)	(4)	(6)	(6)	(3)	(32)

est jugée comparable, les valeurs de potentialité affectées à ces unités ainsi que la classification sommaire globale à un ou deux chiffres des potentialités telle que figurant sur la carte CIEH des potentialités des sols.

6.2.3 Etudes de cas

Les méthodes décrites ci-dessus et la carte des potentialités des sols au 1/5.000.000ème en résultant ont, dans toute la mesure du possible, été vérifiées au moyen de l'examen plus en détail de deux cas particuliers de régions de savane choisies de l'Ouest Africain.

Le premier cas étudié a trait aux informations disponibles sur les sols de Haute-Volta. Le deuxième a trait à deux publications relatives à l'interprétation des sols du Nigeria; il s'agit là d'une étude détaillée d'une partie du nord-ouest du Nigeria et d'une tentative approfondie de détermination, pour les sols nigérians considérés comme un tout, d'un classement quantitatif et chiffré de leurs potentialités.

L'étude de ces cas a permis de révéler certains des problèmes impliqués dans une généralisation à grande échelle des potentialités des sols vues au 1/5.000.000ème et, par là-même et comme discuté plus loin dans ce rapport, certaines des limitations d'une carte à cette échelle.

Ces études de cas elles-mêmes figurent dans les Annexes 6-3 et 6-4 du Volume 3.

6.3 RESULTATS

6.3.1 Légende de la carte

Chacune des 72 unités de sols de la carte IFAN a été placée dans l'une des cinq classes de potentialité (voir Tableau 6-4). Ces cinq classes ont été définies comme suit:

TABLEAU 6-4

PRESENTATION SYNOPTIQUE DE LA CLASSIFICATION CIEH DE POTENTIALITES DES SOLS POUR LES 72 UNITES DE SOLS DE LA CARTE DES SOLS DE L'ATLAS DE L'OUEST AFRICAIN (OUA, 1971)

UNITE DE SOL (classif. fr.) (voir Tableau 6-2)	Classification des potentialités et facteurs limitatifs principaux (définis à la page 6-22)	UNITE DE SOL (classif. fr.)	Classification des potentialités et facteurs limitatifs principaux
1A	5 t u	4D	4 w tt
1B	5 g	4E	4 tt h
1C	5 d	4F	4 tt h
1D	5 d		
1E	5 d	5A	2
		5B	3 h
2A	5 t u	5C	3 h
2B	5 t u	5D	3 h
2C	4 d g	5E	2
2D	4 d u	5F	5 t u
2E	4 d	5G	4 t
2F	4 t		
2G	4	6A	1
2 H	3	6B	2 w tt
2I	2	6C	2
2J	5 s		
		7A	4 t u
3A	1	7B	4 t u
		7C	2
4A	3 tt	7D	3
4B	4 tt h	7E	3 g
4C	4 w tt	7F	3 g

TABLEAU 6-4 (Suite)

UNITE DE SOL (classif. fr.)	Classification des potentialités et facteurs limitatifs principaux	UNITE DE SOL	Classification des potentialités et facteurs limitatifs principaux
7G	3	8P	3
7H	4 g	8Q	3 a
		8R	3 a
8A	2	8S	4 a
8B	4 d	8T	2 a
8C	3	8U	4 a t
8D	4 d	8V	3 a g
8E	3 g	8W	3 a g
8F	4 g d		
8G	3	9A	2 a w
8H	3	9B	2 w d
8I	3	9C	1
8J	1	9D	1
8K	3	9E	2 h
8L	3	10A	5 s
8M	3 g	10B	5 a
8N	4 g	10C	5 s
8O	2 g	10D	5 s

Classe 1 : Sols généralement bons.
Ces sols ne présentent pas de limitations sérieuses et peuvent donner de bons rendements pour des cultures appropriées et climatiquement adaptées.

Classe 2 : Sols généralement moyens à bons présentant des limitations faibles à moyennes pouvant en réduire l'utilisation. Les rendements en cultures adaptées climatiquement sont modérément bons.

Classe 3 : Sols généralement de pauvres à moyens. Ces sols présentent une ou plusieurs limitations d'ampleur modérée, une fertilité naturelle habituellement assez faible; ils donnent en général des rendements faibles à modérés pour des cultures climatiquement adaptées et entreprises selon les méthodes traditionnelles.

Classe 4 : Sols généralement pauvres. Ces sols présentent des limitations de modérément sévères à sévères et, exploités selon les méthodes traditionnelles, donnent en général des rendements médiocres.

Classe 5 : Sols ne convenant en général pas à la culture, encore que parfois adaptés à des pâturages maigres ou à d'autres utilisations extensives.

Classe 5 (suite):

Ils souffrent en général de limitations assez sévères pour exclure la culture. Ce sont par exemple une profondeur insuffisante, des pentes raides ou des réactions chimiques du sol très défavorables (acidité ou salinité/ alcalinité extrêmes) qui, sauf amélioration du sol, interdisent pratiquement la croissance des cultures.

Il y a lieu de noter que les définitions proposées:

a) réfèrent aux potentialités actuelles d'un sol avec les méthodes traditionnelles de culture, c'est-à-dire à son aptitude sans améliorations importantes, selon les méthodes traditionnelles de culture à la main et avec peu ou pas d'apport d'engrais. Les définitions de potentialité se réfèrent à des rendements de pauvres (pour les sols de classe 4) à bons mais, dans le contexte de l'Ouest Africain, les rendements résultant des méthodes traditionnelles sont en général faibles devant ceux obtenus dans les exploitations agricoles utilisant des méthodes améliorées.

b) sont relatives à une unité de sol particulière, mais que la plupart des unités de sols indiquées sur la carte comportent plusieurs groupes de sols constituant une association.

c) doivent être interprétées en tenant compte du fait que, avec les méthodes traditionnelles de culture, on régénère la fertilité de nombreux sols en laissant la terre se reposer dans les conditions naturelles de jachère pendant des durées variables après la récolte. La productivité d'un sol peut donc ainsi varier considérablement en fonction de l'histoire de sa mise en valeur antérieure; elle peut s'avérer relativement fertile après une longue jachère mais relativement faible après une longue période d'exploitation. Cela signifie que, dans la pratique, des sols mis dans la même classe de potentialités peuvent présenter

des productivités diverses.

Les rendements que donnera un sol quelconque seront également largement influencés par la compétence de l'agriculteur et la qualité de sa gestion. De plus, il importe d'interpréter la carte des potentialités des sols en fonction du climat, surtout de la précipitation locale, bien que d'autres facteurs affectent eux aussi les rendements.

6.3.2 Facteurs limitatifs

Une tentative a été faite pour indiquer quels sont les facteurs limitatifs considérés comme dominants pour chaque sol. Si l'on suit la pratique habituelle, ces facteurs limitatifs sont indiqués par une ou plusieurs lettres mises sous forme de suffixe au numéro de classe de potentialité (exemple : 5s ou 3g). Cependant, pour essayer d'avoir une information plus précise que celle donnée en général dans les classifications de potentialités des sols, un nombre de suffixes plus important que de coutume a été utilisé. Ce sont les suivants:

- a - acidité
- d - limitation par la profondeur
- g - sol graveleux ou graveleux et pierreux
- h - consistance très lourde
- s - salinité
- t - texture trop légère
- tt - texture trop lourde
- u - structure instable de la couche superficielle
- w - humidité, c'est-à-dire mauvais drainage

Dans la pratique, certains de ces facteurs limitatifs sont liés les uns aux autres et donc souvent trouvés ensemble (par exemple, t et u pour des sols sablonneux et w et tt pour des sols très lourds).

Dans de nombreux cas, un sol souffre de plusieurs facteurs limitatifs, à un degré voisin pour chacun, ce qui rend difficile la séparation de seulement un ou deux d'entre eux. D'autres facteurs limitatifs non énumérés ici ont trait aux pentes locales (souvent liées à une limitation par la profondeur d) et, plus particulièrement, à des fertilités ou possibilités de rétention d'eau insuffisantes (souvent liées à t, texture légère, et d, limitation par la profondeur). Dans des régions de climats comparables, les différences locales dans la rétention de l'eau peuvent jouer un rôle très important. Les sols hydromorphes des fonds de vallées donnent souvent des récoltes meilleures et plus variées en raison d'un apport d'eau meilleur résultant beaucoup plus de leur topographie que des qualités intrinsèques du sol lui-même.

6.3.3 Cartographie des sols principaux et des sols associés

Les cartes de base des sols IFAN et FAO utilisées ne donnent que l'unité de sols dominants de l'association cartographiée. Une association type comporte cependant plusieurs sols, souvent avec un ou plusieurs sols associés, chacun étant défini comme occupant au moins 20 % de l'ensemble de l'unité cartographique. Bien que la carte IFAN indique, par le symbole couleur utilisé, uniquement celui des 72 sols dominant dans chaque unité cartographique, des informations complémentaires ont été données dans des tableaux séparés pour les 390 unités cartographiques et, dans l'Annexe 6-1, des valeurs de potentialité ont été affectées à tous les sols de chaque association, c'est-à-dire aux sols associés comme au sol principal.

Sur la carte des potentialités des sols, on ne peut indiquer, pour chaque unité cartographique, que deux classes de potentialités soit, par exemple, celle du sol dominant et celle globale des autres sols de l'unité cartographique concernée.

Les potentialités des sols associés ont été indiquées, ou résumées, par l'utilisation d'un deuxième symbole sur la carte; il y a exception pour les cas où la classe de potentialité affectée aux sols associés est la même que celle du sol dominant, auquel cas une seule classe de potentialité doit être indiquée. Les exemples suivants montrent comment le deuxième symbole est utilisé pour résumer les potentialités des sols et inclusions associés.

Unité cartographique	Potentialités du sol dominant et des sols associés	Symboles indiqués sur la carte
I 33	5, 3, 4	5-3
Vc 8	4, 4	4
Vc 10	4, 1	4-1
Ql 12	4, 4, 5, 3-4	4
Od 10	2, 2-4, 1-2	2
Lg 9	1, 1-2, 2-4, 4	1-2

Une liste complète est donnée à l'Annexe 6-1.

6.4 INTERPRETATION ET UTILISATION DE LA CARTE DES POTENTIALITES DES SOLS

L'établissement d'une carte des potentialités des sols est subordonné à un certain nombre de contraintes importantes limitant son utilité. Parmi les plus évidentes de ces contraintes et limitations, figurent les suivantes :

a) Qualité inégale des données de base

Aucune interprétation des potentialités ne peut être meilleure que les renseignements de base sur les sols sur lesquels elle se fonde. Ces renseignements, bien que commodément résumés sur les deux cartes des sols examinées plus haut, sont essentiellement inégaux en couverture et en qualité.

b) Les cartes de base des sols utilisent des classifications taxonomiques

La carte des sols de l'IFAN, utilisée comme base de la carte de potentialités des sols, classe ces sols selon le système français. Ce système complexe est un système taxonomique de classification qui met l'accent sur les caractéristiques de profils des sols dont on pense qu'elles reflètent leur formation. La classification n'a pas été conçue pour grouper les sols selon leurs potentialités et ne met donc pas nécessairement l'accent sur les facteurs importants affectant pratiquement l'agriculture. Bien que de nombreux critères utilisés dans le classement des unités de sols aient un rapport avec leur valeur agricole, il n'en demeure pas moins vrai que les sols constitués en groupes en raison d'une formation comparable présentent souvent une diversité importante dans les caractéristiques relatives à leur productivité. Les sols d'une même unité peuvent ainsi présenter toute une gamme de textures, teneurs en graviers, profondeurs, capacités de rétention d'eau, teneurs en matières organiques et degré d'érosion, tous facteurs jouant un rôle dans leurs potentialités à produire des récoltes. Des écarts dans les caractéristiques de ces sols mis dans une même unité peuvent donc résulter en toute une gamme de potentialités au sein de l'unité concernée. La potentialité affectée à l'unité ne peut pas alors représenter plus que la moyenne de l'ensemble, certains sols particuliers dans l'unité s'écartant considérablement de cette moyenne.

c) <u>L'expérience générale dans l'interprétation des données sur les sols est, dans l'Ouest Africain, mal adaptée</u>

Bien que le volume des données analytiques disponibles sur les sols aille croissant, il y a en général un manque d'expérience quant aux corrélations à établir entre ces renseignements et le rendement des terrains en cultures, ce qui rend difficile l'évaluation de l'influence éventuelle sur le rendement de paramètres tels que les réactions des sols, leurs capacités d'échanges de cations et autres propriétés.

d) <u>Les cartes sont établies à une échelle trop petite ne donnant pas suffisamment de détails</u>

La petite échelle de la carte au 1/5.000.000ème limite évidemment le nombre des détails qui peuvent y être montrés. Bien qu'une

carte à petite échelle présente l'avantage de faire ressortir les caractéristiques marquantes d'une région étendue, elle a comme inconvénient de ne pas montrer de petites parcelles du sol pouvant néanmoins être importantes localement. Des sols hydromorphes, par exemple, existent dans presque toutes les chaînes géologiques mais sont en général de dimensions trop réduites pour apparaître sur la carte au 1/5.000.000ème.

e) Les unités cartographiques sont en général des associations de plusieurs sols

Même sur la plupart des cartes des sols de l'Ouest Africain établies à une échelle plus grande que celle de la carte des potentialités jointe, l'unité cartographique n'est en général pas constituée d'un sol unique mais d'une association de sols ou enchaînement géologique. Ces enchaînements sont une succession relativement régulière de sols liés au relief. La première description en a été donnée pour l'Est Africain et ils sont très caractéristiques des sols d'Afrique. Un tel enchaînement est souvent formé d'au moins deux roches mères différentes, les sols au sommet des versants étant plus ou moins sédentaires, ou au moins remaniés in situ, tandis que ceux au bas des versants sont formés à partir des colluvions locales et que ceux des fonds des vallées sont alluvionnaires. Certaines chaînes sont compliquées en raison d'une historique géomorphologique complexe du terrain. Sur les cartes des sols IFAN et FAO au 1/5.000.000ème, l'unité de sol indiquée est celle du sol dominant. Les sols associés appartiennent souvent à des unités différentes et peuvent présenter des possibilités autres. Ce point a été indiqué, dans une certaine mesure, sur la carte des potentialités des sols : comme dit ci-dessus, à cet effet on a affecté une deuxième valeur de potentialité aux sols associés. Une simplification considérable est cependant parfois nécessaire si on ne veut pas surcharger la carte de détails. Cette deuxième valeur de potentialité ne représente donc pas plus qu'une estimation sommaire approximative de la potentialité de tous les sols associés.

6.5 CONCLUSIONS

6.5.1 Superficie des classes de potentialité des sols

Les unités cartographiques montrées sur la carte 6-1 sont regroupées dans l'une des vingt-cinq combinaisons de classes de potentialité, comme représenté dans la première colonne du Tableau 6-5. Dans chaque combinaison de classes, le premier nombre réfère à la classe de potentialité du sol dominant, tandis que le second chiffre indique la classe générale assignée au(x) sol(s) associé(s).

Le Tableau 6-6 indique que les classes dominantes de potentialité dans les régions de savane, en termes de superficie, correspondent aux classes 3 et 4 dont l'ensemble constitue le sol dominant dans 73% du périmètre cartographié, les sols de la classe 2 restant les moins répandus (3% seulement de l'aire relevée). Les secteurs où prédominent les sols de la classe 1 couvrent environ 7% de la superficie, alors que les surfaces où domine la classe 5, c'est-à-dire des sols de productivité faible ou nulle, totalisent 17% des régions de savane.

TABLEAU 6-6

RAPPORT ENTRE LES SUPERFICIES DES UNITES CARTOGRAPHIQUES OU DOMINENT DES SOLS DE CHACUNE DES CINQ CLASSES DE POTENTIALITE

Classe dominante de potentialité		Pourcentage de la région de savane
Bonne	1	7,0
Moyenne à bonne	2	3,0
Pauvre à moyenne	3	38,4
Pauvre	4	34,6
Impropre	5	17,0

TABLEAU 6-5

POURCENTAGE DE LA SUPERFICIE TOTALE DE LA SAVANE OCCUPE PAR CHAQUE UNITE CARTOGRAPHIQUE, ET POURCENTAGE DU TOTAL OCCUPE PAR CHACUNE DES CLASSES DE POTENTIALITE DES SOLS 1,2,3,4 ET 5

		Pourcentage de la classe réparti entre ses composants				
Classe	%	1	2	3	4	5
1	1,40	1,40				
1 + 2	0,85	0,55	0,30			
1 + 3	2,70	1,75		0,95		
1 + 4	1,84	1,20			0,64	
1 + 5	0,16	0,10				0,06
2	0,83		0,83			
2 + 1	0,05	0,02	0,03			
2 + 3	0,90		0,58	0,32		
2 + 4	0,53		0,34		0,19	
2 + 5	0,71		0,46			0,25
3	17,92			17,92		
3 + 1	3,89	1,36		2,53		
3 + 2	3,00		1,05	1,95		
3 + 4	9,24			6,01	3,23	
3 + 5	4,33			2,81		1,52
4	13,15				13,15	
4 + 1	1,84	0,64			1,20	
4 + 2	2,63		0,92		1,71	
4 + 3	10,23			3,58	6,65	
4 + 5	6,80				4,42	2,38
5	6,54					6,54
5 + 1	0,44	0,15				0,29
5 + 2	1,94		0,68			1,26
5 + 3	4,05			1,42		2,63
5 + 4	4,03				1,41	2,62
Totaux	100%	7,17%	5,19%	37,49%	32,60%	17,55%

Les superficies figurant dans le Tableau 6-6 correspondent simplement aux secteurs dans lesquels les sols de chaque classe de potentialité prédominent. Cependant, si le sol dominant dans une unité cartographique où deux classes de potentialité sont représentées est supposé occuper 65% de la superficie de l'unité en question, et le sol ou les sols associés les 35% restants, on peut alors estimer l'étendue réellement occupée par les sols de chaque classe de potentialité là 5, sans tenir compte de la combinaison selon laquelle ces classes de potentialité se produisent, comme cela est du reste clairement exposé dans le Tableau 6-5. En effectuant donc les calculs de cette manière, on arrive à établir le Tableau 6-7 ci-après dans lequel sont données les superficies réellement occupées par chacune des classes de potentialité.

TABLEAU 6-7 ETENDUE DES CLASSES DE POTENTIALITE

Classe de potentialité		Pourcentage de la superficie de la savane	Superficie (en Km^2)
Bonne	1	7,2	327.135
Moyenne à bonne	2	5,2	236.796
Pauvre à moyenne	3	37,5	1.710.499
Pauvre	4	32,6	1.487.390
Impropre	5	17,5	800.727
Total		100,00	4.562.547

6.5.2 Superficie et répartition des sols dans chaque classe de potentialité

Sols de la classe 1

Le périmètre cartographié au titre de la Classe 1 totalise 1,4% de l'aire de la savane, avec en sus 5,77% cartographiés en combinaison avec des sols de plus faibles classes de potentialité, comme cela est représenté sur le Tableau 6-5. Ces pourcentages correspondent en fait à des superficies de 63.876 et 263.259 Km^2, soit à peu près 33 millions d'hectares.

Les sols de la classe 1 de potentialité sont, en termes du système français de classification, essentiellement hydromorphes, et surtout des sols hydromorphes minéraux, gleyiques en profondeur, ou avec pseudogley. Selon le système cartographique de la FAO, les sols de cette classe de potentialité sont principalement des gleysols (humiques, eutriques, et non différenciés), des fluvisols (eutriques et non différenciés), des luvisols gleyiques et des cambisols gleyiques.

Les aires cartographiques au titre de la Classe 1 se trouvent en grande partie le long des principaux cours d'eau. C'est ainsi que dans l'ouest elles se rencontrent le long du fleuve Sénégal, dans des secteurs peu importants au sud de Dakar, et le long du fleuve Gambie. De vastes superficies avec sols de la Classe 1 existent dans la zone du fleuve du Bani et de ses affluents vers le sud. Plus à l'est, au Nigeria, des sols de cette même classe 1 apparaissent le long du Niger, tandis que de plus larges périmètres avec ces sols sont relevés sur son principal affluent, le Bénoué, vers l'est. Ces zones s'étendent vers l'est au Cameroun et à l'Empire Centrafricain, pendant que dans le nord-est du Nigeria d'autres aires des sols de la Classe 1 sont trouvées au nord-est de Kano le long des cours d'eau comme le Komadugu Yobé et le Komadugu Gana qui se déversent dans le lac Tchad. Dans l'Empire Centrafricain, il existe de grandes superficies de sols de la Classe 1 cartographiées le long du Chari, au sud-est du lac Tchad, vers Sahr, et également au nord-est de Sahr, le long des tributaires du fleuve Chari.

Cependant, de nombreuses parcelles, de dimensions réduites, de sols de la Classe 1, y compris celles qui se sont développées dans les petites zones d'alluvion, n'ont pas pu être représentées sur une carte à la présente échelle. N'ont pu être pris en compte que les plus grands espaces où les sols de la Classe 1 sont sufisamment répandus localement pour constituer le sol dominant dans l'unité cartographique ou le sol principal

dans l'association des sols. Pratiquement, la majortié des catenas de l'Ouest Africain contient au moins de petites parcelles où les sols se sont formés dans des alluvions locales, sols dont beaucoup se qualifieraient comme sols de la Classe 1. Bien qu'en règle générale ces parcelles soient d'étendue restreinte, il se pourrait que l'ensemble de leur superficie non cartographiée soit très important. C'est ainsi que si l'on présumait que dans le reste des unités cartographiées comme ayant des sols dominants ou associés appartenant à de plus faibles classes d'aptitude, seulement 1% de la superficie totale consistait en ces petites parcelles de la Classe 1, alors 0,9% environ seraient ajoutés à l'aire relevée, soit l'équivalent d'à peu près 40.000 Km^2.

Sols de la Classe 2

Les sols de la Classe 2 à eux seuls ne totalisent que 0,83% de l'ensemble du périmètre cartographié, mais ils occupent un pourcentage supplémentaire de 4,36% de ce périmètre lorsqu'ils sont pris en association avec des sols des autres classes d'aptitude. Les sols de la Classe 2 totalisent donc 5,19% des aires relevées dans les régions du Sahel et de la savane, ou l'équivalent de quelque 24 millions d'hectares.

Les sols placés dans la Classe 2 comprennent les sols hydromorphes exclus de la Classe 1, c'est-à-dire les sols hydromorphes humiques, acides et vertiques, ainsi que les sols complètement greyiques, certains sols embryonnaires sur dépôts sableux, certains sols hydromorphes ferrugineux sur des sables et certains sols bruns sous-arides.

Les sols de la Classe 2 sont rencontrés surtout dans l'extrême nord et le nord-est du Nigeria (y compris les secteurs sur le Komadugu qui se jette dans le lac Tchad), dans le sud-est du Nigeria (au sud de la Bénoué), dans les zones dans la partie est du Tchad (le long des fleuves

Bahr Bala et Bahr Keita) et dans le sud de l'Empire Centrafricain (au nord de l'Oubangui et du M'Bomou). Par ailleurs, de petites superficies avec sols de la Classe 2 existent dans les régions côtières du Sénégal et de la Gambie, également dans les zones intérieures de la République de Guinée, en Haute-Volta et dans le territoire voisin du Niger.

Sols de la Classe 3

Aux eux seuls, les sols de la Classe 3 occupent un total de 17,92% de l'ensemble de la surface relevée, et un pourcentage supplémentaire, 19,57%, est rencontré en association avec des sols des autres classes d'aptitude (cf. Tableau 6-5). Au total donc, 37,49% du périmètre correspondent à cette Classe 3 qui se définit comme une classe consistant en sols généralement pauvres à moyens, d'ordinaire de fertilité naturelle assez faible produisant le plus souvent des rendements faibles à modérés pour des cultures climatiquement adaptées et entreprises selon des systèmes traditionnels de gestion. En termes de superficie, ces sols couvrent approximativement 171 millions d'hectares, et ils correspondent à la plus importante des cinq classes de potentialité cartographiées.

Les sols de la Classe 3 en question comprennent essentiellement tant des sols ferrugineux tropicaux dessaturés (équivalents aux luvisols plinthiques et ferriques de la terminologie de la FAO) que des sols ferralitiques légèrement dessaturés et dessaturés (acrisols ferriques et orthiques, avec quelques nitosols). Quant aux superficies restreintes avec sols de la Classe 3, elles englobent certains sols peu évolués. Les sols ferrugineux tropicaux peuvent être considérés comme les sols modaux des régions de savane moyennement sèches de l'Afrique Occidentale, tandis que les sols ferralitiques légèrement dessaturés et dessaturés sont rencontrés dans les zones humides de la savane (ainsi que du reste dans les régions de forêt vers le sud).

Les sols de la Classe 3 sont prédominants à travers toute la moitié sud du périmètre cartographié. Bien qu'ils soient par ailleurs importants dans certaines parties de la moitié nord, ils y occupent cependant une étendue moindre que les sols de la Classe 4.

Sols de la Classe 4

Les sols de la Classe 4, pris tout seuls, recouvrent 13,15% de l'aire cartographiée, mais ils en occupent un pourcentage supplémentaire de 19,45% en association avec des sols d'autres classes de potentialité; ce qui donc totalise 32,60% pour les sols de cette Classe 4, c'est-à-dire l'équivalent d'environ 149 millions d'hectares.

Les sols cartographiés dans la Classe 4 de potentialité tombent fondamentalement dans deux grands groupes de texture opposée. Le premier groupe consiste généralement en sols sableux, légèrement texturés, montrant souvent un profil peu développé, et considéré dans le système de classification française surtout comme des sols bruns rougeâtres, subarides, peu évolués, et comme des sols ferrugineux tropicaux, sur sables éoliens. Ces caractéristiques, dans la terminologie de la FAO, correspondent essentiellement à des régosols et à des arenosols luviques, cambiques et ferraliques. Ce groupe de sols est très répandu dans les secteurs nord cartographiés, tout spécialement dans les zones de sables quaternaires. Quant au second grand groupe de sols de la Classe 4, il englobe des sols de texture très lourde, les vertisols. Ces derniers sont moins fréquents que les sols à texture légère, mais on les rencontre sur de vastes étendues au Tchad et sur des superficies moindres dans le nord-est du Nigeria et le sud-ouest de la Haute-Volta.

On peut dire qu'en règle générale les sols de la Classe 4 de potentialité, tout particulièrement ceux à texture légère, occupent de larges

secteurs dans les parties plus au nord et plus sèches cartographiées.

Sols de la Classe 5

Les aires cartographiées au titre de la Classe 5 couvrent à elles seules 6,54% de l'ensemble, mais prises en association avec des sols de classes plus élevées de potentialité elles en occupent 11,01%; ce qui donne un total de 17,55% ou environ 80 millions d'hectares.

Les sols placés dans cette Classe 5 tombent essentiellement dans trois groupes distincts: les sables meubles des dunes mouvantes, les lithosols peu profonds, et les sols salins.

Les sables meubles des ergs se rencontrent au Sénégal, dans le sud de la Mauritanie et dans le nord du Mali; également sur des aires restreintes dans le nord de la Haute-Volta et ailleurs.

Les superficies avec lithosols peu profonds sur roches ou sur roches ferrugineuses sont trouvées dans la partie centrale du Sénégal, dans le sud et le sud-est de la Mauritanie, dans le nord du Mali, dans un secteur du nord-ouest de la Guinée s'étendant vers le sud-ouest du Mali, également dans l'est du Mali et dans la partie centrale du Nigeria.

Quant aux sols salins, ils se présentent dans le nord de la Haute-Volta, également dans la République du Tchad, tant au sud qu'à l'est du lac Tchad lui-même, et, davantage encore dans les régions nord-est du pays, dans les environs d'Abéché.

CHAPITRE 7

RESSOURCES HUMAINES

7.1 INTRODUCTION

Le Projet d'Utilisation des Ressources en Eau et des Terres des Régions de Savane vise essentiellement à planifier la mise en valeur rationnelle des ressources hydrauliques pour les régions de savane. Pour arriver aux fins ainsi poursuivies il importe de déterminer la situation, la qualité et la quantité des ressources hydrauliques existantes, également de procéder à l'évaluation des besoins actuels et futurs en eau. Ce dernier aspect des tâches implique évidemment l'analyse de la distribution de la population, de sa densité et son taux d'accroissement prévu.

Le but du présent chapitre consiste donc à présenter un sommaire de ce que l'on sait pour l'instant à propos de la population qui habite la savane: qui compose cette population, quel est son chiffre, où est-elle située et quel est son taux de croissance prévu.

La Savane, telle que définie par la précipitation moyenne annuelle, s'entend d'une région semi-aride qui coupe des frontières économiques et sociales complexes et souvent en conflit du point de vue politique. Sur le plan politique, c'est une région dans laquelle des frontières nationales n'ont été tracées qu'au cours des deux dernières décennies et où les alliances politiques continuent d'être considérablement influencées par l'héritage colonial. Economiquement, c'est une région où l'interdépendance internationale n'est pas rare. (Par exemple, les pays entourés de terre, comme la Haute-Volta, ont accès aux marchés mondiaux par l'entremise des moyens de transports plus développés des nations côtières, notamment

la Côte-d'Ivoire). S'agissant du domaine social, la Savane est riche en groupes ethniques. (A titre d'illustration, on citera le Cameroun qui passe pour posséder 200 tribus parlant 24 des principales langues d'Afrique). Ces groupes sont unis par des liens familiaux, religieux, et culturels, qui s'étendent au-delà des frontières nationales et fréquemment divisent les nations intérieurement (témoin la récente guerre civile au Nigeria).

Malgré toutes les différences politiques, sociales et économiques qui existent parmi les pays composant la Savane, ces derniers sont tous confrontés par le même dilemme fondamental : le facteur critique limitant le développement continue d'être l'absence d'approvisionnements d'eau prévisible et sûr. La précipitation atmosphérique reste la principale source d'eau dans la Savane, comme d'ailleurs dans le Sahel, et comme dans les pays sahéliens la précarité de cette source d'eau a été récemment rappelée de façon tragique aux nations de la Savane.

Les populations habitant les pays d'Afrique Occidentale et d'Afrique Centrale du Cameroun, du Tchad et de l'Empire centrafricain partagent certaines caractéristiques communes. C'est ainsi que les populations de la Savane sont essentiellement rurales et agraires et se distinguent par des taux élevés de natalité et de mortalité. De plus, elles sont très mobiles, avec un important pourcentage des gens participant à de fréquentes migrations.

7.2 METHODES ET DOCUMENTS ETUDIES

7.2.1 Choix des sources de données

La principale difficulté à l'occasion de la préparation d'un rapport démographique pour la Savane réside dans l'insuffisance, ou le manque total, de données sûres de recensement. Bien que la Mauritanie, le Mali,

la Haute-Volta, la Côte-d'Ivoire, le Bénin, le Niger, le Tchad et le Cameroun aient prévu leur premier recensement pour 1974-75, malheureusement les renseignements à ce propos ne sont pas encore disponibles au moment de l'établissement du présent document (1977). Par ailleurs, s'il est vrai que d'autres pays faisant partie du projet(notamment la Gambie, la Guinée, la Guinée-Bissau, la Sierra Leone, le Togo, le Nigeria, l'Empire centrafricain) ont effectués un recensement, les informations recueillies demeurent incomplètes. Seules les données démographiques publiées par le Ghana sont considérées comme complètes.

Plusieurs facteurs contribuent aux déficiences dans les informations existantes. L'un des problèmes est celui du dénombrement. En effet, ceux-là chargés de recueillir les données très souvent ne se rendent pas compte de la taille des familles de façon exacte; cette situation résulte d'ordinaire d'une involontaire confusion au sujet de l'âge des gens, du nombre de naissances et de décès. Parfois, cependant, la consignation de données inexactes vient d'une intention voulue s'expliquant par des considérations personnelles comme la mauvaise grâce à déclarer la mortalité infantile réelle, ou la crainte d'être frappé d'impôt (le Mali a eu pendant plusieurs années un impôt par tête d'habitant). De plus, des considérations d'ordre politique affectent également la sûreté des chiffres démographiques vu qu'il a été constaté que certains pays d'Afrique Occidentale ont tendance à enfler le total de leur population à l'effet de se qualifier pour davantage de fonds venant de donateurs internationaux. D'autres pays ont tout simplement réinterprété les renseignements jugés défavorables au gouvernement du moment.

Les limitations des données démographiques existant à propos de l'Afrique Occidentale ont apparu au cours de la récente sécheresse dans le Sahel. Les bilans des incidences démographiques de cette sécheresse varient considérablement. Les experts des services du Ministère de la Santé des Etats-Unis ont calculé qu'au moins 100.000 décès sont

survenus en 1973 seulement. En outre, un rapport spécial des Fonds de la Fondation Carnegie pour les études internationales (Sheets et Morris, 1974) déclare que :

> "Proportionnellement, c'est comme si plus d'un million d'américains avaient été anéantis par un désastre naturel."

Pour sa part, John Caldwell (1975), un éminent démographe de l'Afrique Occidentale, conteste cette assertion et conclut que :

> "La sécheresse s'est révélée énormément pénible : elle a occasionné la souffrance et la maladie; elle a détruit des foyers et des troupeaux; et elle a obligé de nombreuses gens à vendre des bien conservés précieusement. Mais elle n'a pas provoqué de massive réduction du nombre des humains et elle n'a pas arrêté l'accroissement de population ... la principale réaction démographique à la sécheresse n'a pas été la mort mais plutôt la migration."

Pour résumer, les données démographiques dont on dispose pour la Savane peuvent être décrites comme des jeux de patience auxquels il manque de nombreuses pièces. Bien que des organisations nationales et internationales s'occupent actuellement de rassembler certains renseignements supplémentaires, il faudra quand même attendre un certain temps avant d'obtenir un tableau exact de la situation. Entre-temps, on ne peut qu'estimer les lacunes au moyen d'une soigneuse extrapolation à partir des statistiques de vie et des études de cas. En fait, c'est ce que font actuellement des institutions internationales proéminentes comme les Nations Unies, l'Agence Amércaine pour le Développement International, le Centre des Programmes de Statistiques Internationales du Bureau de Recensement des U.S.A., et la Banque Mondiale.

Les chiffres indiqués dans le présent chapitre sont tirés des documents des Nations Unies, du Centre du Programme des Statistiques

internationales, du Bureau de Référence pour la Population et de la Banque Mondiale. Les chiffres ainsi préparés par ces organismes sont fondés sur les statistiques officielles publiées par chaque pays, lesquelles sont ajustées ou augmentées en utilisant des méthodes comme des modèles de population quasi-stable, des tables de mortalité Coale-Demeny et des techniques Brass.

Les Nations Unies envoient chaque année des questionnaires aux gouvernements afin d'obtenir les plus récentes statistiques démographiques disponibles. Les renseignements ainsi reçus sont publiés, à moins que l'analyse par la Division de la Population, Nations Unies, ne révèle d'appréciables inconsistances internes dans les données. Dans ce cas, des ajustements sont effectués en employant des modèles démographiques quasi stables (ONU, 1968). Pour chaque pays et région, l'ONU donne des informations démographiques de base sur la population totale. l'ONU prépare également trois projections d'accroissement démographique possible : "faible", "moyenne" et "élevée", lesquelles sont fonction d'une hypothèse d'augmentation faible, modérée ou rapide de la population. La variante moyenne correspond à celle présentée dans ce chapitre (ONU, 1975).

Le Centre des Programmes de Statistiques Internationales regroupe les renseignements existant pour le moment à propos des taux de vie, du développement économique et social, des activités du planning familial et des programmes de santé publique. Sont également prises en compte les estimations et prévisions préparées par les démographes et statisticiens des organismes nationaux, régionaux, et internationaux.

Les chiffres du Bureau de Référence pour la Population sont basés sur les estimations des gouvernements, de l'ONU et du Centre des Programmes de Statistiques Internationales, bien qu'en vérité ils soient souvent ajustés et diffèrent donc des sources en question. Les taux de croissance ont été calculés en se fondant sur ceux officiellement

admis pour 1972-73 ou 1973-74, ou bien en ayant recours au taux pour les prévisions de population utilisées en 1975 par l'ONU (variante moyenne) pour la période 1970-75.

En reprenant dans ce rapport les estimations des organismes susmentionnés il devient possible de présenter une gamme de statistiques pour les caractéristiques d'une population donnée, plutôt qu'un seul nombre. Cette approche est préférable car, compte tenu des limitations de la base des données, une gamme est vraisemblablement appelée à moins induire en erreur pour les besoins du planning qu'un nombre unique. En outre, il convient de considérer que ces organismes comptent plusieurs années d'expérience dans le travail avec des données démographiques incomplètes et sujettes à caution. Cependant, la mise en oeuvre de ces renseignements impose des contraintes à l'analyse effectuée dans le présent rapport, vu que toutes les sources précitées rendent compte de leurs conclusions au niveau national. Il en résulte donc que pour les états ne se situant pas entièrement dans les limites des régions de Savane du projet il n'est pas possible de séparer les caractéristiques démographiques des individus résidant dans la Savane de celles des gens résidant ailleurs.

7.2.2 Indicateurs démographiques

Pour les fins du présent exposé, on a fait choix des indicateurs démographiques suivants à l'effet d'analyse :

1. taux de natalité
2. taux de mortalité
3. pourcentage de la population au-dessous de l'âge de 15 ans (enfants à charge)
4. vie probable
5. taux de croissance de la population
6. population urbaine
7. densité de la population

Les taux de natalité et de mortalité sont calculés par millier de personnes de la population totale sans distinction d'âge ou de sexe. Ces taux bruts peuvent être utilisés pour calculer l'augmentation naturelle d'une population, soit la différence entre le taux des naissances et celui des décès par millier d'individus de la population. Les taux de croissance de la population sont calculés en ajustant l'augmentation naturelle afin de refléter les effets de la migration.

Dans les pays en voie de développement, les probabilités de vie (c'est-à-dire le nombre moyen d'années de vie des individus nés de sexe masculin et féminin) constituent une utile indication des risques auxquels la santé d'une population est exposée. Dans ces pays en voie de développement, les principales causes de décès sont représentées par les maladies infectueuses, parasitaires, et respiratoires, et par des complications digestives. L'un des aspects intéressant le présent projet est le fait que la plupart des maladies mortelles ou débilitantes survenant en Afrique Occidentale sont d'origine hydrique.

On peut utiliser les estimations des pourcentages des enfants de moins de 15 ans en manière du potentiel du futur accroissement de la population. De plus, comme la plupart des personnes au-dessous de 15 ans ne travaillent pas, ou qu'elles travaillent moins efficacement par rapport à leurs besoins de consommation que les adultes qui travaillent, ces chiffres sont souvent employés pour évaluer, dans chaque pays, le pourcentage de la population économiquement à charge.

Les définitions, du point de vue recensement, des terminologies populations "urbaines" et "rurales" varient grandement parmi les pays. Bien que la majorité des états considère comme "urbaines" les agglomérations qui, en fonction des caractéristiques nationales type, semblent fonctionner à la manière de centres urbains, il n'en demeure pas moins que ce qui peut être classifié comme "urbain" dans un pays peut ne pas être pris comme tel dans un autre. C'est pourquoi les sources de données citées dans le présent chapitre utilisent les différents concepts de population "urbaine" comme l'entend chaque nation concernée.

Par ailleurs, la densité de population, calculée en divisant la population totale d'une région par la superficie totale de cette dernière, ne

constitue qu'une mesure approximative qui ignore le fait que certains secteurs demeurent inhospitaliers et ne favorisent pas le développement d'une population dense. Ceci s'avère tout particulièrement vrai pour une région comme celle de la Savane. Néanmoins, la densité de population se révèle utile pour comparer des régions, surtout si elle est considérée en relation avec la distribution de la population.

7.3 RESULTATS ET CONCLUSIONS

7.3.1 Profil social général de la Savane

Parmi les nombreux groupes ethniques des régions de Savane, les tribus les plus importantes sont représentées par les Haoussas, les Foulbés (Peuls), les Yoroubas et les Voltaïques. Les trois religions prédominantes sont l'animisme, l'islam, et le christianisme. Dans la plus grande partie de la zone du projet le français est la langue officielle, alors qu'en Gambie, au Nigeria, en Sierra Leone et au Ghana c'est la langue anglaise, et en Guinée-Bissau le portugais. La majorité de la population est engagée dans une production de subsistance, essentiellement l'agriculture et le nomadisme pastoral.

Dans une large mesure, la distribution et la densité de la population rurale dans la Savane sont affectées par des facteurs d'environnement comme la présence ou l'absence de parcours adéquats, de sols fertiles, de vecteurs de maladies, et de ressources en eau. Quant aux centres urbains au sein de la Savane, ils se sont développés en raison surtout de considérations politiques et économiques. La Carte 7-1 montre la distribution et la densité de la population de la savane ainsi que les agglomérations urbaines qui y sont rencontrées aujourd'hui.

La plus grande partie de la population est groupée le long de la périphérie de la région de Savane la plus rapprochée de la côte. C'est ainsi que l'on peut distinguer une ceinture côtière comprenant une zone

avec une plus forte densité d'établissements humains : en partant de l'ouest, ce sont les zones côtières du Sénégal et de la Sierra Leone; les parties sud de la Côte-d'Ivoire, du Ghana, du Togo, du Bénin, du Nigeria; et des prolongements dans des parties du Cameroun.

On note avec intérêt dans des secteurs intérieurs et du nord de la Savane l'existence de plusieurs noyaux avec populations plus denses. On citera à titre d'exemple, un secteur dans les environs de Ségou et de Bamako au Mali, un centre près de Ouagadougou en Haute-Volta, et une zone plus vaste dans le nord du Nigeria.

Entre les centres côtiers de population et les noyaux de population du nord, et à l'est de ces secteurs au Tchad et dans l'Empire centrafricaine, il existe une région ayant une population très clairsemée, souvent avec des densités de moins de 10 personnes par kilomètre carré. La présence de cette ceinture non peuplée est due à un certain nombre de facteurs, y compris aux vecteurs de maladies (comme la mouche tsé-tsé et la mouche noire) et l'indisponibilité de sources permanentes d'eau.

Historiquement, les conflits, joints à la coutume visant à capturer les membres d'autres tribus en vue de l'esclavage, ont encouragé la réunion en agglomération des groupes tribaux. Les chefs de tribus ont souvent concentré dans une région les pouvoirs économiques et politiques de leurs empires, royaumes ou souverainetés. Bien que l'ère coloniale ait réduit les conflits tribaux et conduit à une certaine intégration des membres de tribus différentes, il n'en demeure pas moins que des centres de concentration tribale existent encore de nos jours, témoin les Mossis en Haute-Volta, les Yoroubas et les Banis au Nigeria, et les Oualoffs au Sénégal.

Il est clair que dans le cadre des fins de la présente étude, les affiliations ethniques des habitants de la Savane ne sont pas aussi importantes que le genre d'activité économique à laquelle ils se livrent.

A cet égard, on retiendra donc que deux groupes sont essentiellement dominants dans la Savane : les agriculteurs sédentaires et les éleveurs migrateurs.

La plus grande partie de l'agriculture pratiquée dans la Savane demeure traditionnelle et dépend d'un système d'assolement fondé sur les précipitations et les eaux de crue des rivières, normalement désignées en français sous le nom de "décrues". Les agriculteurs sédentaires cultivent surtout le millet et le sorgho dans le nord, les ignames et le manioc dans le sud. Avec la construction des aménagements d'irrigation, une certaine diversification dans ces cultures de base a été introduite, notamment s'agissant du riz et des légumes.

John Caldwell (1975) estime que l'Afrique de l'Ouest compte bien davantage que 2,5 millions d'éleveurs nomades ou migrateurs. Les bovins sont considérés comme les plus importants et les plus précieux des animaux gardés par les nomades, bien que leurs troupeaux comprennent également des moutons, des chèvres, des chameaux et des ânes. Historiquement, les précipitations atmosphériques ont fixé les limites nord du parcours des nomades, tandis que la mouche tsé-tsé a arrêté les limites sud (au sud de 14°N, il y a suffisamment d'humidité pour supporter cet insecte). Bien que l'on ne possède pas énormément de renseignements à propos des caractéristiques des nomades par opposition aux agriculteurs sédentaires, il n'en demeure pas moins que les études entreprises récemment suggèrent certaines différences. Ainsi, Ganon pense qu'il se peut que le taux de natalité soit légèrement plus faible que celui des populations sédentaires (Ganon, 1975). Par ailleurs, Caldwell a présumé que la mortalité parmi les nomades se situait à des niveaux un peu plus élevés que parmi les agriculteurs sédentaires, et nous citons :

"Les seules raisons qui semblent expliquer une mortalité relativement élevée parmi les nomades résultent de la rudesse de l'environnement dans lequel ils vivent, de l'insuffisance de services médicaux ou autres mis à leur disposition, et du palier plus élevé de malnutrition chez leurs enfants, tel que cela est montré par les études hygiéniques (entreprises surtout, on l'admet, pendant la sécheresse)" (Caldwell, 1975).

Traditionnellement, il a existé des relations symbiotiques entre les nomades et les agriculteurs sédentaires. Les nomades ont fourni des produits animaux comme le lait, la viande et les peaux aux agriculteurs, qui à leur tour ont alimenté les nomades en grains et en biens domestiques. En outre, les nomades ont utilisé les terres inaptes à l'exploitation agricole. Récemment, et spécialement suite à la sécheresse, il s'est produit une tension croissante entre les nomades et les agriculteurs. Les droits que les nomades ont exercé historiquement sur les pâturages dans le sud et dans les plaines d'inondation des cours d'eau, sont actuellement contestés par les agriculteurs. Le développement de l'agriculture en irrigué, l'augmentation du nombre d'agriculteurs possédant leurs propres troupeaux, et les pertes en pâturage pendant la sécheresse ont réduit la quantité de pâturages disponibles pour les nomades et ont augmenté le nombre de conflits entre les deux groupes. En conséquence, les efforts visant à mettre en valeur les ressources hydrauliques dans la zone du projet devront prendre en compte tant les besoins des agriculteurs sédentaires que ceux des nomades.

7.3.2 Profil démographique

Le Tableau 7-1 présente des estimations et projections démographiques sélectionnées pour chacun des pays de la Savane. Les données

TABLEAU 7-1 INDICATEURS DEMOGRAPHIQUES SELECTIONNES DES PAYS DE LA SAVANE

PAYS	Pourcentage de la superficie nationale au sein de la savane (Approx.)	Population totale 1975 (1)	Taux de Natalité (2)	Taux de Mortalité (2)	Taux de Croissance(3)	Projection de la population pour l'an 2000(4)	Pourcentage de la population au-dessous de 15 ans	Pourcentage de la population urbaine	Densité de la Population 1975 (par Km2)	Vie Probable
Bénin	100%	3,07 - 3,10	48-54	20,8-29	1,9-3,10	5,92	45	13,0-18,0	27	41-43,5
Gambie	100%	0,509 - 0,516	38-43	20,0-25	1,3-2,10	0,85	41	12,8-14,0	49	40-41,0
Guinée-Bissau	100%	0,522 - 0,525	37-40,8	23,2-25	1,0-1,76	0,84	37	20,0-23,0	15	38-41,0
Togo	100%	2,23 - 2,25	49-56	21,0-25	2,4-3,40	4,64	46	13,5-15,0	40	41-43,5
Haute-Volta	100%	5,96 - 6,03	48-54	24,8-29	1,9-2,60	10,97	43	7,0- 8,3	22	38-39,0
Sénégal	90%	4,38 - 4,42	46-49	20,0-24	2,4-2,60	8,17	43	28,3-30,0	23	40-41,0
Nigeria	90%	62,93 -63,022	48-50	20,0-24	2,4-3,00	134,92	45	16,0-18,1	68	41-43,5
Guinée	90%	4,38 - 4,40	46-51	20,7-24	2,2-2,80	8,46	43	19,5-29,0	18	41-43,5
Ghana	70%	9,87 -10,00	47-51	17,0-22	2,7-3,40	21,16	47	29,0-32,4	41	44-46,0
Cameroun	55%	6,40 - 6,49	40-43	19,0-23	1,8-2,40	11,58	40	20,0-23,8	14	41-43,5
Côte d'Ivoire	55%	4,38 - 6,67	45-52	18,7-25	2,0-3,10	9,62	43	20,0-28,0	13-20	44-46,0
Sierra Leone	55%	2,98 - 3,04	42-45	18,0-21	2,3-2,60	5,72	43	13,0-15,0	42	44-46,0
Mali	45%	5,63 - 5,70	51-55	25,0-28	2,3-3,00	11,25	44	12,0-13,4	5	38-40,0
Empire CentrAfricain	40%	1,70 - 1,80	43-48	20,0-28	1,6-2,60	3,36	42	27,0-35,9	3	41-43,5
Tchad	40%	4,18 - 4,03	44-52	22,8-31	1,4-2,70	6,91	41	12,0-13,9	3	38-40,0
Niger	20%	4,55 - 4,59	49-55	20,0-25	2,4-3,00	9,57	46	8,0- 9,4	4	38-40,0
Mauritanie	10%	1,24 - 1,32	43-47	23,0-27	1,4-2,20	2,28	42	10,0-11,1	1	38-40,0

(1) en millions
(2) par millier d'habitants
(3) pourcentage de la population totale
(4) variante moyenne de l'ONU (1975)

References:

Population Reference Bureau, Inc. World Population Growth and Response 1965 - 1975. Washington, D.C., 1976.

Population Reference Bureau, Inc. Africa and Its Population Growth, Population Reference Bulletin v. 30, no. 1, 1975.

United Nations. Annuaire Demographique. New York, 1975.

United Nations. Population Division ESA. Selected World Demographic Indicators by Countries, 1950 - 2000. New York, 1975.

U.S. Bureau of Census. ISPC Recent Demographic Estimates for the Countries and Regions of the World. Washington, D.C., 1976.

sont puisées des Nations Unies (1975), du Bureau des Programmes de statistiques Internationales du Recensement (1976) et du Bureau de Référence pour la Population (1975, 86).

En ce qui concerne les 17 pays, on estime que le taux moyen de natalité (45-50 par millier d'habitants) correspond en gros au double du taux de décès (20,8 à 25,6). En prenant en compte les changements survenus dans la population par suite de la migration, il en résulte un taux d'accroissement moyen de 1,96 à 2,7 par an. A un pareil taux, qui se place du reste parmi les plus élevés dans le monde, la population totale ferait plus que doubler vers la fin du siècle actuel; ce qui, pour les 17 pays, en porterait le chiffre d'environ 126 millions en 1975 à quelque 256 millions en l'an 2.000. Les perspectives d'un renversement de cette tendance semblent faibles. En effet, avec l'expansion continue des services de santé dans la Savane, on s'attend à ce que les taux de mortalité diminuent dans la Savane, tandis que vraisemblablement ceux des naissances ne manifesteront pas de réduction. A ce propos, l'examen des programmes en cours ou prévus pour le planning familial révèle que de sérieux obstacles continuent de s'opposer au contrôle de la natalité :

> "La culture africaine se caractérise par son aspect fortement nataliste ... Au séminaire de 1973 sur la politique démographique à Nairobi, on a conclu que "la fécondité est hautement considérée dans certaines sociétés africaines ... La fécondité a une grande valeur pour la femme mariée ..." Dans ce contexte culturel, de nombreuses femmes dans les campagnes se préoccupent bien davantage d'une insuffisance plutôt que d'un excès de fécondité." (Bureau de Référence pour la Population, 1975)

Compte tenu de la résistance de leurs citoyens vis-à-vis de l'application du planning familial, la plupart des gouvernements de la

Savane n'accordent pas de haute priorité aux programmes démographiques. L'amélioration des soins hygiéniques, l'instruction, l'augmentation de l'emploi sont considérés plus importants.

Une moyenne d'environ 45 % de la population est âgée de moins de 15 ans. Ce dernier chiffre est souvent utilisé dans les pays industrialisés pour calculer l'indice dit du "poids de la charge" où BD exprime le rapport entre le nombre de personnes à charge et le nombre de personnes productives, soit

$$BD = \frac{\text{partie de la population de moins de 15 ans et de plus de 60 ans}}{\text{partie de la population entre 15 et 60 ans}}$$

cependant, de nombreux analystes suggèrent que dans une économie de subsistance, comme celle rencontrée dans la Savane, les enfants ne constituent pas un fardeau.

> "Economiquement et socialement, l'enfant ... ne représente qu'une faible dépense, du reste rapidement amortie. Mieux, il représente une bonne affaire : mal nourri et pauvrement vêtu, peu ou pas du tout instruit, il se livre très tôt aux travaux productifs liés aux biens et aux services." (Afana, 1966).

D'un autre côté, Etienne Van de Walle suggère que :

> "Compte tenu des études budgétaires et des enquêtes agricoles, il n'y a pas de preuve concluante de la contribution économique des enfants ... bien qu'il soit pleinement avéré que les enfants participent activement dans les travaux des champs et les travaux domestiques. S'il est vrai qu'ils acquièrent de l'efficacité entre l'âge de 6 et 15 ans, par contre il est difficile de préciser l'âge où ils produisent davantage qu'ils ne consomment." (Van de Walle, 1975).

Malgré les apparentes contradictions dans les données, Van de Walle conclut qu'une réduction dans la fécondité entrainerait

immédiatement une diminution du fardeau de la charge, ce qui alors réduirait l'investissement nécessaire à l'emploi de la main-d'oeuvre ainsi qu'à sa dotation en matériel.

La grande majorité de la population des régions de Savane vit dans les campagnes; seulement 16,5 à 19,9 % en moyenne sont considérés comme des citadins. Cependant, on a enregistré une dramatique augmentation dans l'urbanisation au cours des récentes années. Le nombre d'individus vivant dans les communautés urbaines a à peu près doublé depuis 1950, époque où on estimait que seulement 9,6 % de la population étaient établis dans les centres urbains. Il est généralement admis du point de vue démographique que la fécondité urbaine se situe à un taux moins élevé que celui dans les campagnes. On serait donc amené à conclure en fonction de ce postulat qu'un accroissement d'urbanisation devrait diminuer les taux de natalité. Cependant, il n'en est pas ainsi pour l'Afrique Occidentale où trois caractéristiques distinctes ont été observées à propos de l'urbanisation et de la fécondité. En effet, Cohen a constaté qu'au Congo, au Gabon, et dans une moindre mesure, en Haute-Volta, la fécondité urbaine dépassait celle dans les campagnes; au Tchad et au Sénégal les taux de chacune des deux fécondités étaient à peu près comparables; au Mali, en Guinée et au Togo les taux de natalité urbaine étaient moindres que ceux dans les campagnes (Cohen, 1976). En conséquence, l'évaluation de l'impact de l'accroissement de l'urbanisation sur la natalité devrait être entreprise au moyen d'une étude séparée pour chaque pays de la Savane.

7.3.3 Migration

Peut-être que le facteur le moins compris, et l'un des plus importants affectant la distribution de la population est la migration. Une grande partie de la population de la Savane participe aux migrations saisonnières ou permanentes. Trois types de migration dans la Savane sont

représentés sur la Carte 7-7. L'une de ces migrations correspond à la transhumance pastorale qui consiste dans le mouvement saisonnier des éleveurs nomades changeant de pâturages pour leurs troupeaux.

Quant à la seconde de ces migrations, la migration de la main-d'oeuvre, elle comprend les jeunes gens qui laissent des zones davantage traditionnelles pour rechercher des emplois dans les mines, les centres commerciaux, agricoles et urbains de la côte. La majorité de ces jeunes gens maintient ses liens avec les lieux traditionnels d'origine. Les routes typiques de la migration vont du nord au sud et de l'intérieur vers les zones côtières. Ces mouvements comprennent notamment ceux de la Mauritanie au Mali et au Sénégal; du Mali au Sénégal et à la Côte-d'Ivoire; du Niger au Nigeria; de la Haute-Volta au Ghana et à la Côte-d'Ivoire. Bien que dans une large mesure la migration soit saisonnière ou temporaire, il y a néanmoins un courant évident de population se dirigeant du nord vers le sud.

Le troisième type de migration est religieux. En effet, le mouvement des pélerins musulmans a toujours été important en Afrique Occidentale. On a estimé que les pélerinages impliquent des dizaines de milliers de gens chaque année (Mabogunje, 1975). Bien que l'on admette que ces pélerinages ne modifient pas les caractéristiques démographiques, il n'en demeure pas moins que la durée de temps exigée en l'occurrence et conséquemment la réduction de main-d'oeuvre, ne devraient pas être négligées.

Par ailleurs, il existe plusieurs autres types de migration au sein de la Savane. Au nombre de ces migrations, on citera celles très importantes, mais difficiles à retracer en raison de leur irrégularité, dues aux conditions de l'environnement. Essentiellement, les agriculteurs se déplacent à la recherche des terres arables (Lobi de la Côte-d'Ivoire), tandis que les éleveurs nomades vont en quête de pâturages et d'eau, également

pour éviter les vecteurs de maladie comme la mouche tsé-tsé. Récemment, des conflits politiques ont augmenté le nombre de migrateurs en créant des réfugiés politiques.

Quoique l'on possède très peu de renseignements à propos de la fréquence et de la durée des migrations, on a estimé que près de 80 pour cent des migrateurs restent à leur point de destination pendant moins d'une année. Il semble que l'occupation à laquelle se livrent les migrateurs constitue un déterminant de leur destination ainsi que de la longueur de leur séjour. Des groupes commerçants comme les Fulani, les Haoussas, les Yoroubas et les Zermas ont tendance à se rendre dans des centres urbains où ils séjournent moins de six mois. Par contre, les ouvriers agricoles comme les Senoufos et les Kotakis se déplacent vers les zones rurales et ils y restent pendant plus d'un an (Mabogunje, 1975). Quant aux jeunes gens qui partent pour les villes ou pour l'Europe à la recherche de travail, leur séjour dure généralement plus d'une année (Caldwell, 1975).

En conséquence de la sécheresse, le mouvement des habitants da la Savane s'est intensifié pour des raisons d'environnement et d'ordre économique. Des villes comme Bamaco et Mopti au Mali, Ouagadougou en Haute-Volta, Zinder et Niamey au Niger, Kano au Nigeria et N'Djamena au Tchad, ont enregistré un considérable accroissement de population. Les pressions créées par les fortes arrivées de migrateurs ont conduit à des chocs, tels ceux survenus entre migrateurs et résidents dans l'est du Tchad. (Caldwell, 1975).

7.4 CONCLUSIONS

Les populations de la Savane sont essentiellement rurales. Plus de la moitié des régions de Savane comporte des densités de seulement 2 à 10 habitants par kilomètre carré et environ 20 à 25 % de la superficie ont 10 à 90 habitants par kilomètre carré (voir Carte 7-1). En général, les

centres de population les plus importants en Afrique Occidentale sont situés en dehors de la Savane, le long de la côte sud, surtout au Nigeria. Fait toutefois exception ici, le centre urbain qui a été développé autour de Ouagadougou, en Haute-Volta (voir Carte 7-2). Outre le fait que les densités démographiques sont faibles, de sérieux problèmes de population existent dans la Savane. En effet, la capacité utile de la terre, dans l'ensemble, s'avère faible alors que l'on s'attend à un très fort accroissement de population.

Les taux élevés de natalité et de mortalité des populations de la Savane posent de sérieux problèmes aux planificateurs des ressources. Les efforts visant à réduire les taux des décès, au moyen des programmes améliorés de soins médicaux et au moyen de la croissance socio-économique, ont connu davantage de succès que les démarches tendant à diminuer le taux de naissance par l'entremise du planning familial. Il en résulte que le taux moyen annuel de croissance démographique en Afrique de l'Ouest va en augmentant. La Division de la Population, des Nations Unies, (1975) estime que le taux annuel de croissance est passé de 2,37 pour cent en 1965 à 2,75 pour cent en 1975, et elle prévoit un taux de 2,92 pour cent pour 1995. Par ailleurs, on pense qu'en Afrique Centrale des pays comme le Tchad, le Cameroun et l'Empire centrafricain montrent eux aussi un taux grandissant de croissance. En 1965, on estimait à 1,96 le taux moyen de croissance pour ces trois pays; en 1975, il se situait à 2,15, et on prévoit qu'il atteindra 2,44 vers 1995 (Nations Unies, Division de la Population, 1975). Les attitudes et les efforts visant à contenir la croissance démographique vont des programmes du contrôle des naissances du Ghana, entrepris par le gouvernement du pays avec l'assistance internationale, aux points de vues favorables à la natalité et en honneur dans des pays comme la Mauritanie, le Cameroun, et l'Empire centrafricain (AID, 1975).

Il est évident que l'accroissement prévu dans la population annuelle résultera en de plus fortes pressions démographiques sur la terre. Du reste, déjà commence à se manifester sur la Savane la pression de l'excès de population. Selon Hance (1970) dans "Population, migration et urbanisation en Afrique", les indicateurs de cette pression regroupent :

1. La détérioration du sol, sa dégradation, ou sa complète destruction,
2. L'utilisation de terres marginales,
3. Le déclin des rendements agricoles,
4. Des changements dans les caractéristiques des cultures, surtout l'adoption de cultures tolérant des conditions de sol défavorables,
5. Le raccourcissement de la période de mise en jachère et l'allongement de la période de culture, sans prendre de dispositions afin de conserver la fertilité du sol,
6. L'altération du système local d'exploitation de la terre,
7. Des disettes, la faim, et la malnutrition,
8. Le morcellement de la terre, les litiges terriens, le manque de terre,
9. Les dettes rurales.

Tous ces problèmes sont déjà évidents dans les régions de la Savane, et on peut s'attendre à ce qu'ils s'intensifient avec l'accroissement démographique prévu, sauf évidemment si des dispositions sont prises afin d'augmenter la capacité utile de la terre.

Bien que l'on ne connaisse pas encore les implications démographiques à long terme des redistribitions de population survenues pendant et après la sécheresse, il y a quand même un enseignement évident à tirer de cette dernière : la réduction dans la capacité utile de la terre conduit à une pression accrue de la population sur cette terre, ce qui

alors résulte dans l'épuisement du sol, la surcharge des pâturages en bétail, la malnutrition et, dans certains cas, la violence. Avec des projections de taux de croissance allant de 1,96 à 2,7, la Savane aura à faire face à des pressions démographiques qui risquent d'excéder celles enregistrées durant la sécheresse. S'il en était ainsi, la sécheresse aura été un signe présageant les crises à venir.

Au fur et à mesure de la formulation de programmes pour la mise en valeur des ressources hydrauliques et pour d'autres types de développement dans la Savane, il faudra entreprendre des analyses plus pousées des caractéristiques démographiques des agglomérations spécifiquement concernées. On disposera bientôt des conclusions des recherches menées actuellement par les pays d'Afrique Occidentale et les institutions internationales mentionnées dans le présent rapport, conclusions qui devraient faciliter la conduite à bonne fin des analyses susvisées. Il est évident que le succès de tout programme restera subordonné pour une large part à la bonne compréhension et à la convenable prise en compte des caractéristiques et de l'accroissement de la population.

REFERENCES

I. LIVRES, PERIODIQUES, CARTES, RAPPORTS ET ETUDES

Indiqués par ordre alphabétique

BOOKS, PERIODICALS, MAPS, REPORTS AND STUDIES

Listed alphabetically

Abadie, J. et al (1969) Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes aquifères en Mauritanie et au Sénégal. Note de synthèse. Rapport BRGM. Paris, C.I.E.H.

Académie des Sciences d'Outre-Mer (1975) La sécheresse en zone sahélienne. Causes - conséquences - études des mesures à prendre. Paris, La Documentation Française. Notes et études documentaires, n. 4216-4217.

Adjanohoun, E. (1964) Végétation des savanes et des rochers découverts en Côte d'Ivoire Centrale. Paris, ORSTROM.

Afana, D. (1966) "L'économie de l'Ouest-Africain," Economie et Socialisme, vol. 4.

ASECNA-Haute-Volta. Service Météorologique (1966) Aperçus sur le climat de la Haute-Volta, 2nd éd. Ouagadougou.

Agency for International Development (1975) Development Assistance Program, 1976-1980, Central-West African region. Washington, D.C.

Ahn, P.M. (1968) "The effects of large-scale mechanized agriculture on the physical properties of West African soils," Ghana Journal of Agricultural Sciences, 1, 1. 35-40.

Ahn, P.M. (1958) "Regrowth and swamp vegetation in the western forest areas of Ghana," Journal of the West African Science Association, 4, p. 163-73.

Ahn, P.M. (1974) "Some observations on basic and applied research in shifting cultivation," FAO Soils Bulletin, 23, p. 123-54.

Ahn, P.M. (1970) West African Soils. London, Oxford University Press.

Aicard, P. (1957) "Carte géologique à 1/5.000.000 " dans: Les terrains précambriens du Togo et leur extension vers le Nord-Est. Dakar, A.O.F. Bulletin du Service de la Géologie et de la Prospection Minière, no. 23.

Akiti, T.T. (1977) Groundwater from the Keta-Anlo artesian basin. Accra, Water Resources Research Unit, C.S.I.R.

Allan, W. (1965) The African husbandman. Edinburgh and London, Oliver and Boyd.

Ambroggi, R. and L. Lisoni (1975) Pour une politique de l'eau au Togo. U.N.D.P.

American Geological Institute (1972) Glossary of geology and related sciences. Washington, D.C.

American Society of Civil Engineers (1972) Ground water management. Rev. ed. New York.

American Water Works Association (1973) Groundwater.

Amuzu, A.T. (1974) A study of the drinking water quality of boreholes in the rural areas of Ghana. Accra, Water Resources Research Unit, C.S.I.R.

Anderson, H.R. and W. Ogilbee (1973) Aquifers in the Sokoto basin, northwestern Nigeria, with a description of the general hydrogeology of the region. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1757-L.) Washington, D.C., G.P.O.

Angladette, A. and L. Deschamps (1974) Problèmes et perspectives de l'agriculture dans les pays tropicaux. Paris, Maisonneuve et Larose.

Archambault, J. (1960) Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale. Nancy, Archives C.I.E.H.

Archambault, J. (1953) Les eaux souterraines de la boucle du Niger (Soudan Français). Rapport BURGEAP. Dakar, A.O.F. Service Hydraulique

Archambault, J. (1955) Etude des diverses nappes de Mauritanie. Dakar, A.O.F. Service Hydraulique.

Archambault, J. (1954) Quelques aspects de l'hydrogéologie de la Haute-Volta. Rapport BURGEAP Dakar, A.O.F. Service Hydraulique.

Arad, A and U. Kafri (1975) "Geochemistry of groundwater in the Chad Basin," Journal of Hydrology, 25, 1-2, p. 105-27.

ASGA-UNESCO (1967) Fond géologique de base de l'Afrique, 1/20.000.000. Paris.

ASGA-UNESCO (1968) Carte tectonique internationale de l'Afrique, 1/5.000.000 feuilles 1,2,4,5,7. Paris.

Asseez, L.O. (1973) Groundwater resources of Nigeria. Ile-Ife, University of Ife, Department of Geography.

Associated Consulting Engineers (ACE) Ltd. (1975) Ground water investigations. Kano, Kano State, Ministry of Agriculture and Natural Resources.

Astle, W.L. et al (1969) "Land classification for management planning in the Lunagwa Valley of Zambia," Applied Ecology, 6, p. 143-69.

Aubert, G. (1965) "Classification des sols utilisée par la section de Pédologie de l'ORSTROM," Cahiers ORSTROM-série Pédologie, 3,p.269-88.

Aubreville, A. (1949) Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Paris, Société d'Editions Géographiques, Maritimes, et Coloniales.

Audibert, M. (1962) Hydrogéologie de la nappe maestrichtienne du Sénégal. Rapport BRGM. Dakar, Ministère des Travaux Publics, de l'Habitat et de l'Urbanisme.

Ayaode, J.O. (1975) "Water resources and their development in Nigeria," Hydrological Sciences Bulletin, 20,4, p.581-91.

Ayers, R.S. (1977) "Quality of water for irrigation," Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 103, IR2, p. 135-54

Ayibotele, N.B. (1976) Methodology for and status of assessment of surface and groundwater resources in Ghana. (Report presented at the Regional African Meeting, Addis Ababa, 20-25 September 1976 in preparation for the United Nations Conference on Water.) Accra.

Bannerman, R.R. (1973) "Problems associated with development of groundwater in igneous and metamorphic rocks; a case study in Ghana," Ground water, 11, 5, p.31-34.

Bannerman, R.R. (1975) "The role of groundwater in rural supplies in Ghana," Hydrological Sciences-Bulletin des Sciences Hydrologiques, 20, 2, p. 191-201.

Barber, W. (1965) Pressure water in the Chad formation of Bornu and Dikwa emirates North-Eastern Nigeria. (Geological Survey of Nigeria, Bulletin no. 35.)

Barnes, A.C. (1974) The sugarcane. 2nd ed. Aylesbury, Hill.

Barraud, J.P. (1960) Reconnaissances hydrogéologiques en arènes granitiques par sondages électriques en moyenne Côte d'Ivoire. Paris, C.I.E.H.

Baud, L. (1942) Notes hydrogéologiques sur le Sénégal et la Mauritanie. Dakar, A.O.F., Service des Mines.

Beadle, L.C. (1974) The inland waters of tropical Africa. London, Longman.

Beard, B. and H. Brammer (1956) Provisional grassland association of the interior and coastal zones of the Gold Coast. Kumasi.

Beard, J.S. (1963) Savanna. Paper delivered at the Congress of Nairobi.

Bechtel Overseas Corporation (1976) Development of irrigated agriculture (from groundwater) at Matam, Senegal. Washington, D.C., U.S.A.I.D.

Beinroth, F.H. (1975) "Relations between U.S. soil taxonomy, the Brazilian soil classification system and the FAO/UNESCO soil units," Dans: Bornemisza, E. and A. Alvarado, eds., Soil management in tropical America, Raleigh, Soil Science Dept., North Carolina State University.

Benamour, A (1977) Les moyens d'exhaure en milieu rural. Ouagadougou, CIEH.

Benin. Commission Interministérielle de l'Eau (1976) Le problème de l'eau. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Cotonou.

Berg, E. (1975) The recent economic evolution of the Sahel. University of Michigan.

Beyrard (Norbert) France (1974) Programme intégré de développement du bassin du Sénégal. 11 vols. Paris.

Billon, B. et al. (1974) Le bassin du fleuve Chari. (Monographies Hydrologiques ORSTOM, n. 2.) Paris, ORSTOM.

Billon, B. et al. (1966) Monographie hydrologique du Logone. 8 vols. Paris, ORSTOM. Service Hydrologique.

Birch, H.F. (1958) "The effect of soils drying on humus decomposition and nitrogen availability," Plant & Soil, 10, p.9-31.

Birch, H.F. (1959) "Further observations on humus decomposition and nitrification," Plant & Soil, 11, p. 262-92.

Birch, H.F. (1960) "Nitrification in soils after different periods of dryness," Plant & Soil, 12, p.81-96.

Biscaldi, R. Carte hydrogéologique des terrains éruptifs et métamorphiques d'Afrique Occidentale, 1/2.000.000. Paris, Ouagadougou. BRGM, CIEH.

Biscaldi, R. (1969) Etude hydrogéologique de la nappe du Logone - Chari-Tchad; rapport de fin de mission. Yaoundé, B.R.G.M.

Biscaldi, R. (1967) Etude statistique des forages et carte hydrogéologique des régions à substratum éruptif et métamorphique en Afrique Occidentale. Paris, BRGM, SEMA, CIEH.

Bize, J. (1966) Application d'observations géomorphologiques et hydrodynamiques à la prospection des nappes des terrains d'altération en Côte d'Ivoire et en Haute-Volta, Rapport BURGEAP R 413. Paris, C.I.E.H.

Blanchot, A. et al (1957) L'eau dans l'Ouest Mauritanien et le bas Sénégal. Dakar, A.O.F., Service Géologique et Prospection Minière.

Blot, A. (1970) Les nappes phréatiques au Sénégal Oriental; données géochimiques sur les eaux. Dakar, ORSTOM.

Bornemisza, E. and A.Alvarado, eds. (1975) Soil management in tropical America; proceedings of a seminar held at CIAT, Cali, Columbia, February 1974. Raleigh, Soil Science Department, North Carolina State University.

Bouchardeau, A. (1958) "Le Lac Tchad," Annuaire Hydrologique de la France d'Outre-Mer, p. 9-26. Paris, ORSTOM.

Bouchardeau, A. and R. Lefèvre (1957) Monographie du Lac Tchad. Edition provisoire, Paris, ORSTOM.

Bouchardeau, A. et al (1966) Les stations hydrologiques du Togo: description, caractéristiques annuelles, hauteurs et débits classés(mise à jour 1965). Lomé, ORSTOM.

Boul, S.W. et al (1975) "Soil fertility capability classification," in Bornemisza, E. and A. Alvarado, eds., Soil management in tropical America. Raleigh, Soil Science Department, North Carolina State University.

Boulet, R. et al (1969) Etude pédologique de la Haute-Volta, rapport général de synthèse. Ouagadougou, ORSTOM.

Boulet, R. (1968) Etude pédologique de la Haute-Volta, région Centre-Nord. Ouagadougou, ORSTOM.

Boulet, R. and C. Leprun (1969) Etude pédologique de la Haute-Volta, région Est. Ouagadougou, ORSTOM.

Boulet, R. and R. Moreau (1968) Etude pédologique de la Haute-Volta, région Ouest-Nord. Ouagadougou, ORSTOM.

Boulet, R. (1976) Notice des cartes de ressources en sols de la Haute-Volta. Ouagadougou, ORSTOM.

Bourguet, L. and V. Riou (1976) Développement de l'élevage dans le Sud-Est Mauritanien. Etude hydrogéologique et implantation de puits nouveaux. Nouakchott, Ministère de l'Equipement.

Bourguet, L. (1963) Synthèse hydrogéologique et aménagement hydraulique du Sud-Est Mauritanien. Nouakchott, Ministère du Plan.

Boyer, M.J. (1974) "Interpretive land classification in French-speaking countries," FAO Soils Bulletin, 22, p. 26-34.

Brass, W. et al (1968) The demography of tropical Africa. Princeton, New Jersey, University of Princeton.

Brinkman, R. and A.J. Smythe, eds. (1972) Land evaluation for rural purposes. Wageningen, ILRI.

Brunet-Moret, Y. (1968) Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. Paris/Ouagadougou, ORSTOM/CIEH.

Buchanam, K. (19) "The Northern Region of Nigeria: the geographical background of its political duality," Geographical Review, 43, p. 451-73.

Budowski, G. (1956) "Tropical savannas, a sequence of forest felling and repeated burnings," Turrialba, 6, 1-2.

BURGEAP (1974) La construction des puits en Afrique tropicale et "l'investissement humain." Paris, Ministère de la Coopération.

BURGEAP (1971) Etude comparative des avantages des puits et des forages d'eau dans les régions à substratum cristallin de l'Afrique de l'Ouest. Ouagadougou, CIEH.

BRGM (1976) Carte de planification des ressources en eau souterraine des états membres du C.I.E.H. de l'Afrique soudano-sahélienne. Ouagadougou, CIEH.

BRGM (1960) Carte géologique de l'Afrique Occidentale (Côte d'Ivoire, Dahomey, Guinée, Haute-Volta, Mali, Mauritanie, Niger, Sénégal, Togo) 1/2.000.000, 9 feuilles. Paris, BRGM.

BRGM (1960) Carte géologique du Dahomey. Paris, BRGM.

BRGM (1969) Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'ouest (14 fascicules). Paris, CIEH.

BRGM (1975) Notices explicatives et cartes de planification pour l'exploitation des eaux souterraines de l'Afrique Sahélienne; productivité des nappes, coût moyen de captage et d'exploitation de l'eau souterraine, aptitude des eaux à l'irrigation. Paris, Fonds d'Aide et de Coopération de la République Française.

Caldwell, J. et al (eds.) (1973) Croissance démographique et évolution socioéconomique en Afrique de l'Ouest. New York, The Population Council.

Caldwell, J. and C. Okonjo (eds.) (1968) Conference 1966; The population of tropical Africa, papers of the Africa Population. New York, Columbia University Press.

Caldwell, J. (1975) "The Sahelian drought and its demographic implications," Overseas Liaison Committee Paper, 8.

Cameroun. Direction de l'Energie et de l'Eau. (1976) Monographie nationale de l'eau. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Yaoundé.

Cameroun. Service des Mines (1953-1959) Carte géologique de reconnaissance du Cameroun - 1/500.000. Yaoundé.

Carmouze, J.P. (1971) "Circulation générale des eaux dans le lac Tchad," Cahiers ORSTOM, série Hydrobiologie, 5,3/4, p.191-212.

Carmouze, J.P. et al (1972) "Contribution à la connaissance du bassin Tchadien. Sommaire: Grandes zones écologiques du lac Tchad," Cahiers ORSTOM, série Hydrobiologie, o, 2, p. 103-69.

Carmouze, J.P. "Hydrologie et Hydrochimie du Lac Tchad," Cahiers ORSTOM ser Hydrobiol. Vol.X no. 1, 1976. A useful paper containing new data complementary to Arad and Kafri's paper - see above.

Carré, P. (1973) Le Goulbi de Maradi et le lac de Madarounfa, Données hydrologiques de base. Paris/Niamey, ORSTOM.

Carré, P. (1972) "Quelques aspects du régime des apports fluviatiles de matériaux solides en suspension vers le lac Tchad," Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, 9, 1, p. 19-46.

Carroll, D.M. and K. Klinkenberg (1972) The land resources of Nigeria: vol. 1, The environment. Tolworth, England, Land Resources Division.

Castany, G. (1964) Etudes des ressources minières et en eaux souterraines du Togo; rapport de mission. United Nations Special Fund.

Chaperon, P. and N. Guiguen (1974) Etude hydrologique du bassin continental du fleuve Gambie; rapport terminal. 2 vols. Dakar, ORSTOM. Service Hydrologique.

Charter, C.F. (1957) Suggestions for a classification of tropical soils. (Miscellaneous Paper 4.) Kumasi, Ghana Soil & Land Use Survey.

Chouret, A. (1975) Etude des transports solides en suspension au Tchad, campagnes 1972-73, 1973-74, 1974-75, bilan de 7 années d'observations (1968-1974). N'Djaména, ORSTOM.

Chouret, A. (in preparation) Etude hydrogéologique de la nappe phréatique du Lac Tchad. ORSTOM.

Chow, Ven Te, ed. (1964) Handbook of applied hydrology, a compendium of water resources technology. New York, McGraw-Hill.

Christiansen, J. et al (1977) "Irrigation water quality evaluation," Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 103, IR2, p. 155-69.

Church, R.J.H. (1957) West Africa, a study of the environment and of man's use of it. London, Longmans.

Cochemé, J. and P. Franquin (1967) An agroclimatology survey of a semiarid area in Africa south of the Sahara. Technical Note no. 86 Geneva, WMO.

Cohen, J. (1967) "Fécondité: facteurs," INSEE, Afrique Noire, Madorgescat, Comores, Démographie Comparée, v.26, Paris

Collins, J.B. (1975) Classification of soils of sub-humid and semi-arid savannas according to the U.S. soil taxonomy. Paper delivered at the I.S.S.S. Commissions I, IV, V, and VI Meeting on Savannah soils of Africa and their management, Tema, Ghana, Nov. 24-26, 1975.

Colombani, J. (1967) Note sur les mesures de transport solide en solution et de qualité des eaux affectées au Togo de 1965 à 1967. Lomé, ORSTOM.

Dassibat, C. (1967) Etude hydrogéologique des Monts Mandaras; rapport de fin de mission FED. Yaoundé, B.R.G.M.

Davies, H.R.J. (1973) Tropical Africa, an atlas for rural development. Cardiff, University of Wales Press.

Davis, J.D. and R.J.M. DeWiest (1966) Hydrogeology. New York, Wiley.

Degallier, R. (1962) Possibilités de la nappe maestrichtienne du Sénégal. Rapport BRGM. Dakar, Ministère des Travaux Publics, de l'Habitat et de l'Urbanisme.

Delany, F. (1965) Hydrogéologie des régions à substratum schisteux du Ghana, du Nigéria et de Côte d'Ivoire et programme de travaux. Dakar, BRGM.

Delany, F. (1965) Hydrogéologie des régions à substratum schisteux du Ghana, du Nigéria et de Côte d'Ivoire et programme de travaux en Côte d'Ivoire. Dakar, BRGM.

Depagne, J. and H. Moussu (1967) Notice explicative et carte hydrogéologique à 1/500.000 et hydrochimique à 1/1,000.000 du Sénégal. Dakar, B.R.G.M./Direction de l'Energie et de l'Hydraulique.

Des Bouvrie, C. (1975) Planning water resources development in Africa south of the Sahara (Towards a water development strategy in rural areas)/ Planification du développement de petits aménagements hydro-agricoles en Afrique au sud du Sahara (vers une stratégie de l'eau au milieu rural). Paper presented at the FAO /DANIDA Seminar on Small Scale Water Resources Development in West Africa, Ouagadougou, Upper Volta, 29 September - 6 October, 1975.

Development and Resources Corporation et BNETD (1976) Etude d'aménagement intégré des bassins versants de la région Nord; Volume: eaux souterraines. Abidjan, Ministère du Plan.

DeWiest, R.J.M. (1965) Geohydrology. New York. Wiley.

D'Hoore, J. (1964) Soil map of Africa, scale 1 to 5.000.000. Explanatory monograph. Lagos, CCTA.

Direction des Mines et de la Géologie de l'Afrique Equatoriale Française. Carte géologique de reconnaissance de l'Afrique Equatoriale, 1/500.000, 8 feuilles avec notices explicatives.

Direction des Mines et de la Géologie de l'Afrique Equatoriale Française (1958) Carte géologique de l'Afrique Equatoriale Française, 1/2.000.000, avec notice explicative par G. Gérard (1958).

Eagleman, J. R. (1971) "An experimentally derived model for actual evapotranspiration," Agric. Meteorol., 8(4 - 5) p. 385-394.

Elouard, P. and L. Renaud (1953) L'eau dans le Sud-Ouest Mauritanien. Dakar, A.O.F. Direction des Mines et de la Géologie.

Elouard, P. (1976) "Problèmes d'eau et sous-sol de Mauritanie," dans: La désertification au sud du Sahara: Colloque de Nouakchott, 17-19 décembre 1973, Dakar, Nouvelles Editions Africaines.

Enwezor, W.O. (1967) "Soil drying and organic matter decomposition," Plant and Soil, 26, p. 269-76.

Eyre, S.R. (1968) Vegetation and soils, a world picture. London, Edward Arnold.

FAO (1966) Agricultural development in Nigeria, 1965-80. Rome.

FAO (1974) "Approaches to land classification," FAO Soils Bulletin, 22.

FAO (1973b) Contrôle de l'onchocercose dans la région du bassin de la Volta. (Y compris: Atlas; Annexe I-1: Géographie physique, humaine et économique de la région du bassin de la Volta.) Geneva, FAO.

FAO (1970) Développement de l'utilisation des eaux souterraines: Dahomey. Rapport intérimaire. Rome.

FAO (1971) Développement de l'utilisation des eaux souterraines: Dahomey. Rapport sur les résultats, conclusions et recommandations du projet. Rome.

FAO (1971) Développement de l'utilisation des eaux souterraines: Dahomey-hydrogéologie. Rapport technique 1. Rome.

FAO (1973) Etude des ressources en eau du bassin du Lac Tchad en vue d'un programme de développement, Commission du bassin du Lac Tchad. Cameroun, Niger, Nigeria, Tchad. Ressources en eaux souterraines dans le bassin du Lac Tchad. (2 vols.). Rome, PNUD/FAO. Disponible aussi en anglais sous le titre: Survey of the water resources of the Chad Basin for development purposes. Groundwater resources in the Lake Chad Basin.

FAO (1973a) A framework for land evaluation, draft edition. Rome.

FAO (1975b) "Land evaluation in Europe, report on the technical consultation Nitra Czechoslovakia, September 1975," FAO Soils Bulletin, 29.

FAO (1975a) "Report on the adhoc expert consultation on land evaluation, Rome, 6-8 January 1975," World Soil Resources Report, 45.

FAO (1969) Soils and water resources survey of the Sokoto Valley, Nigeria. Final.

Flohn, H. (1971) Etude des conditions climatiques de l'avance du Sahara Tunisien/Investigations of the climatic conditions of the advancement of the Tunisian Sahara. Technical Note no. 116, Geneva, WMO.

Forbes, T.R. (1973) Ferralitic and ferruginous tropical soils of West Africa. Ithaca, Cornell University, Agronomy mimeo 73-20.

Fournier, F. (1960) Climat et érosion: la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques (PARIS).

France. Ministère de la Coopération, Direction des Programmes. Sous-Direction des Etudes Economiques et de la Planification (1976). Cartographie des pays du Sahel. Paris.

France. Ministère de la Coopération et SCET International (1976) Etude préliminaire sur le bilan des ressources en eau des pays sahéliens de l'Afrique de l'ouest et sur leurs possibilités d'utilisation. (2 vols.). Paris.

Franquin, P. (1976) La caractérisation fréquentielle du milieu agro-écoclimatique. Paris, Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique.

Franquin, P. Forest, F. (1977) "Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique, " L'Agronomie Tropicale vol. 32, 1, 1977.

Frink, D.W. and R.D. Fannon, Jr. (1967) Final report on the development of a water pump for underdeveloped countries. Columbus, Batelle Memorial Institute.

WAKUTI, Karl Erich Gall K.G., Ingénieurs-Conseils. (1968) Etudes hydrogéologiques au Nord Cameroun. Siegen, West Germany.

Gallais, J. (1967) Le delta intérieur du Niger et ses bordures. Paris, CNRS. Centre de Recherches et Documentation Cartographiques et Géographiques. Mémoires et Documents, v.3.

Gambia (1976) Country report. (Report presented at the Regional African Meeting, Addis Ababa, 20-25 September 1976 in preparation for the United Nations Conference on Water.) Banjul.

Ganon, M.F. (1973) "Nomades du Niger," in: Caldwell, J. et al (eds.) (1973) Croissance démographique et évolution socioéconomique en Afrique de l'Ouest, New York, The Population Council.

GEOHYDRAULIQUE. Méthode de recherche des eaux souterraines dans les terrains cristallins d'Afrique occidentale. Ouagadougou, CIEH. (en cours d'édition).

GERES (Groupement Européen de Restauration des Sols) (1965) Périmètre de restauration des sols de Ouahigouya. Ouagadougou, GERES/Haute-Volta, Direction des Eaux et Forêts et de la Conservation des Sols.

Ghana. Survey Department (1969) Portfolio of Ghana maps. Accra, Survey of Ghana.

Gill, H.E. (1969) A groundwater reconnaissance of the Republic of Ghana, with a description of geohydrologic provinces. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1757-K.) Washington, D.C., G.P.O.

Giri, J. (1976) An analysis and synthesis of long-term development strategies for the Sahel. Paris, OECD.

Gleave, M.B. and H.P. White (1969) "The West African middle belt, environmental fact or geographer's fiction?," Geographical Review, 59, 1, p. 123-39.

Goulissachvili, V.Z. (1963) Les savanes des pays tropicaux et subtropicaux. Paper delivered at the Congress of Nairobi.

Gravost, M. (1965) Rapport de synthèse: mission hydrogéologique Togo (avril-novembre 1965). Rapport BRGM, Abidjan, B.R.G.M.

Greigert, G. (1968) Les eaux souterraines de la République du Niger, rapport BRGM. Niamey, Ministère des Travaux Publics, Transports, Mines, et Urbanisme.

Griffiths, J.F. (1972) Climates of Africa. World survey of climatology, v. 10. Amsterdam, Elsevier.

Grove, A. (1971) Africa, south of the sahara. England, University of Cambridge.

Grove, A.T. (1972) "The dissolved and solid load carried by some West African rivers: Senegal, Niger, Benue and Shari," Journal of Hydrology 16, 4, p. 277-300.

Guérin-Villeaybreil, G. (1962) Hydrogéologie en Côte d'Ivoire. (Mémoires du B.R.G.M. no. 20.) Paris, B.R.G.M.

Hall, J.B. and J. Denik (1968) "Contribution towards the classification of Savanna in Ghana," Bulletin of l'IFAN, série A, 30, 1, p. 84-93.

Hance, W. (1970) Population, migration and urbanization in Africa. New York, Columbia University Press.

Hem, J.D. (1970) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1473.) Washington, D.C., G.P.O.

Henry, J.C. (1975) Haute Volta. Etude des ressources en eau de surface. Ouagadougou, PNUD.

Henry, J.C. (1976) République Centrafricaine. Eaux de surface: hydrométéorologie. Paris, UNESCO.

Hills, T.L. (1965) "Savannas: a review of a major research problem in tropical geography," Canadian Geographer, 9, 4, p.216-28.

Hottin, G. et O.-F. Ouedraogo (1975) Carte géologique à 1/1.000.000 de la République de Haute-Volta (avec Notice Explicative). Ouagadougou. Direction de la Géologie et des Mines.

Howard Humphries & Sons (1974) Hydrological and topographical studies of the Gambia River basin. Vol. 5-maps; vol. 6-the Gambia provinces groundwater study. Reading, England.

Howard Humphries & Sons (1974) Hydrological and topographical studies of the Gambia River Basin: final report (5 vols.). Reading, England. Disponible aussi en français sous le titre: Etudes hydrologiques et topographiques du bassin du fleuve Gambie: rapport terminal (5 tomes).

Hughes, I.G. (1961) Hydrogeological map of Ghana-1/1.000.000. Accra, Ghana Geological Survey.

Hydrogeo (1975) North Cameroon groundwater investigations and pilot development, final report. Rome.

Illy, P. (1973) Etude hydrogéologique de la vallée du fleuve Sénégal. Rome, FAO.

INSEE (1974) Recensements et enquêtes démographiques dans les Etats Africains et Malgache; situation au 1er janvier 1974. Paris.

IRAT (no date) Recherche des "classes d'orientation culturales". Méthode de travail utilisé par l'IRAT en Haute-Volta.

Institut de Recherches Scientifiques du Cameroun (IRS) (1957) Atlas du Cameroun. Yaoundé, IRSC.

Institut National Tchadien pour les Sciences Humaines (1972) Atlas pratique du Tchad. Paris, Institut Géographique National.

Italconsult (1969) UNDP survey of groundwater resources of Togo, 1967-1969. U.N.D.P.

Ivory Coast. Ministry of Plan (1971) Atlas de Côte d'Ivoire. Abidjan, Ministère du Plan/ORSTOM/Université d'Abidjan, Institut de Géographie Tropicale.

Jaccon, G. (1968) "La crue exceptionnelle du Niger en 1967," Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, 5, 1, p. 15-54.

Jeune Afrique (1975) Atlas de la Haute-Volta. Paris, Editions Jeune Afrique.

Jeune Afrique (1973) Grand atlas du continent Africain. Paris, Editions Jeune Afrique.

Johnson, A.I. (1967) Specific yield; compilation of specific yields for various materials. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1662-D.) Washington, D.C., G.P.O.

Jones, M.J. (1973) "The organic matter content of the savanna soils of West Africa," Journal of Soil Science, 24, p. 42-53.

Jones, M.J. and A. Wild (1975) "Soils of the West African savanna," Commonwealth Bureau of Soils, Technical Communication, 55.

Jones, M.J. and A. Wild (1975) Soils of the West African savanna; the maintenance and improvement of their fertility. Slough, Commonwealth Agricultural Bureaux.

Kaloga, B. (1969) Etude pédologique de la Haute-Volta, région Centre-Sud. Ouagadougou, ORSTOM.

Keay, R.W.J. (1959) An outline of Nigerian vegetation, 3rd ed. Lagos, Govt. Printer.

Keay, R.W.J. (1959) Vegetation map of Africa south of the Tropic of Cancer. London, Oxford University Press.

Klinkenberg, K. and G.M. Higgins (1970) "An outline of Northern Nigerian soils," Samaru Research Bulletin, 107.

Kovda, F.A. et al, eds. (1973) Irrigation, drainage and salinity: an international source book. London, Hutchinson/FAO/UNESCO.

Kowal, J.M. and A.H. Kassam (1977) The agricultural ecology of Savanna; a study of the Savanna of West Africa. Oxford, Oxford University Press.

Kowal, J.M. and D.T. Knabe (1972) An agroclimatological atlas for the northern states of Nigeria. Zaria, Ahmadu Bello University Press.

Kowal, J.M. and D. Knabe (1972) An agroclimatological atlas of the northern states of Nigeria. Zaria, Nigeria, Ahmadu Bello University Press.

Kowal, J.M., A.H. Kassam, and S.Sarraf (1977) Present and potential land use by agro-ecological lanes. Restricted report prepared for AGLS Division of FAO.

Lahee, F.H. (1961) Field geology. New York, McGraw-Hill.

Lang, D.M. (1975) "Land evaluation in Land Resources Division projects," dans:FAO."Reports on the ad hoc expert consultation on land evaluation, Rome, 6-8 January, 1975," World Soil Resources Report, 45, p.27-34.

Lanjouw, J. (1936) "Studies on the vegetation of Suriname savannas and swamps," Ned. kruid. Arch., 47, p. 823-51.

Lelong, F. and J. Lemoine (1968) "Les nappes phréatiques des arènes et des altérations argileuses; leur importance en zone intertropicale; les difficultés de leur exploitation," Bulletin du BRGM, deuxième série, Section III, no. 2, p. 41-52.

Le Maréchal, A. (1976) Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun. Paris, ORSTOM.

Lemoine, L. and J.C. Prat (1972) Cartes d'évapotranspiration potentielle calculée d'après la formule de L. Turc pour les pays membres du CIEH. (9 fascicules.) Ouagadougou, CIEH.

Lemoine, J. (1975) Données pour la valorisation des eaux souterraines sur le territoire voltaique. UNDP.

Leprun, J.C. and R. Moreau (1968) Etude pédologique de la Haute-Volta, région Ouest-Nord. Ouagadougou, ORSTOM.

Lohman, S.W. et al (1972) Definitions of selected ground-water terms - revisions and conceptual refinements. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1988.) Washington, D.C., G.P.O.

Mabogunje, A.L. (1973) "Migration et urbanisation," dans: Caldwell, J. et al (eds.) (1973) Croissance démographique et évolution socio-économique en Afrique. New York, The Population Council.

Maillary, J.C. (1964) Carte hydrogéologique de reconnaissance de la Côte d'Ivoire 1/1.000.000. Paris, B.R.G.M./SODEMI.

Major, D.C. et al (1974) An approach to water resources planning. Annex 8 of: A framework for evaluating long-term strategies for the development of the Sahel-Sudan region. Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Technology-Center for Policy Alternatives.

Manshard, W. (1974) Tropical agriculture. London, Longmans.

Martin, A. and P. Vaubourg (1973) Ressources en eau souterraine de l'Afrique sèche (Sénégal, Mauritanie, Mali, Haute-Volta, Niger, Tchad). Paris, BRGM.

Martin, G. (1975) Mise au point des connaissances hydrogéologiques du Sénégal. Rapport BRGM. Dakar, B.R.G.M.

Mathiez, J.P. and G. Huot (1966) Prospection géophysique et recherches d'eaux souterraines, exemples d'application en Afrique occidentale. Paris, CIEH. Disponible aussi en anglais sous le titre: Geophysical prospecting and ground water exploration, examples of application in West Africa.

Maton, G. (1974) "La politique des grands barrages hydro-agricoles", Actuel Développement, 3, p. 32-7.

Mauritanie (1976) Rapport national pour la Réunion préparatoire à Addis Abéba. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Nouakchott.

McDonald, M. and Partners (1973) Investigation and feasibility study of an irrigation project south of Lake Chad, Nigeria. Boreham Wood, Hunting Technical Services, Ltd.

Meinzer, O.E. (1942) Hydrology. New York, Dover.

Meinzer, O.E. (1923) Outline of groundwater hydrology with definitions. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 493.) Washington, D.C., G.P.O.

Mestraud, J.L. (1963) Carte géologique de la République Centrafricaine, 1/1.500.000. Paris, B.R.G.M.

Miller, R.E. et al (1968) Ground-water hydrology of the Chad in Bornu and Dikwa emirates, Northeastern Nigeria, with special emphasis on the flow of the artesian system. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1757-I.) Washington, D.C., G.P.O.

Ministère de la Coopération de la République Française (1974) Mémento de l'agronome, 2nd ed. Paris.

Molard, R. (1956) Afrique Occidentale Française. 3rd ed. Paris, Berger-Levrault.

Moniod, F. et al, (1977) Le bassin du fleuve Volta. Monographies Hydrologiques ORSTOM n.5. Paris/Ouagadougou, ORSTOM/CIEH.

Monnet, C. (1970) Transport solide en suspension par un fleuve de Côte d'Ivoire: le Bandama. Abidjan, ORSTOM.

Monroe, W.H. (1970) A glossary of karst terminology. (U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1899-K.) Washington, D.C., G.P.O.

Moss, P.R (1974) "Soils and soil management," dans: Church, R.J.H., West Africa, 7th ed. London, Longman.

Mounis, H. and H. Mansongi (1974) Note provisoire sur les pluies exceptionnelles de faible durée en Afrique occidentale et centrale. Ouagadougou, CIEH.

National Academy of Sciences (1974) African agricultural research capabilities. Washington, D.C.

National Academy of Sciences (1972) Soils of humid tropics. Washington, D.C.

Netherlands Engineering Consultants (1959) River studies and recommendations on improvement of Niger and Benue by NEDECO. Amsterdam, North-Holland Publishing, Co.

Niger. Direction des Ressources Hydrauliques (1976) Monographie nationale. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Niamey.

Nigeria. Geological Survey (1965) Geological map of Nigeria 1/2.000.000. Lagos, Federal Ministry of Housing and Survey.

Nye, P.H. and D. J. Greenland (1960) "The soil under shifting cultivation," Commonwealth Bureau of Soils Technical Communication, 51.

Odell, R.T. et al (1974) "Characteristics, classification and adaptation of soils in selected areas in Sierra Leone, West Africa," University of Illinois, Agricultural Experiment Station Bulletin, 748; Njala University College Bulletin, 4.

Ogilbee, W. and H.R. Anderson (1965) Exploratory drilling for ground water in Western Sokoto Province, Nigeria, with particular reference to artesian aquifers in the Gwandu formation. Washington, D.C. U.S. Geological Survey.

Olivry, J.C. (1974) Quelques mesures complémentaires de transports solides en suspension au Cameroun. Le Mayo Tsanaga à Bogo 1973 - Le Mbam à Goura 1970-1974. Yaoundé, ORSTOM.

Ologe, K.O. (1973) Soil erosion, sediment field and water resources development in the Savanna areas of Nigeria. Ile-Ife, Department of Geography University of Ife.

Olson, G.W. (1974) "Interpretive land classification in English-speaking countries," FAO Soils Bulletin, 22, p. 1-5.

ORSTOM (1976) Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Paris.

ORSTOM (1971) Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. (Mémoires de l'ORSTOM, 50) Y compris: Les sols par A. Perraud; La végétation par J.L. Guillaumet et E. Adjanahoun. Paris.

ORSTOM (1970) Monographie hydrologique du bassin du Niger (3 vols.). Paris, CIEH. (Voir aussi: ORSTOM (1958-62)).

ORSTOM (1969) Monographie hydrologique du Lac Tchad. Paris.

ORSTOM (1958-62) Monographie du Niger (annexes des données) (3 vols.). Paris. (Voir aussi: ORSTOM (1970)).

ORSTOM (1970) Rapport de synthèse sur la cartographie pédologique systématique à l'échelle du 1/500.000ème de la Haute-Volta. Dakar, Centre ORSTOM de Dakar.

ORSTOM. Service Hydrologique (1973) de Côte d'Ivoire - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, SEAE/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1977) République de Haute-Volta - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, Ministère de la Coopération/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1977) République de Mauritanie - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, Ministère de la Coopération/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1973) République du Dahomey - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, SEAE/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1974) République du Mali - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, SEAE/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1976) République du Niger - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, Ministère de la Coopération/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1976) République du Sénégal - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, Ministère de la Coopération/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1973) République du Tchad - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, SEAE/CIEH.

ORSTOM. Service Hydrologique (1977) République du Togo - Précipitations journalières de l'origine des stations à 1965. Paris/Ouagadougou, Ministère de la Coopération /CIEH.

OMVS (1976) Aménagement du bassin versant du fleuve Sénégal. Dakar.

OUA (1970) Atlas international de l'Ouest Africain, carte géologique, 1/5.000.000.

Organization of African Unity (OAU) (1968) International atlas of West Africa. (Addis Ababa?)

Organization of African Unity. Scientific, Technical and Research Commission, (1971) International Atlas of West Africa. Y compris: Plate 9: Pédologie. Addis Ababa.

Paloc, H. (1962) Carte hydrogéologique du bassin sud-ouest mauritanien au 1:500.000 et notice explicative. Nouakchott, Direction du Plan.

Paloc, H. (1962) Connaissance hydrogéologique de la Mauritanie en 1962. Dakar, B.R.G.M.

Paris-Teynac, E.-J. (1963) "Contribution à la connaissance des fleuves d'Afrique tropicale et en particulier du Nil. Les crues exceptionnelles," Bulletin de l'IFAN, 25, A, 1, p. 1-23.

Paris-Teynac, E.-J. (1962) "Contribution à la connaissance du fleuve Sénégal," Bulletin de l'IFAN, 24, A, 1, p. 54-68.

Ralph M. Parsons Co. (1964) Hydrogeologic reconnaissance, Republic of Ivory Coast. Washington, D.C., U.S.A.I.D.

Ralph M. Parsons Co. (1963) Hydrogeologic reconnaissance, Republic of Senegal. Washington, D.C., U.S.A.I.D.

Pfannkuch, H.O. (1969) Elsevier's dictionary of hydrogeology. Amsterdam. Elsevier.

Phillips, J. (1959) Agriculture and ecology in Africa - a study of actual and potential development south of the Sahara. London, Faber and Faber.

Pias, J. (1970) Carte pédologique à 1/1.000.000 du Tchad. N'Djaména, ORSTOM.

Pitaud, G. (1977) Carte de l'état des connaissances des ressources en eaux souterraines du Sénégal.

Plote, H. (1974) L'Afrique Sahélienne se dessèche-t-elle? Essai sur la détérioration des conditions climatiques au Sahel tropical. Orléans, BRGM. Département Géologie de l'Aménagement.

Population Reference Bureau, Inc. (1975) "Africa and its population growth," Population Reference Bulletin, v. 30, no. 1.

Population Reference Bureau, Inc. (1976) World population growth and response, 1965-1975. Washington, D.C.

Preez, J.W. (du) and W. Barber (1965) The distribution and chemical quality of groundwater in Northern Nigeria. (Geological Survey of Nigeria, Bulletin no. 36.)

Quantin, P. (1965) Les sols de la République Centrafricaine. Paris, ORSTOM.

Rattray, J.M. (1960) The grass cover of Africa. Rome, FAO.

Reining, P. (1973) Utilization of ERTS-1 imagery in cultivation and settlement sites identification and carrying capacity estimates in Upper Volta and Niger. AID contract: AID/CM/afr-C-73-21, final report. Washington, D.C., AID.

Renard, J. (1973) Atlas de Haute-Volta: cartes provisoires des principaux éléments climatiques. Ouagadougou, Centre Voltaique de la Recherche Scientifique.

République Centrafricaine (1976) Monographie nationale. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Bangui.

Revillion, P.Y. (1977) Notice explicative de la carte d'aptitude des terres à l'irrigation pour l'utilisation des eaux souterraines du Sahel. (avec 4 cartes à 1/500.000 des zones au Sénégal, au Niger, dans le nord et le sud du Tchad.) Paris, BDPA.

Rieffel, J.M. and R. Moreau (1969) Etude pédologique de la Haute-Volta, région Ouest-Sud. Ouagadougou, ORSTOM.

Rijks, D. (1973) "Le climat Ouest-Africain et l'irrigation," L'agronomie Tropicale, XXVIII, 9, p. 848-52.

Riou, V. (1976) Inventaire des points d'eau dans le sud mauritanien en 1974-75. Nouakchott, Ministère de l'Equipement.

Riquier, J. (1972) A mathematical model for calculation of agricultural productivity in terms of parameters of soil and climate. Rome, FAO.

Riquier, J. et al (1970) A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (first approximation). AGL TESR/70/6. Rome, FAO.

Riquier, J. (1974) "A summary of parametric methods of soil and land evaluation," FAO Soils Bulletin, 22, p. 47-52.

Roche, M.A. (1969) "Evolution dans l'espace et le temps de la conductivité électrique des eaux du Lac Tchad d'après les résultats de 1908, 1957, 1962 à mars 1968," Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, 6,1, p.35-78.

Roche, M.A. (1970) "Evaluation des pertes du Lac Tchad par abandon superficiel et infiltrations marginales," Cahiers ORSTOM, série Géologie, 2, 1, p. 67-80.

Roche, M.A. (1968) "Première estimation des apports en sels au Lac Tchad par le Chari," Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, 5, 1, p.55-8.

Rochette, C. (1974) Le bassin du fleuve Sénégal. éd. rév. (Monographies Hydrologiques ORSTOM, N.1.) Paris.

Rodier, J. and C. Auvrau (1965) Estimation des débits de crues décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km^2 en Afrique occidentale. Paris, ORSTOM/CIEH. Disponible aussi en anglais sous le titre: Estimation of discharges of ten year floods for catchments with a surface area less than 200 sq. KM. in West Africa.

Rodier, J. (1975) Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel tropical africain. Paris, ORSTOM. Travaux et documents, n. 46.

Rodier, J. and P. Chaperon (1970) Modifications du régime hydrologique du Niger à Niamey depuis 1961. Niamey, ORSTOM. Service Hydrologique.

Roure, J. (1957) Carte hydrogéologique du Soudan oriental, 1/1.000.000. Dakar, A.O.F. Service de l'Hydraulique.

Roussel, P. (1968) Notice explicative de la carte de reconnaissance hydrogéologique de la Mauritanie au 1/1.000.000. Nouakchott, Service des Eaux Souterraines.

Saad, K.F. (1970) Etude hydrogéologique de l'est du Mali. Paris, UNESCO.

Saad, K.F. (1971) Etude hydrogéologique du nord de la boucle du Niger. Paris, UNESCO.

Sauvel, C. (1968) Etude hydrogéologique du Togo, région des savanes. Rapport BRGM Abidjan, B.R.G.M.

Schneider, J.L. (1969) Carte hydrogéologique de la République du Tchad (1/1.500.000). Paris, B.R.G.M.

Schneider, J.L (1970) Notice explicative de la carte hydrogéologique au 1/1.500.000 de la République du Tchad. Paris, B.R.G.M.

Schenll, R. (1971) Introduction à la phytogéographie des pays tropicaux. Paris, Gauthier-Villars.

Schwoerer, P. (1964) Le bassin du Lac Tchad. Yaoundé, B.R.G.M.

Schwoerer, P. et al (1965) Rapport final-mission de recherche hydrogéologique. Rapport BRGM. Yaoundé, B.R.G.M.

Seguy, L. (1973) Potentialités des sols de l'Ouest Cameroun. Yaoundé, IRAT.

Sénégal. Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique (1973) Carte des forages. Dakar, Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural, Direction de l'Hydraulique Urbaine et Rurale.

Sénégal. Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique. (1976) Rapport national. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Dakar.

Sénégal Consult (1970) Etude de préinvestissement pour la régularisation du fleuve Sénégal. Projet d'un système de contrôle des débits dans le bassin du haut-Sénégal. 9 vols. Geneva.

Senghor, Adrien (1977) Communication devant l'Assemblée Nationale sur la politique de l'eau. Dakar, Ministère du Développement Rural et de l'Hydraulique.

Service Hydraulique de l'AOF (1956) Carte des forages réalisés jusqu'à 1956, 1/10.000.000.

Service Hydraulique de l'AOF (1957) Carte des puits réalisés jusqu'à 1957, 1/10.000.000.

Service Hydraulique de l'AOF (1957) Hydrogéologie du Soudan Oriental, carte des forages, 1/1.000.000.

Shantz, H.L. and C.F. Marbut (1923) The vegetation and soils of Africa. New York, American Geographical Society.

Sheets, Hal and Roger Morris (1974) Disaster in the desert. Special report. New York, The Carnegie Endowment for International Peace.

Sierra Leone Geological Survey (1960) Geologic map of Sierra Leone. Freetown.

Sillars, R. (1958) Les savanes de l'Afrique Centrale. Paris.

Simmonds, N.W. (1966) Bananas. 2nd ed. London, Longmans.

Sirculon, J. (1974) Les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'Ouest Sahélienne. Stockholm, SIES. Secretariat for International Ecology.

Sirculon, J. (1976) "La récente sécheresse des régions sahéliennes," La Houille Blanche, 31, 6/7, p. 537-48.

Slansky, M. (1962) Contribution à l'étude du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Mémoires B.R.G.M., no. 11.

Slansky, M. (1962) Contribution à l'étude géologique du bassin sédimentaire côtier du Dahomey et du Togo. Paris, Mémoires du B.R.G.M., no. 11.

Slansky, M. (1953) Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Bas Dahomey et du Bas Togo. Dakar, A.O.F. Direction Fédérale des Mines et de la Géologie.

Slansky, M. (1952) Etude hydrogéologique du Bas Togo. Dakar, A.O.F. Direction Fédérale des Mines et de la Géologie.

SCET/SEDES (1976) Essai de réflexion sur les stratégies anti-sécheresse possibles dans le Sahel de l'Afrique de l'Ouest, Janvier.

SOGREAH (1972) Etude de la crue de 1970, de la crue de 1968 et des trois crues artificielles. Rapport de consultant du projet PNUD FS REG 65-061 sur l'étude comparative des hauteurs d'eau des crues du fleuve Sénégal. St. Louis, Sénégal, FAO/OMVS, Projet Hydro-agricole.

SOGREAH (1972) Etude des volumes ayant stationné dans le lit majeur du Sénégal. St. Louis, Sénégal, SOGREAH/FAO/OMVS, Projet Hydro-agricole.

Sombroek, W.G. et I.S. Zonneveld (1971) "Ancient dune fields and fluvial deposits in the Kima-Sokoto river basin (N.W. Nigeria)," Soil Survey Paper, 5. Wageningen, Netherlands Soil Survey Institute.

Stow, D.A.V. et al (1976) Preliminary bibliography on groundwater in developing countries 1970 to 1976. St. John's Newfoundland, Association of Geoscientists for International Development.

Strakhov, N.M. (1967) Principes de Lithogenesis; vol. 1 (London).

Swami, K. (1973) Moisture conditions in the savanna region of West Africa. (Savanna Research Series 18; Climatological Research Series 8.) Montreal, McGill University, Department of Geography.

Sys, C. (1975) "The pedology of rubber," dans: FAO. "Report on the ad hoc expert consultation on land evaluation, Rome, 6-8 January, 1975," World Soil Resources Report, 45, p. 59-79.

Taylor, C.J. (1960) Synecology and sylviculture in Ghana. Edinburgh.

Tchad (1976) Monographie nationale de la République du Tchad. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) N'Djaména.

Teaci, D. and M. Burt (1974) "Land evaluation and classification in East European countries," FAO Soils Bulletin, 22, p. 35-46.

Teissier, J. (1974) "Terroir de Mogtedo (Haute-Volta). Etude morphopédologique en vue de la mise en valeur des terres," Agronomie Tropicale, 2-3, p. 312-63.

Thompson, B.W. (1965) The climate of Africa. Nairobi, Oxford University Press.

Thornthwaite, C.W. (1948) "An Approach toward a rational classification of climate," Geographical Review, 38, p. 85-94.

Tillement, B. (1968) Hydrogéologie du bassin quaternaire tchadien au Cameroun Rapport Bureau de l'Eau no. BE 135. Garoua.

Tillement, B. (1970) "Hydrogéologie du Nord Cameroun" Cameroun. Direction des Mines et de la Géologie. Bulletin, no. 6. Yaoundé.

Tirat, M. (1964) Contribution à l'étude hydrogéologique du Continental Terminal, rapport BRGM. Niamey, Ministère des Travaux Publics et des Mines.

Todd, D.K. (1959) Ground water hydrology. New York, Wiley.

Todd, D.K. (1970) The water encyclopedia, a compendium of useful information on water resources. Port Washington, N.Y., Water Information Center.

Togo. Arrondissement de l'Hydraulique et de l'Electricité (1976) Rapport national. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre, 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Lomé.

Trochain, J. (1940) Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. (Mémoires de l'IFAN, 2.)

Tuley, P., ed. (1972) The land resources of North-Eastern Nigeria: vol. 1, the environment. Tolworth, England, Land Resources Division.

UNESCO (1958) Carte géologique de l'Afrique, 1/5.000.000. Paris.

UNESCO (1969) Study of Water Resources in the Chad basin. Techn-Dept., Serial No. 1600.

UNESCO (1969) Study of water resources in the Lake Chad Basin, 1966-1970. Paris, UNDP/UNESCO. Disponible aussi en français sous le titre: Synthèse hydrologique du bassin du Lac Tchad, 1966-1970.

United Nations (1972) Abstraction and Use of water - A comparison of legal regimes " ECOSOC " N.Y.

United Nations (1975) Annuaire démographique. New York.

United Nations (1960) Large-scale ground water development. New York.

United Nations (1975) Reinforcement des services gouvernementaux chargés de découvrir et de mettre en valeur les eaux souterraines du Mali. Conclusions et recommandations. New York.

United Nations (1970) Upper Volta mineral and groundwater surveys/enquête sur les ressources en eaux souterraines. New York.

United Nations. Department of Economic and Social Affairs (1973) Ground water in Africa. New York.

United Nations. Population Division, ESA (1975) Selected world demographic indicators by countries, 1950 - 2000. New York.

United Nations Development Program (1975) Prospection des eaux souterraines dans la zone côtière; conclusions et recommandations du projet. Lomé.

United Nations Development Program (1975) Renforcement d'un service des eaux souterraines, conclusions et recommandations du projet. New York.

UNDP-UNESCO (1966-1968) Carte de synthèse hydrologique du bassin du Lac Tchad, 1/5.000.000. Paris.

U.S. Bureau of Census, ISPC (1976) Recent demographic estimates for the countries and regions of the world. Washington, D.C.

United States. Bureau of Reclamation (1968) Reconnaissance study, land and water resources, Lake Chad basin. Denver, Colorado.

United States. Bureau of Reclamation (1975) Senegal River basin water resources development analysis. Washington, D.C. unpublished report.

United States. Department of Agriculture (1975) Soil taxonomy; a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. (Agriculture handbook 436.) Washington, D.C., USDA Soil Conservation Service. 1975.

United States Peace Corps. Wells manual. (Special issue of Program & Training Journal.) Washington, D.C.

Upper Volta. Direction de l'Hydraulique et de l'Aménagement de l'Espace Rural (1976) Monographie Nationale de la Haute-Volta. (Rapport présenté à la Réunion Régionale Africaine, Addis Abéba, 20-25 septembre, 1976 en préparation de la Conférence des Nations Unies sur l'Eau.) Ouagadougou.

van der Leeden, F. (1974) Ground water, a selected bibliography. 2nd. ed. Port Washington, N.Y. Water Information Center.

van der Leeden, F. (1975) Water resources of the world, selected statistics. Port Washington, N.Y., Water Information Center.

van de Walle, Etienne (1973) "Population et développement économique," dans: Caldwell, J. et al (eds.) (1973) Croissance démographique et évolution socioéconomique en Afrique de l'Ouest. New York, The Population Council.

Vigne, C. (1936) "Forests of the Northern Territories of the Gold Coast," Empire Forestry Journal, 15, 2, p. 210-13.

Villemur, J.R. (1967) "Aperçu hydrogéologique sur le basin de Taoudéni," dans: Reconnaissance géologique et structurale du Nord du bassin de Taoudéni, (Mémoires du B.R.G.M., no. 51.) Paris, B.R.G.M.

Walter, H. (1963) Productivity of vegetation in arid countries, the savanna problem and the bush encroachment after overgrazing. Paper delivered at the Congress of Nairobi.

Walton, W.C. (1970) Groundwater resource evaluation. New York, McGraw-Hill

Wolff, J.-P. (1964) Carte géologique de la République du Tchad. (1/1.500.000.) Paris, B.R.G.M.

World Health Organization (WHO) (1973) Onchocerciasis control in the Volta River Basin area. Annex I-1: Atlas. Geneva, WHO.

WMO (1973) Agroclimatology in the semi-arid areas south of Sahara. Proceedings of the Regional Technical Conference, Dakar, 8-20 February, 1971. Geneva, WMO.

Young, A. (1975) "Land requirements for specific land uses," dans: FAO. "Report on the ad hoc expert consultation on land evaluation, Rome, 6-8 January, 1975," World Soil Resources Report, 45, p. 85-7.

Zamora, C. (1975) "Soils of the lowlands of Peru," dans: Bornemisza, E. and A. Alvarado, eds., Soil management in tropical America. Raleigh, Soil Science Department, North Carolina State University, p. 48-60.

II. ANNUAIRES HYDROLOGIQUES/HYDROLOGICAL YEARBOOKS

Indiqués selon le pays et l'année/Listed by country and year

1949	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1951.
1950	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1952.
1951	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1953.
1952	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1954.
1953	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1955.
1954	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1956.
1955	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1957.
1956	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1958.
1957	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la France d'Outre-Mer. Paris, 1959.
1958	ORSTOM. Annuaire hydrologique des états d'outre-mer de la Communauté, des territoires et départements d'outre-mer, du Cameroun, et du Togo. Paris, 1961.
1959	ORSTOM. Annuaire hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1963.
1960	ORSTOM. Annuaire hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1966.
1961	ORSTOM. Annuaire hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1967
1962/1963	ORSTOM. Annuaire hydrologique de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1967.
1964/1965	ORSTOM. Annales hydrologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1969.
1966/1967	ORSTOM. Annales hydrologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1972.
1968/1969	ORSTOM. Annales hydrologiques de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Paris, 1974.

BENIN

1961	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Dahomey. Cotonou, 1963.
1961/1962/ 1963/1964/ 1965	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Dahomey. Cotonou, 1967.

CAMEROUN

1962	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, Institut de Recherches Scientifiques du Cameroun, 1964.
1963	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, Institut de Recherches Scientifiques du Cameroun, 1964.
1964	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, Institut de Recherches Scientifiques du Cameroun, 1965.
1965	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1966.
1966	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1967.
1967	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1968.
1968	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1969.
1969	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1970.
1970	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1971.
1971	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1972.
1972	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1973.
1973	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, 1974.
1974	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Cameroun. Yaoundé, Office National de la Recherche Scientifique et Technique, 1975.

COTE d'IVOIRE

1965/1966/ 1967	ORSTOM. Mesures de débits. Adiopodoumé, 1969.
1968	ORSTOM. Mesures de débits. Adiopodoumé, 1969.
1969	ORSTOM. Mesures de débits. Adiopodoumé, 1970.
1970	ORSTOM. Mesures de débits. Adiopodoumé, 1971.
1971/1972/ 1973	ORSTOM. Mesures de débits. Adiopodoumé, 1974.
1966	ORSTOM. Annuaire 1966, hauteurs d'eau journalières aux stations hydrométriques principales de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1967.
1967	ORSTOM. Annuaire 1967, hauteurs et débits journalières aux principales stations hydrométriques de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1968.
1969	ORSTOM. Annuaire hydrologique de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1970.
1970	ORSTOM. Annuaire hydrologique de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1971.
1971	ORSTOM. Annuaire hydrologique de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1972.

1972	ORSTOM. Annuaire hydrologique de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1973.
1973	ORSTOM. Annuaire hydrologique de Côte d'Ivoire. Adiopodoumé, 1974.

EMPIRE CENTRAFRICAIN

Origine à 1970	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République Centrafricaine. (2 vols.). Bangui, 1971-1972.

GAMBIA aucun/none

GHANA

Origin to Feb. 1961	Ghana. Hydrological Services. The Volta River Basin hydrological data book. Accra, 1966.
1961-62	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1966.
1962-63	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1966.
1963-64	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1966.
1964-65	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1966.
1965-66	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1966.
1966-67	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1967.
1967-68	Ghana. Hydrological Services. River basins of Ghana, water year book. Accra, 1970.

GUINEE aucun/none

HAUTE-VOLTA

1965	ORSTOM. Hauteurs d'eau et débits des stations du réseau hydrométrique de Haute-Volta en 1965. Ouagadougou, 1966.

1966 ORSTOM. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1969.

1967 ORSTOM. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1969.

1968/1969 ORSTOM. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1970.

1970 ORSTOM. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1971.

1971 ORSTOM. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1972.

1972 Haute-Volta. Direction de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1973.

1973 Haute-Volta. Direction de l'Hydraulique et de l'Amenagement de l'Espace Rural. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1974.

1974/1975 ORSTOM. Annuaire hydrologique de Haute-Volta. Ouagadougou, 1977.

MALI

1968-69 Mali. Direction de l'Hydraulique et de l'Energie. Annuaire hydrologique. Bamako, 1969.

1969-70 Mali. Direction de l'Hydraulique et de l'Energie. Annuaire hydrologique. Bamako, 1973.

1970-71 Mali. Direction Générale de l'Hydraulique et de l'Energie. Annuaire hydrologique. Bamako, 1977.

NIGER

1966 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger. Niamey, 1967.

1967 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger. Niamey, 1968.

1968 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger. Niamey, 1969.

1969 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger. Niamey, 1970.

1970 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger. Niamey, 1971.

1971 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger. Niamey, 1972.

1972 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger (le réseau Est-Nigerien). Niamey, 1973.

1972-73 Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologique. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1973.

1973 ORSTOM. Annuaire hydrologique du Niger (le réseau Est-Nigerien). Niamey, 1974.

1973-74 Niger. Service du Génie Rural. Section hydrologique. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1974.

1974-75	Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologie. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1975.
1975-76	Niger. Service du Génie Rural. Section Hydrologie. Rapport Niger-Moyen. Niamey, 1976.

NIGERIA (Kano State only)

1963-64, 1964-65, 1965-66, 1966-67, 1967-68	Kano State (Nigeria). Water Resources & Engineering Construction Agency. Hydrological yearbook. Kano, 1974.
1968-69, 1969-70, 1970-71	Kano State (Nigeria). Ministry of Works & Survey. Hydrological yearbook. Kano, 1972.

SENEGAL

1974-75	ORSTOM. Annuaire hydrologique. Dakar, 1976.
1975-76	ORSTOM. Annuaire hydrologique. Dakar, 1976.

TCHAD

1960	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Tchad. Fort-Lamy, 1961.
1961/1962	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Tchad. Fort-Lamy, 1965.
1963/1964	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Tchad. Fort-Lamy, 1968.
1965/1966	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Fort-Lamy, 1968.
1967/1968	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Fort-Lamy, 1970.
1969	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Fort-Lamy, 1971.
1970	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Fort-Lamy, 1972.
1971	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. Fort-Lamy, 1972.

1972	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. N'Djaména, 1973. (Y compris débits 1971-72 et 1972-73)
1973-74	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. N'Djaména, 1974.
1974-75	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. N'Djaména, 1975.
1975-76	ORSTOM. Annuaire hydrologique de la République du Tchad. N'Djaména, 1976.

TOGO

Origine à 1970-71	ORSTOM. Annales hydrologiques du Togo depuis la création des stations jusqu'à l'année hydrologique 1970-71. (2 vols.). Lomé, 1973, 1974.
1961	ORSTOM. Annuaire hydrologique du Togo. Lomé, 1963.
1962/1963/ 1964	ORSTOM. Récapitulation des hauteurs d'eau des échelles limnimétriques du Togo. Lomé, 1965.
1965/1966	ORSTOM. Récapitulation des hauteurs d'eau des échelles limnimétriques du Togo. Lomé, 1967.