

ACADÉMIE DE MONTPELLIER

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

## **THÈSE**

présentée à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR - INGÉNIEUR**  
**en Écologie Générale et Appliquée**

# **LE BILAN HYDRIQUE ET SON RÔLE DANS LA PRODUCTION DE LA STRATE HERBACÉE DE QUELQUES PHYTOCÉNOCES SAHÉLIENNES AU SÉNÉGAL**

par

**Antoine CORNET**

**Ingénieur Agronome**

**Chargé de Recherches, O.R.S.T.O.M.**

**soutenue le 12 Nov. 1981, devant la Commission d'Examen**

***Jury :*** MM. M. GODRON

A. BERGER

R. FAUCK

F. FOREST

M. GOUNOT

J. MOINEREAU

UNIVERSITÉ  
DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
DU LANGUEDOC

---

LISTE DES PROFESSEURS

---

Président :

L. THALER

Vices-Présidents :

MM. CORRIU, PIETRASANTA et NOUAZE

Doyens Honoraires à l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc :

P. MATHIAS

B. CHARLES

A. CASADEVALL

Présidents Honoraires :

P. DUMONTET

J. ROUZAUD

Professeurs Honoraires de l'Université des Sciences et Techniques du Languedoc :

R. JACQUES

Ch. BOUHET

Ch. SAUVAGE

M. CASTERAS

J. SALVINIEN

J.M. MORETTI

E. TURRIERE

M. MOUSSERON

G. COUCHET

C. CAUQUIL

P. CHATELAIN

P. DEMANGEON

G. DENIZOT

A.M. VERGNOUX

J.P. ROIG

J. GRANIER

E. KAHANE

Secrétaire Général :

E. SIAU

Professeurs titulaires :

M.J. AVIAS ..... Géologie

M.JJ. MOREAU ..... Mécanique rationnelle

M. B. CHARLES ..... Mathématiques Pures

M. R. JOUTY ..... Physique

M. R. LEGENDRE	.....	Zoologie
M. I. ASSENMACHER	.....	Physiologie Animale
M. Ch. ROUMIEU	.....	Analyse Supérieure
M. J. ROBIN	.....	Physique
M. B. PISTOULET	.....	Physique
M. A. POTIER	.....	Chimie Minérale
M. R. LAFONT	.....	Physique
M. R. JACQUIER	.....	Chimie
M. J. FALGUEIRETTES	.....	Minéralogie
M. J. REGNIER	.....	Chimie
Mme J. CHARLES	.....	Mathématiques
M. J. ROUZAUD	.....	Chimie
M. P. CAILLON	.....	Physique
M. H. CHRISTOL (E.N.S.C.M.)	.....	Chimie
M. H. ANDRILLAT	.....	Astronomie
Mme G. VERNET	.....	Biologie Animale
M. L. CECCHI	.....	Physique
M. L. EUZET	.....	Zoologie
M. C. DELOUPY	.....	Physique
M. M. MATTAUER	.....	Géologie
M. M. SAVELLI	.....	Physique
M. R. MARTY	.....	Psychophysiologie
M. A. BONNET	.....	Botanique
M. G. LAMARTY	.....	Chimie
Mme S. ROBIN	.....	Physique
M. R. CORRIU	.....	Chimie
Mme N. PARIS	.....	Physiologie Végétale
M. J. ZARZYCKI	.....	Sciences des Matériaux
M. M. MAURIN	.....	Chimie Minérale
M. L. THALER	.....	Paléontologie
M. S. GROMB	.....	Chimie Physique
M. JV. ZANCHETTA	.....	Chimie Générale
M. P. SABATIER	.....	Mathématiques
M. F. SCHUE	.....	Chimie Organique
M. E. GROUBERT	.....	Physique
M. Ch. CASTAING	.....	Mathématiques
M. M. ROUZEYRE	.....	Physique
M. F. PROUST	.....	Géologie

M. J. PARIS	.....	Biologie Animale
M. A. GROTHENDIECK	.....	Mathématiques
M. C. DURANTE	.....	Physique
M. G. BOUGNOT	.....	Physique
M. G. LECOY	.....	E.E.A.
M. R. GAUFRES	.....	Chimie
M. JD. BAYLE	.....	Physiologie Animale
M. JL. IMBACH	.....	Chimie
M. JP. FILLARD	.....	E.E.A.
M. N. ROBY	.....	Mathématiques
M. Ph. JEANTEUR	.....	Biochimie
M. M. AMANIEU (I.S.I.)	.....	Hydrologie et Mariculture
M. A. COMMEYRAS	.....	Chimie Organique

Professeurs sans Chaire :

M. G. TOURNE	.....	Chimie
M. J. REMY	.....	Géologie
Mme H. GUASTALLA	.....	Biologie Physico-Chimique
M. R. LENEL	.....	Biologie Animale
M. A. BASSOMPIERRE	.....	Physique
M. R. JONARD	.....	Botanique
M. R. CANO (I.U.T.)	.....	Mesures Physiques
M. P. MOLINO	.....	Mathématiques
M. J. LEGRAND	.....	Physiologie Animale
M. J. D'AUZAC	.....	Physiologie Végétale
M. G. BOUIX	.....	Zoologie
M. M. DENIZOT	.....	Biologie Végétale
M. B. BRUN	.....	Chimie Physique
M. L. GIRAL	.....	Chimie Organique
M. JP. QUIGNARD	.....	Zoologie
M. Ph. VIALLEFONT	.....	Chimie
M. A. RAIBAUT	.....	Zoologie
M. P. VITSE	.....	Chimie Minérale
M. J. GRIMAUD (E.N.S.C.M.)	.....	Chimie
M. J. GARCIA (I.U.T. Nîmes)	.....	Génie Mécanique

M. P. LOUIS	.....	Géophysique Appliquée
M. Cl. BOCQUILLON	.....	Hydrologie
M. A. DONNADIEU	.....	Physique
M. M. LEFRANC	.....	Mathématiques
M. G. MASCHERPA	.....	Chimie
M. C. GOUT	.....	Physique
M. JP. TRILLES (I.U.T.)	.....	Biologie Appliquée
M. F. HALLE	.....	Biologie Végétale
M. G. BORDURE (I.U.T.)	.....	Génie Electrique
M. JP. NOUGIER	.....	Electronique
M. M. GODRON	.....	Ecologie Végétale
M. L. LASSABATERE (I.U.T.)	.....	E.E.A.
M. J. LAPASSET (I.U.T.)	.....	Physique Mesure Physique
M. M. AVEROUS (I.U.T.)	.....	Physique Génie Electrique
M. G. MAURY	.....	Chimie
M. G. LOUPIAS	.....	Mathématiques
M. R. BEN AIM (I.S.I.)	.....	Génie Chimique et Traitement des eaux
M. J. CROUZET (I.S.I.)	.....	Biochimie Appliquée
M. L. COT (E.N.S.C.M.)	.....	Chimie
M. Jc. CHEFTEL (I.S.I.)	.....	Biochimie Appliquée à l'alimentation
M. P. JOUANNA (I.U.T.)	.....	Génie Civil
M. H. MATHIEU (I.S.I.)	.....	E.E.A.

Professeurs Associés :

M. M. MICALI	.....	Mathématiques
M. H. BILGER	.....	Physique
M. G. AUBERSON	.....	Mathématiques

Professeurs Associés d'Université :

M. L. DAUZIER	.....	Physiologie Animale
M. GALZY	.....	Biochimie
M. C. MAURIN	.....	Biologie Animale
M. R. SENOUILLET	.....	Economie et Gestion
M. E. SERVAT	.....	Géologie
M. C. VAGO	.....	Biologie Animale
Mme M. VAN CAMPO	.....	Biologie Végétale
M. E. VERDIER	.....	Chimie
M. F. WINTERITZ	.....	Chimie

Maîtres de Conférences :

M. R. HAKIM	.....	Mathématiques
M. F. LAPSCHER	.....	Mathématiques
Mle M. LEVY (I.U.T.)	.....	Chimie
M. J. LAGARRIGUE (I.U.T.)	.....	Biologie Appliquée
M. Cl. DROGUE (I.S.I.)	.....	Hydrogéologie
M. P. GENESTE (E.N.S.C.M.)	.....	Chimie Physique Appliquée
M. Y. PIETRASANTA (E.N.S.C.M.)	.....	Chimie Appliquée
M. B. LEMAIRE (I.S.I.)	.....	Mathématiques Appliquées, Informatique
M. M. VALADIER	.....	Mathématiques
M. JI. ROBERT (I.U.T. Nîmes)	.....	Génie Electrique
J. O. MAISONNEUVE	.....	Mécanique
M. R. BRUNEL	.....	Physique
M. M. CADENE	.....	Physique
M. P. DELORD	.....	Physique
M. A. PAVIA	.....	Chimie
M. JM. BESSIERE	.....	Chimie
M. JP. BARD	.....	Géologie
M. P. BESANCON (I.S.I.)	.....	Physiologie de la nutrition appliquée à l'alimentation.
M. Y. NOUAZE	.....	Mathématiques
M. J. PETRISSANS	.....	Chimie
M. JY. GAL	.....	Chimie Analytique appliquée
M. C. BENOIT	.....	Physique
M. H. GIBERT (I.S.I.)	.....	Génie Alimentaire
M. A. LIEGEOIS (I.S.I.)	.....	Automatique
M. B. TARODO DE LA FUENTE (I.S.I.)	.....	Biochimie Appliquée et Techniques des Matières alimentaires
M. Y. ESCOUFIER	.....	Informatique
M. A. SANS	.....	Psychophysiologie
M. G. DURAND	.....	Chimie
M. B. FILLIATRE (I.S.I.)	.....	Informatique et Gestion
M. JJ. MACHEIX	.....	Physiologie Végétale
M. P. HINSELIN	.....	Génie Civil
M. Cl. BOKSENBAUM	.....	Informatique
M. G. CAMBON (I.S.I.)	.....	E.E.A.
M. J. FERRIE (I.S.I.)	.....	Informatique
M. E. AKUTOWICZ	.....	Mathématiques

M. Ch. HEBANT	.....	Paléobotanique
M. J. LANCELOT	.....	Géophysique
M. D. AUVERGNE (I.S.I.)	.....	E.E.A.
M. B. LEBLEU	.....	Biochimie
M. C. JOUANIN	.....	Physique
M. M. RIBES	.....	Chimie
M. JP. ROQUE	.....	Chimie
M. JL. AUBAGNAC	.....	Chimie
M. CL. ALIBERT	.....	E.E.A.
Mlle H. ASTIER	.....	Physiologie Animale
M. F. ARTHAUD	.....	Géologie
M. G. ROYO	.....	Chimie Organique - Mesures Physiques
M. Ph. FOUCOU (I.U.T.)	.....	Sciences Economiques

..0\_0\_0\_0\_0\_0.

## A V A N T - P R O P O S

Les recherches qui font l'objet du présent mémoire ont été réalisées de 1974 à 1979, dans le cadre des programmes d'écologie végétale développés par l'Office de Recherches Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M.) au Sénégal.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous ceux qui par leur aide ou leurs conseils m'ont permis de mener ce travail à son terme.

Je prie Monsieur le Professeur M. GODRON d'accepter l'expression de ma profonde gratitude. Il m'a accueilli au Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques L. EMBERGER, et il a fait preuve d'une très large compréhension à l'égard de mes travaux. Je le remercie d'avoir bien voulu assurer la présidence de ce Jury.

Je suis particulièrement sensible à la confiance que Monsieur le Professeur M. GOUNOT m'a accordée depuis qu'il est mon Directeur scientifique. Son accueil a toujours été attentif et bienveillant ; il m'est agréable de le compter parmi les membres de ce Jury.

Ma gratitude s'adresse également à Monsieur R. FAUCK, Inspecteur Général de Recherches à l'O.R.S.T.O.M., qui, malgré ses nombreuses charges a accepté de participer à ce Jury et ne m'a jamais ménagé son aide.

Je remercie Monsieur A. BERGER, Maître de Recherches au Département de Physiologie écologique du Centre EMBERGER, pour sa participation à ce Jury et ses conseils éclairés et amicaux.

Monsieur J. MOINEREAU, Maître de Conférence en Sciences du Sol à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier a bien voulu faire partie de mon Jury, je lui en suis très reconnaissant.

Monsieur F. FOREST, Ingénieur Agronome I.R.A.T. a bien voulu examiner avec intérêt mon travail, il m'est agréable de le compter parmi les membres de ce Jury et je souhaite que le dialogue puisse se développer.

Je remercie Monsieur G. BOUDET, Directeur de Recherches à l'O.R.S.T.O.M., qui fut mon Directeur scientifique et l'initiateur de ce travail, je regrette que ses nombreuses occupations ne lui aient pas permis d'être présent dans ce Jury.

Monsieur P. FRANQUIN, mon Parrain scientifique, n'a cessé de guider et de stimuler le développement de mes travaux, je lui en suis très reconnaissant.



Que tous les membres du Laboratoire d'écologie végétale de l'O.R.S.T.O.M. à DAKAR soient assurés de mon amicale reconnaissance. Le concours efficace et chaleureux de mes collègues m'a toujours été très précieux. Une partie de ce travail, qui fut d'abord un long travail de terrain, n'aurait pu être exécutéesans l'aide efficace du personnel technique de ce Laboratoire, qu'ils en soient remerciés.

Ce travail, sur le terrain, a bénéficié de l'aide morale et matérielle du Docteur A.K. DIALLO, Directeur du Laboratoire National de l'élevage, du Docteur J. VALENZA, de Monsieur SENE, Directeur des Eaux et Forêt du Sénégal, ainsi que de Messieurs les Directeurs du Centre de recherches zootechniques de DAHRA, de la Direction de la Société d'Exploitation des Ressources Animales du Sénégal, du Directeur du ranch de DOLI, et du personnel de la station forestière de MBIDI ; que tous soient remerciés.

Le laboratoire d'écophysiologie du Centre L. EMBERGER m'a accueilli durant les deux années passées en FRANCE ; mon travail a été grandement facilité par les moyens mis à ma disposition, les conseils prodigués et par la gentillesse constamment rencontrée ; que tout son personnel trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Les membres du Département d'écologie générale, qui ont bien voulu discuter mes résultats et m'éclairer de leurs avis sont nombreux ; je les prie d'accepter tous ensemble mes vifs remerciements.

Le Service de l'Ecothèque méditerranéenne a mis à ma disposition son matériel informatique pour le traitement des relevés de végétation ; je remercie grandement Monsieur G. LONG son Directeur et l'ensemble de son personnel.

Ma gratitude s'adresse encore à tous ceux qui, sous une forme ou sous une autre, m'ont apporté leur appui :

- Mes collègues pédologues LEPRUN et C. FELLER.
- Monsieur P. JACQUART, Chef du Département de Physiologie Ecologique
- Monsieur S. RAMBAL qui par sa profonde connaissance du bilan hydrique des sols et de la modélisation m'a été très utile
- Monsieur J.L. SALAGER dont la compétence en informatique m'a été d'un grand secours.

Enfin, que toutes les personnes qui ont contribué à la mise en forme de ce mémoire trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

# SOMMAIRE

---

	Pages
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I - PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE ET DES STATIONS	
1. Localisation géographique et description sommaire des installations.....	5
2. Climat régional	
2.1. Température de l'air.....	9
2.2. Précipitations.....	11
2.3. Humidité relative de l'air et évaporation.....	13
2.4. Caractérisation du climat.....	17
3. Relief et substrat géologique.....	18
4. Sols.....	20
5. Description de la végétation	
5.1. Physionomie générale de la végétation et notions phytogéographiques.....	26
5.2. Etudes locales existantes.....	28
- Conclusion sur la description du milieu.....	31
CHAPITRE II - ETUDE DE LA VEGETATION DES STATIONS	
1. Description et structure de la végétation	
1.1. Composition floristique et spectre biologique.....	36
1.2. Structure de la végétation	
1.2.1. Structure du peuplement ligneux.....	40
1.2.2. Unités de végétation à grande échelle.....	41
1.2.3. Méthodes de mesure utilisées pour l'analyse quantitative de la végétation herbacée.....	48
1.2.4. Etude de la structure de la végétation herbacée et des modes de répartition des espèces par l'analyse factorielle des correspondances.....	49

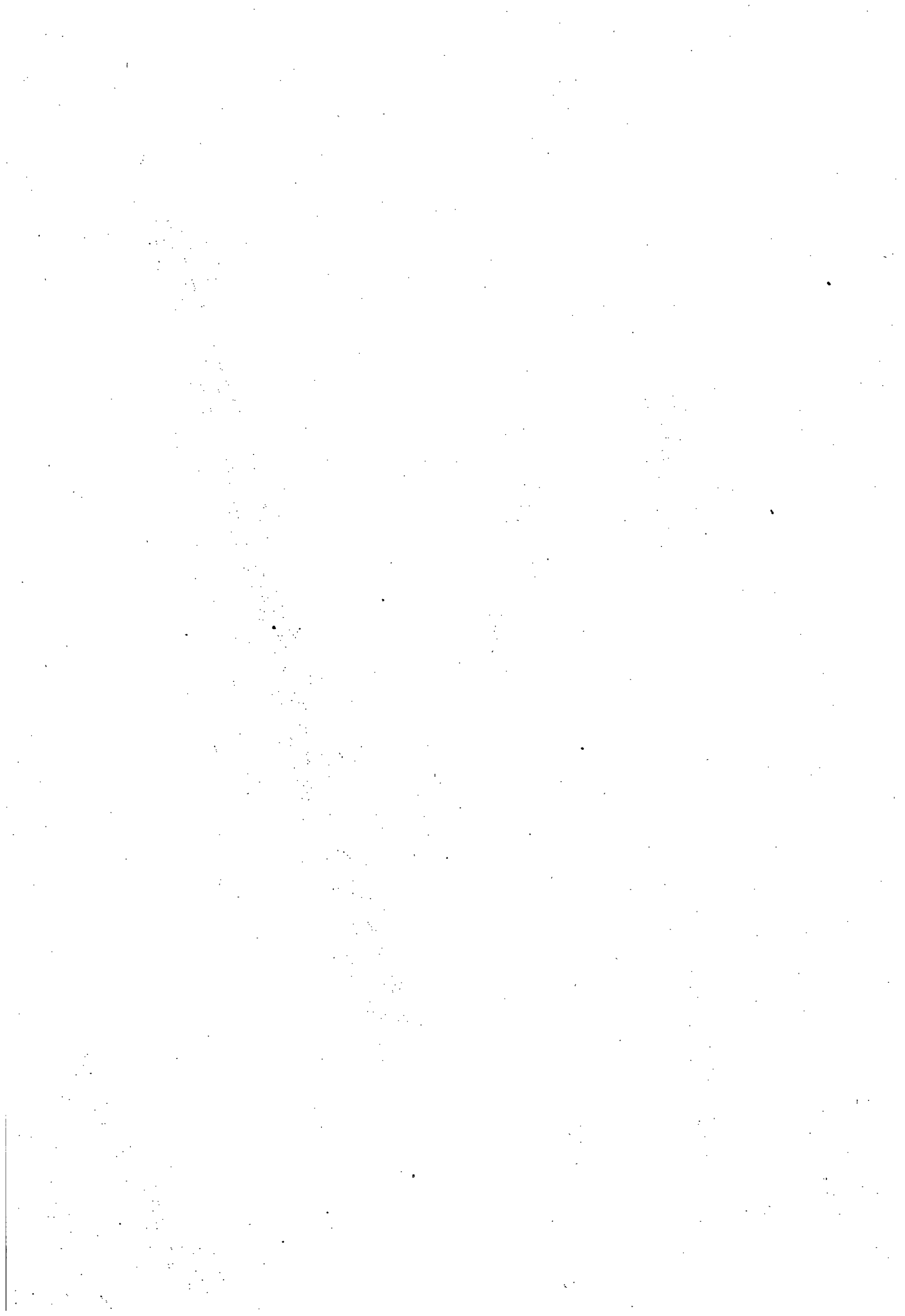
	Pages
2. Mise en place du peuplement, variations interannuelles et évolution	
2.1. Mise en place du peuplement	
2.1.1. Production de semences et stock de graines.....	65
2.1.2. Germination et levée.....	66
2.2. Variations interannuelles entre 1975 et 1978 de la présence et de la fréquence des espèces	
2.2.1. Variations au niveau global des parcelles.....	71
2.2.2. Contributions spécifiques au niveau des principaux groupements	
2.2.2.1 Contributions spécifiques en 1975.....	74
2.2.2.2. Comparaison entre les contributions spécifiques présence et les contributions spécifiques massiques.....	74
2.2.2.3. Evolution des contributions spécifiques au cours d'une même saison de végétation.....	77
2.2.2.4. Evolution interannuelle.....	79
2.3. Tendances évolutives, action de la sécheresse et du pâturage.	
2.3.1. Evolution de la flore et de la végétation.....	83
2.3.2. Action de quelques facteurs sur la dynamique de la végétation, tendances évolutives actuelles	86
3. Production de biomasse aérienne par la strate herbacée	
3.1. Aspects généraux de la production de biomasse et de sa mesure en zone sahélienne.....	89
3.2. Résultats de production globale épigée.....	90
3.3. Détermination de la production aérienne nette.....	92
3.3.1. Méthode.....	92
3.3.2. Résultats.....	94
3.4. Cycle de production.....	104
 CHAPITRE III - ETUDE DU BILAN HYDRIQUE ET DE SES COMPOSANTES EN TANT QUE FACTEURS DE LA PRODUCTION	
1. Eléments climatiques du bilan hydrique.....	110
1.1. Précipitations	

	Pages
1.1.1. Caractérisation des précipitations annuelles	
1.1.1.1. Distribution.....	111
1.1.1.2. Variabilité.....	115
1.1.2. Répartition des précipitations	
1.1.2.1. Début et fin de saison des pluies....	118
1.1.2.2. Répartition annuelle.....	119
1.1.2.3. Répartition décadaire.....	122
1.1.3. Analyse fréquentielle des précipitations déca- daïres.....	122
1.2. Demande évaporative : Evapotranspiration	
1.2.1. Méthodes de détermination	
1.2.1.1. Utilisation de l'évaporomètre piche...	128
1.2.1.2. Utilisation des bacs d'évaporation....	129
1.2.1.3. Utilisation de la formule de PENMAN .	134
1.2.2. Résultats	
1.2.2.1. Comparaison préliminaire des résultats des différentes méthodes.....	135
1.2.2.2. Valeurs annuelles et mensuelles d'ETP.	139
1.2.2.3. Valeurs décadaïres.....	141
1.2.3. Discussion.....	141
1.3. Bilan hydrique climatique. Notion de période humide..	146
2. Bilan hydrique du sol	
2.1. Caractéristiques hydrodynamiques des sols	
2.1.1. Densité apparente et porosité.....	156
2.1.1. Potentiel et dynamique de l'eau dans le sol....	158
2.1.3. Capacité de rétention et réserve utilisable....	161
2.1.4. Perméabilité et conductivité hydraulique.....	171
2.1.5. Discussion.....	172
2.2. Etude des profils hydriques et suivi de l'humidité des sols	
2.2.1. Evolution des profils hydriques à FETE-OLE.....	174
2.2.2. Evolution des profils hydriques à DAHRA-nord...	177
2.2.3. Evolution des profils hydriques à DAHRA-sud....	181

	Pages
2.2.4. Evolution des profils hydriques à DOLI-nord.....	181
2.3. Evolution des réserves, bilan hydrique et détermination de l'évapotranspiration réelle	
2.3.1. Bilan hydrique du sol à FETE-OLE.....	184
2.3.2. Bilan hydrique du sol à DAHRA-nord.....	191
2.3.3. Bilan hydrique du sol à DAHRA-sud.....	196
2.3.4. Evolution des réserves à DOLI-nord.....	203
2.3.5. Discussion.....	203
2.4. Caractérisation des régimes hydriques des sols et du cycle de l'eau dans les toposéquences étudiées	
2.4.1. FETE-OLE.....	205
2.4.2. DAHRA-nord.....	208
2.4.3. DAHRA-sud.....	209
2.4.4. DOLI-nord.....	209
2.4.5. Conclusion.....	210
 3. Modélisation du bilan hydrique	
3.1. Description du modèle	
3.1.1. Calcul de ETR.....	212
3.1.2. Coefficients ou paramètres de réglage.....	214
3.1.3. Calcul de la RU croissante.....	214
3.1.4. Entrées et sorties du modèle.....	216
3.2. Calibration, validation et résultats.....	216
3.3. Analyse de la sensibilité du modèle.....	222
3.4. Utilisation en simulation sur de longues périodes....	225
4. Action du bilan hydrique sur la production végétale	
4.1. Correlations entre la production et certains éléments du bilan hydrique.....	229
4.2. Détermination d'une fonction de production à partir des éléments du bilan hydrique	
4.2.1. Bases du modèle.....	235
4.2.2. Entrées et sorties du modèle.....	241
4.2.3. Calibration, validation et intérêt du modèle....	242

CHAPITRE IV - APPLICATION A LA DETERMINATION DES  
POTENTIALITES

1. Etude des potentialités agronomiques régionales à partir des études fréquentielles du bilan hydrique climatique et du bilan hydrique du sol.....	254
2. Détermination des capacités de charge des parcours à partir des potentialités de production des phytocénoses naturelles estimées par modélisation	
2.1. Aspects généraux.....	259
2.2. Résultats.....	262
2.3. Difficultés d'extension des résultats au niveau régional.....	264
3. Intérêt de la méthode utilisée dans le cadre de l'étude écologique d'une zone en vue de son aménagement.....	266
CONCLUSION.....	269
BIBLIOGRAPHIE.....	276
ANNEXES.....	292



## I N T R O D U C T I O N

Le Sahel est généralement défini comme une zone écologique caractérisée par un climat tropical sec et par une végétation composée essentiellement d'herbacées annuelles et de quelques rares ligneux. Au sens large, le Sahel est compris comme une bande de territoire située au Sud du SAHARA entre les isohyètes 100 et 600 mm, de la côte atlantique de l'Afrique de l'Ouest à la Mer Rouge sur une largeur moyenne de 450 km. Les limites précises et les subdivisions données à cette zone varient suivant les auteurs (BOUDET, 1975 ; LE HOUEROU, 1977 ; KETELAARS, 1978 ; TROCHAIN, 1980).

L'élevage traditionnel est le principal moyen de vivre de la quasi totalité de la population sahélienne. Cette population était estimée en 1974 (FAO, 1977) à 7 700 000 habitants dont 5 000 000 concentrés dans le secteur sahélo-soudanien. Le cheptel était estimé en 1970 à : 21 860 000 bovins et 39 271 000 ovins et caprins ; en 1974 après la sécheresse les effectifs avaient baissé à : 15 600 000 bovins et 34 660 000 ovins et caprins (KETELAARS, 1978). On assiste depuis à un nouvel accroissement de cheptel. Cet élevage repose sur l'utilisation des pâturages naturels. Si dans le passé, un équilibre existait entre les ressources végétales et leur exploitation, cet équilibre a été bouleversé du fait de l'accroissement des populations, tant humaines qu'animales. L'amélioration des conditions sanitaires a permis cet accroissement. Il s'y rajoute le relâchement ou l'abandon des modes coutumiers d'exploitation pour entraîner une surexploitation et une dégradation des pâturages. Les aléas climatiques, notamment la sécheresse de 1970 à 1974 ont aggravé ce phénomène. La végétation naturelle constituant la seule ressource actuellement exploitable de la région le maintien de la population et le développement agricole passent par une mise en valeur rationnelle, permettant la restauration, le maintien et, si possible l'accroissement du potentiel de production végétale.

Dans cette zone, il y a beaucoup à faire et à découvrir, en vue de gérer rationnellement l'espace pastoral sahélien (BOUDET, 1974). Outre les travaux préliminaires d'inventaire et de cartographie des pâturages, la demande en connaissances porte essentiellement sur deux points :

- la connaissance de la production des pâturages naturels et de sa variabilité.
- l'étude de la dynamique des groupements constituant ces pâturages, sous l'influence des aléas climatiques et des actions d'exploitation.

A la suite des travaux réalisés à partir de 1969, dans le cadre du Programme Biologique International en zone sahélienne au Sénégal, notre travail avait pour but l'étude de l'action du facteur hydrique sur la production de quelques phytocénoses. Lorsque ce travail a débuté, il existait un certain nombre d'études similaires dans les zones arides : notamment en zone aride méditerranéenne : Projet parcours sud en Tunisie (FLORET et PONTANIER, 1978), en Israël (NOY-MEIR, 1973, 1975) ; mais aussi en zone



aride au U.S.A. (LAUENROTH et SIMS, 1973) et en Australie (C.S.I.R.O.) (FITZPATRICK et NIX, 1969 ; CHRISTIE, 1978). En zone sahélienne, il existait de nombreuses mesures de biomasse (voir § 3.1 chapitre II) effectuées généralement de façon ponctuelle dans le temps lors de la cartographie des pâturages. Mais il n'existait aucune étude concomitante de la production et du bilan hydrique. Pour ce dernier, les seuls travaux réalisés étaient ceux de AUDRY (1967) au Tchad, non totalement publiés et les travaux de DANCETTE (1973) au Sénégal sur parcelles cultivées. Ultérieurement, deux études similaires furent engagées : le projet "Production primaire au Sahel" au Mali et le projet D.G.R.S.T. "Mare d'OURSI" en Haute Volta.

La production végétale herbacée dépend de nombreux facteurs, les uns propres à la végétation tels que la structure du peuplement et sa composition floristique, et d'autres constituant le milieu environnant tels que l'alimentation hydrique ou la fertilité du sol. Une des caractéristiques de la production végétale dans la zone aride est sa grande variabilité dans l'espace et dans le temps. Cette variabilité est la source de deux difficultés importantes qui sont d'une part les problèmes d'échelle spatiale, d'autre part les problèmes de durée de l'étude. Les niveaux d'étude doivent prendre en compte la diversité du tapis végétal et des situations écologiques, mais aussi la possibilité d'intégration des résultats à un niveau utilisable.

Le présent travail a pour but l'étude du bilan hydrique et le rôle que jouent ses différentes composantes vis à vis de la production végétale, avec le double objectif, d'une part d'accroître la connaissance des processus écologiques afin de soulever les points essentiels justifiant une recherche plus approfondie, d'autre part de fournir une méthode susceptible d'être utilisée pour déterminer les potentialités de production des systèmes écologiques en vue de leur aménagement. En zone sahélienne, la complexité des systèmes écologiques n'est pas apparente d'emblée ; à petite échelle la perception est celle d'un espace plutôt homogène. Dans une première phase, nous avons cherché à caractériser la diversité écologique au niveau de parcelles choisies, ce qui nous a conduit à déterminer quatre niveaux d'étude correspondant à des seuils d'homogénéité des différents facteurs. Suivant ces différents niveaux, nous avons étudié la végétation dans sa structure, sa mise en place et sa production, et le bilan hydrique dans ses différents constituants. La durée très limitée dans le temps des études ne permet pas de saisir les importantes variations interannuelles. Les résultats obtenus ne représentent donc pas une moyenne fiable et significative. Notre travail s'est donc orienté vers la modélisation simple des phénomènes hydriques et de la production, qui permet une simulation de la variabilité des phénomènes et leur analyse en termes de fréquences.

Le présent travail est divisé en quatre chapitres, le premier donne une présentation succincte de la zone étudiée en insistant sur ses principales caractéristiques et sur la diversité écologique décelable aux échelles retenues.

Dans le second chapitre est abordée l'étude descriptive de la végétation des stations étudiées. Outre l'étude de la composition floristique et de la structure du tapis herbacé, l'accent est mis sur l'importance de la mise en place du peuplement, et sur les variations inter-annuelles de fréquence des espèces. Les résultats des mesures de biomasse et leur signification sont donnés et discutés, ainsi qu'une méthode de détermination de la productivité aérienne nette.

Le troisième chapitre porte sur l'étude du bilan hydrique. Dans l'étude de ses composantes, on peut distinguer deux niveaux. Le niveau du bilan hydrique climatique, qui détermine le cycle de production en date et en durée, ses variations interannuelles et ses variations zonales, et le niveau du bilan hydrique édaphique, où le stockage et la redistribution des précipitations conditionnent la production et ses variations stationnelles. L'étude est effectuée en reprenant ces deux niveaux. Un modèle simple de simulation du bilan hydrique est proposé. Il est utilisé pour simuler, à partir des données existantes, les variations des éléments du bilan et en déterminer la fréquence.

L'action du facteur eau sur la végétation se traduit, d'une part par la répartition des principales espèces et groupements, d'autre part par la liaison existant entre le bilan hydrique et la production. Cette liaison est schématisée par un modèle simple, permettant la simulation de la production.

Le chapitre quatre concerne les possibilités d'utilisation des résultats obtenus et des modèles proposés pour orienter l'agriculture vers une meilleure utilisation des ressources en eau, et pour déterminer les potentialités de production des pâturages naturels.

En conclusion, nous discuterons de la démarche poursuivie et des méthodes utilisées, et nous montrerons l'intérêt de cette étude tant sur le plan de la compréhension du milieu sahélien, que sur le plan des applications à la détermination des potentialités pour l'élevage; en soulignant la place que peut occuper ce type d'étude dans le cadre de l'étude écologique intégrée d'une zone en vue de son aménagement.



CHARITRE I

PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE .  
ET DES STATIONS



## 1 - LOCALISATION GEOGRAPHIQUE ET DESCRIPTION SOMMAIRE DES INSTALLATIONS

En 1969 l'étude d'une biocénose sahélienne fut entreprise dans le nord du Sénégal : les travaux, rattachés au Programme Biologique International, avaient pour objectif, en écologie végétale, la mesure de la production primaire dans cette région, (BILLE et al., 1972 b ; BILLE, 1977a ; POUPON, 1980). Les accidents climatiques des années 1970 à 1974 qui marquèrent la zone, incitèrent à poursuivre les mesures de façon à étudier les conséquences de la période de sécheresse sur l'équilibre de la phytocénose. Ces études furent conduites conjointement par M. BILLE et POUPON. Pour ces études le site de FETE-OLE (République du Sénégal) avait été choisi. Il est situé en limite de la zone sylvopastorale dite des "six forages", espace réservé au bétail et au reboisement, mais hors de la zone d'influence de ces forages dont les plus proches (Mbidi et Tatki) sont à 25 km. Il se trouve au sud de la zone bordant la vallée du Sénégal appelée "Diéri", dont il est nettement distinct du point de vue sol et végétation. Il constitue notre premier point d'étude.

Le dispositif de terrain comprend un quadrat de un km de côté, matérialisé par un réseau de bornes repères et entouré d'un double pare-feu. Une surface de 25 ha est mise en défens grâce à une clôture de fils barbelés. Si la mise en défens contre le pâturage a été efficace depuis 1969, par contre le feu a parcouru partiellement le terrain à trois reprises (1969, 1974, 1976). Une base sommaire édiflée à proximité du quadrat comprend des abris pour le matériel et les hommes, ainsi qu'un petit poste météorologique avec thermo-hygrographe et pluviomètre.

L'extension des études amena en 1974 à choisir deux nouvelles implantations, DAHRA et DOLI, échelonnées selon le gradient climatique nord-sud. (voir figure 1). Le choix et la délimitation des nouvelles parcelles d'étude furent effectués en commun avec M. BILLE, POUPON et GROUZIS. Le choix a été effectué à partir d'une part de la carte des parcours de VALENZA et DIALLO (1972), d'autre part, en tenant compte des types de sols. La localisation a été déterminée par étude des photographies aériennes, suivie de prospections sur le terrain.

Le second point étudié se situe dans le Centre de Recherches Zootechniques de DAHRA dépendant de l'Institut Sénégalais de Recherches Agronomiques (I.S.R.A.). Ce Centre, situé dans la parties sud du FERLO sableux, en dessous de la vallée sèche du FERLO, légèrement au nord de la route DAHRA-LINGUERE, couvre une superficie de 6 800 hectares. Là, deux parcelles de cinq hectares chacune ont été retenues : DAHRA nord et DAHRA sud, installées sur les deux types de végétation et de sol les plus représentatifs de la concession du centre.

La parcelle de DAHRA-nord a été choisie au nord-ouest de la concession sur dunes fixées ; ces dunes au relief amolli de direction NE-SW présentent des dénivellations de 3 à 6 m. Le sol y est uniformément sableux avec très peu d'argile même dans les interdunes. La végétation herbacée y est peu dégradée et constituée essentiellement par une formation à *Tephrosia purpurea*.

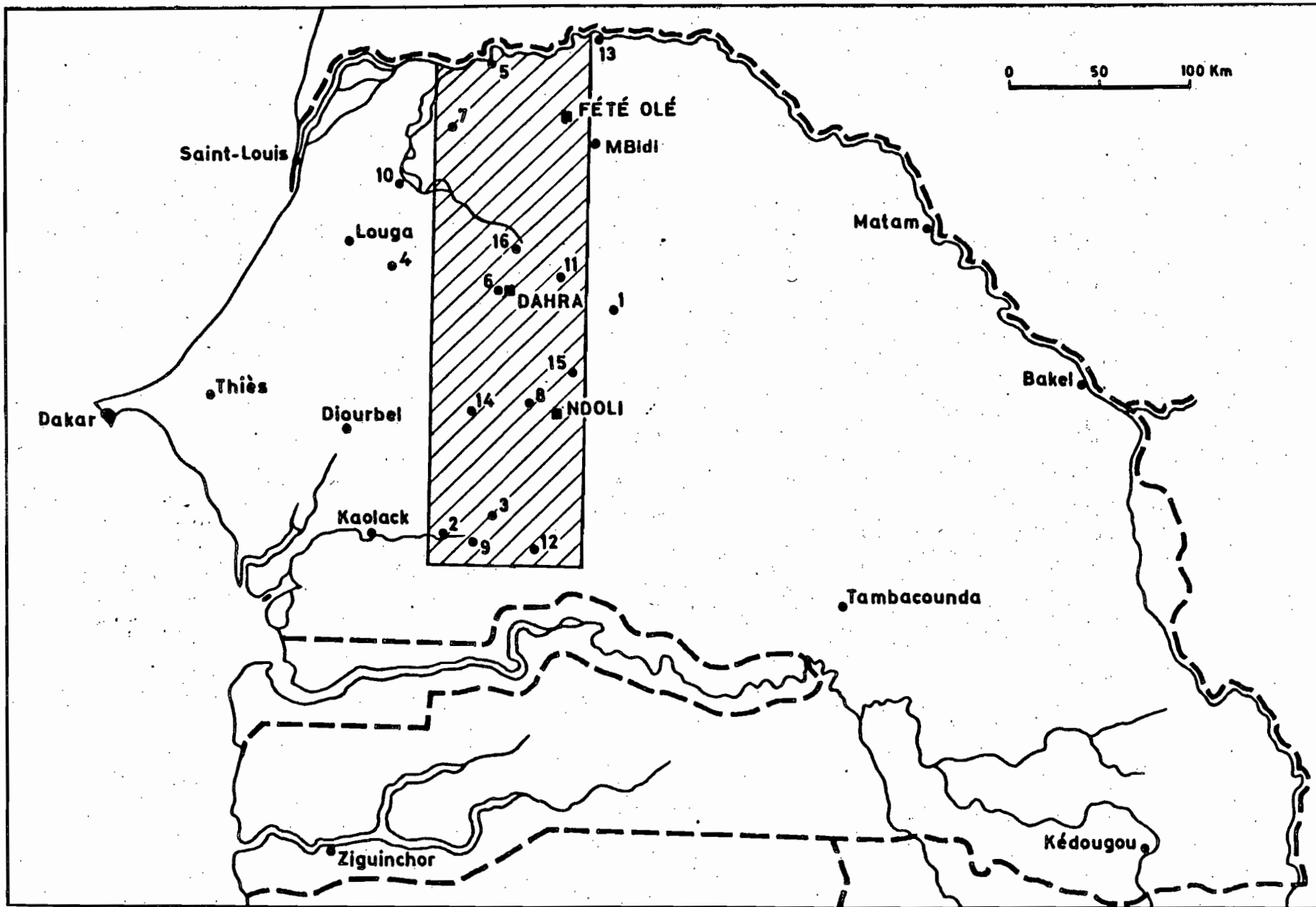


Fig. 1 - Carte du Sénégal - Localisation de la région étudiée et des stations.

La parcelle DAHRA sud est sur formation sableuse de type plus ancien. Les dénivellations y sont très faibles. Le sol est argilo-sableux ou localement argileux. La végétation est très dégradée ; le tapis herbacé est composé en grande majorité par *Zornia glochidiata*.

Le troisième point d'étude, le plus méridional, est également constitué de deux parcelles de cinq hectares chacune, il est compris dans le ranch de DOLI. Ce ranch est situé dans la partie occidentale du "FERLO" sensu lato, et plus précisément dans le "FERLO DJOLOFF" (RAYNAL 1963), à 60 km au sud de DAHRA.

La parcelle de DOLI nord a été choisie dans une zone sableuse. Elle porte une végétation assez dégradée. La parcelle de DOLI sud a été implantée dans la partie du ranch située sur sol gravillonnaire. Elle porte une végétation non dégradée avec strate arbustive importante et strate herbacée à *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*, et *Aristida kerstingii*.

Contrairement à ce qui a été fait à FETE-OLE, les parcelles de DAHRA et DOLI ne sont pas mises en défens mais soumises au rythme normal d'exploitation par les animaux du Centre de Recherches Zootechniques ou du ranch.

L'implantation des parcelles au sein de structures établies (C.R.Z., ranch) nous a permis de bénéficier des infrastructures existantes.

L'étude du bilan hydrique nous a conduit à installer ou à renforcer l'équipement instrumental des postes météorologiques dans nos stations d'étude. L'impossibilité de faire effectuer à FETE-OLE des relevés réguliers et précis autres que ceux des précipitations, nous a amené à renforcer le poste de MBIDI, station appartenant aux Eaux et Forêts et distante de 25 km de FETE-OLE dont les coordonnées sont 16° 08 de latitude nord, 14° 56 de longitude ouest. Une description des stations et du matériel utilisé pour la mesure des données climatiques figure en annexe I.

Le tableau I donne les coordonnées géographiques des trois stations étudiées.

TABLEAU I  
COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DES TROIS STATIONS ETUDIEES

Station	Longitude W	Latitude N
FETE-OLE	15° 06'	16° 14'
DAHRA	15° 27'	15° 20'
DOLI	15° 09'	14° 45'



La présentation des parcelles choisies et la description des facteurs du milieu ont fait l'objet de plusieurs publications : BILLE et al. (1972 a et 1972 b), BILLE et POUPON (1972 a et 1972 b), BILLE (1977 a), CORNET et POUPON (1978), POUPON (1978). Nous ne rappellerons, en faisant largement appel aux publications précédentes, que les faits essentiels à la compréhension du présent travail.

## 2 - CLIMAT REGIONAL

La région étudiée est caractérisée par un climat tropical sec de type sahélien à sahélo-soudanien. Selon la classification d'AUBREVILLE (1949) FETE-OLE se situe en limite des régions sub-désertiques et sahélo-sénégalaises, avec 9 mois de saison sèche et une pluviosité voisine de 300 mm. Au sud, selon AUBREVILLE (1949) et AUDRY (1962), la limite entre les domaines sahélien et soudanien se situerait vers le quinzième degré de latitude nord, soit entre les stations de DAHRA et DOLI.

La comparaison entre les différentes stations météorologiques de la région est délicate du fait de la grande variabilité dans le nombre d'années de mesure et dans la nature des mesures réalisées. Nous allons essayer d'en dégager les aspects principaux : la pluviométrie et la demande évaporative seront examinées plus en détail avec les facteurs climatiques du bilan hydrique (chapitre III, § 1). Les données climatiques recueillies dans les stations étudiées ont été publiées sous forme de rapports CORNET (1976, 77, 78, 79). L'analyse des données de FETE-OLE a été réalisée par POUPON (1978).

Dans la zone considérée, le climat dépend essentiellement de la dynamique et de l'interaction de deux masses d'air :

- L'air tropical continental, masse d'air chaud et sec venant de l'est et du nord-est, il est souvent désigné sous le nom "*d'Harmattan*".
- L'air tropical maritime, originaire de l'anticyclone de Sainte HELENE, vient du sud-ouest et est communément désigné sous le nom de *mousson*.
- L'air boréal maritime, lié à l'anticyclone des ACORES et qui influence fortement le climat côtier sénégalais, n'a ici, à l'est du lac de GUIERS, que peu d'importance. "Le contact entre les deux masses d'air s'appelle front intertropical ou FIT, la *mousson* jouant le rôle de masse froide par rapport à l'*Harmattan*, elle s'enfonce comme un coin sous cette masse d'air sec... Au contact des deux masses d'air et plus au sud, dans la masse d'air de la *mousson*, il se produit des formations orageuses qui donnent lieu dans certaines conditions, à des précipitations" (RODIER, 1975a). Le FIT se déplace au cours de l'année du 7ème degré de latitude nord en janvier au 21ème en août, suivant ainsi avec un retard le mouvement apparent du soleil. L'arrivée du FIT au SAHEL est suivie d'averses, qui se reproduisent plus ou moins régulièrement jusqu'à son retrait vers le sud. La saison des

pluies, au passage du FIT, se produit donc de juin à octobre. En dehors de cette période, c'est la saison sèche. Cependant, durant la période de janvier à avril, à la suite d'invasions d'air boréal, des perturbations peuvent se produire et entraîner des pluies faibles. Ces pluies connues sous le nom de "Heug", et dont l'importance décroît du nord vers le sud, ne présentent aucun intérêt pour la végétation et l'agriculture.

## 2.1 - Température de l'air sous abri

La température est directement liée à l'énergie solaire disponible, mais l'intervention de la pluie modifie cette relation et, en fait, "le régime thermique est l'image de l'interaction pluie, rayonnement solaire" (RIOU, 1975). D'après BILLE (1977a) le rayonnement solaire global n'est jamais inférieur à  $16\ 700\ \text{KJ.m}^{-2}$  par jour dans la zone étudiée.

Les températures sont généralement élevées. La moyenne annuelle est supérieure à  $28^{\circ}\text{C}$ . La courbe des minimums moyens avec un maximum en juillet et un minimum en janvier reflète approximativement la courbe thermique solaire. Au contraire, celle des maximums présente deux sommets, l'un en mai, l'autre en octobre, séparés par une dépression nette en saison humide (voir fig. 2).

Le tableau II montre que, pour 5 stations échelonnées en latitude dans la zone étudiée, les moyennes mensuelles diffèrent peu. Dans les stations septentrionales (FETE-OLE, PODOR), la température moyenne des mois frais est plus faible et celle des mois chauds est plus forte que dans les stations plus méridionales.

TABLEAU II

TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES EN  $^{\circ}\text{C}$

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
PODOR (1968/1977)	23,1	25,2	27,5	30,0	31,8	32,5	30,5	29,9	30,7	31,0	27,5	24,0
FETE-OLE (sep. 69-déc.78)	23,9	25,5	27,8	30,2	32,1	32,2	30,5	30,4	30,4	31,3	28,2	25,0
MBIDI (juin 75-déc.78)	22,8	24,7	27,7	30,3	30,3	30,8	29,3	29,2	28,3	29,1	26,8	23,7
DAHRA (juin 75-déc.78)	24,4	25,8	28,7	29,8	30,3	31,1	29,9	29,9	28,8	30,0	27,7	25,2
LINGUERE (1968 - 1977)	24,6	26,8	28,5	30,2	31,2	31,3	29,5	28,8	28,8	30,0	21,0	25,4

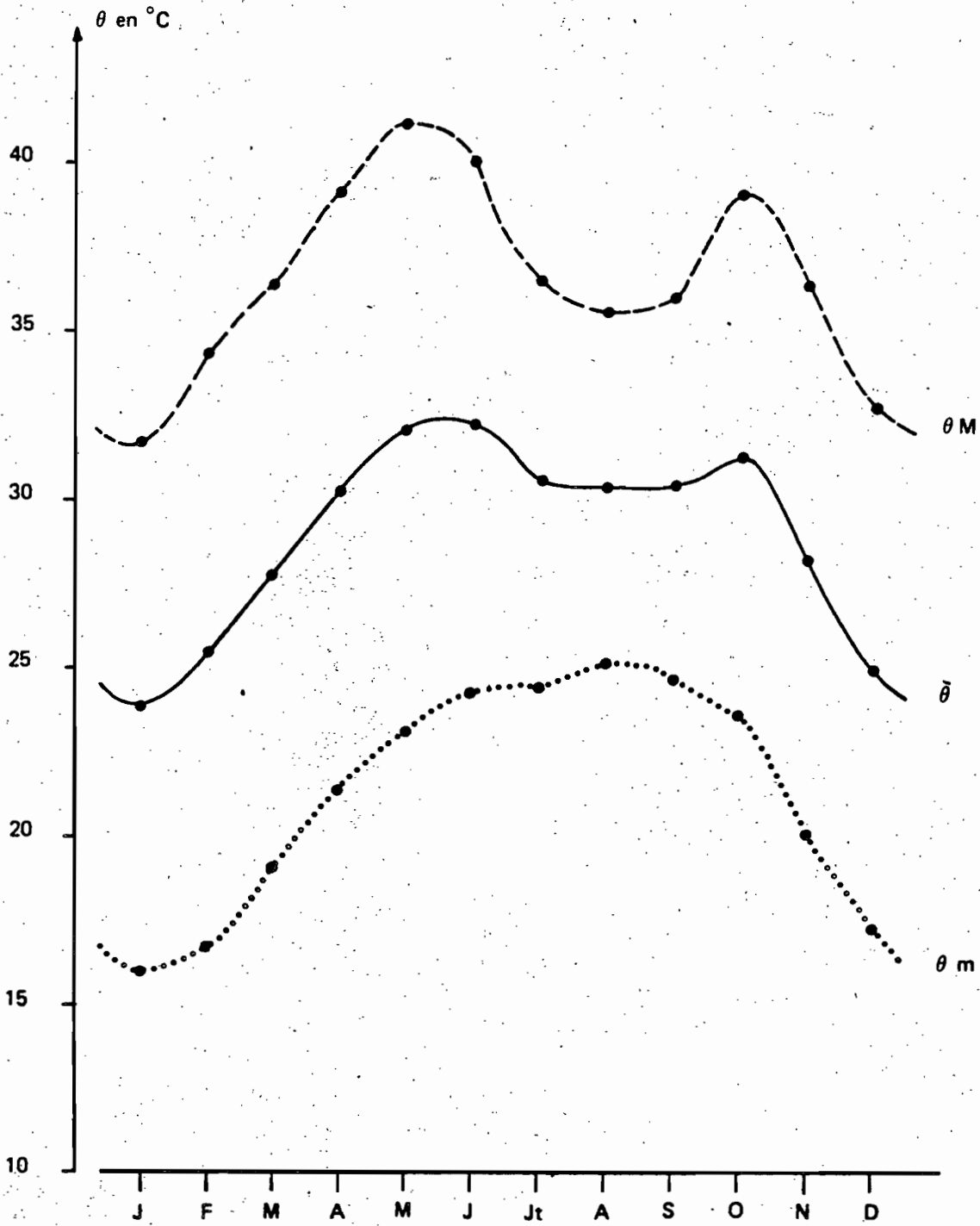


Fig. 2 Évolution des températures maximums et minimums et moyennes mensuelles

FETE-OLE (sept. 1969-déc. 1978)

Les amplitudes thermiques journalières sont fortes en saison sèche et faibles en saison de pluies. Les valeurs extrêmes notées pour FETE-OLE, (POUPON, 1978) vont de 2°C en juillet, août et septembre, à 29°C en février.

Au cours de la période d'observation les valeurs absolues de température suivantes ont été enregistrées :

FETE-OLE : maximum absolu 49°C le 02/05/73 et le 30/05/78  
minimum absolu 9°C le 04/02/72

MBIDI : maximum absolu 48°C le 15/04/77  
minimum absolu 9°C le 05/01/76

DAHRA : maximum absolu 45°C le 04/06/77  
minimum absolu 7,5°C le 19/01/76

Le nombre annuel moyen de jours où :

- la température moyenne est inférieure à 20°C, est de :

- . 3 jours à FETE-OLE
- . 6 jours à MBIDI
- . 3 jours à DAHRA

- la température moyenne est supérieure à 30°C, est de :

- . 169 jours à FETE-OLE
- . 106 jours à MBIDI
- . 127 jours à DAHRA

## 2.2. - Précipitations

Les précipitations constituent le facteur déterminant pour la végétation et l'agriculture en zone sahélienne. Elles sont caractérisées par la quantité de pluie, sa répartition et sa variabilité. Le nombre d'observations nécessaires pour obtenir des moyennes stables et représentatives est très grand dans la zone sèche, car la variabilité inter-annuelle est importante. Dans l'ensemble, on peut considérer, pour la zone étudiée, que les valeurs "normales" annuelles des précipitations varient de 300 mm au nord, à 600 mm au sud. La période 1970-1978 a été une période très déficitaire, avec notamment une succession de 5 années sèches : 1970 à 1974. Le tableau III montre les valeurs annuelles des précipitations durant cette période, dans les stations de DAHRA et FETE-OLE, ainsi que pour deux stations les encadrant géographiquement : PODOR et LINGUERE.

TABLEAU III  
PRECIPITATIONS ANNUELLES

Station		1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	Moy. pé- riode
PODOR	Total	255,1	136,7	109,7	153,0	151,1	225,2	249,1	132,4	304,0	190,7
	nbre. de j.	20	16	15	21	22	32	29	11	28	18
FETE-OLE	Total	128,7	202,2	33,3	208,7	316,0	311,2	346,4	126,2	340,1	233,6
	nbre. de j.	13	14	8	13	12	23	18	12	19	15
DAHRA CRZ	Total	209,5	276,3	273,9	258,9	922,7	482,5	369,6	280,8	292,7	307,4
	nbre. de j.	25	23	16	21	30	32	30	22	31	26
LINGUERE	Total	201,4	328,3	240,4	255,4	330,0	478,9	378,4	331,1	317,0	317,9
	nbre. de j.	39	35	22	33	34	37	47	27	41	35

Les moyennes sur la période sont nettement inférieures aux moyennes calculées sur l'ensemble des observations (51 ans à PODOR, 38 ans à LINGUERE, 21 ans à DAHRA-CRZ).

La variation inter-annuelle est forte ; ainsi pour FETE-OLE, sur une courte période d'observations, les précipitations varient dans le rapport de 1 à 10 (33,3 mm en 1972 et 340,1 mm en 1978).

Le nombre de jours de pluies est faible dans l'année. Ce nombre croît du nord vers le sud : 20 jours à FETE-OLE et PODOR, 30 à DAHRA et environ 40 à DOLI. La variabilité du nombre de jours de pluie est moindre que celle des totaux annuels.

Le tableau IV donne la répartition annuelle moyenne des pluies de saison humide. On note une concentration générale des pluies entre juin et octobre et, plus particulièrement, en août et septembre, dont la pluviosité est supérieure à 50 % du total annuel.

TABLEAU IV

REPARTITION MENSUELLE MOYENNE DES PLUIES DE SAISON HUMIDE EN % DU TOTAL ANNUEL

STATION	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	OCTOBRE
PODOR (1931-1971)	4,6	19,7	37,9	27,1	7,8
FETE-OLE (1970-1978)	5,5	14,1	48,2	24,8	5,6
DAHRA-CRZ (1970-1978)	6,5	22,3	37,0	27,8	4,6
LINGUERE (1931-1971)	5,5	19,7	37,7	25,8	9,2

Cette répartition présente des variations importantes d'une année à l'autre ; ainsi, on a en % du total annuel, les valeurs suivantes :

		juin	juillet	août	septembre	octobre	Autres mois
FETE-OLE	: 1972	11,8	0	34,4	7,1	34,1	11,6
	: 1978	10,3	5,0	45,6	31,2	7,4	0,5
DAHRA-CRZ	: 1972	32,8	23,3	19,2	13,0	11,7	0
	: 1978	14,6	31,7	11,9	29,0	5,9	6,9

La répartition est également très variable entre les stations dans une même année. La figure 3 montre, pour 1975, les différences de répartition décadaires entre trois stations : FETE-OLE, DAHRA et DOLI.

Les précipitations seront étudiées en détail au chapitre III § 1 en tant qu'élément du bilan hydrique climatique.

### 2.3 - L'humidité relative de l'air et l'évaporation

Dans la zone étudiée, les influences océaniques sont très réduites et le climat est nettement continental. L'humidité de l'air varie essentiellement en fonction de la dynamique des masses d'air, du vent et de la pluviosité.

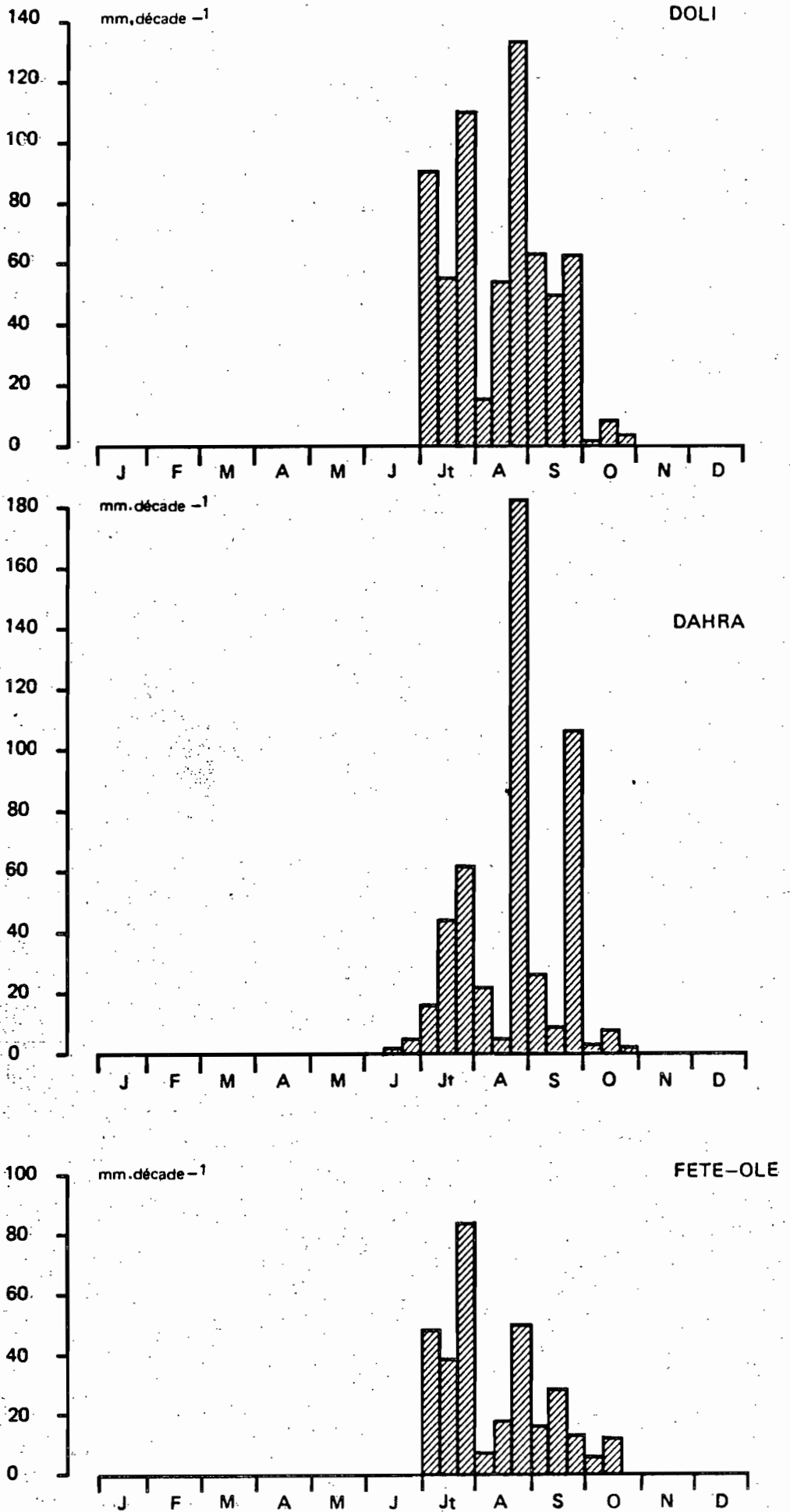


Fig. 3 Précipitations décadaires en 1975

TABLEAU V

HUMIDITES RELATIVES MOYENNES MENSUELLES EN %

STATION	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D
PODOR <sup>x</sup> (51-60)	34	31	28	27	31	44	57	66	68	58	47	41
FETE-OLE (70-78)	30	34	35	40	40	49	59	64	63	46	33	34
M'BIDI (75-78)	42	37	30	40	39	52	63	63	72	48	33	40
DAHRA-CRZ (75-78)	36	31	34	40	45	55	63	67	70	56	36	38
LINGUERE <sup>x</sup> (51-60)	28	28	29	34	41	52	66	75	77	64	46	35

x Pour ces stations  $\bar{h}$  humidité moyenne =  $\frac{h_{06^h} + h_{12^h} + h_{18^h}}{3}$

Pour les autres stations  $\bar{h} = \frac{hM + hm}{2}$

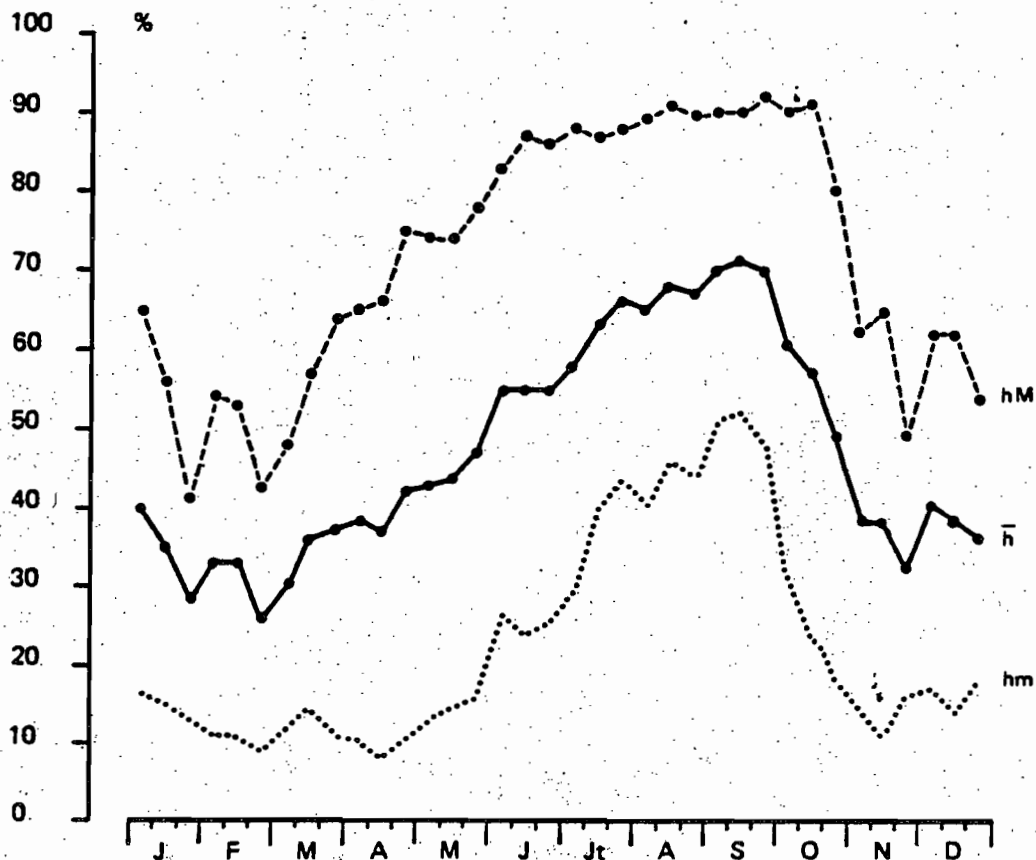


Figure 4 : Humidité relative de l'air, moyennes décadaires DAHRA (1975-1978)



Le tableau V donne, pour 5 stations, les moyennes mensuelles de l'humidité relative. Elle passe par un minimum en saison sèche en janvier-février, puis augmente à partir de mai. L'arrivée des masses d'air humide précède la saison des pluies ; ainsi, en juin les humidités relatives sont plus élevées, bien que les précipitations soient encore faibles. Cet accroissement de l'humidité relative semble correspondre au démarrage de la végétation arbustive (POUPON, 1980).

La figure 4 montre, pour DAHRA, l'évolution des valeurs décadaires maximums  $hM$ , minimums  $hm$  et moyennes  $\bar{h}$ . On voit que l'amplitude entre les maximums et les minimums est élevée. Les valeurs moyennes recouvrent des variations journalières importantes, notamment en saison sèche. Sous l'action de l'Harmattan, des valeurs minimums très basses (inférieures à 5 %) sont atteintes fréquemment.

La demande évaporative, considérée comme élément climatique, est caractérisée par la notion d'évapotranspiration potentielle (ETP). L'évaporation est à la fois un phénomène de diffusion (transport de vapeur d'eau dans l'air) et un phénomène énergétique. Elle dépend de nombreuses variables climatiques.

Le tableau VI donne les valeurs moyennes mensuelles d'ETP calculées par la méthode de PENMAN.

TABLEAU VI - VALEURS MOYENNES MENSUELLES EN mm d'ETP CALCULEES  
PAR LA METHODE DE PENMAN

Station	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	Total annuel
PODOR*	138	162	203	203	242	238	217	189	173	176	144	133	2218
DAHRA-CRZ (1975-1977)	125	135	182	209	215	213	189	184	148	167	139	117	2023
LINGUERE	149	175	201	204	216	203	184	150	149	167	151	146	2095

\* D'après FRANQUIN 1974

Les valeurs moyennes mensuelles présentent un minimum relatif en septembre dû aux pluies, et une nette remontée en octobre donnant un deuxième maximum. Les valeurs annuelles, 2 000 à 2 200 mm, correspondent à celles données par RIOU (1975) pour la zone sahélienne au Tchad. Comme le souligne cet auteur, il faut noter que, si la variabilité décadaire de l'ETP peut être élevée, le total annuel est peu variable d'une année à l'autre.

#### 2.4 - Caractérisation du climat

La zone étudiée est caractérisée par une pluviosité variant de 300 mm au nord à 600 mm au sud. La durée de la saison sèche est de 9 mois. La variabilité inter-annuelle est très importante. Les températures sont élevées avec de grandes amplitudes.

La nécessité de comparer entre eux des climats de régions parfois éloignées a amené climatologues et géographes à classer les climats et pour ce faire, à établir des indices simples donnant une idée d'ensemble du climat. La portée de ces indices est toutefois très limitée.

A titre de référence, le tableau VII indique, pour 4 stations, les valeurs de trois indices climatiques très classiques

I = Indice d'aridité de DE MARTONNE

IA = Indice pluviométrique annuel de BRIGAUD (1965)

Q = Quotient pluviothermique d'EMBERGER (1955)

Ces indices situent le climat de FETE-OLE et PODOR en climat tropical subdésertique et DAHRA et LINGUERE en climat tropical aride.

TABLEAU VII  
VALEUR DES PRINCIPAUX INDICES CLIMATIQUES

STATION	I	IA	Q
PODOR	8,78 <sup>xx</sup>	0,41	1,74 <sup>xx</sup>
FETE-OLE	5,67 <sup>x</sup>	0,30 <sup>x</sup>	0,67 <sup>x</sup>
DAHRA-CRZ	10,2	0,54	2,49
LINGUERE	14,14	0,65	4,25
x D'après POUPON (1978)			
:xx D'après GIFFARD (1974)			

La figure 5 a donne les climogrammes de FETE-OLE, MBIDI et DAHRA établis à partir des valeurs moyennes calculées. Pour FETE-OLE, on distingue trois saisons types : une saison fraîche comprenant novembre, décembre, janvier, février et mars, une saison chaude : avril, mai auxquels s'ajoute octobre, et une saison humide : juillet août, septembre. Le mois de juillet se situant d'ailleurs à la limite des mois chauds et des mois humides. La température maximum des mois humides est peu inférieure à la moyenne annuelle des maximums. Pour DAHRA, la saison froide est plus réduite : décembre, janvier, février. Les mois de mars, avril et de novembre, forment deux petites saisons intermédiaires moyennement froides.

Nous donnons également figure 5 b les diagrammes ombrothermiques selon BAGNOULS et GAUSSEN (1957). Ils font ressortir l'importance de la saison sèche.

En reprenant la classification d'AUBREVILLE (1949), on peut diviser cette région du domaine sahélien en trois sous-régions climatiques dont les limites sont peu tranchées.

- au nord une sous-région sahélo-saharienne, avec des précipitations moyennes inférieures ou égales à 300 mm, dont la limite sud se trouverait au niveau de FETE-OLE - MBIDI.
- une sous-région sahélo-sénégalaise, de 300 à 500 mm, dont la limite sud serait au sud de DAHRA et LINGUERE.
- une sous-région sahélo-soudanienne pour des précipitations > à 500 mm.

Les caractéristiques de chaque zone seront précisées par l'étude du bilan hydrique climatique.

### 3 - RELIEF ET SUBSTRAT GEOLOGIQUE

La région étudiée est presque plate, l'altitude moyenne est voisine de 40 m. Elle appartient au bassin Sénégal-Mauritanien. Au cours des âges géologiques, la mer s'est avancée progressivement vers l'intérieur de ce bassin de subsidence. Au Lutétien, elle atteignait BAKEL. A la fin du Tertiaire, les parties orientales et centrales du bassin sont totalement émergées. On y trouve une accumulation de dépôts continentaux grés-argileux hétérogènes, c'est "le Continental terminal" (MICHEL, 1969).

Au début du Quaternaire, sous un climat plus humide, la surface aplanie du Continental terminal subit un cuirassement. Le Quaternaire est marqué par des alternances de périodes humides et de périodes sèches, entraînant l'altération de la cuirasse ferrugineuse et la formation de matériaux sableux dunaires. On distingue généralement la formation de trois ergs principaux successifs : un erg ancien (plus de 40 000 ans A.A.), un deuxième erg plus récent, qui correspondrait aux "dunes rouges" Ogoliennes, d'âge 18 à 20 000 ans B.P., et au cours d'une troisième phase aride mineure, qui se situerait vers 7 000 à 5 000 A.A., un troisième erg de faible extension (LEPRUN, 1971 ; CHAMARD, 1973).

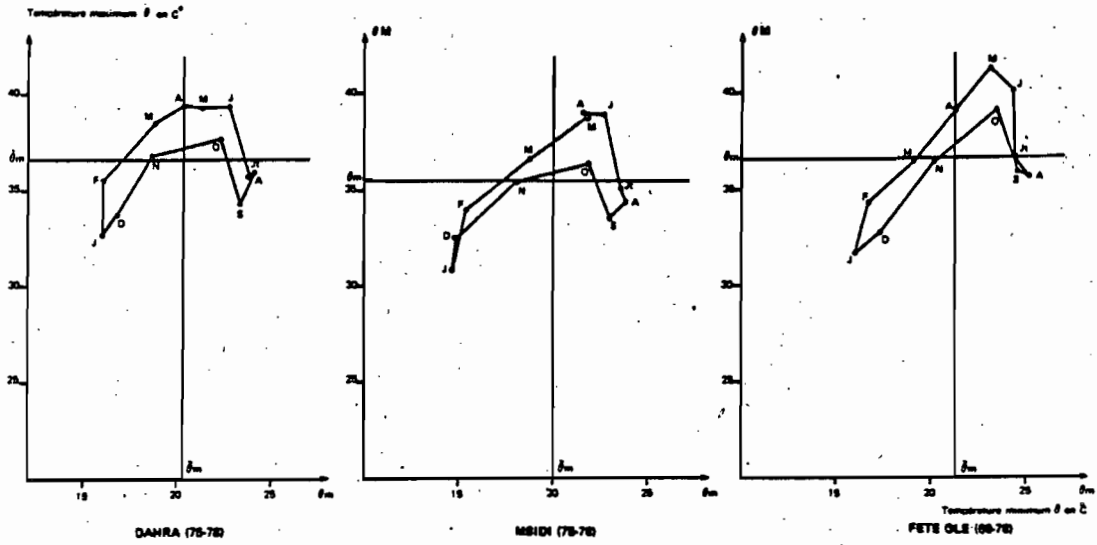


Fig. 5a - Climogrammes des stations de FETE-OLE, MBIDI et DAHRA.

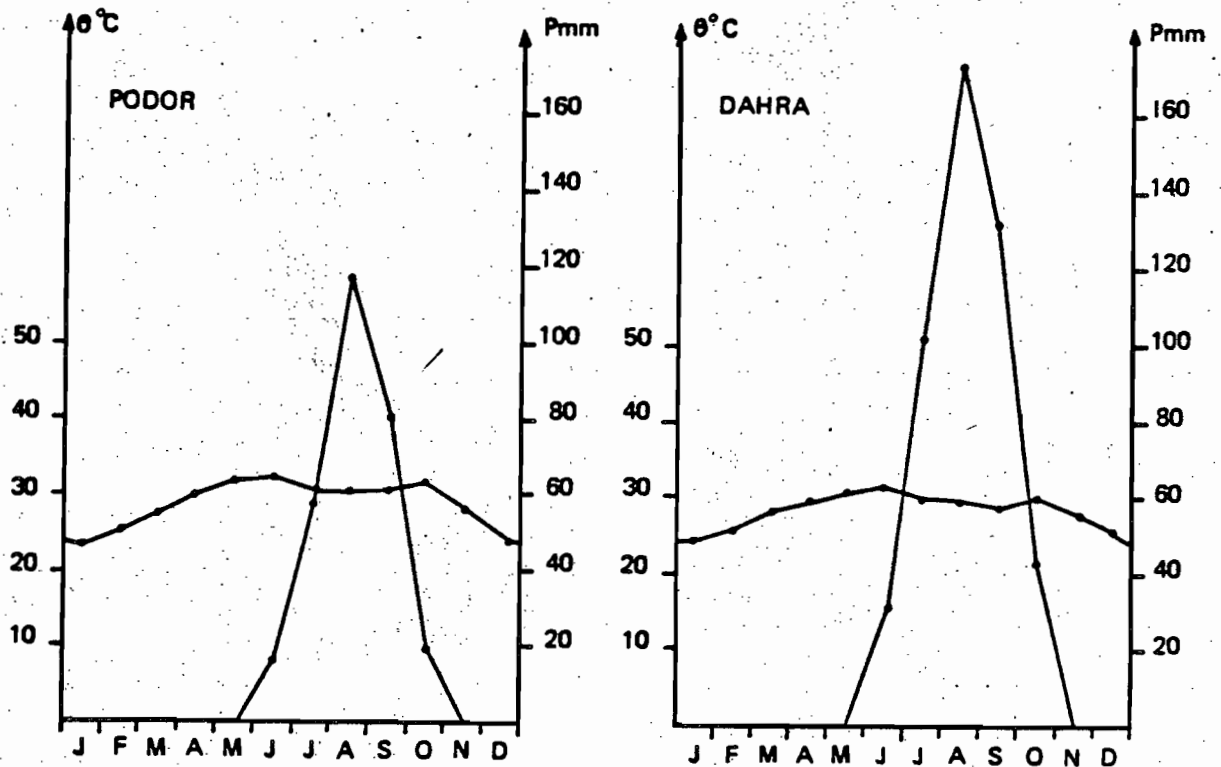


Fig. 5b - Diagrammes ombrothermiques de DAHRA et PODOR établis à partir des valeurs moyennes.

Ces formations sableuses, qui donnent à la région un modelé dunaire particulier et différent suivant leur ancienneté, recouvrent des dépôts plus anciens. La cuirasse ferrugineuse a été détruite en presque totalité, avec reconstitution de cuirasses de nappe parfois affleurantes ou sub-affleurantes à partir des éléments démantelés. Sur la cuirasse, on trouve parfois des dépôts calcaires en coupole attribués à des dépôts lacustres quaternaires (AUDRY, 1962) et qui influencent très localement les sols et la végétation.

Les types de substrat et de relief permettent de distinguer dans la région cinq types de paysages : la cuirasse subhorizontale, les petits systèmes dunaires non orientés, les petits systèmes dunaires orientés, les grands systèmes dunaires orientés et non orientés.

Les proportions relatives de ces paysages sont de 10 à 15 % pour la cuirasse et de 85 à 90 % pour les formations dunaires sableuses.

La nature des formations sableuses, la profondeur de la cuirasse, les accidents topographiques locaux, et l'abondance relative des précipitations conditionnent la répartition des types de sols. Le tableau VIII montre les relations entre formations géologiques, modelé et types de sols.

#### 4 - SOLS

Les documents pédologiques utilisés sont : la carte pédologique ORSTOM au 1/1 000 000, l'étude pédologique du CRZ de DAHRA effectuée par AUDRY (1962), la reconnaissance pédologique du Ferlo sud (PEREIRA-BARRETO 1964). L'étude des sols a été effectuée dans chaque station sur des toposéquences représentatives. Elle est basée sur l'étude des profils sur fosses pédologiques, dont la description fut assurée par divers pédologues ORSTOM, lors de missions sur nos parcelles. Elle a été complétée par les analyses de nombreux prélèvements, effectuées au Laboratoire commun d'analyse ORSTOM de DAKAR-HANN. Les tableaux de l'annexe II donnent la texture sur 100 cm pour les principaux sites.

Les sols les plus représentés dans la région étudiée sont :

- I - Les sols peu évolués sur faciès ferrugineux, limités aux formations dunaires récentes peu abondantes.
- II - Les sols brun rouges subarides modaux sur sable siliceux, développés surtout sur les formations de l'erg moyen, et leurs intergrades soit vers les sols ferrugineux ou vers les sols hydromorphes des dépressions.

TABLEAU VIII - FORMATIONS DUNAIRES FIXEES DU FERLO NORD-OCCIDENTAL (d'après J.C. LEFRUN 1971).

Désignation	Localisation	Modelé	Différenciation pédologique	Parcelles étudiées
Formation I (la plus ancienne)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très grande extension soit seule, soit avec II dont elle forme le soubassement.</li> <li>- De TATKI, elle descend très loin vers le sud, jusque vers BIRKELANE.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Très aplani à faiblement ondulé; avec alignement de bas-fonds et de mares temporaires.</li> <li>-Orientation SW-NE 40 à 45°.</li> </ul>	<p><u>Sols ferrugineux tropicaux :</u> peu lessivés à horizon B différencié avec croissance de la teneur en éléments fins en profondeur 10 %. En bas-fonds et mares, passage aux <u>sols hydromorphes</u>.</p>	<p>FETE-OLE DAHRA-SUD NDOLI-NORD</p>
Formation II	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exclusive entre AMALI-TESSKRE et YANG-YANG et au NORD de TATKI.</li> <li>- Elle constitue ailleurs en mélange avec I la majeure partie du FERLO sableux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Alignements sableux longitudinaux avec dunes et inter-dunes moyennes.</li> <li>-3 à 6 m de dénivellation.</li> <li>-Orientation SW-NE 45 à 53°.</li> </ul>	<p><u>Sols brun rouges subarides :</u> -Dans le nord avec passage vers le sud (pluviosité plus forte) aux sols intergrades entre brun rouges subarides et ferrugineux tropicaux. -La teneur en éléments fins augmentant peu en profondeur.</p>	<p>DAHRA-NORD</p>
Formation III	<p>Peu étendue, elle se localise en bordure des zones alluviales notamment du lac de GUIERS.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Cordons uniques ou associés par deux ou trois,</li> <li>-modelé vigoureux, crêtes sommitales nettes.</li> <li>-Dénivellation à 10 m.</li> <li>-Orientation variable 35 à 55° NE.</li> </ul>	<p><u>Sols peu évolués à faciès ferrugineux.</u></p>	

III - Les sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés en fer sur sables siliceux évoluant, au sud de la zone, vers les sols ferrugineux tropicaux lessivés. Dans les dépressions, le passage se fait soit vers les sols ferrugineux à pseudogley de profondeur, soit vers les sols hydromorphes à pseudogley.

IV - Sur matériaux gravillonnaire affleurant, on a des sols peu évolués d'érosion régosolique. Ils sont peu abondants dans la zone étudiée.

Les principaux facteurs de différenciation pédologique sont :  
Le substrat géologique, le climat et le relief.

Le climat joue un rôle important dans la formation et l'évolution des sols, notamment par la pluie. Bien que la répartition zonale des types de sols soit peu nette, on note la prédominance des sols bruns subarides au nord, passant progressivement aux sols ferrugineux tropicaux et enfin vers le sud aux sols ferrugineux tropicaux lessivés (PEIRRERA-BARRETO, 1964). Cependant, même dans la partie nord on trouve intercalés des sols ferrugineux, mais uniquement sur les formations dunaires anciennes affleurantes (FETE-OLE). On peut penser (LEPRUN, 1971 ; AUDRY, 1962) que ces sols se sont formés lors de périodes plus humides.

Le substrat, bien que relativement homogène, si l'on excepte les cuirasses gravillonnaires, joue un rôle important par les différences texturales du matériau et par son âge. C'est-à-dire par les altérations différentes qu'il a subi du fait d'une origine plus ou moins ancienne.

Le relief, bien que de faible importance, joue un rôle dans l'évolution des sols. Sur chaque toposéquence on note la présence d'une chaîne de sols dont la différenciation est due pour l'essentiel à la dynamique interne et externe de l'eau le long de celle-ci. Les travaux de ROOSE (1978) mettent en évidence l'importance des transferts latéraux de l'eau dans la dynamique actuelle des sols en zone sahélienne.

La végétation joue certes un rôle important par la production de matière organique agissant sur l'évolution du sol, mais la relative homogénéité des formations végétales en fait un facteur ici peu discriminant. De même l'action anthropique du fait du peu de culture n'a eu jusqu'à présent qu'un rôle de faible importance. Cependant, le déboisement joint au surpâturage pourrait entraîner la dégradation des sols et la désertification comme cela se produit dans d'autres régions de la zone sahélienne.

Les sols du quadrat de FETE-OLE sont en général du type ferrugineux tropical peu lessivé. Ils comprennent un horizon humifère superficiel, puis un horizon peu humifère lessivé en fer et un horizon B peu distinct, qui ne se différencie souvent que faiblement par sa couleur et sa structure. La répartition des sols selon la topographie est la suivante :

- sur les sommets de dunes : sol ferrugineux peu lessivé à horizon A peu développé et horizon B de couleur.
- sur des pentes, sols ferrugineux peu lessivés à horizon B épais différencié par la couleur et la structure.
- sur les replats (parties horizontales étroites entre deux portions de pente) existence à la base de l'horizon B d'un niveau engorgé plus ou moins marqué.
- en bas-fonds, sols hydromorphes, soit à hydromorphie d'ensemble, soit à pseudogley de profondeur seulement (BOULET et LEPRUN, 1970 ; résultats non publiés) (BILLE et al., 1972a).

D'après les analyses (voir annexe II) on constate que ces sols de texture sableuse présentent une relative richesse en éléments fins dont le taux croît en profondeur et vers le bas de la toposéquence. A l'exception des mares et des couronnes de mares, les teneurs en matière organique sont faibles dès la surface ( $< 0,6\%$ ), et très faibles en profondeur. Sous le couvert des arbres, ces teneurs sont environ deux fois plus élevées (BERNHARD-REVERSAT 1977), mais elle décroissent assez rapidement en profondeur pour atteindre vers 70 cm des valeurs comparables à ce qu'elles sont à l'extérieur.

La capacité d'échange varie en surface assez largement autour de 2 méq. Ces sols sont assez peu désaturés et faiblement acides.

La microporosité de ces sols est assez bonne, sauf quand il sont hydromorphes. Les éléments fins provoquent des phénomènes de battance.

La zone de dunes de FETE-OLE présente des surfaces de sol nu ou à végétation très clairsemée. Le sol de ces parties présente un encroûtement marqué, de 3 à 5 mm d'épaisseur. Ces encroûtements ont été signalés par divers auteurs en zone sahélienne. BARBEY et COUTE (1976), DULIEU et al. (1977) ont mis en évidence leur origine biologique due à des algues Cyanophycées. A notre demande, une évaluation des populations d'algues a été effectuée par REYNAUD (1979, résultats non publiés).

Les résultats donnés en annexe III montrent une forte proportion d'espèces fixatrices d'azote.

La présence de cet encroûtement joue un rôle important pour le bilan hydrique, en diminuant la perméabilité du sol. En saison sèche, il empêche l'action de l'érosion éolienne. En empêchant la fixation des diaspores au sol, l'encroûtement provoque le maintien de plages dénudées ou à faible végétation. La destruction de la croûte par grattage augmente l'infiltration de l'eau de pluie et diminue la vitesse de dessiccation du sol. La croûte, après grattage, se reforme assez rapidement, par contre, l'apport artificiel d'un voile sableux de quelques mm sur les surfaces encroûtées amène une colonisation assez rapide de ces zones par la végétation.



Les plages nues, assez abondantes en dune à FETE-OLE, ne peuvent pas être considérées comme des surfaces d'érosion active ; et en l'absence d'intervention, elles évoluent peu. A FETE-OLE, une mise en défens de 10 ans n'a amené aucune réduction des surfaces dénudées.

A DAHRA-nord, la toposéquence recoupe des sols très sableux de type brun-rouge subaride. En sommet de dune on observe un sol brun-rouge subaride modal marqué par une pénétration humifère profonde et une variation de couleur très progressive. Celle-ci correspond à la lente décroissance du taux de matière organique dans les 60 premiers centimètres. Cette matière organique est bien humifiée et les rapports C/N sont voisins de 10. Le principal agent de structuration semble être la matière organique. Aucune variation texturale n'est décelable par l'analyse granulométrique classique. En inter-dune, à 150 m du précédent et avec unedénivelé de 3 m, on a un sol intergrade entre brun-rouge subaride et ferrugineux tropical peu lessivé. (LEPRUN, 1976, résultats non publiés; AUDRY, 1962). Ces sols très sableux (voir tableau en annexe) ont une faible teneur en éléments fins. Celle-ci ne croît pas sensiblement avec la profondeur. Ils sont très perméables. La capacité d'échange comprise entre 1,5 et 2,4 méq. en surface, décroît un peu en profondeur en fonction du taux de matières organiques. Ces sols sont assez proches de la saturation.

A DAHRA-sud en l'absence quasi-totale de relief nous avons simplement considéré les surfaces plates d'une part, les dépressions plus ou moins hydromorphes d'autre part. Dans les zones planes, nous avons des profils caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux à drainage moyen à médiocre. Dans les dépressions, on passe à divers sols de la série ferrugineux tropicaux à traces d'hydromorphie (LEPRUN, 1976, Résultats non publiés). AUDRY (1962) note pour les sols des parties plates : "La succession des horizons est caractéristique d'un sol ferrugineux tropical légèrement lessivé en fer et marqué à la partie supérieure par des signes d'engorgement. L'horizon lessivé est un peu ocre et le lessivage en fer apparaît moins nettement.... Le mauvais drainage imputable ici au modelé et à la variation texturale verticale, se traduit par le brunissement de l'horizon sous jacent d'autant plus marqué que ces sols sont mal drainés".

Les résultats d'analyse montrent que :

- La texture varie nettement avec la profondeur. La teneur relativement élevée en éléments fins dispersés conduit en surface à des phénomènes de battance. La perméabilité est faible. Celle-ci est encore résulte par la présence fréquente d'encroûtements à Cyanophycées comparables à ceux de FETE-OLE (voir en annexe).

- La pénétration organique est progressive, avec une faible teneur en surface et un rapport C/N un peu supérieur à 10.

- Une acidité pH marquée et un complexe relativement dessaturé. La capacité d'échange est le plus souvent de l'ordre de 1,5 à 2,5 méq en surface, avec parfois une augmentation à profondeur.

A DOLI nord, la parcelle est caractérisée par une toposéquence sur sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à lessivés, dont l'inter-dune ne constitue pas une zone hydromorphe en surface, mais présente un engorgement en profondeur.

En sommet de dune, on trouve un sol ferrugineux tropical peu lessivé modal (FELLER, 1977, résultats non publiés), présentant une bonne porosité sur l'ensemble du profil, une activité biologique forte jusqu'à 70 cm, une pénétration humifère jusque vers 40 cm, variation texturale verticale nette. En bas-fond, on a un sol ferrugineux tropical lessivé modal (FELLER, 1977, résultats non publiés) présentant une bonne porosité en surface, mais plus compact en profondeur. Les horizons de surface sont moins humifères, l'activité biologique est moyenne jusqu'à 100 cm, la variation texturale verticale est nette, avec une discontinuité marquée vers 120 cm. Cette discontinuité se retrouve également au niveau des pentes. Engorgement et traces d'hydromorphie sont observés vers 300 cm. Dans ces sols la perméabilité est bonne tout au moins dans les horizons superficiels. Pas de phénomènes d'encroûtement. La capacité d'échange est voisine ou inférieure à 2 méq. L'acidité est peu élevée.

La parcelle de DOLI sud est caractérisée par la présence d'une cuirasse ferrugineuse subaffleurante. En l'absence de topographie marquée, les types de sols dépendent de l'importance du recouvrement terrigène plus ou moins gravillonnaire. Sur recouvrement terrigène important (> 50 cm) on a un sol ferrugineux tropical lessivé peu épais, sur matériaux argilo-sableux à horizon gravillonnaire en profondeur. C'est un assez bon sol, à microporosité élevée, d'activité biologique forte. Lorsque la zone gravillonnaire affleure, on a un sol peu évolué d'érosion régosolique sur matériaux gravillonnaires avec horizon carapacé rougeâtre vers 50 cm (FELLER, 1977, résultats non publiés).

Ces sols sont marqués par l'abondance croissante à faible profondeur de gravillons. La teneur en éléments fins est importante et croît rapidement dans la zone gravillonnaire (voir Annexe II). La teneur en matière organique est moyenne. La structure de surface est peu compacte, l'infiltration est bonne.

Du fait de l'abondance de l'argile, et de la présence à faible profondeur de la cuirasse imperméable, la rétention de l'eau est bonne et favorable à la végétation lorsque la cuirasse n'est pas trop superficielle.

Les sols gravillonnaires de DOLI sud mis à part, les autres types qui recouvrent en quasi-totalité l'ensemble de la zone étudiée, ne sont pas séparés par des limites tranchées. Ils passent des uns aux autres par des transitions très ménagées. Ceci correspondant d'ailleurs à une texture sableuse assez peu différente d'un type de sol à l'autre.

Cependant, les modifications liées à l'origine du matériau (erg ancien ou récent), à la topographie (dunes, versants, inter-dunes) sont sensibles. En outre, des variations texturales faibles conduisent dans ces sols sableux à des fluctuations importantes des propriétés physiques et hydriques. La disposition de ces sols en catena, le long des toposéquences entraîne des différences importantes vis à vis du stockage et des transferts latéraux de l'eau, ce qui conditionne fortement la répartition de la végétation.

Au point de vue chimique. Ces sols sableux, ferrugineux tropicaux ou brun subarides, sont caractérisés par une très grande pauvreté en éléments nutritifs. La capacité d'échange varie peu autour de 2 méq. En rapport avec des teneurs faibles en matière organique, les teneurs en azote sont généralement très faibles (0,2 à 0,4 %) dans l'horizon superficiel, pour atteindre, dans les horizons sous-jacents, 0,1 à 0,15 %. Cependant, les coefficients de minéralisation de l'azote sont assez élevés, indiquant une dynamique favorable de cet élément pour une rapide mise à la disposition des plantes dans la limite de réserves faibles. Les teneurs en  $P_2O_5$  total sont variables, mais nettement insuffisantes (0,1 à 0,3 %). Les teneurs en potassium sont très faibles, (0,1 à 0,2 méq.) en surface et plus faible encore en profondeur.

Les sols hydromorphes du fait de leur plus grande richesse en matière organique et en argile, présentent des niveaux de fertilité plus élevés.

## 5 - DESCRIPTION DE LA VEGETATION

### 5.1. - Physionomie générale de la végétation et remarques phytogéographiques

La végétation de la zone étudiée se présente, en fin de saison des pluies, à son maximum de développement, sous la forme d'un tapis herbacé, plus ou moins continu, pouvant atteindre 50 cm à 1 m, composé essentiellement d'espèces annuelles. Ce tapis est parsemé d'arbres et arbustes fréquemment épineux, ne formant jamais une strate continue.

Du nord au sud du Sénégal, il n'y a pas de discontinuité brusque dans la végétation, mais une variation progressive. Des espèces végétales qui sont à la limite méridionale de leur aire disparaissent, alors que d'autres, plus mésophiles, apparaissent. Ceci est dû à l'absence de variations brusques des facteurs du milieu (climat et sol) et à l'extension probable vers le nord, aux époques historiques et préhistoriques, de boisements actuellement méridionaux. La présence éparse dans toute la zone septentrionale d'espèces ligneuses beaucoup plus mésophiles, montre que la végétation actuelle semble être la résultante de conditions climatiques plus difficiles, et d'une action anthropique intense.

AUBREVILLE (1949) décrit cette végétation comme une steppe très ouverte à *Acacia senegal* (et espèces affines) en insistant sur la présence des épineux. La rareté des espèces vivaces dans la strate herbacée est à souligner.

Au sud de l'isohyète 500 mm, la transition se fait peu à peu vers une savane arbustive dont le peuplement ligneux devient de plus en plus important et dont la strate herbacée s'enrichit en Andropogonées de grande taille, pour aboutir enfin à la savane arborée soudanienne. Celle-ci voit, vers l'isohyète 750 mm, la disparition des espèces les plus xérophiles : *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, et l'apparition d'espèces guinéennes.

D'après les divisions phytogéographiques de TROCHAIN (1940), le Sénégal septentrional appartient à la région soudano angolane de l'empire floral paléotropical. Le tableau IX montre, selon le même auteur, les divisions de cette région floristique en domaines et secteurs, correspondants à la zone étudiée. La station d'étude de FETE-OLE appartient au secteur sahélo-saharien. DAHRA et DOLI appartiennent respectivement aux secteurs sahélo-soudanien et soudano-sahélien. Il convient de noter que, compte tenu des variations progressives de végétation, les limites phytogéographiques sont délicates à situer précisément sur le terrain.

La strate herbacée des formations sahéliennes est caractérisée par la dominance d'espèces herbacées annuelles, notamment de graminées généralement à feuilles basilaires, à limbes étroites et pliés ou enroulés : *Schoenfeldia gracilis*, *Aristida*, *Cenchrus*, *Chloris*. Ce caractère les différencie nettement des steppes sahariennes (TROCHAIN, 1980 ; SCHNELL, 1976 ; ADAM, 1968), marquées par la présence de nombreuses touffes de graminées vivaces : *Panicum turgidum*, *Aristida pungens*... entre lesquelles se développe un peuplement éphémère d'annuelles. Il les distingue aussi des savanes soudanennes, où les Andropogonées de grande taille, à feuilles larges, vivaces ou annuelles, sont abondantes.

TABLEAU IX  
DIVISIONS PHYTOGEOGRAPHIQUES (d'après TROCHAIN 1940)

Domaine	Secteur	Limite sud approximative	Correspondance avec la répartition des espèces
Sahélien	Sahélo-saharien	16° de lat. N isohyète 350 mm	Limite septentrionale de l'aire de <i>Combretum glutinosum</i> . Limite méridionale des aires de <i>Capparis decidua</i> et <i>Maerua crassifolia</i> .
	Sahélo-soudanien	15° de lat. N isohyète 550 mm	Limite septentrionale des aires de <i>Bombax costatum</i> et <i>Piliostygya reticulatum</i> .
Soudanien	Soudano-sahélien	14° de lat. N isohyète 750 mm	Limite méridionale des aires de <i>Acacia senegal</i> , <i>Balanites aegyptiaca</i> et <i>Boscia senegalensis</i> .
	Soudano-guinéen		

Ce type de végétation est désigné par TROCHAIN (1980) sous le terme de "Pseudosteppe", bien que ce terme n'ait pas été retenu au Colloque de YANGAMBI (C.S.A. 1956), qui ne reconnaît que les termes de savane ou de steppe. Les critères de hauteur, et de discontinuité du tapis herbacé adoptés dans cette classification prêtent à discussion et rendent par exemple difficile le classement des formations sahéliennes dans l'une ou l'autre catégorie. D'où leur désignation selon les auteurs soit comme steppe, soit comme savane (CHEVALIER, 1911 ; AUBREVILLE, 1949 ; GILLET, 1968 ; BOUDET, 1972 a, BILLE, 1977a ; BOURELIERE, 1978). ADAM (1968) parle de "Prairies tropicales, estivales éphémères". DESCOINGS (1973) critique de façon pertinente, point par point, les définitions de YANGAMBI. Il refute les deux termes de steppe et de savane auxquels il substitue celui de "formation herbeuse", qui a l'avantage de montrer les continuités existantes entre ces types de végétation. Il établit une méthode analytique descriptive intéressante, mais le terme de formation herbeuse, ne présente guère d'utilité, pour la simple désignation du type de végétation. La figure 6, montre la fiche analytique remplie selon la méthode de DESCOINGS pour la végétation de FETE-OLE, dont la diagnose selon cette méthode serait : "Formation herbeuse homogène unistrate basse, ouverte, à peuplement ligneux composé arbustif bas et arbustif haut, lache, épars".

## 5.2. - Etudes locales existantes

L'inventaire phytosociologique de la zone étudiée n'a pas été fait. La description et l'inventaire d'associations végétales tropicales, se heurtent à un manque d'information dans les liaisons entre espèces et variables écologiques, ainsi qu'à une méconnaissance des relations entre les groupements. De sorte que les études phytosociologiques ont, dans ces zones, un grand retard, alors que ce travail d'inventaire et de cartographie des groupements végétaux est d'importance primordiale non seulement pour les études d'écologie, mais également pour les recherches concernant l'utilisation des pâturages.

Des études fragmentaires ont été réalisées dans le nord Sénégal, mais avec des méthodes ou des échelles liées à des objectifs particuliers. Les termes utilisés tels que formation, ou groupement ont des sens parfois différents selon les auteurs. L'utilisation de ces travaux doit être faite avec une grande prudence.

TROCHAIN (1940), décrit des groupements qui sont en fait de vastes ensembles synthétiques plus phytogéographiques que phytosociologiques.

ROBERTY (1952) a tenté une description des groupements végétaux de son "Secteur Ferloïen", qui inclut la partie nord de notre zone. Sa méthode de "phytogéographie à petite échelle", jointe au fait qu'il délaisse quasi totalement les espèces herbacées, le font aboutir à des combinaisons d'espèces parfois assez différentes des groupements réels observés.

Dans l'étude botanique des pâturages de C.R.Z. de DAHRA-DJOLOF, RAYNAL (1964) a réalisé une étude phytosociologique précise, basée sur la comparaison de nombreux relevés et l'utilisation de la méthode des groupes écologiques. Il décrit les divers groupements et leurs faciès associés. Une cartographie de la concession du C.R.Z. au 1/20 000, en précise les limites et



la répartition. De ce travail il ressort que la parcelle d'étude de DAHRA nord appartient au groupement à *Tephrosia platycarpa* et *Tephrosia purpurea*, qui comporte en outre : *Phyllanthus pentandrus*, *Aristida stipoïdes*. Ce groupement occupe les sols sableux des parties les plus typiques du système dunaire, et ses limites actuelles correspondent bien avec celles qui ont été décrites par RAYNAL.

La parcelle de DAHRA sud est située par cet auteur dans le groupement à *Andropogon amplexans* Nees. (syn. : *Diheteropogon hagerupii* Hitchc) et *Zornia glochidiata*. Ce groupement a totalement disparu de la concession depuis 10 ans ; il a été remplacé par un groupement appauvri à *Zornia glochidiata*. Celui-ci correspond d'ailleurs au faciès de dégradation du groupement à *Andropogon* + *Zornia* décrit par RAYNAL (1964).

Pour DOLI, RAYNAL (1963), n'a effectué qu'une étude préliminaire de la végétation. Il a cependant distingué quatre grandes unités phytosociologiques d'ordre supérieur aux groupements précédents dont notamment :

- "Une savane arbustive sur sables dunaires à *Combretum glutinosum* et *Terminalia avicenoïdes*, *Ctenium elegans*, *Andropogon gayanus*, *Diheteropogon hagerupii*", unité à laquelle appartient la parcelle de DOLI nord avec un appauvrissement récent en grandes *Andropogonées*.
- "Savane forestière sur cuirasse affleurante ou subaffleurante, avec sous-bois à *Loudetia togoensis* et *Aristida kerstingii*", qui recouvre la parcelle sud de DOLI.

La seule carte d'ensemble existante est la carte des pâturages naturels du nord-Sénégal, (VALENZA et DIALLO, 1972), qui a été utilisée pour le choix des stations d'études. Dans les pâturages naturels du nord Sénégal, ils distinguent 7 types de "formations" suivant la nature du substrat. A partir de la description des strates herbacées et ligneuses, chaque type est divisé en "groupements", puis en "parcours". Bien qu'elle ne correspondent pas à des unités phytosociologiques, ces divisions donnent une bonne image de la végétation à l'échelle régionale, grâce à la profonde connaissance du milieu et de la végétation par acquise les auteurs.

D'après cette étude, FETE-OLE appartient à la "formation" sur sol sablo-argileux à argilo-sableux, au "groupement" à *Balanites aegyptiaca*, *Schoenfeldia gracilis* et au "parcours" à *Boscia senegalensis* et *Alysicarpus ovalifolius* (P a 1). "Ce parcours largement répandu, se présente comme une steppe arbustive assez dense et parfois arborée, recouvrant l'erg ancien dans sa partie septentrionale, au modelé très aplani" (VALENZA et DIALLO, 1972).

La végétation DAHRA sud appartient à la "formation" sur sol argilo-sableux à argileux, au "groupement" sur pénéplaine basse à *Balanites aegyptiaca* et *Aristida funiculata*, et au "parcours" à *Boscia senegalensis* et *Schoenfeldia gracilis* (A 1 a). Ce parcours marque le passage entre le parcours Pal sur erg ancien aplani et sol ferrugineux peu lessivé (FETE-OLE) et celui sur pénéplaine basse à horizon gravillonnaire peu profond.

La végétation de DAHRA nord correspond à la "formation" sur sol sableux des dunes continentales, au "groupement" à *Combretum glutinosum* et *Tephrosia purpurea*, et au "parcours" à *Guiera senegalensis* et *Aristida stipoïdes* (D 1 a). Il s'agit d'une steppe arbustive claire située sur les systèmes à relief dunaire bien marqué.

Les formations étudiées, qui paraissent homogènes à petite échelle sont, en fait, constituées d'une mosaïque de petits groupements reflétant les micro-variations des variables écologiques. BILLE (1977a) a réalisé une étude phytosociologique de la végétation herbacée de la parcelle de FETE-OLE. A partir de 150 relevés comparés entre eux, en utilisant l'analyse factorielle des correspondances, il aboutit à l'individualisation de 8 groupements herbacés. Ces groupements, comme le souligne l'auteur, ne peuvent pas être assimilés à des associations végétales. Il donne une carte au 1/1 000 de la répartition de ces groupements, tout en précisant que les limites des groupements peuvent varier d'une année à l'autre. Les résultats de BILLE seront repris ultérieurement pour les comparer à nos propres résultats.

#### CONCLUSION SUR LA DESCRIPTION DU MILIEU

La description des stations étudiées montre pour le FERLO sableux, qui constitue notre zone, une certaine unité d'ensemble qui n'exclue pas une assez grande diversité locale des phytocoenoses, en raison des variations de sol notamment.

L'ensemble des sols présente une texture très sableuse due aux matériaux dunaires originels, mais le modelé du relief, l'âge du matériau, l'importance des précipitations, ont entraîné la différenciation de sols qui, bien que très voisins pédologiquement, présentent des propriétés physiques et hydriques différentes.

Les éléments climatiques de la zone, si l'on excepte les précipitations, ne présentent pas de variations très importantes entre les cinq sites. Le climat est chaud, la température moyenne annuelle est voisine de 28°C, avec de fortes amplitudes diurnes, plus accusées vers le nord de la zone. Le climat est sec, l'humidité relative de l'air est voisine de 30 % entre décembre et avril ; avec des minimums inférieurs à 5 %. En saison humide, elle est de l'ordre de 70 %. L'évapotranspiration potentielle est élevée : 2200 mm au nord et 2000 mm au sud. Les précipitations, au contraire, constituent un élément très variable. Elles varient suivant la latitude, de 300 mm au nord à 600 mm au sud, créant un gradient important. Elles varient beaucoup d'une année à l'autre, pour une même station, dans leur importance et dans leur répartition.



La végétation, à petite échelle, ne présente pas de discontinuité brusque, mais une variation progressive du nord au sud. La différenciation de cette végétation est cependant bien marquée, à grande échelle, il apparaît une individualisation de phytocoenoses très liées aux conditions stationnelles : modelé, sol, exploitation... qui justifie l'implantation de plusieurs stations d'étude.

La diversité écologique de la zone paraît pouvoir être analysée à partir de quatre niveaux de perception. Ces niveaux qui correspondent à des seuils d'homogénéité des principaux facteurs, sont :

- Le niveau de la région qui correspond à un seul type climatique : Tropical sahélien, chaud et sec, à une unité géologique : les formations sableuses quaternaires, à un type de végétation pouvant être désigné par : "formation herbeuse sahélienne".
- Le niveau de la station d'étude coïncidant avec des sous-régions climatiques.
- Le niveau de la toposéquence correspond à des catena individualisées de sols, à des séquences de groupements végétaux et à une unité cohérente de redistribution de l'eau.
- Le niveau site d'étude ou de la "station écologique" correspond à un élément de relief (dune, pente...), un type de sol, et fréquemment un groupement végétal.

Le tableau X résume les travaux réalisés à ces quatre niveaux en vue d'étudier la structure de la végétation et le bilan hydrique, qui conditionnent la production végétale.

Le tableau XI (d'après CORNET et POUPON, 1978) résume des principales caractéristiques des 5 parcelles, ceci afin de mieux cerner les limites de notre travail et de faciliter la comparaison avec d'autres études.

TABLEAU X - ETUDES EFFECTUEES AUX DIFFERENTS NIVEAUX

NIVEAUX	REGIONAL	PARCELLAIRE	TOPOSEQUENCES	PLACETTES ELEMENTAIRES
Climat	Etude des pluies des ETP	données climatiques stationnelles		
Sol		Principaux types de sols	Chaînes de sols	Caractéristiques hydrodynamiques
Bilan hydrique	Bilan hydrique climatique Analyse fréquentielle Zonation Agroclimatique	Régime hydrique global caractéristique d'un type de paysage	Bilan hydrique du sol Redistribution des précipitations	Bilan hydrique du sol Modélisation Etude fréquentielle
Végétation		Détermination et cartographie des principaux groupements Biomasse globale produite Liaisons avec les précipitations	Structure, séquences de groupements, répartition des espèces. Fluctuations inter-annuelles Biomasse Liaisons avec le bilan hydrique	Contribution spécifique et fluctuations inter-annuelles. Détermination de la production primaire nette aérienne Modélisation en fonction du B.H. Etude fréquentielle

TABLEAU XI - CARACTERISTIQUES DES CINQ PARCELLES ETUDIEES.

Parcelle	F. O.	D. N.	D. S.	N. N.	N. S.
Substrat géologique	Erg ancien	Dunes rouges	Erg ancien	Erg ancien	Cuirasse re-constituée
Sols	Ferrugineux tropical non lessivé	Brun rouge sub-aride	Ferrugineux tropical à drainage moyen à médiocre	Ferrugineux tropical lessivé	Peu évolué d'évolution régosalique sur matériau gravillonnaire
Climat	Sahélo-Sahérien	Sahélo-Sénégalais		Sahélo-Soudanien	
Précipitations normales en mm	300	500		600	
Traitement	- Défens. - Protection partielle contre les feux.	- Pâturage intense. - Protection efficace contre les feux.		- Pâturage peu intense. - Protection aléatoire contre les feux.	
Zones de végétation	Secteur Sahélo-Saharien	Secteur Sahélo-Soudanien		Secteur Soudano-Sahélien	
Nombre et pourcentage d'espèces annuelles	91 75,3 %	60 79,0 %	48 78,7 %	61 64,9 %	64 56,6 %
Nombre et pourcentage d'espèces vivaces	30 24,7 %	16 21,0 %	13 21,3 %	33 35,1 %	49 43,4 %
Nombre d'arbres par ha	841	360	160	517	1 671
Nombre et pourcentage d'arbres de C < 10 cm par ha	709 81,7 %	271 75,3 %	98 61,2 %	479 92,6 %	1 261 75,5 %
Pourcentage d'arbres motrs	20,0 %	22,1 %	48,4 %	47,6 %	14,1 %

CHAPITRE II

ETUDE DE LA VEGETATION DES STATIONS

## I - DESCRIPTION ET STRUCTURE DE LA VEGETATION

Le but de la présente étude n'est pas la description exhaustive de la végétation, mais l'analyse de la production végétale en relation avec le bilan hydrique. Cependant, la production d'un couvert végétal dépend de facteurs exogènes tels que l'énergie reçue, l'eau et les éléments nutritifs disponibles, mais aussi de facteurs endogènes tels que sa composition floristique, sa structure, son mode d'établissement. Par ailleurs, l'étude de la production nécessite la définition d'ensembles homogènes de mesure hiérarchisés en fonction de la structure de la végétation. D'où la nécessité des chapitres qui vont suivre.

La présence d'un peuplement ligneux, bien que réduit, est très important pour les phytocénoses sahéliennes, par le rôle qu'il exerce sur la strate herbacée. L'étude de la végétation ne saurait dissocier les deux strates. Cependant, pour des raisons pratiques liées à l'organisation des travaux de recherche, nous avons essentiellement étudié la strate herbacée, M. POUPON, étudiant la strate ligneuse. Pour l'étude détaillée du peuplement ligneux, il convient de se reporter à BILLE (1977a), CORNET et POUPON (1978) et POUPON (1980).

### 1.1. - Composition floristique et spectre biologique

L'inventaire floristique des cinq parcelles, a été réalisé à la suite des relevés et des récoltes effectués entre 1974 et 1978, en collaboration avec J.C. BILLE, M. GROUZIS et H. POUPON. Ces récoltes ont permis la constitution d'un herbier de référence, et l'établissement de la liste floristique jointe en annexe IV. La nomenclature de cette liste est conforme à celle de LEBRUN (1973). Elle comporte, outre la famille et le nom scientifique, l'indication du type biologique selon RAUNKIAER (1905) dont l'utilisation en milieu tropical a été justifiée par de nombreux auteurs (RAYNAL, 1964 ; EMBERGER, 1966 ; LEBRUN, 1966 ; DESCOINGS, 1975). La présence de chaque espèce dans chaque parcelle est notée, mais sans indication d'abondance, car celle-ci varie beaucoup d'une année à l'autre, par contre les présences sont assez stables. Nous avons également mentionné l'appâtibilité estimée de la plante pour les bovins zébus, d'après divers auteurs tels que RAYNAL (1964), BOCOUM (1971), TOUTAIN (1977), BOUDET (1978), complété par nos propres observations. Ces indications doivent être considérées avec réserve, la consommation variant beaucoup avec les conditions de pâturage, le stade phénologique, les disponibilités fourragères de l'année et, également, d'une contrée à l'autre.

Nous avons dénombré 223 espèces, dont 149 thérophytes, 48 phanérophytes, 10 chaméphytes, 8 hémicryptophytes et 8 géophytes. Le Tableau XII montre le nombre et la répartition des espèces par parcelle. Nous n'avons pas tenu compte des divisions au sein de chaque type, ainsi les phanérophytes sont représentées ici uniquement par des micro ou des nano-phanérophytes.

Tableau XII - Nombre d'espèces et types biologiques par parcelle.

TYPES BIOLOGIQUES	FETE OLE	DAHRA NORD	DAHRA SUD	DOLI NORD	DOLI SUD
-THEROPHYTES	91: 74,6%	61: 76,3%	65: 81,5%	60: 62,5%	65: 57,0%
- PHANEROPHYTES	24: 19,7%	11: 13,7%	11: 13,6%	25: 26,0%	38: 33,3%
- CHAMEPHYTES	2: 1,6%	3: 3,8%	1: 1,2%	5: 5,3%	5: 4,4%
-HEMICRYPTOPHYTES	3: 2,5%	4: 5,0%	1: 1,2%	3: 3,1%	2: 1,8%
- GEOPHYTES	2: 1,6%	1: 1,2%	2: 2,5%	3: 3,1%	4: 3,5%
- T O T A L	122:	80:	81:	96:	114:

Ce Tableau fait ressortir l'importance de deux types biologiques : les thérophytes, correspondant aux annuelles de la strate herbacée ; et les phanérophytes correspondant à la strate ligneuse. Ceci traduit bien le paysage végétal. Ces deux types biologiques présentent une bonne adaptation écologique dans une zone à neuf mois de saison sèche, par la brièveté du cycle des thérophytes et par la caducité du feuillage chez les phanérophytes.

Pour expliquer la rareté des espèces herbacées vivaces dans les formations sahéliennes, on peut émettre deux hypothèses : que d'une part, la faiblesse des précipitations, et la durée de la saison sèche ne permettent pas le maintien des espèces vivaces soudaniennes, d'autre part, le passage relativement fréquent des feux élimine les espèces vivaces xérophiiles présentes au Nord dans les zones non parcourues par le feu.

Il faut noter l'accroissement de l'importance des phanérophytes en allant vers le Sud, en passant du domaine sahélien au domaine soudanien. A cette augmentation du nombre d'espèces se superpose un grand accroissement du nombre d'individus (voir Tableau XI). Il faut cependant faire exception de DAHRA dont la strate arbustive est dégradée, et non représentative.

Sur l'ensemble des parcelles, les Graminées comptent 53 taxa dont 2 vivaces seulement : *Andropogon gayanus* et *Aristida sieberana*. Elles représentent 34 % des thérophytes, mais elles constituent plus de 70 % de la biomasse herbacée.

En ce qui concerne l'origine phytogéographique des espèces, pour la station de FETE-OLE, selon POUPON (1980), on a la répartition suivante :

- Espèces à "tendance" saharienne	9,3 %
- Espèces soudano-deccaniennes plutôt sahéliennes	22,9 %
- Espèces soudano-deccaniennes plutôt soudaniennes	3,4 %
- Espèces soudano-deccaniennes généralisées	33,1 %
- Espèces à large répartition	31,3 %

Si l'on considère la présence des différents taxa selon les parcelles, vingt sept espèces sont communes aux cinq stations, dont 22 thérophytes et 5 phanérophytes. Ces 22 annuelles sont essentiellement des plantes à grande extension, au moins dans la zone sahélienne. Certaines sont importantes par leur contribution à la production herbacée, notamment: *Dactyloctenium aegyptium*, *Schoenfeldia gracilis*, *Alysicarpus ovalifolius* ou *Zornia glochidiata*. D'autres sont liées à des conditions stationnelles qui se répètent régulièrement, ainsi l'ombrage des couronnes d'arbres pour *Achyranthes argentea*, *Commelina forskalaei* et *Borreria stachydea*.

Cinquante huit espèces n'ont été rencontrées que dans les trois parcelles du domaine sahélien (FETE-OLE, DAHRA nord et sud). Certaines d'entre elles existent pourtant couramment en zone soudanienne telles : *Coccinia grandis*, ou *Pennisetum violaceum*. D'autres, par contre, semblent plus particulièrement liées à ce domaine : *Blepharis linariifolia*, *Cleome monophylla*, *Cleome tenella*, *Aristida funiculata*, *Leptotrium senegalense*, *Tragus berterorianus*, *Crotalaria podocarpa*, *Indigofera aspera*, *Indigofera senegalensis*, *Ceratothera sesamoïdes*, *Tribulus terrestris*.

Dans les deux stations du domaine soudanien (DOLI nord et sud), on dénombre soixante sept espèces propres, dont dix sept communes aux deux stations.

Si l'on considère les quatre parcelles dont le substrat est constitué par un recouvrement sableux épais, elles ont six espèces en commun, qui semblent bien préférentielles de ce type de sol : *Polycarpea linearifolia*, *Aristida mutabilis*, *Brachiaria xantholeuca*, *Chloris pilosa*, *Gisekia phanaceoïdes*, *Acacia senegal*

- La parcelle de FETE-OLE comprend 32 espèces qui lui sont exclusives, dont 26 thérophytes. Parmi celles-ci, certaines sont caractéristiques des mares temporaires à sol argileux et hydromorphe, qui dans nos parcelles, ne se rencontrent qu'à FETE-OLE : *Alternanthera nodiflora*, *Cyperus iria*, *Echinochloa colona*, *Panicum walense*, *Aeschynomene indica*

On peut aussi noter la présence d'un groupe de petites annuelles précoces, abondantes sur les dunes bordant la vallée proche du fleuve Sénégal : *Cleome viscosa*, *Gynandropsis gynandra*, *Euphorbia forskallii*, *Trianthema portulacastrum*, *Eragrostis ciliaris*, *Leptotrium senegalense*, *Boerhavia erecta*, *Portulaca oleracea*.

- La parcelle de DAHRA Nord comporte sept espèces particulières, toutes annuelles, qui sont, pour la plupart, caractéristiques des sols bruns subarides très sableux, telles sont : *Crotalaria atrorubens*, *Crotalaria podocarpa*, *Tephrosia platycarpa*.

La strate herbacée de cette parcelle est peu dégradée, par contre, la strate ligneuse est très appauvrie. La parcelle de DAHRA Sud a été choisie, en raison du caractère très dégradé de sa végétation, tant pour la strate herbacée que pour la strate ligneuse.

- Quinze espèces ne figurent que dans la parcelle de DOLI Nord, parmi lesquelles, dix annuelles, et une hémicryptophyte cespiceuse : *Andropogon gayanus*, qui semble ici bien dans son

milieu, et qui, depuis 1974 s'étend assez rapidement sur dune. Parmi les annuelles, malgré une relative pauvreté de la strate herbacée, on note une tendance soudanienne avec : *Cassia absus*, *Panicum pansum*, *Indigofera prieuriana*, *Tephrosia linearis*.

- La parcelle de DOLI Sud est celle qui s'individualise le plus avec 35 espèces exclusives, dont 17 thérophytes, 2 hémicryptophytes, 3 géophytes, 3 chaméphytes et 10 phanérophytes. Cela s'explique par sa position soudanienne marquée et par le substrat de cuirasses gravillonnaires subaffleurantes. *Eragrostis gangetica*, *Andropogon fastigiatus*, *Hackelochloa graminularis*, *Tephrosia gracilipes*, marquent nettement la tendance soudanienne. *Loudetia togoensis* et *Aristida kerstingii* sont caractéristiques des sols sur cuirasse, cette dernière espèce étant, par ailleurs, nettement soudanienne et proche de sa limite septentrionale (RAYNAL, 1967). Il est à noter, l'enrichissement de la flore en géophytes, en hémicryptophytes crassulescents : *Caralluma decaisneana*, *Aloe buettneri* et en chaméphytes sarmenteux : Vitacées.

Parmi les 223 espèces recensées dans les cinq parcelles, 119 sont consommées par les bovins (22 très appréciées, 53 appréciées, et 44 peu appréciées) soit 53,4 % des espèces, ce qui est un pourcentage élevé.

Le Tableau XIII montre la répartition des espèces selon leur degré d'appétence, dans les 5 parcelles.

Tableau XIII - Appétibilité des espèces végétales par parcelle.

Degré d'appétibilité:	FETE OLE	DAHRA NORD	DAHRA SUD	DOLI NORD	DOLI SUD
Très appréciées	19: 15,6%	15: 18,6%	16: 19,6%	13: 13,5%	12: 10,5%
Apprécées	37: 30,3%	25: 31,2%	25: 32,1%	27: 28,1%	30: 26,3%
Peu appréciées	26: 23,0%	17: 21,3%	16: 19,7%	23: 24,0%	25: 21,9%
Consommées	64: 68,9%	57: 71,3%	58: 71,6%	63: 65,6%	67: 58,7%
Non appréciées	33: 27,0%	18: 22,5%	20: 24,7%	25: 26,1%	30: 26,3%
Toxiques	1: 0,8%	0: 0	0: 0	0: 0	3: 2,7%
Indéterminées	4: 3,3%	5: 6,2%	3: 3,7%	8: 8,3%	14: 12,3%

On voit que le nombre d'espèces consommées est important partout. Il est le plus faible dans la parcelle sur sol gravillonnaire de DOLI Sud. Il faut noter que, dans cette parcelle, la proportion de ligneux est la plus importante. Par ailleurs, nombre d'espèces herbacées de cette parcelle ne sont consommées qu'à l'état vert.



## 1.2. - Structure de la végétation

La composition floristique des stations et leur spectre biologique fournissent une certaine information sur les facteurs du milieu au travers d'exigences de chaque taxon. L'agencement spatial des individus végétaux constitue une réponse à l'action du milieu sur la distribution des espèces et à l'interaction entre espèces. La structure de la végétation correspond selon l'acceptation proposée par le Code édité par le C.E.P.E. L.EMBERGER (GODRON et al., 1968) à cette répartition spatiale. Son étude constitue une source d'information qui traduit fidèlement l'action des facteurs du milieu. Elle permet la définition de stations écologiquement homogènes, la caractérisation de coupures écologiques et l'observation de leur variation inter-annuelle. Elle est aussi utilisée pour déterminer les zones les plus favorables pour une étude à une autre échelle (Dynamique de la production).

### 1.2.1. - Structure du peuplement ligneux

La structure du peuplement ligneux dans les cinq parcelles a été étudiée par H. POUPON. L'essentiel des observations sera ici résumé rapidement.

A FETE-OLE (POUPON, 1980, p. 84) "La végétation ligneuse se concentre dans les dépressions et sur leur pourtour, formant de véritables fourrés dominés par quelques arbres. Sur les dunes au contraire, le tapis graminéen est piqué de phanérophytes qui ne forment jamais une strate continue. A superficie égale, il y a dix fois moins d'individus sur les dunes que dans les cuvettes, et les surfaces terrières évoluent dans le rapport de 1 à 15 ... *Guiera senegalensis*, semble avoir l'amplitude écologique la plus large, même si elle marque une légère préférence pour les cuvettes. Ce sont aussi ces dernières que recherchent *Grewia bicolor* et *Boscia senegalensis* ... A l'opposé, *Balanites aegyptiaca* supporte bien les sols où l'alimentation en eau n'est que très temporairement convenable. Il s'installe volontiers sur les sommets et les versants de dunes. *Acacia senegal* et *Commiphora africana* se retrouvent un peu partout le long de la toposéquence, mais ils ne sont jamais très abondants".

Le Tableau XIV reconstitué d'après POUPON (1980) montre l'importance des ligneux en fonction de chaque élément du relief.

TABLEAU XIV - IMPORTANCE DES LIGNEUX A FETE-OLE EN FONCTION DES ELEMENTS DU RELIEF : (a) ABONDANCE, EN NOMBRE D'INDIVIDUS, (P) POURCENTAGE D'ARBRES AYANT PLUS DE 20 cm DE CIRCONFERENCE ET (S) SURFACE TERRIERE EN m<sup>2</sup> PAR ha D'ELEMENT DE RELIEF

	Dunes	Pentes	Replats	Bas de pentes	Dépression	Moyenne pour l'ensemble de quadrat
(a)	296	492	1004	1497	3499	841
(P)	8,0 %	5,6 %	8,7 %	10,9 %	10,1 %	8,9 %
(S)	0,59	0,73	2,04	3,85	8,77	1,78

La strate ligneuse se présente fort différemment pour les stations de DAHRA et DOLI (CORNET et POUPON, 1978). A DAHRA, le nombre d'arbres est faible 360 individus/ha à DAHRA nord et 160 à DAHRA sud. La répartition est assez uniforme à DAHRA-nord avec peu de différence entre les sommets de dune et les bas fonds. A DAHRA sud les rares ligneux subsistant se concentrent autour de petites dépressions. Sur la parcelle de DOLI nord (517 individus/ha), les dunes et pentes sont occupées par des arbustes, alors que les bas fonds présentent des arbres de taille moyenne appartenant à des espèces plus soudaniennes. DOLI sud présente un boisement plus important (1 671 individus/ha) assez uniformément répartis.

Pour l'ensemble des stations, la répartition du peuplement ligneux est très liée au bilan hydrique et notamment aux redistributions des précipitations. La présence d'une strate ligneuse influence nettement la strate herbacée, mais la composition floristique de cette dernière n'est pas liée à la nature du peuplement ligneux du moins à l'échelle des parcelles. La structure et la composition spécifique du peuplement ligneux permettent, par contre, de définir des unités de végétation à plus petite échelle (VALENZA et DIALLO, 1972).

#### 1.2.2. - Unités de végétation à grande échelle

L'étude écologique de la végétation des parcelles, les mesures de la biomasse herbacée et de la production primaire nette en liaison notamment avec le bilan hydrique, nécessitent la définition d'unités de végétation homogènes et représentatives.

C'est pourquoi, plusieurs auteurs travaillant sur ces thèmes en zone sahélienne (BILLE, 1977a ; CORNET et POUPON, 1978 ; GROUZIS, 1979), ont été amenés à déterminer des unités de végétation plus fines que les groupements phytosociologiques classiques, dans la définition desquelles les arbres n'interviennent pas, et qui ne sont homogènes qu'au niveau de la strate herbacée.

Nous appelons ici "groupements élémentaires de végétation" (désigné ultérieurement par groupement) chacune des unités floristiquement, écologiquement et physionomiquement différenciées dont l'imbrication plus ou moins régulière constitue une phytocénose. Ce terme correspond à la notion d'élément proposée par GOUNOT (1958 et 1969) : "Discontinuité de la communauté végétale sur le plan horizontal". L'utilisation de ce terme permet la description pratique d'un tapis végétal, indépendamment de toute considération théorique sur la nature ou la position des unités dans une hiérarchie phytosociologique.

La distinction de ces groupements est basée sur des critères propres à la végétation : présence des espèces, association entre elles, aspect physionomique, etc. et des critères écologiques tels que la microtopographie, l'hydromorphie du sol, etc. La détermination en est effectuée à partir de relevés et de leur comparaison.

Ces groupements se répètent de façon constante d'une station à l'autre, avec cependant des fluctuations inter-annuelles dans les limites de leur répartition. Ils ont été définis pour les 5 parcelles dans une étude précédente : CORNET et POUPON (1978). Ils seront brièvement rappelés, et pour chacun d'eux, la correspondance avec le groupement décrit par BILLE (1977a) sera indiqué entre parenthèses.

1 - FETE-OLE

- Secteurs à sol non hydromorphe :

Ia - Groupement des dunes et pentes hautes, à *Aristida mutabilis*, *Aristida funiculata*, *Schoenfeldia gracilis*, *Blepharis linariifolia*, *Polycarpea linearifolia*, *Gisekia pharnaceoides*. Ce groupement est composé de plantes espacées recouvrant assez faiblement le sol. L'abondance relative ou la rareté de *Schoenfeldia* dans ce groupement dépend de la pluviosité de l'année. Il occupe environ 60 % de la surface du sol. Il recouvre les unités A1 et A2 de BILLE (1977a).

IIa - Groupement des replats ou ensellements comblés par un matériau sableux et à bilan hydrique plus favorable, à *Cenchrus prieurii*, *Cenchrus biflorus*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Merremia pinnata*, *Borreria stachydea*, *Commelina forskalaei*. Il occupe entre 5 et 10 % de la surface. (A3 de BILLE).

IIIa - Groupement de bas de pente comprenant : *Schoenfeldia gracilis*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Aristida mutabilis*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Brachiaria xantholeuca*, *Brachiaria distichophylla*, *Panicum laetum*, *Chloris prieurii* et *Indigofera pilosa*. Il représente environ 20 % de la surface (A4 de BILLE) Les deux groupement (IIa et IIIa) ont une végétation plus dense que le précédent.

IVa - Groupement d'ombrage, en dehors des dépressions. Ce groupement localisé sous la couronne des arbres occupe environ 7 % de la superficie et comprend : *Achyranthes argentea*, *Brachiaria deflexa*, *Digitaria horizontalis*, *Commelina forskalaei*. (B1 de BILLE).

Va - Un groupement très réduit, formant une frange autour de la zone dénudée des termitières, il comprend : *Aristida funiculata*, *Tripogon minimus*, *Bulbostylis barbata*. (B2 de BILLE).

- Secteurs à sols hydromorphes, au moins à faible profondeur :

VIa - Un groupement sciaphile sur sol humide, des couronnes de mares et bas-fonds boisés, à : *Diheteropogon hagerupii*, *Pennisetum pedicellatum*, *Indigofera astragalina*, *Hibiscus sidiiformis*, *Ipomoea eriocarpa*, *Brachiaria ramosa*. (C1 de BILLE).

VIIa - Un groupement des surfaces non boisées et non inondées des mares temporaires, comprenant : *Panicum lactum*, *Aristida adscensionis*, *Digitaria argilacea*, *Zornia glochidiota*, *Indigofera secundiflora*, (C2 de BILLE).

VIIIa - Un groupement de zones inondées au moins temporairement, qui comprend : *Panicum walense*, *Echinochloa colona*, *Aeschynomene indica*, *Zornia glochidiata*, *Cyperus sp. plur.*

IXa - Un groupement de mares à sol peu profond avec horizon imperméable cuirassé, caractérisé par : *Andropogon pinguipes*, *Schizachyrium exile*, *Borreria sp. plur.* Cette unité est peu représentée sur le quadrat de FETE-OLE. L'ensemble des groupements sur sols hydromorphes représente environ 5 % de la superficie du quadrat.

2 - DAHRA nord :

Ib - Un groupement à *Tephrosia purpurea*, *Phyllanthus pentandrus*, *Aristida stipoïdes*, *Crotalaria podocarpa*, *Merremia tridentata*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Indigofera aspera*. Ce groupement, assez pauvre en graminées occupe les hauts de dunes et de pentes, soit environ 40 % de la surface de la parcelle.

IIb - Un groupement des bas de pentes et pentes moyennes, caractérisé par : *Tephrosia platycarpa*, *Schoenfeldia gracilis*, *Brachiaria xantholeuca*, *Alysicarpus ovalifolius*, *Zornia glochidiata*, *Crotalaria perrottetii*, *Eragrostis tremula*. Ce groupement à *Schoenfeldia* et *Brachiaria* dominants occupe environ 40 % de la surface.

IIb1 - Un faciès du groupement précédent, appauvri en espèces, constitué par des plages de *Zornia glochidiata* presque pur, avec peu d'*Eragrostis tremula*, d'*Alysicarpus ovalifolius* et de *Schoenfeldia gracilis*. Son importance est variable d'une année à l'autre. Étendu en 1975 et 1976 (10 à 15 % de la surface), il s'est réduit en 1977-1978.

IIIb - Un groupement à Convolvulacées occupant les parties les plus basses des interdunes (< 5 % de la surface). Il comprend : *Ipomoea pestigridis*, *Ipomoea vagans*, *Merremia pinnata*, *Merremia tridentata*, *Crotalaria perrottetii*, *Eragrostis pilosa*.

IVb - Le même groupement de couronnes d'arbres que celui rencontré à FETE-OLE (IVa) auquel s'ajoute ici *Pennisetum violaceum*. Ce groupement, lié aux arbres ou aux anciennes souches, occupe entre 5 et 10 % de la surface.

3 - DAHRA sud :

Ic - Groupement à *Zornia glochidiata*, et *Eragrostis tremula*. Il comprend aussi, en petite quantité, *Schoenfeldia gracilis* et *Brachiaria xantholeuca*, *Digitaria horizontalis*, formant des taches (1975), ou plus disséminés (1976) suivant la pluviosité de l'année.

Dans cette parcelle, où la végétation est très dégradée, 80 % de la surface sont occupés par ce groupement très appauvri.

IIc - Les bas-fonds sont occupés à leur périphérie par un groupement de végétation un peu plus dense comprenant : *Brachiaria ramosa*, *Chloris pilosa*, *Indigofera astragalina*, *Chloris prierurii*, *Tephrosia linearis*, *Indigofera pilosa*.

IIIc - Le centre des dépressions est occupé par un groupement à *Cassia obtusifolia*, *Hibiscus diversifolius*, *Tephrosia bracteolata*, *Ipomoea sp. plur.*

IVc - Au pied des quelques arbres qui restent, ou à l'emplacement d'anciennes souches, on retrouve le groupement IVa de FETE-OLE et DAHRA nord à *Achyranthes argentea*, *Digitaria horizontalis*, *Brachiaria deflexa*.

4 - DOLI nord :

Id - Un groupement de dunes et de pentes, occupant 50 % de la surface, à : *Andropogon gayanus*, *Elionurus elegans*, *Borreria* sp. plur., *Schizachyrium exile*, *Euphorbia convolvuloides*, *Tephrosia linearis*, *Tephrosia bracteolata* et *Sporobolus stolzii*.

IIId - Un groupement des pentes moyennes et des bas de pentes (représentant 25 % de la surface) qui comprend : *Digitaria gayana*, *Elionurus elegans*, *Ctenium elegans*, *Crotalaria perrottetii*, *Indigofera bracteolata*, *Brachiaria wantholeuca*, *Borreria* sp. plur., *Schizachyrium exile*, *Zornia glochidiata* et *Eragrostis tremula*.

IIIId - Un groupement de bas-fonds (15 % de la surface) à *Schoenfeldia gracilis*, *Setaria pallide-fusca*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Cassia absus* et *Brachiaria distichophylla*.

IVd - Un groupement sciaphile sous arbres et arbustes comprenant : *Digitaria horizontalis*, *Achyranthes argentea*, *Commelina forskalaei*, *Pennisetum pedicellatum* et *Ipomoea heterotricha*.

5 - DOLI sud :

Ie - Un groupement sur sables atgileux peu profonds, caractérisé par *Schoenfeldia gracilis*, *Elionurus elegans*, *Digitaria gayana*, *Phyllanthus pentandrus*, *Indigofera dendroïdes*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Heliotropium strigosum*, *Sporobolus stolzii* et *Zornia glochidiata*.

IIe - Un groupement sur sol argilo-sableux à horizon gravillonnaire subaffleurant à *Andropogon pseudapricus*, *Diheteropogon hagerupii*, *Aristida kerstingii*, *Tephrosia gracilipes*, *Cochlospermum tinctorium* et *Lepidagathis anobrya*.

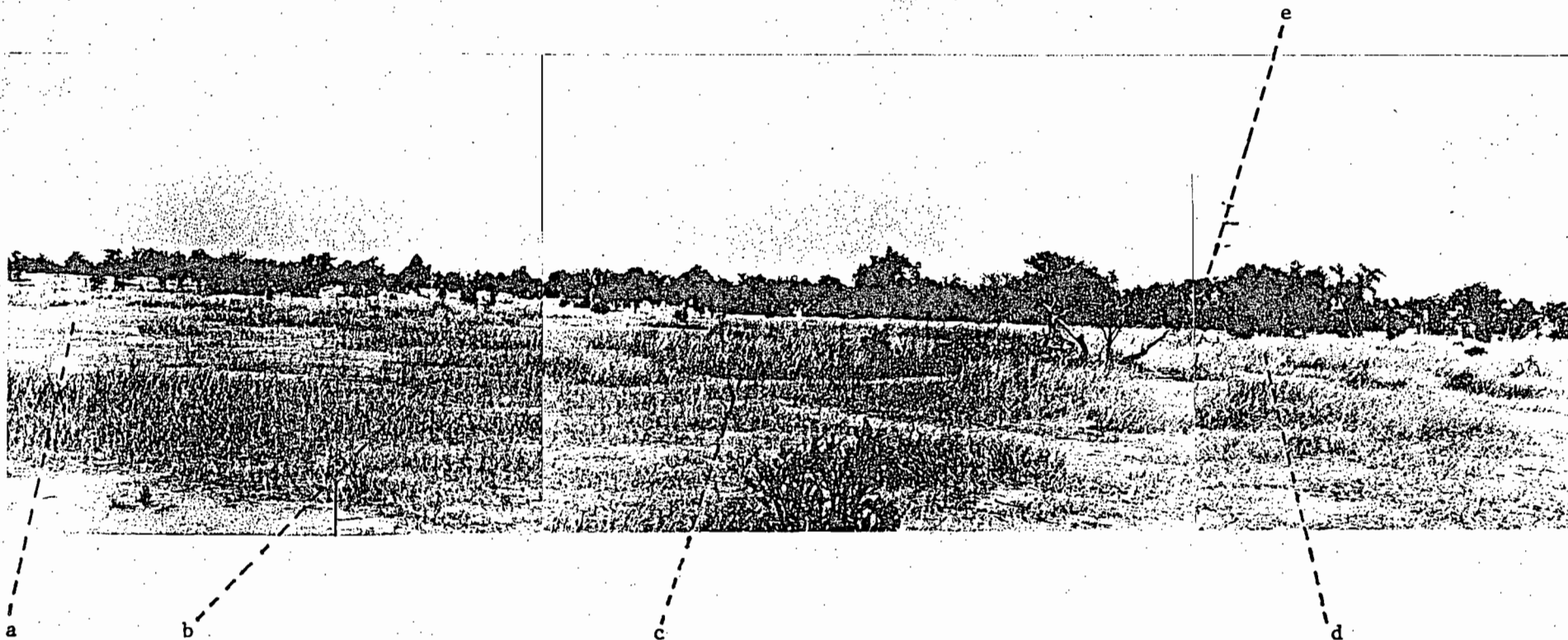
IIIe - Un groupement sur sol gravillonnaire comprenant : *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis* et *Aristida kerstingii*.

IVe - Un groupement de sous-bois à *Pennisetum pedicellatum*, *Brachiaria lata*, *Diheteropogon hagerupii*, *Aristida adscensionis*, *Lepidagathis servicea* et *Borreria* sp. plur.

Ve - Un groupement des zones dépressionnaires à engorgement caractérisé par *Acacia ataxantha*, *Andropogon pingipes*, *Setaria sphacelata*, *Sporobolus pectinellus* et *Cyperus* sp. plur.

Autour de nombreuses termitières, il existe un ou plusieurs petits groupements avec *Microchloa indica*, *Tripogon minimus*, *Bulbostylis barbata* et parfois avec des plantes crassuléscentes telles *Aloe* ou *Caralluma*.

Les figures A, B, C, D, E de l'annexe V montrent les transects de végétation pour les cinq parcelles en fonction de la position topographique et de la nature du sol. On y a représenté également la répartition des principales espèces ligneuses.



FETE-OLE Vue d'une toposéquence

a - Dune

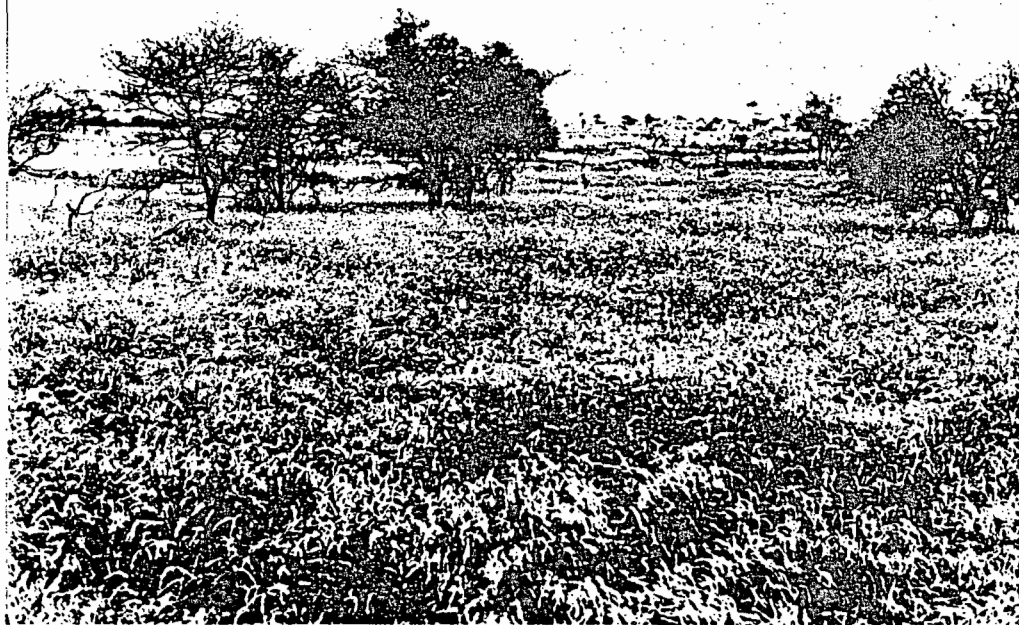
Groupement à *Aristida* sp. plur., *Schoenfeldia gracilis*  
et *Blepharis linariifolia*.

b - Pente

c - Replat Groupement à *Cenchrus* sp. plur., *Alysicarpus ovalifolius*  
et *Borreria stachydea*.

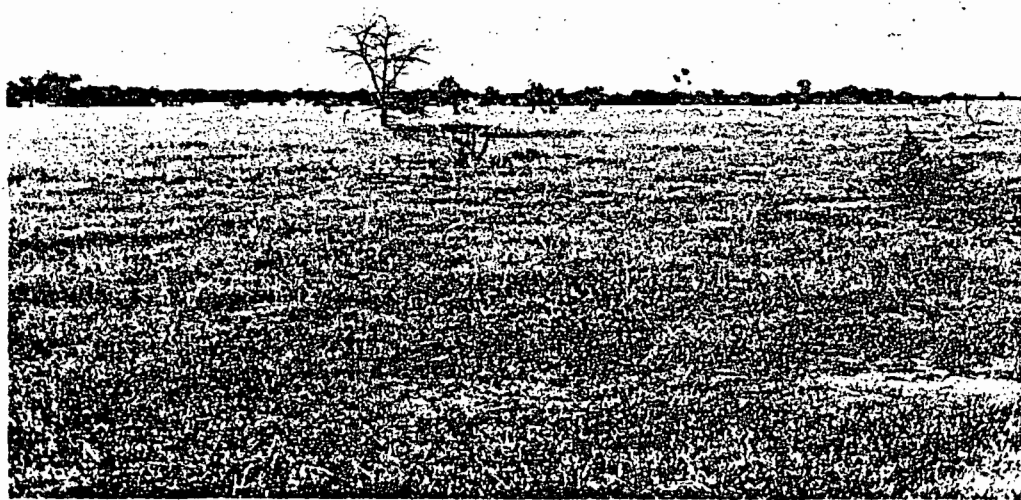
d - Bas de pente Groupement à *Schoenfeldia gracilis*, *Brachiaria xantholeuca*,  
*Alysicarpus ovalifolius* et *Chloris prieurii*

e - Dépression



DAHRA-NORD Bas de pente

Groupement à : *Tephrosia platycarpa*, *Schoenfeldia gracilis*,  
*Brachiaria xantholeuca*, *Alysicarpus ovalifolius*.



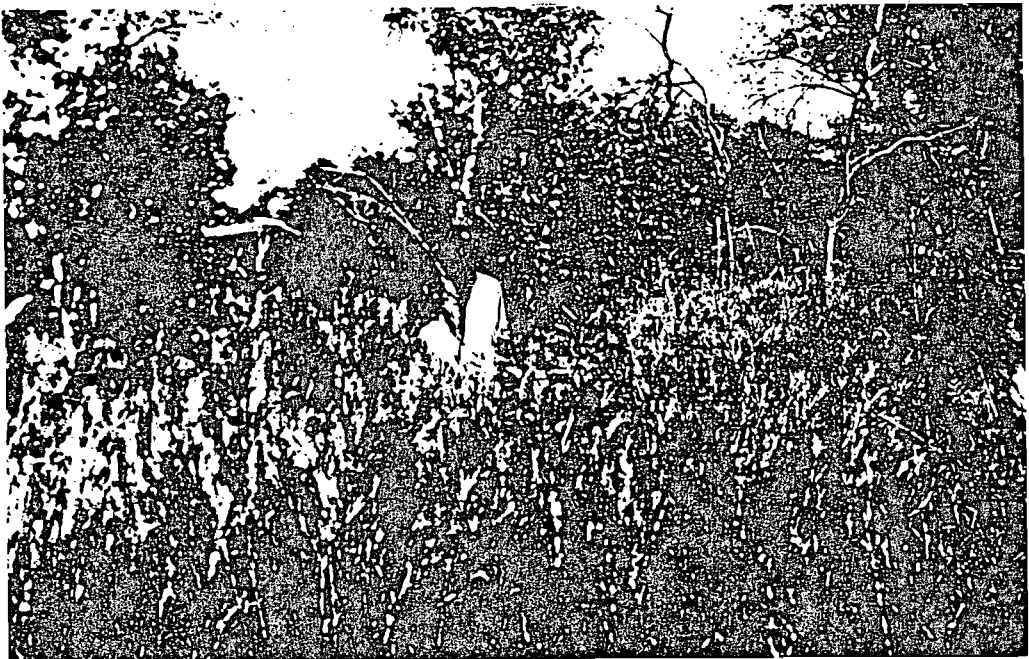
DAHRA-SUD Replats

Groupement à ; *Zornia glochidiata* et *Eragrostis tremula*



DOLI-NORD Pente

Groupement à : *Digitaria gayana*, *Elionurus elegans*,  
*Schizachyrium exile* et *Indigofera bracteolata*.



DOLI-SUD Replat à sol gravillonnaire

Groupement à : *Andropogon pseudapricus*, *Loudetia togoensis*  
et *Aristida kerstingii*.



1,2,3. - Méthodes de mesure utilisées pour l'analyse quantitative de la végétation herbacée

Les mesures de végétation sont faites le long d'un transect, soit sur des lignes fixes le long des toposéquences par la méthode dite des segments, soit dans les principaux groupements par la méthode des points.

- Méthode des segments :

Le long d'un double décamètre tendu au-dessus du sol, au ras de la végétation, on note toutes les espèces interceptées par la portion de plan vertical passant par chaque segment (GODRON, 1966 ; CORRE et RIOUX 1969).

La longueur de chaque segment est ici de 50 cm. Les lignes ainsi analysées sont de 120 mètres pour FETE-OLE et de 168 m pour DAHRA nord et DOLI nord. Les lignes sont repérées par des piquets métalliques établis à demeure.

- Méthode des points

Dans les principaux groupements, la détermination de la fréquence des espèces, nécessaire à la détermination des contributions spécifiques et de leur évolution, est réalisée par la méthode des points quadrats. Cette méthode décrite par LEVY et MADDEN (1933) reprise notamment par BROWN (1954) a été développée, améliorée et largement utilisée par le C.E.P.E. L. EMBERGER (DAGET et POISSONET, 1964 ; GODRON et al., 1967 ; POISSONET P. et J., 1969 ...). Elle a été appliquée avec succès pour des formations herbeuses tropicales (POISSONET et CESAR, 1972 ; BOUDET, 1978). Elle consiste à recenser les présences des espèces à la verticale de points régulièrement disposés le long d'un décamètre tendu sur la végétation. Une tige métallique à bord effilé matérialise la ligne de visée. Par convention, chaque espèce n'est recensée qu'un fois par point. Si aucune espèce n'est présente au point considéré, l'état du sol est noté : sol nu, litière, ... L'emploi d'une terminologie normalisée (DAGET et POISSONET, 1971) facilite les descriptions. On retiendra les principaux paramètres suivants .

- Fréquence spécifique d'une espèce (FS) : c'est le nombre de points où cette espèce est rencontrée.

- Fréquence centésimale (FC) : c'est le rapport de la fréquence spécifique d'une espèce sur le nombre de points échantillonnés exprimé en pourcentage  $FC = \frac{FS}{N} \cdot 100$

La probabilité de présence d'une espèce est la limite vers laquelle tend la fréquence centésimale lorsque le nombre de points devient très grand. Elle constitue une mesure du recouvrement de l'espèce (GODRON, 1968)

La contribution spécifique présence d'une espèce (CSPi) est définie comme le rapport de la fréquence spécifique FS<sub>i</sub> de l'espèce à la somme des fréquences spécifiques et toutes les espèces rencontrées.

$$CSPi = \frac{FS_i}{\sum_{i=1}^{i=n} FS_i} \cdot 100 \quad \text{où } n \text{ est le nombre d'espèces.}$$

Par analogie, on pourra parler aussi de contribution spécifique segment (CSS) (POISSONET, P. et J., 1969 ; HUBERT, 1978) pour le rapport exprimé en pourcentage entre le nombre de présences de cette espèce et la somme des présences de toutes les espèces sous les segments.

La détermination du nombre de lignes d'observation nécessaires a été effectuée à partir de l'effectif cumulé par ligne, des présences de l'espèce dominante sur l'effectif cumulé de l'ensemble des présences de toutes les espèces (BOUDET, 1975). Il peut être obtenu directement à partir de la somme des fréquences spécifiques en consultant un abaque (DAGET et POISSONET, 1971). Les résultats obtenus ici montrent que des précisions de 5 % sont généralement atteintes avec 3 lignes.

#### 1.2.4. - Etude de la structure de la végétation herbacée et des modes de répartition des espèces par l'Analyse factorielle des correspondances.

##### 1.2.4.1. - Méthode

Les segments situés le long de lignes continues, suivant les toposéquences, peuvent être considérés comme autant de relevés caractérisés d'une part par leur position sur la ligne, d'autre part par les espèces présentes. On cherche à connaître l'existence des relations entre espèces et entre relevés pour voir s'il existe un mode ordonné de répartition des relevés et des espèces et comment cette répartition reflète les variables du milieu. Parmi les diverses méthodes nous avons choisi l'analyse factorielle des correspondances. Exposée par CORDIER (1965) et BENZECRI (1966), elle a été utilisée à de nombreuses reprises en écologie, ROMANE (1972) en donne un inventaire bibliographique.

Cette méthode d'analyse est appliquée ici sur une matrice formée entre les éléments de deux ensembles : d'une part, l'ensemble des espèces notées en présence/absence, d'autre part, l'ensemble des relevés.

L'analyse revient à calculer une matrice de distances entre chacun des deux ensembles, en fonction de la distribution des éléments de l'un dans les éléments de l'autre ensemble, et à y associer une représentation géométrique. Chaque ensemble forme dans un espace à n dimensions, un nuage plus ou moins étiré suivant des directions privilégiées. Ce nuage constitue une expression complète des affinités qui existent entre les éléments d'un ensemble. L'analyse recherche les axes qui rendent le mieux compte des étirements du nuage et c'est-à-dire ceux qui absorbent le maximum d'inertie. On obtient la représentation de la projection du nuage sur les principaux axes factoriels. La forme, la structure ou l'étirement du nuage sur tel ou tel axe traduisent les liens unissant les éléments.

Le programme utilisé calcule la participation de chaque élément à la détermination de l'axe et l'inertie expliquée par chaque axe. L'analyse permet de mettre en évidence :

- des proximités entre espèces, lesquelles se regroupent d'autant plus qu'elles se trouvent plus souvent ensemble, ce qui peut correspondre à des exigences écologiques voisines,

- des proximités entre relevés, lesquels se regroupent d'autant plus qu'ils ont plus d'espèces en commun donc qu'ils offrent des conditions écologiques voisines,
- les nuages correspondant aux espèces et aux relevés qui sont superposables, montrent ainsi les liaisons entre espèces et relevés, ce qui semble traduire les relations existant entre les exigences des espèces et les conditions de milieu offertes par les relevés.

Le distribution des états de certaines variables écologiques, relevée sur le terrain est mise en relation avec les résultats de l'analyse factorielle des correspondances, ce qui permet de proposer une interprétation écologique des axes de l'analyse et de la structure de la végétation.

Il est à noter que cette analyse n'intègre pas la structure spatiale des données, mais comme le montrent les travaux de ESTEVE (1978), BACHACOU et CHESSEL (1979), DAVID et al., (1979), son utilisation dans le cas de relevés régulièrement disposés donne de bons résultats en interprétant la valeur pour chaque axe d'analyse de chaque relevé en fonction de sa position dans l'espace.

#### 1.2.4.2. - Résultats de l'analyse des relevés de la première année :

Les mesures de végétation par segments ont été effectuées dans les trois parcelles de FETE-OLE, DAHRA nord et DOLI nord. Les transects représentent : 120 m à FETE-OLE soit 240 segments, 168 m à DAHRA nord et DOLI nord soit 336 segments chacun.

Les relevés ont été réalisés 4 années successives à FETE-OLE et DAHRA nord et deux années à DOLI nord, sur les mêmes transects.

L'analyse a été effectuée en utilisant les segments comme relevés. Chaque segment doit être caractérisé par un nombre suffisant d'espèces, pour être représentatif du type de végétation traversée. Le petit nombre d'espèces présentes sur chaque segment de 50 cm nous a conduit à regrouper les segments d'abord par 2, puis par 4 pour constituer un relevé. Nous ne considérons dans ce paragraphe que les résultats obtenus par l'analyse des relevés de 1975.

Le Tableau XV montre la répartition relative des axes factoriels à l'inertie du nuage.

Tableau XV - PARTICIPATION RELATIVE DES AXES FACTORIELS A L'INERTIE DU NUAGE

	FETE-OLE	DAHRA nord	DOLI sud
axes			
1	15,1	11,2	10,7
2	8,2	6,4	8,6
3	7,6	5,8	6,8
4	5,9	5,5	6,3
5	5,2	5,3	5,4
TOTAL pour ces axes	42,0	34,2	37,8

On note la décroissance rapide des valeurs entre le premier et le second axe, ensuite la décroissance est faible. Les valeurs sur l'axe 1 sont assez élevées, surtout pour FETE-OLE, ce qui correspond à des contrastes très marqués entre relevés opposés appartenant à des milieux très différents.

- FETE-OLE :

La projection des relevés sur le plan des axes 1 et 2 (voir figure 7) montre un fort étirement du nuage selon l'axe 1. L'étirement sur l'axe 2 est réduit en raison de la présence d'un relevé très excentré (relevé n° 49). Ce relevé s'individualise, par sa pauvreté en espèces, et par la présence d'une espèce exclusive (*Kyllinga* sp.).

Le long de l'axe 1 de l'analyse, les relevés et les espèces s'ordonnent en fonction des caractères d'humidité des sols. Du côté des ordonnées négatives, on trouve les relevés et les espèces correspondants aux sols secs bien drainés (relevés de 1 à 45 et 61 à 129). Vers les ordonnées positives se situent ceux afférents aux sols à hydromorphie de surface (229 à 237) ou présentant une hydromorphie à faible profondeur (158 à 217). Les relevés les plus éloignés de l'origine correspondent aux zones d'inondation temporaire. Près de l'origine se trouvent les espèces les plus communes et un ensemble de relevés assurant la transition (161-181), qui correspondent aux zones de bas de pente recevant de l'eau par ruissellement et présentant un engorgement temporaire en profondeur.

Sur l'axe 2 s'opposent d'une part les relevés des replats (53, 57) d'autre part les relevés des zones à inondation temporaire (229 à 237). Les premiers sont caractérisés par un horizon superficiel plus sableux (< 4 % d'argile), alors que les seconds présentent l'horizon superficiel le plus argileux (15 % environ). La texture des horizons de surface est très liée au bilan hydrique.

La signification écologique de l'axe 3 n'apparaît pas clairement. En effet, sur cet axe, s'opposent d'un côté les 2 groupements précédents (replats et zones à inondation temporaire), de l'autre, les zones hydromorphes avec recouvrement arbustif des bordures de dépression (relevés n° 213 et 221).

Sur l'axe 4 la seule distinction nette qui apparaisse est l'opposition entre les relevés de zones inondables non boisées (229 à 233) et les relevés des zones inondables boisées (relevé 237).

Le diagramme des espèces et leur contribution aux axes (Tableau XVI) permettent, en fonction du signe de leurs coordonnées et de la valeur de leur participation sur chaque axe, de les regrouper suivant leurs affinités.

Ainsi, espèces des lieux secs bien drainés : *Aristida mutabilis*, *A. funiculata*, *Schoenfeldia gracilis*, *Blépharis linariifolia*, *Indigofera aspera* et les espèces de milieux à hydromorphie temporaire sans recouvrement arbustif : *Indigofera astragalina*, *I. secundiflora*, *Chloris pilosa*, *Aristida adscensionis*.

La figure 8 montre les coordonnées des relevés sur les axes 1-2 et 3 en fonction de leur position sur la ligne. On voit qu'il existe une relation, notamment sur l'axe 1, avec opposition entre les relevés de

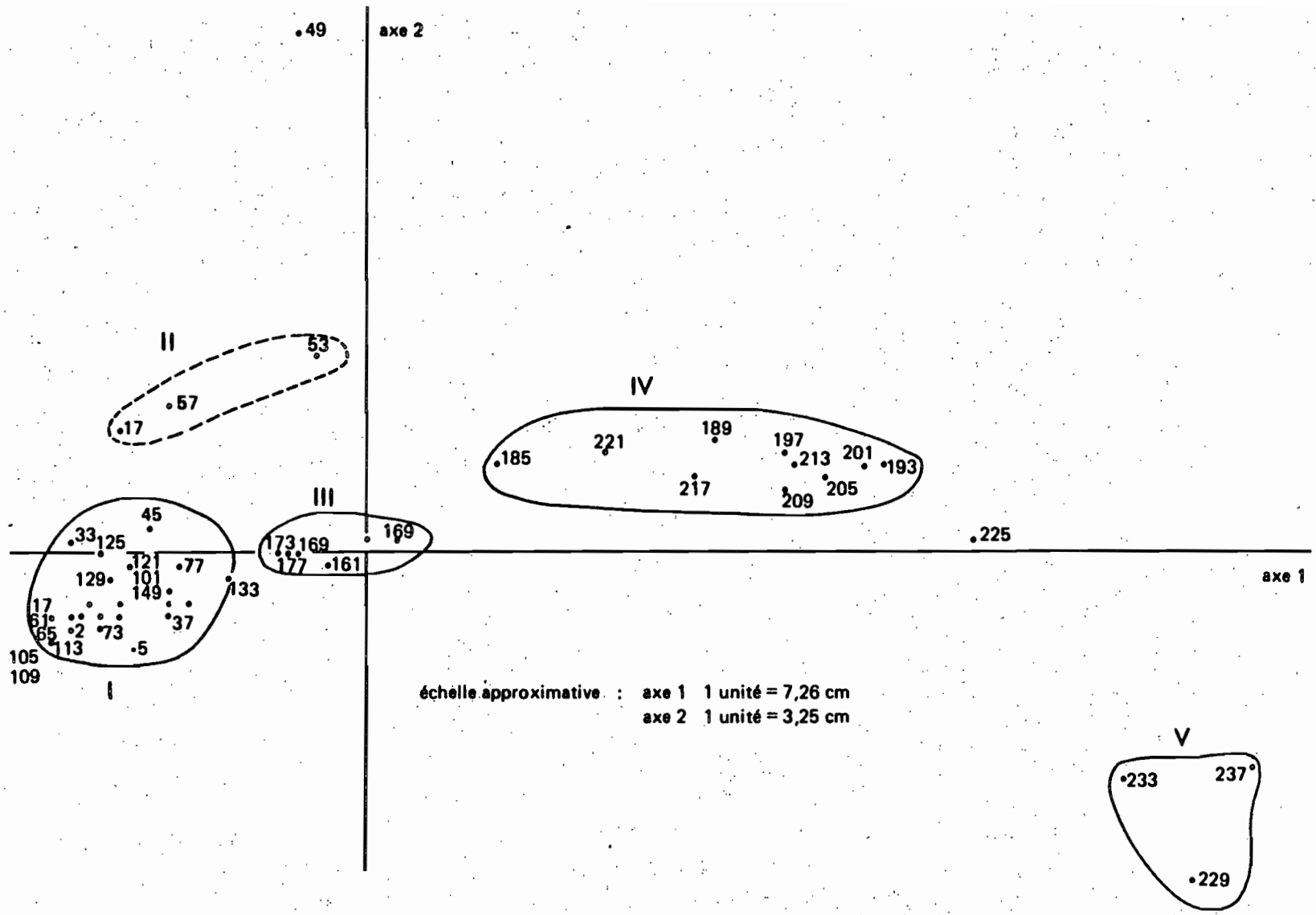


Fig. 7 Analyse factorielle des correspondances espèces-relevés (FETE OLE)  
Représentation des relevés dans le plan des axes 1 et 2

TABEAU XVI

REGROUPEMENT DES PRINCIPALES ESPECES EN FONCTION DU SIGNE DE LEURS COORDONNEES  
ET DE LEUR PARTICIPATION SUR CHAQUE AXE

ESPECES	Participation							
	Axe 1		Axe 2		Axe 3		Axe 4	
<i>Aristida mutabilis</i>	-	17,72	-	2,80	0+	0,01	0+	0,06
<i>Aristida funiculata</i>	-	13,80	-	1,73	0+	0,07	0+	0,01
<i>Schoenfeldia gracilis</i>	-	10,58	-	1,27	+	0,58	0+	0,00
<i>Blepharis linariifolia</i>	-	9,65	-	0,45	0-	0,14	0+	0,07
<i>Indigofera aspera</i>	-	8,68	-	2,18	0-	0,03	0+	0,04
<i>Chloris priurii</i>	-	6,67	-	1,21	+	1,46	0+	0,09
<i>Fimbristylis hispidula</i>	-	8,71	-	1,16	-	0,37	0+	0,00
<i>Aerva javanica</i>	-	0,28	+	19,25	-	18,81	+	0,08
<i>Kyllinga sp</i>	-	0,03	+	23,08	-	21,50	+	0,05
<i>Merremia pinnata</i>	-	0,90	+	8,61	-	7,18	0+	0,02
<i>Monsonia senegalensis</i>	-	1,02	+	12,53	-	19,03	0+	0,00
<i>Borreria stachydea</i>	0+	0,001	+	10,83	-	3,12	+	0,29
<i>Commelina forskalaei</i>	+	0,57	+	11,85	-	1,05	+	0,33
<i>Ipomoea eriocarpa</i>	+	27,55	0+	0,00	0+	0,07	0+	0,08
<i>Brachiaria ramosa</i>	+	25,64	0-	0,04	0+	0,11	0+	0,10
<i>Diheteropogon kagerupii</i>	+	21,61	-	1,74	-	1,29	+	0,97
<i>Pennisetum pedicellatum</i>	+	16,34	0-	0,00	0-	0,05	+	6,06
<i>Digitaria horizontalis</i>	+	12,94	0-	0,05	+	0,4	+	1,79
<i>Indigofera astragalina</i>	+	13,23	+	5,55	+	7,82	-	0,51
<i>Indigofera secundiflora</i>	+	3,00	+	0,53	+	2,52	-	2,69
<i>Chloris pilosa</i>	+	5,09	+	3,11	+	5,09	-	0,05
<i>Aristida adscensionis</i>	+	10,11	+	3,99	+	7,06	-	1,22
<i>Borreria chaetocephala</i>	+	12,60	+	4,15	+	8,11	-	1,22
<i>Endostemon tereticaulis</i>	+	19,55	-	10,31	-	7,23	+	0,34
<i>Digitaria argilacea</i>	+	13,23	-	7,16	-	5,96	-	9,26
<i>Cyperus amabilis</i>	+	10,37	-	11,46	-	12,95	-	7,68
<i>Cyperus iria</i>	+	10,37	-	11,46	-	12,95	-	7,68
<i>Blainvillea gayana</i>	+	6,45	-	3,19	-	1,32	+	41,44
<i>Corchorus olitorius</i>	+	6,45	-	3,19	-	1,32	+	41,44

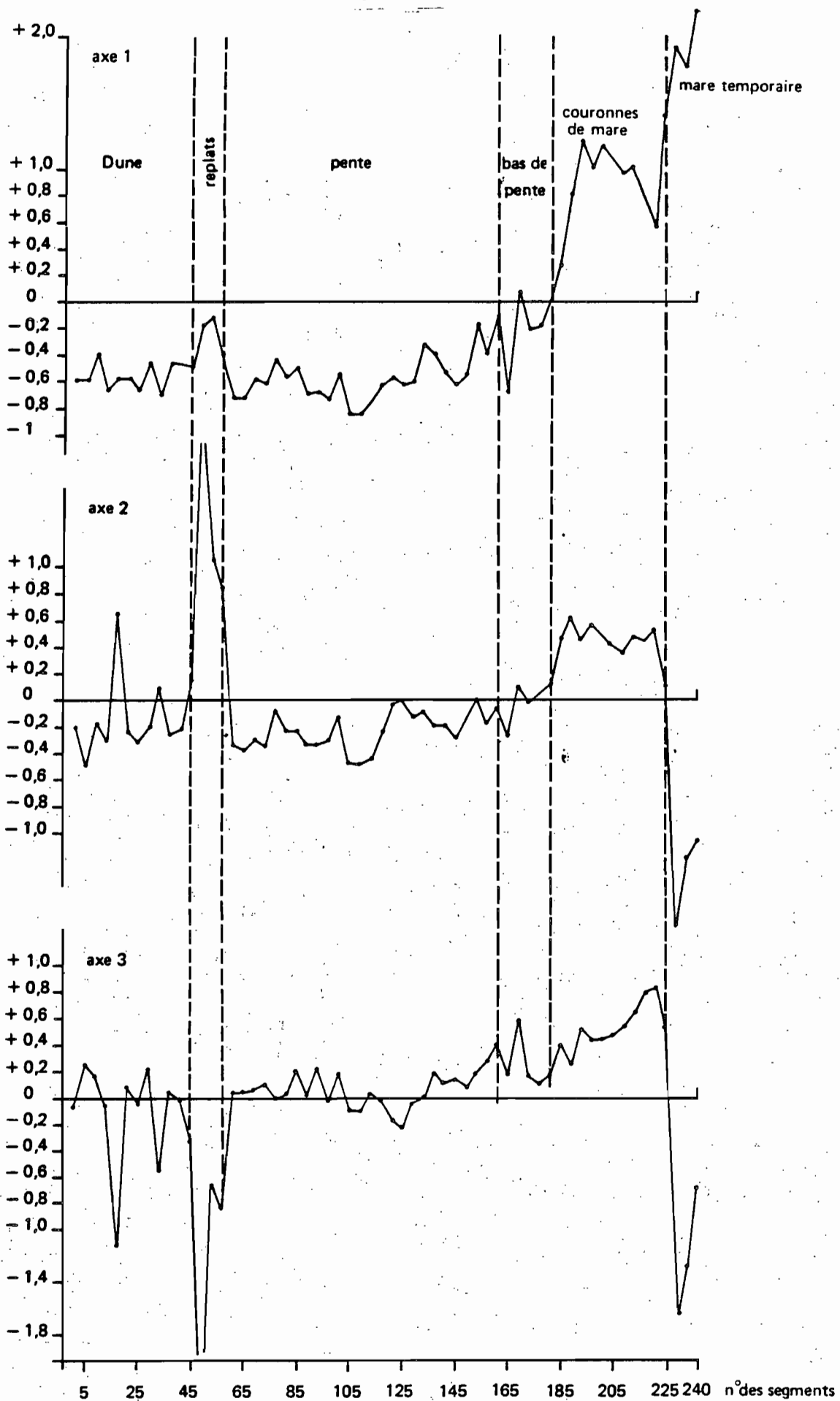


Fig. 8 Coordonnées sur les axes 1, 2, 3 de l'analyse factorielle pour chaque relevé en fonction de sa position sur la ligne (60 relevés) (FÊTE OLÉ)

bas-fonds et des relevés de dunes. En tenant compte des axes 1, 2 et 3, on peut déterminer 5 coupures correspondant à la séparation des 5 groupes de relevés qui apparaissent sur le diagramme des projections.

A partir de ces éléments, le long de la toposéquence, l'analyse permet de distinguer 5 groupes de relevés auxquels correspondent des groupes d'espèces liées aux principaux milieux.

- Groupe I : relevés des zones à sols secs, bien drainés des dunes et pentes, à strate herbacée claire, caractérisés par la présence de :

*Aristida mutabilis*  
*Schoenfeldia gracilis*  
*Aristida funiculata*  
*Blepharis linariifolia*  
*Indigofera aspera*  
*Chloris plicurii*  
*Fimbristylis hispidula*

Sur l'axe 3, quelques relevés (17, 33, 45, 121, 125) se détachent de ce groupe, du fait de leur appauvrissement en Graminées et de la présence d'espèces de dunes moins fréquentes, telles que : *Polycarpea linearifolia*, *Gisekia pharnaceoides*, *Indigofera senegalensis*.

- Groupe II : relevés correspondant aux zones de replats, avec un horizon superficiel plus sableux, et absence de ruissellement. La strate herbacée est plus dense, avec comme espèces principales :

*Aerva javanica*  
*Merremia pinnata*  
*Monsonia senegalensis*  
*Borreria stachydea*  
*Commelina forskalaei*

Le relevé 49, qui appartient à ce type de milieu, se singularise du groupe par la présence de *Kyllinga* sp. et l'absence de nombreuses espèces.

- Groupe III : correspondant aux relevés des bas de pente, présentant un bilan hydrique plus favorable, et une hydromorphie temporaire en profondeur. Il est un groupe intermédiaire, comprenant des espèces du groupe I, telles *Aristida mutabilis*, *Schoenfeldia gracilis*, *Chloris plicurii* et des espèces des zones hydromorphes telles que *Chloris pilosa*, *Panicum laetum* et *Digitaria horizontalis*. Il s'en distingue par l'absence ou la rareté des autres espèces. Il correspond à une zone de végétation graminéenne plus dense, où *Dactyloctenium aegyptium* et *Brachiaria xantholeuca* sont plus abondants.

- Groupe IV : il correspond aux relevés des couronnes de mares, présentant un sol hydromorphe à faible profondeur, et un boisement assez important. Les espèces qui les caractérisent se scindent en deux groupes distincts, l'un appartient au couvert des arbres et l'autre aux zones découvertes.



Zone sous couvert

*Ipomoea eriocarpa*  
*Brachiaria ramosa*  
*Diheteropogon hagerupii*  
*Pennisetum pedicellatum*  
*Digitaria horizontalis*

zone à découvert

*Indigofera astragalina*  
*Indigofera secundiflora*  
*Chloris pilosa*  
*Aristida adscensionis*  
*Borreria chaetocephala*

- Groupe V : il représente les zones inondées temporairement  
On peut distinguer :

les micro butes inondées moins fréquemment, occupées par  
*Endostemon tereticaulis* et *Digitaria argilacea* avec *Panicum*  
*laetum* et *Zornia glochidiata*.

les zones basses à *Cyperus* spp., *Zornia glochidiata*, *Panicum*  
*laetum* et parfois *Echinochloa colona*

les zones inondables et couvertes par les couronnes d'arbres  
avec peu de végétation : *Blainvillea gayana* et *Corchorus oli-*  
*torius*

L'analyse factorielle des correspondances a permis de mettre en évidence les regroupements possibles entre espèces et entre relevés. Les groupes de relevés ainsi constitués montrent une bonne correspondance avec les groupements déterminés précédemment (cf § 1.2.2.). La comparaison des groupes de relevés et des groupes d'espèces avec les états de variables écologiques, relevés simultanément le long des transects, permet une interprétation écologique de ces groupes ainsi que le montre le Tableau XVII, qui résume les relations entre relevés, espèces et conditions de milieu pour 1975 à FETE-OLE.

- DAHRA Nord

Sur l'axe 1, les relevés s'ordonnent essentiellement en fonction de leur position topographique le long de la toposéquence. On distingue du côté des ordonnées négatives, l'ensemble des relevés de dune et de haut de pente et du côté positif de l'axe les relevés de bas de pente et de bas-fond. Vers l'extrémité s'individualisent les relevés correspondant aux zones de bas fond à Convolvulacées dominantes. Près de l'origine se regroupent des relevés à affinités intermédiaires. Les projections sur les autres plans factoriels permettent l'individualisation d'autres sous-groupes de relevés.

Les teneurs en argile ne varient pas de façon sensible en fonction de la topographie, (cf § 4, chapitre 1), mais on note une modification des proportions de sables fins/sables grossiers (0,78 en dune, 1,33 en bas fond). Il n'y a pas de redistribution des précipitations par ruissellement, le sol étant meuble en surface et très perméable. L'interprétation des axes 2, 3 et 4 n'apparaît pas clairement. Le tableau XVIII résume les relations entre relevés et espèces.

La comparaison avec les groupements déterminés précédemment montre une bonne correspondance au niveau des trois principaux ensembles : groupe de dunes et hauts de pente à *Tephrosia purpurea*, groupe de bas de pentes à *Schoenfeldia gracilis*, et groupe des bas fonds à Convolvulacées. Dans une végétation herbacée physionomiquement assez homogène les autres sous-groupes n'avaient pas été distingués excepté le faciès à *Zornia*.

TABLEAU XVII - LIAISONS ENTRE RELEVÉS-ESPECES ET MILIEUX, LE LONG D'UNE TOPOSEQUENCE FETE-OLE

SOLS NE PRESENTANT PAS D'HYDROMORPHIE APPARENTE			SOLS HYDROMORPHES EN SURFACE OU A FAIBLE PROFONDEUR					
Sol à horizon superficiel couronné (cyanophytes)	Sol à horizon superficiel sableux	Sol à surface battante, enrichi en argile en surface par colluvionnement	Sol moule en surface assez riche en matière organique		Sol argileux et battant en surface			
Niveau hydrique peu favorable, pertes par ruissellement	Bonne perméabilité, pas de ruissellement	Niveau hydrique plus favorable, apport par ruissellement, hydromorphie en profondeur	Hydromorphie temporaire		Inondation temporaire			
Dunes et Pentec	Replata	Bas de Verranta	Couronne de maré		Naze temporaire			
GROUPE I	GROUPE II	GROUPE III	GROUPE IV		GROUPE V			
Nombreuses petites plages nues	végétation herbacée claire		Sous couvert arborescent	A découvert	Microbutes moins invadées	Parties Bases		
		Strate graminéenne plus dense			à découvert	Cyperus iria Cyperus amabilis	Sous couvert arborescent	
	<i>Aristida matabilis</i> <i>Aristida fasciculata</i> <i>Schumfeldia gracilis</i> <i>Ruppertia limicola</i> <i>Indigofera aspera</i> <i>Chloris pruriifolia</i> <i>Panicum polyanthum</i>	<i>Arava javanica</i> <i>Brachiaria pinnata</i> <i>Hemionia senegalensis</i> <i>Crematogaster forficata</i> <i>Rottboellia exaltata</i>	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> <i>Brachiaria zanzibarica</i> plus abondante	<i>Ipomoea triloba</i> <i>Brachiaria ramosa</i> <i>Diatrypella hirsuta</i> <i>Panicum pedunculatum</i> <i>Digitaria horizontalis</i>	<i>Indigofera antipathica</i> <i>Indigofera secundiflora</i> <i>Chloris pilosa</i> <i>Aristida adscendens</i> <i>Rottboellia chaetocarpa</i>	<i>Diatrypella hirsuta</i> <i>Digitaria horizontalis</i>	Plus <i>Panicum polyanthum</i> et <i>Barnia glaberrima</i>	<i>Blainvillaea gayana</i> <i>Cenchrus ciliaris</i>

TABLEAU XVIII- LIAISONS ENTRE RELEVÉS ET ESPECES LE LONG DE LA TOPOSEQUENCE DE DAHRA-NORD.

Relevés de dunes et Haut de Pentes Végétation dominée par les légumineuses sable grossier plus abondant	Zone intermédiaire plus riche en graminées Zone intermédiaire pente	Zone des bas de pentes à <i>Schoenfeldia</i> dominant	Zone des bas fonds à Convolvulacées dominante Sable fin plus abondant
<p style="text-align: center;">GROUPE I</p> <p><i>Tephrosia purpurea</i> <i>Fimbristylis hiapidula</i> <i>Phyllanthus pentandrus</i> <i>Monsonia senegalensis</i> <i>Eragrostis tremula</i></p> <p>Sous groupe                      Sous groupe</p> <p><i>Cassia mimosoides</i>            <i>Jacquemontia tamifolia</i> <i>Borreria stachydea</i>        <i>Merremia tridentata</i> <i>Indigofera pilosa</i>           <i>Conelina forskalei</i> <i>Aristida stipoides</i>         <i>Fimisetum violaceum</i> <i>Trichoneura mollis</i></p>	<p style="text-align: center;">GROUPE II</p> <p><i>Dactyloctenium aegypticum</i> <i>Cenchrus biflorus</i> <i>Brachiara xantholeuca</i> <i>Aristida mutabilis</i> <i>Indigofera aspera</i></p>	<p style="text-align: center;">GROUPE III</p> <p><i>Schoenfeldia gracilis</i> <i>Alysicarpus ovalifolius</i> <i>Tephrosia platycarpa</i> <i>Chloris priurii</i></p> <p>Sous groupe</p> <p><i>Zornia glochidiata</i> dominant</p>	<p style="text-align: center;">GROUPE IV</p> <p><i>Ipomoea Vagans</i> <i>Ipomoea Pes-tigridis</i></p> <p>Sous groupe                      Sous groupe</p> <p><i>Crotalaria perrottetii</i>        <i>Citrullus colocynthis</i> <i>Striga aspera</i>                   <i>Striga gesnedioides</i> <i>Schoenfeldia gracilis</i>        <i>Chloris priurii</i></p>

- DOLI Nord

L'analyse factorielle des correspondances relevés/espèces pour DOLI nord montre un fort regroupement des relevés autour de l'origine pour l'ensemble des axes, avec opposition sur l'axe 1 du relevé n° 5 qui ne comprend que deux espèces : *Andropogon gayanus* et *Euphorbia convolvuloïdes* (voir figure 9) *Andropogon gayanus* forme des touffes éparses localisées en sommet de dune. Elle n'a été rencontrée que dans un seul relevé (n° 5), *Euphorbia convolvuloïdes* est très peu abondante en dune où elle est localisée. La présence de ces deux espèces, jointe à l'absence dans ce relevé des autres espèces de dunes, confèrent à ce dernier un "poids" important dans l'analyse. Sur l'axe 2 s'individualisent les relevés 313 à 333 qui correspondent aux zones de bas fond dont le sol présente des traces d'engorgement temporaire en profondeur. Ces relevés sont caractérisés par les espèces suivantes qui en sont pratiquement exclusives :

*Schoenfeldia gracilis*  
*Panicum pansum*  
*Pennisetum pedicellatum*  
*Setaria pallide-fusca*  
*Indigofera bracteolata*

L'ensemble des autres relevés groupés autour de l'origine n'est pas analysable. Après avoir enlevé le relevé 5, les relevés 313 à 333, et les espèces qui en sont exclusives, nous avons réalisé une deuxième analyse sur les relevés et les espèces restantes (voir figure 10). On obtient sur l'axe 1 : d'une part, les relevés de dunes et de hauts de pentes, sur sol à horizon superficiel meuble, et présentant une augmentation progressive du taux d'éléments fins, qui s'ordonnent vers les abscisses négatives. D'autre part, les relevés qui correspondent aux pentes et bas de pentes, sur sols marqués par une discontinuité texturale à faible profondeur (partie positive de l'axe 1). De ces deux ensembles s'individualisent des groupes de relevés sur les axes 1, 2 et 3. L'interprétation des axes 2 et 3 n'apparaît pas de façon claire.

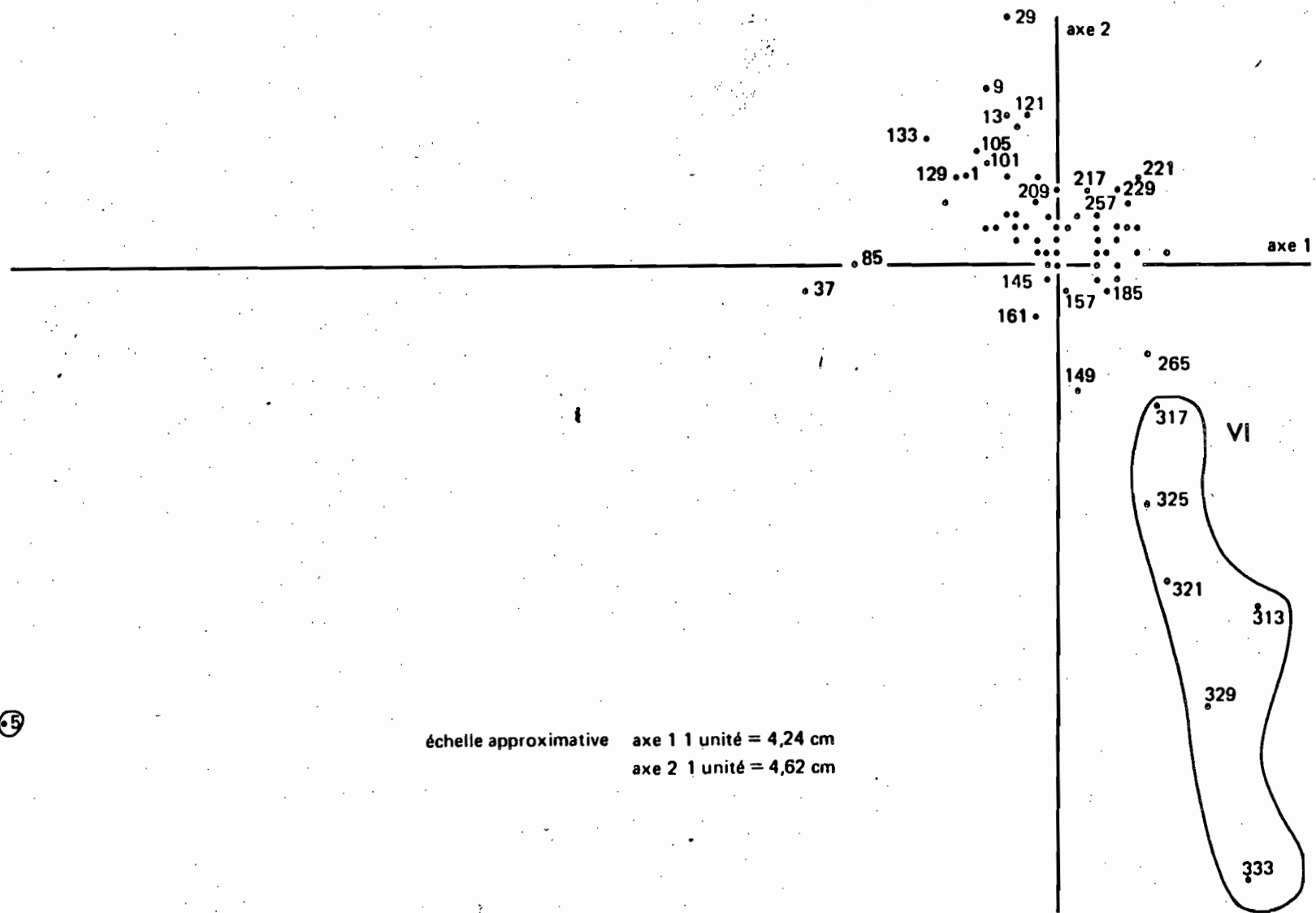
Sur l'ensemble de la toposéquence se distinguent 3 ensembles de relevés, correspondant aux conditions de topographie et de sol.

- L'ensemble correspondant aux dunes et hauts de pentes qui comprend un groupe I

Caractérisé par : *Fimbristylis hispidula*  
*Sporobolus stolzii*  
*Cochlospermum tinctorium*

un groupe II caractérisé par *Schizachyrium exile*  
*Alysicarpus ovalifolius*  
*Elionurus elegans*  
*Cassia mimosoïdes*  
*Tephrosia bracteolata*

auquel il faut ajouter *Andropogon gayanus* et *Euphorbia convolvuloïdes*



échelle approximative axe 1 1 unité = 4,24 cm  
axe 2 1 unité = 4,62 cm

Fig. 9 - Analyse factorielle des correspondances espèces-relevés (DOLI-nord).  
Représentation des relevés dans le plan des axes 1 et 2.

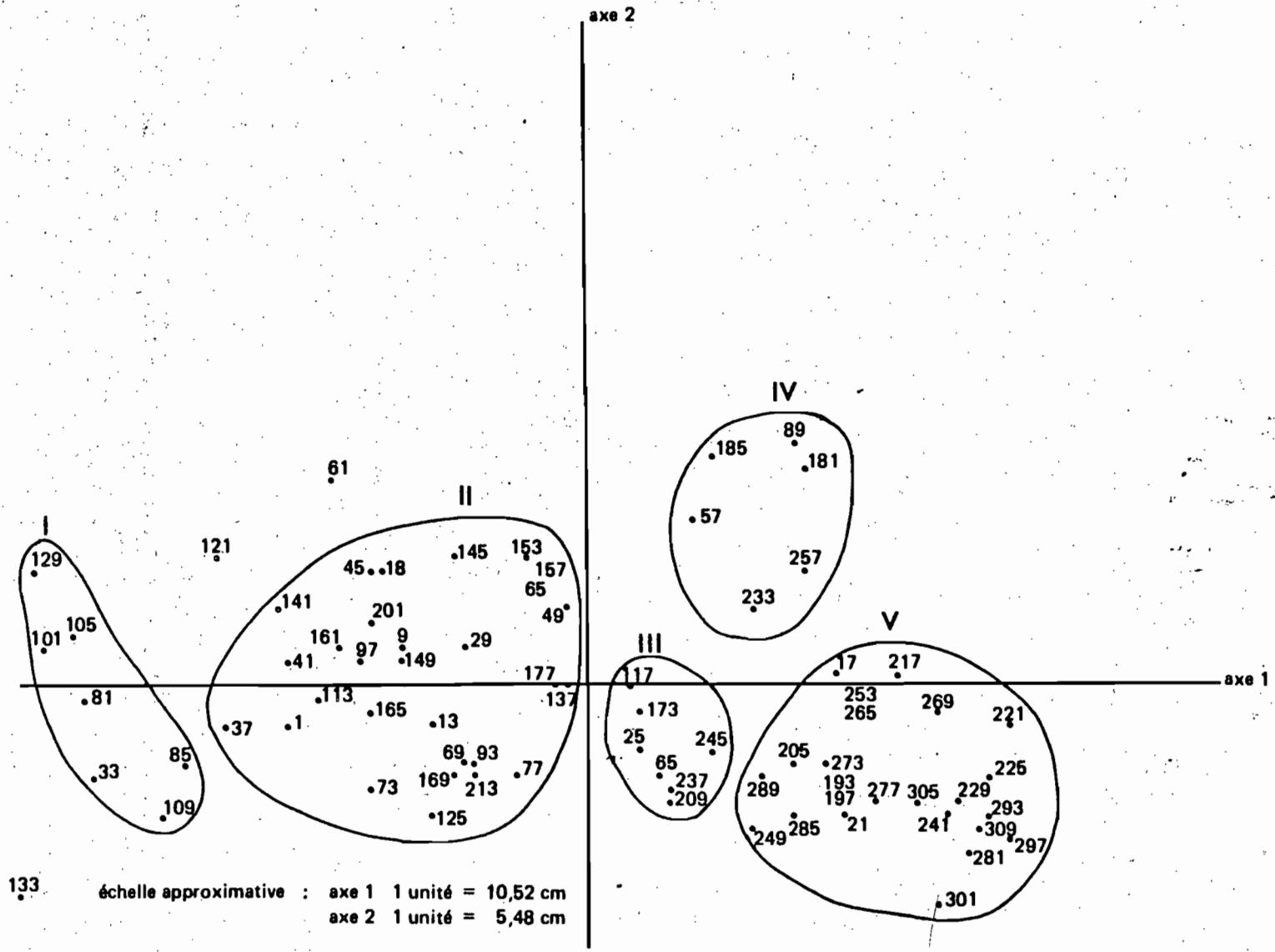


Fig. 10 Analyse factorielle des correspondances espèces-relevés (Doli-Nord)  
Représentation des relevés dans le plan des axes 1 et 2 (relevé n°5 313 à 333 enlevés)

- L'ensemble correspondant aux pentes et bas de pentes, qui comprend un groupe III intermédiaire avec le précédent est caractérisé par :

*Ctenium elegans*  
*Eragrostis tremula*  
*Kohautia grandiflora*

un groupe IV qui correspond aux zones à couverture arbustive à *Guiera senegalensis* plus importante à :

*Ipomoea coscinosperma*  
*Merremia tridentata*

un groupe V caractérisé par :

*Indigofera dendroïdes*  
*Tephrosia linearis*  
*Crotalaria perrottetii*  
*Digitaria gayana*  
*Merremia pinnata*

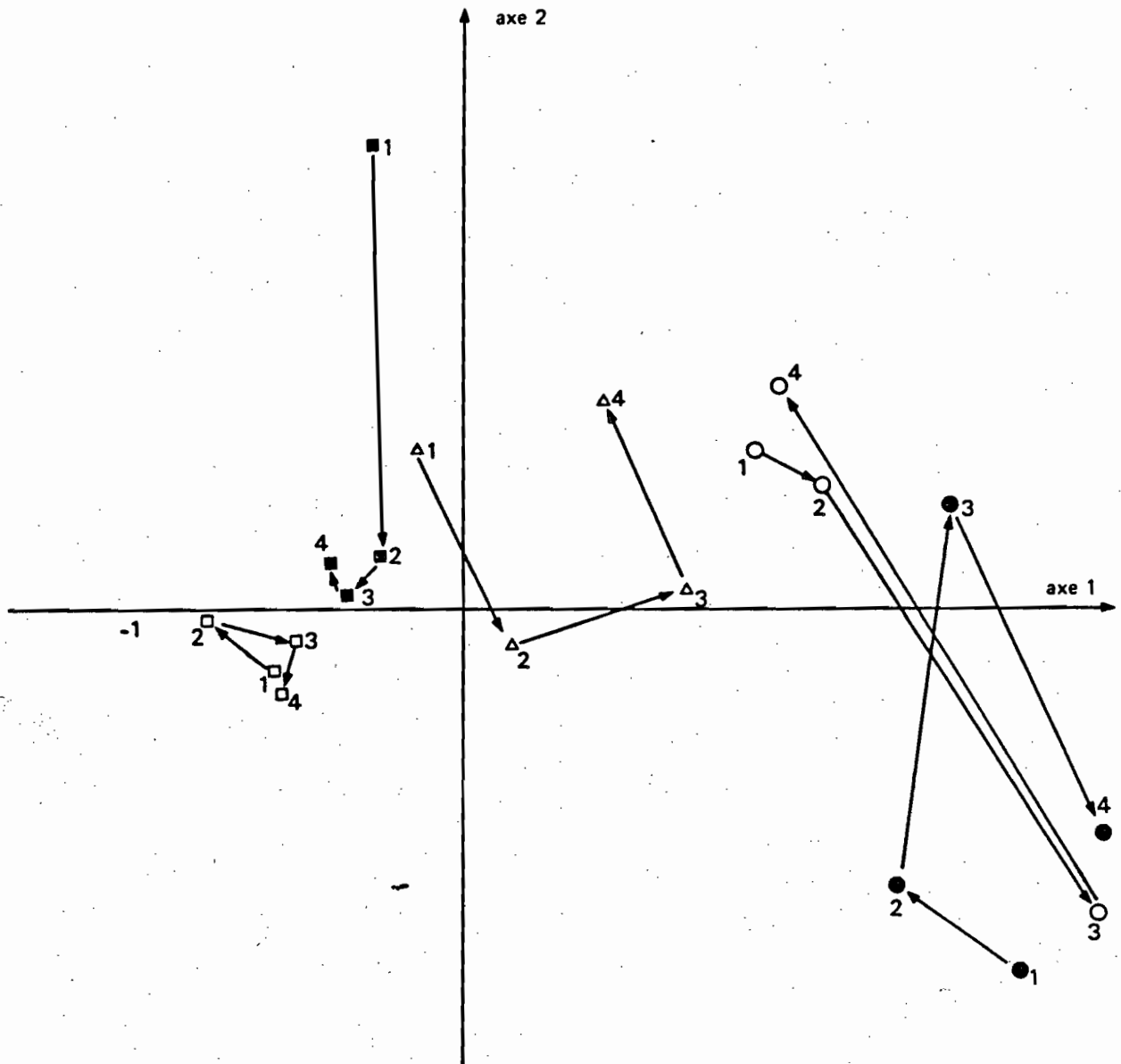
- L'ensemble des bas fonds, fortement individualisé à couverture graminéenne plus dense correspond au groupe VI avec :

*Schoenfeldia gracilis*  
*Panicum pansum*  
*Pennisetum pedicellatum*  
*Setaria pallide-fusca*  
*Indigofera bracteolata*

La comparaison avec les unités de végétation définies auparavant montre une bonne concordance. Le groupement sciaphile des zones non hydromorphes n'apparaît pas se différencier nettement lors des analyses. Cela est certainement dû aux dimensions réduites des taches de ce groupement, et à leur faible interception par les segments.

#### 1.2.4.3. - Application aux relevés des années successives

Malgré les difficultés et les incertitudes liées aux possibilités de signification variable des axes, nous avons appliqué l'analyse factorielle des correspondances aux relevés des quatre années successives. On constate que les rapprochements entre relevés permettent chaque année l'individualisation de groupements semblables, mais que leurs positions relatives varient sensiblement d'une année à l'autre. Sur la figure 11, les points moyens des projections des principaux groupes de relevés ont été portés pour les 4 années d'étude. Il en ressort, que l'individualisation des groupes varie en fonction des conditions climatiques de l'année. En année sèche, les groupements de dune et de replat s'individualisent fortement, alors que les groupements de zone hydromorphes sont moins individualisés du fait de l'absence partielle ou totale des espèces caractéristiques liées à l'inondation temporaire. En année humide on assiste à une uniformisation des groupements de zone sèche et à une forte individualisation des groupements de mare. Les variations constituent des fluctuations plus ou moins importantes, mais réversibles, autour d'un état moyen.



- groupement I, dunes et pentes
- groupement II, replats
- △ groupement III, bas de versants
- groupement IV, couronne de mare
- groupement V, mare temporaire

1 = 1975    2 = 1976    3 = 1977    4 = 1978

Fig. 11 - Déplacement des points moyens des projections des relevés sur les axes 1 et 2 de l'AFC, pour les cinq groupements principaux de FETE-OLE au cours des 4 années de mesure.



- DISCUSSION

L'analyse factorielle des correspondances, portant sur espèces-relevés, permet dans chaque cas d'ordonner les relevés et les espèces et de montrer leur correspondance. Les variables étudiées de façon fine sur le terrain (voir chapitre III) sont les caractéristiques de sol : texture, nature des horizons, état de surface, et les éléments du bilan hydrique : réserve utilisable, perméabilité, redistribution de l'eau. On voit que ces variables permettent l'interprétation des premiers axes de l'analyse, et l'explication d'une part importante de la diversité du tapis végétal mais dans ce cas l'interprétation directe était plus rapide et aussi sûre. Pour DHARA nord, du fait de l'absence de variation importante de ces variables, l'explication est plus difficile. On peut penser qu'alors d'autres variables moins apparentes prennent plus d'importance.

La correspondance entre espèces et relevés, ainsi que les groupes de relevés qui ont pu être séparés montrent que l'on retrouve assez fidèlement les unités de végétation définies par ailleurs avec une autre méthode (cf § 1.2.2.)

Certaines espèces assez généralement réparties telles : *Cenchrus* sp. plur., *Dactyloctenium aegyptium*, *Brachiaria xantholeuca* peuvent caractériser, par leur abondance particulière certains groupements tels par exemple les groupements de replat et ceux de bas de pente à FETE-OLE ; cela ne ressort pas de l'analyse. Certaines espèces peu abondantes ont dans les relevés de taille réduite une présence très faible, alors qu'elles peuvent être caractéristiques d'un milieu (cas de *Aeschynomona* indice des zones inondées temporairement). Cela montre qu'il serait préférable d'utiliser pour l'analyse des relevés de taille plus importante que ceux qui ont été utilisés ici, de façon à ce que chaque relevé constitue un échantillon représentatif.

## 2 - MISE EN PLACE DU PEUPEMENT, VARIATIONS INTERANUELLES ET EVOLUTION.

### 2.1.- Mise en place du peuplement.

La strate herbacée des formations sahéliennes étant constituée essentiellement d'annuelles, sa production dépend en premier lieu de la mise en place du peuplement et par conséquent du stock de graines disponibles, de leur germination et de l'établissement de plantules. Si de nombreuses observations ont été faites sur les variations de composition spécifique du couvert herbacé des phytocénoses sahéliennes, peu ont porté sur les conditions de mise en place du peuplement.

#### 2.1.1. - Production de semences et stock de graines.

Nous n'avons pas réalisé de mesures de production de graines, ni de stock de semence dans le sol. BILLE (1973, 1977a) a effectué en 1970 et 1971 une estimation de cette production à FETE-OLE. Pour 1970, les mesures s'étagent de 1,4 à 13 g.m<sup>-2</sup> avec une moyenne de 5,8 g.m<sup>-2</sup> en 1971, il obtient pour les dunes et pentes 2,3 g.m<sup>-2</sup> correspondant à 3 750 diaspores par m<sup>2</sup>. En bas fond, il obtient 11,97 g.m<sup>-2</sup> correspondant à 10 050 diaspores.

Des mesures de quantité de graines présentes sur le sol ou dans les 5 premiers mm donnent les résultats suivants :

	dune et pente	bas fond
Novembre 1971	3,35 g.m <sup>-2</sup> 4 384 graines.m <sup>-2</sup>	18,4 g.m <sup>-2</sup>
Août 1972	2,4 g.m <sup>-2</sup> 3 415 graines.m <sup>-2</sup>	17,10 g.m <sup>-2</sup> 11 940 graines.m <sup>-2</sup>
Janvier 1973	2,10 g.m <sup>-2</sup>	14,2 g.m <sup>-2</sup>

Les résultats de novembre 1971 indiquent soit une sous estimation de la production de l'année, soit plus vraisemblablement l'existence d'un stock important de graines antérieures (1,18 g.m<sup>-2</sup> en dunes et pentes et 6,4 g.m<sup>-2</sup> en bas fond). La production grainière ayant été pratiquement nulle en 1972, l'auteur déduit des mesures une perte par consommation ou dégradation correspondant à 1,1 g.m<sup>-2</sup> par an. Ce chiffre discutable comprend aussi la fraction de graines germées en 1972. BILLE estime que la production annuelle de semences correspond à environ 3 % de la production de biomasse épigée, ce qui paraît faible vis-à-vis des chiffres usuellement cités. Des essais d'arrosage successifs (voir plus loin) ont permis d'obtenir à DAHRA entre 3 000 et 4 000 germinations par m<sup>2</sup>. GASTON (1976) au Tchad, montre que la production grainière atteignait 20,6 g.m<sup>-2</sup> en 1973 et 223,8 g.m<sup>-2</sup> en 1975. GROUZIS (1979) en Haute Volta montre qu'il existe une grande variabilité dans la production de semences, allant pour une année de 4,3 g.m<sup>-2</sup> pour certains groupements de glaciis limoneux à 53,1 g.m<sup>-2</sup> pour le groupement de piedmont sableux. Le rapport entre production grainière annuelle et production de biomasse épigée varie de 6 à 31 %. Ces valeurs sont nettement supérieures à celles de BILLE (1977a) et se rapprochent de celles fréquemment citées pour les thérophytes : 20 à 40 % (OGDEN in HARPER, 1977).

On connaît en fait assez peu de choses sur la production de graines du couvert herbacé des phytocénoses sahéliennes, bien que ce soit un des aspects essentiels de la dynamique de ce couvert, la graine étant le seul lien entre deux périodes de végétation. Cette production est importante, mais elle est très variable d'une année à l'autre. Selon GASTON (1976a), elle dépend essentiellement de la répartition des précipitations, surtout en début de cycle ; nous avons observé le même phénomène au Sénégal. Elle est également très variable d'un groupement à l'autre, notamment en fonction de la capacité de production des espèces dominantes et de la taille de leurs semences. La production grainière représente une part importante de la production de biomasse épigée des thérophytes. Cette proportion croît les années sèches (HARPER, 1977). L'observation montre en effet, que la plupart des espèces sont susceptibles de raccourcir leur cycle et d'assurer une fructification, malgré un développement très réduit. Le stock de graines du sol est très important. Les semences de petites tailles sont parfois retrouvées assez profondément (*Schoenfeldia* à 10 cm à DAHRA). Selon BILLE (1977a), la consommation par les oiseaux et les insectes ne semble avoir qu'un effet accessoire sur le stock.

#### 2.1.2.- Germination et levée.

- Conditions de levée : La levée se produit généralement rapidement après les premières pluies. Elle dépend de la quantité de pluie et surtout du maintien d'une humidité suffisante durant quelques jours. Toute pluie voisine ou supérieure à 10 mm peut provoquer la levée des plantules si le sol reste humide assez longtemps. Ainsi, à FETE-OLE en 1977, une pluie de 12,5 mm le 2 juin, rapidement évaporée, ne provoque pas de levée, excepté sous le couvert des arbustes où le sol reste humide plus longtemps. L'observation des levées en 1975, 1977, 1978 montre que les pluies de début de saison, voisines de 10 mm sont rapidement évaporées et ne provoquent la levée des plantules que si elles sont rapidement suivies d'un deuxième épisode pluvieux. Les conditions de levée dans les sols sableux de la zone étudiée sont : une pluie supérieure ou égale à 20 mm ou une pluie supérieure à 10 mm suivie d'une décade comportant au moins 10 mm de précipitations. En sol lourd (bas fond), la levée se produit plus tard et nécessite des précipitations plus abondantes. Celles-ci servent à combler un déficit plus important du sol. Ce phénomène est généralement observé (BILLE, 1977a ; FLORET et PONTANIER, 1978 ; GROUZIS, 1979). Ce dernier auteur cite 20 mm de pluies comme étant nécessaires à la levée en dunes sableuses. DE VRIES (1978) au Mali, cite des chiffres de 10 à 20 mm. BILLE (1977a) parle de 40 à 60 mm nécessaires à la levée, cette quantité correspond en fait à la quantité nécessaire à la phase d'établissement du peuplement.

Assez fréquemment, une première levée se produit en début de saison à la faveur d'une pluie précoce supérieure à 20 mm. Cette levée est ensuite détruite par une période de sécheresse et une deuxième levée se produit plus tard. Cela a été observé entre autre à FETE-OLE en juin 1977 et juin 1978, à DAHRA sud en juin 1977. En novembre 1976 et décembre 1978, à la suite de pluies très tardives, des levées partielles ont été observées. Les plantules se sont maintenues une dizaine de jours. Parmi les espèces observées, on note : *Cenchrus biflorus*, *Tribulus terrestris*, *Zornia glochidiata*, *Merriemia pinnata* et quelques rares *Brachiaria xantholeuca* et *Cassia mimosaoides*. Les plantules de *Cenchrus* provenaient pour une part des semences de l'année. La distinction n'était pas possible pour les autres espèces.

- Déroulement : Sur sol sableux, la levée se produit de façon rapide, les principales graminées lèvent en masse, ainsi que *Zornia glochidiata*,

*Merremia pinata* et un certain nombre d'espèces à cycle court : *Tribulus terrestris*, *Gisekia pharnaceoides* ... La levée des autres Légumineuses et de certaines plantes diverses est plus étalée. Des observations semblables ont été faites par BILLE (1977a) et DE VRIES (1978). Ce sont les graines enfouies qui germent les premières, cela peut être dû à l'état de semences : âge, conservation etc... ou simplement à des conditions hydriques plus favorables dans le sol.

La densité maximale de plantules est atteinte entre 10 et 15 jours après le début de la levée (voir tableau XIX). Elle décroît ensuite rapidement et se stabilise à environ 20 à 40 % de la valeur maximum (BILLE, 1977a ; GROUZIS, 1979). Le nombre maximal de plantules se situe en général entre 1 000 et 4 000 plantules par mètre carré pour atteindre ensuite 400 à 1 000 plantules par mètre carré. Il y a annuellement un fort gaspillage de diaspores. Lorsque le début de la saison est déficitaire en pluie, le nombre maximal atteint est moindre mais la diminution ultérieure est faible ou nulle (Tableau XIX, figure 12).

Les graines fertiles ne germent pas toutes malgré les conditions favorables. Selon BILLE (1977a) environ 10 % seulement de graines produites germent. Si une période de sécheresse détruit la première levée, de nouvelles graines germeront lorsque les conditions seront redevenues favorables. En 1978, nous avons effectué une expérimentation en bacs, sur des blocs de sols de 5 cm d'épaisseur et de 20 cm de côté. Après un arrosage, les plantules étaient comptées et enlevées. Au bout de 20 jours, il n'apparaît pratiquement plus de plantules. L'arrosage est alors arrêté et le sol laissé à sécher durant 3 semaines. Un nouvel arrosage produit alors une nouvelle levée, avec toutefois un nombre plus faible de plantules (voir Figure 13). Après la troisième levée, l'expérimentation a été interrompue.

Il semble donc exister pour les semences des obstacles à la germination : dormances ou inhibitions de différents ordres, dont certaines pourraient être levées par des alternances humidité-déshydratation. Les quelques travaux existants ou en cours (MIEGE et TCHOUME, 1963 ; GROUZIS, 1979 ; LEGRAND, 1979) confirment que le taux de germination pour les quelques espèces sahéliennes étudiées est faible, et qu'il existe de nombreuses inhibitions ou dormances.

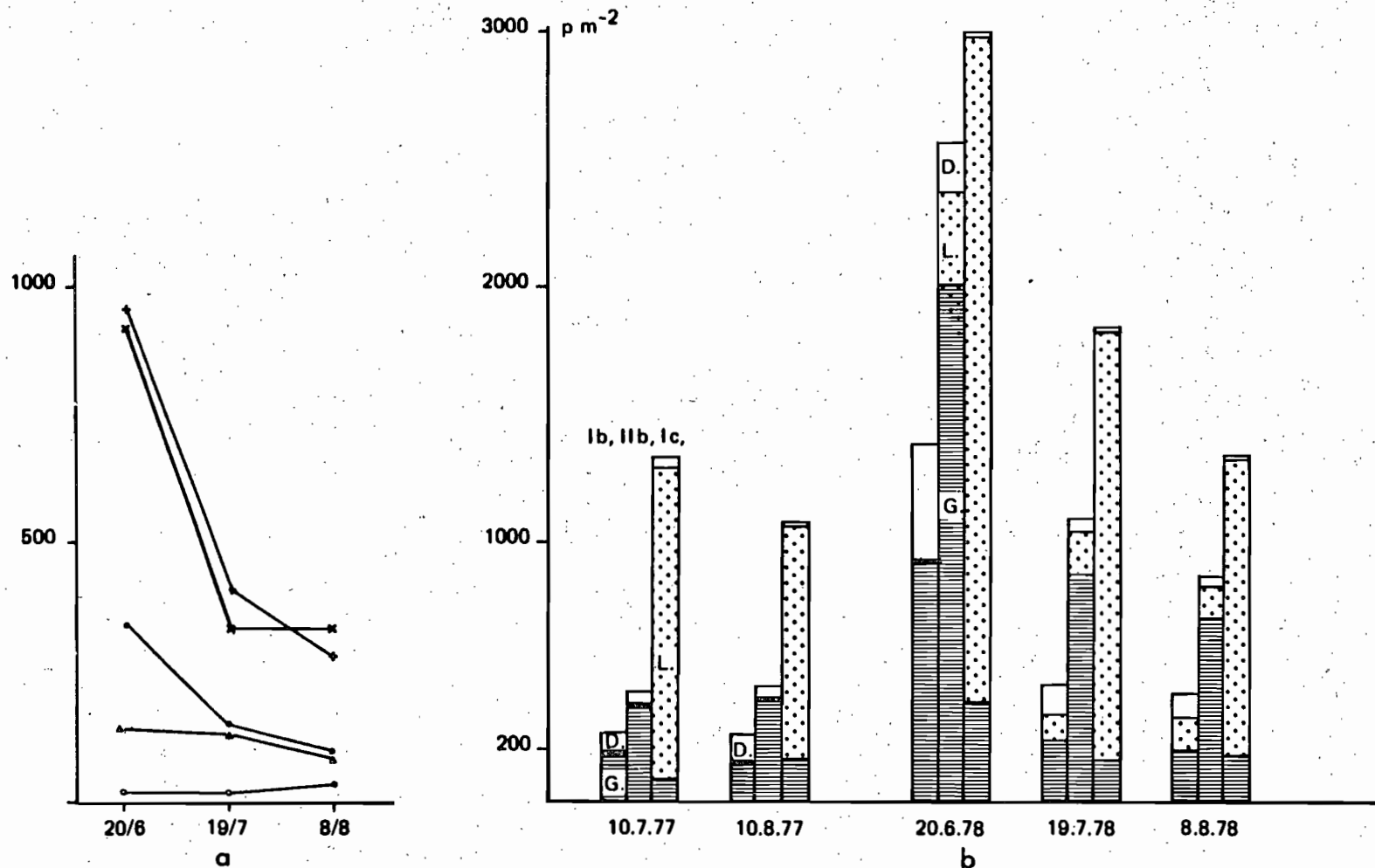
En milieu naturel, on constate, de façon générale, que les principales Graminées germent bien tous les ans ; les Légumineuses par contre présentent de très grandes irrégularités. Les grandes différences de fréquences spécifiques que l'on pourra constater d'une année à l'autre semblent dues, pour les Graminées, à des différences de comportement lors du tallage ou de la croissance : sensibilité à la compétition, ou aux périodes sèches intercalaires, alors que pour les Légumineuses, excepté *Zornia glochidiata*, elles semblent dépendre du comportement germinatif.

Après la levée, l'établissement du peuplement passe par une phase de faible croissance en hauteur, correspondant au tallage des Graminées et à la multiplication végétative des espèces traçantes. D'après HIERNAUX (communication personnelle), le tallage semble dépendre essentiellement de l'espèce, de la densité de touffes et de l'exploitation (piétinement, pâturage précoce).

Annexe Groupement	Levée	Pluie mm	1er comptage				2ème comptage					3ème comptage					
			Date	N	G	L	D	Date	N	G	L	D	Date	N	G	L	D
1975																	
IB	17/7	64,6	30/7	2185													
IIB	17/7	64,6	30/7	3250													
IC	17/7	64,6	30/7	2875													
IA	8/7		47,5														
1977																	
IB	10/7	15,9	20/7	273	72,2 %	1,1	26,7	10/8	243	60,9	2,5	36,6					
IIB	10/7	15,9	20/7	428	86,6 %	0,7	12,7	10/8	453	86,9	6,2	6,9					
IC	4/7	9,5	20/7	1332	6,9	89,0	4,1	10/8	1080	15,0	83,3	1,7					
IA	15/8	32,9	17/8	2575	98,3	0	1,7	29/8	1344	95,3	0,6	4,1					
1978																	
IB	13/6	25,0	20/6	1384	66,9 %	1,1	32,0	19/7	449	55,0 %	20,9	24,1	8/8	425	50,3	26,8	22,9
IIB	13/6	25,0	20/6	2555	78,7 %	14,0	7,3	19/7	1098	80,5 %	15,0	4,5	8/8	863	83,1	14,0	2,9
IC	13/6	25,0	20/6	2993	13,0 %	86,4	0,6	18/7	1841	9,0 %	90,1	0,9	8/8	1343	14,0	85,5	0,5
IA	8/8	147,0															

TABLEAU XIX - OBSERVATIONS SUR LA DATE DE LEVEE ET LE NOMBRE DE PLANTULES OBTENU POUR DES COMPTAGES SUCCESSIFS

N = nombre total de plantules; G, L, et D = pourcentage de Graminées, Légumineuses / et espèces diverses.



a) groupement IIb de DAHRA NORD en 1978  
 ♦ brachiaria xantholeuca, x shoenfeldia gracilis, ▲ autres graminées  
 • zornia glochidiata, autres légumineuses.

b) en 1977 et 1978 à DAHRA pour les groupements : Ib, IIb, Ic  
 G. graminées, L. légumineuses, D. diverses

Fig. 12 Évolution du nombre de plantules après la levée

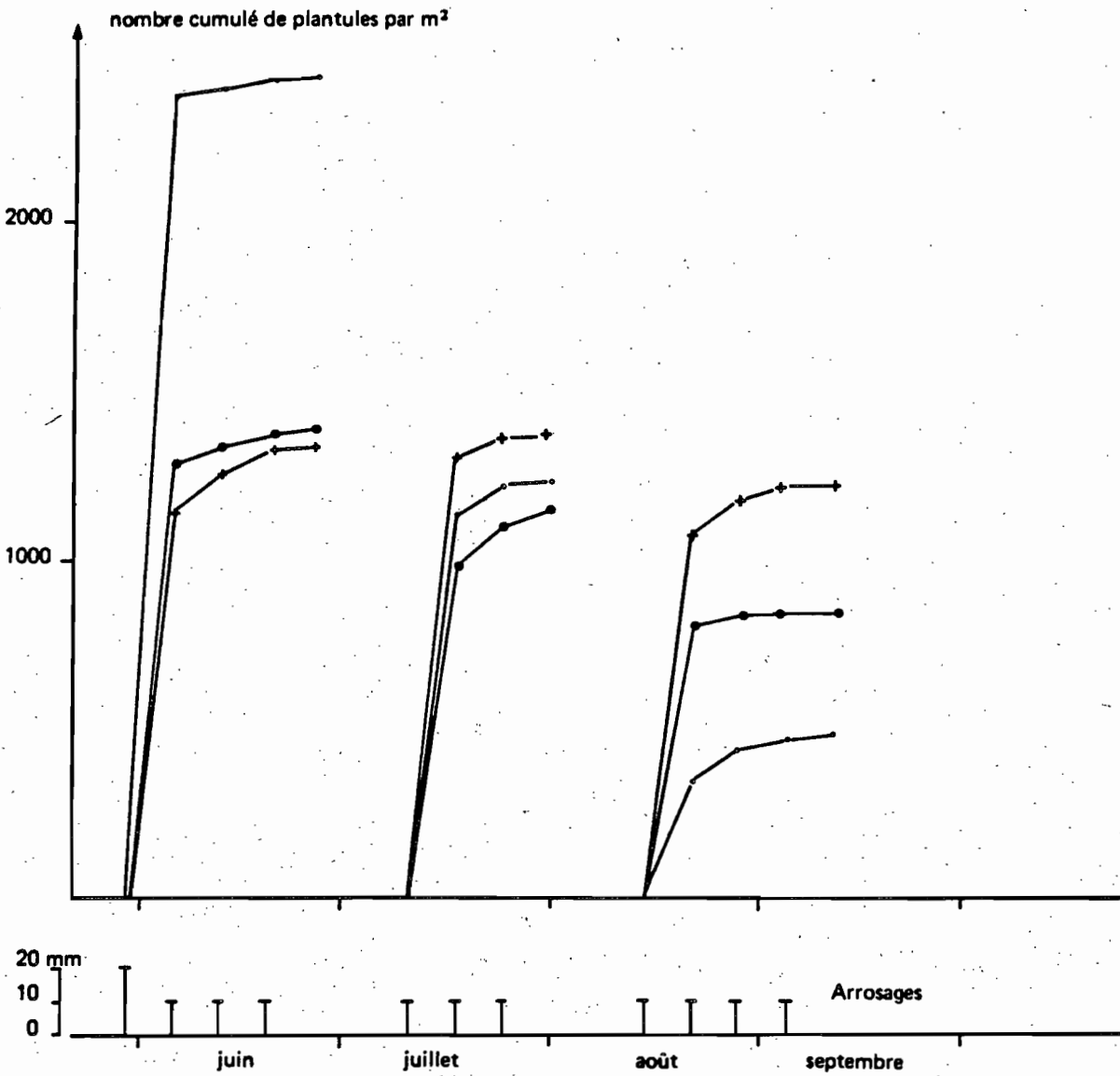


Fig. 13 Nombre de plantules obtenues pour trois périodes d'arrosage successives, en bac de végétation

• groupement Ic, ● groupement Ib, + groupement IIb (moyenne de 5 répétitions)

2.2.- Variations interannuelles entre 1975 et 1978 de la présence et de la fréquence des espèces.

2.2.1.- Variations au niveau global des parcelles.

Les variations interannuelles de la strate herbacée peuvent porter sur la présence des espèces, leur fréquence et leur répartition. La comparaison des listes d'espèces établies dans chaque parcelle pour les quatre années étudiées (2 années pour DOLI), montre des différences très faibles entre les années. Les espèces non retrouvées ou les espèces nouvelles (< à 5 %) sont des espèces rares dans les parcelles, représentées seulement par quelques individus, donc pouvant échapper facilement à une prospection même minutieuse. C'est le cas de *Cleome tenella*, *Gynandropsis gynandra*, *Tripogon minimus* à FETE-OLE, *Wormskioldia pilosa* à DOLI-nord, *Rothia hirsuta* à DAHRA-sud, *Acalypha segetalis* à DOLI-nord ou *Raphionacmè daronii* à DOLI-sud, trouvées certaines années et non d'autres. Une mention à part doit être faite, pour FETE-OLE où un petit nombre d'espèces très localisées, liées à l'inondation temporaire des mares, ne sont présentes que les années où cette inondation est suffisamment prolongée : *Echinochloa colona*, *Alternanthera nodiflora*, *Aeschynomene indica* ...

La présence des espèces dans une station est une donnée relativement constante.

Si l'on considère le nombre d'espèces interceptées à des dates comparables, par une ligne permanente de 120 ou 168 m, installée le long d'une toposéquence, nous obtenons les résultats suivants :

	1975	1976	1977	1978	Total intercepté	Communes aux 4 ans	TOTAL parcelle
FETE-OLE	53	50	51	60	72	35	122
DAHRA-NORD	39	42	38	30	49	28	80

On voit que le nombre et la nature des espèces interceptées varient sensiblement d'une année à l'autre ; la probabilité d'interception d'une espèce par la ligne est fonction de son recouvrement.

On peut appliquer aux listes d'espèces interceptées les différentes années, le calcul du coefficient de similitude de JACCARD

$$P = \frac{c}{a + b - c}$$

où P = coefficient de similitude  
a = espèces interceptées l'année 1  
b = espèces interceptées l'année 2  
c = espèces communes

Le tableau XX montre les valeurs calculées.



TABLEAU XX - VALEURS CALCULEES DU COEFFICIENT DE SIMILITUDE POUR CHAQUE STATION, ENTRE LES DIFFERENTES ANNEES.

	FETE-OLE			DAHRA-nord		DOLI-nord	
	1976	1977	1978	1976	1977	1978	1976
1975	0,66	0,68	0,71	0,80	0,75	0,68	0,66
1976		0,71	0,72		0,74	0,64	
1977			0,66			0,74	

Pour DAHRA-nord, les valeurs du coefficient de similitude montrent que les années sont d'autant plus similaires qu'elles sont plus rapprochées dans le temps. Ceci tendrait à montrer que la végétation de l'année n dépend en grande partie de la végétation de l'année n-1. Ceci n'apparaît pas à FETE-OLE, peut-être en raison des contrastes climatiques plus importants durant les années observées.

La figure 14 schématise l'évolution des contributions spécifiques segment pour les Graminées, Légumineuses et espèces diverses, le long des toposéquences de FETE-OLE et DAHRA-nord.

A FETE-OLE, on constate, de 1975 à 1976 une augmentation de la contribution des Graminées, avec une nette diminution de la contribution des Légumineuses. La pluviosité est assez comparable pour les deux années, mais les pluies de 1976 sont plus tardives et plus concentrées dans le temps. 1977 est une année sèche, la contribution de Légumineuses reste faible et celle des Graminées diminue au profit des espèces diverses. En 1978, la pluviosité est légèrement supérieure à la moyenne, avec une répartition très irrégulière. On assiste à une diminution importante des Graminées et un accroissement des espèces diverses.

A DAHRA-nord, on note une augmentation progressive de la contribution des Graminées de 1975 à 1978. Après la période de sécheresse 1970-1974, la végétation apparaissait sur les dunes et les pentes comme très appauvrie en Graminées. On peut penser que l'équilibre se rétablit progressivement. L'année 1977 qui a connu des précipitations très déficitaires, voit une chute importante de la contribution des Légumineuses. En 1978, la baisse de contribution des espèces diverses est explicable par l'élimination de beaucoup d'entre elles lors des périodes de sécheresse intercalaires et aussi par le fait que l'allongement de la période globale de végétation a entraîné la disparition des espèces précoces avant la date de la mesure.

#### 2.2.2.- Contributions spécifiques au niveau des principaux groupements.

Dans les principaux groupements, (c'est-à-dire ceux qui occupent une part importante de la surface et présentent des étendues homogènes suffisantes) nous avons étudié les fréquences et les contributions spécifiques par la méthode des points-quadrats (cf. & 1.2.3.). Les groupements étudiés en 1975 sont : Groupement Ia de FETE-OLE, Ib et Iib de DAHRA-nord, Ic de DAHRA-sud et Id de DOLI nord. Pour les années ultérieures, seuls les groupements de DAHRA ont été suivis.

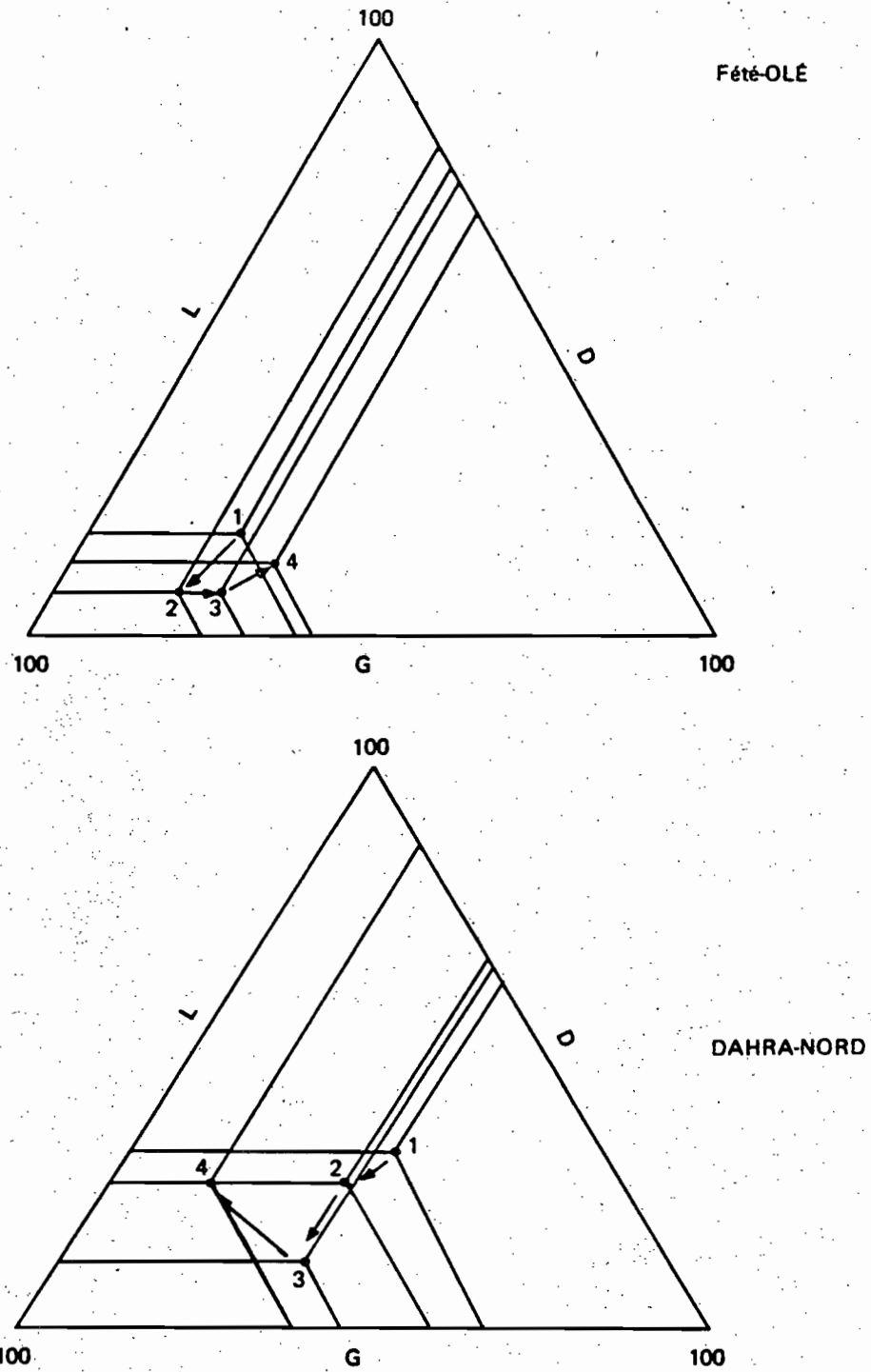


Fig. 14. évolution des contributions spécifiques des graminées (G), légumineuses (L) et diverses (D) le long des Toposéquences à Fété Olé et Dahra-Nord pour 4 années successives : 1975-1978

- 1 = 1975
- 2 = 1976
- 3 = 1977
- 4 = 1978

### 2.2.2.1. - Contributions spécifiques en 1975.

Le tableau XXI donne les présences, les contributions spécifiques et le rang calculés pour 5 groupements. Les mesures ont été effectuées au moment de la biomasse maximale. On note, pour chaque groupement, la présence de quelques espèces, à forte contribution et nettement dominantes :

- Groupe ment Ia : : *Aristida funiculata*, *A. mutabilis*
- Ib : : *Phyllanthus pentandrus*, *Brachiaria xantholeuca*,  
*Tephrosia purpurea*
- I Ib : : *Schoenfeldia gracilis*, *Brachiaria xantholeuca*
- Ic : : *Zornia glochidiata*, *Eragrostis tremula*,  
*Schoenfeldia gracilis*
- Id : : *Borreria radiata*, *Elionurus elegans*, *Schizachyrium exile*

Certaines dominantes, peuvent l'être dans plusieurs groupements. En se référant aux définitions de DAGET et POISSONET (1971) on dénombre 6 à 8 espèces très productrices (CSP > à 4%) par groupement. Le tableau XXI donne également les sommes des contributions spécifiques pour les Graminées, les Légumineuses et espèces diverses. On constate que, dans les groupements Ib et Id, la contribution des Graminées est inférieure à 50 %, alors que les espèces diverses présentent une contribution élevée. La contribution très élevée des Légumineuses en Ic est due à *Zornia glochidiata* qui représente à lui seul une CSP de 40,6%.

Les distributions des fréquences spécifiques dans les groupements ne correspondent pas à l'allure Log-normale généralement observée dans les groupements en équilibre DAGET (1968). Le groupement Ic de DAHRA-sud est celui qui présente la distribution la plus polymodale, il est aussi le groupement le plus dégradé.

### 2.2.2.2.- Comparaison entre les contributions spécifiques présence et les contributions spécifiques massiques.

En 1976, au moment où la biomasse sur pied est maximale, nous avons effectué, dans le groupement Ib de DAHRA-nord, des mesures simultanées de contribution spécifique présence, de contribution spécifique contact, et de biomasse. Ces dernières ont été effectuées à partir de 40 prélèvements de 1/4 de m<sup>2</sup>, les prélèvements ont été triés espèce par espèce, puis séchés à 85°C et pesés. La précision sur les valeurs obtenues est de 9,6 % pour la biomasse totale et de 14,7 % pour la biomasse de l'espèce dominante.

Nous avons calculé les contributions spécifiques présence (CSP) contact (CSC) et massique (CSM) (DAGET et POISSONET, 1971). La précision calculée pour les contributions spécifiques présence est de 3,5 % avec 2 lignes et 518 présences. Le tableau XXII donne les valeurs calculées. Le rang reste le même pour les CSP et le CSC ; pour CSM on note un décalage pour certaines espèces, ainsi *Tephrosia purpurea* a une CSM supérieure à celle de *Brachiaria xantholeuca*, alors que les CSP et CSC sont faiblement inférieures. Cela paraît dû à la contribution importante à la biomasse des souches vivaces de *Tephrosia*.

TABLEAU XXI - ETUDE DE LA CONTRIBUTION SPECIFIQUE DANS DIFFERENTS GROUPEMENTS EN 1975.

Localisation	FETE-OLE IA			DAHRA-NORD IB			DAHAR-NORD IIB			DAHRA-SUD IC			DOLI NORD ID		
Date	17-09-75			30-09-75			29-09-75			28-09-75			14-10-75		
Espèces	P	CSP	R	P	CSP	R	P	CSP	R	P	CSP	R	P	CSP	R
<i>Schoenfeldia gracilis</i>	29	8,73	4	6	1,23	13	191	25,92	1	115	16,29	3			
<i>Brachiaria zantholeuca</i>	2	0,60	15	96	19,79	2	136	18,45	2	42	5,95	4			
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	4	1,20	11	16	3,30	7	26	3,53	8	38	5,38	5			
<i>Aristida mutabilis</i>	69	20,78	2	1	0,21	22	3	0,40	19	3	0,42	11			
<i>Zornia glochidiata</i>	19	5,72	5	21	4,32	5	116	15,74	3	287	40,65	1	17	3,88	10
<i>Eragrostis tremula</i>	4	1,20	11	11	2,27	10	7	0,95	13	126	17,85	2	6	1,37	15
<i>Fimbristylis hispidula</i>	16	4,81	6	3	0,62	18	1	0,14	22	2	0,28	15	26	5,94	8
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	4	1,20	11	11	2,27	10	75	10,18	4	7	0,99	9	29	6,62	6
<i>Chloris prieurii</i>	32	9,64	3	1	0,21	22	5	0,68	15	17	2,40	7			
<i>Gisekia piaraceoides</i>	2	0,60	15	2	0,41	20	1	0,14	22	3	0,42	11			
<i>Cenchrus biflorus</i>	10	3,01	9	3	0,62	18	9	1,22	12						
<i>Cenchrus prieurii</i>	7	2,11	10	6	1,23	13	4	0,54	17						
<i>Indigofera aspera</i>	11	3,31	8	6	1,23	13	1	0,14	22						
<i>Monsonia senegalensis</i>	2	0,60	15	14	2,89	8	14	1,90	10						
<i>Aristida paniculata</i>	94	28,31	1												
<i>Indigofera senegalensis</i>	1	0,30	21												
<i>Blepharis linariifolia</i>	14	4,22	7												
<i>Panicum laetum</i>	2	0,60	15												
<i>Trianthema portulacastrum</i>	1	0,30	21												
<i>Tripogon minimum</i>	2	0,60	15												
<i>Tragus berterorianus</i>	2	0,60	15												
<i>Mollugo nudicaulis</i>	3	0,90	14												
<i>Polycarpa linearifolia</i>	1	0,30	21												
<i>Eragrostis pilosa</i>	1	0,30	21							2	0,28	15			
<i>Cassia mimosoides</i>				17	3,55	6	13	1,80	11	3	0,42	11	35	7,99	4
<i>Merremia pinnata</i>				12	2,47	9	28	3,80	7	1	0,14	18	15	3,42	11
<i>Merremia tridentata</i>				8	1,65	12	4	0,54	17				5	1,14	17
<i>Digitaria horizontalis</i>				58	11,96	4	23	3,12	9	37	5,24	6			
<i>Aristida stipoides</i>				2	0,42	20	2	0,27	20				1	0,23	23
<i>Phyllanthus pentandrus</i>				104	21,44	1	5	0,68	15						
<i>Ipomoea pestigridis</i>				4	0,82	17	6	0,81	14	1	0,14	18			
<i>Corchorus tridens</i>				5	1,03	16	30	4,07	6				6	1,37	15
<i>Ceratothera sesamoides</i>				1	0,21	22	1	0,14	22						
<i>Tephrosia purpurea</i>				74	15,26	3									
<i>Crotalaria podocarpa</i>				1	0,21	22									
<i>Limium diffusum</i>				1	0,21	22							31	7,08	5
<i>Borreria stachydea</i>				1	0,21	22									
<i>Tephrosia platycarpa</i>							32	4,34	5						
<i>Citrullus colocynthis</i>							1	0,14	22						
<i>Trichoneura mollis</i>							1	0,14	22						
<i>Crotalaria perrottetii</i>							2	0,27	20				13	2,97	13
<i>Comelina forskallii</i>										5	0,71	10	5	1,14	17
<i>Eliconurus elegans</i>										2	0,28	15	50	11,4	2
<i>Digitaria gayana</i>										3	0,42	11	15	3,42	11
<i>Indigofera pilosa</i>										1	0,14	18			
<i>Brachiaria distichophylla</i>										10	1,42	8			
<i>Portulaca foliosa</i>										1	0,14	18			
<i>Borreria radiata</i>													70	15,98	1
<i>Schizachyrium exile</i>													41	9,36	3
<i>Sporobolus stolzii</i>													21	4,79	9
<i>Ctenium elegans</i>													29	6,62	5
<i>Impomoea coscinospema</i>													9	2,05	14
<i>Indigofera bracteolata</i>													4	0,91	19
<i>Indigofera denardodes</i>													2	0,46	22
<i>Tephrosia linearis</i>													3	0,68	20
<i>Cochlospermum tinctorium</i>													3	0,68	20
<i>Andropogon gayanus</i>													1	0,23	23
<i>Kuhnia grandiflora</i>													1	0,23	23
Nombre de lignes	3			2			3			3			3		
Nombre de Présences	332			485			737			706			438		
Précision	± 4,9			± 3,7			± 3,2			± 3,7			± 3,5		
Graminées	77,68 %			41,23 %			55,22 %			55,93 %			37,42 %		
Légumineuses	10,53 %			26,80 %			32,47 %			42,20 %			23,51 %		
Diverses	11,79 %			31,97 %			12,31 %			1,87 %			39,07 %		

P = Présences

CSP = Contribution spécifique présence

R = Rang

TABLEAU XXII - COMPARAISONS ENTRE LES CONTRIBUTION SPECIFIQUES MASSIQUES (CSM), CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES CONTACT (CSC) ET CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES PRESENCE (CSP) GROUPEMENT Ib DAHRA-NORD 1976.

ESPECES	CSM	CSC	CSP
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	36,50	23,80	20,08
<i>Tephrosia purpurea</i>	27,41	17,14	15,44
<i>Digitaria horizontalis</i>	7,01	13,81	13,90
<i>Brachiaria xantholeuca</i>	6,52	17,63	17,18
<i>Phyllanthus pentandrus</i>	6,22	7,27	9,27
<i>Merremia tridentata</i>	4,23	5,30	6,18
<i>Cassia mimosoides</i>	3,90	3,21	3,28
<i>Merremia pinnata</i>	2,32	3,45	4,05
<i>Monsonia senegalensis</i>	1,75	0,74	1,16
<i>Cenchrus biflorus</i>	1,36	0,25	0,39
<i>Aristida stipoides</i>	1,06	1,23	0,77
<i>Corchorus tridens</i>	0,39	0,25	0,39
<i>Gisekia pharnaceoides</i>	0,38	0,12	0,19
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	0,31	0,37	0,58
<i>Schoenfeldia gracilis</i>	0,29	0,74	0,97
<i>Eragrostis tremula</i>	0,09	1,97	2,32
<i>Indigofera pilosa</i>	0,08	0,12	0,19
<i>Zornia glochidiata</i>	0,07	0,25	0,39
<i>Indigofera aspera</i>	0,06	0,62	0,97
<i>Limeum diffusum</i>	0,05	0,12	0,19
<i>Kohautia senegalensis</i>	0	0,49	0,58
<i>Aristida mutabilis</i>	0	0,37	0,58
<i>Cenchrus prieurii</i>	0	0,25	0,19
<i>Borreria stachydea</i>	0	0,12	0,19
<i>Ceratotheca sesamoïdes</i>	0	0,12	0,19
<i>Impomoea pes-tigridis</i>	0	0,12	0,19

En effectuant les sommes des contributions on obtient :

	CSM	CSC	CSP
Ensemble des Graminées	: 52,8 %	60,0 %	56,4 %
Ensemble des Légumineuses	: 31,8 %	21,7 %	20,9 %
Ensemble des espèces diverses	: 15,3 %	18,2 %	22,8 %

Cinq espèces, soit 20 % des espèces recensées, représentent :

- . 75,9 % des CSP
- . 79,7 % des CSC
- . 83,7 % de la Biomasse

On peut déterminer les corrélations existant entre CSM, CSP et CSC. Ainsi, entre CSM et CSP on a la relation :

$$\text{CSM} = 1,215 \text{ CSP} - 0,947 \text{ avec } r = 0,825 \quad r^2 = 0,68$$

La relation est significative, mais peu étroite ; si l'on calcule l'intervalle de confiance on obtient :

CSP = 1	CSM = 0,27 ± 2,9
CSP = 5	CSM = 5,12 ± 2,5
CSP = 10	CSM = 11,20 ± 3,2
CSP = 20	CSM = 23,35 ± 6,4

Il en ressort que l'utilisation de cette relation, pour calculer la production des principales espèces à partir de la biomasse totale et de leur CSP, donne une valeur peu précise. L'utilisation de CSC au lieu de CSP n'apporte pas de gain de précision appréciable. Il ne nous a pas été possible de tester cette relation sur d'autres groupements. On peut cependant penser que, dans des groupements à forte proportion de Graminées, les résultats seraient plus satisfaisants en raison d'une plus grande homogénéité de la végétation.

#### 2.2.2.3.- Evolution des contributions spécifiques au cours d'une saison de végétation.

Afin de connaître l'influence de la date de mesure sur la fréquence des espèces sous des points alignés, et de tester cette méthode pour suivre le développement des espèces, nous avons effectué à DAHRA nord et DAHRA sud des mesures échelonnées en 1977 et 1978.

Le tableau XXIII montre l'évolution des présences et des contributions spécifiques à DAHRA-nord pour le groupement Ib en 1978. Les autres résultats figurent en annexe. Si l'on effectue les sommes des contributions spécifiques par catégorie, on obtient :

	9-8-78	30-8-78	21-9-78
Ensemble des Graminées	: 42,9 %	53,3 %	59,2 %
Ensemble des Légumineuses	: 34,4 %	34,0 %	36,6 %
Ensemble des espèces diverses	: 23,6 %	12,7 %	4,2 %

On note une évolution nette de la contribution de chaque groupe en fonction de la date. Cette évolution recouvre en fait des variations spécifiques différentes. Ainsi, entre le 30/8 et le 21/9, l'accroissement de la contribution des Graminées (+ 5,9 %) recouvre une diminution pour les

TABLEAU XXIII - EVOLUTION DES CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES A  
DAHRA-NORD, GROUPEMENT Ib DURANT LA PERIODE  
DE VEGETATION 1978.

DATE	9.08.1978			30.08.1978			21.09.78		
	P	CSP	v	P	CSP	v	P	CSP	v
<i>Indigofera aspera</i>	58	10,92	2	106	15,9	2	124	17,71	1
<i>Aristida stipoides</i>	114	21,47	1	80	12,0	3	110	15,71	2
<i>Brachiaria zantholeuca</i>	46	8,66	5	122	18,31	1	93	13,28	4
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	24	4,50	9	61	9,16	6	50	7,14	5
<i>Tephrosia purpurea</i>	58	10,92	2	65	9,76	4	98	14,00	3
<i>Aristida mutabilis</i>				2	0,30	18	29	4,14	9
<i>Cenchrus biflorus</i>	29	5,46	9	65	9,76	4	49	7,00	6
<i>Digitaria horizontalis</i>	10	1,88	11	1	0,15	22	23	3,28	10
<i>Cassia minosoides</i>	57	10,70	4	48	7,21	7	31	4,43	7
<i>Cenchrus prieurii</i>				16	2,40	10	30	4,29	8
<i>Phyllanthus pentandrus</i>	8	1,50	12	5	0,75	12	2	0,29	20
<i>Merremia pinnata</i>	46	8,66	5	30	4,50	8	6	0,85	14
<i>Merremia tridentata</i>	12	2,26	10	5	0,75	12	6	0,85	14
<i>Monsonia senegalensis</i>	2	0,75	15	5	0,75	12	8	1,14	12
<i>Schoenfeldia gracilis</i>				3	0,45	16	7	1,00	13
<i>Eragrostis tremula</i>				2	0,30	18	10	1,42	11
<i>Trichoneura mollis</i>							6	0,85	14
<i>Ipomoea pes-tigridis</i>	3	0,56	17	2	0,30	18	3	0,43	17
<i>Chloris prieurii</i>				1	0,15	22	3	0,43	17
<i>Aristida sieberana</i>							3	0,43	17
<i>Pennisetum violaceum</i>							2	0,29	20
<i>Zornia glochidiata</i>	2	0,75	15				2	0,29	20
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	5	0,94	14	8	1,20	11	1	0,14	23
<i>Corechorus tridens</i>				1	0,15	22	1	0,14	23
<i>Camelina forskalaei</i>	2	0,38	18				1	0,14	23
<i>Borreria stachydea</i>				1	0,15	22	1	0,14	23
<i>Tribulus terrestris</i>							1	0,14	23
<i>Gisekia pharmaceoides</i>	42	7,91	7	25	3,75	9			
<i>Cerafotheca sesamoides</i>	1	0,19	20	3	0,45	16			
<i>Linum diffusum</i>	2	0,38	18	1	0,15	22			
<i>Linum viscosum</i>	8	1,50	12	5	0,75	12			
<i>Sesamum alatum</i>	1	0,19	20						
<i>Crotalaria pedocarpa</i>	1	0,19	10	1	0,15	22			
<i>Brachiaria distichophylla</i>				2	0,30	18			
Nombre de lignes	2			3			3		
Nombre de Présences	531			666			700		
Précision	± 3,6 %			± 3,0 %			± 2,9 %		

espèces précoces : *Brachiaria xantholeuca*, *Dactyloctenium aegyptium* et un accroissement supérieur pour les espèces plus tardives : *Schoenfeldia gracilis*, *Eragrostis tremula*, *Aristida mutabilis*.

Sur l'ensemble des mesures et des observations phénologiques réalisées, on note des différences de comportement marquées entre les espèces :

- *Brachiaria xantholeuca*, *Dactyloctenium aegyptium* et *Cenchrus biflorus* germent très rapidement, le tallage débute tôt et la montaison est précoce. Ces espèces sont assez sensibles aux déficits hydriques en début de cycle, *Cenchrus* étant plus résistant.
- *Schoenfeldia gracilis* germe rapidement, il reste assez longtemps à un stade 3 ou 5 feuilles, le tallage et la montaison sont plus tardifs.
- *Eragrostis tremula*, *Chloris prieri*, *Trichoneura mollis*, *Aristida mutabilis* germent plus tardivement et se développent de même.
- Pour les Légumineuses, *Zornia* germe très rapidement, sa germination peut se dérouler en plusieurs vagues successives. *Cassia mimosaoides* et *Crotalaria podocarpa* germent très rapidement, le cycle de cette dernière est assez court. De manière générale, les autres Légumineuses germent et se développent de façon plus tardive.
- Parmi les espèces diverses, la germination et le développement sont étalés. Il existe un groupe d'espèces précoces à cycle court comprenant : *Gisekia pharnaceoides*, *Mollugo* sp. plur., *Limeum* sp. plur., *Cleome tenella* ...

Bien que trop peu nombreuses ici, les mesures d'évolution au cours de la saison des fréquences des espèces sous des points alignés, peuvent permettre de comprendre le comportement de certaines espèces et d'expliquer les variations annuelles dans la mise en place du peuplement. Il faut noter, par ailleurs, que les comparaisons de contributions spécifiques interannuelles ou inter-groupements, doivent être effectuées à des dates comparables.

#### 2.2.2.4.- Evolution interannuelle.

La comparaison des résultats obtenus pour les années 1975 à 1978 au moment du développement maximum de la végétation (voir annexes VI) montre qu'il existe de grandes variations dans les contributions des espèces. La figure 15 montre les variations de contribution spécifique des principales Graminées et Légumineuses par les groupements étudiés de DAHRA. Pour le groupement Ib on constate que l'espèce dominante varie chaque année : 1975 - *Phyllanthus pentandrus*, 1976 - *Dactyloctenium aegyptium*, 1977 - *Brachiaria xantholeuca*, 1978 - *Indigofera aspera*. Cependant, si l'on met à part des espèces comme *Phyllanthus pentandrus* et *Indigofera aspera*, qui pullulent exceptionnellement certaines années, de façon inexplicable, les 5 espèces les plus fréquentes du groupement restent sensiblement les mêmes : *Brachiaria xantholeuca*, *Tephrosia purpurea*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Digitaria horizontalis*, *Cenchrus biflorus* (cf. figure 15).

Pour le groupement IIb, *Brachiaria xantholeuca* et *Schoenfeldia gracilis* dominent nettement. L'une ou l'autre espèce prenant le plus d'importance en fonction de la répartition des pluies de début de saison, *Zornia*



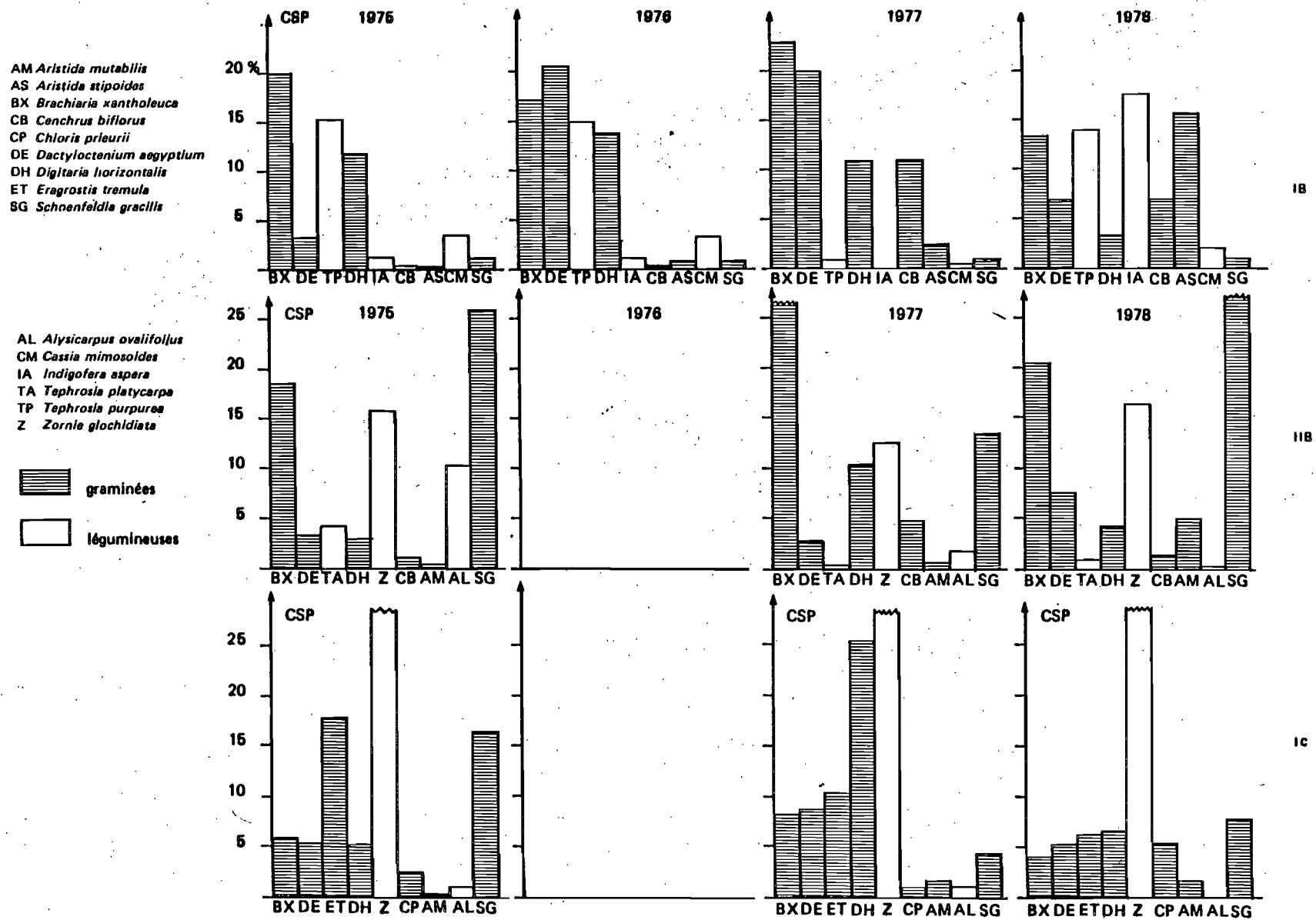


Fig. 15 - Variations des contributions spécifiques des principales Graminées et Légumineuses à DAHRA-nord et DAHRA-sud au moment où la biomasse sur pied est maximum.

*glochidiata* est la troisième espèce la plus productrice, sa fréquence varie en sens inverse de celles des deux premières.

Pour DAHRA sud Ic, *Zornia glochidiata* reste de très loin l'espèce dominante, représentant 30 à 60 % des contributions spécifiques. *Schoenfeldia gracilis*, *Digitaria horizontalis*, *Eragrostis tremula* et *Brachiaria xantholeuca* sont les autres espèces productrices, leurs proportions relatives varient en fonction des conditions annuelles.

Pour FETE-OLE Ia, *Aristida funiculata*, *Aristida mutabilis* et *Schoenfeldia* constituent les espèces dominantes. En 1977, année sèche, *Blepharis linariifolia* devient important du fait de la diminution du peuplement graminéen. De 1975 à 1979, *Schoenfeldia gracilis* voit sa contribution augmenter régulièrement au détriment d'*Aristida funiculata*.

A DOLI nord Id, en 1975 et 1976, le tapis herbacé était dominé par *Borreria* sp. plur., par la suite, la contribution des Graminées a augmenté surtout avec *Eragrostis tremula* et *Elionurus elegans*. Le tableau XXIV montre les variations de contribution pour les ensembles : Graminées, Légumineuses et espèces diverses.

TABLEAU XXIV : CONTRIBUTION DES GRAMINEES, LEGUMINEUSES ET ESPECES DIVERSES DANS LES GROUPEMENTS ETUDIES EN FONCTION DES ANNEES.

Groupements		1975	1976	1977	1978	1979*
Ib DAHRA Nord	G	41,2	56,4	70,5	59,3	1,0
	L	26,8	20,8	1,8	36,6	20,0
	D	32,0	22,8	27,7	4,1	79,0
IIb DAHRA Nord	G	55,2		68,8	78,3	
	L	37,5		14,5	17,5	
	D	12,3		16,7	4,2	
Ic DAHRA Sud	G	55,9		62,0	39,2	15,0
	L	42,2		33,6	58,3	79,0
	D	1,9		4,4	2,5	6,0
Ia FETE-OLE	G	77,7				94,0
	L	10,5				3,0
	D	11,8				3,0
Id DOLI Nord	G	37,4				54,0
	L	23,5				20,0
	D	39,1				26,0

\* D'après BOUDET (1980)

En 1979, l'absence quasi-totale de Graminées à DAHRA nord s'explique par une attaque de chenilles au moment de la montaison, qui les a presque totalement éliminées.

D'une façon générale, ce sont les espèces moyennement ou faiblement présentes qui fluctuent le plus d'une année à l'autre. Les contributions spécifiques présence des taxons varient essentiellement avec la répartition des pluies durant le début de la période de végétation (15 juillet-15 août). La présence ou l'absence d'alternance sécheresse-humidité et leur position dans le cycle interfèrent avec les caractéristiques biologiques des espèces (précocité de la levée, du tallage et de la montaison, sensibilité à la concurrence ...) pour déterminer leur abondance relative. Les variations sont importantes et, comme le soulignait TOUTAIN (1974), pour la Haute-Volta des productions quantitativement comparables peuvent présenter pour l'élevage un intérêt totalement différent en raison des différences de composition : ainsi, en 1974 et 1975, la production d'espèces consommables varie de 1 à 3 pour une même valeur de biomasse. Une étude statistique liant les caractéristiques de la saison des pluies à la composition finale du tapis herbacé est insuffisante pour pouvoir expliquer et prévoir cette composition, en raison de la multiplicité de cas possibles. Seule une étude précise de la biologie des principales espèces pourrait apporter des éléments permettant d'expliquer ces variations à partir du régime des pluies.

### 2.3. - Tendances évolutives, action de la sécheresse et du pâturage

Il paraît intéressant de comparer les études de végétation effectuées sur les parcelles à des dates assez éloignées, pour chercher à connaître l'évolution à plus long terme. Pour FETE-OLE, nous disposons des études de BILLE datant de 1969 (BILLE et POUPON, 1972 a). La parcelle, installée sur une zone non dégradée et peu exploitée, est mise en défens depuis 1969, avec protection contre le bétail et le feu. La végétation, tant herbacée que ligneuse, a été suivie régulièrement. Pour DAHRA, il existe les études de MAINGUY (1954), ADAM (1956) et RAYNAL (1964). La clôture de la concession et les pare-feux ont été réalisés en 1955. Les protections contre le feu ont été efficaces, la charge, faible jusque vers 1963, s'est accrue ensuite de façon importante. Pour DOLI, nous avons la prospection de RAYNAL (1963). La protection contre le feu s'est avérée inefficace, par contre la charge est faible.

#### 2.3.1. - Evolution de la flore et de la végétation.

FETE-OLE : Les comparaisons des listes floristiques établies par BILLE (BILLE et POUPON, 1972 a ; BILLE, 1977 a) et des relevés réalisés entre 1975 et 1978 (voir liste floristique en annexe) montrent (cf. § 2.2.1) que la présence des espèces dans une station est relativement constante, seul un petit nombre d'espèces apparaissent ou disparaissent d'une année à l'autre. Par contre, les abondances varient considérablement. Les prospections minutieuses effectuées ont montré que certaines espèces avaient complètement disparu de la parcelle, après les années de sécheresse. En 1974, il ne manquait plus que 4 espèces par rapport à la liste de 1969 : *Diheteropogon hagerupii*, *Andropogon gayanus*, *Andropogon ginguipes* et *Schizachyrium exile*. Ces quatre espèces sont des Andropogonées à tendance soudanienne. Trois d'entre elles ont réapparu progressivement. Seule l'espèce vivace *Andropogon gayanus* semble avoir disparu de toute la zone. Il faut noter qu'elle était peu abondante, et à la limite septentrionale de son aire. Pour FETE-OLE, en l'absence de pâturage et de feu et malgré la sécheresse, il n'y a donc pas eu de modification floristiques importantes entre 1969 et 1978.

En ce qui concerne la végétation herbacée, l'analyse de la structure en 1975 retrouve les groupements définis par BILLE à partir des relevés de 1969-1970. La carte d'organisation de la végétation au 1/1 000, dressée par cet auteur (BILLE, 1977a) à partir de ces relevés et des photo aériennes de 1970, montre que les positions moyennes des groupements se sont maintenues, ainsi que leurs proportions relatives. Cela s'explique d'ailleurs par leur forte liaison avec les facteurs édaphiques. Les limites ont parfois sensiblement évolué.

L'application de l'analyse factorielle des correspondances pour quatre années successives montre que les groupes de relevés et d'espèce demeurent constants, même si leur individualisation est plus ou moins marquée en fonction des conditions climatiques de l'année. Les groupements comportent des groupes d'espèces permanents, dont seule l'abondance varie, et des espèces à plus large répartition dont la présence et l'abondance

sont sous la dépendance de conditions climatiques annuelles. D'autre part, dans des positions topographiques peu tranchées (limites pentes, bas de pentes par exemple), la limite des groupements fluctue en liaison avec les variations annuelles de régime hydrique.

POUPON (1980) a étudié en détail, de 1970 à 1978, la dynamique du peuplement ligneux à FETE-OLE. Il constate surtout l'effet néfaste de la sécheresse, avec une mortalité moyenne de 20 % des ligneux, et de grandes disparités suivant les espèces : 53,2 % pour *Acacia senegal*, 5,5 % pour *Balanites aegyptiaca* et seulement 0,3 % pour *Boscia senegalensis*. Il note pour les années suivantes une forte régénération de la plupart des espèces. Mais ces régénérations sont en grande partie détruites par le passage accidentel du feu et par la pullulation de rongeurs en 1975. Des espèces telles que *Balanites aegyptiaca*, et *Acacia senegal* sont très sensibles aux feux de brousse et au pâturage au stade juvénile.

Si nous nous basons sur le seul critère du nombre d'individus présents dans la parcelle de FETE-OLE, l'évolution paraît positive : la densité des ligneux a doublé entre juin 1972 (409 individus.ha<sup>-1</sup>) et décembre 1976 (847 individus.ha<sup>-1</sup>). Ce phénomène global ne doit pas masquer deux constatations importantes :

- la raréfaction de certaines espèces (*Acacia senegal* voit en 1978 son effectif réduit à 7 % de ce qu'il était en 1971) au profit d'autres (par exemple *Boscia senegalensis* dont l'effectif a quadruplé en 5 ans) beaucoup moins intéressantes sur le plan de la fixation d'azote, ou de la contribution fourragère ;
- un accroissement des contrastes entre les parties hautes des toposéquences de plus en plus déboisées, et les dépressions où se forment de véritables fourrés. La comparaison des photographies aériennes de 1955 et de 1978 confirme ce fait pour une grande partie du FERLO.

#### DAHRA :

Depuis 1953, trois études successives se sont déroulées à DAHRA : celle de MAINGUY, ayant la clôture de la concession et la réalisation des pare-feux, celle d'ADAM qui suit de peu cette installation, enfin celle, plus complète, de RAYNAL en 1961.

Ce dernier note, par rapport aux études précédentes :

- la disparition progressive des annuelles post-culturales
- un accroissement important des grandes Graminées annuelles (*Andropogon pseudapricus* et *Diheteropogon hagerupii*),
- une extension importante des arbres, notamment *Acacia seyal*.

RAYNAL écrivait "... la physionomie de végétation du C.R.Z. peut déjà paraître singulière, comparée à l'extérieur, par l'abondance des arbres jeunes, au moins dans certaines zones, ainsi que par la densité des *Andropogon*. Celle-ci doit être attribuée, à la protection réalisée depuis 1954 contre les feux et le surpâturage... Il est vraisemblable que la savane à *Andropogon* étudiée à DAHRA se réaliserait dans toute la contrée avoisinante, si le pâturage n'était pas aussi intense et si surtout les feux étaient moins fréquents". Depuis, du fait de l'existence et de l'entretien permanent des pare-feux, on peut considérer que ceux-ci ont été éliminés. Entre 1961 et 1968 le cheptel du centre a augmenté de façon très importante, amenant ainsi un surpâturage de certaines parcelles de la concession. Les cinq dernières années, 1970 et 1974, ont été marquées par un déficit pluviométrique plus important. L'intensité du pâturage s'est encore accrue durant la période sèche.

Notre étude de 1975 à 1978 montre, comme pour FETE-OLE, une assez grande stabilité des espèces présentes. Les *Andropogonées*, et certaines *Légumineuses* à affinités soudaniennes ont considérablement régressé. *Andropogon gayanus* et *Diheteropogon hagerupii* sont réduits à quelques petites populations occupant des sites privilégiés. *Andropogon pseudapricus* qui avait totalement disparu depuis 1968, a fait une timide réapparition en 1977.

L'ensemble de la végétation de la concession du CRZ est redevenue très semblable à celle des parcours avoisinants. La végétation des zones dunaires très sableuses (groupement à *Tephrosia purpurea*) a peu évolué depuis l'étude de RAYNAL. On note, cependant, une régression importante de la contribution des *Graminées* et un accroissement de celle des espèces diverses. La strate arbustive s'est considérablement dégradée et a beaucoup souffert de la sécheresse (22,1 % de mortalité), surtout les *Combretacées*.

Dans les zones de pénélaines sablo-argileuses (DAHRA-sud), les *Andropogonées*, qui pour RAYNAL caractérisaient ces formations, ont quasiment disparu. Elles ont été remplacées par un groupement très appauvri à *Zornia glochidiata*, *Eragrostis tremula* et parfois *Elionurus elegans*. Dans les alentours du CRZ, de vastes superficies sont actuellement occupées par ce groupement qui semble être un terme de dégradation commun à divers groupements végétaux, sous l'action du surpâturage. Pour DAHRA sud, selon VALENZA (communication personnelle), les *Andropogonées* ont disparu avant la sécheresse, vraisemblablement sous l'action du pâturage. Contrairement à ce qu'écrit RAYNAL (1964), il semble peu vraisemblable que la savane à *Andropogon* soit la végétation d'équilibre de la zone de DAHRA. Nous pensons plutôt que l'action conjointe de la mise en défens et d'une succession exceptionnelle de 6 années humides (1957 à 1961) a permis l'installation temporaire de cette végétation, habituellement reléguée plus au sud. La strate ligneuse de ces zones est extrêmement dégradée (160 individus.ha<sup>-1</sup>) et a connu une forte mortalité (48,4 % d'arbres morts en 1975).

DOLI :

Depuis l'étude de RAYNAL (1963), la végétation des zones cuirassées ne semble pas s'être modifiée. La strate ligneuse est toujours abondante (1 261 arbres.ha<sup>-1</sup>) et la mortalité durant la sécheresse fut faible (14,1 %).

Dans les zones de dunes sableuses de DOLI-nord, les grandes Andropogonées annuelles ont considérablement régressé, remplacées par des espèces annuelles de jachère, essentiellement : *Borreria*, *Mitracarpus*, *Schizachyrium exile*, *Eragrostis tremula*. Cette évolution est très semblable à celle notée au Ranch de NIONO au MALI par BREMAN et CISSE (1977). Entre 1976 et 1978, on assiste à une reconquête de la zone par des Graminées à affinités sahéliennes. *Andropogon gayanus*, abondant en 1963 a considérablement régressé. Cependant, dans la parcelle de DOLI-nord, à partir de 3 touffes anciennes existant en 1974 on a assisté à une extension rapide jusqu'en 1976 où l'on dénombrait 140 touffes. La parcelle n'avait pas été brûlée entre ces deux dates. Les incendies de 1977 et 1978 ont réduit la population à une vingtaine de touffes. La strate arbustive de cette parcelle a été très touchée par la sécheresse (47,6 % de mortalité). Les espèces les plus atteintes sont les espèces soudaniennes et les *Combretum*. Il ne restait en 1975 presque aucun grand arbre vivant dans la parcelle. Entre 1975 et 1978, on a assisté à une prolifération de *Guiera senegalensis*.

2.3.2. - Action de quelques facteurs sur la dynamique de la végétation, tendances évolutives actuelles.

En termes généraux, beaucoup a été écrit sur la détérioration de l'environnement au Sahel et sur la dégradation de la végétation sous l'action des aléas climatiques et de l'action anthropique. Il est souvent difficile de faire la part de l'action des éléments climatiques et celle des actions liées à l'activité de l'homme et de ses troupeaux. Un certain nombre de travaux suivis, permettent cependant de dégager les grandes lignes de ces actions : (BREMAN et CISSE, 1977 ; RAPP et al., 1976 ; BOUDET, 1978...).

Les espèces végétales des phytocénoses sahéliennes possèdent des adaptations variées et efficaces à la sécheresse : brièveté et plasticité de la durée du cycle, production et stock grainier important, pour les annuelles, résistance et facultés de rejet pour les vivaces. La végétation sahélienne présente de grandes variations en fonction des conditions climatiques annuelles, mais ces variations s'accompagnent de retour à un équilibre moyen. La plasticité de la composition floristique de la végétation herbacée et de la dominance des différentes espèces est forte, en relation avec la prépondérance des espèces annuelles. On peut émettre l'hypothèse qu'elle constitue une réponse adaptative de phytocénoses aux fluctuations climatiques brusques, dans la mesure où elle favorise leur persistance. En effet elle permet chaque année la meilleure occupation du sol et l'utilisation optimale de l'eau disponible, assurant ainsi une protection du sol contre la dégradation, et la constitution d'un stock de semences important. Cette plasticité jointe à la structure en mosaïque des phytocénoses semblent assurer une stabilité de la végétation sahélienne face à un environnement variable. Cet équilibre peut être détruit, ou modifié si l'amplitude d'un des facteurs du milieu dépasse les possibilités de plasticité de la phytocénose ; cela semble être le cas du surpâturage prolongé, mais pas de la sécheresse de 1970 à 1973. Les observations permettent de souligner la relative stabilité des groupements herbacés, justifiant leur utilisation en cartographie, à condition que l'étude porte sur quelques années successives. BOUDET (1980) souligne la parfaite validité de la carte des pâturages de VALENZA et DIALLO (1972) même après la sécheresse.

L'action de la sécheresse paraît plus particulièrement forte dans les zones de transitions écologiques. Au Sénégal, comme à NIONO au Mali (BREMAN et CISSE, 1977) elle a surtout affecté les espèces végétales à la limite nord de leur habitat. Ainsi dans le FERLO sableux, les prospections montrent que la limite nord d'*Andropogon gayanus* a reculé d'environ 50 km vers le sud. Dans la zone sahélo-soudanienne, l'évolution de la végétation est marquée par un recul des espèces soudanaises, remplacées dans un premier temps par des espèces envahissantes, souvent présentes dans les jachères, puis par des espèces plus sahéliennes. En l'absence d'exploitation intense, cette évolution ne semble pas irréversible, les fluctuations inverses dépendant seulement de l'occurrence d'années plus humides.

En ce qui concerne la strate ligneuse, l'action de la sécheresse paraît plus importante et plus durable en raison d'une part de la lenteur des phénomènes de reconstitution et d'autre part de la fragilité des strates juvéniles de nombreuses espèces. Cependant, lorsque la pression d'exploitation diminue et que la protection contre les feux est assurée, le retour d'une pluviométrie plus favorable amène une régénération importante (BOUDET, 1978 ; POUPON, 1980).

Les successions de périodes sèches ont, dans les phytocénoses des zones arides, une action importante de réduction durable de la production de biomasse (COOK et SIMS, 1975 ; BREMAN et CISSE, 1977 ; BILLE, 1977a ; BOUDET, 1978), due d'une part, à la diminution des espèces productives, d'autre part, à la baisse du niveau trophique des sols. L'équilibre entre la restitution au sol et les pertes d'azote notamment est modifié par les années de sécheresse et l'équilibre est long à se rétablir. Un accroissement des prélèvements par pâturages augmente encore ce phénomène et peut le rendre irréversible.

L'action de la sécheresse n'est cependant pas uniforme, elle dépend des conditions de sol et de régime hydrique des phytocénoses. Les zones dunaires sableuses paraissent moins sensibles à la dégradation que les zones basses sablo-argileuses ou limoneuses. Les zones de colluvionnement sont particulièrement fragiles, la dégradation de la couverture végétale y entraînant une érosion hydrique et un colmatage du sol.

Les facteurs anthropiques (déboisement, surpâturage...) semblent être les moteurs essentiels de la dégradation des phytocénoses sahéliennes. KEETELAARS (1978) en conclut que, si les années de sécheresse 1970-1973 ont eut une exceptionnelle gravité dans la zone sahélienne. C'est en fait que la capacité de charge des pâturages était déjà dépassée avant cette période.

Le surpâturage est lié à l'accroissement des troupeaux et à l'abandon des modes traditionnels d'exploitation par transhumance. Il entraîne une dégradation importante de la végétation par :

- des prélèvements excessifs de la biomasse produite, incompatibles avec le maintien de la fertilité des sols et de l'équilibre existant ; de nombreux auteurs (BOUDET, 1975, 1977 ; BILLE, 1977a ; MARTIN 1975) estiment que le maintien de l'équilibre de la végétation exige que seulement 30 % de la biomasse produite soit prélevée par pâturage.



- un piétinement intense et une dégradation des propriétés physiques des sols dans les lieux de concentration de bétail.
- une destruction partielle de la strate arbustive qui joue dans ces phytocénoses un rôle d'équilibre et de protection pour la strate herbacée (BILLE, 1977a ; LE HOUEIROU, 1980) et une destruction systématique des régénérations.
- une élimination sélective de certaines espèces apétées et leur remplacement par des espèces moins productives. Sur de grandes surfaces, dans la zone sahélienne sénégalaise, le surpâturage a entraîné l'installation d'un groupement dégradé, peu productif et paraissant stable, à base de *Zornia glochidiata*.

Le feu joue un double rôle : d'une part la destruction d'une grande quantité de biomasse diminue les restitutions au sol et accroît la charge des autres zones de parcours, d'autre part, il entraîne la destruction des régénérations des espèces ligneuses ou herbacées vivaces.

Au Sénégal, dans la zone étudiée, l'action conjointe de la sécheresse et d'une trop forte exploitation, n'a pas entraîné de réelle désertification, contrairement à ce qui a pu se produire dans d'autres zones : Mauritanie, Gourma au Mali.... Cependant on assiste à une lente dégradation de la végétation, sensible d'abord au niveau du peuplement ligneux, mais également au niveau de la strate herbacée. Cette dégradation semble due à la surexploitation de ces phytocénoses, qui empêche, après les périodes sèches, le retour à l'équilibre qui se produit dans les zones protégées. Bien que soumises à de grandes fluctuations interannuelles, les phytocénoses sahéliennes semblent présenter une bonne adaptation aux conditions de sécheresse. Elles sont malgré cela, rendues très fragiles par une exploitation dépassant leurs capacités qui peut détruire de façon irrémédiable l'équilibre naturel.

Il est important et urgent de mettre l'accent sur cette fragilité provoquée, sur l'existence de seuils d'exploitation à définir et à respecter, ainsi que sur la nécessité d'actions visant à maintenir ou à régénérer la productivité de la végétation des parcours sahéliens.

### 3 - PRODUCTION DE BIOMASSE AERIENNE PAR LA STRATE HERBACEE

Pour l'éleveur ou l'aménagiste, l'étude de la production d'une phytocoenose se ramène à un objectif précis : la connaissance des possibilités de production de matière consommable. Pour l'écologiste, la production constitue un élément de base du fonctionnement de l'écosystème, et présente divers aspects. La production primaire est la base des chaînes trophiques. La croissance et la production sont les aspects fondamentaux de la réaction des individus ou des communautés végétales aux conditions du milieu ambiant. Chaque aspect correspond à des niveaux d'étude et des méthodologies différentes.

#### 3.1. - Aspects généraux de la production de biomasse et de sa mesure en zone sahélienne.

Il existe de nombreux travaux de mesure de biomasse herbacée en zone sahélienne. On peut citer notamment ceux de BOUDET (1961, 1969, 1970, 1972 b, 1980) en Mauritanie, au Mali et au Sénégal ; GASTON et BOTTE (1971) en Haute Volta, GILLET (1961, 1967) au Tchad, PEYRE de FABREGUES (1963) au Niger, VALENZA et DIALLO (1972) au Sénégal, BREMAN et al., (1975) au Mali, et l'ensemble des travaux réalisés au Soudan et repris par SHEPHERD (1968). Ces travaux ont généralement été réalisés de façon ponctuelle dans le temps, en liaison avec la cartographie des parcours ; l'importante variabilité interannuelle pose le problème de leur représentativité, et les résultats ne doivent être considérés qu'en fonction de la pluviosité de l'année et du lieu.

Bien que les méthodes utilisées soient très différentes, les résultats sont assez cohérents et permettent de situer le niveau moyen de la production en zone sahélienne (LE HOUEROU et HOSTE, 1977).

Dans la période plus récente des travaux plus détaillés, portant sur plusieurs années, ont été entrepris : BILLE (1977 a et b) dans le cadre du P.B.I. au Sénégal, PENNING de VRIES (1978) au Mali dans le projet "Production primaire au Sahel", GROUZIS (1979), LEVANG et GROUZIS (1980) en Haute Volta, "Projet LAT mare d'OURSI. Les résultats de ces différents travaux ne sont encore que partiellement connus.

Les caractères généraux de la production herbacée en zone sahélienne dépendent des éléments propres à la végétation, à savoir : un peuplement annuel avec un cycle de végétation court, un tapis végétal hétérogène constitué par une mosaïque de groupements élémentaires, ayant une grande variabilité interannuelle (cf. § 1 et 2 du présent chapitre). Ils sont aussi liés aux caractéristiques du milieu. Les précipitations rares et aléatoires semblent constituer le facteur limitant essentiel, auquel s'ajoute la pauvreté quasi générale des sols en éléments nutritifs. Ces caractères de la production, imposent de nombreuses contraintes pour les mesures : signification des valeurs obtenues, précision, rythme et dates de prélèvement....

SINGH et al. (1975) comparent et discutent diverses méthodes, parmi les plus utilisées pour déterminer la production des formations herbacées. Ces méthodes peuvent être rangées en deux grandes catégories : celles qui ne tiennent pas compte de l'évolution du matériel mort et celles qui font entrer cette évolution dans le calcul de la production nette (WIEGERT et EVANS, 1964). Les observations effectuées par BILLE (1977a) montrent que pour les formations étudiées le fait de négliger la décomposition du matériel mort entraîne une sous-estimation importante de la biomasse produite (> à 30 %). Les méthodes du deuxième groupe, bien que plus complètes et plus précises, exigent beaucoup de travail et de précaution.

Pour l'ensemble des groupements de FETE-OLE et de DAHRA, nous avons utilisé la méthode de récolte intégrale de tout le matériel (vivant et mort), présent dans le système à un moment donné. Les récoltes sont échelonnées dans le temps et la production est assimilée à la valeur maximale observée au cours du cycle de végétatif (MAC NAUGHTON, 1968). Pour les trois groupements principaux de DAHRA, nous avons réalisé la détermination de la production nette aérienne à l'aide d'une méthode dérivée de celle de WIEGERT et EVANS (CORNET, 1979).

### 3.2. - Résultats de production globale épigée.

La diversité des sens attribuée à un même terme par différents auteurs (CORNET, 1981) rend nécessaire de définir au préalable les termes utilisés. Dans ce travail, on entend par biomasse la matière végétale vivante plus les feuilles mortes encore érigées et attenantes à la plante. La matière morte comprend l'ensemble des individus morts érigés ou au sol. La litière représente la matière morte au sol. La phytomasse totale représente l'ensemble biomasse + matière morte. Lorsqu'il ne sont pas précisés les termes de biomasse et phytomasse concernent ici uniquement la partie épigée.

Les prélèvements de phytomasse sont effectués dans des carrés de  $1/4$  de  $m^2$  répartis dans les différents groupements après stratification préalable de l'échantillonnage. Le nombre de carrés par relevé est généralement de 20, il est porté à 30 dans les milieux très hétérogènes (FETE-OLE dune par exemple). Le choix de la dimension des surfaces échantillonnées et du nombre de répétitions a été effectué en tenant compte des valeurs citées par différents auteurs VAN DYNE et al. (1963), MILNER et HUGUES (1968), FRIEDEL (1977) et en effectuant quelques mesures comparatives avec des carrés de surface différentes ( $1 m^2$ ,  $2 m^2$ ). Les prélèvements sont pesés après passage à l'étuve à  $85^\circ C$  jusqu'à stabilisation du poids. Les parcelles ne sont pas pâturées au cours de la saison de végétation.

Le tableau XXV montre la valeur de la phytomasse herbacée en fin de cycle de la végétation. Pour FETE-OLE et DAHRA nord il est remarquable de noter la relative stabilité de la phytomasse totale pour l'ensemble des parcelles 1 136 kg à 1 468 kg et 2 320 à 2 595  $kg \cdot ha^{-1}$  respectivement, alors que ces années sont très différentes sur le plan pluviométrique : 311 mm en 1975 et 126 en 1977 à FETE-OLE. Au niveau des groupements les variations sont plus nettes, mais restent faibles. Cela semble dû à la sous-exploitation actuelle. La phytomasse totale présentée en fin de cycle ne donne en fait qu'une approximation assez mauvaise de la production annuelle. En septembre 1977 à DAHRA, les 2 432  $kg \cdot ha^{-1}$  de phytomasse totale englobent 447 kg de matière morte provenant de l'année précédente. Pour l'ensemble des

TABLEAU XXV - PHYTOMASSE HERBACEE EN FIN DE CYCLE DE VEGETATION EXPRIMEE EN  
KG DE MATIERE SECHE PAR HECTARE.

Année	FETE-OLE				DAHRA Nord			
	Ia	IIIa	IVa	T	Ib	IIb	IVb	T
1975	860	2360	2800	1468	1800	2972	2880	2320
1976	716 ± 207	2472 ± 690	3140 ± 973	1467 ± 438	1533 ± 363	3176 ± 531	2940 ± 529	2316 ± 483
1977	699 ± 277	1833 ± 795	2054 ± 483	1136 ± 364	2432 ± 316	3187 ± 766	3230 ± 840	2595 ± 625
1978	606 ± 484	2727 ± 592	2506 ± 627	1308 ± 431	2431 ± 778	2836 ± 451	3029 ± 627	2513 ± 598
	DAHRA Sud				DOLI Nord		DOLI Sud	
	Ic	T			T		T	
1975	2072	2134			3035		2200	
1976	2375 ± 332	2446 ± 415						
1977	1587 ± 378	1634 ± 381						
1978	1205 ± 201	1241 ± 225						

T = total pour la parcelle.

groupements de la parcelle la phytomasse maximale de l'année est de 2 005 kg au lieu de 2 595 mesurés. Pour DOLI nord et DOLI sud les mesures de phytomasse ont fréquemment été rendues impossibles par le passage précoce des feux.

Sur la figure n° 17 ont été portées les variations de phytomasse herbacée pour les deux groupements principaux de FETE-OLE : Groupement de dune Ia et groupement de bas de pente IIIa. On voit que les phytomasses de deux groupements ne varient pas toujours dans le même sens, en effet, le groupement IIIa, bénéficie d'apports d'eau par ruissellement, qui suivant la nature des précipitations peuvent être plus ou moins importants (cas de 1978 : fort ruissellement). L'année 1973 présente une phytomasse faible, paraissant liée au contre coup de la sécheresse de 1972. Cet effet est difficilement explicable, si l'on considère que le stock de graines était suffisant. On peut penser à une baisse de la quantité d'azote disponible dans le sol.

### 3.3. - Détermination de la production aérienne nette

#### 3.3.1. - Méthode

La production primaire nette aérienne durant un intervalle de temps est égale à la variation de matériel vivant, plus la variation de matière morte, plus la quantité de matière disparue dans l'intervalle (MILNER et HUGHES, 1968). Les observations effectuées par BILLE (1977 a) montrent que dans ces formations, la disparition du matériel mort est rapide en saison des pluies, donc que la quantité mesurée est une sous-estimation importante de la quantité de matériel réellement morte, de l'ordre de 30 % selon cet auteur.

Pour des formations herbeuses diverses de nombreux auteurs ont montré que les méthodes ne tenant pas compte de l'évolution du matériel mort entraînent d'importantes sous-estimations de la production nette (voir SINGH et al., 1975). WALLENTINUS (1973) montre que, pour une formation herbeuse des bords de la Baltique, les méthodes classiques de détermination de la production entraînent une sous-estimation de l'ordre de 30 %. WIEGERT et EVANS (1964) donnent des valeurs plus importantes dépassant même 100 % ; GOUNOT et YU (1980) arrivent à des conclusions semblables.

WIEGERT et EVANS (1964) ont établi la méthode des parcelles appariées, modifiée ensuite par LOMNICKI et al. (1968) qui consiste à considérer les variations de matériel vivant et de litière durant un intervalle de temps donné sur deux parcelles semblables. A une même date on mesure : sur une première surface le matériel vivant et le matériel mort produit depuis la mesure précédente, sur une seconde surface, le matériel mort que l'on prélève. Cette surface est destinée aux mesures du matériel vivant et du matériel mort qui auront été produits lors du prochain prélèvement.

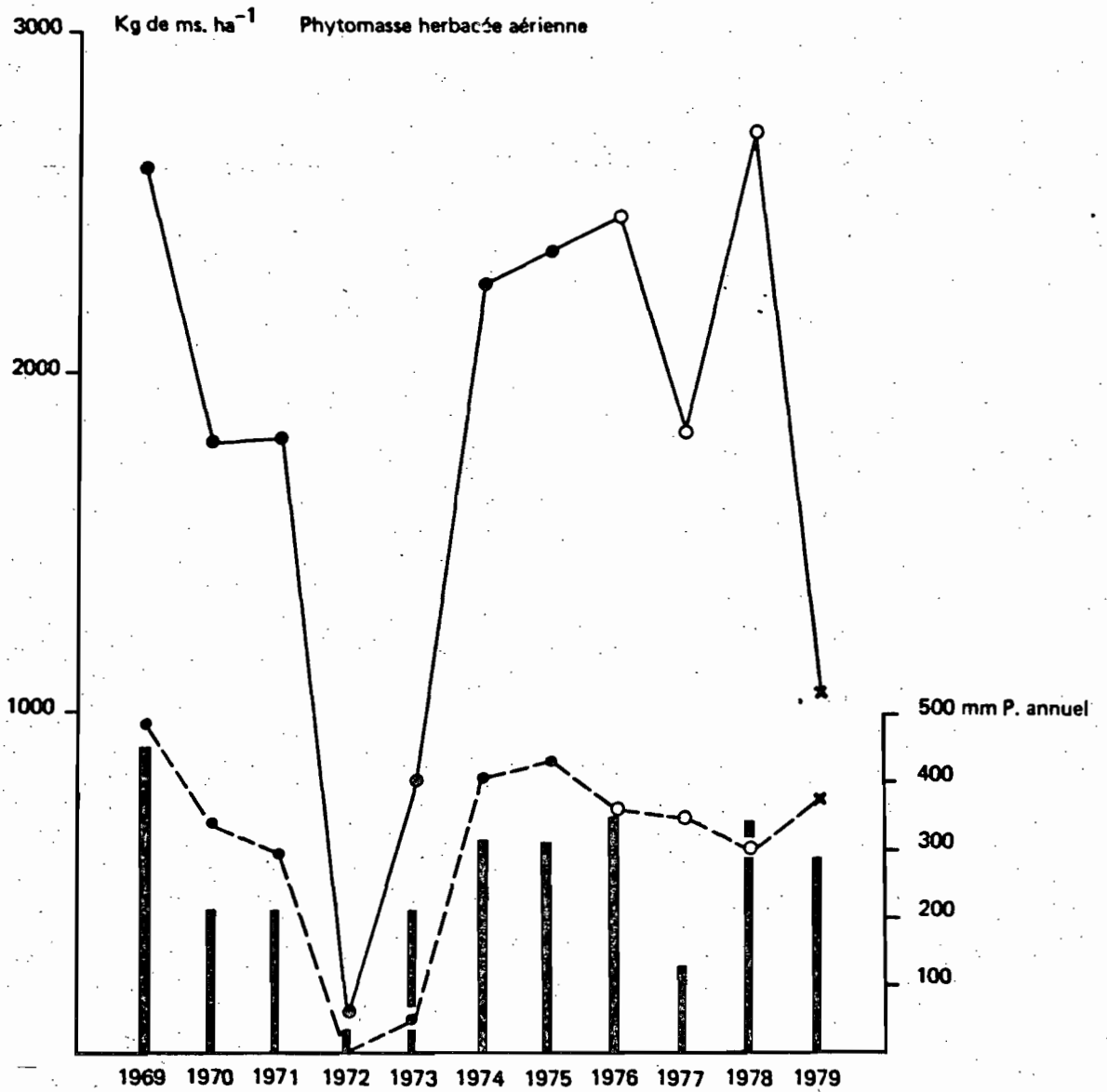


Fig. 17 Variations de la phytomasse herbacée dans deux groupements de FÉTÉ OLÉ et variations des précipitations annuelles

● valeurs BILLE 1977  
x valeurs BOUDET 1980

--- groupement de dunes IA  
— groupement de bas de pente IIIA

Nous utilisons cette méthode des parcelles appariées pour effectuer les mesures. Les calculs du taux de disparition de la matière morte et la quantité de matériel mort formé sont modifiés. En effet, durant la période de végétation active, la matière morte est produite et décomposée partiellement durant le même temps. La litière accumulée est la résultante des deux phénomènes. En reprenant les travaux de OLSON (1963) et de BERNHARD-REVERSAT (1970) nous étudions le devenir de cette matière morte.

La variation de la quantité de matière morte peut s'exprimer par une série d'équations différentielles, dont l'intégration en tenant compte des données expérimentales permet de calculer le taux de disparition de la matière morte durant chaque intervalle de temps (CORNET 1979, 1981).

Le tableau XXVI compare les principaux éléments des méthodes de WIEGERT et EVANS, LOMNICKI et al., et de la méthode proposée.

La méthode a été appliquée en 1977 et 1978 aux trois principaux groupements de DAHRA (groupement Ib de dune et Iib de bas de pente pour DAHRA nord, groupement Ic pour DAHRA sud). Les mesures ont été effectuées sur 20 séries de parcelles appariées pour chaque groupement. Les parcelles, d'une surface de 1/4 de mètre carré chacune, sont réparties au hasard dans la zone représentant le groupement de façon homogène. Les mesures commencent en début de saison pluvieuse et se poursuivent avec un intervalle de temps de 7 à 14 jours jusqu'en octobre, fin de la saison des pluies et de la période de production. Les matières récoltées sont séchées à l'étuve à 85°C et pesées.

### 3.3.2. - Résultats

La figure 18 montre l'évolution de la biomasse et de la matière morte dans chaque groupement pendant les périodes de végétation 1977 et 1978. Durant la saison sèche, de novembre à juin, la biomasse herbacée est nulle, car les annuelles dont est constituée cette strate sont mortes. Durant cette même période la matière morte décroît essentiellement en fonction du pâturage, de la consommation par les insectes et de l'enfouissement par la micro-faune édaphique.

La figure 18 montre que la production de biomasse en 1977 suit une courbe typique en "S", alors que les courbes pour 1978 sont atypiques. La production de biomasse, après un départ rapide en juin et juillet, est interrompue par des périodes de sécheresse. L'action de ces périodes sèches est différente suivant les groupements et les types de sol.

La biomasse  $b_i$  est connue avec un intervalle de confiance moyen de 19,3 % (probabilité 0,95), cet intervalle est de 25,3 % pour la litière ( $x_i$ ). Par contre, pour le matériel mort ( $a_i$ ) accumulé entre deux observations, l'intervalle atteint 40 %. Les tableaux XXVII a,b,c montrent les résultats des calculs de la production nette, ainsi que la quantité de matière ( $m_i$ ) morte pendant l'intervalle de temps et le taux de disparition de la matière morte ( $k$ ). Les valeurs sont exprimées en  $g.m^{-2}$  ou en  $g.g^{-1}.m^{-2}$  pour  $k$ .

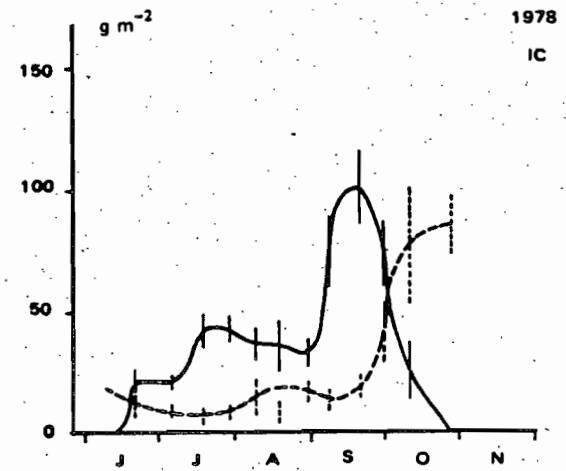
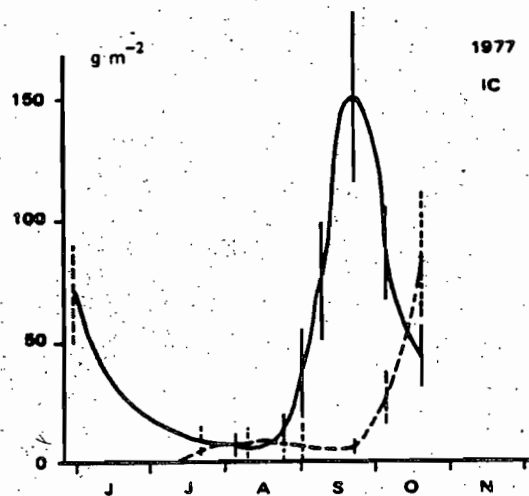
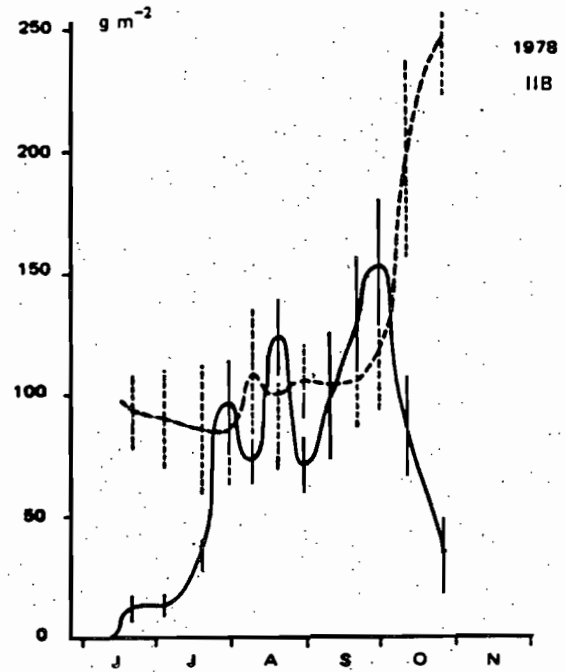
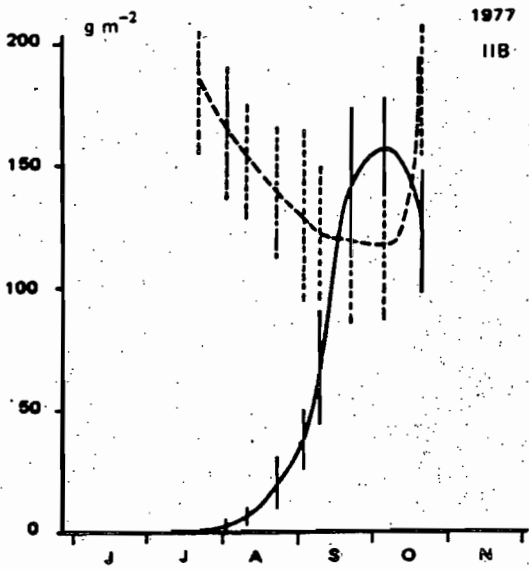
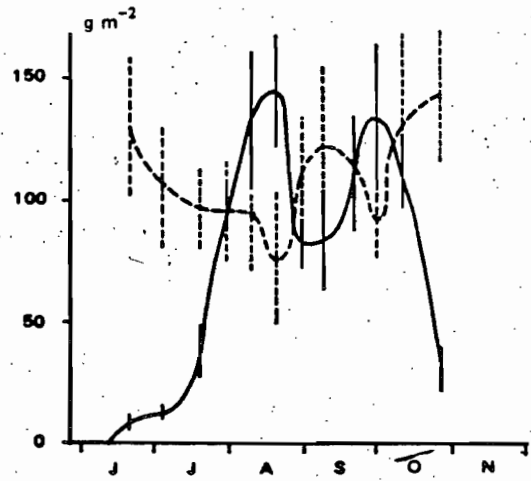
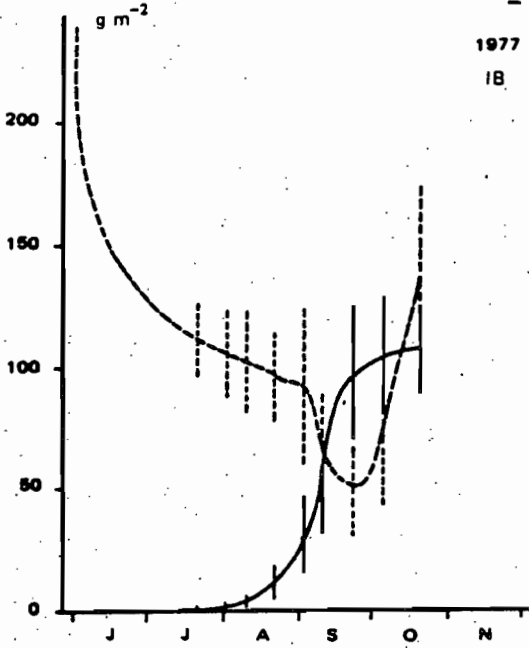
TABLEAU XXVI - COMPARAISON DES METHODES DE MESURE DE LA PRODUCTION PRIMAIRE  
(d'après CORNET, 1981)

WIEGERT & EVANS, 1964	LOMNICKI et al., 1968	Méthode proposée
<p><u>Prélèvements</u></p> <p>temps <math>t_0</math> { parcelle 1 - biomasse <math>b_0</math>                   - litière <math>x_0</math> parcelle 2 - biomasse <math>b_0</math></p> <p>temps <math>t_1</math> { parcelle 2 - litière <math>x_1</math>                   parcelle 3 - biomasse <math>b_1</math></p>	<p><u>Prélèvements</u></p> <p>temps <math>t_0</math> { parcelle 1 - biomasse <math>b_0</math>                   - litière <math>x_0</math> parcelle 2 - litière <math>x_0</math></p> <p>temps <math>t_1</math> { parcelle 2 - biomasse <math>b_1</math>                   - litière accumulée <math>a_1</math> parcelle 3 - litière <math>x_1</math></p>	<p><u>Prélèvements</u></p> <p>idem LOMNICKI</p>
<p><u>Calculs</u></p> <p><math>y = b_1 - b_0 + m_1</math></p> <p><math>m_1 = x_1 - x_0 + \left(\frac{x_1 + x_0}{2}\right)kt</math></p> <p><math>k = \text{Log} \left(\frac{x_0}{x_1}\right) \cdot \frac{1}{t_1 - t_0}</math></p>	<p><u>Calculs</u></p> <p><math>y = b_1 - b_0 + a_1</math></p> <p><math>k</math> non déterminé</p>	<p><u>Calculs</u></p> <p><math>y = b_1 - b_0 + m_1</math></p> <p><math>m_1 = \frac{k a_1}{1 - e^{-kt}}</math></p> <p><math>k = -\text{Log} \left(\frac{x_1 - a_1}{x_0}\right) \cdot \frac{1}{t_1 - t_0}</math></p>
<p><u>Hypothèses</u></p> <p>1) Parcelles semblables biomasse et <math>k</math> identiques</p> <p>2) Pas d'influence de la matière vivants sur la disparition de la litière</p>	<p><u>Hypothèses</u></p> <p>1) idem</p> <p>2) Pas d'influence de la litière sur la production de biomasse</p> <p>3) <math>k</math> taux de disparition de la matière morte négligeable entre <math>t_0</math> et <math>t_1</math></p>	<p><u>Hypothèses</u></p> <p>1) idem</p> <p>2) idem LOMNICKI</p>

Abréviations utilisées

Grandeurs mesurées	<p><math>b</math> : biomasse</p> <p><math>x</math> : litière</p> <p><math>a_1</math> : litière accumulée entre <math>t_0</math> et <math>t_1</math></p>	<p><math>b_0</math> : biomasse au temps <math>t_0</math></p> <p><math>b_1</math> : biomasse au temps <math>t_1</math></p> <p><math>x_0</math> : litière au temps <math>t_0</math></p> <p><math>x_1</math> : litière au temps <math>t_1</math></p>	Grandeurs calculées	<p><math>y</math> : production primaire nette entre <math>t_0</math> et <math>t_1</math></p> <p><math>m_1</math> : matière morte formée entre <math>t_0</math> et <math>t_1</math></p> <p><math>k</math> : taux de disparition de la litière</p>
--------------------	---	---	---------------------	--





— matière vivante accumulée    - - - matière morte accumulée    | intervalle de confiance

Fig. 18 - Evolution de la biomasse épigée, et de la matière morte dans les principaux groupements de DAHRA en 1977 et 1978.

TABLEAU XXVIIa - DETERMINATION DE LA PRODUCTION AERIENNE NETTE DAHRA-NORD GROUPEMENT Ib.

1977						1978					
Date $t_i$ unité	Inter- valle $t_0-t_i$ j	B $g.m^{-2}$	k $g.g^{-1}.m^{-2}$	$m_i$ $g.m^{-2}$	$Y_i$ $g.m^{-2}$	Date $t_i$ unité	Inter- valle $t_0-t_i$ j	B $g.m^{-2}$	k $g.g^{-1}.m^{-2}$	$m_i$ $g.m^{-2}$	$Y_i$ $g.m^{-2}$
						20/6/78	9*	138,3	-	-	9,4**
						4/7/78	14	118,9	0,213	2,22	5,52
21/7/77	9*	112,8	-	-	1,2**	19/7/78	15	133,4	0,127	2,66	27,26
2/8/77	12	108,7	0,046	0	0,9	30/7/78	11	193,0	0,037	2,55	63,25
10/8/77	8	107,4	0,040	0,61	2,91	9/8/78	10	226,9	0,323	29,84	64,44
21/8/77	11	108,0	0,087	1,88	9,28	14/8/78	10	220,1	0,381	14,55	25,55
2/9/77	12	123,2	0,056	1,44	20,44	30/8/78	11	193,7	0,343	67,92	6,22
9/9/77	7	125,6	0,263	1,71	24,01	8/9/78	9	204,2	0,574	76,87	77,67
22/9/77	13	146,2	0,575	12,89	55,39	21/9/78	13	222,8	0,327	22,90	54,90
5/10/77	13	178,7	0,030	24,77	34,37	30/9/78	9	224,6	0,593	38,98	61,98
20/10/77	15	243,2	0,029	65,5	67,55	11/10/78	11	243,1	0,010	39,90	19,60
						26/10/78	15	171,7	0,287	50,61	0
Total					216,0	Total					415,0

\* depuis le début des germinations

\*\* valeurs par défaut

B : matière végétale totale

k : taux de disparition de la litière

$m_i$  : matériel passé à la litière

$Y_i$  : production nette

TABLEAU XXVIIb - DETERMINATION DE LA PRODUCTION AERIEENNE NETTE - DAHRA-NORD - GROUPEMENT IIB.

1977						1978					
Date $t_i$ unité	Inter- valle $t_0-t_i$ j	B $g.m^{-2}$	k $g.g^{-1}.m^{-2}$	$m_i$ $g.m^{-2}$	$Y_i$ $g.m^{-2}$	Date $t_i$ unité	Inter- valle $t_0-t_i$ j	B $g.m^{-2}$	k $g.g^{-1}.m^{-2}$	$m_i$ $g.m^{-2}$	$Y_i$ $g.m^{-2}$
						21/6/78	10*	106,0	-	-	12,7**
						4/7/78	13	104,7	0,065	3,2	4,70
21/7/77	9*	187,2	-	-	1,60**	19/7/78	15	120,0	0,096	4,3	23,80
2/8/77	12	166,8	0,125	0	1,40	30/7/78	11	182,9	0,057	4,11	67,81
10/8/77	8	159,0	0,078	0,52	4,52	9/8/78	10	183,3	0,012	25,55	1,55
22/8/77	12	160,0	0,092	0,52	14,42	19/8/78	10	233,5	0,181	8,86	59,16
2/9/77	11	167,8	0,082	1,77	18,87	30/8/78	11	178,2	0,266	33,94	0
9/9/77	7	191,8	0,070	2,49	32,89	9/9/78	10	202,5	0,472	46,67	73,77
22/9/77	13	263,9	0,158	15,78	91,28	21/9/78	12	237,7	0,319	35,28	68,68
5/10/77	13	274,4	0,158	16,27	30,47	30/9/78	9	271,8	0,425	58,92	81,72
20/10/77	15	318,7	0,047	84,03	49,63	11/10/78	11	283,6	0,227	115,12	47,72
						26/10/78	15	282,4	0,030	58,69	5,59
Total					245,1	Total					447,3

\* depuis le début des germinations

\*\* valeurs par défaut

B : matière végétale totale

k : taux de disparition de la litière

$m_i$  : matériel passé à la litière

$Y_i$  : production nette

TABLEAU XXVIIc - DETERMINATION DE LA PRODUCTION AERIENNE NETTE - DAHRA-SUD - GROUPE Ic

1977						1978					
Date $t_i$ unité	Inter- valle $t_o-t_i$ j	B $g.m^{-2}$	k $g.g^{-1}.m^{-2}$	$m_i$ $g.m^{-2}$	$Y_i$ $g.m^{-2}$	Date $t_i$ unité	Inter- valle $t_o-t_i$ j	B $g.m^{-2}$	k $g.g^{-1}.m^{-2}$	$m_i$ $g.m^{-2}$	$Y_i$ $g.m^{-2}$
						20/6/78	8*	32,9	-	-	20,8**
						5/7/78	15	30,0	0,505	2,29	2,39
21/7/77	11*	15,3			5,4**	18/7/78	13	50,4	0,433	1,85	1,84
4/8/77	14	15,4	0,291	0,231	2,63	29/7/78	11	51,2	0,543	5,14	5,14
9/8/77	5	14,4	0,054	1,03	0	8/8/78	10	52,4	0,754	16,09	10,49
24/8/77	15	21,6	0,158	0,43	8,43	18/8/78	10	49,1	0,920	10,55	9,55
1/9/77	8	43,9	0,227	1,34	23,94	29/8/78	11	50,6	0,879	12,58	14,98
8/9/77	7	80,9	0,797	3,48	41,98	7/9/78	9	88,7	0,811	8,90	50,10
22/9/77	14	158,7	0,336	3,30	79,0	20/9/78	13	120,5	0,969	21,39	48,30
5/10/77	13	113,9	0,458	29,17	0	29/9/78	9	114,9	0,698	48,63	17,53
19/10/77	14	129,1	0,004	58,10	15,4	10/10/78	11	103,5	0,099	39,50	0
Total					176,8	Total					181,1

\* depuis le début des germinations  
 \*\* valeurs par défaut

B : matière végétale totale  
 k : taux de disparition de la litière  
 $m_i$  : matériel passé à la litière  
 $Y_i$  : production nette

Des résultats il ressort que la production aérienne nette est faible en début de saison des pluies ; elle croît ensuite proportionnellement à l'accumulation de biomasse, c'est-à-dire à la quantité de tissus productifs présente. La production nette est très liée par ailleurs aux paramètres climatiques, notamment à l'eau disponible. Les périodes sèches entraînent une baisse de la production nette ou même son arrêt. Cependant, une diminution de la biomasse ne signifie pas obligatoirement un arrêt de la production. La productivité nette journalière passe par un maximum en septembre, le bilan hydrique étant favorable et le peuplement suffisamment développé. Les valeurs maximum calculées sont de :

$9,1 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$  pour le groupement  $II_b$  en 1978

$8,5 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$  pour le groupement  $I_b$  en 1978

$6,0 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$  pour le groupement  $I_c$  en 1977

Valeurs calculées sur des intervalles de 9 jours.

Pour ces mêmes groupements BILLE (1977b) obtenait en 1975, année pluvieuse :

$I_b$   $3,2 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$

$II_b$   $5,2 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$

$I_c$   $5,1 \text{ g.m}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$

mais ces productivités étaient calculées sur un intervalle de temps entre deux mesures de 41 jours et le taux de disparition de la matière morte était calculé empiriquement.

Le tableau XXVIII montre les comparaisons entre les valeurs obtenues de biomasses maximales  $B_{\text{max}}$ , de phytomasse maximale  $PM_{\text{max}}$  et de production nette annuelle. La biomasse maximale mesurée ne représente qu'une partie de la production nette annuelle, de 35 à 85 % suivant les années et les groupements. La phytomasse maximale annuelle donne une valeur plus proche 58 à 92 %, mais cependant encore éloignée et variable.

En 1978, l'allongement de la saison de végétation aboutit à une valeur élevée de la production nette, bien que les valeurs de  $B_{\text{max}}$  et  $PM_{\text{max}}$  soient faibles, en raison de la production et de la dégradation d'une grande quantité de matière morte.

La disparition de la matière morte est mesurée par le taux  $k$ , qui recouvre d'une part la consommation par les insectes et d'autres éléments de la microfaune, d'autre part la décomposition microbienne. Ce taux est très faible en saison sèche. En effet, les populations d'insectes sont peu abondantes et l'activité microbienne est réduite ou nulle à cause de la dessiccation. En saison des pluies, on observe, dans les trois groupements, une différence importante entre 1977 et 1978. Les valeurs du taux de disparition sont beaucoup plus élevées durant cette dernière année. Cela s'explique par le fait qu'en 1977 la mortalité en début de saison est très faible,

TABLEAU XXVIII : COMPARAISON DES VALEURS MESUREES DE BIOMASSE MAXIMALE (B max) DE PHYTOMASSE MAXIMALE (MM max) ET DE PRODUCTION NETTE CALCULEE (PN) en g.m<sup>-2</sup>.

Station	Année	Groupement	B max.	PM max.	P.N.	$\frac{B \text{ max}}{PN}$	$\frac{PM \text{ max}}{PN}$
FETE-OLE*	1970*	Ia	48,0	67,0	95,6	0,50	0,70
	" *	IIIa	134,0	180,0	265,0	0,50	0,68
DAHRA Nord	1975*	Ib	165,6	180,0	214,7	0,77	0,84
	" *	IIb	258,4	297,2	373,0	0,69	0,80
	1977*	Ib	106,8	198,5	216,1	0,49	0,92
	"	IIb	158,1	221,6	245,1	0,65	0,90
	1978	Ib	143,6	243,1	417,9	0,34	0,58
		IIb	154,5	283,6	447,3	0,35	0,63
DAHRA Sud	1975*	Ic	207,2	207,2	243,3	0,85	0,85
	1977	"	151,0	158,7	176,8	0,85	0,90
	1978	"	101,6	120,5	203,2	0,50	0,59

le taux de disparition s'applique donc surtout à du matériel de l'année antérieure. En 1978, les périodes sèches intercalaires, ont entraîné la mort d'une partie importante de la biomasse produite, matériel plus rapidement décomposable de par sa nature (feuilles et jeunes tiges) et sa composition chimique.

Des études effectuées *in situ* dans une autre phytocénose herbacée de la zone sahélienne sénégalaise, en 1977, par étude des pertes de poids d'échantillons connus d'herbe sèche (BERNHARD-REVERSAT, 1977) donnent des valeurs du taux de disparition comparables à celles obtenues à la même époque pour les groupements étudiés.

Les tableaux XXIX montre la comparaison des différentes valeurs obtenues.

TABLEAU XXIV - VALEURS DU TAUX DE DISPARITION DE LA LITIÈRE  
EN  $\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$  EN 1977.

Auteur	Lieu	du 9/5 au 5/7	du 5/7 au 30/8	du 30/8 au 30/9
BERNHARD-	FETE-OLE dune	0,0130 <sup>x</sup>	0,0090 <sup>x</sup>	0,0231 <sup>x</sup>
REVERSAT	FETE-OLE bas de pente	0,0096 <sup>x</sup>	0,0013 <sup>x</sup>	0,0247 <sup>x</sup>
CORNET	DAHRA-nord I <sub>b</sub>	0,0036	0,0100	0,0376
	DAHRA nord II <sub>b</sub>	0,0104	0,0077	0,0122
	DAHRA sud I <sub>c</sub>	0,0108	0,0105	0,0540

<sup>x</sup> valeurs mesurées

La connaissance de la production nette, du taux de disposition de la matière morte, ainsi que de la quantité de matière morte produite durant chaque période, permet de mieux suivre le fonctionnement des groupements herbacés en tant que producteurs primaires. La consommation par la microfaune du sol peut être prise en considération, ce qui n'est pas le cas avec les méthodes classiques de détermination de production. On constate, par ailleurs, que la production de matières consommables dépend non seulement de la production nette, mais aussi de la disparition de la matière produite, les deux phénomènes étant liés aux conditions climatiques.

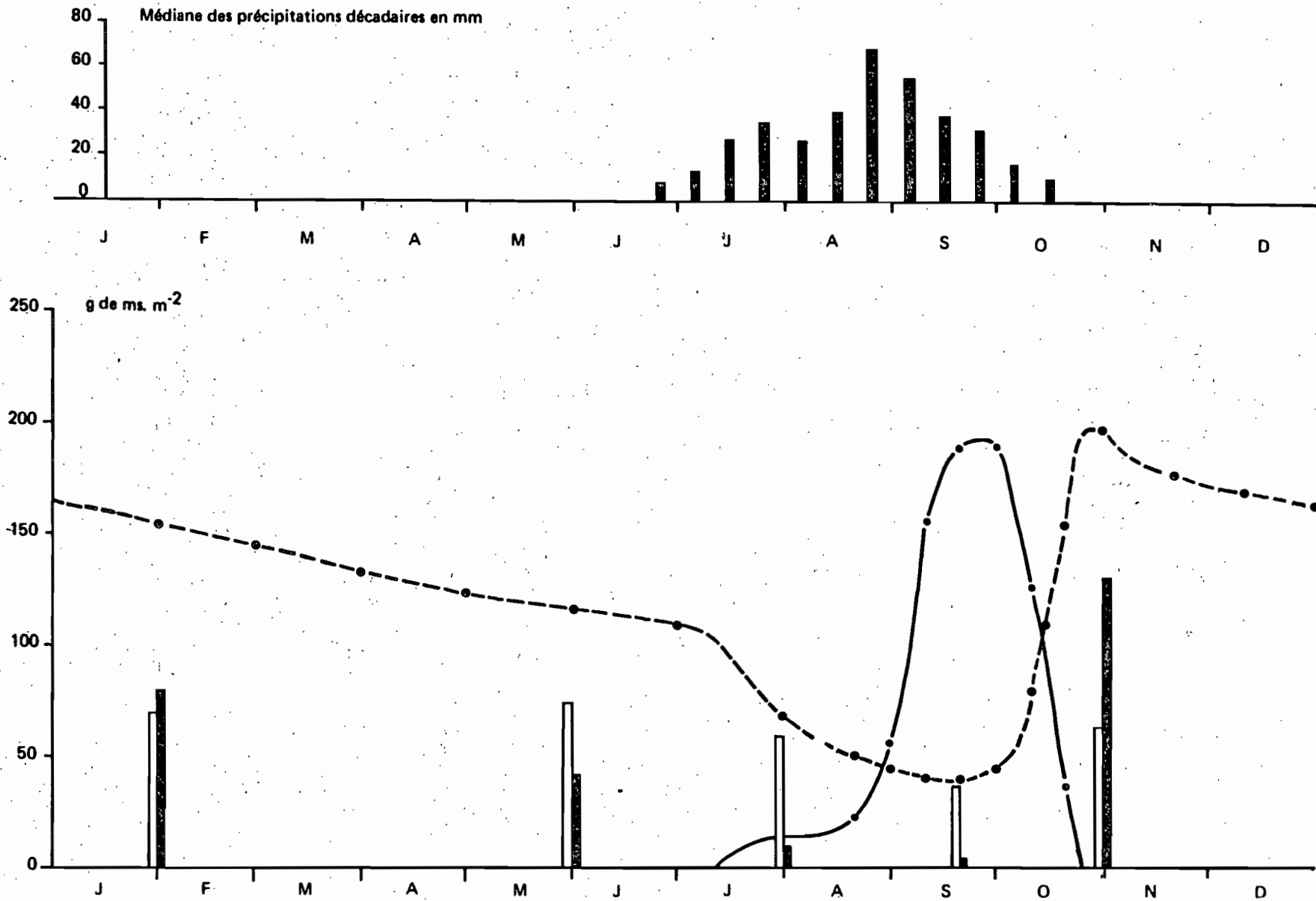


Fig. 19 Variation de la biomasse et de la matière morte au cours d'un cycle moyen de production à DAHRA

- - - Matière morte      — biomasse  
 □ litière      ■ matière morte érigée



### 3.4. - Cycle de production

Le cycle annuel de production débute fin juin, début juillet, avec le départ de la saison des pluies efficaces, lorsque l'humidité du sol demeure assez longtemps suffisante pour assurer la germination des semences (cf. § 2.1.2., chapitre II). La figure 19 montre l'évolution de la biomasse et de la matière morte au cours d'un cycle de production reconstituée pour une année moyenne à DAHRA. L'allure des courbes de production est très similaire pour tous les groupements. On note cependant les différences sensibles, notamment un raccourcissement du cycle vers le nord, un retard et un allongement dans les bas fonds.

D'une façon générale, en partant de la germination, on peut distinguer 5 phases dans le cycle de production des groupements herbacés sahéliens.

- 1 - après la germination, on a une phase de durée variable durant laquelle, l'augmentation de biomasse aérienne est lente. Elle correspond à la période de tallage des graminées et d'installation des espèces diverses tardives. La croissance racinaire est très importante, les racines suivent la pénétration du front d'humectation. La matière morte restante de l'année précédente subit une dégradation rapide si les pluies sont suffisantes, en liaison avec l'accroissement de la microfaune et de la microflore du sol. Cependant, contrairement à ce qu'écrit BILLE (1977a), la litière de l'année précédente ne disparaît que partiellement durant la saison des pluies, s'il n'y a pas eu pâturage. On observe par ailleurs que la présence de litière abondante en début du cycle diminue assez fortement le développement de la végétation de l'année, mais améliore la production des années ultérieures.

Cette phase est de durée variable, généralement de mi-juillet à mi-août, elle est très raccourcie les années à pluies tardives. Elle peut être entrecoupée de périodes sèches plus ou moins intenses et plus ou moins prolongées. C'est de cette phase que dépend essentiellement la composition du tapis herbacé.

- 2 - Une phase de croissance rapide, pratiquement linéaire, correspondant à la période de mi-août à mi-septembre. Durant cette période l'élaboration de biomasse est très active, elle coïncide avec la période durant laquelle les conditions hydriques sont généralement les plus favorables. C'est la période de montaison, de floraison et de fructification des Graminées. On peut définir au cours de cette phase une productivité moyenne correspondant à l'accroissement de matière végétale par unité de surface et de temps.

TABLEAU XXX - PRODUCTIVITE MOYENNE DURANT LA PHASE LINEAIRE DE CROISSANCE  
EN  $g.m^{-2}.j^{-1}$ .

	1975	1977	1978
FETE-OLE Ia			2,3
FETE-OLE IIIa			6,1
DAHRA nord Ib	5,3	4,4	4,4
" I Ib	7,3	7,0	9,3
DAHRA sud Ic	5,5	4,0	5,6

Pour une zone comparable en Haute Volta, GROUZIS (1979) donne des valeurs allant de 1,4 à 6,9  $m.m^{-2}.j^{-1}$ . Il signale les différences importantes existant entre les groupements pour une même année. Les résultats pour DAHRA montrent que les valeurs pour chaque groupement varient assez peu d'une année à l'autre.

La durée de cette phase est très variable d'une année à l'autre en fonction des conditions pluviométriques ; c'est de la durée de cette phase que dépend essentiellement la biomasse totale produite.

- 3 - une phase de stabilisation de la biomasse, relativement courte, correspondant à la maturation des semences. La biomasse est alors maximale. C'est cette valeur qui peut être approximativement considérée comme la valeur de la production annuelle.
- 4 - ensuite la quantité de biomasse décroît rapidement : mort des organes, dissémination des diaspores, en même temps que s'accumule la matière morte essentiellement sous forme d'herbe sèche sur pied. Cette phase brève, est terminée fin octobre. On constate que le dessèchement des herbacées se produit généralement alors qu'il reste une certaine quantité d'eau disponible dans le sol. L'arrivée de périodes très sèches et très chaudes entraîne la mort des plantes. Une partie de la matière morte sur pied se dégrade rapidement à la fin de cette période surtout sous l'action des petits consommateurs primaires encore abondants.
- 5 - La dernière phase, va de novembre à juin. La phytomasse est constituée de matière morte érigée, passant lentement à la litière. On assiste, en l'absence de pâturage, à une lente diminution de la phytomasse totale. A partir des mesures effectuées en 1970 et 1971, BILLE (1977a) estime les pertes de phytomasse durant cette période à 38  $kg.mois^{-1}.ha^{-1}$ . LEPAGE (1972) calcule pour FETE-OLE, de 50 à 60  $kg.mois^{-1}.ha^{-1}$  la prédation par les seules termites. Il est vrai que cette consommation s'exerce en partie sur la phytomasse racinaire. Les observations réalisées de 1975 à 1978, montrent que cette disparition est très variable

d'une année à l'autre. Les averses exceptionnelles, l'importance des vents de sable ont une grande influence sur cette disparition et sur la redistribution de la litière et les diaspores en saison sèche. Dans les zones non protégées, le feu détruit assez fréquemment la phytomasse aérienne, particulièrement les années où elle est abondante.

Dans le cas du pâturage de saison sèche, il y a disparition de la matière morte érigée, soit par consommation, soit par piétinement. La litière restante est soit incorporée au sol, soit dispersée par le vent. La fraction de phytomasse consommable est généralement considérée par les différents auteurs BOUDET (1975) BILLE (1977b) comme égale à 1/3 de la phytomasse produite. Dans certains groupements, tel le groupement Ic à *Zornia* de DAHRA sud, la disparition de la matière morte érigée est très rapide du fait de la chute et de la dispersion des folioles. La phytomasse disponible en saison sèche est alors très réduite.

Les variations des cycles de production sont importantes d'une année à l'autre en fonction des conditions climatiques. La comparaison des cycles observés en Haute-Volta par GROUZIS (1979) montre un décalage important d'environ 1 mois, lié à une saison des pluies plus précoce. Les stations étant à une latitude comparable, on peut penser que le rôle du photopériodisme est faible.

Au cours du cycle de production de 1978 nous avons fait effectuer sur les prélèvements de matière végétale quelques dosages d'azote total. Le tableau XXXI donne les teneurs en azote total de la biomasse et de la matière morte en 1978. Les teneurs en azote de la matière verte croissent avec l'importance de la contribution des Légumineuses dans les groupements. Elles décroissent rapidement au cours du cycle. Les teneurs de la matière morte, durant la saison sèche sont très faibles.

La figure 20 montre les quantités d'azote immobilisé dans la phytomasse herbacée aérienne. Les valeurs maximales observées sont 33,9 kg.ha<sup>-1</sup> à DAHRA nord Ib, 23,6 kg.ha<sup>-1</sup> à DAHRA nord IIb, 22,1 kg.ha<sup>-1</sup> à DAHRA sud Ic et seulement 8,3 kg à FETE-OLE Ia. Ces valeurs faibles sont en relation avec la pauvreté des sols en azote. BILLE 1977a donne pour le groupement Ia de FETE-OLE, une valeur moyenne de 8,5 kg.ha<sup>-1</sup>. Pour le même groupement (BERNHARD-REVERSAT, 1981) donne 3,0 kg.ha<sup>-1</sup> en 1977 et pour le groupement de bas de pente IIIa, 25 kg en 1976 et 12 kg ha<sup>-1</sup> en 1977. SICOT (1979) donne pour des groupements comparables de Haute Volta des valeurs allant en 1976 de 3 à 13,4 kg.ha<sup>-1</sup> suivant les groupements. PENNING DE VRIES (1978) estime de 10 à 40 kg la quantité d'azote immobilisé dans la phytomasse.

Il est à noter que les valeurs maximales d'azote immobilisé ne sont pas obtenues pour la phytomasse maximale, mais au début de la montaison. Elle décroît très faiblement par la suite au cours de la croissance. Cela peut correspondre aux observations de BERNHARD-REVERSAT (1977), qui observe que dès le début de la croissance végétale, la teneur en N minéral du sol chute très rapidement à un niveau très bas et s'y maintient durant toute la saison. Selon PENNING DE VRIES (1978), dans ces sols pauvres, "les plantes absorbent rapidement les minéraux disponibles lesquels sont dilués dans la biomasse jusqu'à ce que la concentration soit minimale". Cet auteur estime (PENNING DE VRIES *et al.* 1978) que les précipitations ne constituent pas le facteur limitant principal en ce qui concerne la production de pâturages sahéliens, mais que c'est la pauvreté des sols, notamment en azote.

TABLEAU XXXI : VARIATIONS DES TENEURS EN AZOTE DANS LA BIOMASSE  
ET DE MATIERE MORTE EN 1978, EXPRIMEE EN %.

Groupement		FETE-OLE Ia	FETE-OLE IIb	DAHRA-n. Ib	DAHRA-n IIb	DS Ic
Contribution des leg.		5,4 %	3,0 %	36,6 %	14,5 %	58,3 %
20.6.78	HV					
	HM	4,8	5,5	7,3	6,8	12,5
10.8.78	HV	15,55	10,75	20,7	21,7	24,75
	HM	4,25	5,25	6,7	7,0	13,0
19.9.78	HV	14,0	10,2	17,0	10,5	18,5
	HM	5,7	5,0	9,5	8,5	12,2
10.10.78	HV			11,0	8,2	16,5
	HM			9,7	7,5	14,0
22.11.78	HM	7,0	7,2	10,8	8,7	12,8
15.02.79	HM	5,7	6,2	10,5	7,0	13,0

HV = Herbe verte

HM = Matière morte

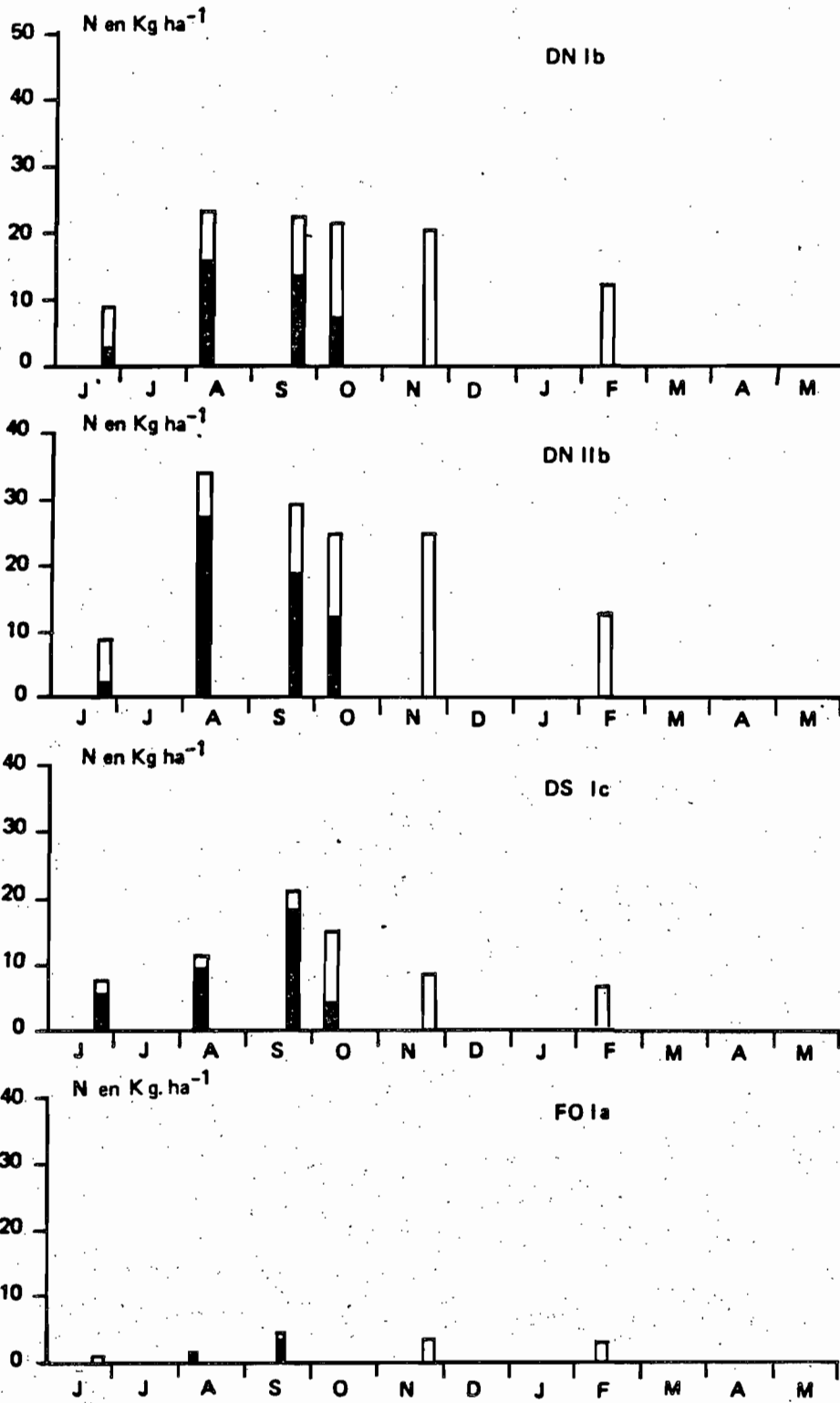


Fig. 2 0 Quantités d'azote immobilisé dans la phytomasse herbacée épigée au cours du cycle de production en 1978

■ dans la biomasse  
□ dans la ménomasse

## CHAPITRE III

ETUDE DU BILAN HYDRIQUE ET DE SES COMPOSANTES  
EN TANT QUE FACTEURS DE LA PRODUCTION VEGETALE

## 1.- ELEMENTS CLIMATIQUES DU BILAN HYDRIQUE.

De tous les éléments du climat, ceux qui concernent l'eau sont certainement à retenir en priorité dans une étude écologique en zone sahélienne. L'influence des températures est uniforme dans cette zone, pour laquelle les précipitations constituent le facteur essentiel pour la végétation. L'étude seule des précipitations est cependant insuffisante (THORNTHWAITE, 1944; ELDIN, 1971), car elle suppose que les besoins en eau sont les mêmes en tout lieu et en toute période. L'étude du facteur hydrique sera plus complète, si on compare, au cours du cycle annuel, les apports d'eau par les pluies aux pertes par évapotranspiration, en analysant le bilan hydrique climatique :  $P - ETP$  (LHOMME et MONTENY, 1979).

Ce bilan hydrique climatique est appelé parfois "bilan hydrique théorique" (COCHEME et FRANQUIN, 1967) par opposition au bilan hydrique du sol ou "bilan hydrique réel".

En fait, le bilan hydrique peut être considéré comme ayant deux composantes :

- le bilan hydrique climatique, dépendant du climat atmosphérique et dont l'échelle d'étude est liée à l'échelle d'homogénéité des variables du climat,
- le bilan hydrique édaphique, dépendant d'une part du climat atmosphérique, d'autre part des caractéristiques physiques du sol, relief y compris, et de la végétation. L'échelle d'étude est alors celle du bilan hydrique réel au niveau stationnel ou parcellaire.

L'étude du bilan hydrique climatique et de ses composantes fait l'objet du présent sous-chapitre. Cette étude concerne une zone allant du fleuve Sénégal au nord à une latitude de  $14^{\circ}30'$  au sud, limitée à l'est par le 15<sup>ème</sup> degré de longitude ouest et à l'ouest par la longitude du lac de Guiers (Fig. 1).

L'étude a porté, outre les trois stations expérimentales, sur 16 postes pluviométriques appartenant à cette zone ou limitrophes. Pour l'étude des ETP trois stations encadrant la zone ont pu être étudiées.

L'étude du bilan hydrique édaphique fait l'objet du sous-chapitre suivant.

## 1.1- Précipitations.

Comme nous l'avons souligné dans la description du climat, le régime des précipitations est lié dans notre aire d'investigation au déplacement du front de convergence intertropical. Les pluies sont faibles, réparties sur un petit nombre de jours et affectées d'une grande variabilité.

### 1.1.1- Caractérisation des précipitations annuelles.

La connaissance du climat pluviométrique d'un lieu ou d'une région implique la détermination de la quantité annuelle de pluie, de sa variabilité et de sa répartition.

Le nombre d'observations nécessaires pour que la moyenne soit stabilisée, donc représentative, croît avec la variabilité des précipitations annuelles. Dans les zones sèches, et notamment au Sahel, la variabilité interannuelle est grande (voir Fig. 21) et de nombreuses années (plus de 50) sont nécessaires pour obtenir une moyenne stable. C'est pourquoi de nombreux auteurs (RODIER, 1975b) préfèrent utiliser comme "normales" les valeurs médianes qui sont moins influencées par l'intervention des valeurs exceptionnelles.

#### 1.1.1.1- Distribution

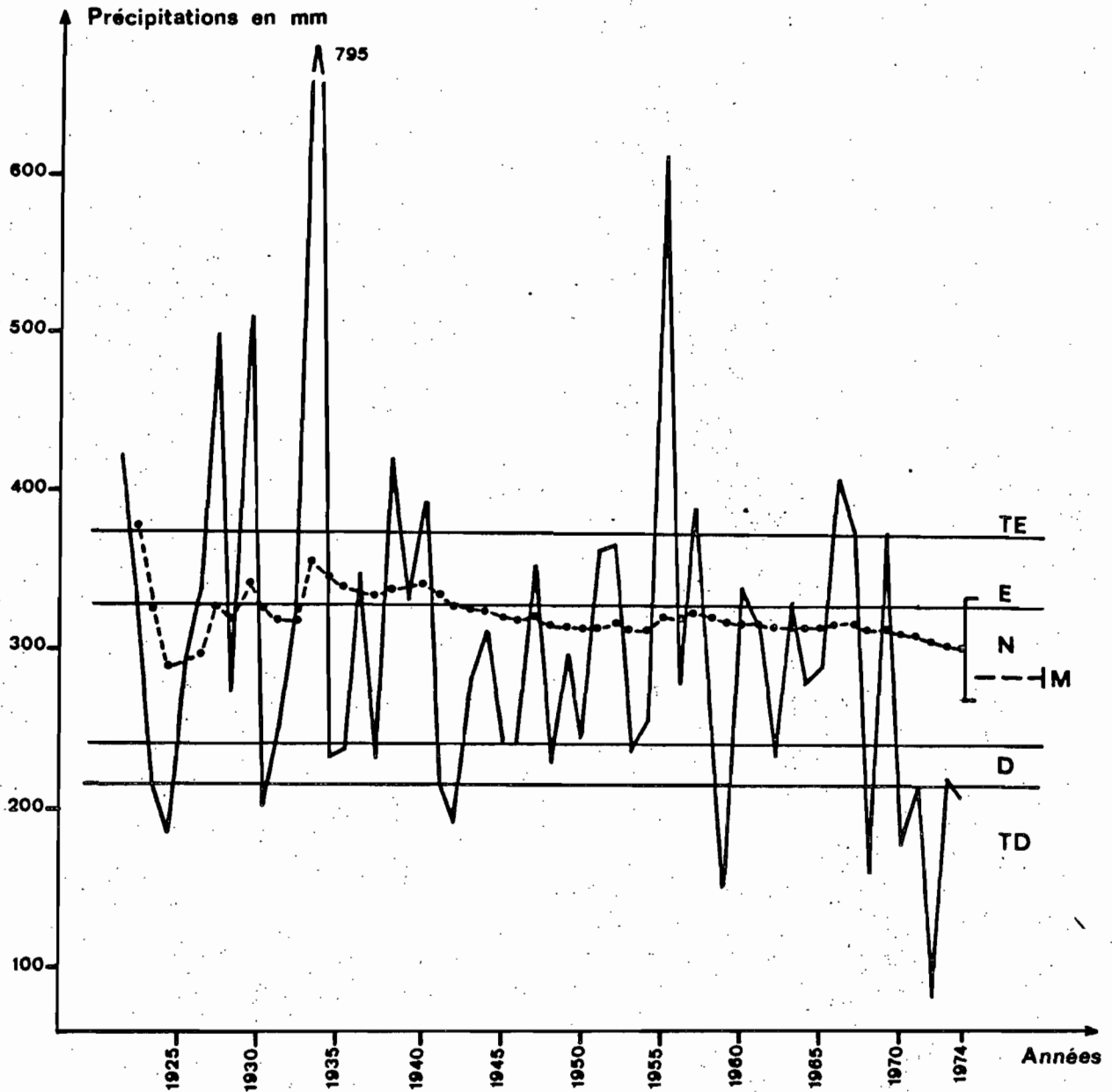
Le tableau n° XXXII donne les valeurs des moyennes et des médianes pour les stations concernant notre zone. Il est à noter que dans la zone proprement sahélienne ( $P < 500$  mm) la médiane des observations est généralement inférieure à la moyenne alors que dans les zones plus humides la médiane est voisine ou légèrement supérieure à celle-ci. A partir de ces données, nous avons tracé, pour la zone d'étude, les isohyètes (Fig. 22) en considérant, d'une part les valeurs médianes et d'autre part les valeurs moyennes.

La distribution des moyennes annuelles montre l'existence d'un gradient latitudinal nord-sud. La figure 23 illustre, pour la zone étudiée, cette variation des valeurs des moyennes annuelles suivant la latitude. Elle peut être exprimée par la droite de régression :

$$P_a = -148,52 \varphi + 2\,753,57 \quad (r^2 = 0,74)$$

où  $P_a$  est la pluviosité annuelle en millimètres,  
 $\varphi$  la latitude exprimée en degrés et centièmes de degré.





○-○-○ Valeurs moyennes de la hauteur annuelle de pluie calculées d'année en année  
- - - Médiane pour l'ensemble de la période 1921-1974  
[ Intervalle de confiance de la moyenne

TE = très excédentaire E = excédentaire N = normale D = déficitaire  
TD = très déficitaire

Fig. 21 DAGANA variations interannuelles des précipitations

Tableau XXXI

PRECIPITATIONS ANNUELLES

N°	STATIONS	$\varphi$	$\lambda$	N	Moy.	Med.	$\sigma$	I. C.
1	BARKEDJI	15°17	14°52	22	424,2	414	113,2	± 48,3
2	BIRKELANE	14°08	15°45	12	601,7	640		
3	BOULEL	14°17	15°32	18	606,4	612		
4	COKI	14°31	16°00	35	472,1	450	152,8	± 51,7
5	DAGANA	16°31	15°30	52	304,5	285	119,9	± 33,3
6	DAHRA-VILLE	15°20	15°29	45	492,1	505	146,2	± 47,4
7	DIAGLE	16°13	15°42	10	308,8	290		
8	GASSANE	14°50	15°18	14	545,6	538		
9	KAFFRINE	14°06	15°33	40	724,9	718	159,1	± 50,3
10	KEUR MOMAR SARR	15°56	15°53	10	360,3	360		
11	LINGUERE	15°23	15°07	38	478,3	510	128,5	± 41,7
12	MALEME HODDAR	14°05	15°10	12	682,2	685		
13	PODOR	16°38	14°56	51	300,3	298	121,4	± 34,0
14	SADIO	14°48	15°33	18	568,8	613		
15	THIEL	14°54	15°04	13	521,5	520		
16	YANG-YANG M'BEULAKE	15°39	15°21	35	467,5	419	191,5	± 65,7

$\varphi$  = Latitude en degrés

$\lambda$  = Longitude en degrés

N = Nombre d'années utilisées

I. C = Intervalle de confiance de la moyenne (P = 0,05)

Moy. = Moyenne

Med. = Médiane

$\sigma$  = Ecart type

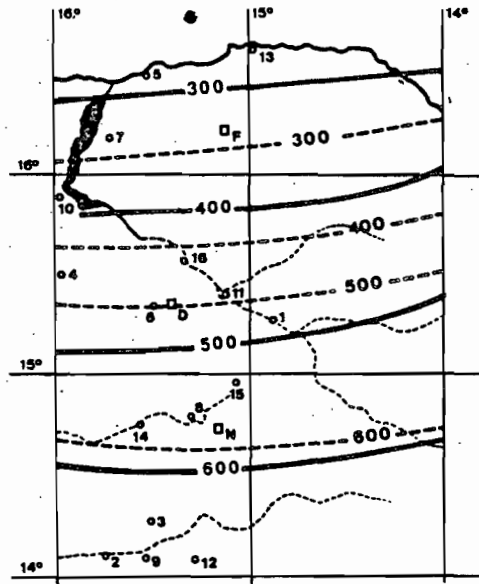


Fig. 22 CARTE DES ISOHYETES

--- valeurs médianes  
 ——— valeurs moyennes

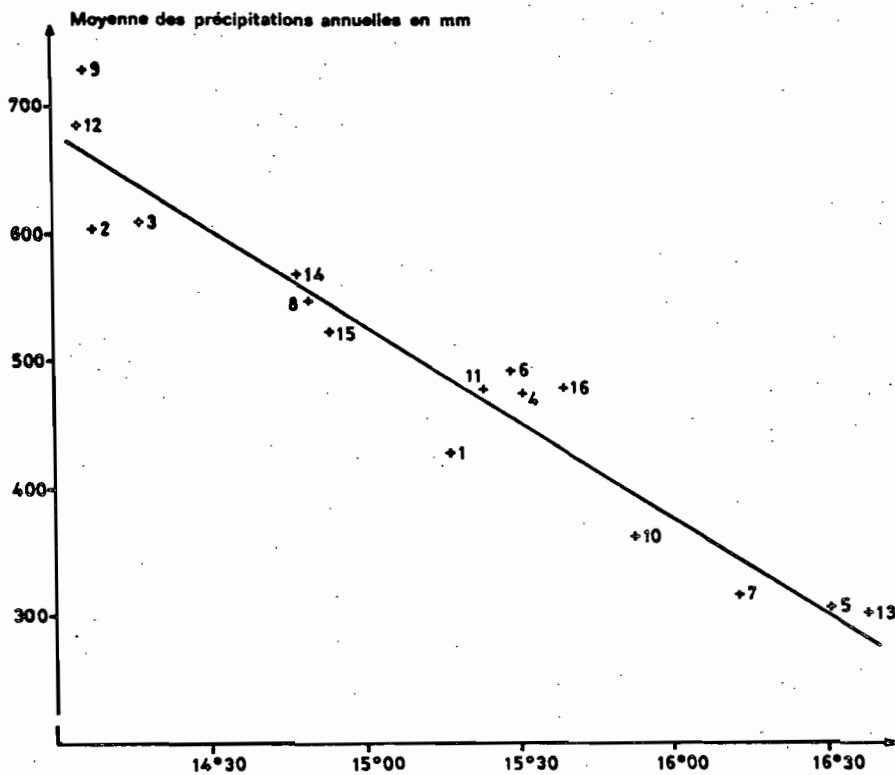


Fig. 23 Évolution des précipitations en fonction de la latitude

Cette décroissance, de l'ordre de 24,8 mm pour 10' de latitude, ne peut être considérée comme uniforme que sur une courte distance. En effet, si l'on compare ces variations à d'autres obtenues en zone subdésertique (Mauritanie centrale, 10 mm pour 10') et en zone subguinéenne (Casamance, 75 mm pour 10') (MICHEL et al., 1969), on voit que les variations sont d'autant plus accentuées que le climat est plus humide et que l'écart entre les isohyètes croît vers le nord.

D'autre part, comme le soulignent COCHEME et FRANQUIN (1967), à des latitudes comparables, le gradient nord-sud des précipitations est plus étalé lorsque l'on se déplace vers l'est (Mali, Haute Volta ...).

L'utilisation de cette régression pour déterminer la moyenne annuelle des précipitations en un lieu est limitée à la région étudiée. Par ailleurs, elle ne doit être utilisée qu'avec précaution, car elle est établie à partir des moyennes sans tenir compte de l'intervalle de confiance de ces moyennes, les résultats ne sont donc pas précis.

#### 1.1.1.2- Variabilité

Pour caractériser la variabilité interannuelle des précipitations, nous avons d'abord considéré les valeurs extrêmes observées. Le tableau XXXIII donne ces valeurs pour les diverses stations. Nous voyons que les quantités observées varient dans de grandes proportions. Pour DAGANA la variation est de 1 à 10. Par ailleurs, les années extrêmes ne correspondent pas aux mêmes dates pour toutes les stations, ce qui montre une variabilité importante entre stations. L'étude de l'intervalle total de variation peut donner une idée fautive de la dispersion, dans la mesure où il n'est pas indépendant de l'effectif utilisé, des valeurs extrêmes risquant davantage d'apparaître au sein d'un grand effectif.

La dispersion des valeurs annuelles des précipitations peut être caractérisée par l'utilisation de quantiles (GRISOLLET et al., 1962). La figure 21 montre pour DAGANA la répartition en quantiles, qui partagent l'ensemble des observations en 5 groupes d'effectifs égaux. Les variations successives sont fortes et il n'existe aucune suite d'années excédentaires ou déficitaires qui soit supérieure à 5 ans.

Ainsi, pour Dahra, sur 45 années (1934-1978) on note:

- 1 succession de 4 années sèches,
- 1 succession de 3 années sèches,
- 1 série d'années moyennement sèches de 9 ans,
- 1 succession d'années pluvieuses de 4 ans,
- 5 successions d'années pluvieuses de 2 ans,
- 1 série moyennement pluvieuse de 13 ans.

Tableau XXXIII

VALEURS EXTREMES OBSERVEES DES PRECIPITATIONS ANNUELLES

N°	STATIONS	Année la + pluvieuse	P Max.	Année la + sèche	P Min.	PM-Pm	C. V.
1	BARKEDJI	1951	688,5	1941	225,3	463,2	26,7 %
2	BIRKELANE	1966	790,2	1973	393,5	592,9	
3	BOULEL	1969	847,2	1970	373,8	473,4	
4	COKI	1952	787,9	1972	187,7	600,2	32,4 %
5	DAGANA	1933	795,0	1972	79,5	715,5	39,4 %
6	DAHRA	1969	857,6	1971	214,5	643,1	29,7 %
7	DIAGLE	1969	624,7	1972	94,1	530,6	
8	GASSANE	1958	851,5	1970	212,4	639,1	
9	KAFFRINE	1936	1133,1	1968	413,0	720,1	21,9 %
10	KEUR MOMAR SARR	1969	539,8	1972	121,9	417,9	
11	LINGUERE	1936	853,6	1941	204,7	648,9	26,9 %
12	MALENE HODDAR	1969	993,6	1970	380,8	612,8	
13	PODOR	1955	793,4	1942	98,4	695,0	40,4 %
14	SADIO	1969	838,2	1968	272,2	566,0	
15	THIEL	1969	924,6	1970	280,4	644,2	
16	YANG-YANG M'BEULAKE	1945	981,9	1972	156,4	825,5	41,0 %

$$\text{Coefficient de variation C.V.} = \frac{\text{écart type}}{\text{moyenne}} \times 100$$

D'autre part, nous avons calculé pour les stations comptant plus de 20 ans d'observation, le coefficient de variation :

$$C.V. = \frac{\text{écart type}}{\text{moyenne}} \times 100 \quad (\text{tableau XXXIII})$$

On voit que ce coefficient qui caractérise la variabilité interannuelle des précipitations croît lorsque la moyenne des précipitations diminue, allant de 22 % au sud à 40 % au nord. Divers auteurs soulignent ce phénomène (GRISOLLET et al., 1962; COCHEME et FRANQUIN, 1967). Ces derniers auteurs montrent que, pour les stations sénégalaises, les coefficients de variation sont plus élevés que pour les autres stations sahéliennes de même latitude. Cet accroissement de la variabilité dans la zone sèche traduit le fait que, plus les pluies sont rares, plus elles sont aléatoires.

A la variabilité interannuelle s'ajoute une variabilité spatiale importante; les pluies étant dues essentiellement à des grains orageux très localisés.

Le tableau XXXIV montre la variabilité des précipitations pour trois stations peu éloignées. DAHRA-CRZ est situé à 4 km à l'est de Dahra-ville, DAHRA-point G est situé à 5 km au nord-est de DAHRA-CRZ à l'intérieur de la concession. Les trois stations sont équipées de pluviomètres standard relevés journallement.

PERIODE		DAHRA ville (1)	DAHRA CRZ (2)	DAHRA Point G (3)	Ecart (1)-(2) en % de (1)	Ecart (1)-(3) en % de (1)	Ecart (2)-(3) en % de (2)
1978	Total annuel	329,8	292,7	392,5	- 11 %	+ 19 %	+ 34 %
	Total mois d'août	62,0	34,8	45,7	- 43,8 %	- 23,3 %	+ 36,5 %
	Total 2 <sup>e</sup> déc. août	19,4	10,3	21,3	- 46,9 %	+ 9,7 %	+106,8 %
1979	Total annuel	284,8	280,4	311,4	- 1,5 %	+ 9,3 %	+ 11,0 %
	Total mois d'août	135,0	138,9	121,6	+ 2,8 %	- 9,9 %	- 12,4 %
	Total 2 <sup>e</sup> déc. août	135,0	138,9	121,6	+ 2,8 %	- 9,9 %	- 12,4 %
1969- 1978	Moyenne annuelle	371,0	354,3		- 4,5 %		

Tableau XXXIV

VARIABILITE DES PRECIPITATIONS ENTRE 3 STATIONS VOISINES.

A la suite de la période de sécheresse récente qui a atteint le Sahel, de nombreux auteurs ont étudié la variabilité des précipitations à long terme, pour déterminer si une tendance générale se dégageait. BILLE (1977a), étudiant les précipitations à Saint LOUIS (période 1871-1970), montre que : "les années extrêmes sont très nombreuses, en particulier les années très humides avant 1920 et très sèches après 1920. Par contre, les années moyennement humides sont plus fréquentes au cours de la période récente... On voit que la seconde moitié du siècle se distingue par une plus grande variabilité des moyennes quinquennales, mais il n'y a pas de tendance à une plus faible pluviosité" (p. 11).

De même, RAPP (1974), rapportant les travaux de SIRCOULON (1974) et DAVY (1974) déclare qu'il n'est pas possible, au vu des données existantes, de conclure à une tendance vers un dessèchement du climat depuis le début du siècle en zone sahélienne.

#### 1.1.2- Répartition des précipitations.

Nous utilisons ici le terme distribution pour parler de la répartition spatiale des précipitations, répartition est réservée à la répartition temporelle.

##### 1.1.2.1- Début et fin de saison des pluies

La date de début de saison des pluies est très importante, car elle détermine le départ de la végétation herbacée annuelle. Une date tardive entraîne pour les troupeaux le prolongement de la disette et un amaigrissement prononcé. De même, un arrêt précoce de la saison des pluies est très préjudiciable au pâturage, car il stoppe la croissance végétale à une période où celle-ci est généralement importante.

Compte tenu de leur efficacité pour la végétation (cf. § 2.1.2 - Chapitre II) nous considérons, comme début de la saison des pluies efficaces, la première pluie supérieure à 20 mm, ou la première pluie supérieure à 10 mm si elle est suivie d'une décade où les précipitations sont supérieures à 10 mm, et ceci après le 1er juin.

Nous considérons comme fin de la saison des pluies, la dernière pluie avant le 31 octobre, supérieure à 10 mm, ou la dernière pluie supérieure à 20 mm suivie d'une décade totalement sèche.

De l'examen des données pluviométriques de DAHRVILLE, sur 45 années utilisables (1934-1978) il ressort que les fréquences observées de début de saison des pluies sont :

- Avant le 15 juillet 0,87
- Avant le 1er juillet 0,44
- Avant le 20 juin 0,22

Les fréquences observées de fin de saison des pluies sont :

- Après le 10 octobre 0,22
- Après le 1er octobre 0,47
- Après le 20 septembre 0,84

La figure 24 montre les fréquences cumulées de début et de fin de saison des pluies efficaces à DAHRA et PODOR. La durée médiane de la saison des pluies efficace, centrée du 20 juillet au 17 septembre, est de 59 jours à PODOR, et du 10 juillet au 24 septembre, soit 76 jours à DAHRA. Pour cette station, une année peut être considérée comme ayant un début de saison des pluies précoces si celle-ci débute avant le 1er juillet. De même, la saison des pluies aura une fin tardive si elle se termine après le 10 octobre.

Notons qu'une année sur cinq, le début de saison des pluies se situe avant le 20 juin et que une année sur cinq, elle se termine après le 10 octobre. Il faut remarquer, par ailleurs, que des périodes de sécheresse intercalaires peuvent intervenir après le début de la saison des pluies, notamment lorsque ce début est précoce.

#### 1.1.2.2- Répartition annuelle.

Le tableau XXXV montre la répartition mensuelle moyenne des précipitations pour les principales stations de notre zone d'étude. 80 % de ces précipitations tombent durant les mois de juillet, août et septembre. Août est le mois le plus arrosé, avec 30 à 40 % des précipitations annuelles. Il est à noter que, pour les moyennes mensuelles ou décadaires de saison sèche, les valeurs ne sont pas représentatives, car elles ne reflètent que l'influence de quelques pluies exceptionnelles.

Pour DAHRA-ville, nous avons essayé de définir des années types à répartition type. Nous avons considéré les années comme moyennes M, humides H, ou sèches S, en fonction du total annuel des précipitations et des interquantiles.

S < 400 mm                      400 mm < M < 550 mm                      H > 550 mm

Sur les 45 années observées, les fréquences sont :

M = 0,47  
H = 0,27  
S = 0,27



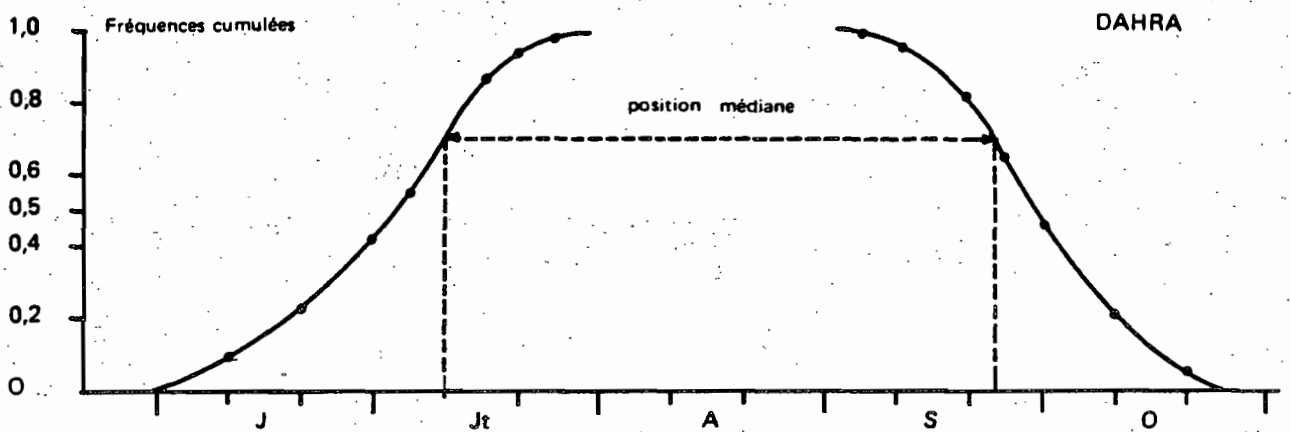
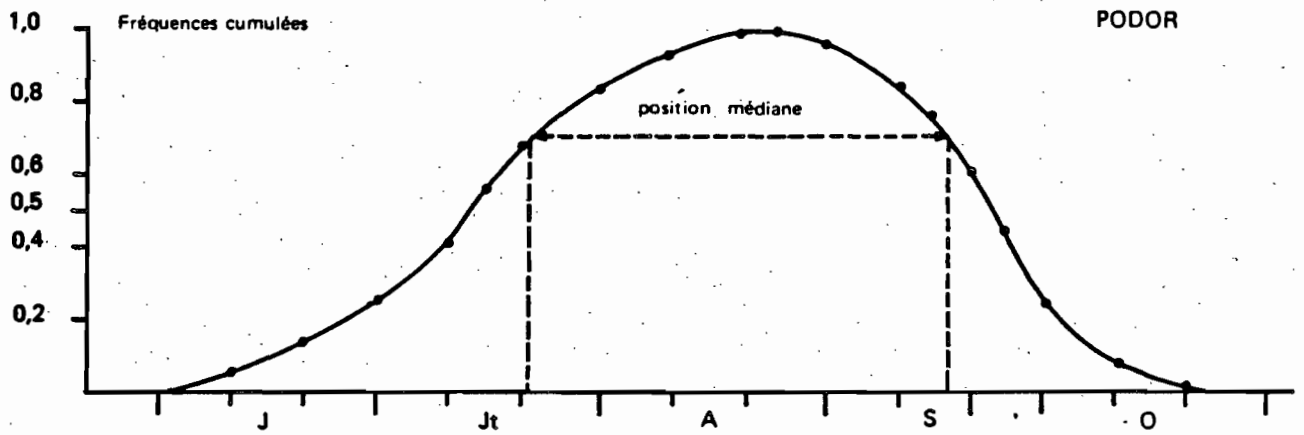


Fig. 24 Fréquences observées de début et de fin de saison de pluies efficace à DAHRA et PODOR

Tableau XXXV

REPARTITION MENSUELLE MOYENNE DES PLUIES

STATIONS	Janvier à Juin	Juin	Juillet	Août	Septemb.	Octobre	Octobre à Décembre
PODOR	4,8 1,6 %	16,4 5,5 %	58,1 19,4 %	117,4 39,1 %	81,3 27,1 %	20,3 6,8 %	1,7 0,6 %
DAGANA	4,5 1,4 %	14,3 4,6 %	54,1 17,4 %	126,2 40,6 %	83,5 26,9 %	24,4 7,9 %	3,5 1,1 %
DAHRA-Ville	1,7 0,3 %	30,6 6,3 %	102,2 21,1 %	172,9 35,7 %	131,6 27,2 %	43,1 8,9 %	1,6 0,3 %
LINGUERE	4,4 0,9 %	27,8 5,8 %	95,2 19,9 %	176,6 36,9 %	132,8 25,9 %	46,3 9,7 %	4,4 0,9 %
BOULEL	1,7 0,2 %	49,2 8,1 %	138,0 22,8 %	196,3 32,4 %	158,0 26,1 %	62,1 10,3 %	0,1 0,02 %
KAFFRINE	6,3 0,9 %	63,5 8,8 %	147,3 20,3 %	265,7 36,7 %	177,8 24,6 %	60,0 8,3 %	3,5 0,5 %

En considérant les trois principaux mois : juillet (J), août (A) et septembre (S), on établit de même :

$J_s < 80 \text{ mm}$	$80 < J_m < 150$	$J_h > 150 \text{ mm}$
$A_s < 100 \text{ mm}$	$100 < A_m < 225$	$A_h > 225 \text{ mm}$
$S_s < 100 \text{ mm}$	$100 < S_m < 175$	$S_h > 175 \text{ mm}$

Les fréquences observées sont :

$J_m = 0,29$
$A_m = 0,49$
$S_m = 0,56$

Le mois de septembre est le mois affecté de la plus faible variabilité, il n'est pas le plus pluvieux, mais il est le plus constant.

A partir d'années-types et de mois-types, on peut définir des années-types à répartition mensuelle type. Les années à répartition les plus fréquentes sont indiquées au tableau XXXVI.

Tableau XXXVI

FREQUENCE DES PRINCIPALES ANNEES TYPES

Année type	Fréquence	Année type	Fréquence
M-Jm Am Sm	0,088	M-Js Am Sm	0,044
M-Js Ah Ss	0,088	H-Jh Ah Sh	0,044
S -Js As Sm	0,088	S-Js As Ss	0,044
M-Jh Am Sh	0,066	H-Js Ah Sm	0,044
H-Jh Am Sm	0,066	S-Js Am Sm	0,044
M-Jh Am Sm	0,044	S-Js Am Ss	0,044

Ainsi, une fois tous les 11 ans environ, on a une chance d'avoir à DAHRA une année moyenne à répartition moyenne ( $\frac{1}{0,088} = 11,25$ ). La fréquence d'apparition d'une année très sèche, dont les trois mois : juillet, août et septembre sont déficitaires, est de une fois tous les 22,5 ans.

1.1.2.3- Répartition décadaire.

La figure 25 montre pour 6 stations la valeur des médianes des précipitations décadaires. Les décades les plus arrosées sont la dernière décade d'août et la 1ère décade de septembre. On remarque pour DAHRA, LINGUERE et les stations situées plus au sud, une baisse des précipitations durant la 1ère décade d'août. Ce ralentissement des pluies, suivant qu'il est plus ou moins marqué, a une grande influence sur la mise en place du peuplement herbacé.

La variabilité interannuelle, forte au niveau des totaux annuels et mensuels, augmente encore au niveau décadaire. L'étude des fréquences du rapport R des hauteurs décadaires de pluie à la moyenne, montre des répartitions très dissymétriques avec une fréquence élevée des valeurs de R inférieures à 1. Il en ressort la non représentativité de la moyenne comme valeur normale des précipitations décadaires, étant donné les faibles fréquences attachées à cette valeur, et l'intérêt de l'étude des médianes et des fréquences (CORNET, 1978).

1.1.3- Analyse fréquentielle des précipitations décadaires.

L'insuffisance et l'irrégularité des pluies font de leur prévision statistique, fondée sur l'analyse fréquentielle des séries d'observations, un des éléments majeurs de la connaissance du climat pluviométrique dans les zones à tendance aride.

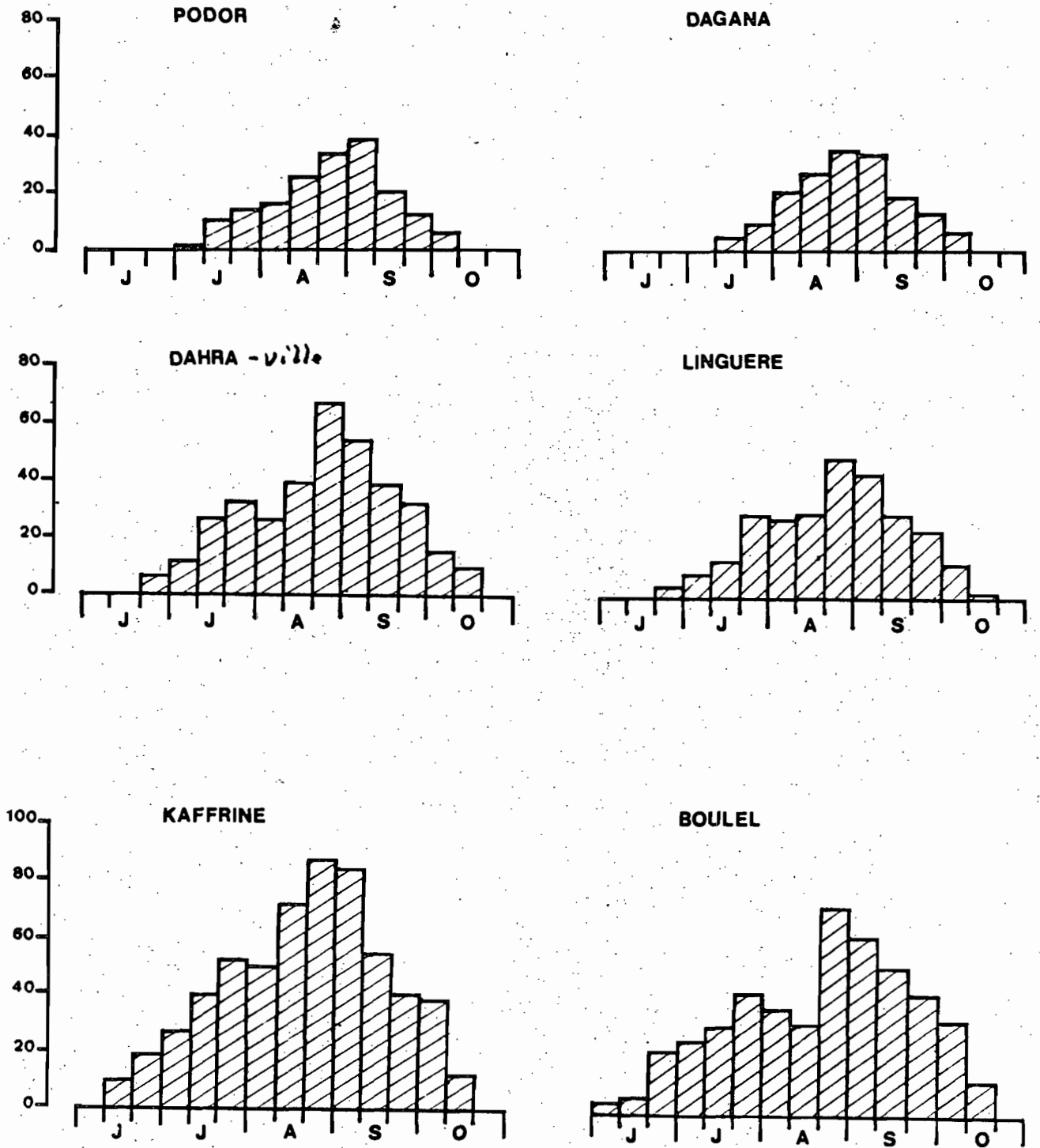


Fig. 25 - Médianes des précipitations décennales pour six stations représentatives

Pour dix stations de notre zone : BOULEL, DAGANA, DAHRA-ville, DIAGLE, GASSANE, KAFFRINE, LINGUERE, PODOR, THIEL et YANG-YANG MBEULAKE, l'étude a été effectuée (CORNET, 1978), grâce au modèle ORSTOM d'analyse fréquentielle des pluies (BRUNET-MORET, 1969). Ce modèle est fondé sur l'ajustement aux données d'une loi de distribution du type : "distribution incomplète gamma ou de Pearson III" dont les paramètres sont estimés.

On rappellera que cette loi de distribution peut s'écrire :

$$F(x) = F(o) + \frac{1 - F(o)}{\Gamma(\gamma)} \cdot \int_{x_0}^x \left( \frac{x - x_0}{S} \right)^{\gamma-1} \cdot e^{-\frac{x - x_0}{S}} \cdot \frac{dx}{S}$$

où  $\Gamma(x)$  est la fonction gamma complète,

$F(x)$  représente la probabilité au non dépassement d'une grandeur observée  $x$  dont la valeur minimale est  $x_0$ , la fréquence étant  $F(o)$  pour  $x = x_0$ .

La fonction est caractérisée par trois paramètres :

$x_0$  : borne inférieure de l'intervalle de définition.

$S$  : paramètre d'échelle de même dimension que  $x$ .

$\gamma$  : paramètre de forme.

Ces paramètres sont estimés par la méthode du maximum de vraisemblance. Dans la pratique, on obtient pour chaque période de durée fixée (ici décadaire) et mobile dans le temps (de 5 en 5 jours), les hauteurs d'eau à espérer à un certain nombre de niveaux de probabilité entre 0,01 et 0,99. La figure 26 montre, pour trois stations représentatives, les lames d'eau à espérer, en fonction de la date, pour les probabilités au non dépassement de 0,25, 0,50 et 0,75. On peut également déterminer pour chaque décade la probabilité d'avoir telle hauteur décadaire de pluie.

Graphiquement, l'axe des abscisses étant celui du temps, et l'axe des ordonnées une échelle de fréquences relatives ou de probabilités, la variabilité d'occurrence de tout événement (par exemple  $P$  nul ou  $P > 20$  mm ...) peut être figurée par un histogramme de densité de probabilité ou une courbe de fréquences relatives. La figure 27 donne, pour trois stations représentatives, les probabilités d'avoir :

a- une décade totalement sèche,

b- des précipitations décadaires  $\geq 20$  mm.

Les résultats de l'analyse fréquentielle sont utilisés dans l'étude de la période humide pour définir les probabilités au dépassement par les pluies de telle ou telle fraction choisie de l'évapotranspiration (FRANQUIN, 1976).

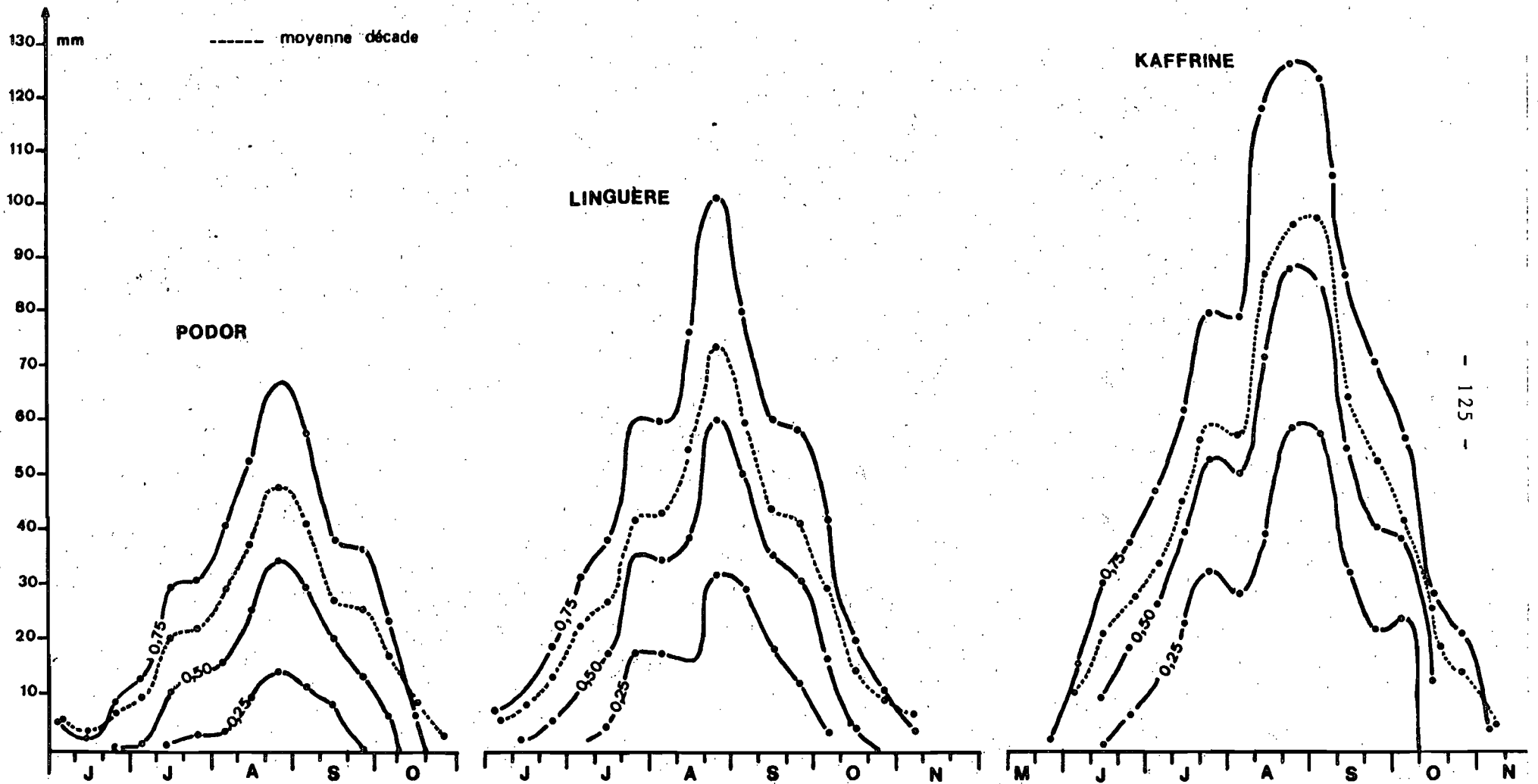


Fig. 26 Hauteur de pluie décadaire pour les probabilités au non dépassement de 0,25 ; 0,50 ; 0,75

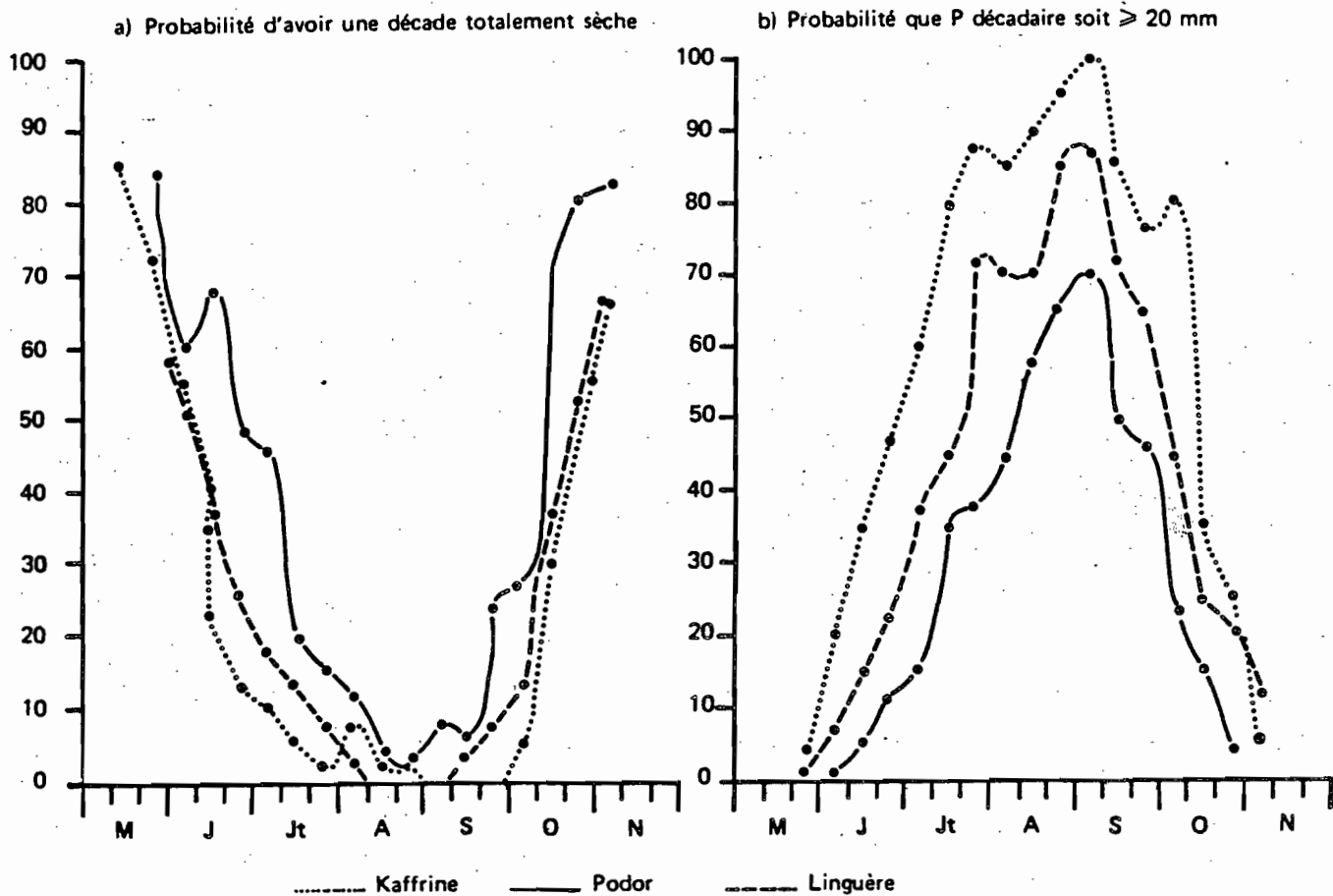


Fig. 27 - Probabilités pour les stations de PODOR, LINGUERE et KAFFRINE d'avoir une décade totalement sèche, ou des précipitations décadaires supérieures à 20 mm.

## 1.2- Demande évaporative : évapotranspiration.

Une des caractéristiques importantes du climat sahélien est l'existence d'une longue saison sèche, marquée par une faible pluviosité et une forte demande climatique en eau, résultant du haut niveau du rayonnement solaire et de la sécheresse des masses d'air apportées par le vent. La caractérisation du climat passe par la détermination de la demande évaporative. Cette demande est traduite par la notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) introduite par THORNTHWAITE (1944) et définie par lui comme étant la perte d'eau maximale, par la végétation, si à aucun moment le sol ne se trouve en déficit hydrique. La définition de l'ETP et son évaluation ont donné lieu à de nombreuses recherches et publications. BOUCHET (1964) définit l'évapotranspiration potentielle comme "l'évapotranspiration maximale, quand l'énergie est le seul facteur limitant" (p. 195). Elle constituerait donc une donnée dépendant seulement des facteurs climatiques. Selon PERRIER (1975) : "L'évapotranspiration potentielle d'un couvert est donc l'évapotranspiration maximale de ce couvert, si l'ensemble de ses surfaces d'échange est à saturation" (p. 13). L'évolution du concept d'ETP a conduit à une pluralité de définitions, suivant le but recherché. Il importe donc de préciser que dans cette étude l'ETP est simplement définie comme l'expression de la demande climatique. L'intérêt de cette définition réside d'une part dans son indépendance vis à vis du couvert végétal, d'autre part, en tant que caractéristique climatique.

La détermination de l'ETP est relativement complexe, et a fait l'objet de très nombreuses études, tant théoriques que pratiques. Il existe, en général, quatre façons de procéder :

- soit par des mesures directes,
- soit par des mesures de flux d'énergie ou de vapeur,
- soit par des mesures indirectes,
- soit par le calcul, à partir des données climatiques, suivant des formules plus ou moins empiriques.

### 1.2.1- Méthodes de détermination.

Les mesures directes, à partir d'évapotranspiromètres constituent les mesures de référence. Elles sont précises et significatives si les précautions nécessaires ont été prises. Mais l'installation est coûteuse, grosse consommatrice d'eau en zone sèche, pour l'irrigation de l'anneau de garde que l'on doit choisir aussi grand que possible. Elles nécessitent un entretien constant, une surveillance permanente par un personnel compétent. Il était donc exclu que nous puissions installer des évapotrans-



piromètres dans une station de mesure éloignée, avec un personnel réduit et, souvent, pas ou peu d'eau.

Les méthodes basées sur les mesures de flux : méthode aérodynamique, méthode du bilan d'énergie ou méthode mixte, sont utilisées pour mesurer l'évapotranspiration à des échelles de temps très courtes allant du quart d'heure à la journée. Elles sont précises, mais complexes et nécessitent l'utilisation de matériel compliqué et coûteux.

Les méthodes indirectes reposent sur l'utilisation d'un modèle physique simplifié : bac d'évaporation ou évaporimètre. Leur utilisation nécessite un certain nombre de précautions et la transformation des résultats.

Le calcul de l'ETP à partir des données climatiques a conduit de très nombreux auteurs à déterminer des formules adaptées à cet objectif. La nature empirique de ces formules et le petit nombre de données utilisées font qu'elles ne sont généralement applicables que dans un cadre étroit, et non transposables à des zones climatiques différentes. Seule la formule de PENMAN (1969), basée sur l'analyse du bilan énergétique d'une surface évaporante semble donner des résultats satisfaisants.

Dans un premier temps, nous avons comparé à DAHRA trois méthodes : l'utilisation de l'évaporimètre Piche, l'utilisation du bac et la formule de PENMAN. Nous avons ensuite utilisé la formule de PENMAN pour calculer les ETP pour PODOR, DAHRA et LINGUERE, et utilisé le bac pour déterminer l'ETP des stations de MBIDI et DAHRA.

#### 1.2.1.1- Utilisation de l'évaporimètre Piche.

L'évaporimètre Piche est utilisé depuis longtemps et traditionnellement placé dans l'abri météorologique, ses données sont régulièrement citées. Le grand nombre de données existantes et la simplicité de l'appareil a conduit de nombreux auteurs à tenter de l'utiliser pour déterminer l'évapotranspiration potentielle. Le Piche a fait l'objet de plusieurs études théoriques (BOUCHET, 1964; RIOU, 1975,...) permettant de mieux préciser la signification des mesures sous abri. De l'application de la formule de PENMAN au Piche, BOUCHET déduit la formule dite "de Piche corrigé".

$$ETP = \alpha_1 \alpha_2 E_p \left( 1 + \frac{F'(\theta)}{\gamma} \right)$$

où  $E_p$  est l'évaporation Piche.

$F'(\theta)$  la dérivée de l'équation donnant la tension de vapeur en fonction de la température :  $F'(\theta) = \Delta$

$\gamma$  est la constante de Bowen.

L'expression  $1 + \frac{F'(\theta)}{\gamma} = \lambda$  a été calculée en fonction de  $(\theta)$  par BOUCHET (1964)

Le coefficient  $\alpha_1$  est fonction du rapport  $\frac{RN}{E_a}$  lui-même fonction du rapport  $\frac{ETR}{ETP}$  qui traduit l'aridité de la région,  $E_a$  représentant le terme advectif.

Le coefficient  $\alpha_2$  dépend surtout du type d'abri et de sa hauteur au-dessus du sol; dans le cas d'un abri normalisé on peut considérer  $\alpha_2$  comme constant.

SCHOCH et DANCETTE (1968) pour le calcul de l'ETP au Sénégal ont repris la formule de Piche corrigée en donnant une loi de variation de  $\alpha = \alpha_1 \cdot \alpha_2$  en fonction de l'aridité du lieu. En effet, en région subtropicale, caractérisée par une saison sans pluie et une saison à pluviométrie abondante, ETR peut varier pratiquement de 0 à ETP suivant les périodes. On peut donc s'attendre à observer des variations importantes du coefficient  $\alpha$ . Ces auteurs ont essayé de relier les variations de  $\alpha$  à une donnée climatique simple, traduisant assez bien l'aridité de la région : la différence entre les températures minimales de l'air et du point de rosée. Les résultats obtenus pour 3 stations à climats très différents (SEFA, BAMBEY et RICHARD-TOLL), ont permis de mettre en évidence les variations de  $\alpha$  avec l'aridité de la région;  $\alpha$  diminue lorsque l'aridité et l'évaporation sous abri augmentent. La détermination des valeurs de  $\alpha$  permet d'utiliser la formule dite du Piche corrigée pour des zones d'aridité très différentes (CORNET, 1974). Cependant, comme le souligne RIOU (1975), la formule dite du "Piche corrigé" souffre du même défaut que les formules empiriques basées sur un petit nombre de facteurs du climat. On peut évidemment perfectionner la formule et introduire des termes correctifs; mais dans ce cas l'analyse nécessaire à l'application de la formule est telle, qu'elle y perd son intérêt, qui est justement de donner des informations avec un minimum de données de base.

L'intérêt de l'évaporation Piche comme indice climatique peut être pris en considération, à condition d'utiliser des abris normalisés permettant la comparaison des données.

#### 1.2.1.2- Utilisation des bacs d'évaporation.

Dans les différents réseaux de mesures, trois types de bacs sont essentiellement utilisés : le bac Colorado américain enterré, le bac enterré modifié ORSTOM, carré, de 1 m de côté, et le bac dit de classe A, surélevé, à base cylindrique, de 1,21 mètre de diamètre.

Au Sénégal, des mesures d'évaporation bac ont été effectuées par l'IRAT depuis 1969 dans ses principales stations.

Ont été utilisés simultanément, les bacs "classe A" et les bacs enterrés de type ORSTOM : les résultats montrent des données cohérentes pour les deux types de bacs, comparables grâce à des relations statistiques (DANCETTE, 1976 ; RIOU, 1975). L'orientation actuelle, dans un souci de normalisation, semble se faire vers les bacs de "classe A" qui ont été également utilisés par RIJKS (1973) dans la vallée du fleuve Sénégal.

Cependant, les facilités de réalisation locale du bac carré enterré, type ORSTOM, ainsi que son faible coût nous ont conduit à choisir ce dernier. Utilisé en Afrique par la section hydrologique de l'ORSTOM, il existe des séries importantes de données permettant des comparaisons. Il a fait l'objet d'études approfondies en Afrique centrale (RIOU, 1975), dans une région allant de la zone sahélienne à la zone équatoriale. D'autre part, il est moins sensible que le bac "classe A" aux variations climatiques rapides, et, de ce fait, plus proche de l'évaporation d'une masse d'eau importante ou d'un couvert végétal étendu (RIOU, 1975).

Le bac d'eau libre est un appareil simple et peu coûteux; mais, en contre partie, ses données ne sont pas directement transposables pour le calcul de l'ETP. RIOU (1975) propose une relation dérivant de l'analyse de l'évaporation d'une surface d'eau libre de petites dimensions et permettant d'évaluer l'ETP à l'aide des données du bac et des données climatiques. A l'échelle d'une région le climat est repéré par des mesures effectuées au-dessus du sol au niveau de l'abri météorologique (généralement 2 m). Pour le bac, un autre climat doit être défini et il ne pourrait être repéré que par des mesures situées très près de la surface du bac, à une hauteur  $z$  qui dépend des dimensions de ce bac. L'évaporation du bac peut être analysée par les formules usuelles à condition d'y introduire les éléments du microclimat obtenu à la hauteur  $z$ .

Les éléments obtenus à 2 m n'étant pas influencés par l'introduction du bac, on peut les rattacher à ceux qui définissent le climat au niveau  $z$ . Il est alors possible d'exprimer l'évaporation d'un bac en fonction des données usuelles du climat et de paramètres dépendant de la surface du bac. La formule ainsi obtenue n'est guère utilisable, mais elle se simplifie dans le cas d'un petit bac pour lequel l'effet d'hétérogénéité est maximum. Le bac de  $1 \text{ m}^2$ , les résultats expérimentaux le montrent, a une évaporation voisine d'un tel bac.

Une méthode identique à celle de Penman conduit alors à une expression de l'évaporation valable pour le bac de  $1 \text{ m}^2$  :

$$E_{\text{bac}} = \frac{RN/L + 2 \gamma Ea}{\Delta + 2 \gamma}$$

où :  $RN$  = rayonnement net,  $L$  = chaleur latente de vaporisation,  $Ea$  = terme advectif, qui peut être calculé par la relation  $Ea = b.U.(ea-ed)$  où  $ea$  est la pression de vapeur saturante à la température de l'air  $\theta_a$ ,  $ed$  la pression de vapeur satu-

rante mesurée sous abri, U = la vitesse du vent à 2 m.  $\gamma$  est la constante psychrométrique et :

$$\Delta = \frac{de}{d\theta} = F'(\theta)$$

La consommation d'eau d'un couvert végétal bien irrigué est, en général, traduite correctement par la relation;

$$ETP = f \cdot \frac{RN/L + \gamma Ea}{\Delta + \gamma}$$

f étant le coefficient de réduction qui peut varier avec la saison et le type de couvert végétal. On en déduit une relation entre ETP et Ebac :

$$ETP = f \cdot \frac{\Delta + 2\gamma}{\Delta + \gamma} \left( Ebac - \frac{\gamma Ea}{\Delta + 2\gamma} \right)$$

on peut remarquer que le terme  $f \cdot \frac{\Delta + 2\gamma}{\Delta + \gamma}$  varie peu.

Dans la région étudiée par RIOU (Afrique centrale)  $\Delta$  varie pratiquement entre 1,2 et 1,9 et f reste proche de 0,8. Il est donc possible d'écrire :

$$ETP \approx Ebac - \frac{\gamma Ea}{\Delta + 2\gamma} \text{ au terme correctif près.}$$

Une étude ayant porté sur 7 années dans la zone sahélienne du Tchad montre que le meilleur ajustement a été fait avec le terme correctif 0,96 (RIOU, 1975).

$$ETP = 0,96 \left( Ebac - \frac{\gamma Ea}{\Delta + 2\gamma} \right)$$

avec ETP et Ebac en  $\text{mm.j}^{-1}$  et  $Ea = 0,24 U (ea - ed)$  (RIOU, 1975).  
U = vitesse du vent à 2 m en  $\text{m.s}^{-1}$ , ea et ed en mbar.

Le terme  $\frac{\gamma Ea}{\Delta + 2\gamma}$  peut également s'écrire  $Ea \left( \frac{1}{\frac{\Delta}{\gamma} + 2} \right)$

Or, pour les calculs, les valeurs de  $\lambda = 1 + \frac{\Delta}{\gamma}$  en fonction de  $(\theta)$  sont données par une table (BOUCHET, 1964)

La relation devient :

$$ETP = 0,96 \left( Ebac - \frac{0,24 U (ea - ed)}{\lambda + 1} \right)$$

Dans le cas où les données nécessaires à cette estimation font défaut, (cas d'une station météo trop incomplète) il est possible d'estimer l'ETP en multipliant les données du bac par un coefficient  $\alpha$ , variable suivant la saison et le climat  $ETP = \alpha Ebac$ .

Ce procédé empirique couramment utilisé donne des résultats assez satisfaisants. A partir des études réalisées en Afrique centrale RIOU donne, pour le climat sahélien, les valeurs suivantes de  $\alpha$ :

mois les plus frais	$\alpha = 0,67$
saison des pluies	$\alpha = 0,77$
saison chaude	$\alpha = 0,70 \text{ à } 0,75$

$\alpha$  variant en fait suivant l'aridité du climat, il nous a paru intéressant de relier ses variations calculées aux variations d'un indice d'aridité climatique. SCHOCH et DANCETTE (1968) utilisent comme indice d'aridité climatique, la différence entre la température minimum et la température du point de rosée. RIOU (1975) souligne l'intérêt du Piche comme indice climatique lorsque les mesures sont faites dans des conditions comparables. Il est à noter que ces deux indices traduisent l'état hydrique de la masse d'air et non l'aridité. C'est ainsi qu'en zone sahélienne il y a un décalage important entre l'arrivée du front intertropical qui amène de l'air humide et le début des pluies. La variation de la pression de vapeur d'eau influence le rayonnement net (RIOU, 1975 ; BALDY, 1978), mais non l'ETR, entièrement conditionnée, en cette saison, par les pluies. D'après les mesures effectuées à DAHRA et SANGALKAM, la figure 28 montre qu'il existe une corrélation entre les valeurs de :  $\alpha = \frac{ETP}{Ebac}$  et Epiche en  $\text{mm.j}^{-1}$  d'une part, et entre  $\alpha$  et  $\theta_m - \theta_r$  d'autre part.

Le calcul nous donne les équations de régression suivantes :

$$\alpha = - 0,015 E_p + 0,906$$

avec :	$r = 0,841$	$F_{\text{calc.}} = 212,46$
	$r_{0,01} = 0,267$	$F_{0,01} = 7,00$

$$\text{et } \alpha = - 0,018 (\theta_m - \theta_r) + 0,865$$

avec :	$r = 0,750$	$F_{\text{calc.}} = 111,63$
	$r_{0,01} = 0,267$	$F_{0,01} = 7,00$

Les deux régressions sont significatives au seuil de probabilité de 1 %, cependant la relation avec  $E_p$  a un coefficient de corrélation  $r$  plus élevé et une variance résiduelle moindre. Pour le calcul de ETP dans les stations incomplètes telles MBIDI, nous utiliserons la relation  $ETP = E_{bac} (0,906 - 0,015 E_p)$ .

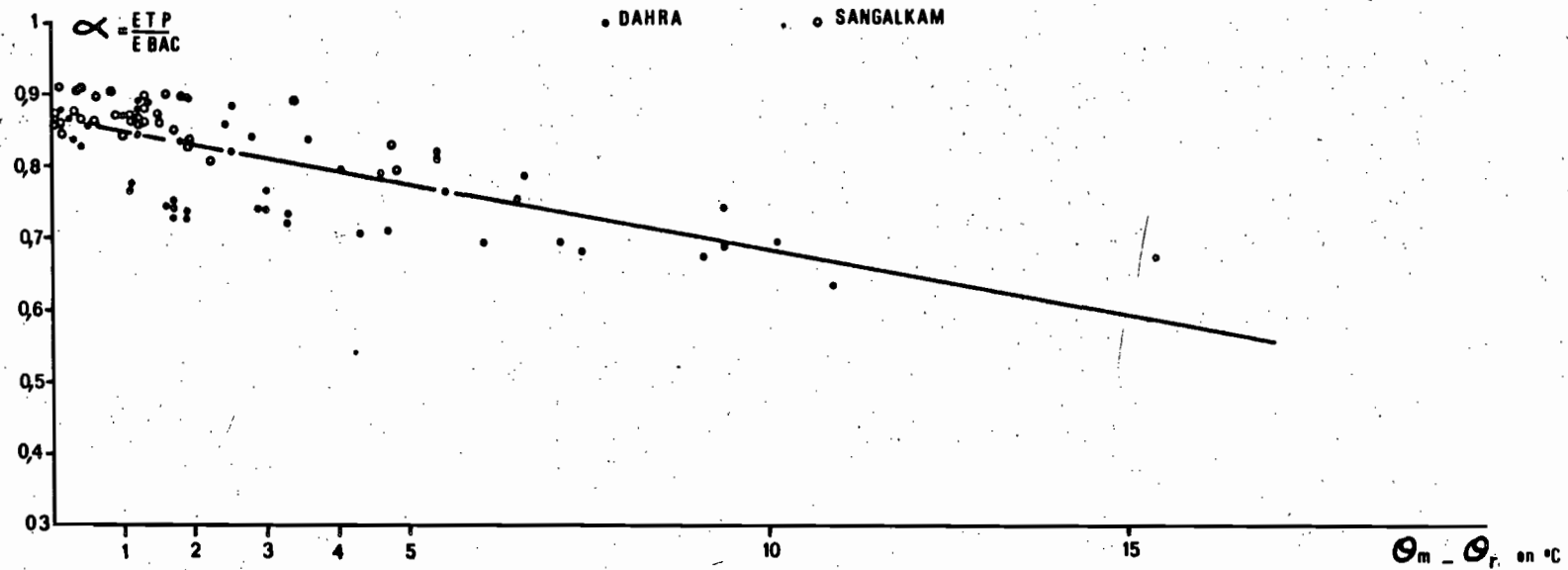
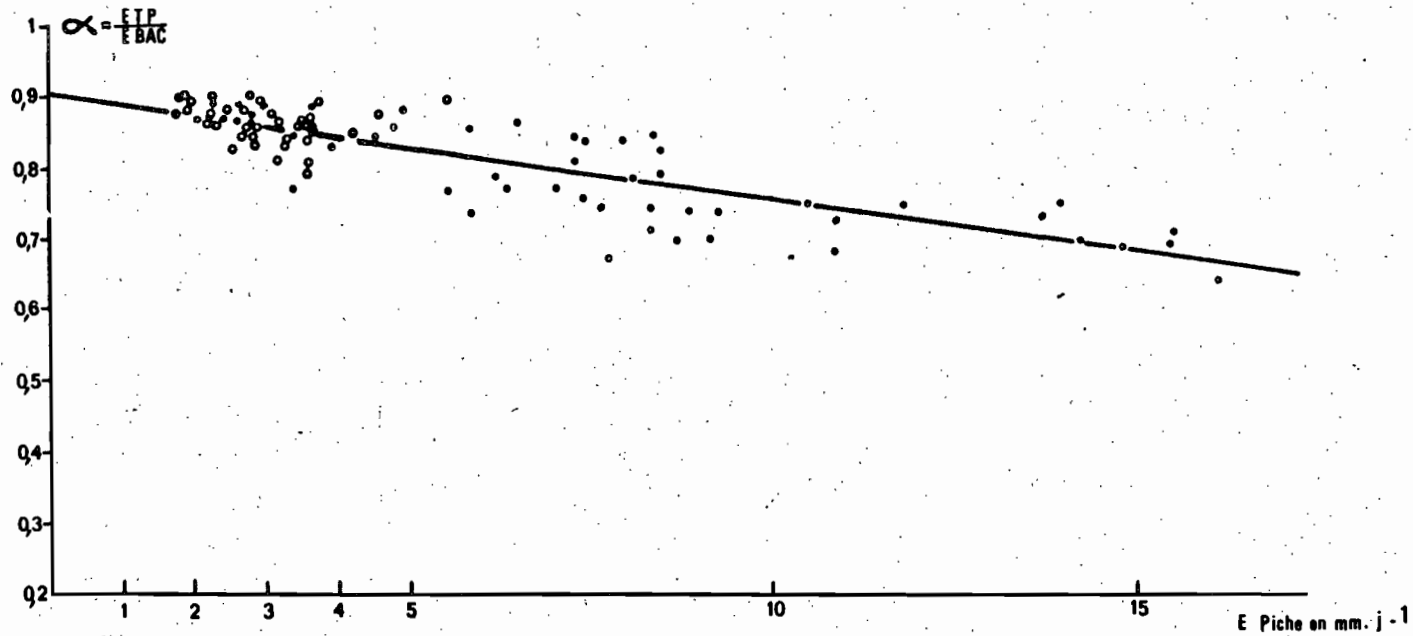


Fig. 28 Variation du rapport  $\alpha = \frac{ETP}{E \text{ BAC}}$  en fonction de E piche et de  $\theta_m - \theta_f$

En 1975 nous avons installé trois bacs d'évaporation dans trois stations réparties suivant le gradient climatique nord-sud, en zone sahélienne sénégalaise :

- à la station des Eaux et Forêts de MBIDI.
- au C.R.Z. de DAHRA,
- au ranch de DOLI.

Un quatrième bac a été installé à la station expérimentale de SANGALKAM dans une zone climatique différente. Ces bacs ont fonctionné régulièrement depuis juin 1975 à l'exception de l'installation de DOLI qui, en raison de l'absence sur place de personnel sérieux et compétent, a dû être abandonnée.

L'installation de ces bac a été effectuée suivant la recommandation de RIOU (1975) (p. 148), "L'implantation du bac doit être effectuée dans un site représentatif de la zone étudiée : par exemple en zone sèche, une parcelle de sol nu sur laquelle on peut laisser s'installer une courte végétation naturelle en saison de pluies". Une protection a été assurée contre les animaux risquant de venir boire l'eau du bac. Les mesures sont effectuées de façon volumétrique, avec installation d'une pointe fixe. En période pluvieuse, les quantités d'eau reçues par le bac sont évaluées par un pluviomètre au sol.

Pour DAHRA et SANGALKAM, l'ETP est calculée suivant la relation donnée par RIOU. Pour MBIDI, jusqu'en 1977 nous avons utilisé la relation donnant  $\alpha$  en fonction de Epiche, en raison du manque de mesures de vent.

#### 1.2.1.3- Utilisation de la formule de PENMAN.

La formule de PENMAN, basée sur l'analyse des phénomènes physiques d'évaporation, se présente sous une forme rationnelle. Elle combine deux facteurs, le rayonnement net RN et un terme advectif Ea, qui est l'évaporation fictive d'une nappe d'eau libre à la température de l'air  $\theta_a$ , sous la forme :

$$ET = \frac{\Delta RN/L + \gamma Ea}{\Delta + \gamma}$$

Le rapport de ces deux termes est très variable suivant les conditions d'aridité. Le fait que la formule de PENMAN les prenne en compte justifie son utilisation dans des milieux très différents.

Le rayonnement net est généralement calculé à partir de formules empiriques, dont il existe plusieurs types et dont les coefficients doivent être adaptés à la zone étudiée. Le terme Ea est obtenu, par la loi de DALTON, après établissement des coefficients empiriques.

La forme et les coefficients utilisés pour le calcul sont ceux employés par le service d'agroclimatologie ORSTOM pour le calcul de ETP Penman en Afrique sèche, qui a effectué les calculs.

$$RN/L = (1-a)(0,18 + 0,62 n/N) - \sigma T^4 (0,56 - 0,092 \sqrt{ed}) \\ (0,10 + 0,90 n/N)$$

et  $Ea = 0,35 (ea - ed) (1 + U/100)$

où a est l'albedo, a = 0,20  
n durée d'insolation en heures  
N durée du jour  
T température de l'air en °K  
ed tension de vapeur mesurée en mbar  
ea - ed déficit de saturation de l'air en mbar.  
U vitesse du vent à 2 m en m.s<sup>-1</sup>

Les valeurs d'ETP obtenues sont en mm.j<sup>-1</sup>.

## 1.2.2- Résultats.

### 1.2.2.1- Comparaison préliminaire des résultats des différentes méthodes.

A partir des mesures effectuées à DAHRA et à SANGALKAM (station proche de DAKAR) en 1975 et 1976, nous avons calculé les ETP suivant les trois méthodes décrites : Piche corrigé, bac corrigé et formule de PENMAN, en vue de comparer les trois méthodes. Les résultats concernant DAHRA sont donnés au tableau XXXVII. La comparaison avec des mesures directes d'ETP effectuées à l'aide d'évapotranspiromètres n'est pas possible, les rares mesures existantes (DANCETTE, 1976 ; RIJKS, 1974) concernent des stations assez éloignées et des périodes différentes.

La figure 29 montre la comparaison des moyennes décennales, suivant les trois méthodes d'obtention. Il est à noter des divergences importantes entre les résultats. Ces différences sont d'autant plus marquées que la période considérée présente une plus forte aridité. L'allure des courbes est similaire, avec présence de deux minimums, l'un en période fraîche (décembre et janvier), l'autre en période humide (août et septembre). Les résultats du Piche corrigé montrent les écarts les plus importants, par rapport aux deux autres méthodes. La comparaison entre le bac corrigé et la formule de PENMAN montre que, de façon systématique, ETPbac est supérieure à ETP Penman en saison sèche et inférieure en saison humide. En saison sèche l'écart est d'autant plus élevé que l'aridité est plus forte. Cela est lié aux parts respectives du rayonnement net et de l'advection dans la détermination de l'ETP. L'étude à SANGALKAM (CORNET, 1977) montre, pour cette station à climat sub-canarien, plus frais et plus humide, une très bonne concordance des valeurs ETPbac, ETP Penman, les écarts



Tableau XXXVII

COMPARAISON DES VALEURS D'EVAPORATION MESUREES ET CALCULEES A DAHRA.  
MOYENNES DECADEIRES en mm.j<sup>-1</sup>

DECADE			E mesurées		ETP calculées		
			E piche	E bac	E piche corrigé	E bac corrigé	E PENMAN
Septembre	75	D1	2,1	4,1	2,5	3,6	4,7
"	75	D2	2,6	4,4	2,8	4,0	5,1
"	75	D3	2,3	5,2	2,5	4,6	5,0
Octobre	75	D1	3,7	5,5	3,5	4,9	6,2
"	75	D2	3,0	5,1	2,8	4,5	4,8
"	75	D3	4,8	6,3	4,4	5,4	5,1
Novembre	75	D1	7,3	6,5	4,5	5,3	4,4
"	75	D2	7,4	5,8	4,0	4,4	4,1
"	75	D3	7,7	7,0	3,2	5,2	3,9
Décembre	75	D1	7,9	6,9	5,1	5,8	3,9
"	75	D2	8,4	6,6	5,8	5,5	3,9
"	75	D3	8,5	6,6	4,7	5,4	3,6
Janvier	76	D1	8,2	6,4	4,5	5,0	3,9
"	76	D2	8,1	6,4	3,9	5,0	3,6
"	76	D3	7,8	6,0	3,3	4,0	3,7
Février	76	D1	8,4	7,3	4,5	5,1	4,5
"	76	D2	9,3	7,4	5,0	5,2	4,7
"	76	D3	10,9	9,9	4,4	6,7	5,2
Mars	76	D1	10,9	9,6	7,2	6,9	5,8
"	76	D2	10,4	8,7	8,0	6,5	5,2
"	76	D3	15,5	13,2	9,9	9,1	6,8
Avril	76	D1	14,3	12,6	8,9	8,7	6,8
"	76	D2	14,8	13,2	8,4	9,0	7,1
"	76	D3	16,1	14,3	9,4	9,1	7,6
Mai	76	D1	14,0	13,0	10,6	9,6	6,9
"	76	D2	15,6	13,8	12,1	9,7	7,4
"	76	D3	13,8	12,8	12,7	9,3	7,3
Juin	76	D1	11,8	12,2	12,6	9,1	7,1
"	76	D2	8,9	10,7	9,1	7,9	6,9
"	76	D3	9,3	10,8	9,4	8,0	6,9
Juillet	76	D1	8,4	10,4	9,1	7,7	7,0
"	76	D2	6,4	8,2	7,6	6,3	6,0
"	76	D3	6,2	8,9	8,1	7,0	6,1
Août	76	D1	5,0	8,6	5,8	7,0	5,8
"	76	D2	4,6	6,8	6,6	5,8	5,2
"	76	D3	3,4	4,3	3,9	3,4	5,3
Septembre	76	D1	4,0	4,9	5,7	4,0	5,3
"	76	D2	2,9	4,2	4,3	3,7	5,0
"	76	D3	2,7	3,5	4,0	3,0	4,1
Octobre	76	D1	3,4	5,0	3,8	4,3	4,8
"	76	D2	5,9	7,2	11,5	6,2	5,3
"	76	D3	7,9	7,2	15,0	6,1	5,1
Novembre	76	D1	6,5	6,5	8,1	5,6	4,7
"	76	D2	10,7	7,5	9,7	6,2	4,3
"	76	D3	11,8	8,7	5,9	6,1	4,4
Décembre	76	D1	10,6	7,0	6,0	5,4	3,9
"	76	D2	7,7	5,5	5,1	4,2	3,1
"	76	D3	7,7	5,3	4,9	3,9	3,5

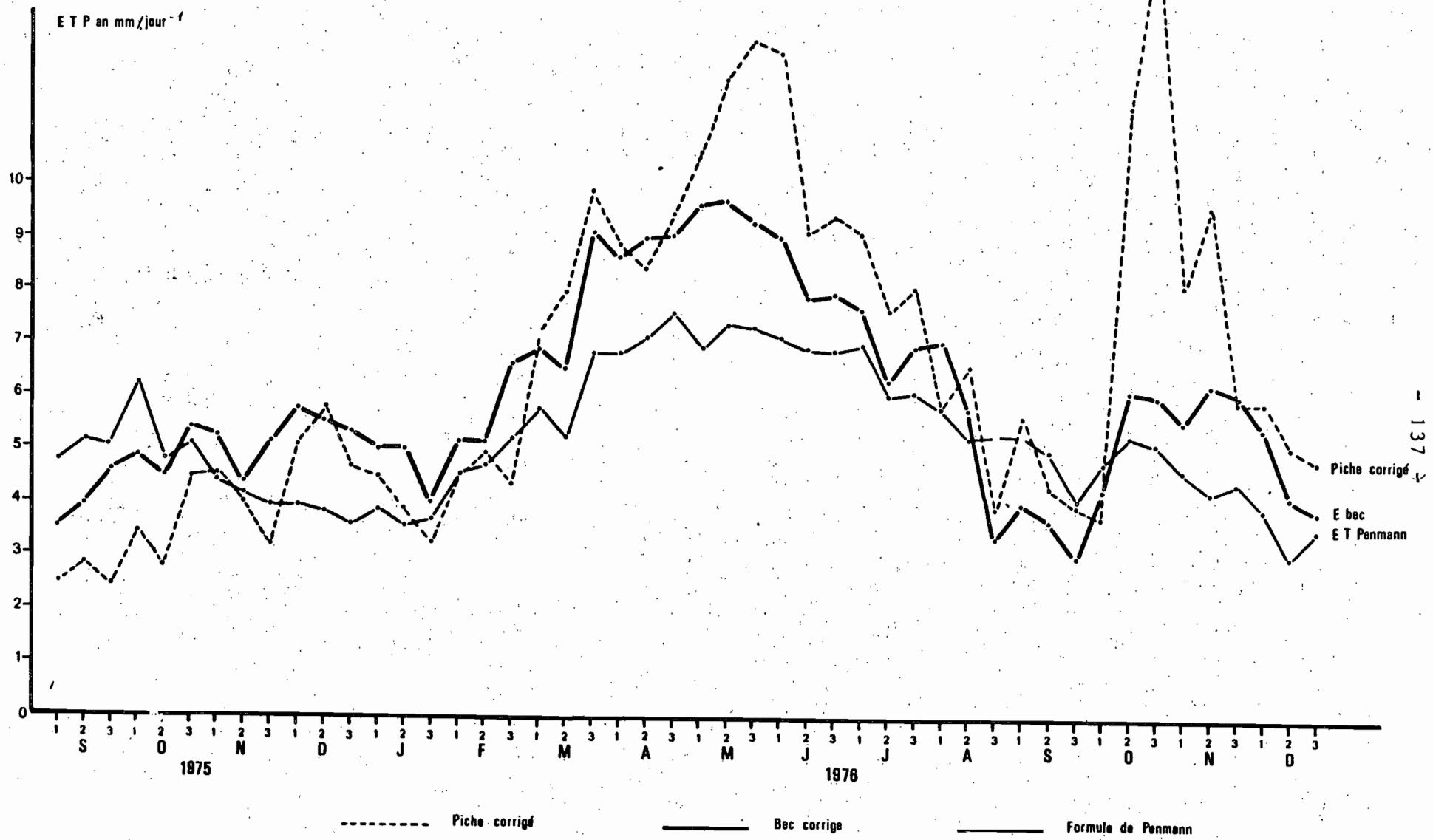


Fig. 29 Comparaison des valeurs décadaires d'ETP à DAHRA

étant constamment inférieurs à 10 %. Ce qui semble montrer que les écarts observés en zone sahélienne proviennent du fait que la méthode du bac est plus sensible aux variations d'aridité, et d'énergie advective, que la formule de PENMAN. SEGUIN (1975) aboutit à des conclusions semblables en climat méditerranéen, et montre que, pour le bac enterré, une pénétration partielle du rayonnement incident dans l'eau diminue l'énergie radiative au niveau de la surface; par contre, il présente une plus forte utilisation de l'énergie advective.

Pour 1976, on obtient à DAHRA, les valeurs annuelles suivantes :

Piche corrigé	2739 mm
Bac corrigé	2332 mm
Formule de PENMAN	1994 mm

Les moyennes d'ETP données par DANCETTE (1976) sont pour RICHARD-TOLL 2404 mm et pour BAMBEY 2011 mm. Les mesures faites par RIOU (1975) au Tchad donnent, pour la zone sahélienne: 2599 mm pour ABEICHE, 2146 mm pour BOL-MATAFO et 1876 mm pour FORT-LAMY. Il semble donc que les valeurs obtenues par la méthode du bac corrigé soient les plus proches de ces valeurs.

DANCETTE (1976), RIOU (1973), BALDY (1978) considèrent également que l'utilisation du bac corrigé pour la détermination des ETP est satisfaisante en zone sahélienne. Il est à noter que les services de recherche agronomique sénégalais (ISRA) préconisent l'utilisation de bacs pour la détermination des besoins en eau des cultures dans les stations expérimentales.

A DAHRA, la formule de PENMAN conduirait donc à une surestimation de l'ETP de 10 % en saison pluvieuse et à une sous estimation de 20 % en saison sèche. Ces résultats préliminaires nous conduisent à utiliser la méthode du bac corrigé pour déterminer dans nos stations d'étude l'ETP en vue de l'étude du bilan hydrique. La formule de PENMAN sera utilisée pour le calcul de l'ETP régional à partir des stations météorologiques de PODOR et LINGUERE, en affectant le résultat d'un coefficient établi à partir des comparaisons faites à DAHRA avec le bac. La comparaison des valeurs obtenues entre 1975 et 1978 par les deux méthodes montre que le rapport :

$$\frac{\text{ETP bac corrigé}}{\text{ETP PENMAN}}$$

est assez stable pour une même période d'une année à l'autre. Il est, en moyenne de 1,25 pour les mois secs de novembre à mai, de 1,1 pour juin et octobre avec une variabilité plus grande liée aux variations des dates de début et fin de saison des pluies. Il est de 0,98 pour juillet et de 0,90 pour août et septembre. L'utilisation de formule du Piche corrigé a été rejetée en raison des grandes fluctuations enregistrées.

1.2.2.2- Valeurs annuelles et mensuelles de l'ETP.

Le tableau XXXVIII montre les valeurs d'ETP pour diverses stations sénégalaises appartenant à notre zone d'étude ou voisines. Bien qu'obtenues de manières différentes : bac corrigé, formule de PENMAN, ETP gazon mesuré, et établies pour des périodes parfois non concordantes, elles donnent une idée cohérente des valeurs de la demande évaporative dans la zone.

Tableau XXXVIII

VALEURS ANNUELLES ET MENSUELLES D'ETP MESUREES en mm

STATIONS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total annuel
PODOR 16°38 N 1970-77 ETP Penman	169	163	207	214	243	241	233	208	187	190	153	147	2356
* RICHARD-TOLL 16°27 1969-71 ETP gazon	137	150	230	260	269	277	232	188	168	184	171	138	2404
GUEDE** 16°30 1976 Bac A corrigé	111	131	180	262	288	249	234	187	184	193	176	111	2305
MBIDI 16°08 1978 ETP Penman	190	131	195	227	242	207	204	208	157	154	118	110	2143
DAHRA 15°20 1975-78 ETP Penman	133	137	191	213	219	208	194	184	152	168	133	120	2052
DAHRA 15°20 1975-78 Bac corrigé	162	188	242	262	279	227	191	167	130	189	171	159	2367
LINGUERE 15°23 1970-77 ETP Penman	136	136	176	183	200	188	178	158	150	163	130	119	1917
*BAMBEY 14°40 1968-70 ETP gazon	143	151	211	216	205	189	167	143	141	155	147	143	2011
* d'après DANCETTE (1976)													
** d'après Rapport d'activité bioclimatologie ISRA, 1977													

Ces valeurs montrent que la demande évaporative, voisine de 2000 mm au sud de la zone, atteint 2400 mm au nord, suivant ainsi le gradient d'aridité nord-sud. Au cours de l'année, la courbe des ETP montre deux maximums, l'un en avril, mai, l'autre plus faible en octobre. Les valeurs les plus faibles sont mesurées durant la période fraîche, décembre, janvier.

Le tableau XXXIX montre les valeurs et les écarts par rapport à la moyenne des totaux annuels et mensuels. La variabilité des valeurs annuelles est faible dans une même station. On note seulement 2 valeurs sur 22 supérieures à 10 %, et 16 sont inférieures à 5 %. La variabilité mensuelle, donnée ici pour un mois aride, mai, et pour un mois humide, septembre, est assez importante. L'écart à la moyenne peut atteindre ou dépasser 30 % pour ETPBac. Les écarts importants sont cependant rares. Il est à noter que les valeurs de mai semblent plus stables que les valeurs de septembre, influencées certainement par les précipitations.

Tableau XXXIX

VARIABILITE INTERANNUELLE DES VALEURS D'EVAPOTRANSPIRATION.

	ETP annuelle mm	Ecart à la moyenne	ETP mai mm	Ecart à la moyenne	ETP septembre mm	Ecart à la moyenne
<b>PODOR</b>						
ETPPenman						
1970	2226	- 5,5 %	248	+ 2,1 %	183	- 2,1 %
1971	2051	- 12,9 %	215	- 11,5 %	172	- 8,0 %
1972	2323	- 1,4 %	226	- 7,0 %	203	+ 8,6 %
1973	2599	+ 10,3 %	252	+ 3,7 %	207	+ 10,7 %
1974	2406	+ 2,1 %	247	+ 1,6 %	187	0
1975	2299	- 2,4 %	240	- 1,2 %	173	- 7,5 %
1976	2357	0	254	+ 4,5 %	187	0
1977	2589	+ 9,9 %	264	+ 8,6 %	188	+ 0,5 %
<b>LINGUERE</b>						
ETPPenman						
1970	2002	+ 5,0 %	204	+ 3,0 %	165	+ 11,5 %
1971	1988	+ 4,4 %	213	+ 7,6 %	154	+ 4,0 %
1972	1976	+ 3,7 %	203	+ 2,5 %	163	+ 10,1 %
1973	1884	- 1,1 %	194	- 2,0 %	141	- 4,7 %
1974	1818	- 4,6 %	182	- 8,1 %	135	- 8,8 %
1975	1872	- 1,7 %	201	+ 1,5 %	145	- 2,0 %
1976	1814	- 4,8 %	190	- 4,0 %	140	- 5,4 %
1977	1882	- 1,2 %	199	+ 0,5 %	144	- 2,7 %
<b>DAHRA</b>						
ETPPenman						
1976	1996	- 2,7 %	223	+ 1,8 %	144	- 5,3 %
1977	2067	+ 0,7 %	206	- 5,9 %	153	+ 0,7 %
1978	2107	+ 2,7 %	227	+ 3,7 %	163	+ 7,2 %
<b>DAHRA</b>						
ETPBac						
1976	2333	- 1,4 %	295	+ 5,7 %	107	- 17,6 %
1977	2550	+ 7,7 %	299	+ 7,2 %	121	- 6,9 %
1978	2242	- 5,3 %	242	-13,3 %	170	- 30,8 %

### 1.2.2.3- Valeurs décadaires.

Les figures 30 et 31 montrent, respectivement, les variations des valeurs décadaires mesurées à DAHRA et MBIDI entre 1975 et 1978. Les valeurs exprimées en mm par jour, sont données à l'annexe VII.

Nous constatons, comme pour la période 1975-1976, les mêmes écarts entre les résultats du bac corrigé et de la formule de Penman. Pour cette dernière, on note une sous-estimation de 20 % en saison sèche et une sur-estimation de 10 % en saison humide. Pour MBIDI, nous n'avons pu effectuer les calculs des ETP Penman que pour 1978, faute au préalable d'équipement de la station. La variabilité interannuelle des valeurs décadaires est élevée. Elle atteint 34 % en septembre à Dahra et 32 % en mai pour la même station. Cette variabilité est vraisemblablement liée aux fluctuations de la part advective de l'évapotranspiration, car elle apparaît plus élevée dans le cas de mesures du bac. Les précipitations en saison humide interviennent sur les valeurs décadaires de l'ETP, mais cet effet n'est pas proportionnel, car au delà d'un certain seuil, l'importance des précipitations n'a pas d'action sur la demande évaporative.

On note, au cours de trois périodes : mars, avril, mai 1976, et 1978 à MBIDI, et novembre 1978 à DAHRA, des valeurs très élevées de l'ETP bac, supérieures à  $10 \text{ mm.j}^{-1}$ . Ces valeurs ne correspondent pas à des valeurs élevées de l'ETP Penman, mais par contre à des valeurs très élevées de l'évaporation Piche sous abri : 16 à 15  $\text{mm.j}^{-1}$ . Elles représentent des variations de 60 à 80 % par rapport aux valeurs des autres années pour les mêmes périodes. Des valeurs semblables ne sont citées ni par RIOU (1975) au Tchad, ni par DANCETTE (1976) au Sénégal; par contre, des maximums similaires ont été signalés par RIJKS (1974) à GUEDE. Ces mesures correspondent à des périodes d'*Harmattan*. Le vent de nord-est chaud et sec souffle alors durant la journée. Les températures diurnes sont élevées, de l'ordre de  $40^{\circ}\text{C}$ , l'humidité relative de l'air dans la journée est très basse, voisine de 5 %. Par contre, la nuit, les températures baissent,  $20^{\circ}\text{C}$  environ, et l'humidité relative monte à 60 %. Les moyennes journalières de température et d'humidité, calculées par  $\frac{\text{maximum} + \text{minium}}{2}$ , ne reflètent pas les conditions qui règnent durant la journée. Leur utilisation dans la formule de PENMAN explique probablement que celle-ci ne traduise pas les élévations importantes d'ETP. Ces périodes de grande aridité, à ETP élevée, constituent une caractéristique du climat dans la partie nord de notre zone. Des périodes similaires, mais de courte durée (2 à 3 jours) se produisent assez fréquemment en octobre, entraînant la mort de la végétation herbacée, alors en fin de cycle.

### 1.2.3- Discussion.

Malgré l'absence de mesures de référence et d'appareillage élaboré nous avons pu, grâce à l'utilisation du bac d'évaporation et

Fig. 30 Valeurs décadaires de l'évapotranspiration à DAHRA

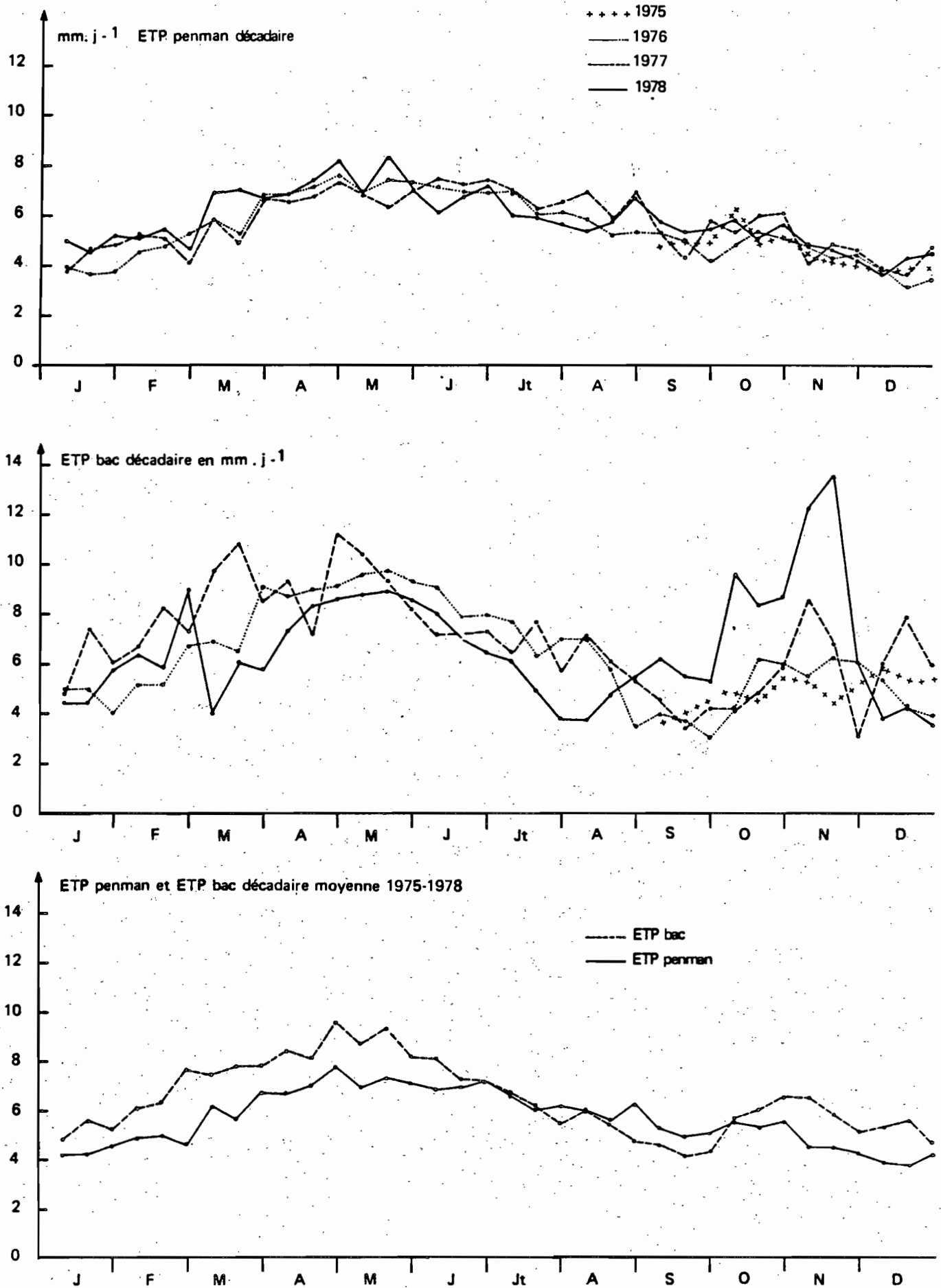
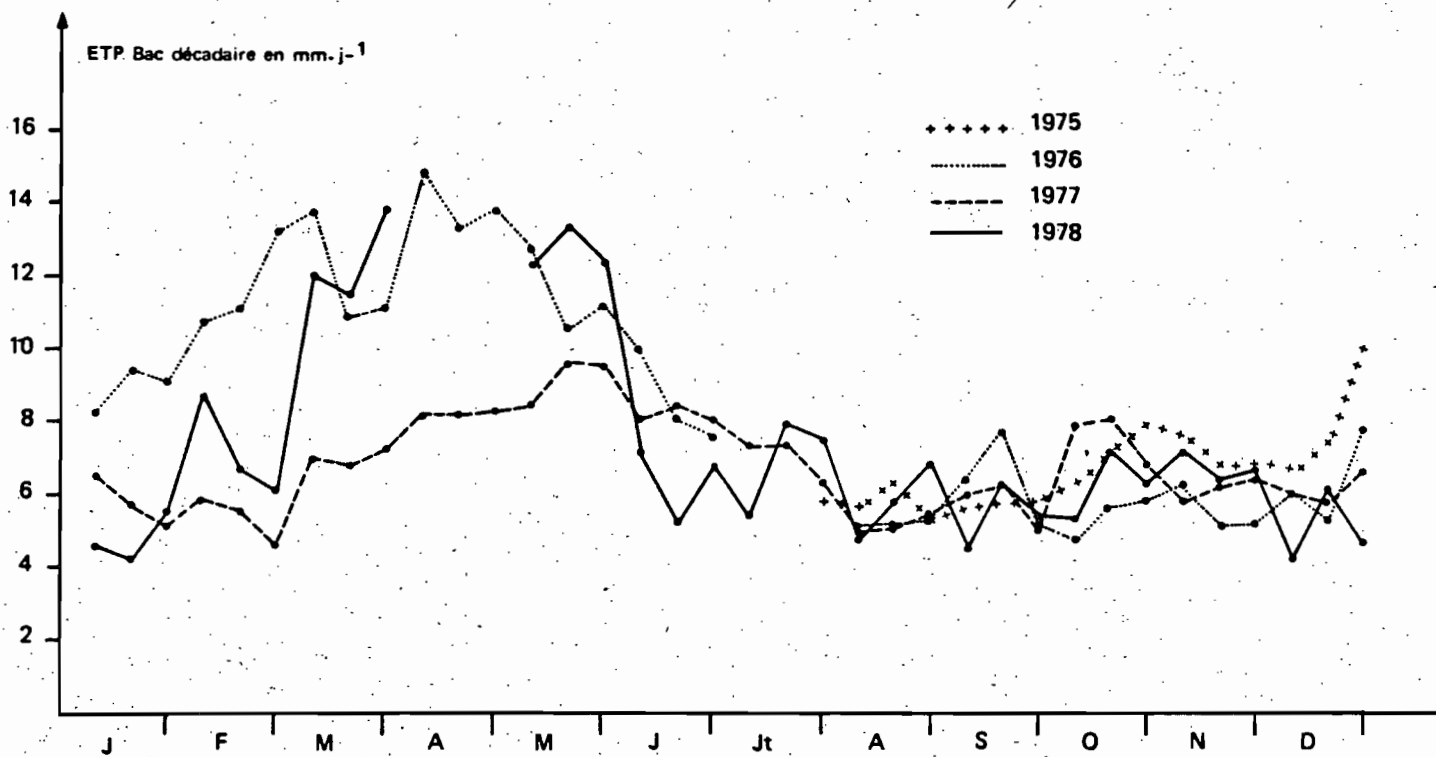


Fig. 31 Valeurs décadaires de l'évapotranspiration à MBIDI





de la formule de PENMAN, estimer l'ETP dans notre zone d'étude.

Bien que moins accentué que le gradient pluviométrique, il existe un gradient nord-sud de la demande évaporative. Celle-ci augmente avec l'aridité du climat. Plus la pluviosité diminue, plus les valeurs d'ETP sont élevées. Selon DANCETTE (1976, le rapport  $\frac{\text{Pluie}}{\text{ETP}}$  varierait de 0,08 pour RICHARD-TOLL à 0,27 pour BAMBEY.

Les variations saisonnières de l'ETP montrent que cette dernière suit assez fidèlement les variations du rayonnement global, comme le souligne RIOU (1975). En zone sahélienne, les minimums correspondent d'une part à la période fraîche (décembre, janvier), donc aux valeurs les plus faibles du rayonnement, d'autre part à la saison humide, qui s'accompagne d'une diminution du rayonnement global du fait des nuages, mais aussi d'une baisse des températures et d'une augmentation de l'humidité de l'air. Les deux maximums correspondent à avril et mai, d'une part, et à octobre d'autre part.

La variabilité interannuelle de l'ETP est assez faible, bien que non négligeable, comme le notent de nombreux auteurs : CO-CHEME et FRANQUIN (1967), RIOU (1975), ce qui donne une valeur représentative aux moyennes calculées.

Le tableau XXXX donne les valeurs décadaires pouvant être considérées comme moyennes d'une part pour le secteur nord : FETE-OLE, MBIDI, d'autre part, pour le secteur médian : DAHRA, LINGUERE.

La variabilité est très liée aux variations des conditions d'aridité et par conséquent à la part de l'énergie advective dans l'évapotranspiration. L'humidité relative de l'air est, dans la zone sahélienne, un des facteurs importants des variations de l'ETP comme le souligne BALDY (1978) pour la Haute-Volta. Ces variations en fin de saison sèche peuvent jouer un rôle important sur la phénologie des ligneux (débourrement, floraison). Durant certaines périodes, en raison de l'*Harmattan*, le déficit hydrique des masses d'air croît de façon très importante, et les valeurs de la demande évaporative sont alors exceptionnellement élevées. La méthode du bac corrigé traduit ces variations importantes de l'ETP et semble préférable pour la détermination du bilan hydrique.

Tableau XXXX

VALEURS DECADAIRES MOYENNES DE L'ETP en mm.j<sup>-1</sup>

MOIS	Janvier			Février			Mars			Avril		
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Secteur Nord	6,0	6,4	6,6	6,4	6,7	7,0	7,6	7,8	8,5	8,9	9,6	9,9
Secteur médian	4,8	5,6	5,3	6,1	6,4	7,7	7,5	7,8	7,8	8,4	8,1	9,6
MOIS	Mai			Juin			Juillet			Août		
Secteur Nord	9,1	9,9	9,5	8,1	7,2	7,5	6,3	6,6	6,5	5,1	5,6	5,7
Secteur médian	8,7	9,3	8,2	8,1	7,3	7,2	6,7	6,2	5,5	6,0	5,5	4,7
MOIS	Septembre			Octobre			Novembre			Décembre		
Secteur Nord	5,6	5,0	5,3	6,1	6,9	6,7	6,7	6,1	6,3	5,7	5,2	5,3
Secteur médian	4,6	4,1	4,3	5,7	6,0	6,5	6,5	5,8	5,1	5,3	5,6	4,7

### 1.3- Bilan hydrique climatique et notion de période humide.

L'occurrence d'une période humide ou de l'état de sécheresse résulte du bilan pour la période considérée, entre une demande climatique exprimée par l'évapotranspiration potentielle, et d'une certaine offre traduite par la pluviométrie. Plusieurs auteurs (THORNTHWAITE, 1948; ARLERY et al., 1954; ELDIN et DAUDET, 1967) ont introduit la notion de déficit hydrique climatique :  $D$ , tel que  $D = ETP - P$  pour une période considérée. Cette période sera dite sèche si  $D > 0$ , elle sera dite humide si  $D < 0$ . Le degré de sécheresse d'une période étant déterminé par la valeur de  $D$  sur l'ensemble de la période.

Le calcul du bilan hydrique climatique et du déficit hydrique climatique cumulé à partir des valeurs moyennes de  $P$  et  $ETP$  permet de comparer les climats des différentes stations (ELDIN, 1971; COCHEME et FRANQUIN, 1967). Cependant, si la variabilité interannuelle de l' $ETP$  est suffisamment faible pour que les valeurs moyennes soient représentatives, il en va autrement pour la pluviométrie. Ceci a conduit à étudier fréquemment le bilan hydrique climatique (LHOMME et MONTENY, 1979).

En zone sahélienne, en dehors de la période allant de juin à octobre, les pluies sont très faibles et ont une probabilité quasi nulle. Pour les mois secs le déficit hydrique climatique correspond sensiblement aux valeurs de l' $ETP$  et ne donne donc pas d'information supplémentaire. Nous avons calculé, pour 10 stations de la zone, le déficit hydrique climatique cumulé sur la période du 1er juin au 31 octobre, où la probabilité des précipitations n'est pas nulle.

Le tableau XXXXI donne les valeurs du déficit hydrique climatique pour les trois niveaux de probabilité au non dépassement : 0,75 , 0,50 et 0,25.

Ainsi, pour DAHRA, une année sur 4, le déficit hydrique cumulé entre juin et octobre sera supérieur à 744 mm, une année sur 2, il sera supérieur à 569 mm, et une année sur 4, il sera inférieur à 377 mm.

Le classement des stations, suivant les valeurs du déficit hydrique climatique, correspond au classement latitudinal. Cependant ces valeurs font apparaître trois groupes de stations : un groupe nord, PODOR, DAGANA, DIAGLE dont le déficit hydrique cumulé ( $P = 0,50$ ) est supérieur à 700 mm, un groupe intermédiaire : YANG-YANG, LINGUERE, DAHRA pour lequel le déficit cumulé est voisin de 570 mm, enfin, un groupe méridional : THIEL, GASSANE, BOULEL et KAFRINE dont le déficit cumulé est inférieur à 400 mm.

A partir des données décadaires d'ETP, et des probabilités décadaires de pluie fournies par l'analyse fréquentielle, on peut déterminer les probabilités pour que P soit supérieure ou égale à ETP ou à une fraction d'ETP. La figure 32 montre, pour PODOR et pour DAHRA, les probabilités pour chaque décade que P soit  $> 0,3$  ETP,  $> 0,5$  ETP et  $P \geq ETP$ . Les calculs ont été effectués grâce au programme ORPROB mis au point par la section d'Agroclimatologie ORSTOM.

Pour PODOR, les courbes présentent un seul maximum début septembre. On constate que la probabilité que P décadaire soit  $> \frac{1}{2}$  ETP est constamment inférieure à 0,50. Pour Dahra, les courbes présentent un minimum intermédiaire correspondant à la première décade d'août. Les stations voisines, LINGUERE, THIEL, YANG-YANG, GASSANE présentent le même ralentissement des pluies durant cette décade.

La figure 33 montre les probabilités d'avoir  $P \geq ETP$  en fonction de la date et de la latitude. On voit que la probabilité d'avoir  $P \geq ETP$  pour une décade donnée diminue du sud vers le nord, de même que la durée durant laquelle on a une probabilité donnée d'avoir  $P \geq ETP$ .

La figure 34 montre le calendrier de probabilité (PEGUY, 1977), pour la valeur P-ETP; traitée décade par décade, à DAHRA. Cette représentation permet, pour une station, de connaître l'évolution du déficit ( $P-ETP < 0$ ) ou de l'excédent hydrique ( $P-ETP > 0$ ), au cours du temps, pour un niveau de probabilité donné, ou de connaître les probabilités d'avoir une valeur donnée de P-ETP pour une décade déterminée. Ainsi, une année sur 10, l'excédent hydrique durant la 3e décade d'août, sera de 90 mm, et 4 années sur 10, toutes les décades présenteront un déficit hydrique.

La seule définition exacte, d'une période humide, est : toute période durant laquelle les précipitations sont égales ou supérieures à l'évapotranspiration. Toutefois, en zone sèche, la période durant laquelle  $P \geq ETP$ , est très courte, et ne correspond qu'à une petite partie de la saison de végétation. Il devient donc important de considérer la quantité minimum d'eau nécessaire à la poursuite de la croissance des végétaux. D'après les observations et mesures faites à DAHRA et FETE-OLE au cours de l'étude, il semble que la croissance de la strate herbacée soit stoppée ou très ralentie quand ETR est inférieur à  $\frac{ETP}{3}$ , ce qui correspond assez bien au chiffre de 20 mm décade citée par BILLE (1977a) pour FETE-OLE.

Pour Dahra, la saison humide, ayant une fréquence de 0,50 au moins, peut être caractérisée ainsi :

Début de saison des pluies efficaces :	5 juillet
20 mm < P décadaire < ETP	5 juillet au 15 août
P décadaire $\geq$ ETP	15 août au 10 septembre
20 mm < P décadaire < ETP	10 sept. au 5 octobre

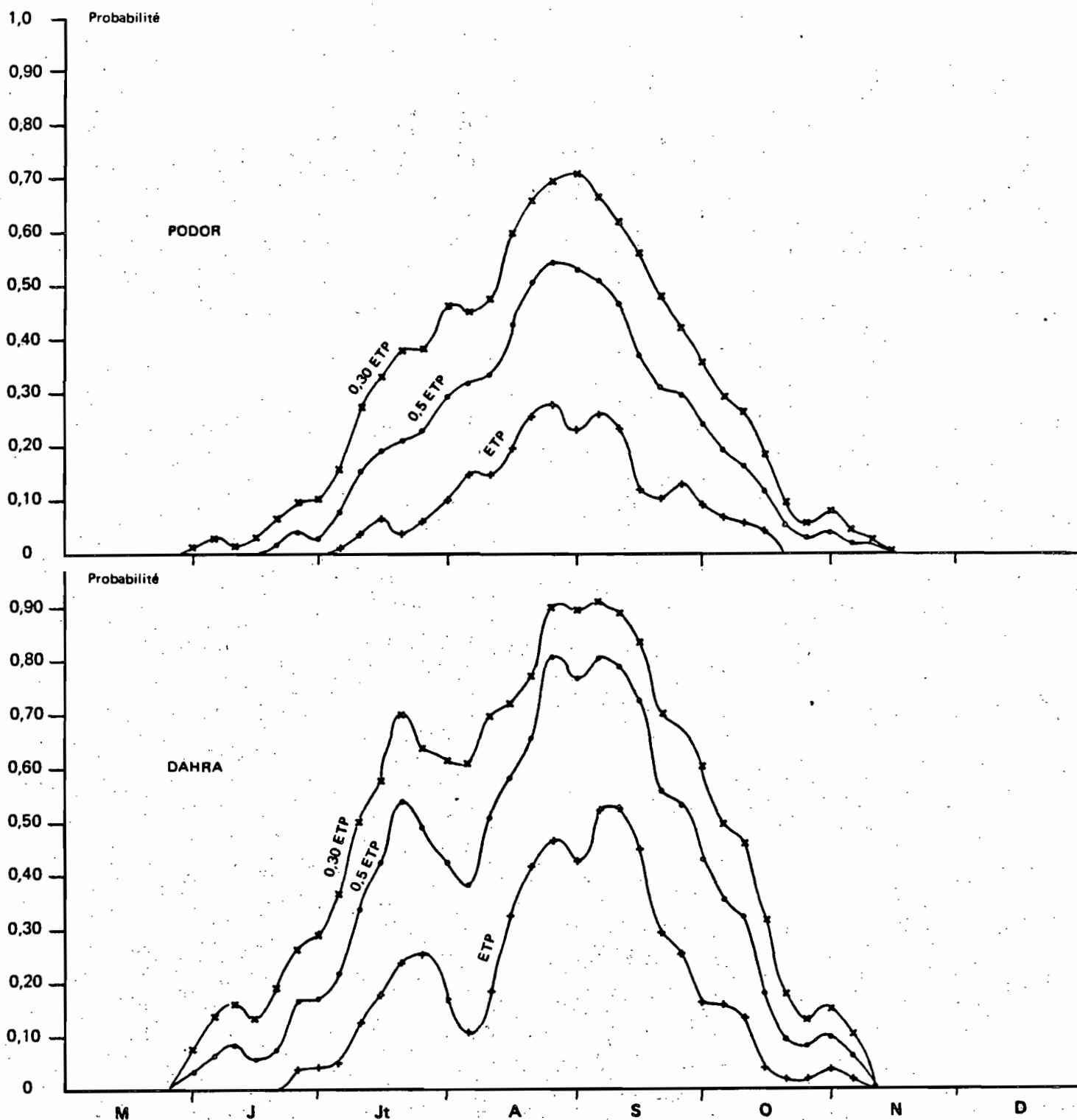


Fig. 32 Stations de PODOR et DAHRA Probabilités pour que :

$P$  décadaire  $\geq$  ETP  $\leftarrow$  —  
 "  $\geq$  0,5 ETP  $\leftarrow$  —  
 "  $\geq$  0,3 ETP  $\leftarrow$  —

(Calculs effectués à l'aide du programme ORPROB)

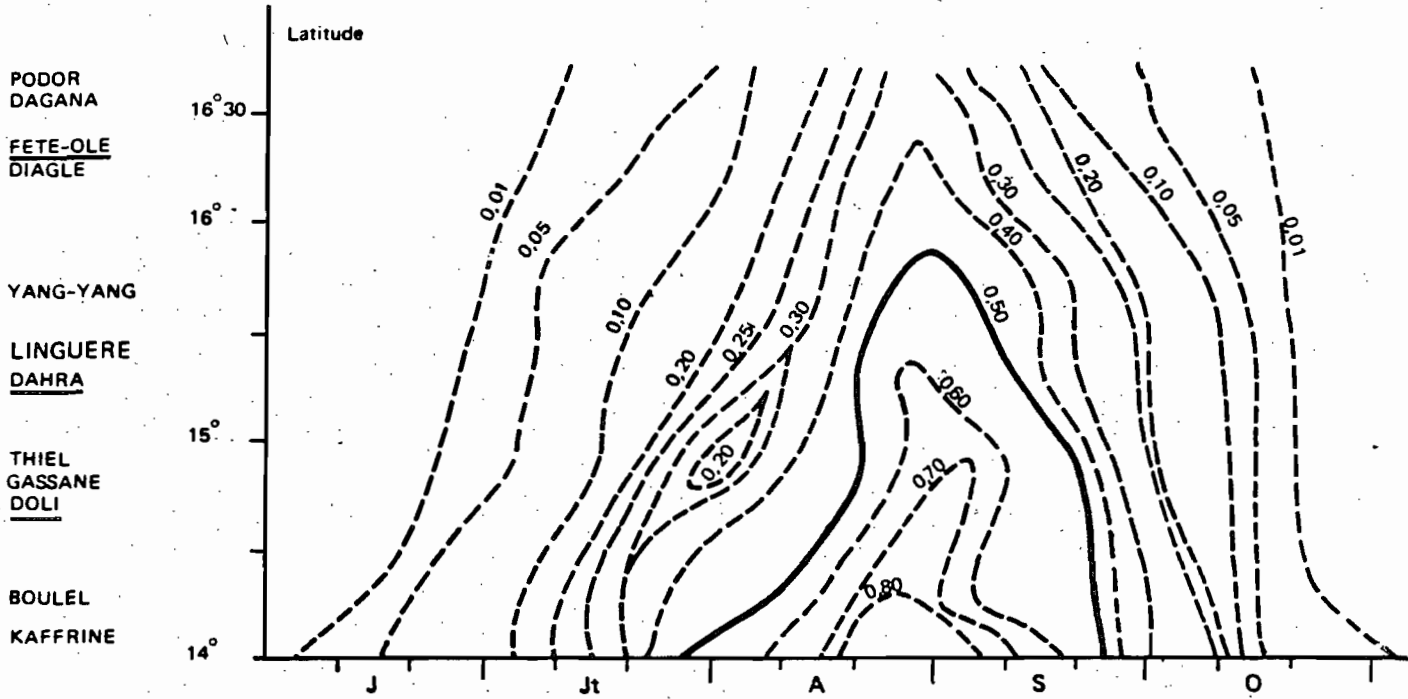


Fig. 33 Probabilités d'avoir  $P \geq ETP$  en fonction de la date et de la latitude.

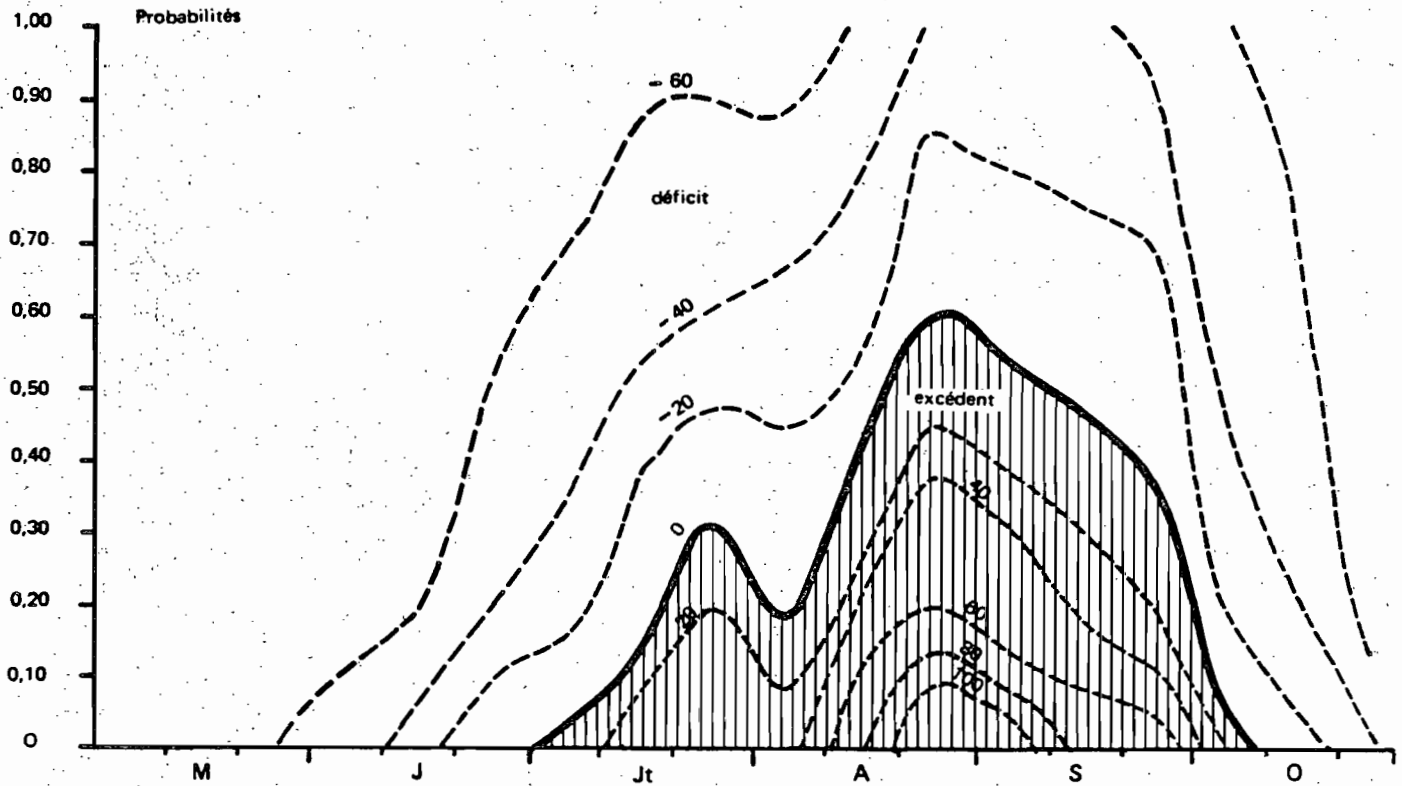


Fig. 34 Probabilités des valeurs décadaires de  $P - ETP$  à DAHRA

Tableau XXXXI

DEFICIT HYDRIQUE CLIMATIQUE CUMULE POUR LA PERIODE  
DU 1er JUIN au 31 OCTOBRE, en mm

STATIONS	Probabilités au non dépassement		
	0,75	0,50	0,25
PODOR	904	779	550
DAGANA	905	788	552
DIAGLE	887	730	507
YANG - YANG	766	570	366
LINGUERE	746	570	362
DAHRA -ville	744	569	377
THIEL	614	431	273
GASSANE	584	381	211
BOULEL	551	369	190
KAFFRINE	477	321	171

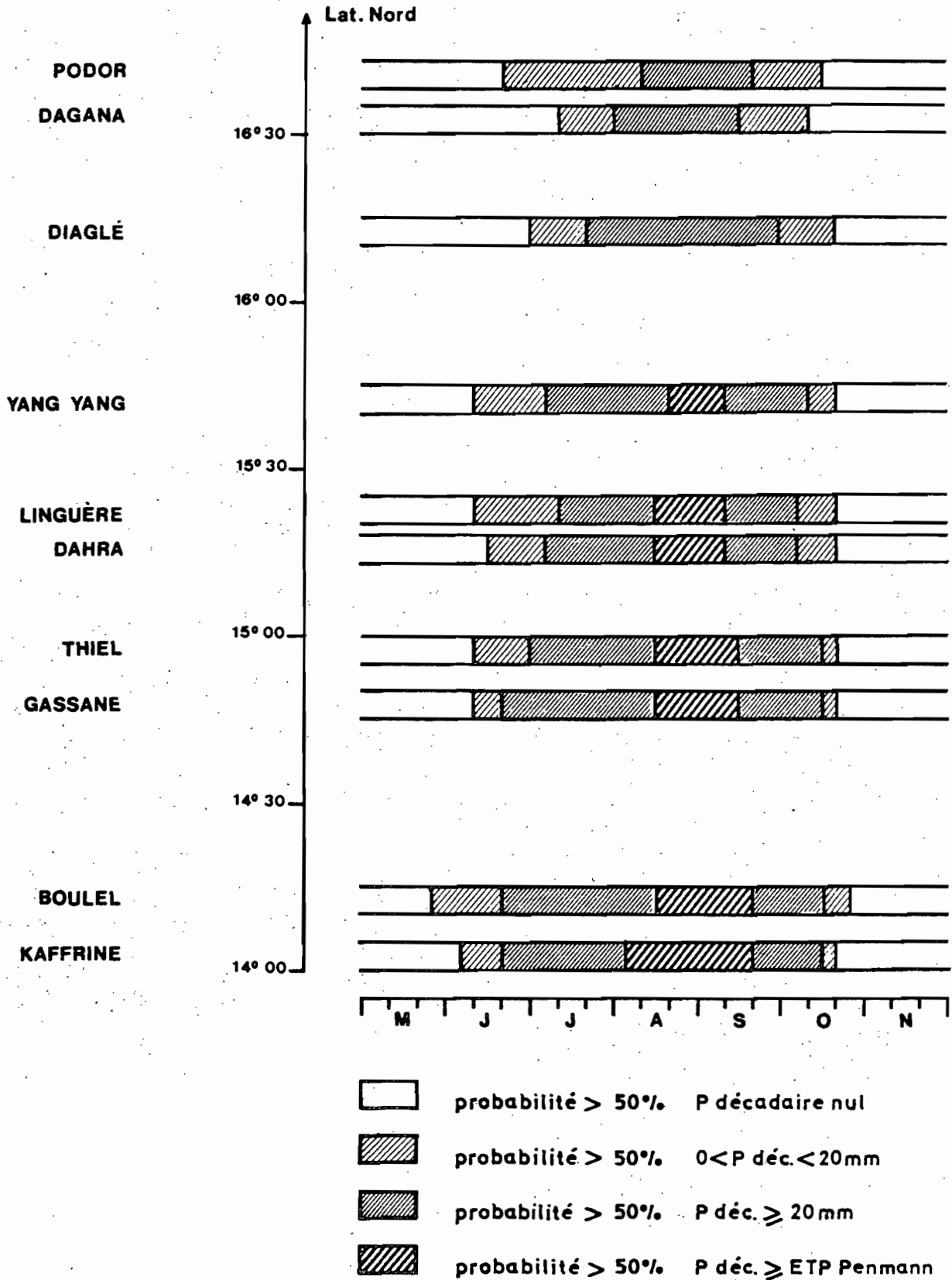
La figure 35 montre pour 10 stations, suivant le gradient latitudinal, comment se répartissent les périodes où les probabilités sont supérieures à 0,50 pour :

P décadaire = 0  
P décadaire > 20 mm  
P décadaire > ETP

On voit que pour les stations du nord de la zone, la probabilité d'avoir  $P \geq ETP$  est constamment inférieure à 0,50. Pour les autres stations, la période durant laquelle cette probabilité est  $> 0,50$ , varie de 45 jours à KAFFRINE à 20 à YANG-YANG. Cette variabilité dans la durée et la répartition de la période humide est un des éléments qui permettent d'expliquer la répartition de la végétation et la vocation agricole des différents secteurs.

L'étude du bilan hydrique climatique montre que la zone d'étude peut être divisée en trois secteurs agroclimatiques. Il convient d'exclure la vallée proprement dite du fleuve Sénégal, qui bénéficie d'un climat un peu différent (RIJKS 1974). Ces trois secteurs correspondent assez bien aux secteurs climatiques définis classiquement.

Fig. 35 Répartition de la période humide pour les différentes stations





Un secteur correspondant au Sahélo-Saharien, qui comprend les stations de PODOR, DAGANA, DIAGLE, FETE-OLE, MBIDI; pour ce secteur, les précipitations sont voisines de 300 mm, avec une forte variabilité (C.V. > 35 %). Le nombre de jours de pluie est faible: 20 à 25. Le début de la saison des pluies efficaces se situe une année sur deux après le 15 juillet, et la fin avant le 20 octobre. La probabilité de  $P \geq ETP$  est toujours inférieure à 0,50. Dans cette zone, la culture du mil précoce est aléatoire.

Un secteur correspondant au Sahélo-Sénégalais, qui comprend les stations de YANG-YANG, DAHRA, LINGUERE. Les précipitations sont de 400 à 500 mm. Le début de la saison des pluies efficaces se produit une année sur deux après le 5 juillet. Du 15 août au 10 septembre, la probabilité de  $P > ETP$  est supérieure à 0,50. Dans cette zone, se rencontre la culture de l'arachide, mais avec des rendements faibles et aléatoires; on cultive également le mil précoce.

Un secteur correspondant au Sahélo-Soudanien, qui comprend les stations de THIEL, GASSANE, SADIO, DOLI. Les précipitations sont comprises entre 500 et 650 mm, avec une variabilité plus faible (C.V. < 25 %). Le début de saison des pluies efficaces se produit une année sur deux avant le 1er juillet. Durant la période du 15 août au 15 septembre, la probabilité de  $P \geq ETP$  est supérieure à 0,50. Climatiquement, cette zone permet la culture de l'arachide et de variétés de mil à cycle plus long. Les stations de KAFFRINE et de BOULEL, qui bordent notre zone au sud, sont à rattacher au secteur soudanien plus humide.

## 2.- BILAN HYDRIQUE DU SOL.

Le sol joue un rôle essentiel dans la régulation des transferts hydriques dans le système "sol-plante-atmosphère" : les aspects principaux en sont le stockage, la circulation, la redistribution de l'eau. Le bilan hydrique des sols est un élément important du fonctionnement des phytocénoses, notamment en zone aride, où l'eau est un facteur limitant de la production végétale. Au niveau même de la caractérisation et de l'inventaire, la connaissance du régime hydrique\* du sol représente une approche globale, importante, de son rôle dans l'écosystème et souvent différente de l'approche pédologique classique.

La texture et la structure du sol déterminent un certain nombre de caractéristiques, qui conditionnent la circulation et le stockage de l'eau dans le sol. La connaissance de ces caractéristiques hydrodynamiques permet d'interpréter les variations d'humidité observées en terme de bilan et de régime hydrique. L'eau n'a pas un comportement de fluide statique dans le sol. Elle participe aux phénomènes d'humectation, de ressuyage, d'absorption racinaire, d'évaporation ... L'eau du sol ne peut pas être considérée comme immobile, si ce n'est pour des échelles de temps et d'espace très réduites. Sa compartimentation, suivant la nature des espaces qu'elle occupe, ne doit être envisagée qu'en fonction des contraintes que cette répartition impose à sa mobilité.

Le présent chapitre comporte l'étude des caractéristiques hydrodynamiques des sols, l'observation des profils hydriques, le suivi de l'évolution des réserves. On en déduit le bilan hydrique des sols et la caractérisation de leur régime hydrique.

Ces différentes études ont été menées dans chaque parcelle, suivant des toposéquences choisies de façon aussi représentative que possible (voir en annexe V). La parcelle de DAHRA-sud ne présentant pas de relief marqué, seuls les replats ont constitué un élément homogène étudié. Dans la parcelle de DOLI-sud, la présence d'horizons gravillonnaires compacts subaffleurants a empêché l'étude du bilan hydrique du sol. Sur les toposéquences, divers sites de mesure correspondant aux éléments du relief ont été retenus : dune, haute de pente, pente, bas de pente, replat, bas-fond. Par la suite, seuls les sites caractéristiques pour chaque parcelle ont été conservés.

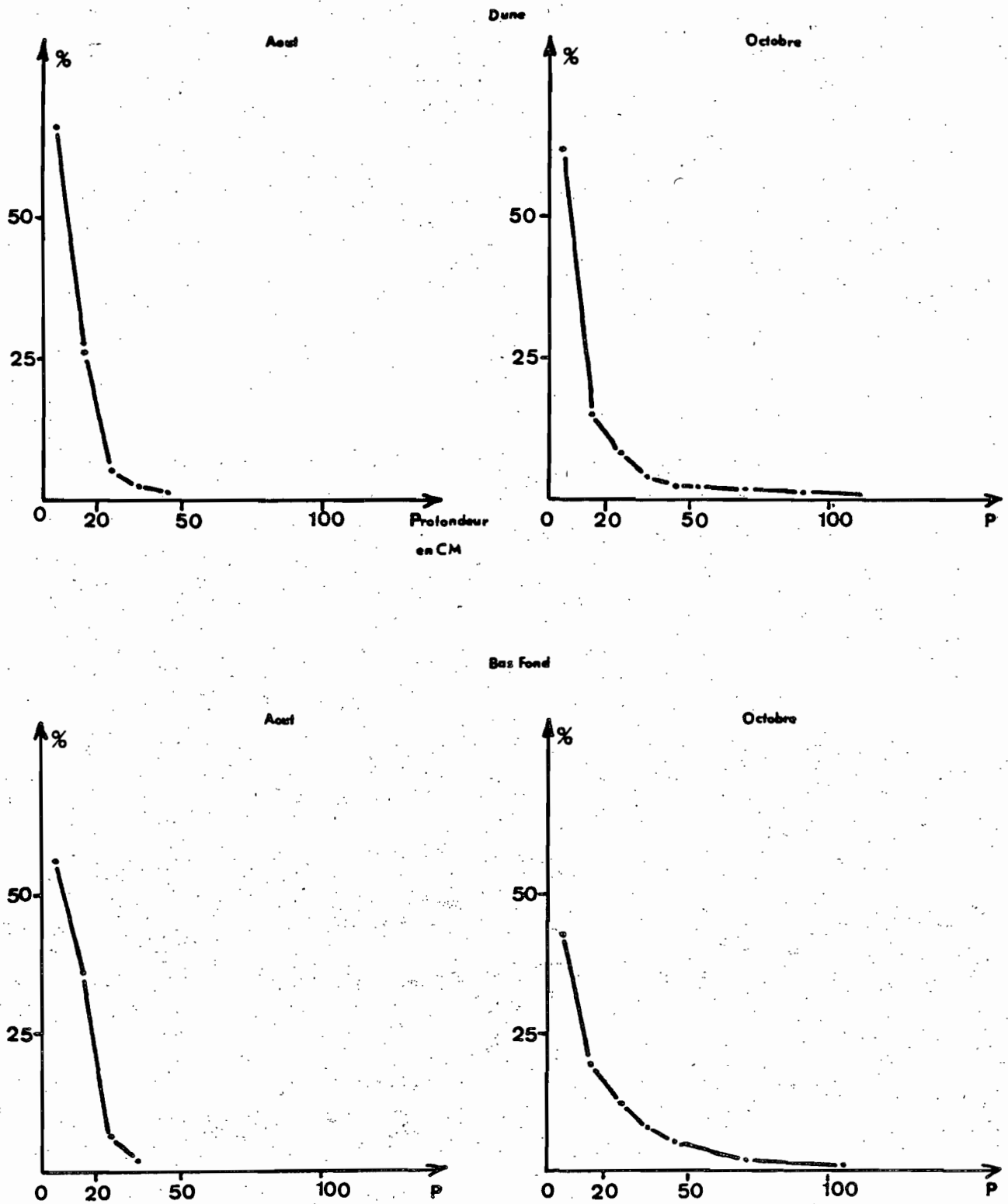
Les études de BILLE (1977a) à FETE-OLE et à DAHRA, sur le système racinaire de la strate herbacée montrent (Fig. 36) que l'extension en profondeur du système racinaire est assez faible et ne dépasse que très rarement 1 m. Les travaux récents de GROUZIS (1979) et de LEGRAND (1979) en Haute-Volta, portant sur l'enracinement de différents groupements herbacés sahéliens, confirment ce fait. Il est à rappeler que le peuplement herbacé étant constitué d'annuelles, le système racinaire progresse en profondeur au fur et à mesure de la croissance des plantes.

Les travaux de POUPON (1980) sur le système racinaire des arbres et arbustes montrent une faible extension de celui-ci. Parmi tous les arbres étudiés à FETE-OLE, aucun ne possède de système racinaire important descendant au-dessous de 3 m. Par contre, ces ligneux présentent, à faible profondeur (30 cm), une très importante extension racinaire latérale.

---

\* Le régime hydrique d'un sol peut être défini comme l'ensemble des caractères de la variation annuelle de l'humidité du sol (AUDRY et al., 1972).

Fig. 36 Répartition des racines en pourcentage de la masse totale hypogée FÉTÉ OLÉ (d'après J.C. Bille 1975)



Par ailleurs, à FETE-OLE et à DAHRA, la profondeur de 3 m n'est jamais, ou exceptionnellement, atteinte par le front d'humectation et constitue une zone sèche en permanence, ce qui permet de simplifier le calcul du bilan hydrique des couches sus-jacentes.

En l'absence de zonation pédologique marquée, les caractéristiques hydrodynamiques des sols et les teneurs en eau ont été étudiées suivant neuf niveaux de prélèvement : 0-10, 10-30, 30-50, 50-70, 70-100, 100-150, 150-200, 200-250, 250-300 cm. Du point de vue comportement hydrique, le sol est considéré comme constitué de trois couches successives :

- Une couche superficielle (0-30 cm) où se situe la majorité des racines, dont 85 % des racines d'herbacées. Cette couche est très rapidement colonisée par les racines en début de végétation ; son dessèchement est rapide entre les épisodes pluvieux.

- Une couche (30-100 cm) qui constitue une zone de réserve, exploitée par les herbacées et les ligneux.

- Une couche (100-300 cm), participant aux variations de stock, mais comprenant une zone inférieure sèche en permanence. Cette couche est peu exploitée par les racines, qui sont d'ailleurs exclusivement des racines de ligneux.

## 2.1.- Caractéristiques hydrodynamiques des sols.

Un des caractères physiques essentiels du sol est d'être un milieu poreux, présentant des vides dans l'assemblage de ses constituants. Les nombreux vides, de dimension variable, sont occupés concurrentiellement par l'air et par l'eau. Ils correspondent aux voies de circulation et de stockage possible des fluides. La mobilité de l'eau dans un sol dépend de la taille et de la nature des vides qu'elle occupe. On distingue les mouvements rapides, empruntant tout ou partie de la macroporosité, et les mouvements lents liés à la microporosité.

### 2.1.1. Densité apparente et porosité.

Un volume quelconque de sol est constitué par des particules solides et des vides. Si on désigne par  $V_t$  le volume total de sol, par  $M$  la masse des particules solides, et par  $V_s$  le volume occupé par ces particules, la densité des particules solides ou densité réelle du sol est  $d_r = M/V_s$ . La densité apparente sèche est le rapport de la masse de terre sèche au volume apparent de l'échantillon :  $d_a = M/V_t$ . La porosité totale peut se définir (AUDRY et al., 1973) "comme la fraction de l'unité de volume du sol en place qui n'est pas occupée par la matière solide". Si  $P_t$  est la porosité totale, on a  $P_t = V_t - V_s / V_t = 1 - d_a / d_r$ . Elle est le plus souvent exprimée en %,  $P_t = 100 (1 - d_a / d_r)$ .

La mesure de la densité réelle repose sur la détermination du volume exact de la phase solide d'un échantillon de poids connu. Elle est réalisée à l'aide d'un pycnomètre. Les mesures faites par le Laboratoire commun d'analyse ORSTOM de DAKAR montrent que, pour les différents sols étudiés ici, les valeurs de la densité réelle ne sont pas significativement différentes de 2,7.

La mesure de la densité apparente, excepté pour la parcelle de DOLI-sud, a été effectuée par la méthode du cylindre. Les prélèvements sont faits horizontalement, à partir d'une fosse, à l'aide d'une sonde à prélèvements comportant deux cylindres successifs de  $68 \text{ cm}^3$ . En raison du manque total de cohésion du sol sec, les prélèvements ont dû être réalisés en fin de période humide. Or, il est à noter que la densité apparente n'est pas une grandeur indépendante de l'humidité du sol au moment du prélèvement. En effet, les sols peuvent présenter un phénomène de gonflement. Cependant, la très faible teneur en argile des sols étudiés permet, excepté pour les sols hydromorphes limités aux mares temporaires de FETE-OLE, de négliger l'effet du gonflement.

Les mesures ont été effectuées avec 10 répétitions jusqu'à 1 m et avec 3 répétitions au-delà. Le tableau XXXXII donne la variabilité des mesures, et l'erreur relative pour deux sols de DAHRA.

TABLEAU XXXXII - VARIABILITE DES MESURES DE DENSITE APPARENTE POUR DEUX SOLS DE DAHRA, AVEC 10 REPETITIONS, SUR 100 CM.

couche	moy.	Ecart-type	Intervalle de confiance p = 0,05			Extrêmes observées	
			min.	max.	erreur relative %	min.	max.
<b>DAHRA-NORD</b>							
<b>DUNE</b>							
0-10	1,63	0,048	1,60	1,66	2,10	1,54	1,69
10-30	1,63	0,017	1,62	1,64	0,75	1,60	1,66
30-50	1,63	0,017	1,62	1,64	0,75	1,59	1,65
50-70	1,63	0,018	1,62	1,64	0,80	1,60	1,65
70-100	1,58	0,015	1,57	1,59	0,70	1,55	1,60
<b>DAHRA-SUD</b>							
<b>REPLATS</b>							
0-10	1,55	0,040	1,52	1,58	1,85	1,50	1,63
10-30	1,61	0,022	1,59	1,63	0,98	1,57	1,64
30-50	1,63	0,019	1,62	1,64	0,83	1,60	1,65
50-70	1,57	0,026	1,55	1,59	1,18	1,54	1,61
70-100	1,60	0,014	1,59	1,61	0,62	1,58	1,63

Cette variabilité est très faible, sauf en surface. L'erreur relative avoisine 1 % pour  $p = 0,05$ . Cela est dû à la grande homogénéité des sols. Pour la couche de surface, en raison de la dimension réduite des cylindres, la densité apparente mesurée n'inclut pas la macroporosité importante, due à l'activité de la faune du sol.

Les valeurs de densité apparente et de porosité totale calculée, sont données en annexe VIII. La valeur moyenne de la porosité totale, pour l'ensemble des sols, varie peu autour de 40 %, valeur assez élevée. A FETE-OLE et à DOLI-nord, en bas de pente, l'accroissement du taux d'argile s'accompagne d'une baisse sensible de la porosité. Pour les sols hydromorphes de mares temporaires, la porosité est faible, inférieure à 30 %. Cette porosité ne tient, en outre, pas compte des fentes de retrait existantes.

### 2.1.2. Potentiel et dynamique de l'eau dans le sol.

Le potentiel total de l'eau du sol est la résultante du potentiel gravitaire, du potentiel matriciel et du potentiel osmotique. Dans un sol proche de la saturation le potentiel gravitaire est dominant et provoque la percolation de l'eau. En deçà de la capacité de rétention, le potentiel matriciel, qui caractérise les effets capillaires et les phénomènes de liaison entre l'eau et la phase solide, devient prépondérant. Puisque l'eau est alors sous tension dans le sol, ce potentiel est une grandeur négative exprimée par unité de volume en terme de pression équivalente. Le niveau d'énergie de rétention dans le sol est fréquemment exprimé par le logarithme décimal de cette pression en cm d'eau, désigné par le symbole pF. Le potentiel matriciel  $\Psi$  varie en fonction de la teneur en eau du sol (Hv). On sait que, pour un sol, la relation  $\Psi$  (Hv) n'est pas univoque, mais dépend du sens d'évolution des teneurs en eau (HALLAIRE et BALDY, 1964). D'un sol à l'autre, les valeurs du potentiel matriciel pour une humidité déterminée varient en fonction de la texture et de la structure de ces sols.

Toute particule d'eau du sol peut être caractérisée par son énergie potentielle par unité de poids, ou charge hydraulique H telle que  $H = h - z$ , où z est la distance à la surface du sol et h la traduction du potentiel matriciel en terme de charge. Cette notion est très importante, car toute différence d'énergie potentielle entre deux points entraîne un écoulement, du point de plus forte énergie au point de plus faible énergie. L'écoulement, sous l'effet des différences de charge, peut être exprimé par la loi de DARCY généralisée (VACHAUD et al., 1978) :

$$Q = - K (Hv) \cdot \Delta H / \Delta z$$

$\Delta H / \Delta z$  = gradient de charge

$K(Hv)$  = conductivité hydraulique qui dépend très fortement de la teneur en eau du sol.

Q = Flux volumique.

Le point de flétrissement permanent est une caractéristique hydrique du sol, qui définit classiquement la limite inférieure de l'eau utile. Cependant, sa définition fait intervenir, non seulement le sol, mais aussi la plante. Le point de flétrissement permanent est déterminé, soit par la méthode de test biologique de référence, qui est assez délicate, soit, le plus souvent, dans la pratique, par la détermination de l'humidité à pF = 4,2.

Les divers échantillons prélevés (234 échantillons) ont été étudiés au laboratoire commun d'analyse pour détermination de la texture, et de l'humidité à différentes valeurs de pF. Celles-ci ont été effectuées par passage à la presse à membrane, ou à la presse à plaque de porcelaine poreuse. Sur ces échantillons, ont été déterminées les teneurs en eau, sous pression de 16 kg (pF = 4,2), de 1 kg (pF = 3,0), de 0,320 kg (pF = 2,5), de 0,08 kg (pF = 1,9) et parfois de 0,160 kg (pF = 2,2). Nous avons ainsi obtenu, pour chaque échantillon, 4 ou 5 points de la courbe de pF (humidité volumique). Le tableau XXXXIII montre les valeurs moyennes obtenues pour les différentes couches considérées. La figure 37 montre l'allure des relations pF humidité pour la couche 30-100 cm, en dune ou replat, pour les 4 stations.

Divers auteurs (COMBEAU, 1961 ; COMBEAU et QUANTIN, 1963 ; CHARREAU, 1963 ; DANCETTE, 1973) ont montré qu'il existe des relations linéaires étroites entre le taux d'humidité à un pF donné et la texture du sol.

TABLEAU XXXXIII - RELATIONS ENTRE pF ET HUMIDITE VOLUMIQUE DES SOLS.

Valeurs de pF	F E T E - O L E								D A H R A - N O R D							
	DUNE				BAS DE PENTE				DUNE				BAS FOND			
	0-10	10-30	30-100	100-300	0-10	10-30	30-100	100-300	0-10	10-30	30-100	100-300	0-10	10-30	30-100	100-300
1,9	19,8	23,3	23,8	24,3	21,7	24,0	27,0	29,9	22,8	22,5	22,2	22,9	23,2	16,8	16,9	16,9
2,2									6,8	6,8	8,1	7,1				
2,5	5,1	7,1	8,4	9,4	7,2	8,9	13,0	15,1	3,6	3,7	4,5	4,7	4,6	4,3	5,2	5,0
3,0	3,2	4,8	6,0	6,2	4,8	6,8	9,5	14,5	2,8	2,1	2,1	2,9	3,2	2,4	2,6	2,6
4,2	1,7	3,2	4,1	4,7	2,4	3,3	5,4	7,9	2,1	1,6	1,8	2,0	2,1	1,6	1,8	1,4

- 159 -

Valeur de pF	D A H R A - S U D				D O L I - N O R D							
	REPLATS				DUNE				BAS FOND			
	0-10	10-30	30-100	100-300	0-10	10-30	30-100	100-300	0-10	10-30	30-100	100-300
1,9	21,2	23,1	24,0	25,6	17,4	17,0	16,3	16,4	18,6	19,2	21,3	26,7
1,2	11,0	11,6	17,6	19,6								
2,5	5,1	6,4	9,2	14,0	5,7	6,7	7,7	7,6	9,8	12,5	14,6	19,5
3,0	3,4	5,0	6,8	6,4	3,5	4,3	4,8	5,2	7,6	9,0	9,1	14,6
4,2	1,9	3,2	6,0	7,3	2,2	3,0	3,7	4,5	2,9	3,4	5,0	12,4



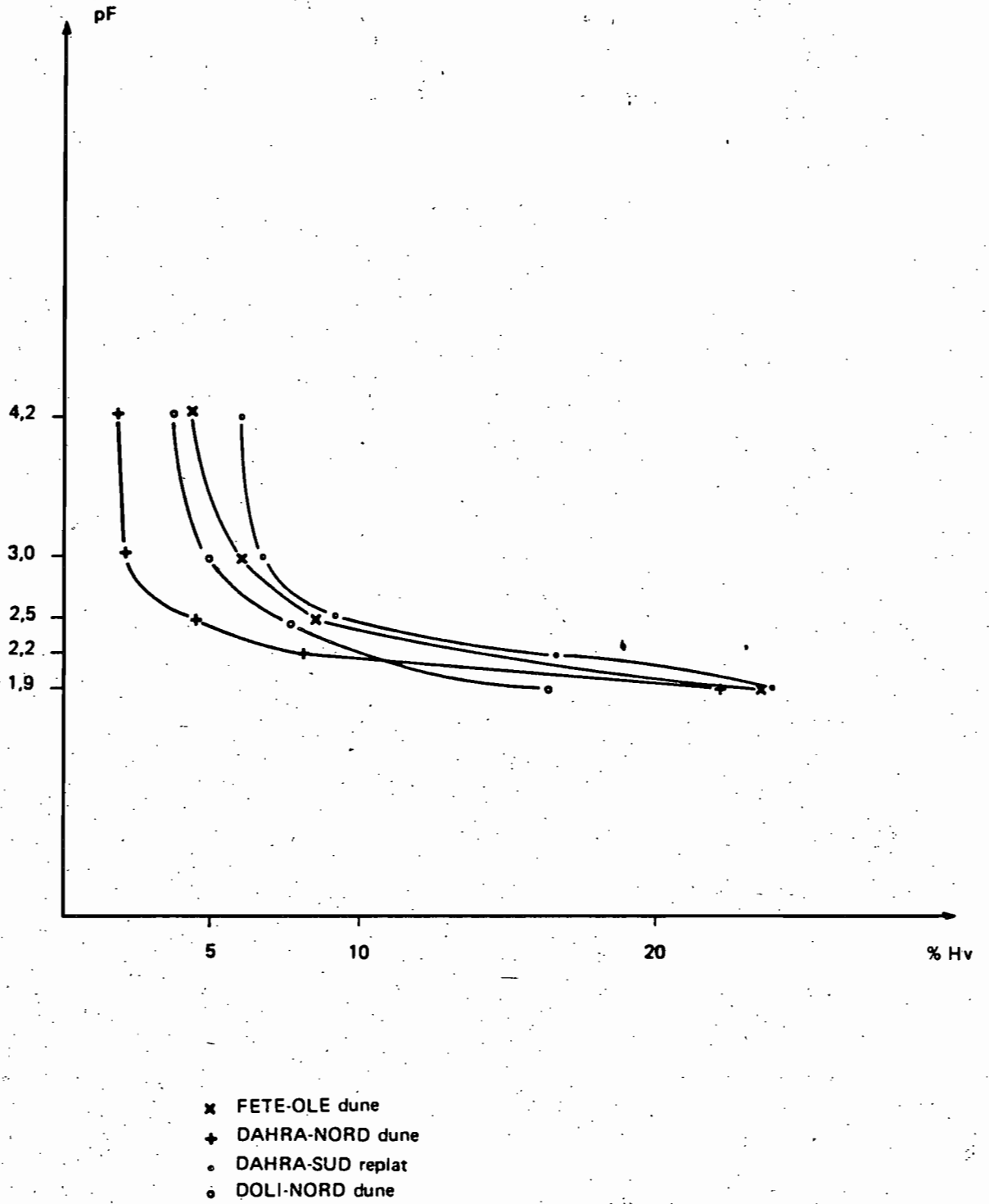


Fig. 37 Courbes pF (H<sub>v</sub>) pour l'horizon 30-100 cm

Ceci a été vérifié ici; il existe une corrélation significative entre le taux d'humidité et la teneur en argile (fraction 0-2  $\mu$ ) du sol. L'introduction de la fraction 2-20  $\mu$  (limon fin) entraîne une élévation du coefficient de corrélation et une diminution de la variance résiduelle. Ceci montre que l'effet des limons fins sur la rétention en eau des sols étudiés n'est pas négligeable. Le taux de matière organique, faible et assez constant il est vrai, a peu d'influence. La détermination des droites de régression, pour les différentes parcelles, d'une part, et pour les différentes classes de teneur en éléments fins, d'autre part, montre (CORNET, 1980) que les coefficients de régression ne sont pas significativement différents au seuil de  $p = 0,01$  (test de STUDENT-FISHER), excepté pour les très faibles teneurs en éléments fins : teneurs inférieures à 7,5%. Ceci justifie la détermination d'une même droite de régression. Pour les sols à très faible teneur en éléments fins, la corrélation devient peu significative. On peut alors penser que, vu leur faible teneur en matière organique, la rétention d'eau dans ces sols est surtout liée à la granulométrie des sables.

Si nous désignons par  $x$  la teneur en éléments fins (0-20  $\mu$ )  
et par : Y2 l'humidité à pF = 2,5  
Y3 l'humidité à pF = 3,0  
Y4 l'humidité à pF = 4,2

nous obtenons les relations suivantes :

- (1)  $Y2 = 0,445 x + 0,380$        $r^2 = 0,94$
- (2)  $Y3 = 0,344 x - 0,108$        $r^2 = 0,90$
- (3)  $Y4 = 0,217 x - 0,106$        $r^2 = 0,85$

Les points représentatifs, pour le pF = 4,2 sont portés sur le graphique figure 38, ainsi que le tracé des droites de régression.

### 2.1.3. Capacité de rétention et réserve utilisable.

L'étude de la redistribution de l'eau dans un sol après un arrosage en excès montre que l'évolution de l'humidité en fonction du temps, après une décroissance rapide, s'amortit jusqu'à devenir très faible. Selon FEODOROFF (1969) "Il est vraisemblable que la manifestation de ces deux régimes successifs de redistribution est liée à une certaine discontinuité dans le mode de rétention de l'eau par le sol, et que cette discontinuité caractérise la capacité de rétention" (p. 872). La capacité au champ ou capacité de rétention, est la plus forte humidité pour laquelle les transferts d'eau sont lents. Grâce à cette propriété, elle peut être considérée comme la limite supérieure de l'eau mise en réserve par le sol, (FEODOROFF et GUYON, 1972 ; AUDRY et al., 1973). D'études récentes (GRAS, 1962 ; FEODOROFF, 1972 ; MARCESSE et COUCHAT, 1973 ; DANCETTE, 1970 ; DANCETTE et MAERTENS, 1974) il ressort que la capacité de rétention n'est pas liée à un potentiel déterminé, mais que le pF à la capacité de rétention varie avec la texture du sol.

Il existe de très nombreuses méthodes de détermination de la capacité de rétention, tant sur le terrain qu'au laboratoire (CORNET, 1971). Nous avons utilisé ici une méthode préconisée par FEODOROFF (1972). Une parcelle de 2 m<sup>2</sup> sur sol homogène est entourée par une bordure métallique enfoncée verticalement dans le sol. Elle est arrosée abondamment de façon à amener le sol à une humidité proche de la saturation. La parcelle est ensuite recouverte d'une bache plastique pour empêcher l'évaporation. On procède à des mesures d'humidité échelonnées dans le temps 12 - 18 - 24 - 36 - 48 - 72 h ... après l'arrosage. La capacité de rétention est donnée par la teneur en eau pour laquelle  $\Delta H_v / \Delta t$  devient négligeable. Cette valeur a généralement été obtenue entre 36 et 48 heures.

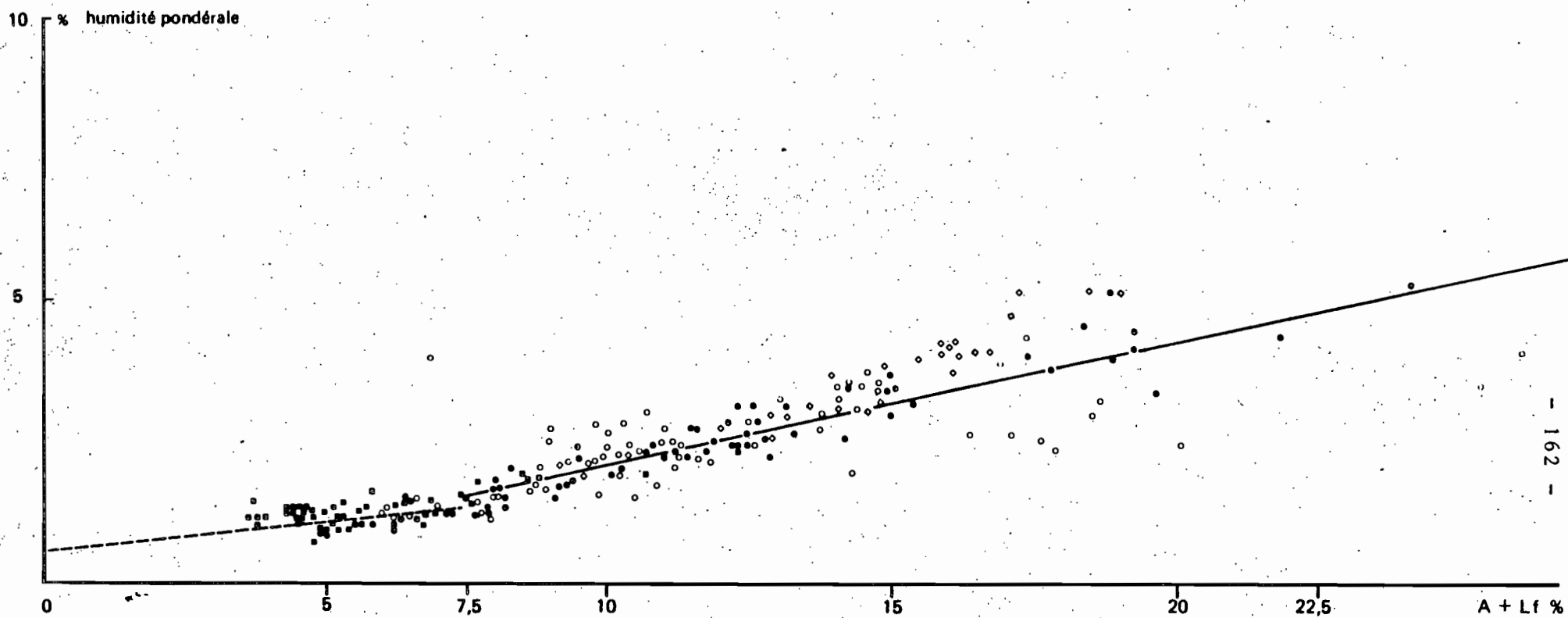


Fig. 38 Relation entre l'humidité pondérale à pF 4,2 et la teneur en argile + limon fin

• FETE OLE

• DAHRA NORD

○ DOLI

○ DAHRA-SUD

La figure 39 montre l'évolution de l'humidité obtenue pour une couche de sol à DAHRA nord et met en évidence les deux cinétiques de ressuyage.

Les mesures d'humidité à la capacité de rétention ont été effectuées en février 1977 à DAHRA-nord et à DAHRA-sud. En effet, sur ces seules parcelles, il était possible de disposer d'eau et d'une citerne pour les arrosages. Par ailleurs, les sols de ces deux parcelles présentent une gamme assez étendue de texture du sol. Les valeurs obtenues figurent en annexe VIII. Elles varient fortement en fonction de la teneur en éléments fins des sols. Nous avons donc cherché à relier humidité à la capacité de rétention et texture du sol. Les calculs ont été effectués à partir des humidités pondérales, la transformation en humidité volumique est réalisée ensuite.

Pour DAHRA, sur le graphique de la figure 40 ont été portées les valeurs mesurées de capacité de rétention et d'humidité à  $pF = 4,2$  en fonction de la teneur en argile + limon fin. Les droites de régression calculées à partir des mesures de laboratoire pour ces échantillons, ont été également représentées. Les points représentant la capacité de rétention montrent une assez forte dispersion.

En désignant par  $Y_c$  l'humidité pondérale à la capacité de rétention et par  $x$  la teneur en argile + limon fin, on obtient la relation :

$$(4) Y_c = 0,398 x + 4,28 \quad \text{avec} \quad r^2 = 0,74 \\ F_c = 81,09 \\ \text{Variance résiduelle} = 1,78$$

Il est donc possible de prévoir l'humidité à capacité de rétention en fonction de la teneur en éléments fins. Cependant, la précision de cette prévision est assez faible. Pour l'améliorer, nous avons essayé d'établir une régression multiple ayant comme variables explicatives  $x_1$  la teneur en éléments fins en %, et  $x_2$  la teneur en matière organique exprimée en %.

Nous obtenons la relation :

$$(5) Y_c = 0,395 x_1 + 0,872 x_2 + 2,572 \quad \text{où} \quad r^2 = 0,93 \\ F_c = 173,65 \\ \text{Variance résiduelle } S^2_E = 0,427 \\ F_{0,01} = 5,66$$

La figure 40 illustre le fait signalé par de nombreux auteurs (GRAS, 1962 ; FEODOROFF, 1972) que la capacité de rétention ne correspond pas à une valeur de  $pF$  déterminée. Le  $pF$  correspondant à la capacité de rétention est lié à la teneur en éléments fins. Il est d'autant plus élevé que la teneur en éléments fins est plus forte. Pour les sols ayant une teneur en argile + limon fin inférieure à 10 %, le  $pF$  correspondant à la capacité de rétention est inférieur à 2,2. Pour les sols dont la teneur est comprise entre 10 et 25 %, le  $pF$  est situé entre 2,2 et 2,5.

Le tableau XXXXIV indique la réserve totale en millimètres contenue dans les cent premiers centimètres de chaque sol pour les valeurs de  $pF = 3,0$  ;  $2,5$  ;  $2,2$  et pour la capacité de rétention. On voit l'erreur importante que l'on commet lorsque l'on prend par exemple l'humidité à  $pF 2,5$  comme correspondant à la capacité de rétention.

En l'absence de mesures possibles, les humidités à la capacité de rétention, pour FETE-OLE et DOLI-nord, ont été calculées à partir des teneurs en éléments fins et en matière organique.

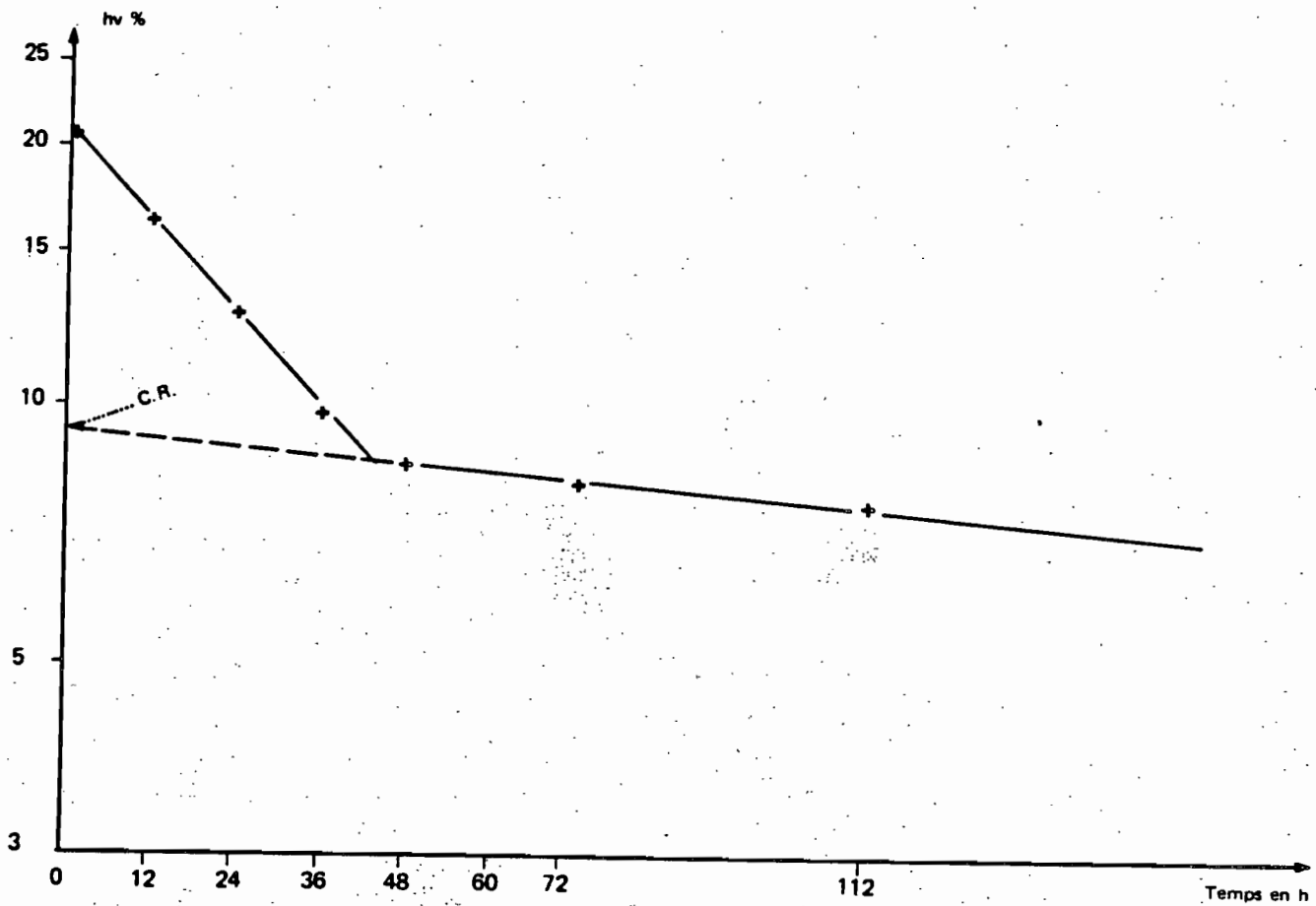


Fig. 39 cinétique de ressuyage horizon 30-50 DAHRA NORD Dune

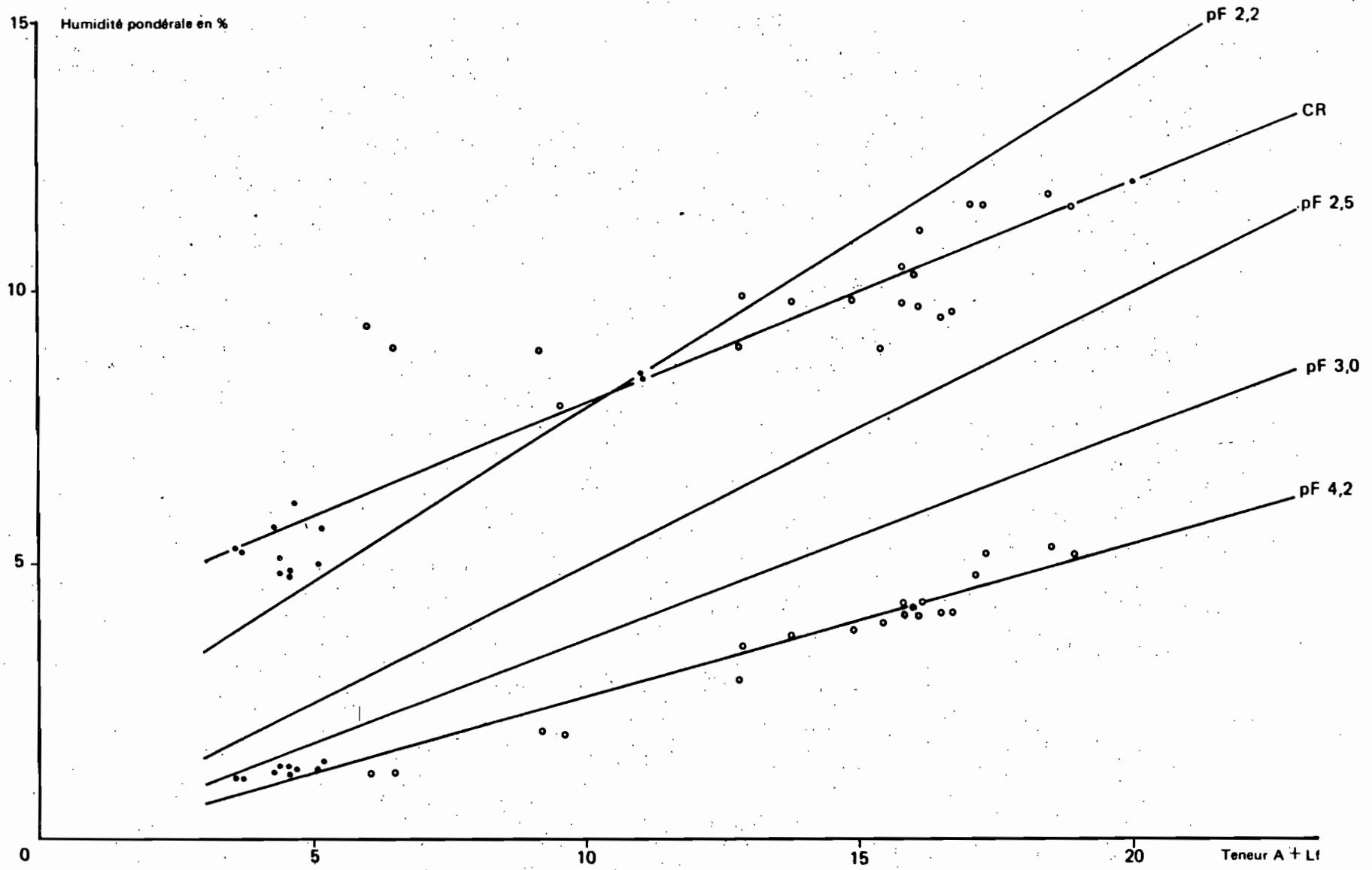


Fig. 40 Relation entre humidité pondérale à divers pF donnés et à la capacité de rétention et la teneur en éléments fins : argile + limon fin à DAHRA

TABLEAU XXXXIV - COMPARAISON DES RESERVES AUX DIFFERENTS pF ET A LA CAPACITE DE RETENTION POUR DEUX PROFILS DE SOL-TYPE.

Type de sol	Réserve totale sur 100 cm en mm			
	pF 3	pF 2,5	pF 2,2	CR*
Brun sub-aride DAHRA-Nord	27,0	38,0	70,0	86,0
Ferrugineux tropical peu lessivé DAHRA-Sud	74,0	97,0	148,0	149,0

\* CR = capacité de rétention

L'eau contenue dans le sol à la capacité de rétention, correspondant au remplissage de la microporosité, l'humidité volumique du sol correspondante est une mesure de la microporosité. La figure 41 montre la répartition des différentes classes de porosité des sols, relativement au stockage de l'eau.

Le tableau XXXXV donne la valeur des rapports : microporosité/porosité totale. Ce rapport, plus que les seules valeurs de porosité totale, permet d'explicitier le comportement hydrique des sols. En effet, il traduit l'importance des compartiments à transferts lents, par rapport aux compartiments à transferts rapides. Plus ce rapport est faible, plus les sols sont perméables, plus il est élevé, plus la réserve maximum utilisable sera importante, mais aussi plus la tendance à l'engorgement est forte. Les sols bruns sub-arides de DAHRA-nord présentent les valeurs les plus faibles, et ces valeurs décroissent avec la profondeur. Il n'existe dans ces sols, aucune entrave à la percolation de l'eau, le front d'humectation pénètre assez profondément.

La réserve maximum utilisable, assez faible pour chaque couche, est globalement importante du fait de la profondeur affectée par le stockage. Pour les sols ferrugineux tropicaux, à l'exception de l'horizon de surface, le rapport microporosité sur macroporosité dépasse 30 %. Il devient élevé pour les horizons présentant une action d'hydromorphie (> à 70% à DOLI-nord bas-fond, couche 100-300). Dans ces sols, la perméabilité est moins importante. Elle est encore diminuée par la présence fréquente de croûtes de battance (DAHRA-sud) ou de croûtes d'origine biologique (algues cyanophycées à FETE-OLE). La diminution en profondeur de la macroporosité entraîne une faible pénétration du front d'humectation et des phénomènes d'engorgement (DAHRA-sud, DOLI-nord). Malgré des capacités de stockage en eau plus importantes, la faible profondeur humectée, l'accroissement de l'évaporation par le maintien de l'eau en surface et l'apparition du ruissellement en cas de pente, font que ces sols sont peu favorables à l'utilisation de l'eau par la végétation. En outre, la quantité d'eau nécessaire pour amener ces sols à pF = 4,2 après dessèchement est supérieure à celle nécessaire dans les sols bruns sub-arides. Donc pour une même recharge en eau, la réserve d'eau disponible pour la végétation sera bien inférieure.

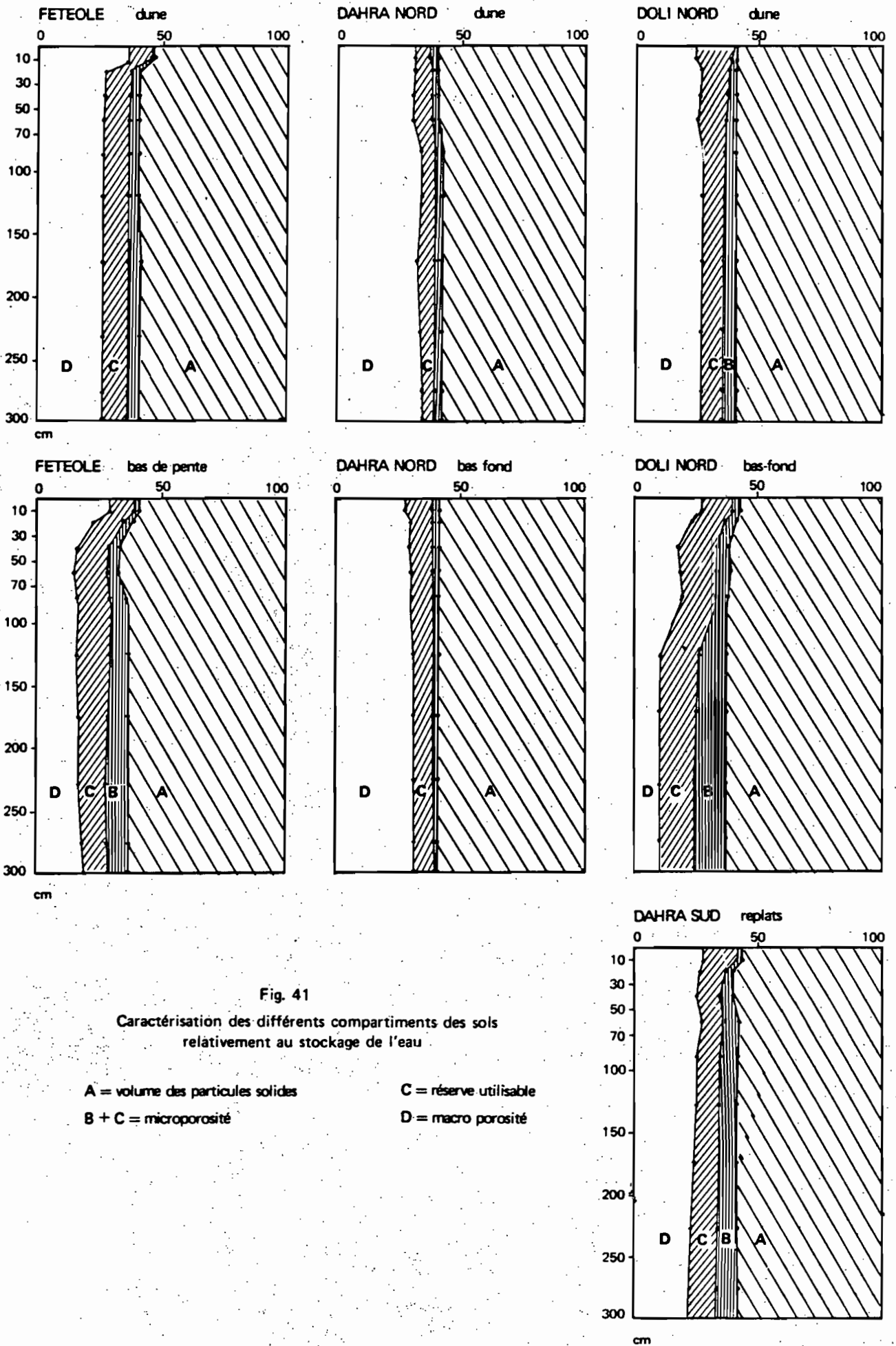


Fig. 41

Caractérisation des différents compartiments des sols  
relativement au stockage de l'eau

A = volume des particules solides

C = réserve utilisable

B + C = microporosité

D = macro porosité



TABLEAU XXXXV - VALEURS DU RAPPORT ENTRE MICROPOROSITE ET POROSITE TOTALE DANS LES PRINCIPAUX SOLS.

Profondeur en cm	FETE-OLE		DAHRA-NORD		DAHRA-SUD	DOLI-NORD	
	Dune	Bas de pente	Dune	Bas fond	replats	Dune	Bas fond
0-10	0,22	0,31	0,22	0,33	0,34	0,39	0,36
10-30	0,32	0,39	0,21	0,27	0,35	0,35	0,44
30-50	0,36	0,53	0,23	0,28	0,38	0,37	0,56
50-70	0,36	0,56	0,23	0,26	0,36	0,39	0,55
70-100	0,35	0,53	0,19	0,19	0,38	0,35	0,51
100-150	0,37	0,55	0,19	0,23	0,39	0,34	0,72
150-200	0,36	0,53	0,23	0,23	0,42	0,33	0,73
200-250	0,36	0,54	0,19	0,23	0,46	0,33	0,74
250-300	0,37	0,47	0,18	0,23	0,46	0,33	0,74

La différence entre l'humidité volumique à  $pF = 4,2$  et celle à la capacité de rétention représente la réserve maximum utilisable RU, grandeur très utilisée en agronomie, qui représente la quantité d'eau maximum que le sol peut mettre en réserve pour l'alimentation des plantes. La figure 42 montre la variation de la RU cumulée en fonction de la profondeur dans les principaux profils de sols. L'accroissement de RU cumulée est sensiblement linéaire, ce qui traduit bien l'homogénéité des sols. Les variations entre profils dépendent essentiellement de la texture et de la teneur en matière organique des sols.

Si RU est la réserve maximum utilisable en mm dans 10 cm de sols, si  $x_1$  désigne la teneur en éléments fins en % et  $x_2$  le taux de matière organique en %, on calcule la relation :

$$(6) \quad RU = 0,199 x_1 + 1,699 x_2 + 3,815 \quad \text{où} \quad \begin{aligned} R^2 &= 0,79 \\ F_c &= 51,34 \\ F_{0,01} &= 5,66 \\ \text{variance résiduelle} &= 0,879 \end{aligned}$$

Le tableau XXXXVI montre les comparaisons entre les valeurs mesurées d'humidité au point de fanaison permanente, de capacité de rétention et les valeurs calculées par les relations respectives (3) et (5). Il indique également la comparaison entre la valeur mesurée de la réserve utile en mm et les valeurs calculées soit à partir des relations (3) et (5) et de la densité apparente ( $d_a$ ) mesurée, soit directement à partir de la relation (6). Le calcul par la "méthode de couples" montre que les valeurs calculées et mesurées ne diffèrent pas significativement au seuil de 1%.

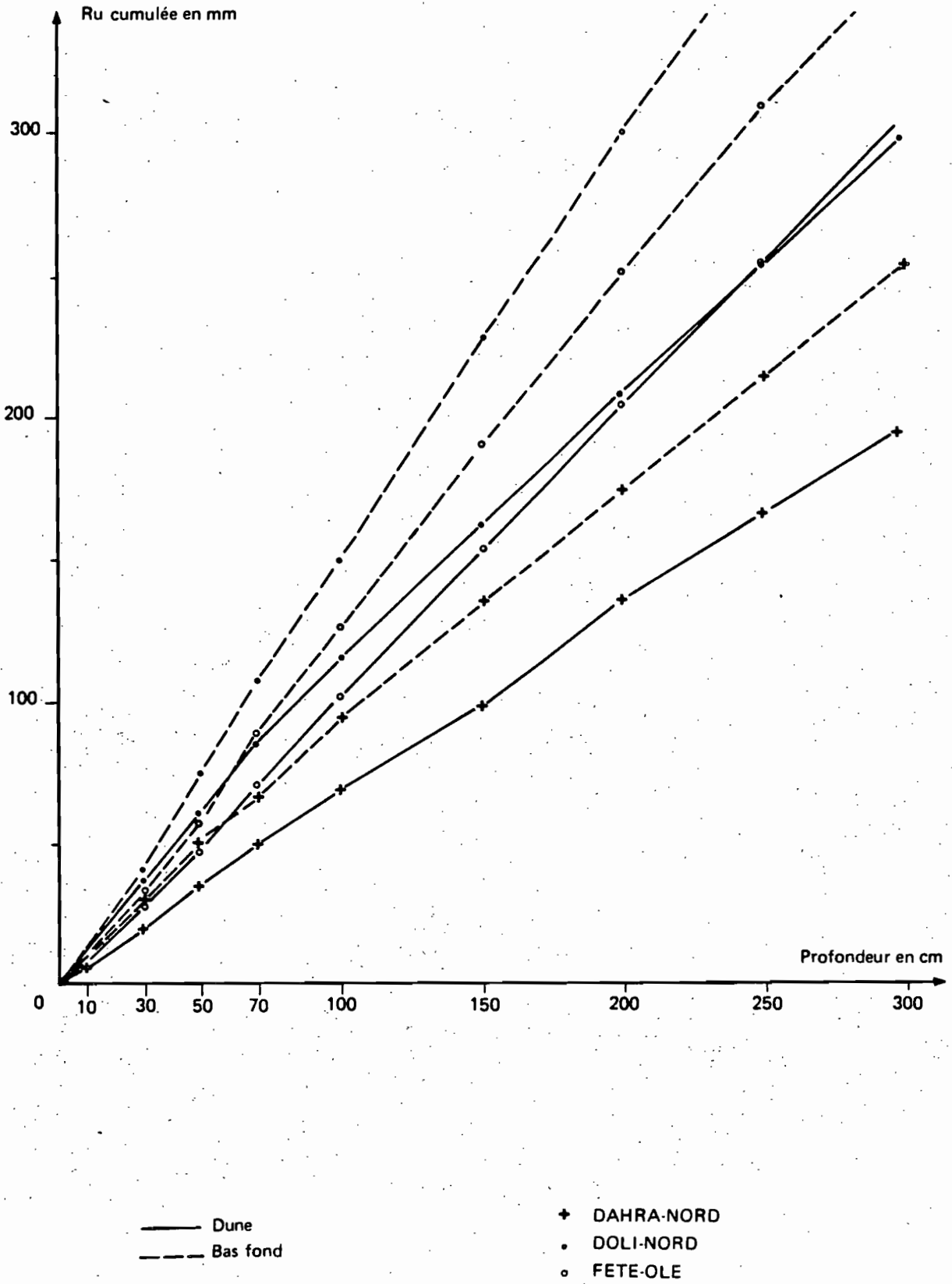


Fig. 42 Variation de la Ru cumulée en fonction de la profondeur

TABLEAU XXXXVI - COMPARAISONS ENTRE VALEURS CALCULEES ET VALEURS MESUREES DES PRINCIPAUX PARAMETRES HYDRIQUES.

N° Echan- tillon	Humidité à pF 4,2		Humidité à CR *		Réserve utile en mm pour 10 cm de sol		
	Mesurée	Calculée (3)	Mesurée	Calculée (5)	Mesurée	Calculée (5) - (3) da	Calculée (6)
DS 1	1,2	1,2	9,4	8,1	12,7	10,7	11,2
DS 2	2,0	1,9	8,9	8,7	11,3	11,5	10,6
DS 3	3,5	2,7	9,9	9,7	10,2	11,1	10,4
DS 4	4,0	3,2	8,9	10,1	7,8	10,9	9,7
DS 5	4,1	3,5	9,5	10,4	8,6	11,0	5,6
DS 6	4,1	3,5	9,6	10,5	8,8	11,4	9,7
DS 7	3,8	3,1	9,8	9,6	9,6	10,4	8,9
DS 8	4,3	3,4	11,1	10,1	10,9	10,7	9,2
DS 9	5,3	3,9	11,8	11,4	10,4	12,0	10,4
DS 10	5,2	3,7	11,6	10,7	10,2	11,2	9,7
DS 11	1,2	1,3	9,0	8,8	12,1	11,6	12,2
DS 12	1,9	2,0	7,9	8,8	11,0	11,1	10,4
DS 13	2,9	2,7	9,0	9,5	10,1	10,8	10,0
DS 14	4,1	3,3	10,4	10,4	10,1	10,8	10,0
DS 15	4,1	3,4	9,7	10,2	9,0	10,8	9,5
DS 16	4,3	3,3	9,8	10,4	8,8	11,4	10,0
DS 17	3,7	2,9	9,8	9,2	9,8	10,1	8,8
DS 18	4,2	3,4	10,3	10,0	9,8	10,6	9,1
DS 19	5,2	4,0	11,5	11,8	10,1	12,5	10,9
DS 20	4,8	3,6	11,6	10,7	10,9	11,4	9,8
DN 1	1,1	0,7	5,3	6,2	8,9	6,9	8,8
DN 2	1,1	0,7	5,2	5,5	6,7	7,8	7,4
DN 3	1,2	0,8	5,7	5,6	7,3	7,8	7,3
DN 4	1,4	1,0	5,7	5,5	7,0	7,3	6,5
DN 5	1,3	1,0	5,0	5,2	5,9	6,8	6,1
DN 6	1,3	0,9	4,9	4,9	5,7	6,3	5,9
DN 7	1,2	0,9	4,8	4,9	5,7	6,3	5,7
DN 8	1,3	0,9	6,1	5,0	7,6	6,5	5,9
DN 9	1,3	0,9	5,1	5,2	6,0	6,8	6,5
DN 10	1,3	0,9	4,8	5,2	5,5	6,8	6,3

\* CR = capacité de rétention

2.1.4. Perméabilité et conductivité hydraulique.

Le manque de temps et l'absence de matériel nécessaire nous ont empêché d'effectuer, sur différents sols étudiés, les mesures de perméabilité et les mesures de conductivité hydraulique. AUDRY (1962) dans l'Etude pédologique du C.R.Z. de DAHRA, a effectué un certain nombre de mesures de "perméabilité" au laboratoire, sur échantillon remanié et sous charge constante, sur les sols de cette station. Les résultats obtenus montrent une assez forte dispersion des valeurs : pour les sols bruns rouges sub-arides, la perméabilité mesurée au laboratoire varierait de 1,1 à 2,9 cm.h<sup>-1</sup>. Pour les sols ferrugineux tropicaux, elle serait comprise entre 0,5 et 1,2 cm.h<sup>-1</sup>.

A titre indicatif, le tableau XXXXVII donne les valeurs obtenues pour deux profils situés dans nos parcelles.

TABLEAU XXXXVII - VALEURS DE LA PERMEABILITE, OBTENUES AU LABORATOIRE, POUR DEUX PROFILS DE SOLS DE DAHRA (D'après AUDRY, 1962).

DAHRA-NORD DUNE Profil : C.R.Z. 45		DAHRA-SUD REPLAT Profil : C.R.Z. 21	
Profondeur en cm	Perméabilité en cm.h <sup>-1</sup>	Profondeur en cm	Perméabilité en cm.h <sup>-1</sup>
0 - 10	1,3	0 - 7	0,6
15 - 25	1,2	8 - 15	0,5
40 - 50	2,1	25 - 35	0,9
80 - 100	2,0	40 - 60	1,1
		60 - 100	1,1

VACHAUD et al. (1978) ont réalisé, sur deux sols du Sénégal, voisins des sols étudiés ici, mais sensiblement différents, la détermination *in situ* des relations entre conductivité hydraulique K et humidité volumique Hv. Le tableau XXXXVIII donne les valeurs obtenues.

Ces résultats ne peuvent guère être extrapolés à des sols légèrement différents, tels ceux étudiés ici. Par ailleurs, il est à noter que ces travaux effectués sur des sols après irrigation en excès, correspondent à des zones d'humidité pas, ou très rarement, rencontrées en milieu naturel.

TABLEAU XXXXVIII - RELATION ENTRE CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE ET HUMIDITE VOLUMIQUE, POUR DEUX SOLS DU SENEGAL, PAR ETUDE DU DRAINAGE INTERNE (D'après VACHAUD et al., 1978).

Sol brun sub-aride (DIERI) N'DIOL z = 30 cm		Sol ferrugineux tropical (DIOR) BAMBEY B1 z = 30 cm	
Hv en cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>	K en mm.h <sup>-1</sup>	Hv en cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup>	K en mm.h <sup>-1</sup>
0,200	58,1	0,261	66,1
0,180	38,7	0,233	48,0
0,155	21,7	0,214	23,4
0,127	7,0	0,189	8,8
0,106	2,2	0,178	1,4
0,088	1,4	0,151	0,6
0,067	0,33		
0,050	0,20		
0,035	0,034		
0,021	0,007		

#### 2.1.5. Discussion.

Les divers résultats montrent que, pour des sols peu différents issus d'un matériau semblable, les propriétés physiques et hydriques peuvent être très différentes. Ce sont les dimensions et la géométrie des vides du sol qui conditionnent la circulation et la rétention de l'eau. Les facteurs qui agissent sur ces caractéristiques sont très divers. Cependant, en considérant des sols non cultivés, dont la structure varie peu, et dont l'origine est comparable (évolution des dépôts sableux), les variations de texture et de teneur en matière organique permettent d'expliquer les variations des caractéristiques hydriques. Or, si les caractéristiques physiques des sols sont en général bien décrites, lors des prospections pédologiques, les caractéristiques hydriques le sont rarement. Il nous a paru intéressant de chercher à relier caractéristiques hydriques et texture de façon à pouvoir étendre l'étude à l'ensemble des sols sableux de la zone. Il ressort des résultats, que la prévision des principales caractéristiques hydriques des sols sableux du nord Sénégal peut être réalisée de façon satisfaisante, grâce à des relations statistiques simples, à partir de leur teneur en éléments fins (argile + limon fin) et du taux de matière organique.

De façon générale, il existe une corrélation significative entre le taux d'humidité d'un sol à un pF déterminé et sa teneur en argile. La fraction 2 -20  $\mu$  (limon fin) joue dans ces sols un rôle important dans la

rétention de l'eau, et l'on obtient une meilleure corrélation avec la fraction 0-20  $\mu$  qu'avec la seule fraction 0-2  $\mu$ . La corrélation entre l'humidité à un pF déterminé et la teneur en éléments fins est d'autant plus étroite que le pF est plus élevé. Par ailleurs, le coefficient de régression augmente lorsque le pF diminue. Ce fait se traduit par une augmentation des différences de teneur en eau entre deux valeurs consécutives de pF lorsque le taux d'éléments fins augmente (voir Fig. 40).

La capacité de rétention est une grandeur caractéristique des sols, déterminable expérimentalement *in situ*. Sa variation est expliquée en grande partie par la teneur en éléments fins du sol et par la teneur en matière organique. La capacité de rétention du sol ne correspond pas à un pF déterminé. Le pF correspondant à celle-ci augmente avec le taux d'éléments fins contenus dans le sol. Dans les sols très sableux, il peut atteindre des valeurs très faibles, voisines de 2,0.

## 2.2. - Etude des Profils hydriques et suivi de l'humidité des sols.

L'humidité des sols a été étudiée par l'établissement périodique de profils hydriques. Les prélèvements étaient effectués à la tarière jusqu'à trois mètres. L'humidité des échantillons était déterminée par la méthode pondérale, après séchage à l'étuve à 105°C. Sur chaque site des toposéquences, trois points de prélèvement étaient choisis au hasard, chaque point devant être à plus de 1,50 m d'un point de prélèvement antérieur. Pour chaque point, on prélève 9 échantillons répartis entre 0 et 300 cm de profondeur. L'humidité pour chaque niveau est déterminée en faisant la moyenne entre les trois échantillons obtenus.

La fréquence des prélèvements était définie en fonction des possibilités matérielles et variable selon la saison. En 1975 et 1976, elle était de 1 prélèvement tous les 15 jours en saison des pluies, et de 1 prélèvement par mois en saison sèche. La fréquence en saison des pluies s'étant avérée insuffisante, elle a dû être portée, pour DAHRA, en 1977 et 1978, à 1 prélèvement tous les 10 jours.

Sur les figures de l'annexe IX ont été représentés les profils les plus caractéristiques concernant 1975 et montrant l'évolution de l'humidité du sol.

Les valeurs d'humidité à pF 4,2 et la réserve d'eau utilisable ont été représentées. En l'absence de mesure de potentiel, les déductions concernant la dynamique de l'eau dans les sols, effectuées à partir des seules études de profils hydriques, doivent être faites avec prudence.

### 2.2.1. - Evolution des profils hydriques à FETE-OLE.

La figure A en annexe IX montre l'évolution des profils hydriques en dune, pente et bas de pente. En 1975, la pluviosité peut être considérée comme normale, avec 311,2 mm en 23 jours de pluie (voir fiches pluviométriques en annexe X. Les averses sont faibles ou moyennes et bien réparties. L'évolution des profils hydriques montre, en dune et en pente que la pénétration du front d'humectation atteint 150 à 180 cm en septembre. En dessous de cette profondeur, le sol reste sec durant toute la saison. On constate qu'il n'y a plus d'eau disponible dès le 1er octobre et, fin novembre, le profil sec initial est pratiquement atteint. En bas de pente, dès le mois de juillet, le front d'humectation atteint 100 cm, il dépasse 300 cm en août. Au 1er octobre, le profil est proche de la capacité de rétention. L'assèchement du profil se poursuivra durant toute la saison sèche et il restera un reliquat d'eau utilisable (15 à 20 mm) en fin de saison sèche en profondeur.

En 1976, les précipitations ont été très faiblement excédentaires (346,4 mm) avec un nombre faible de jours de pluie (18 jours), et des averses plus importantes.

Au cours de la saison pluvieuse, en dune, le front d'humectation atteint 220 cm. A 300 cm l'humidité reste stable et très faible, il n'y a donc pas de drainage. En pente, en août, la capacité de rétention est atteinte sur 200 cm. Le front atteint 300 cm. Après redistribution le long du profil entre fin août et fin septembre, un drainage en dessous de trois mètres est possible. En bas de pente il y a, au cours de la saison, reconstitution des réserves sur l'ensemble du profil et drainage d'une partie de l'eau en dessous de la côte 300 cm ; mais, contrairement à l'année précédente, on assiste à un dessèchement rapide du profil, qui dès janvier 1977, et sec sur 300 cm.

1977 est une année sèche avec 126,2 mm et 12 jours de pluie seulement. En dune et pente, le front d'humectation atteint à peine 30 à 50 cm. En dessous de cette profondeur, il n'y a pas d'évolution des profils hydriques, si ce n'est, un dessèchement encore plus prononcé en décembre 1977. Dans les bas de pente, il y a reconstitution des réserves jusqu'à 100 cm; mais ces réserves sont rapidement utilisées et le profil est sec dès le mois d'octobre.

En 1978, la pluviosité est faiblement excédentaire, avec 340,1 mm en 19 jours de pluie. Une grande partie des précipitations est concentrée sur une courte période : 143,5 mm en 5 jours début août, dont une averse de 93,5 mm. En dune et en pente, on constate une faible pénétration du front d'humectation (80 cm environ) ce qui correspond à une année sèche. En dessous de 100 cm, on note peu d'évolution des profils hydriques, le dessèchement très rapide intervient après la fin des pluies. En bas de pente, lors des pluies de début août, le front atteint et dépasse 300 cm. On observe alors des phénomènes d'engorgement. La mare temporaire de bas de toposéquence est remplie, mais elle se videra assez rapidement. Contrairement à 1975, le dessèchement en bas de pente sera rapide en début de saison sèche.

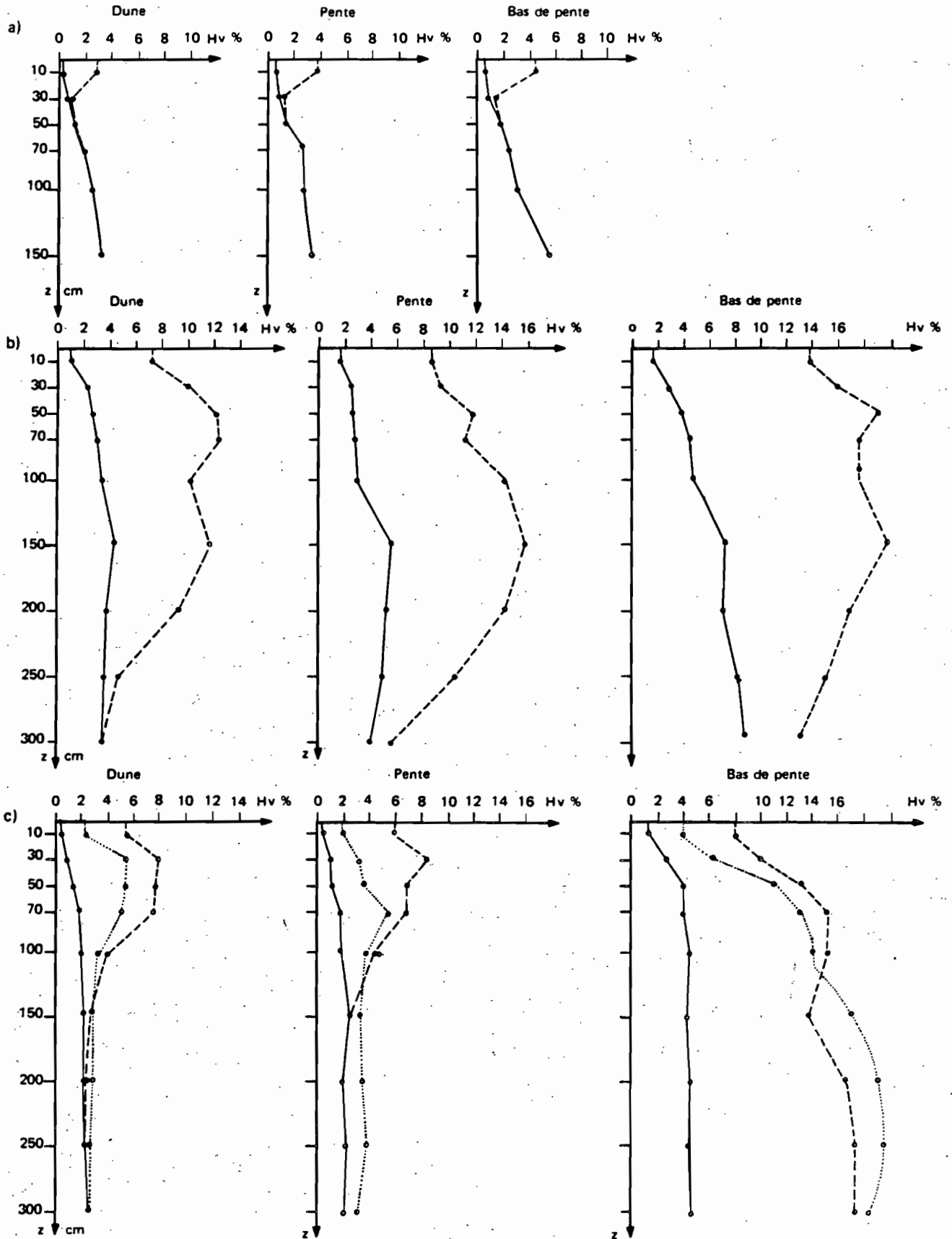
La figure 43 montre l'analyse de l'infiltration pour trois épisodes pluvieux caractéristiques. Tout d'abord, une averse isolée de début de saison des pluies (3-7-75) de 14,8 mm. Les profils établis les 27-6 et 4-7-75 (fig. 43 a) montrent la pénétration de cette averse. La pluie tombe sur un sol desséché. L'examen des profils montre que l'infiltration est comparable pour les trois sites, donc que l'averse n'a pas ou peu ruisselé. L'humectation pénètre peu profondément, 20 cm environ et la lame d'eau stockée est faible : 4 à 6 mm, un jour après la pluie. Une forte proportion, supérieure à 50 % de la pluie incidente, a donc été perdue, vraisemblablement par évaporation. Ceci montre le peu d'efficacité, pour la reconstitution des réserves et la végétation, des pluies de faible importance en début de saison.

La figure 43 b représente les profils hydriques établis avant et après trois averses rapprochées : 37,0 mm le 14-8-76, 27,0 mm le 16-8-76 et 13,0 mm le 17-8-76. On constate que les dunes et les pentes ont contribué, par ruissellement, à alimenter partiellement les bas de pente. Cependant, le front d'humectation a atteint 220 cm en dune, et 250 cm en pente. La succession d'averses de moyenne importance a donc permis, malgré le ruissellement, la reconstitution des réserves dans ces deux sites, sur une bonne partie du profil.

Le troisième épisode concerne la période à forte précipitations de début août 1978 : 93,5 mm le 3-8, 20,0 mm le 5-8 et 30,0 mm le 7-8. Les profils établis le 20 juillet et le 10 août montrent (figure 43 c) une très mauvaise infiltration des pluies en dune et en pente où le front d'humectation atteint seulement 100 cm, et une forte concentration de l'eau en bas de pente et dans la mare temporaire qui est remplie. Le profil établi le 21 août, alors qu'il ne s'est produit qu'une averse de 5,0 mm le 15-8, montre l'importance des pertes par évapotranspiration, affectant les cent premiers centimètres du profil.



Fig. 43 FETE OLE Analyse de trois épisodes pluvieux différents



a) Pluie le 3-7-75 : 14,8 mm      Profils : — 27-6-75, --- 4-7-75

b) Pluies le 14-8-76 : 37,0 mm, le 16-8 : 27,0 mm, le 17-8 : 13,0 mm      Profils : — 3-8-76, --- 18-8-76

c) Pluies le 3-8-78 : 93,5 mm, le 5-8 : 20,0 mm, le 7-8 : 30 mm, le 15-8 : 5,0 mm

Profils : — 20-7-78, — 10-8-78 --- 21-8-78

En dune et en pente la partie inférieure des profils a peu évolué. En bas de pente on note, au contraire, une augmentation des teneurs en eau entre 120 et 300 cm, zone où la capacité de rétention est atteinte. En l'absence de pluies importantes et de transfert d'eau à partir du haut de la toposéquence, on assiste donc à une alimentation en eau des bas de pente, à partir du bas fond et de la mare temporaire. Ce phénomène sera observé à plusieurs reprises. La figure 44 représente la répartition de l'humidité le long de la toposéquence pour trois dates considérées comme représentative : Début de saison des pluies, fin de saison des pluies, milieu de la saison sèche.

De ces différentes observations il ressort un certain nombre de caractéristiques générales du régime hydrique des sols à FETE-OLE. Tout d'abord, l'existence, en saison sèche, d'un profil d'équilibre nettement inférieur à l'humidité pF 4,2 sur l'ensemble des profils (0-300 cm). Ce phénomène a été précédemment signalé sur des sols semblables au Tchad par AUDRY (1967). Ce profil est très semblable d'une année sur l'autre, excepté pour le bas de pente en 1976 où il restait de l'eau disponible en profondeur en fin de saison sèche. Le fait que l'humidité du sol soit, en début de saison des pluies, nettement inférieure à l'humidité à pF 4,2 entraîne, lors des premières averses, une compétition vis à vis de l'eau entre le sol et les plantes, notamment pour les semences d'espèces annuelles. Cette compétition, d'autant plus forte que le sol est plus riche en éléments fins, explique les différences de rapidité de levée entre les différents milieux ; cela a été également constaté par FLORET et PONTANIER (1978) en Tunisie et DE VRIES (1978) au Mali. Par ailleurs, la reconstitution des réserves du sol à une valeur proche de la capacité de rétention est rarement observée en dune et en pente en saison des pluies. Par contre, elle est fréquente en bas de pente. En dune et en pente on a une mauvaise pénétration de l'eau, liée à la dispersion des éléments fins en surface, et à un encroûtement fréquent. L'infiltration semble meilleure lorsque des pluies de faible importance se succèdent. Une pluie tombant sur un sol partiellement humecté semble mieux pénétrer. On constate de grandes différences de répartition de l'eau en fonction de la topographie, liées à un important phénomène de concentration de l'eau vers les bas de pente et les bas fonds par ruissellement, ce qui permet d'avoir en ces points un bilan hydrique plus favorable. La végétation revêt ainsi un aspect de végétation contractée.

Les possibilités de drainage profond sont nulles en dune et très faibles en pentes, où elles sont liées à la persistance de phénomènes pluvieux sur plusieurs jours, ce qui se rencontre rarement dans la zone. Un drainage profond en dessous de 3 m se produit assez régulièrement en bas de pente, sauf en année sèche. Cependant, des sondages à 6 m n'ont pas permis de mettre en évidence la présence d'une zone d'accumulation.

#### 2.2.2. - Evolution des profils hydriques à DAHRA-nord.

Cette évolution est figurée par les principaux profils à la figure B en annexe IX. En 1975, la pluviosité, pour cette station, peut

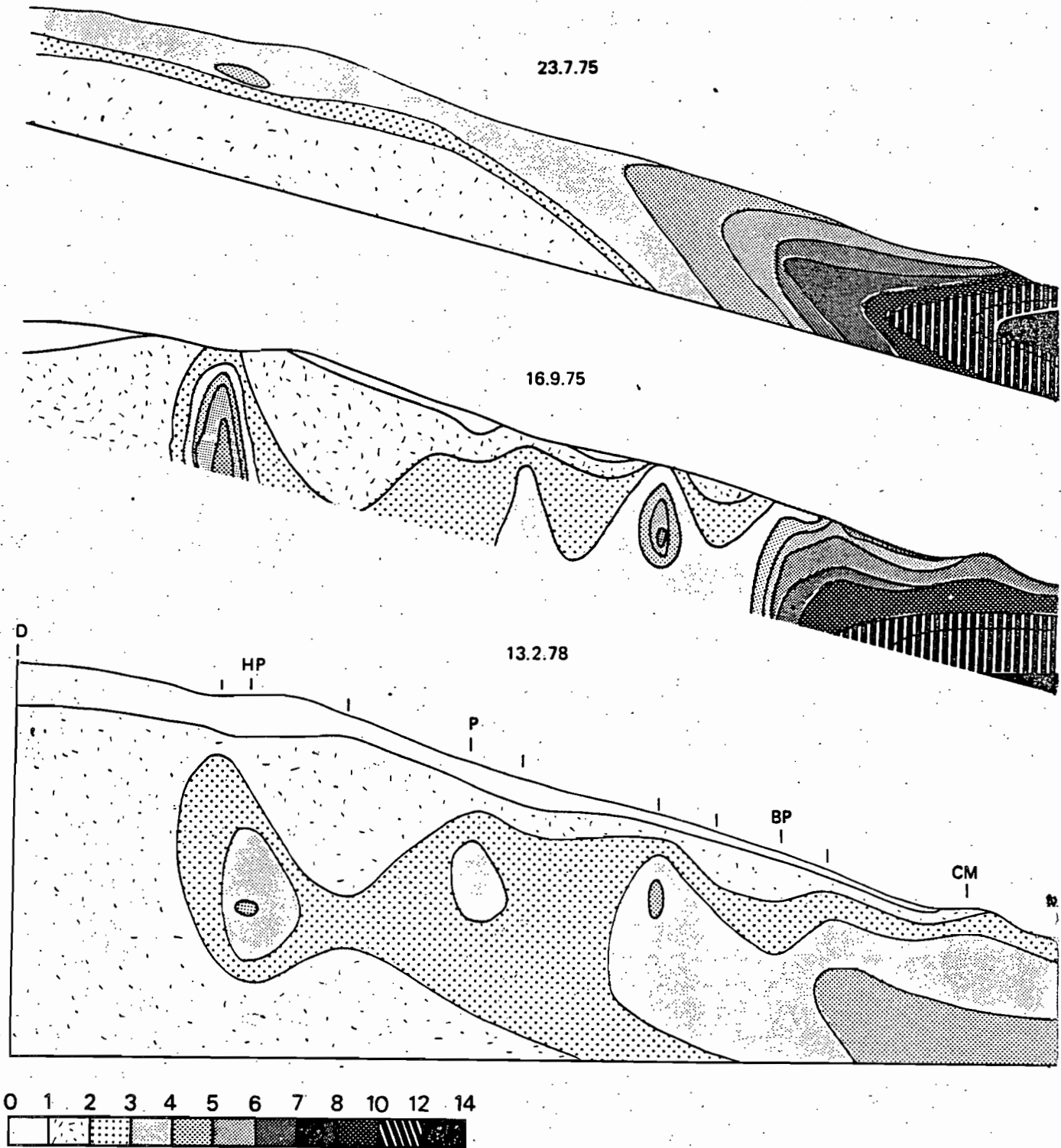


Fig. 44 - Répartition de l'humidité du sol le long de la topo-séquence à trois dates caractéristiques (début de saison de pluie, milieu de saison de pluies et milieu de saison sèche). Les figurés représentent les isoteneurs exprimées en % pondéral.

être considérée comme voisine de la normale, avec 487,4 mm en 24 jours de pluie (voir annexe X). Les profils montrent que l'infiltration est bonne. Le front d'humectation atteint 250 cm en septembre en dune et en pente, et 220 cm en bas fond. L'humidité à la côte 300 cm ne semble pas avoir évolué. Les profils sont comparables dans les différents sites de la toposéquence. Les faibles différences de profil hydrique peuvent être imputées aux différences de texture. Il n'y a pas redistribution de la lame d'eau incidente le long de la toposéquence. Il n'y a pas de ruissellement apparent.

En 1976, les précipitations sont déficitaires : 395,6 mm en 30 jours. Malgré un nombre important de jours de pluie la répartition est irrégulière, avec un déficit en août et des pluies éparses en dehors de la saison humide (novembre). La pénétration du front d'humectation est plus faible, peut-être en raison de l'absence d'averses consécutives. Il atteint 180 cm en dune, 150 cm en pente et en bas fond. On constate, jusqu'à 3 m, une faible variation de la teneur en eau, notamment en dune, sans qu'il y ait toutefois reconstitution des réserves à cette profondeur.

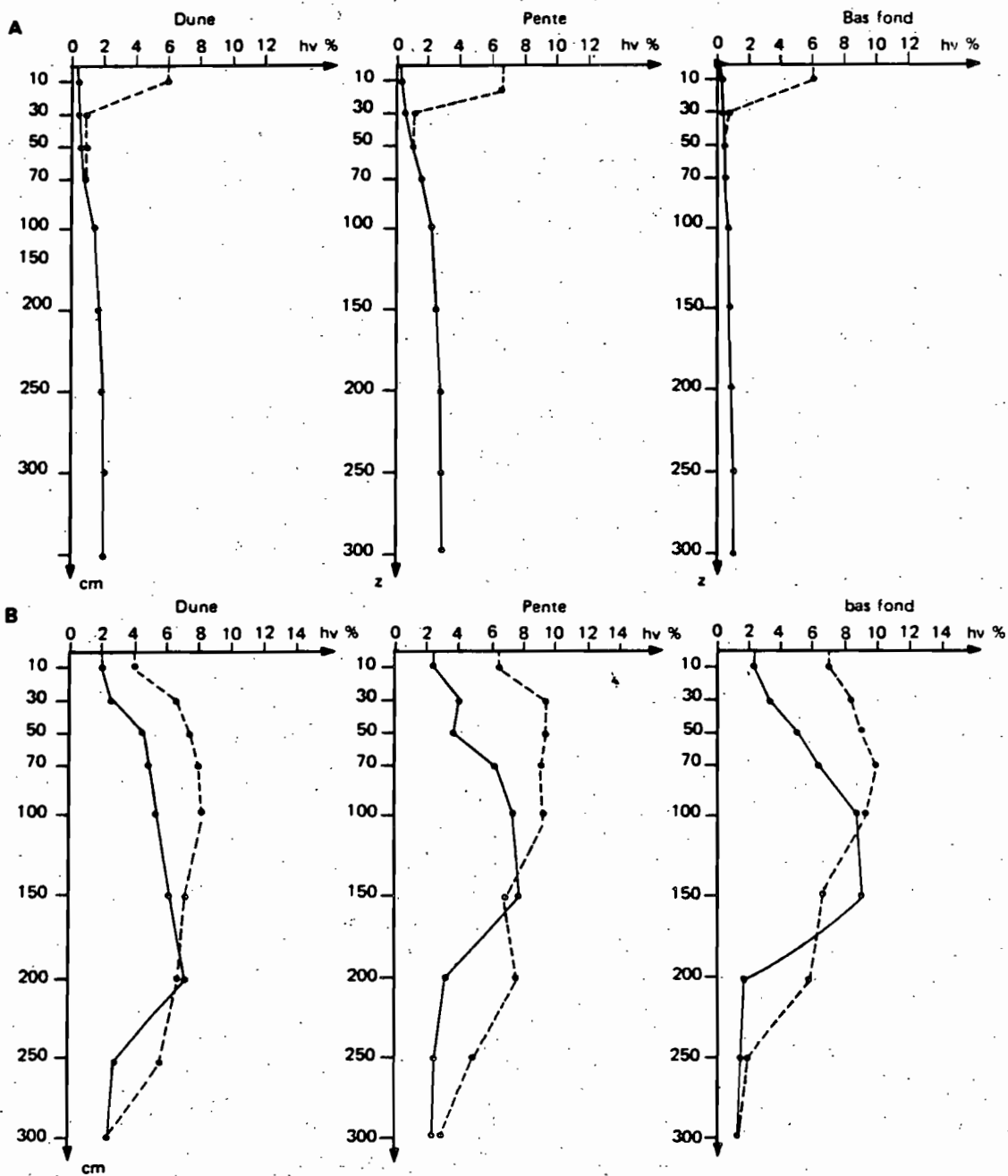
En 1977, les précipitations ont été très déficitaires, avec 305,4 mm en 23 jours. La répartition a été irrégulière, avec une forte concentration des pluies durant la deuxième décennie d'août (121,6 mm). Ceci explique sans doute une bonne pénétration du front d'humectation qui atteint 250 cm malgré le déficit pluviométrique général. On ne constate pas de drainage au-delà de 300 cm, même après les pluies de la mi-août.

1978 présente également un déficit pluviométrique avec 362,6 mm en 28 jours de pluie. La saison des pluies a été très étalée et très irrégulière. Les averses ont été de faible importance, une seule est supérieure à 30,0 mm. Les profils montrent que le front d'humectation n'est pas descendu en dessous de 70 cm, en raison de la faible importance des averses.

La figure 45 montre l'analyse de l'infiltration pour deux épisodes pluvieux. L'averse du 3-7-75 (6,5 mm) tombe sur un sol desséché. Les profils établis le 27-6 (fig. 45a) correspondent aux profils d'équilibre de saison sèche. Les profils établis le 3-7, quelques heures après l'averse, montrent une bonne infiltration équivalente tout au long de la toposéquence.

Les profils représentés sur la figure 45 b ont été établis le 2-9-1977 et le 9-9-1977 soit, respectivement, avant et après une série de trois jours de pluie consécutifs, dont deux averses d'importance moyenne: 30,1 mm le 4-9, 40,2 mm le 5-9 et 9,0 mm le 6-9. On constate une bonne infiltration, avec une progression importante du front d'humectation, qui atteint 250 cm en dune et 220 cm en pente et bas fond. Le comportement est similaire pour les trois sites, et l'on ne constate pas de redistribution le long de la toposéquence. Il est à noter, dans les deux cas, que la bonne pénétration de l'eau limite les pertes par évaporation directe après les averses.

Fig. 45 DAHRA NORD. Analyse de deux épisodes pluvieux différents



A Pluie le 3.7.75 : 6,5 mm, profils : — 27.6.75, ... 3.7.75 après la pluie

B Pluies le 4.9.77 : 30,1 mm, le 5.9 : 40,2 mm, le 6.9 : 9 mm  
 Profils : — 2.9.77, ... 9.9.77

L'étude de l'évolution des profils hydriques montre que la perméabilité du sol est bonne à tous les niveaux de la toposéquence. Il n'y a pas de redistribution de l'eau le long de celle-ci, le bilan hydrique au niveau de chaque site est semblable. Ceci correspond à une végétation assez homogène le long de la toposéquence.

Malgré une faible capacité de rétention, ces sols permettent un bon stockage de l'eau pour la végétation. Il n'a jamais été observé d'écoulement superficiel et, durant les quatre années observées, on n'a pas constaté de drainage.

#### 2.2.3. - Evolution des profils hydriques à DAHRA-sud.

La détermination des profils hydriques n'a été réalisée à DAHRA-sud que sur les replats, seule zone homogène, représentant plus de 80 % de la surface, chaque petite dépression constituant un cas particulier. Les mesures ont débuté en 1976, qui a été une année déficitaire avec 344,3 mm en 30 jours de pluies ; 1977 et 1978 ont été des années sèches avec respectivement 296,7 mm en 23 jours et 357,6 mm en 30 jours de pluie. La répartition est analogue à celle notée pour DAHRA-nord.

L'évolution des profils hydriques montre (fig. C en annexe IX) une mauvaise pénétration de l'eau. Durant ces trois années, le front d'humectation n'est jamais descendu en dessous de 80 cm. La mauvaise perméabilité est liée à l'état dispersé des éléments fins dans l'horizon superficiel et à la présence d'encroûtement en surface.

En l'absence de relief on constate peu de ruissellement, si ce n'est un faible ruissellement en nappe au cours des plus fortes averses, lié à un engorgement temporaire de la couche superficielle. Aucun drainage profond n'est constaté. Il est à noter que le profil sec d'équilibre en saison sèche s'établit à des humidités très inférieures à celles correspondant au pF 4,2. Il est très rapidement atteint en fin de saison des pluies.

#### 2.2.4. - Evolution des profils hydriques à DOLI-nord.

L'étude de l'évolution des profils hydriques n'a été effectuée à DOLI-nord, qu'en 1975 et 1976, deux années pour lesquelles les précipitations sont voisines de la normale (environ 600 mm) mais dont la répartition est assez différente. Les profils portés sur la figure D en annexe IX mettent en évidence une bonne perméabilité pour l'ensemble des sites de la toposéquence. Le front d'humectation descend assez rapidement en dessous de 3 mètres. Il y a une bonne reconstitution des réserves en saison des pluies, avec des humidités très proches de la capacité de rétention.

En raison d'une bonne perméabilité, de l'absence d'encroûtement et de la présence d'une couverture herbacée assez dense, il n'a pas été observé d'écoulement superficiel. On note cependant une redistribution de l'eau, avec accumulation retardée dans les bas fonds, où se développent des phénomènes d'hydromorphie temporaire en profondeur. Ceci peut probablement être attribué à un phénomène de drainage latéral accru par l'existence de discontinuités texturales dans les profils des sols.

Un profil sec d'équilibre, inférieur à pF 4,2, est atteint assez rapidement dans les couches superficielles en début de saison sèche, mais il ne s'établit pas en profondeur. En effet, en dessous de 100 cm, la réserve utilisable ne disparaît que progressivement tout au long de la période sèche. Elle se maintient jusqu'à la fin de cette période dans les bas fonds. Une partie non négligeable des précipitations draine, chaque année en profondeur en dessous de 3 m.

L'étude de l'évolution des profils hydriques fait apparaître, entre les quatre parcelles étudiées, des différences de régime hydrique, avec une redistribution et une utilisation différente de l'eau. Le régime hydrique dépend des interactions entre la position topographique et les facteurs édaphiques : texture, structure, état de la surface du sol. Il est pour un même site variable d'une année à l'autre en fonction des précipitations qui agissent essentiellement par leur répartition, leur intensité et leur abondance. Nous caractériserons ultérieurement les différences observées au niveau de chaque toposéquence.

### 2.3. - Evolution des réserves, bilan hydrique et détermination de l'évapotranspiration réelle (ETR).

Pour chaque tranche de sol et pour chaque profil, la connaissance des teneurs en eau en fonction de la profondeur, exprimées en humidité volumique Hv, permet de calculer la valeur du stock d'eau dans la tranche considérée :

$$S = \int_0^z Hv(z) dz$$

où S : est le stock d'eau exprimé en mm, ou réserve totale,

Hv : l'humidité volumique en %,

z : l'épaisseur de la couche considérée en dm.

De même, la réserve utilisable RU exprimée en mm est donnée par la relation

$$RU = \int_0^z (Hv - Hf) dz$$

où Hf est l'humidité volumique au point de fanaison permanente (pF = 4,2).

Le bilan hydrique du sol consiste à effectuer la comptabilisation des différents flux d'eau, entrant ou sortant du compartiment sol pendant une période quelconque. Si on considère comme compartiment une tranche de sol d'épaisseur z, son bilan hydrique peut être exprimé par la relation :

$$(\Delta S)_0^z = P - ETR + r + D$$

où  $(\Delta S)_0^z$  : est la variation du stock d'eau dans la couche (0, z)

P : précipitations durant la période considérée.

ETR : évapotranspiration réelle.

r : ruissellement.

D : drainage ou remontée capillaire à la profondeur z.

Les termes r et D sont pris en valeur algébrique, ils sont positifs, lorsqu'ils représentent un apport d'eau à la tranche de sol considérée, et négatifs dans le cas contraire.

Dans cette équation du bilan hydrique, on ne sait mesurer facilement que les termes P et  $\Delta S$ . On est donc fréquemment amené à calculer ETR à l'aide d'une expression tronquée du bilan hydrique  $ETR = P - (\Delta S)_0^z$ , ce qui revient à émettre l'hypothèse dans ce cas que r et D sont négligeables.

La présence réelle de ruissellement peut, si elle existe, être constatée visuellement, mais aussi ressortir de l'étude des profils hydriques le long de la toposéquence. L'importance du terme D est beaucoup



plus difficile à apprécier. Comme de nombreux expérimentateurs, nous avons cherché à nous affranchir de ce terme, en considérant une tranche de sol suffisamment épaisse, de façon à atteindre, dans la majorité des cas, une couche où l'humidité varie très peu au cours de la saison. Cependant, comme le soulignent divers auteurs, (DAUDET et VALANCOGNE, 1976 ; VACHAUD et al, 1978 ; SICOT, 1978), rien ne permet d'affirmer, en toute rigueur, que de très faibles variations d'humidité traduisent nécessairement des flux d'eau presque nuls. Une teneur en eau constante peut traduire, non pas un flux nul, mais un régime permanent. En outre, même si le flux hydrique est très faible, l'intégration sur de longues périodes peut mettre en jeu des quantités d'eau importantes.

Le détermination des flux profonds, dans l'étude du bilan hydrique, peut être soit déduite du bilan, en connaissant avec précision l'ETR (éapotranspiromètres pesables ou bilan d'énergie : DAUDET et VALANCOGNE, 1976), soit calculée à partir de la loi de DARCY généralisée :  $Q = -K (Hv) \Delta H / \Delta z$ , après avoir déterminé la relation entre conductivité hydraulique et humidité volumique  $K (Hv)$ , et en connaissant les profils de potentiel dans le sol (DAUDET et VALANCOGNE, 1976 ; VACHAUD et al., 1978). Ces méthodes ne pouvaient pas être utilisées dans la présente étude par manque de matériel et en raison de l'éloignement des stations.

Les travaux mettant en évidence l'existence de flux profonds importants, sans variation d'humidité ont été effectués soit dans le cas où la couche profonde est humide en permanence, cas des limons de plateau de Versailles (DAUDET et VALENGOGNE, 1976), soit dans des sols sableux soumis à de fortes irrigations (VACHAUD et al, 1978), ce qui représente des conditions totalement différentes de celles rencontrées ici, où la couche présentant une humidité stable est une couche sèche, dont la conductivité hydraulique est très faible : inférieure à  $0,2 \text{ mm.j}^{-1}$  (VACHAUD et al 1978). La perte maximum possible en saison des pluies serait donc de 12 mm en supposant un régime de chainage permanent, ce qui est inférieur à la précision des mesures. On peut donc, sans grand risque d'erreur, utiliser l'expression tronquée du bilan hydrique pour calculer ETR, lorsque l'humidité de la couche profonde est stable, et lorsque le ruissellement est négligeable ou estimé par ailleurs.

### 2.3.1. - Bilan hydrique du sol à FETE-OLE.

Les tableaux Ia, Ib, Ic, Id de l'annexe X montrent, pour trois sites de la toposéquence : dunes, pentes et bas de pentes, les variations des valeurs mesurées des réserves hydriques totale et utile, au cours des 4 années de mesure. Ces valeurs font ressortir que la totalité des réserves est généralement évaporée chaque année. Cependant, en 1975-76 une partie de la réserve utile en bas de pente a persisté jusqu'aux pluies de la saison 1976.

La durée durant laquelle il existe une réserve d'eau utile en dune et en pente est généralement faible. Elle varie considérablement avec les précipitations de l'année. Ainsi en 1975, année moyenne, on note la présence d'eau utilisable pendant 94 jours ; en 1977, année sèche, la réserve utilisable n'est reconstituée que pendant des périodes très courtes, soit 35 jours au total. En 1978 les grosses pluies de début août ont, malgré le ruissellement, permis la constitution des réserves sur 80 cm et le sol a pu jouer le rôle de volant hydrique. En bas de pente, au contraire, quelle que soit l'année, le bilan hydrique est plus favorable. Le ruissellement apporte des quantités d'eau supplémentaires assurant la constitution de réserves importantes.

L'étude des profils hydriques, et de l'évolution des réserves, montre l'existence d'une redistribution importante, à partir des dunes et des pentes vers les bas de pentes et les bas-fonds. Excepté en 1977, année sèche, le front d'humectation atteint et dépasse trois mètres en bas de pente ; il y a donc drainage profond. Les essais de mesure du ruissellement ont échoué, en raison de la faible pente et de la nature sableuse du substrat. En effet, l'installation de parcelles de ruissellement entraîne des perturbations suffisantes pour faire disparaître celui-ci à leur niveau. Dans ces conditions, l'utilisation de la relation simplifiée du bilan hydrique pour le calcul des pertes par évapotranspiration n'est pas possible, pour les périodes présentant du ruissellement ou du drainage. Cependant, nous avons essayé d'effectuer le calcul approché du bilan hydrique grâce à quelques hypothèses simplificatrices basées sur les observations, pour les deux années les moins complexes, 1975 et 1977.

Nous avons les relations suivantes, en absence vérifiée de drainage :

$$\begin{array}{ll} \text{en dune} & \Delta S_1 = P - ETR_1 + r_1 \\ \text{en pente} & \Delta S_2 = P - ETR_2 + r_2 \\ \text{en bas de} & \Delta S_3 = p - ETR_3 + r_3 \\ \text{pente} & \\ \text{en replat} & \Delta S_4 = P - ETR_4 \end{array}$$

Le long de la toposéquence, les dunes représentent 20 % de la surface, les pentes 40 %, les bas de pente et bas fond 20 %, également les replats représentent 20 %, mais ne participent pas à la redistribution de l'eau. En supposant : le flux d'eau conservatif du haut vers le bas de la toposéquence, et l'alimentation des bas de pente et bas fond par les dunes et les pentes, on a, par unité de surface, la relation :

$$\begin{array}{l} 2 r_1 + 4 r_2 = - 2 r_3 \\ \text{ou } P - \Delta S_1 - ETR_1 + 2 (P - \Delta S_2 - ETR_2) = - (P - \Delta S_3 - ETR_3). \end{array}$$

En 1975 et 1977, les pluies ayant ruisselées se sont produites au début de végétation, alors que la végétation présente est très faible à tous les niveaux ; on peut donc faire l'hypothèse que ETR est faible, et que  $ETR_1 \neq ETR_2 \neq ETR_3$ , au moins pour de courtes périodes, ce qui permet de calculer ETR moyen. En début de saison, il n'y a pas de drainage en 1975, et durant toute la saison en 1977.

Les tableaux Ia, Ib en annexe XII montrent le calcul du bilan hydrique du sol pour chaque période durant les années 1975 et 1977. En 1976 et 1978, l'action combinée du ruissellement et du drainage rend impossible le calcul. Les figures 46 et 47 donnent une représentation des divers éléments du bilan hydrique respectivement pour 1975 et 1977. L'ETP, les précipitations, l'évolution de la réserve totale sur 100 cm et les valeurs d'ETR en dune, pente et bas de pente sont portées pour chaque période correspondant à l'intervalle entre deux mesures.

Pour 1975, l'évolution de l'ETR montre le très bas niveau de celui-ci en période sèche, de l'ordre de  $0,1 \text{ mm j}^{-1}$ . On constate une valeur plus élevée de ETR sur une courte période lors des premières pluies. Ces pluies tombent sur un sol très desséché et chaud ; elles sont très rapidement évaporées. Ensuite, pour la période du 5 juillet au 15 août, malgré des précipitations abondantes, l'ETR reste faible pour l'ensemble des sites, ce qui correspond à la lente mise en place de la couverture végétale herbacée à partir des germinations. C'est aussi la phase de constitution de la réserve du sol. L'ETR croît ensuite régulièrement durant fin août et début septembre, période qui correspond au maximum de croissance végétale. Pour les dunes et les pentes, le maximum d'ETR ( $4,6$  et  $3,5 \text{ mm j}^{-1}$ ), demeure sensiblement inférieur aux valeurs de l'ETP, le rapport ETR/ETP est alors de  $0,8$  et  $0,65$ . Pour ces deux sites, l'ETR décroît rapidement dès la mi-septembre avec l'épuisement des réserves du sol. En bas de pente, au contraire, l'ETR reste élevée du 5 septembre au 15 octobre, le rapport ETR/ETP étant de :

0,97 du 4 au 16-9  
0,92 du 16-9 au 1-10  
0,93 du 1-10 au 15-10

L'ETR décroît ensuite, mais moins rapidement, l'évapotranspiration est alors due, en grande partie, aux ligneux, assez abondants en bas de pente.

La figure 48 montre la représentation en courbes cumulées des principaux éléments du bilan hydrique. Cette figure fait ressortir l'importance de l'ETR en bas de pente, par opposition aux dunes et aux pentes. L'ETR en bas de pente est supérieure aux précipitations. Pour la période du 29-6-75 au 21-12-75, nous avons :

Précipitations	:	311,2 mm
ETR dune	:	216,4 mm
ETR pente	:	206,4 mm
ETR bas de pente	:	448,4 mm
ETR replat	:	309,0 mm

Le drainage en dune et pente est nul ; en bas de pente, le calcul conduit à une estimation de 75 mm.

Pour 1977, les ETR évoluent de façon comparable à celles de 1975, mais les valeurs maximums atteintes sont beaucoup plus faibles, en liaison avec une végétation peu abondante :

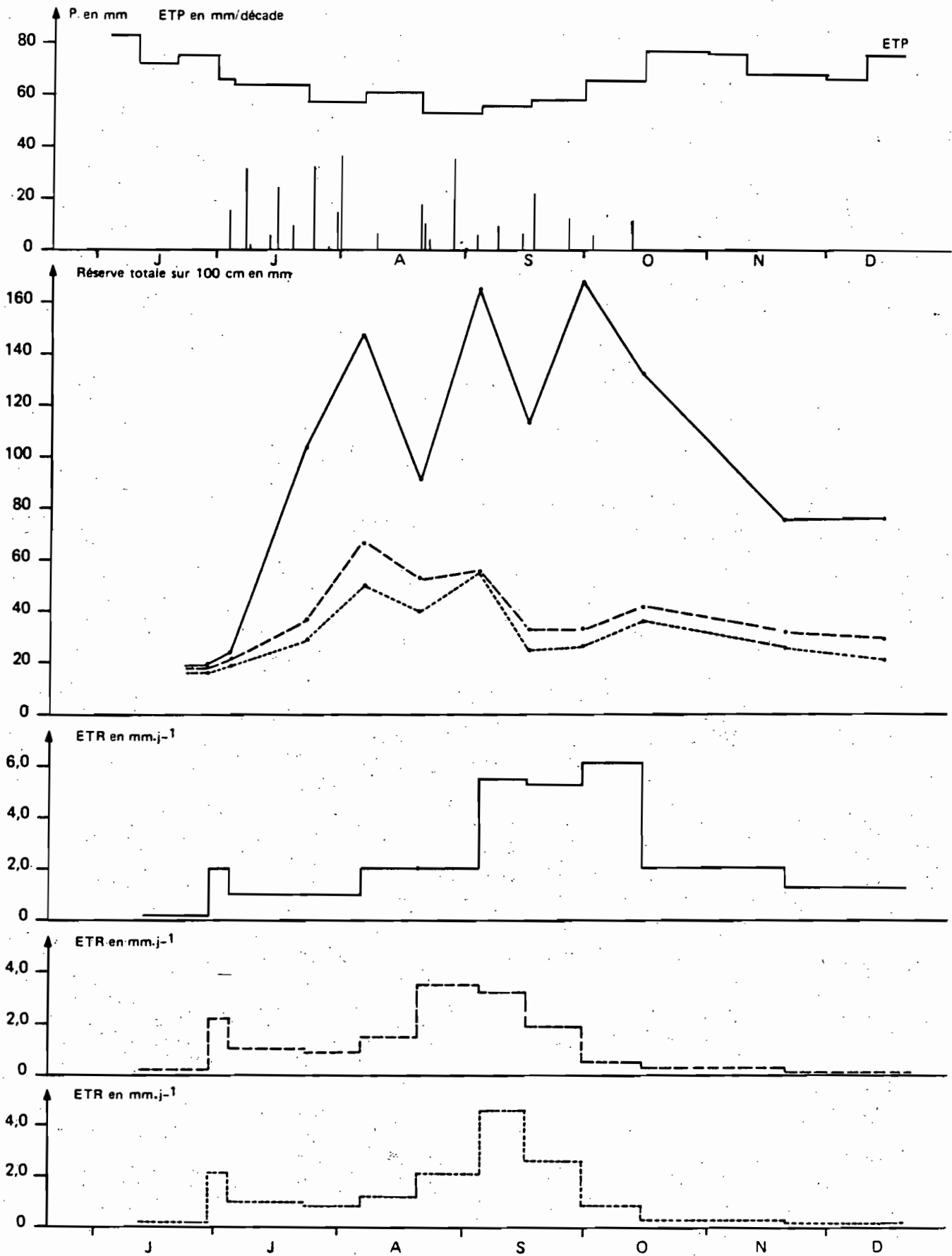


Fig. 46 FETE - OLE 1975 Éléments mesurés ou calculés du bilan hydrique

..... Dune      - - - - - pente      \_\_\_\_\_ Bas de pente

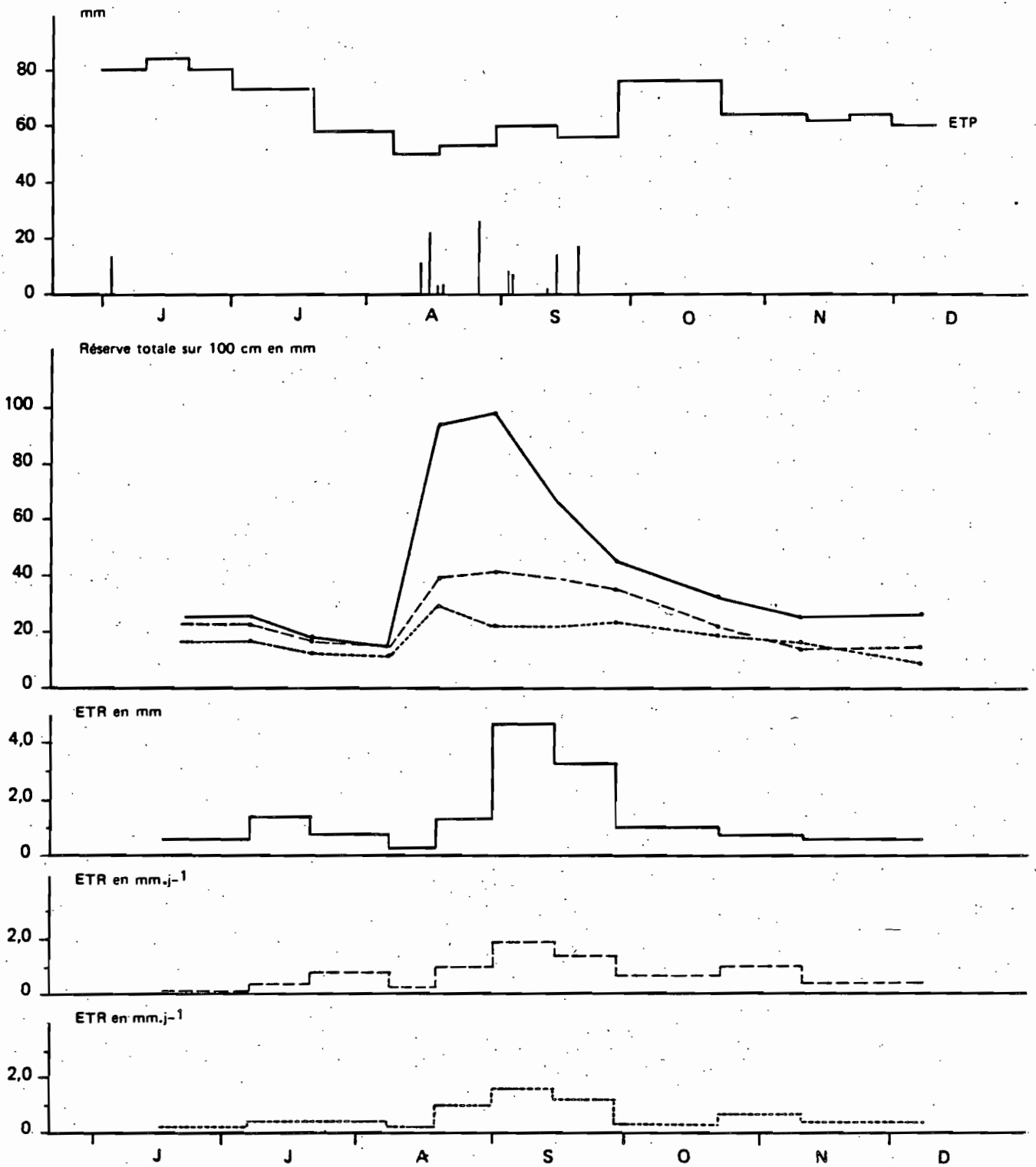


Fig. 47 FÉTÉ - OLÉ 1977 Éléments mesurés ou calculés du bilan hydrique

..... Dune      - - - - - Pente      ——— Bas de Pente

En dune	1,6 mm j <sup>-1</sup>	du 30-8	au 13-9	avec ETR/ETP = 0,27
En pente	1,9 mm j <sup>-1</sup>	du 30-8	au 13-9	avec ETR/ETP = 0,32
En bas de pente	4,7 mm j <sup>-1</sup>	du 30-8	au 13-9	avec ETR/ETP = 0,79

Pour la période du 5 juillet au 7 décembre 1977, nous avons :

Précipitations	:	126,2 mm
ETR dune	:	100,7 mm
ETR pente	:	130,3 mm
ETR bas de pente	:	218,4 mm
ETR replat	:	128,3 mm

Le drainage est nul dans les trois sites. Durant la saison sèche 1977-78, le dessèchement du sol sera plus prononcé, notamment en pente et bas de pente, que durant les autres saisons sèches.

L'observation de l'évolution des profils hydriques et des réserves montre que 1976 a connu un régime assez semblable à celui de 1975. Cependant, le raccourcissement de la période pluvieuse et la diminution du nombre de jours de pluie font que la période durant laquelle de l'eau disponible est présente dans le sol est plus courte, et les pertes par drainage plus importantes.

Le tableau IL donne les périodes durant lesquelles l'eau disponible est présente dans le sol.

On voit que 1975, bien que n'étant pas l'année la plus pluvieuse, est celle qui paraît le plus favorable pour la végétation, grâce à une bonne répartition. Pour 1978, il faut noter l'existence d'une période humide précoce (11-6 au 26-6), qui provoqua le départ de la végétation, mais qui fût suivie d'une période sèche entraînant la mort des espèces levées. Un nouveau départ de végétation se produisit lors de fortes pluies de début août.

TABLEAU IL - PERIODES DURANT LESQUELLES DE L'EAU DISPONIBLE EST PRESENTE DANS LE SOL, à FETE-OLE.

Zone considérée	Année	Périodes où RU ≠ 0	Périodes sèches intercalaires	Nombre de jours où RU ≠ 0
Dunés et pentes 0-300 cm	1975	3-7 au 5-10	0	94
	1976	18-7 au 10-10	25-7 au 2-8	76
	1977	13-8 au 25-9	5-9 au 13-9	35
	1978	11-6 au 26-6	27-6 au 3-8	16
		3-8 au 5-10	27-8 au 2-9	52
Bas de pente 0-100 cm	1975	3-7 au 31-12	0	181
	1976	18-7 au 20-10	25-7 au 2-8	86
	1977	13-8 au 25-9	0	43
	1978	11-6 au 27-6	27-6 au 3-8	16
		3-8 au 15-10	0	73
Bas de pente 100-300 cm	1975	7-7 au 31-12		177
	1976	1-1 au 31-12		366
	1977	1-1 au 30-10		30
	1978	26-8 au 1-10		35
		3-8 au 15-10		73

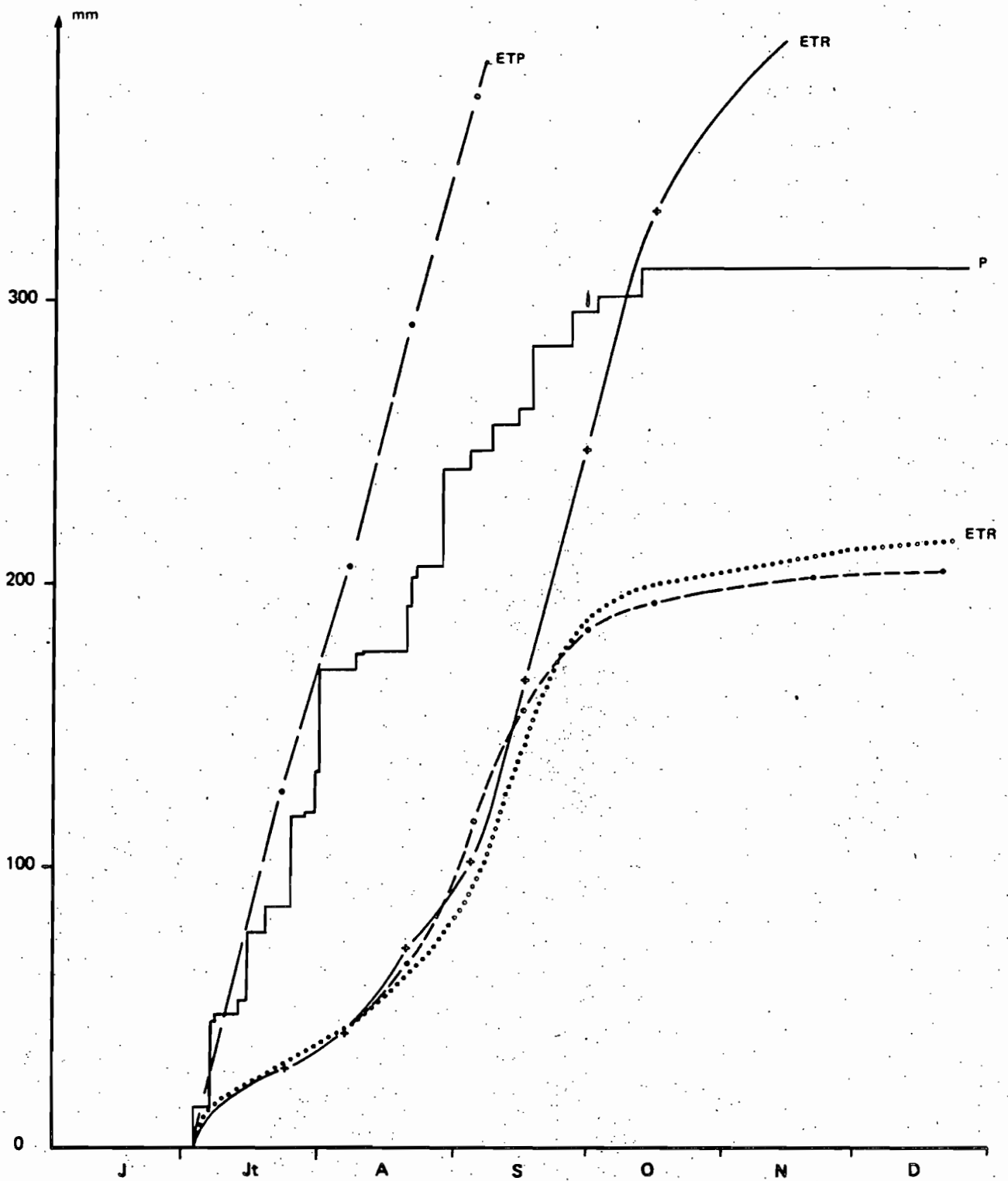


Fig. 48 FETE-OLE 1975. Éléments du bilan hydrique en représentation cumulée

Évapotranspiration potentielle :	ETP	—○—	
Précipitations	P	— —	
Évapotranspiration réelle : ETR	}	dune	.....
		pente	—○—
		bas de pente	—+—

2.3.2. - Bilan hydrique du sol à DAHRA-nord.

Les tableaux IIa à II d en annexe XI donnent, pour les trois sites : dune, pente et bas fond, la variation des valeurs mesurées des réserves hydriques totale et utile au cours des saisons 1975 à 1978. On constate que la capacité de rétention est atteinte rapidement dans la couche 0-30 cm, et moins rapidement et moins fréquemment dans l'horizon 30-100 cm. La redistribution de l'eau, qui s'effectue sous l'action combinée de la pesanteur et des forces de succion exercées par la couche sèche sous-jacente, permet l'humectation d'une partie de la couche 100-300 cm, mais celle-ci est rapidement limitée par la rétention de l'eau dans les couches supérieures. Aucun ruissellement, ni aucun drainage n'ont été constatés durant les 4 années de mesure. L'humidité du sol, généralement stable en saison sèche semble décroître en 1977 et 1978, à la suite de saisons pluvieuses déficitaires. La totalité de la réserve utile est totalement évaporée chaque année, ce qui pose le problème de maintien en dune des rares espèces herbacées vivaces, passant la saison sèche à l'état de vie ralentie.

Une bonne infiltration de l'eau dans le sol permet à ce dernier de jouer correctement le rôle de volant hydrique, excepté en 1978, où les averses ayant été de faible importance et espacées, il y a eu des périodes sèches intercalaires durant lesquelles la réserve utile était nulle pour l'ensemble du sol.

Le tableau L montre les périodes durant lesquelles de l'eau disponible est présente dans le sol et le nombre de jours où RU  $\neq$  0.

TABLEAU L - PERIODES DURANT LESQUELLES DE L'EAU DISPONIBLE EST PRESENTE DANS LE SOL, à DAHRA-NORD.

Zone considérée	Année	Périodes où RU $\neq$ 0	Périodes sèches intercalaires	Nombre de jours où RU $\neq$ 0
Dunes pentes bas-fond 0-100 cm	1975	3-7 au 6-11	0	126
	1976	14-7 au 5-12	25-10 au 1-11	137
	1977	7-7 au 30-10	0	115
	1978	11-6 au 10-11	30-6 au 5-7 25-7 au 30-7 25-8 au 2-9	139
Dunes pentes bas-fond 100-300 cm	1975	30-7 au 31-12	0	154
	1976	1-1 au 10-2		41
	1977	14-8 au 10-12		118
	1978	16-8 au 30-11 16-9 au 25-11		106 70



En l'absence de ruissellement et de drainage (le front d'humectation n'a jamais dépassé la zone contrôlée) il est possible d'utiliser l'équation simplifiée du bilan hydrique  $ETR = P - (\Delta S)_0^z$  pour calculer l'ETR. Les tableaux IIa à II d en annexe XII montrent le calcul pour chaque intervalle entre deux mesures. La précision sur ETR est fonction de la précision sur P, et surtout de celle sur  $\Delta S$ . Malgré le petit nombre de répétitions pour chaque mesure, l'homogénéité du sol rend la précision sur  $\Delta S$  acceptable (9 à 15 %). Le tableau LI donne les valeurs calculées de ETR en  $mm\ j^{-1}$  et les valeurs d'ETP bac calculées pour les mêmes périodes. On constate que quelques valeurs de ETR en période humide (notamment en 1975) sont très légèrement supérieures à ETP. On peut penser que cela provient d'une sous-estimation systématique de cette dernière durant les périodes humides, par la méthode du bac (cf. chapitre III § 1.2.3.1.). Les figures 49 et 50 montrent les variations des valeurs de ETP et ETR pour les 4 années de mesure. Le tableau LI donne également les valeurs totales annuelles des précipitations, des ETP et des ETR. Les totaux annuels montrent, pour 1976 et 1977, des valeurs d'ETR faiblement supérieures aux précipitations correspondant à un dessèchement plus prononcé du sol en saison sèche.

En 1975, les ETR s'accroissent rapidement début juillet (figure 49). Cette augmentation est plus rapide en dune qu'en bas de pente et bas fond. Cela peut être relié à la présence d'espèces herbacées vivaces et d'annuelles précoces à cycle court (*Molluginacées*, *Zygophyllacées*) abondantes cette année-là, alors qu'en pente et en bas fond le peuplement graminéen annuel dominant se met en place plus lentement. Un premier maximum de ETR, proche de ETP, est atteint début août, après une période très pluvieuse favorable à la mise en place du peuplement herbacé. La diminution des pluies en août entraîne une régression et un palier pour les ETR. Un second maximum se produit fin septembre. Courant octobre, on assiste à une chute de ETR liée au déperrissement progressif de la végétation herbacée annuelle.

Les pluies de mi-juillet 1976 provoquent une humectation permettant le départ de la végétation, mais l'accroissement des ETR en début de saison est beaucoup plus lent que l'année précédente ; des valeurs supérieures à  $3\ mm\ j^{-1}$  ne sont atteintes qu'à partir du 25-8, mais elles se prolongent jusqu'au 10-10, une décroissance se produit alors.

Le début de saison 1977 est marqué par des averses de faible importance, espacées, ne parvenant pas à reconstituer de réserve efficace. Les ETR (figure 50) restent très basses jusqu'à fin juillet où un premier accroissement se produit. A partir de la mi-août, les ETR croissent avec l'augmentation du couvert végétal, jusqu'à début septembre où elles sont maximums. La décroissance est ensuite assez rapide.

En 1978 la saison des pluies est longue, les épisodes pluvieux sont de faible importance et espacés. Il n'y a pas de reconstitution importante des réserves, si ce n'est fin septembre. Les valeurs de ETR présentent deux maximums, fin juillet et fin septembre, correspondant aux deux périodes actives de végétation.

TABLEAU LI DAHRA-NORD VALEURS CALCULEES DE ETR EN mm. j<sup>-1</sup>

1 9 7 5					1 9 7 6					1 9 7 7					1 9 7 8				
Période	ETP	ETR			Période	ETP	ETR			Période	ETP	ETR			Période	ETP	ETR		
		D	P	BF			D	P	BF			D	P	BF			D	P	BF
					6/2-24/3	6,4	0,2	0,15	0,2	11/1-15/2	6,9	0,2	0,1	0,4	12/1-21/2	5,7	0,2	0,3	0,1
					24/3-4/5	9,0	0,1	0,3	0,2	15/2-3/5	9,0	0,05	0,05	0,02	21/2-30/3	6,2	0,2	0,3	0,1
					4/5-1/6	9,5	0,1	0,3	0,2	3/5-1/6	9,7	0,02	0,04	0,01	30/3-27/5	7,9	0,1	0,04	0,03
					1/6-30/6	8,3	0,2	0,4	0,2	1/6-28/6	7,2	0,4	0,8	0,2	27/5-20/6	7,7	0,6	0,5	0,6
27/2-3/7	5,7	0,1	0,1	0,1	30/6-16/7	7,2	0,3	0,1	0,1	28/6-20/7	7,1	0,4	0,2	0,6	20/6-3/7	6,3	1,6	1,8	1,9
3/7-18/7	4,9	3,8	2,4	1,4	16/7-27/7	6,7	1,4	1,6	2,1	20/7-1/8	5,9	1,3	2,1	2,2	3/7-19/7	5,4	1,8	1,5	1,8
18/7-29/7	4,4	3,1	4,1	3,6	27/7-10/8	7,0	2,3	2,2	1,8	1/8-8/8	7,2	0,6	0,2	0,2	19/7-30/7	5,6	4,5	4,7	4,3
29/7-12/8	4,8	4,5	5,4	4,7	10/8-25/8	5,0	2,2	1,2	1,2	8/8-25/8	6,0	0,9	2,4	0,9	30/7-9/8	5,3	1,6	2,2	3,0
12/8-26/8	4,3	3,0	3,8	4,8	25/8-7/9	5,5	3,9	4,5	4,5	25/8-2/9	5,6	2,7	2,4	3,2	9/8-18/8	5,7	1,9	0,8	0,7
26/8-17/9	4,7	4,0	3,9	3,2	7/9-22/9	4,9	4,4	3,7	3,5	2/9-9/9	5,3	4,9	2,6	5,6	18/8-22/8	5,9	1,1	1,4	0,8
17/9-2/10	5,2	4,8	5,1	5,7	22/9-12/10	4,6	3,3	4,0	4,0	9/9-22/9	4,5	3,3	4,2	3,5	22/8-30/8	6,1	1,3	1,6	1,5
2/10-6/11	5,0	2,3	2,4	2,6	12/10-4/11	6,0	1,9	2,6	2,7	22/9-5/10	5,6	3,3	3,9	4,5	30/8-10/9	6,1	1,4	1,1	2,5
6/11-11/12	5,2	0,8	0,7	0,7	4/11-18/11	5,9	1,4	1,0	1,3	5/10-19/10	5,8	2,1	1,0	3,4	10/9-21/9	5,5	1,0	0,9	1,7
11/12-6/2	5,0	0,2	0,2	0,1	18/11-30/11	6,1	0,8	0,9	1,2	19/10-12/1	6,0	0,8	0,9	0,3	21/9-30/9	5,3	4,5	4,1	4,8
					30/11-15/12	5,0	1,4	0,3	0,5						30/9-26/10	8,9	1,7	1,0	1,5
					15/12-11/1	4,4	0,5	0,3	0,1						26/10-22/11	7,2	1,6	1,4	0,8
															22/11-19/12	8,8	0,5	0,9	0,4
TOTAL du 27/6 au 31/12					TOTAL annuel					TOTAL annuel					TOTAL annuel				
ETP : 920 mm					ETP : 2332 mm					ETP : 2550 mm					ETP : 2242 mm				
Pluies : 483,4 mm					Pluies : 395,6 mm					Pluies : 305,4 mm					Pluies : 362,6 mm				
ETR dune : 470 mm					ETR dune : 404 mm					ETR dune : 307 mm					ETR dune : 363 mm				
pente: 482 mm					pente: 408 mm					pente: 324 mm					pente: 351 mm				
bas fond : 467 mm					bas fond : 399 mm					bas fond : 315 mm					bas fond : 344 mm				

D = dune

P = pente

BF = bas fond

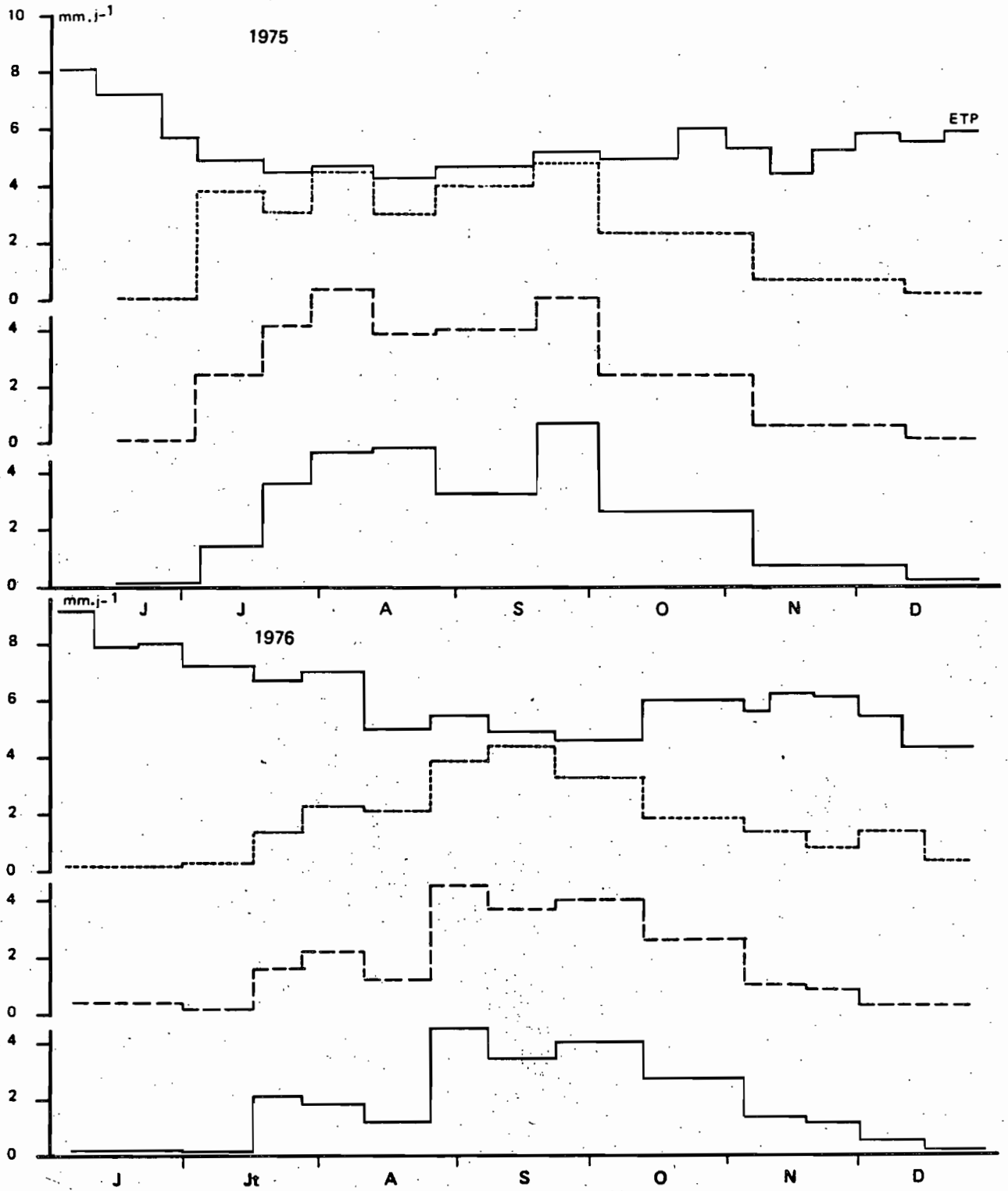


Fig. 49 Comparaison des valeurs d'ETR et d'ETP en 1975 et 1976 DAHRA NORD

ETR    - - - - - Dune    - - - - - Pente    - - - - - bas fond

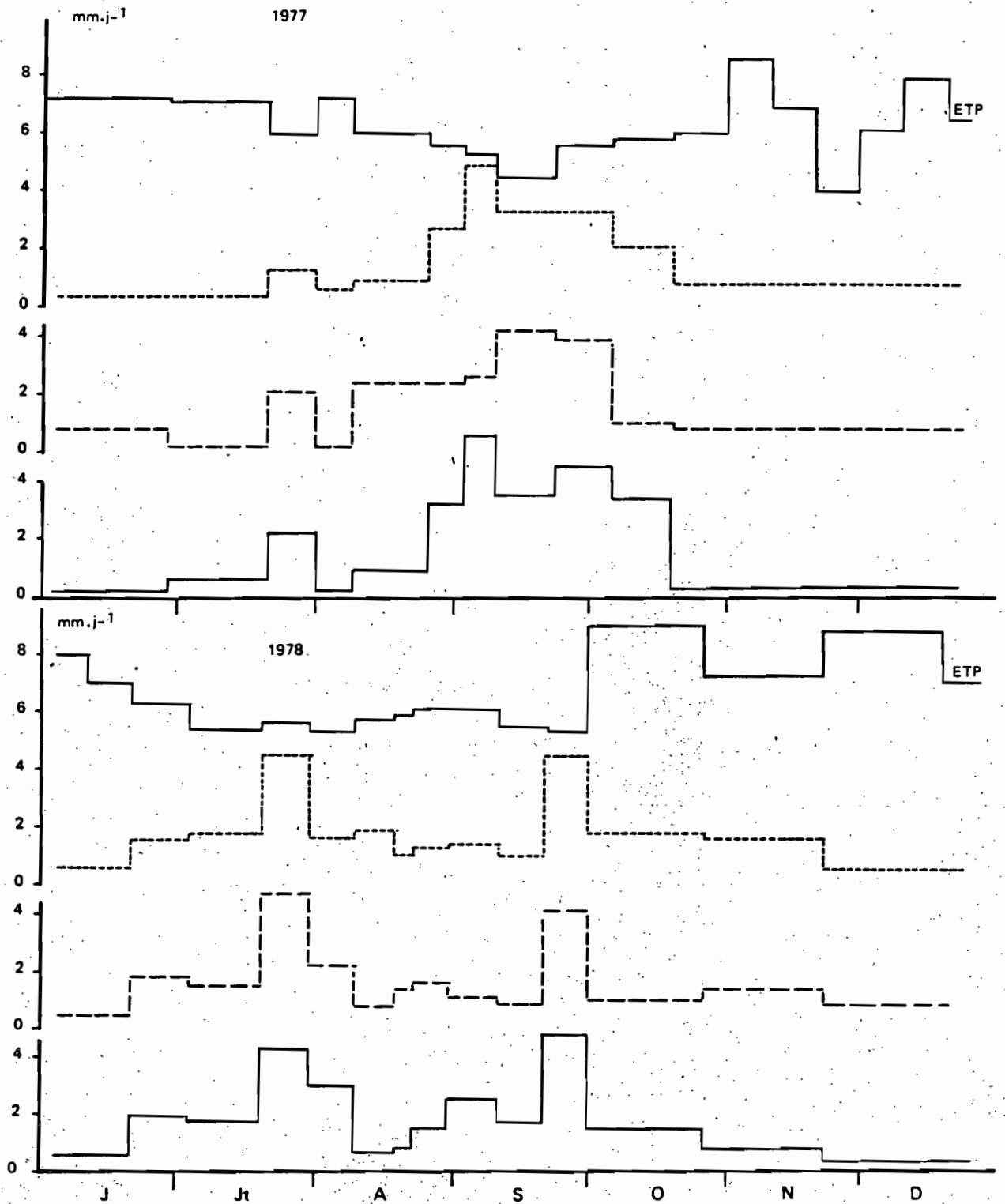


Fig. 50 DAHRA-NORD Comparaisons des valeurs d'ETR et d'ETP en 1977 et 1978

ETR    - - - - - dune    - - - - - pente    - - - - - bas fond

La figure 51 montre les courbes cumulées des divers éléments (P, ETP, ETR) pour la saison 1975. On note un démarrage rapide de ETR en début de saison, et un comportement peu différent des trois sites, malgré des caractéristiques de sol légèrement différentes.

A partir des valeurs de ETR obtenues, on peut déduire les valeurs ajustées du stock d'eau et représenter son évolution en fonction du temps (AUDRY, 1967). La précision sur les valeurs de S entre les points de mesure est fonction de celle sur ETR. Il est cependant intéressant de conserver à la courbe son allure en dents de scie, en fonction de chaque pluie. La figure 52 montre l'évolution de la réserve ainsi déduite dans la couche 0-100 cm pour les trois sites. Les valeurs correspondant aux réserves à pF 4,2, ainsi que la durée de la période de végétation des annuelles, ont été reportées sur la figure.

### 2.3.3. - Bilan hydrique du sol à DAHRA-sud.

Les variations de la réserve hydrique au cours des saisons 1976, 77 et 78, pour la zone de replats à DAHRA-sud, sont données au tableau III annexe XI. Une mauvaise perméabilité et une capacité de rétention élevée dans les horizons superficiels font que l'eau pénètre peu profondément. La couche 0-30 cm joue le rôle essentiel pour le stockage de l'eau. La couche 30-100 cm n'est rechargée en eau que faiblement et tardivement. La couche 100-300 cm est sèche durant les trois années de mesure. On note une faible variation du taux d'humidité dans sa partie supérieure, sans qu'il y ait toutefois de réserve utilisable. Des phénomènes d'engorgement temporaires sont constatés dans la couche superficielle. L'humidité du sol en saison sèche se situe à un niveau d'équilibre très inférieur à l'humidité à pF 4,2 et peu variable d'une année à l'autre.

L'absence de drainage et de ruissellement permet de calculer ETR à partir des précipitations et des variations de stock. Le tableau III en annexe XII montre le calcul du bilan pour chaque intervalle entre deux mesures. Le tableau LII donne les valeurs calculées de ETR et de ETP pour les trois années, ainsi que les valeurs totales annuelles.

On constate que chaque année, l'ETR totale est sensiblement égale aux précipitations. La réserve est très rapidement épuisée en fin de saison des pluies. Comme pour DAHRA nord, quelques valeurs d'ETR en période humide sont légèrement supérieures aux valeurs d'ETP. Cela peut être expliqué comme précédemment, par une sous estimation des valeurs d'ETP. Cependant, pour les valeurs du 10 au 20-9-78 (ETP = 5,5 mm j<sup>-1</sup> et ETR = 6,5 mm j<sup>-1</sup>) l'écart est très important ; il s'agit probablement d'une erreur de détermination de  $\Delta S$  donc de ETR.

A partir des valeurs d'ETR calculées on déduit les valeurs ajustées du stock d'eau entre les dates de mesure. Les figures 53 a, b et c représentent, pour les trois années mesurées, les principaux éléments du bilan hydrique du sol : ETP, P, variation du stock d'eau et ETR. On voit que l'accroissement des ETR est assez rapide après les premières pluies. La variation de ETR est très liée, au cours du temps, aux variations de pluviosité. Les histogrammes présentent plusieurs maximums correspondant aux périodes les plus pluvieuses.



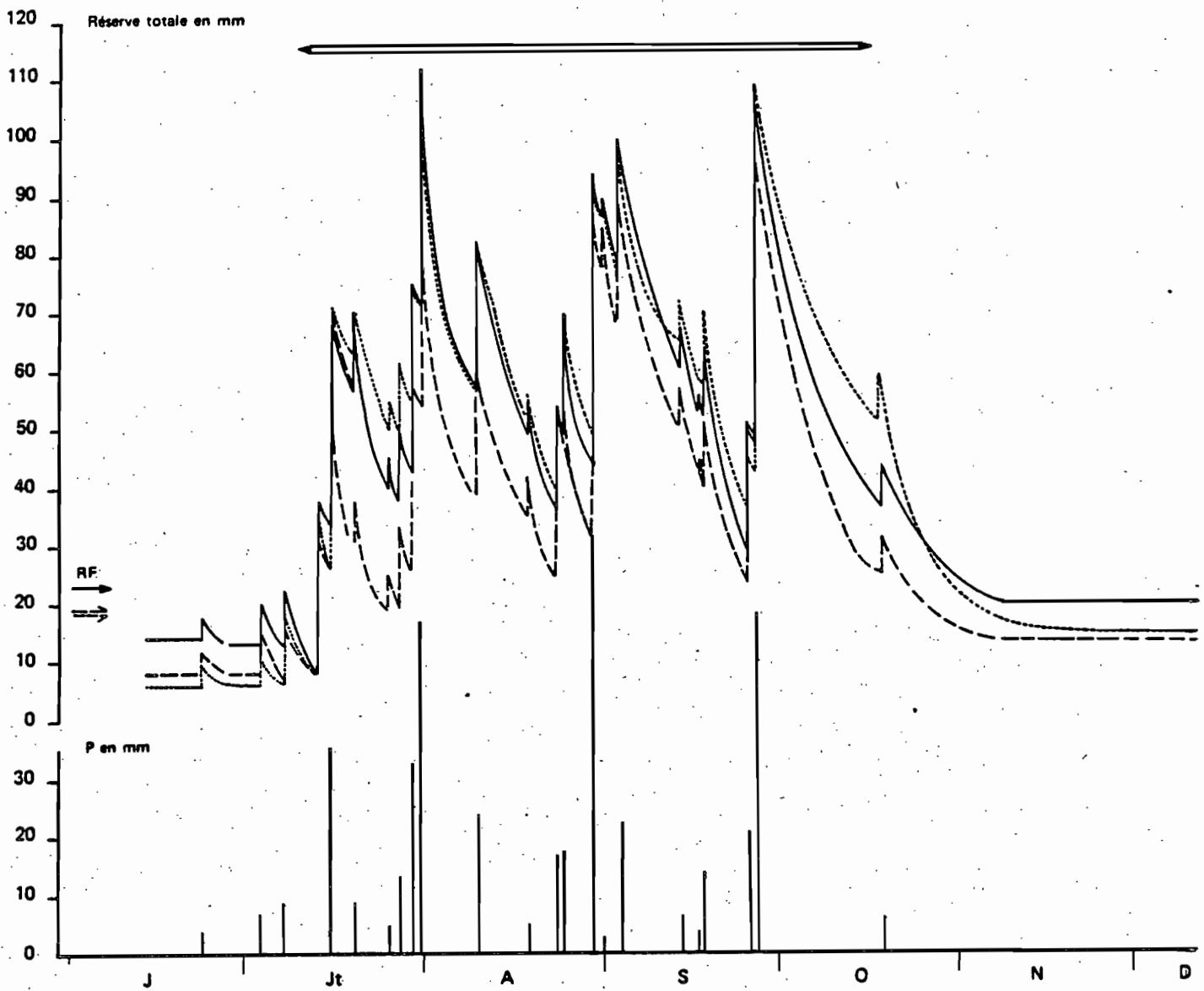


Fig. 52 DAHRA-NORD Variations de la réserve hydrique totale dans la couche 0-100 cm

--- dune      — pente      - · - · - bas-fond  
Rf → Réserve à pF 4,2  
← → Période de végétation des annuelles

TABLEAU L II - DAHRA SUD VALEURS CALCULEES DE ETP ET ETR EN mm j<sup>-1</sup>.

1 9 7 6			1 9 7 7			1 9 7 8		
Périodes	ETP	ETR	Périodes	ETP	ETR	Périodes	ETP	ETR
23/3 - 4/5	9.0	0.04	11/1 - 17/2	7.0	0.05	10/3 - 5/7	7.6	0.4
4/5 - 1/6	9.5	0.2	17/2 - 18/3	9.2	0.02	5/7 - 18/7	5.3	1.5
1/6 - 30/6	8.3	0.2	18/3 - 1/6	9.4	0.01	18/7 - 7/8	5.5	3.9
30/6 - 14/7	7.3	0.1	1/6 - 28/6	7.2	0.5	7/8 - 17/8	5.6	2.2
14/7 - 27/7	6.7	2.4	28/6 - 20/7	7.1	1.3	17/8 - 22/8	5.9	1.1
27/7 - 10/8	7.0	0.8	20/7 - 1/8	5.9	1.2	22/8 - 29/8	6.1	1.4
10/8 - 25/8	5.0	4.2	1/8 - 9/8	7.2	0.5	29/8 - 10/9	6.2	2.2
25/8 - 7/9	5.5	2.1	9/8 - 25/8	5.9	3.6	10/9 - 20/9	5.5	6.5
7/9 - 22/9	4.9	4.0	25/8 - 1/9	5.8	2.3	30/9 - 29/9	5.3	4.8
22/9 - 13/10	4.6	3.1	1/9 - 7/9	5.3	5.9	29/9 - 10/10	9.2	1.4
13/10 - 4/11	6.0	1.7	7/9 - 11/9	4.6	4.8	10/10 - 27/10	8.4	0.7
4/11 - 18/11	5.9	1.0	21/9 - 18/10	5.7	1.7	27/10 - 21/11	12.0	0.1
18/11 - 30/11	6.1	0.9	18/10 - 30/3	6.0	0.1	21/11 - 18/12	4.7	0.9
30/11 - 10/12	5.0	0.2						
16/12 - 11/1	4.4	0.3						
Total du 23/3 au 31/12			Total annuel			Total annuel		
Pluies	: 339.6 mm		Pluies	: 296.7 mm		Pluies	: 357.6 mm	
ETP	: 1926 mm		ETP	: 2550 mm		ETP	: 2242 mm	
ETR	: 338 mm		ETR	: 295 mm		ETR	: 371 mm	



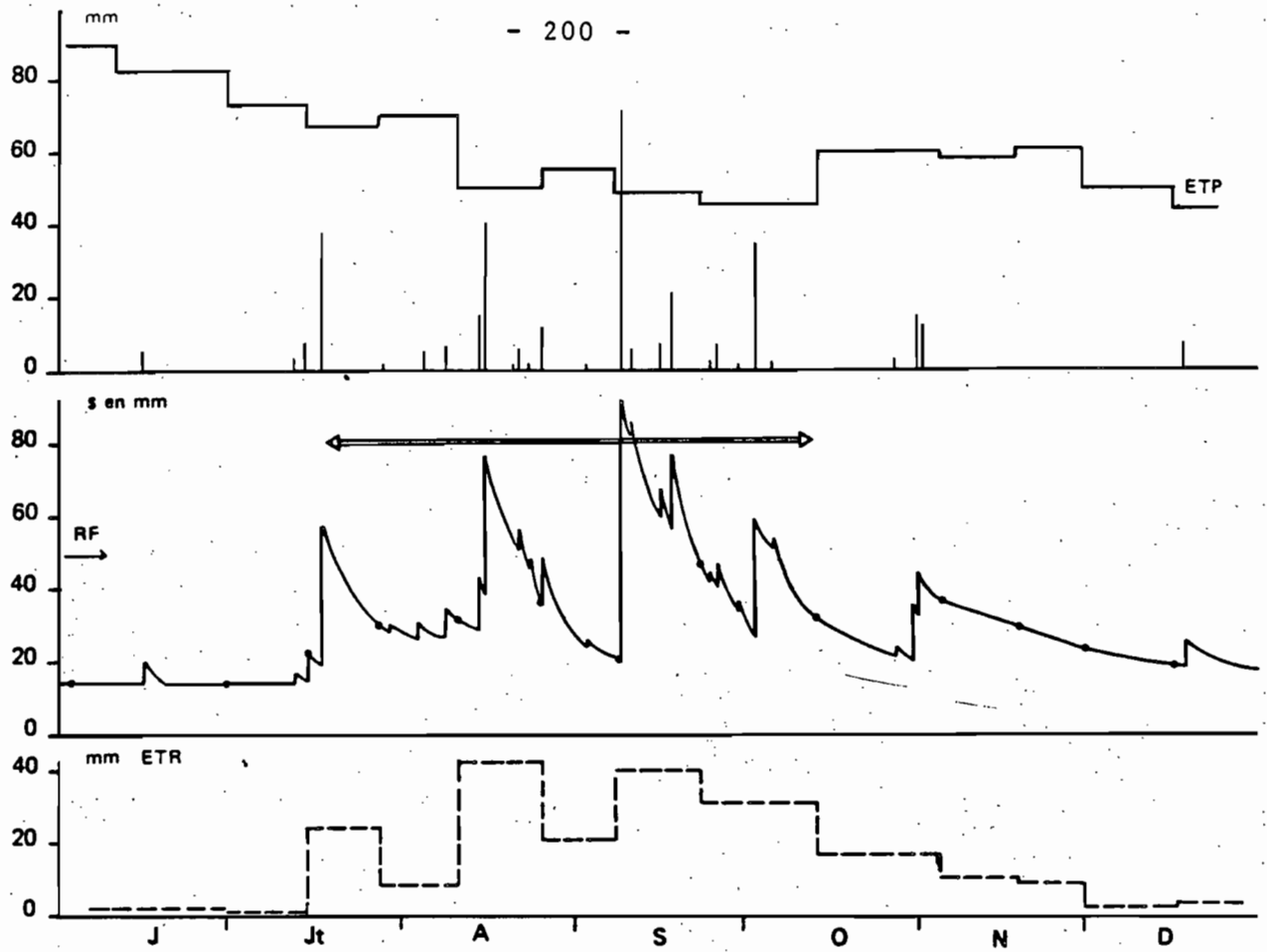


Fig. 53 a) DAHRA-SUD 1976

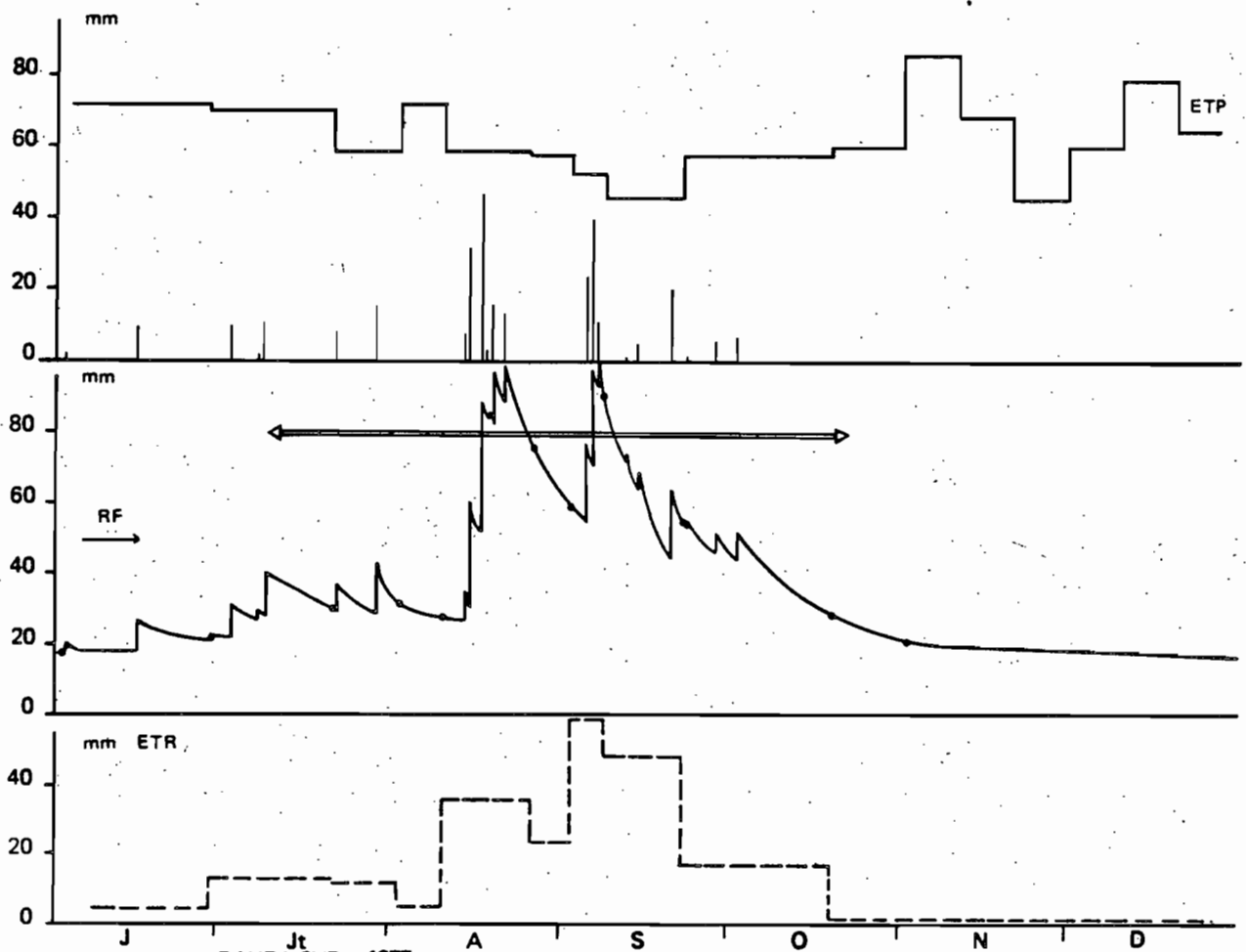
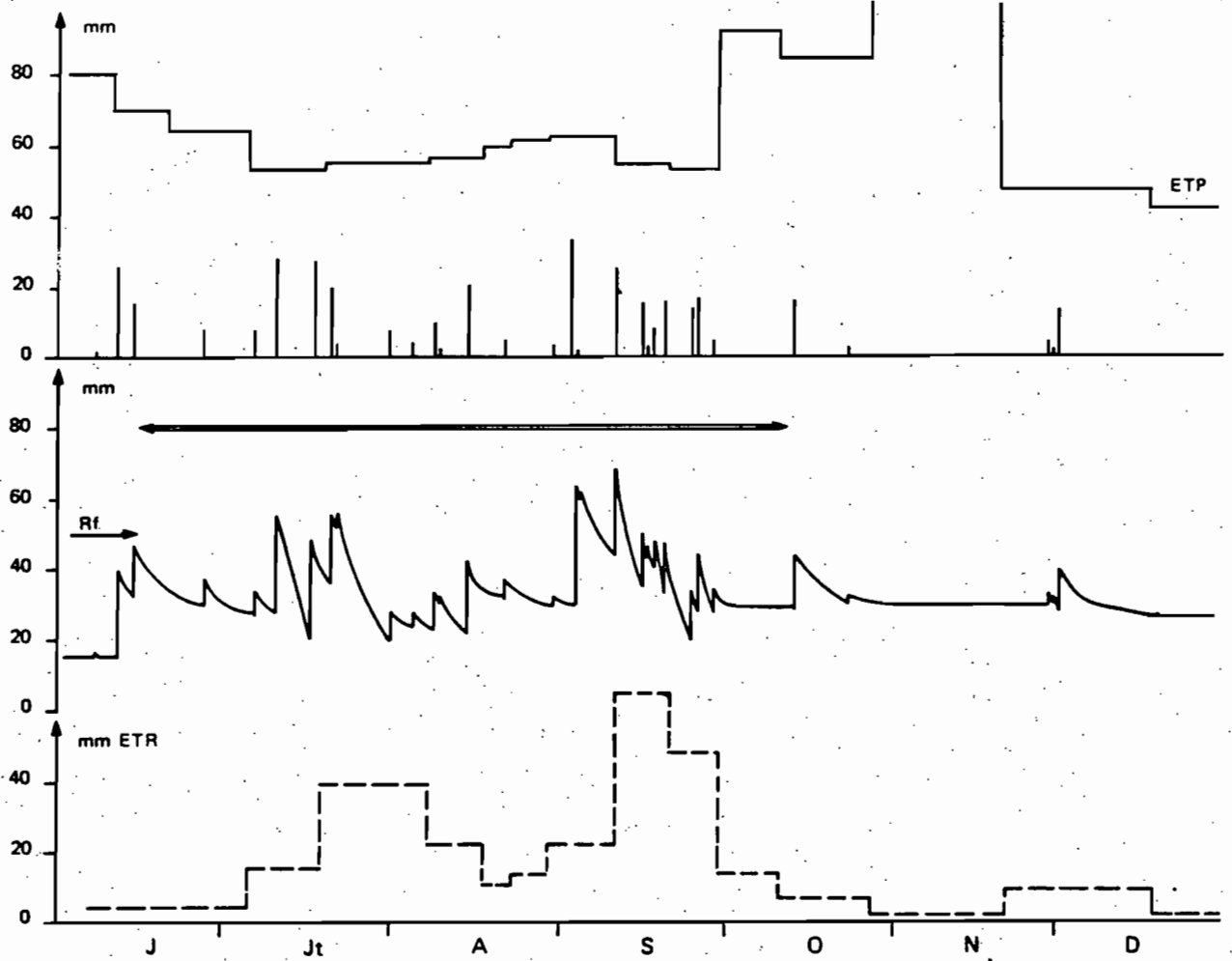








Fig. 53 b) DAHRA-SUD 1977



C - DAHRA-SUD 1978

Fig. 53 DAHRA-SUD Éléments du bilan hydrique

-  ETP bac calculée en mm décade<sup>-1</sup>
-  Précipitations en mm
-  S Réserve totale sur 100 cm en mm
-  ETR calculée en mm décade
-  Rf. Réserve à pF 4,2
-  Période de végétation des annuelles

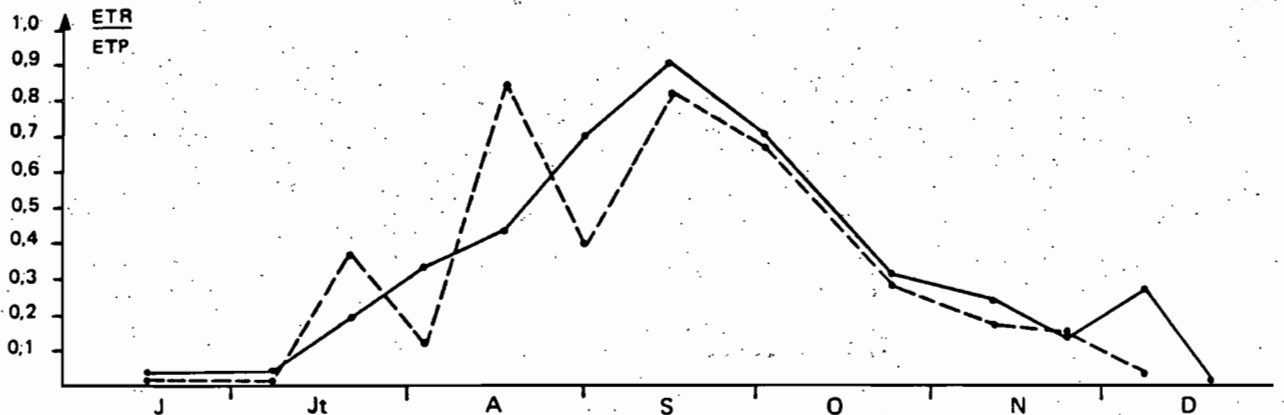


Fig. 54 Évolution comparée du rapport ETR /ETP à DAHRA-NORD dune et DAHRA-SUD replat en 1976

DAHRA-SUD - - - - - DAHRA-NORD ———

Le tableau LIII montre les périodes durant lesquelles de l'eau utilisable est présente dans le sol. Il est à remarquer que, pour une pluviosité comparable à celle de DAHRA-nord, les périodes où RU  $\neq$  0 sont beaucoup plus courtes ; ainsi, en 1976, on a 88 jours à DAHRA-sud, et 139 à DAHRA-nord. D'autre part, le nombre de périodes sèches intercalaires est plus élevé.

TABLEAU LIII - PERIODES DURANT LESQUELLES DE L'EAU DISPONIBLE EST PRESENTE DANS LE SOL, A DAHRA-SUD.

Zone considérée	Année	Période où RU $\neq$ 0	Périodes sèches intercalaires	Nombre de jours où RU $\neq$ 0
Ensemble du profil	1976	14-7 au 10-10	30-8 au 7-9	88
	1977	2-7 au 10-10	13-7 au 20-7	83
			2-8 au 12-8	
	1978	11-6 au 30-9	25-7 au 30-7 5-8 au 8-8 25-8 au 2-9	95

La figure 54 montre l'évolution comparée des rapports ETR/ETP à DAHRA-sud et DAHRA-nord d'une en 1977. On constate que pour DAHRA-nord le rapport ETR/ETP croît au cours de la saison, en relation avec le développement de la couverture végétale, pour atteindre son maximum en septembre. Pour DAHRA-sud, ce rapport s'élève rapidement après chaque période pluvieuse, pour décroître ensuite lorsque les pluies s'espacent. L'allure de la courbe montre une progression de ETR/ETP en fonction de l'accroissement du recouvrement herbacé au cours de la saison ; mais cette progression est masquée par les variations plus importantes liées à la pluviosité.

Alors qu'à DAHRA-nord, les précipitations pénètrent facilement dans le sol où elles sont stockées de façon efficace, à DAHRA-sud, la mauvaise perméabilité du sol l'empêche de jouer le rôle de volant hydrique. Lors des averses l'eau pénètre peu profondément, mais elle sature les horizons superficiels. Cette eau est rapidement reprise par l'évaporation directe, d'autant plus que le recouvrement végétal est faible. Pendant les périodes intercalaires non pluvieuses la végétation manque d'eau, en raison de la faiblesse des réserves. Par ailleurs l'eau présente dans le sol est plus énergiquement retenue dans un sol plus riche en éléments fins.

Pour des précipitations et des ETR totales annuelles comparables, les parcelles de DAHRA-nord et DAHRA-sud présentent des utilisations de l'eau très différentes : à DAHRA-nord, l'eau est stockée efficacement par le sol, elle est ensuite utilisée par les végétaux pour assurer leur transpiration au cours de la période de végétation. A DAHRA-sud, une partie importante des précipitations est perdue par évaporation directe au niveau du sol et une faible fraction seulement est utilisée par les plantes.

#### 2.3.4. - Evolution des réserves à DOLI-nord.

Le tableau IV annexe XI montre l'évolution des réserves hydriques en 1975 et 1976. On constate que le front d'humectation progresse rapidement jusqu'à trois mètres et que la reconstitution des réserves à un niveau proche de la capacité de rétention s'effectue sur l'ensemble du profil. Aucun ruissellement apparent n'a été constaté, une partie de l'eau infiltrée percole au-dessous de trois mètres. Une partie de cette eau est restituée au profil en saison sèche par remontée capillaire. L'étude des profils hydriques montre une concentration de l'eau dans les bas fonds, liée vraisemblablement à un phénomène de drainage oblique. En fin de saison des pluies les réserves de la couche 0-100 cm sont assez rapidement épuisées ; par contre, la couche 100-300 cm conserve de l'eau utilisable durant une grande partie de la saison sèche. Le sol joue efficacement le rôle de réserve hydrique pour la végétation.

Si l'on compare, pour les 4 stations, le nombre de jours où  $RU \neq 0$  pour la couche 0-100 cm, on a les résultats suivants :

<u>STATION</u>	<u>1975</u>	<u>1976</u>
FETE-OLE dune	94 j.	76 j.
DAHRA-nord dune	126	137
DAHRA-sud replats		88
DOLI-nord dune	160	124
FETE-OLE bas de pente	181	86
DAHRA-nord bas fond	126	137
DOLI-nord bas fond	365	366

On constate, pour DOLI-nord, un nombre plus élevé de jours où la végétation dispose d'eau utilisable. Cela est lié à un bilan hydrique climatique plus favorable : précipitations plus abondantes, saison des pluies plus longue, mais aussi, à un stockage efficace de l'eau dans le sol.

#### 2.3.5. - Discussion

L'étude du bilan hydrique du sol montre l'allure générale de l'évolution de ETR. En fin de saison sèche, les valeurs sont très faibles, voisines de  $0,1$  à  $0,2 \text{ mm.j}^{-1}$  et le rapport  $ETR/ETP = 0,01$  à  $0,02$ . On observe ensuite une phase de croissance lente de ETR correspondant à l'établissement progressif du couvert végétal. Les valeurs varient alors de  $1$  à  $3 \text{ mm.j}^{-1}$ , le rapport  $ETR/ETP$  variant de  $0,2$  à  $0,5$ . Cette phase coïncide avec la reconstitution des réserves du sol ; sa durée est variable, en moyenne du 15 juillet au 15 août. Elle est suivie par une phase d'ETR élevée, correspondant à la phase de croissance active de la végétation herbacée. Les valeurs observées varient de  $3,5$  à  $5,5 \text{ mm.j}^{-1}$ , le

rapport ETR/ETP diminuant à des valeurs de 0,3 ou 0,4. Elle est en relation avec le dessèchement du tapis herbacé. Elle est suivie d'une période de décroissance lente, ETR diminuant de 2 à 0,5 mm j<sup>-1</sup>. Durant cette période, l'ETR est essentiellement due à la transpiration du couvert arbustif.

Il est important d'observer que le dessèchement de la végétation herbacée ne semble pas correspondre à l'épuisement total des réserves utilisables du sol. Celui-ci serait plutôt dû à l'élévation importante des températures et de la demande évaporative en fin de saison des pluies, sans exclure pour autant l'action possible de la photopériode (DE VRIES, 1978).

La même évolution des valeurs d'ETR a été observée par STROOSNIJDER (1977) au Mali. Les valeurs de ETR, pour les différentes phases, sont très comparables, cependant, les valeurs maximales obtenues par cet auteur sont légèrement inférieures (voisines de 4 mm j<sup>-1</sup>) à celles obtenues ici, cela est vraisemblablement lié à une texture plus sableuse des sols de notre zone.

Globalement, à l'échelle d'une parcelle ( ≥ à 5 ha), pour des précipitations inférieures à 600 mm, l'ETR annuelle est égale aux précipitations annuelles. Au niveau de chaque site, l'interaction entre les éléments climatiques (importance et répartition des précipitations), la topographie, et les caractères des sols, entraîne de grandes différences, montrant dans ces zones l'importance de la redistribution latérale de l'eau, qui conditionne la répartition et la production du tapis végétal.

## 2.4. - Caractérisation des régimes hydriques des sols et du cycle de l'eau dans les toposéquences étudiées.

L'étude du bilan hydrique des sols permet de dégager les caractéristiques de chaque station sur le plan du cycle de l'eau le long des toposéquences étudiées.

### 2.4.1. - FETE-OLE

Dans cette station, le relief est sensible quoique faible (pente < à 3 %). Le sol développé sur formation dunaire ancienne est ferrugineux tropical peu lessivé. Il présente un gradient important de teneur en éléments fins vers la base du profil et vers le bas de la toposéquence. Le régime hydrique est très variable suivant la position topographique, avec des zones hautes déficitaires, servant d'impluvium à des zones basses à bilan plus favorable. A ceci correspond une végétation de type contracté, avec des divisions phytosociologiques marquées. La richesse floristique est assez importante.

La figure 55 montre la représentation des flux d'eau le long des toposéquences. Les flèches ont une largeur proportionnelle aux flux mesurés en année moyenne (1975). Ces différents flux sont, par ailleurs, très variables suivant la nature des précipitations.

En dune, le sol présente une surface encroûtée avec de nombreuses plages nues. La perméabilité est faible, l'infiltration peu importante et le sol est sec en permanence en profondeur. Des averses moyennes successives assurent une meilleure infiltration que les averses fortes. Le ruissellement est important, il n'y a pas de drainage profond. L'ETR est inférieure aux précipitations. La végétation herbacée est clairsemée, avec un faible développement. Elle est constituée essentiellement d'*Aristida spp.* La végétation ligneuse est peu abondante (296 individus par hectare en dune) et éparse (POUPON 1980).

Sur les replats (parties plates, généralement étroites, comprises entre deux éléments de pente) la surface du sol est non encroûtée. L'infiltration est bonne avec peu de ruissellement et pas de drainage profond. L'ETR annuelle est sensiblement égale aux précipitations. La végétation herbacée est plus continue. La végétation ligneuse est plus abondante : 1004 individus par hectare (POUPON, 1980), mais une forte mortalité s'est produite lors de la sécheresse.

Les pentes ont un comportement assez semblable aux dunes. L'encroûtement est moins marqué, mais la perméabilité reste peu importante. Le ruissellement est important, il n'y a pas de drainage profond. L'ETR annuelle est généralement inférieure aux précipitations. La végétation herbacée est moins diffuse qu'en dune, les plages nues sont plus rares. La végétation ligneuse est éparse et peu abondante : 492 individus par hectare (POUPON, 1980).

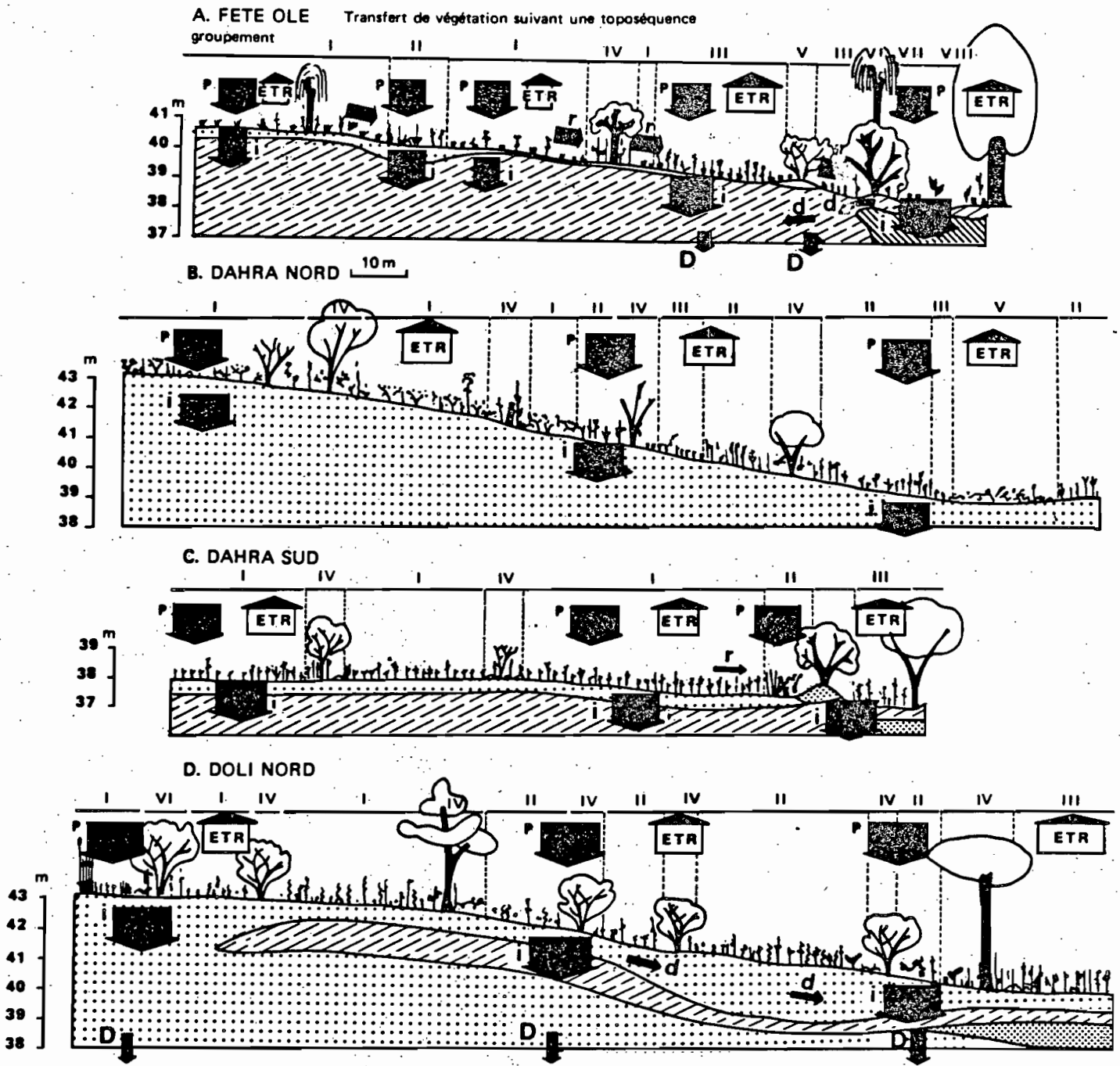


Fig. 55 Représentation des principaux éléments du cycle de l'eau le long des Toposéquences étudiées

- |      |                           |  |                    |
|------|---------------------------|--|--------------------|
| P.   | Précipitations incidentes |  | < à 10 % d'argile  |
| ETR. | Évapotranspiration réelle |  | 10 à 20 % d'argile |
| R.   | Ruissellement             |  | 20 à 30 % d'argile |
| I.   | Infiltration              |  | > 30 % d'argile    |
| D.   | Drainage                  |  |                    |
| d.   | Circulation latérale      |  |                    |

Les flèches sont proportionnelles aux valeurs de flux mesurées en année moyenne (1975)

En bas de pente, le sol est peu encroûté, mais présente des phénomènes de battance. La perméabilité est moyenne, la constitution des réserves est cependant bonne grâce aux apports d'eau par ruissellement. L'étude des profils hydriques et des réserves montre une réalimentation de la couche profonde (100 à 200 cm) à partir des bas fonds. Sauf durant les années sèches, il y a drainage en dessous de trois mètres. L'ETR est généralement supérieure aux précipitations. La végétation herbacée est assez dense et constituée d'espèces plus mésophiles (Panicées, Chloridées...). La végétation ligneuse est abondante : 1497 individus par hectare (POUPON, 1980).

Dans les dépressions, on distingue deux zones : la couronne de mare et la zone inondable, la mare temporaire proprement dite. En couronne de mare, bien que riche en éléments fins, le sol est meuble, avec une teneur en matière organique élevée, et une bonne perméabilité : il bénéficie des apports d'eau par ruissellement et de la redistribution à partir des mares. L'ETR annuelle est très supérieure à P. Le sol présente des phénomènes d'hydromorphie en profondeur. La végétation herbacée est abondante, avec de nombreuses espèces sciaphiles. Le boisement est important.

Les mares temporaires occupent le centre des dépressions ; le sol y est argileux, hydromorphe et battant en surface. L'infiltration est mauvaise. L'accumulation d'eau sous forme d'eau libre est toujours de courte durée. L'importance des couches d'argile empêche l'infiltration profonde et le drainage. Par contre on note un écoulement latéral vers les bas de pente. ETR est supérieure aux précipitations, dont une partie notable sous forme d'évaporation d'eau de surface. La végétation est une végétation herbacée de sols hydromorphes (Cypéracées, *Echinochloa*...). Le boisement de l'ensemble des dépressions représente 3499 individus par hectare (POUPON, 1980).

Le bilan hydrique, pour l'ensemble de la toposéquence, pour la période du 1er juin 1975 au 1er juin 1976, peut se décomposer ainsi :

Précipitations	:	314,6 mm
ETP calculée	:	2893 mm
ETP dune	:	221 mm
ETR replats	:	315 mm
ETR pente	:	224 mm
ETR bas de pente	:	495 mm
Drainage bas de pente	:	75 mm
ETR + Drainage + redistribution en dépression	:	746 mm



La concentration des précipitations vers les parties basses de la toposéquence explique l'aspect contracté de la végétation. Ce mode de régime hydrique entraîne une meilleure résistance de la végétation aux aléas climatiques, et une production de biomasse plus régulière. En effet, en années sèches, excepté les années très exceptionnelles telle 1972, la redistribution des précipitations le long de la toposéquence entraîne un bilan plus favorable pour les groupements de bas de pente et de dépression, assurant la survivance de la strate ligneuse et une production herbacée non négligeable.

#### 2.4.2. - DAHRA-nord.

Le relief dunaire est assez bien marqué ; la pente est voisine de 3 %. Le sol est de type brun rouge subaride très sableux, et ne présente pas de variation importante de la teneur en éléments fins avec la profondeur ou la topographie. La surface du sol est meuble, la perméabilité excellente. La capacité de rétention est faible, mais suffisante pour assurer le stockage de la lame d'eau incidente dans le profil. Il n'y a ni ruissellement, ni de redistribution d'eau le long de la toposéquence. Le drainage profond, nul en année moyennement pluvieuse, peut exister en année très pluvieuse avec succession d'averses rapprochées. Le régime hydrique est semblable le long de la toposéquence (voir figure 51). Les ETR annuelles sont sensiblement égales aux précipitations. La couverture végétale continue est assez homogène, avec individualisation le long de la toposéquence de groupements aux limites peu précises. La végétation ligneuse est éparse et actuellement peu abondante : 360 individus ha<sup>-1</sup> (CORNET et POUPON, 1978), sans différenciation en fonction de la topographie.

Les propriétés du sol assurent une bonne utilisation de l'eau par la végétation. Les fluctuations de la production de la strate herbacée sont très liées à la quantité et à la répartition des précipitations. Les années sèches successives ont peu d'influence sur les peuplements d'annuelles, mais entraînent une régression des herbacées vivaces et une mortalité assez importante des ligneux.

Le bilan hydrique, pour l'ensemble de la toposéquence, pour la période du 1er juin 1975 au 1er juin 1976, se décompose ainsi :

Précipitations	:	492,1	mm
ETP calculée	:	2228	mm
ETR dune	:	499	mm
ETR pente	:	526	mm
ETR bas fond	:	498	mm
Drainage	:	0	

Le léger excédent des ETR sur les précipitations est dû à un désèchement plus prononcé du sol durant la saison sèche.

#### 2.4.3. - DAHRA-sud.

La parcelle est constituée par une zone à relief très faible (pente < 0,5 %) dans laquelle s'individualisent deux unités : d'une part les replats représentant 80 % de la surface, d'autre part des petites dépressions plus ou moins alignées.

Sur les replats, le sol est ferrugineux tropical à drainage moyen à médiocre. Les éléments fins sont assez abondants avec un accroissement net en profondeur. En surface, la battance et l'encroûtement diminuent encore la perméabilité qui est mauvaise. La capacité de rétention est élevée, mais l'infiltration est peu profonde, avec engorgement des horizons de surface. L'absence quasi totale de relief évite le ruissellement. On note un faible ruissellement en nappe, notamment aux abords des dépressions. Le bilan hydrique est homogène, mais peu favorable. ETR annuelle est peu différente de P, mais une partie importante de l'eau est perdue par évaporation directe à partir du sol. La végétation est claire, dégradée et floristiquement pauvre. Les arbres sont rares : 160 individus par hectare, pour l'ensemble de la parcelle (CORNET et POUPON, 1978) et beaucoup sont morts.

Le bilan hydrique pour l'ensemble de la parcelle, pour la période du 23-3-1976 au 31-12-1976, se décompose ainsi :

Précipitations	:	339,6	mm
ETP calculée	:	1926	mm
ETR replats	:	338	mm
ETR dépressions	:	350	mm

Les dépressions, de petite taille et dont le dénivelé est peu important, présentent un sol plus argileux à tendance hydromorphe. La perméabilité est mauvaise, il n'y a pas de drainage profond. Le sol bénéficie de quelques apports d'eau par ruissellement des zones avoisinantes et ETR est légèrement supérieure à P. La végétation herbacée est plus dense et différenciée ; les arbres sont un peu plus nombreux.

#### 2.4.4. - DOLI-nord.

Le relief dunaire est assez net, la pente moyenne est légèrement supérieure à 3 %, avec individualisation d'un bas fond à hydromorphie de profondeur. Les sols sont de type ferrugineux tropical peu lessivés à lessivés, assez hétérogènes verticalement au point de vue de la texture. Ils présentent un gradient net de teneur en éléments fins suivant la toposéquence. La perméabilité est bonne, surtout dans les horizons de surface. Il n'y a pas de ruissellement apparent mais, une accumulation d'eau dans les profils du bas de la toposéquence, montre l'existence d'un drainage oblique au niveau de discontinuités texturales.

En année non excessivement sèche il y a drainage profond sur l'ensemble des sites de la toposéquence. Une remontée capillaire, au niveau des couches profondes (200-300 cm), se produit en saison sèche. La pluviosité plus importante de la zone et les caractéristiques du sol permettent un bilan hydrique relativement favorable, mais très dépendant des précipitations annuelles. La végétation est couvrante, avec abondance de ligneux, même en dune (*Guiera senegalensis* notamment). La sécheresse a entraîné une très grande mortalité des ligneux et une régression des herbacées vivaces (*Andropogon gayanus*). En 1975, on comptait (CORNET et POUPON, 1978) sur l'ensemble de la parcelle 517 individus par hectare dont 47 % de morts. Les années 1975 et 1976 ont amené une forte reconstitution de la strate ligneuse et des populations d'*Andropogon gayanus*. On note une différenciation du peuplement ligneux dans les parties basses, avec des arbres de grande taille appartenant à des espèces plus nettement soudaniennes.

#### 2.4.5. - Conclusions

D'après les observations et les mesures effectuées sur le terrain, il ressort que le drainage vertical est très faible en zone sahélienne. Il ne se produit que dans des positions topographiques particulières : bas fonds à sous-sol perméable, ou durant des séquences pluvieuses prolongées, phénomènes de faible occurrence (1 année sur 20 à DHARA).

Le drainage oblique existe, il se manifeste lors des périodes particulièrement pluvieuses. Cependant, comme le montre ROOSE (1980), il est généralement négligeable vis à vis des autres termes du bilan hydrique excepté lorsque des discontinuités texturales, moins perméables, existent dans le profil.

Le ruissellement constitue dans ces zones un élément important du bilan et conditionne en grande partie la redistribution de l'eau le long des toposéquences et sa disponibilité pour la végétation. Chaque type de toposéquence constitue une unité de fonctionnement qui se reproduit dans une même zone de façon plus ou moins répétitive et constante. Elle caractérise l'unité écologique correspondante et constitue l'unité utilisable pour l'étude. L'importance du ruissellement dépend d'une part des caractéristiques des épisodes pluvieux (intensité, durée...) d'autre part du sol (texture, structure, humidité des horizons de surface). Comme le soulignent divers auteurs : ROOSE (1980), COLLINET et VALENTIN (1979) l'état de surface du sol constitue un facteur important de ruissellement. Les encroûtements d'origine physique ou biologique jouent un grand rôle. La végétation intervient par l'importance du couvert et son recouvrement, mais surtout par l'abondance des organes végétaux à la surface du sol : recouvrement basal, litière... (BOURGES et al, 1979).

Les difficultés de mesure du ruissellement, particulièrement en zone sèche, ainsi que la faible précision des fonctions de ruissellement calculées, ont conduit divers auteurs à ne pas inclure ce terme dans leurs modèles de bilan hydrique (FRANQUIN et FOREST, 1977). Cet aspect nécessite à l'heure actuelle des recherches plus approfondies avec des méthodes nouvelles. On peut penser que l'utilisation de simulateurs de pluie (COLLINET et VALENTIN, 1979) constitue une approche expérimentale intéressante.

### 3 - MODELISATION DU BILAN HYDRIQUE.

L'extrême variabilité des phénomènes climatiques, et notamment des précipitations dans les zones arides fait que les mesures du bilan hydrique des sols, réalisées sur des périodes nécessairement courtes, ne sont que quelques situations possibles dont la représentativité peut être mise en doute. Par contre, il existe d'assez longues séries d'observations météorologiques, d'où la recherche d'un modèle simple de bilan hydrique du sol, qui permettrait, après réglage sur les années observées, la simulation du bilan à partir des éléments climatiques et des caractéristiques des sols. On obtiendrait donc autant d'estimations que d'années d'observation des données météorologiques, avec la possibilité d'effectuer sur ces résultats une analyse fréquentielle.

De très nombreux auteurs ont mis au point divers modèles de bilan hydrique. Ils diffèrent entre eux par le but poursuivi : modèles descriptifs, modèles explicatifs, modèles prédictifs ..., et par des approches mathématiques différentes. Sans vouloir aborder l'aspect classification des modèles, qui est un sujet difficile et controversé, on peut citer à titre d'exemple : des modèles à priori, où la relation mathématique traduit simplement l'allure générale du phénomène (GOODALL, 1969), des modèles empiriques dans lesquels les fonctions ont été déterminées, en calculant les relations existant entre les données expérimentales et les variables mesurées (FITZPATRICK et NIX, 1969 ; DEJONG et MAC DONALD, 1975 ; FRANQUIN et FOREST, 1977 ; RAMBAL, 1980), et des modèles analytiques, où les relations mathématiques tentent de traduire la réalité des phénomènes physiques ; ils utilisent pour la plupart la relation de DARCY pour le calcul des flux d'eau, et un terme d'extraction racinaire (ROSE et al., 1972 ; HUMBERT et al., 1977 ; ROWSE et STONE, 1978 ; ROWSE et al., 1978).

Le choix entre les différents modèles repose d'une part sur les données utilisables ou accessibles, d'autre part sur les buts poursuivis. Ici, le but était de construire un modèle simple, utilisant les seules données météorologiques existantes et les caractéristiques hydriques des sols, et permettant de reproduire le plus exactement possible les phénomènes observés. Ce modèle ne cherche pas à simuler les phénomènes physiques réels des relations sol-plante-atmosphère, mais à reproduire le bilan global des échanges hydriques à une échelle égale ou supérieure à 24 h. Dans un précédent travail (CORNET, 1977b) nous avons utilisé le modèle ORBKNR mis au point par FRANQUIN, pour simuler le bilan hydrique sous parcelle herbeuse et sous parcelle boisée à Madagascar. C'est à partir d'une version modifiée (FRANQUIN et FOREST, 1977) que nous avons établi le modèle utilisé.

#### 3.1. Description du modèle.

Le modèle est basé sur la relation de récurrence, traduisant la conservation de l'eau dans une couche de sol.

$$RS_J = RS_{j-1} + P_j - DR_j - ETR_j$$

$RS_j$  = Réserve dans la couche de sol en fin de période J

$RS_{j-1}$  = Réserve dans la couche de sol en fin de période J-1  
 $P_j$  = Précipitations durant la même période  
 $DR_j$  = Pertes par drainage  
 $ETR_j$  = Evapotranspiration réelle durant la période.

Par cette relation et grâce au calcul de l'ETR, on détermine l'évolution du bilan à partir des conditions initiales avec un pas de temps journalier.

Le sol est découpé en deux strates, d'épaisseur  $e_1$  et  $e_2$  représentant deux réservoirs caractérisés par leur épaisseur et par leur réserve utile maximale  $RU_1 \text{ max.}$  et  $RU_2 \text{ max.}$  La vitesse de circulation de l'eau entre les réservoirs dépend des constantes du temps de redistribution  $T_1$  et  $T_2$  exprimées en jour. Elles sont prises égales à l'inverse de la perméabilité MUNTZ. Pour DAHRA-nord, la perméabilité moyenne mesurée pour la couche supérieure est de  $2,4 \text{ cm.h}^{-1}$ . La constante de temps est de  $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ j.cm}^{-1}$  ; pour un horizon de 100 cm cela représente  $T_1 = 1,7 \text{ j.}$

Le modèle ne possédant pas de fonction de ruissellement propre, il n'est utilisé que dans le cas où le ruissellement est négligeable ou mesuré. C'est alors la pluie infiltrée qui est entrée dans le modèle. Le terme DR représente les pertes par drainage, elles sont débitées en début de période.

### 3.1.1. Calcul de ETR.

Le calcul de ETR est effectué dans le modèle à partir de la relation empirique d'EAGLEMAN (1971). Cet auteur détermine, par ajustement, sur des données expérimentales une relation permettant de calculer ETR en fonction de l'ETP et du rapport d'humidité ou "humidité relative du sol" HR :

$$HR = \frac{HD}{RU} = \frac{S - PF}{CR - PF}$$

S = Stock d'eau de la strate de sol considérée  
PF = Stock d'eau au point de fléchissement permanent  
CR = Stock d'eau à la capacité de rétention  
HD = Eau disponible  
RU = Réserve maximum utilisable

La relation s'établit ainsi :

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

où,

A = - 0,05 + 0,732/ETP  
B = + 4,97 - 0,661 . ETP  
C = - 8,57 + 1,56 . ETP  
D = + 4,35 - 0,880 . ETP

La figure 56 montre les variations du rapport ETR/ETP en fonction de HR pour différents niveaux d'ETP.

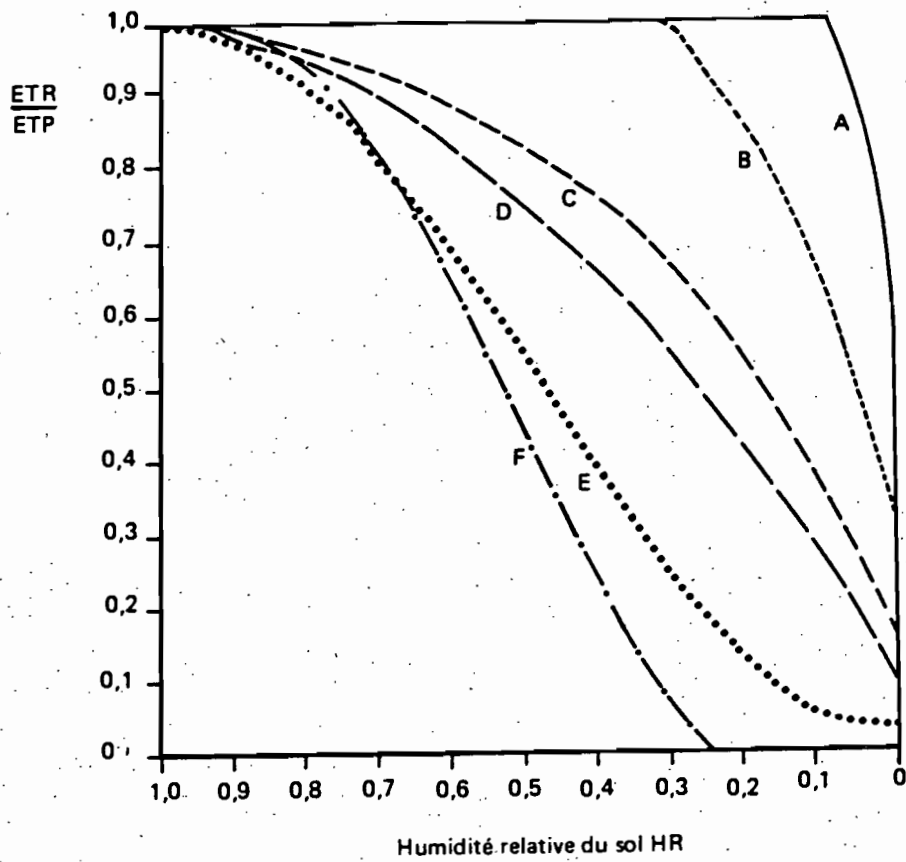


Fig. 56. Variation du rapport ETR/ETP en fonction de HR pour différentes valeurs de la demande climatique ETP

A - ETP = 1 mm . j . <sup>-1</sup> ; B - ETP = 2 mm . j . <sup>-1</sup> ; C - ETP = 4 mm . j . <sup>-1</sup>

D - ETP = 5 mm . j . <sup>-1</sup> ; E - ETP = 8 mm . j . <sup>-1</sup> ; F - ETP = 10 mm . j . <sup>-1</sup>

valeurs calculées d'après la relation de EAGLEMAN

Cette relation empirique est assez rigide mais on peut lui conférer une certaine souplesse d'adaptation grâce à des coefficients de réglage.

### 3.1.2. Coefficients ou paramètres de réglage.

L'évapotranspiration réelle dépend de la quantité d'eau disponible et de l'ETP, éléments que prend en compte la relation d'EAGLEMAN pour le calcul de ETR. Elle peut d'autre part être limitée par l'importance de la surface foliaire, notamment en début de végétation, lors de la mise en place du couvert herbacé annuel. HANSON (1976) qui établit une relation voisine de celle de EAGLEMAN, fait intervenir l'importance du couvert végétal par l'intermédiaire de l'indice foliaire (LAI). Dans le modèle nous introduisons un facteur K de modulation de l'ETP. Ce facteur croît avec le développement de la couverture végétale. On utilise alors un terme appelé "Evapotranspiration maximale",  $ETM = K \cdot ETP$ , comme limite supérieure d'ETR. La valeur de K est estimée ( $K \leq 1$ ).

L'humidité relative du sol ne tient compte que de la fraction d'eau disponible et non de l'énergie de liaison de cette eau avec le sol. Le coefficient A, est destiné à rendre compte des effets des caractéristiques du sol, notamment de la texture, sur cette rétention. Il intervient sur les valeurs prises par HR ; on détermine :

$$HR = DH/RU + A \quad (-0,5 < A < 0,5)$$

Comme HR, par définition, est compris entre 0 et 1, lorsque la valeur calculée de HR est supérieure à 1, on l'égalise à cette limite et lorsqu'elle est négative on l'égalise à zéro. Les valeurs de A positives interviennent dans le cas de sols très sableux, les valeurs négatives sont à utiliser dans les sols très limoneux ou très argileux.

Les pertes d'eau calculées par ETR, sont prélevées dans chaque couche, proportionnellement à la quantité d'eau disponible dans chacune, et à un paramètre B variant en fonction de la répartition racinaire.

### 3.1.3. Calcul de la RU croissante.

En zone sèche, le départ du cycle de végétation se fait à partir d'un sol desséché proche du point de flétrissement. La recharge du profil à partir des premières pluies se fait progressivement. L'utilisation de la réserve utile maximum sur l'ensemble du profil pour la détermination de HR entraîne une sous-estimation importante de ce terme et par là de ETR, celle-ci se produisant seulement à partir des couches réellement humides. Il est donc indispensable de simuler l'accroissement de la RU au fur et à mesure de la progression sous l'effet des pluies, du front de réhumectation.

Le tableau LIV montre la comparaison entre les valeurs de RU calculées par le modèle et les valeurs observées RU (observées) aux différentes dates de mesures. A partir des profils hydriques on détermine la profondeur atteinte à chaque date par le front d'humectation et on détermine la RU correspondante.

Date	z front en cm.	RU <sub>obs.</sub>	RU <sub>calc.</sub>	Date	z front en cm.	RU <sub>obs.</sub>	RU <sub>calc.</sub>
<u>1975</u>				<u>1976</u>			
3-7	10 cm	6,5	6,5	16-7	10 cm	6,5	7,5
18-7	40	28	51,4	27-7	30	20,2	23,6
19-7	70	50	52,4	10-8	30	20,2	23,6
12-8	150	97	102,7	25-8	125	83	80,8
26-8	150	97	102,7	7-9	150	97	80,8
17-9	200	135	134,1	22-9	200	135	115,8
2-10	225	150	147,8	12-10	200	135	115,8
<u>1977</u>				<u>1978</u>			
20-7	20 cm	13,5	11,7	20-6	40 cm	28	34,4
1-8	30	20,2	26,1	3-7	40	28	34,4
8-8	30	20,2	26,1	19-7	50	35,5	34,4
25-8	150	97	100,6	30-7	50	35,5	37,6
2-9	150	97	100,6	9-8	50	35,5	37,6
9-9	200	135	115,3	8-9	50	35,5	37,6
22-9	200	135	115,3	21-9	60	43	42,2
				30-9	80	56,0	55,9
				11-10	80	56,0	55,9

TABLEAU LIV - COMPARAISON DES VALEURS DE RU CALCULEES PAR LE MODELE ET LES VALEURS OBSERVEES.

z front = Profondeur maximale atteinte par le front d'humectation en cm.

RU<sub>obs</sub> = Réserve utile maximale correspondante en mm.

RU<sub>calc.</sub> = Réserve utile maximale calculée par le modèle en mm.



### 3.1.4. Entrées et sorties du modèle.

Le tableau n° LV, récapitule les entrées et les sorties du modèle.

Le choix d'un pas de temps variable, permet d'obtenir des sorties en valeurs journalières, pentadaires, hebdomadaires, et par décades naturelles ou calendaires. Les sorties se font sous forme de tableau imprimé (voir annexe). On peut à la demande obtenir la sortie sur cartes perforées de 1 à 12 variables ou grandeurs intermédiaires calculées. Ces cartes sont utilisées directement par le programme d'analyse fréquentielle. Un sous-programme FORTRAN permet d'obtenir le tracé BENSON de l'évolution des réserves.

Le schéma figure 57 montre l'organisation simplifiée du modèle établi.

### 3.2. Calibration, validation et résultats.

Le modèle a été mis en oeuvre sur l'ordinateur IBM 360/65 du CITIM de Montpellier pour simuler le bilan hydrique de DAHRA-nord durant 4 années: 1975 et 1976 ont servi à la calibration du modèle, 1977 et 1978 à sa vérification. Nous avons utilisé le traceur automatique BENSON pour obtenir les courbes représentant la réserve utile restante dans les deux couches de sol. Sur les figures 58 à 61 sont portés, d'une part les courbes obtenues par simulation pour les horizons 0-100 cm et 100-300 cm au cours de quatre années, d'autre part les points correspondants aux valeurs mesurées.

On note une très bonne concordance entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées pour l'horizon 0-100 cm, et ceci pour les quatre années observées. Les valeurs les moins satisfaisantes correspondent aux premières grosses averses et à la reconstitution des réserves. Pour l'horizon 100-300 cm, la concordance est moins satisfaisante. Le modèle simule cependant assez correctement l'allure de l'évolution des réserves utilisables dans cette couche. Pour obtenir une concordance acceptable, nous avons considéré comme compartiment supérieur l'horizon 0-100 cm qui contient la quasi totalité des racines.

La calibration du modèle a été effectuée en comparant les valeurs simulées et mesurées de la réserve utile restante dans les deux compartiments de sol. Mais on peut, par ailleurs, comparer les valeurs obtenues d'ETR, avec celles calculées par la méthode du bilan, en fonction de l'évolution des réserves totales mesurées.

Le tableau LVI donne la comparaison de ces valeurs au cours des quatre périodes étudiées. Vingt cinq valeurs sur trente deux montrent une bonne concordance entre valeurs simulées et valeurs calculées compte tenu de la précision sur le calcul de ETR. Sept valeurs présentent un écart significatif; elles correspondent soit à des périodes de recharge des réserves après des pluies abondantes, soit à une simulation défectueuse de l'épuisement de la réserve de la strate 2. De façon générale, le modèle reproduit bien le comportement global de l'eau dans le sol.

<u>ENTREES</u>	<u>SORTIES</u>
<u>Variables climatiques</u>	<u>Variables principales</u>
pluies journalières P , mm.j <sup>-1</sup>	évapotranspiration réelle ETR, mm.j <sup>-1</sup>
évapotranspiration potentielle décadaire ETP, mm	réserve en eau des 2 compartiments, mm
<u>Caractéristiques du sol</u>	drainage DR mm
réserves utiles maximales des strates 1 et 2, RU <sub>1</sub> max., RU <sub>2</sub> max.; mm.	<u>Variables intermédiaires</u>
constantes de temps T <sub>1</sub> , T <sub>2</sub> , j.	eau disponible en début de période mm
<u>Paramètres de réglage</u>	évapotranspiration maximale mm.j <sup>-1</sup>
K décadaire	rapport ETR/ETP
A	réserves utiles calculées mm
B	déficit hydrique du sol mm

TABLEAU LV - ENTREES ET SORTIES DU MODELE BIJOU

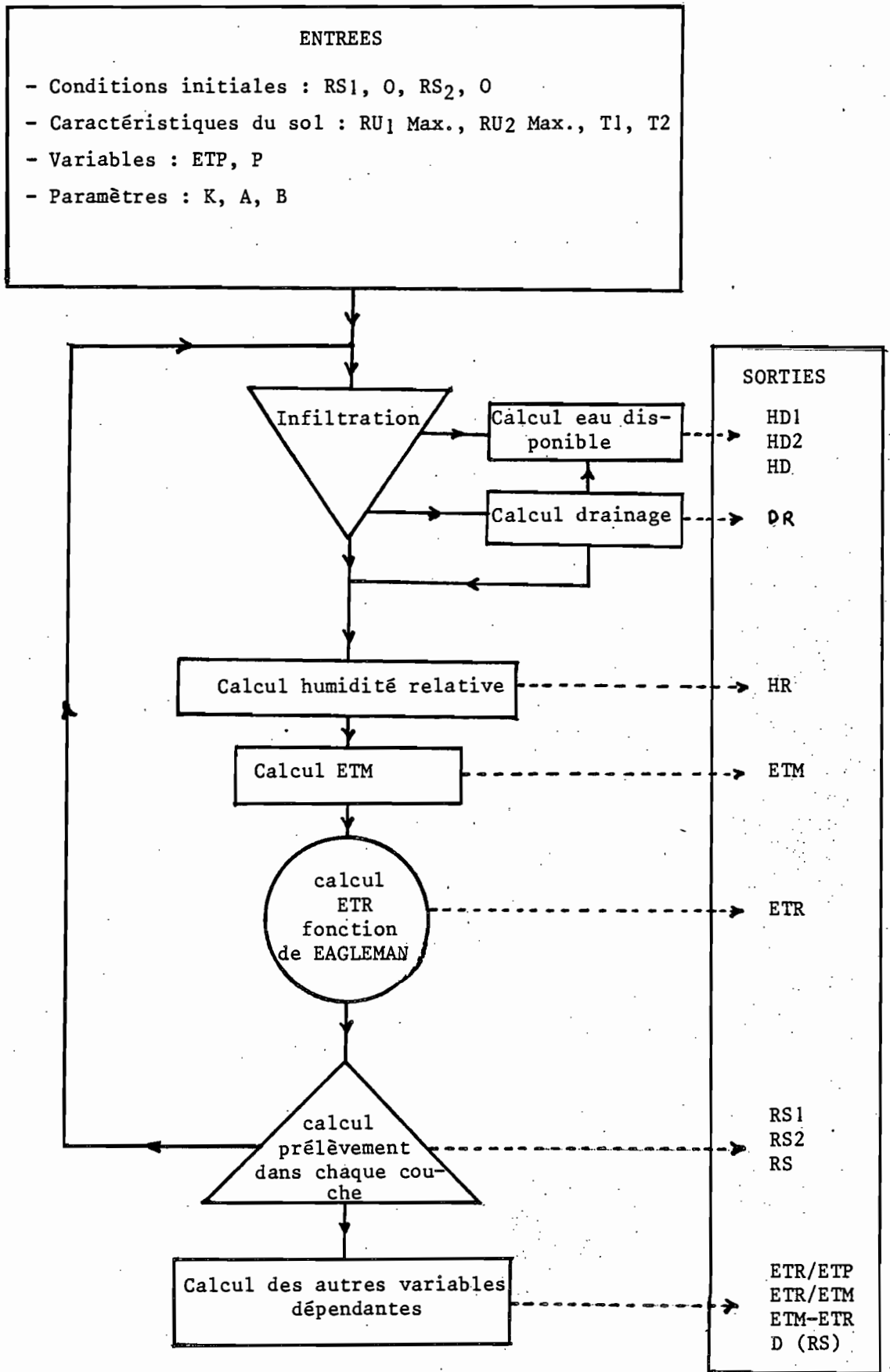


Figure 57 - Schéma d'organisation simplifié du modèle de bilan hydrique

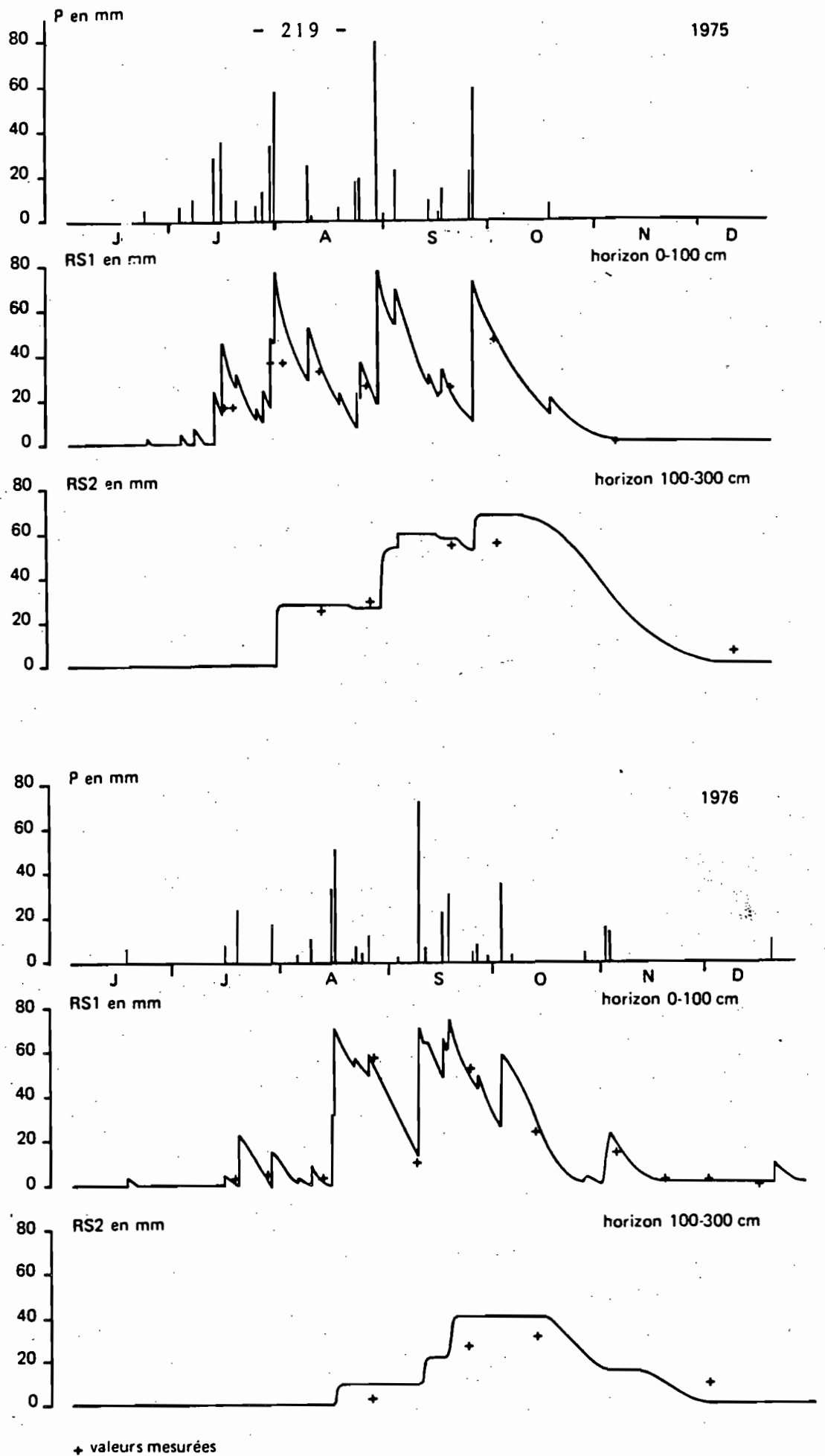


Fig. 58 et 59 - Comparaison des valeurs mesurées et simulées de réserve utilisable du sol à DAHRA-nord dune (1975-1976).

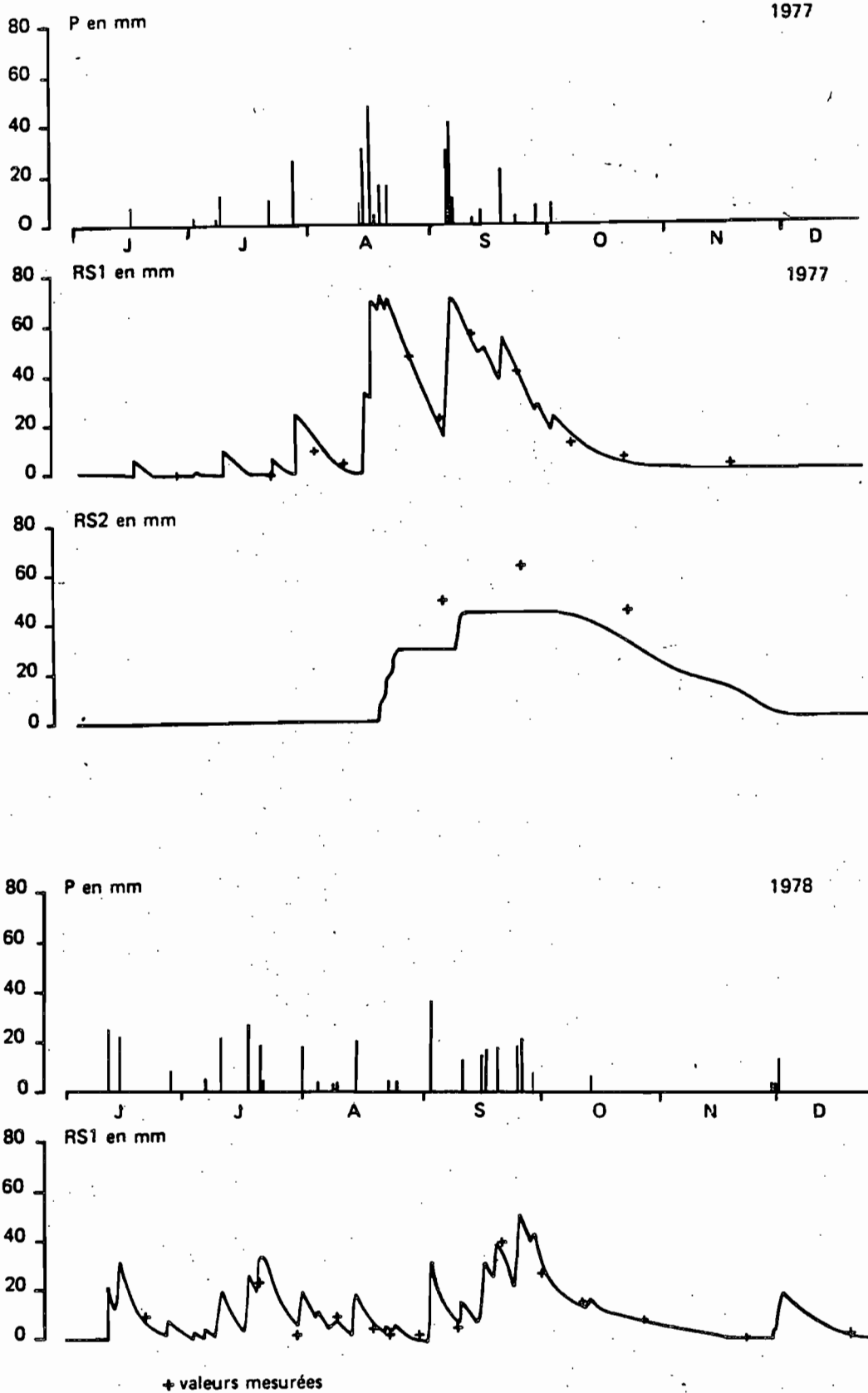


Fig. 60 et 61 - Comparaison des valeurs mesurées et simulées de réserve utilisable du sol à DAHRA-nord dune (1977-1978).

1975	ETR <sub>B</sub>	ETR <sub>M</sub>	1976	ETR <sub>B</sub>	ETR <sub>M</sub>	1977	ETR <sub>B</sub>	ETR <sub>M</sub>	1978	ETR <sub>B</sub>	ETR <sub>M</sub>
3/7-18/7	58,1	55,1	16/7-27/7	15,8	23,2	20/7-1/8	18,7	19,9	20/6-3/7	20,2	17,8
18/7-19/7	34,5	35,1	27/7-10/8	33,1	28,2	1/8-8/8	4,1	<u>11,2</u>	3/7-19/7	28,2	28,5
29/7-12/8	63,6	64,3	10/8-25/8	33,0	38,2	8/8-25/8	14,9	<u>42,2</u>	10/7-30/7	49,0	43,0
12/8-26/8	42,4	50,4	25/8-7/9	50,1	48,0	25/8-2/9	21,7	27,6	30/7-9/8	15,7	<u>25,7</u>
26/8-17/9	88,7	89,8	7/9-22/9	66,4	64,8	2/9-9/9	34,2	28,5	9/8-18/8	17,6	20,7
17/9-2/10	72,3	<u>54,1</u>	22/9-12/10	65,8	70,2	9/9-22/9	43,5	41,1	18/8-30/8	14,7	16,2
2/10-6/11	79,8	73,6	12/10-4/11	44,0	<u>63,8</u>	22/9-5/10	42,8	42,6	30/8-10/9	15,3	<u>29,8</u>
						5/10-19/10	29,9	17,2	10/9-21/9	11,1	<u>34,2</u>
									21/9-30/9	40,9	45,0
									30/9-11/10	20,8	29,4

TABLEAU LVI - COMPARAISON DES VALEURS DE ETR CALCULEE A PARTIR DE L'EVOLUTION  
DES RESERVES MESUREES (ETR<sub>B</sub>) ET CALCULEES PAR LE MODELE (ETR<sub>M</sub>)

### 3.3. Analyse de la sensibilité du modèle.

L'analyse de la sensibilité du modèle a pour but d'indiquer l'effet de la variation d'une variable externe ou d'un paramètre sur les résultats obtenus par simulation. Elle indique d'une part la stabilité ou la divergence du modèle face à ces variations, d'autre part la précision avec laquelle chaque variable doit être mesurée ou chaque paramètre estimé avant d'être introduit dans le modèle. Les variables sont les précipitations P et ETP ; RU max. est un paramètre mesuré, K et A sont des paramètres estimés. Le paramètre B n'a pas d'influence sur la valeur de l'ETR.

Le tableau LVII montre les simulations effectuées en modifiant successivement chaque variable et chaque paramètre. L'analyse des résultats obtenus porte sur la somme annuelle des ETR et sa variation ; mais en raison du fait que ETR est peu différente de P, cette grandeur reste fréquemment constante alors que la répartition d'ETR varie. Nous avons donc analysé la variation des valeurs décennales de ETR en fonction des variations introduites.

La figure 62 montre les variations de ETR décennale en fonction des variations imposées de ETP. Elle montre la non-symétrie des résultats en fonction des variations imposées, et l'alternance fréquente de variations positives et de variations négatives. Pour analyser l'écart entre la courbe de référence et la courbe simulée nous avons calculé deux paramètres de distance entre points de références et points de simulation pour les décades où l'ETR de référence est non nul. Ces distances sont d'une part l'écart absolu moyen  $E = \frac{\sum (x_i - x_0)}{N}$  où  $x_i$  est la valeur simulée,  $x_0$  la valeur de référence et N le nombre de couples. Nous avons calculé également le  $\chi^2 = \frac{\sum (x_i - x_0)^2}{x_0}$ . Les valeurs obtenues sont portées au tableau LVIII. En effectuant pour ces paramètres la moyenne sur les quatre années et pour des variations standard imposées de  $\pm 10\%$ , on obtient :

Variable	E Moyen	$\chi^2$ Moyen
P $\pm 10\%$	3,64	27,38
ETP $\pm 10\%$	4,02	21,27
RU max $\pm 10\%$	0,38	0,573
K $\pm 10\%$	3,48	16,366
A $\pm 10\%$	2,27	13,003

Les variables externes faisant office de fonctions de forçage sont celles qui ont la plus forte action sur les résultats, ce qui est conforme à l'objectif même du modèle. Cela implique une bonne précision de mesure sur les valeurs de P et de ETP. On doit cependant remarquer que, pour cette dernière, seules les valeurs concernant la saison des pluies importent d'être connues avec assez de précisions. L'utilisation des valeurs ETP bac ou ETP PENMAN n'entraînent qu'un faible écart dans les résultats de simulation et permettent d'utiliser ETP PENMAN lorsque l'on ne dispose pas de ETP bac.

TABLEAU LV II - ANALYSE DE LA SENSIBILITE DU MODELE : VARIATION DES PARAMETRES ET RESULTATS CONCERNANT ETR

	P	ETP	R <sub>u</sub>	K	A	1975			1976			1977			1978		
						Δ ETR	E	x <sup>2</sup>	Δ ETR	E	x <sup>2</sup>	Δ ETR	E	x <sup>2</sup>	Δ ETR	E	x <sup>2</sup>
Conditions de Référence	P <sub>A</sub>	ETP <sub>A</sub>	68.0 125.0	K <sub>A</sub>	0	ETR = 487.4	0	0	ETR = 395.6	0	0	ETR = 305.4	0	0	ETR = 362.6	0	0
Effet Pluie	P <sub>A</sub> + 10 %	"	"	"	"	5.6 %	1.19	5.187	+ 10 %	1.81	8.993	+ 10 %	1.36	19.327	+ 10 %	1.79	6.597
	P <sub>A</sub> - 10 %	"	"	"	"	10 %	2.67	31.864	- 10 %	2.30	12.607	- 10 %	1.63	19.262	- 10 %	1.79	5.678
Effet ETP	P <sub>A</sub>	ETP + 10 %	"	"	"	0	3.82	36.655	0	3.72	15.115	0	3.25	23.045	0	2.28	10.848
	"	ETP + 10 %	"	"	"	0	2.12	14.547	0	2.01	4.796	0	1.93	12.242	0	1.37	5.371
	"	ETP - 10 %	"	"	"	5 %	2.37	6.897	0	2.14	6.365	0	2.32	19.975	0	1.82	14.957
	"	ETP - 10 %	"	"	"	12.4 %	3.93	14.512	- 4.8 %	3.36	10.735	- 0.85 %	3.51	27.479	0	1.40	29.225
Effet R <sub>u</sub> May	"	ETP <sub>A</sub>	RU + 10 %	"	"	0	0.59	0.922	0	0.07	0.015	0	0	0	0	0	0
	"	"	RU + 5 %	"	"	0	0.69	1.072	0	0.03	0.004	0	0	0	0	0	0
	"	"	RU - 5 %	"	"	0	0.82	1.353	0	0.04	0.005	0	0	0	0	0	0
	"	"	RU - 10 %	"	"	0	0.79	1.188	0	0.08	0.013	0	0	0	0	0	0
Effet K	"	"	RU	K + 20 %	"	0	2.63	21.283	0	2.49	7.875	0	2.30	18.610	0	1.48	4.564
	"	"	"	K + 10 %	"	0	2.23	11.959	0	1.38	2.568	0	1.72	10.780	0	0.85	1.355
	"	"	"	K - 10 %	"	1.1 %	1.35	4.055	0	3.01	14.940	0	1.21	17.504	0	1.16	2.300
	"	"	"	K - 20 %	"	7.0 %	2.73	8.693	- 4.3 %	3.38	10.900	0	3.53	27.487	0	2.51	10.169
Effet A	"	"	"	K <sub>A</sub>	A = + 0.10	0	1.62	16.333	0	1.38	8.747	0	1.62	14.131	0	1.12	6.686
	"	"	"	"	A = - 0.10	3.3 %	1.23	2.107	- 1.77 %	0.82	0.768	0	0.67	1.960	0	0.61	1.282



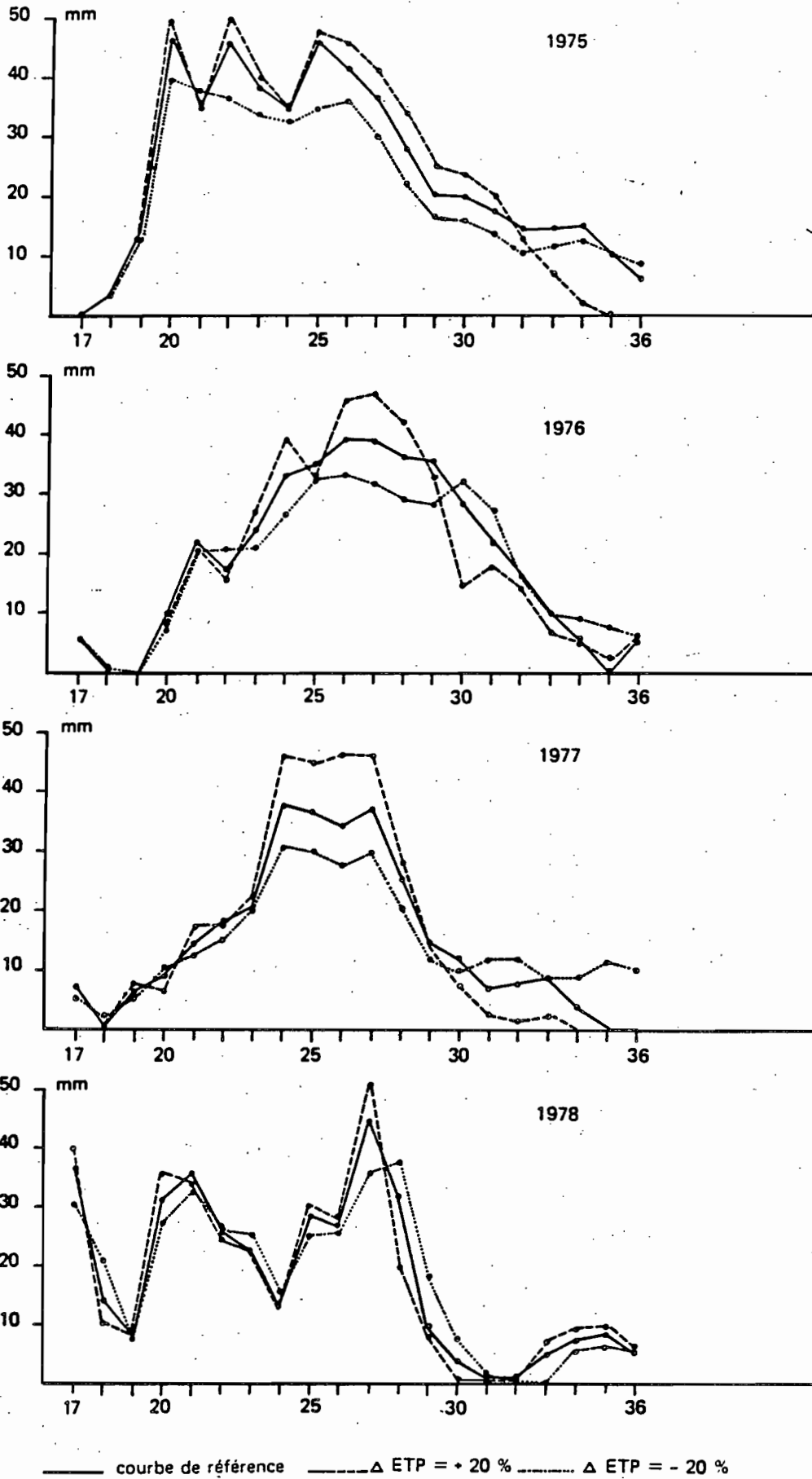


Fig. 62 - Analyse de la sensibilité du modèle. Variations obtenues des valeurs décadaires de ETR pour une variation imposée de  $\pm 20\%$  des valeurs d'ETP.

Les valeurs RU max., paramètre mesuré ont une faible influence sur les résultats. Cela s'explique par le fait qu'en année sèche le modèle fonctionne avec le RU calculé et RU max. n'intervient que très peu en fin d'humectation. En année humide, à pluviométrie excédentaire, la sensibilité du modèle aux variations de RU max serait plus forte. La précision de 10 % sur les mesures de RU est de toute façon très satisfaisante.

### 3.4. Utilisation du modèle en simulation sur de longues périodes.

Le modèle ayant été calé et vérifié à partir des années observées, nous l'avons utilisé pour simuler le bilan hydrique à partir des données météorologiques existantes. Les séries de données permettant le calcul de ETP étant généralement courtes (10 à 15 ans), nous avons utilisé pour les années antérieures les valeurs moyennes de ETP. La simulation a été réalisée sur 23 ans pour DAHRA-CRZ, pour 45 ans pour LINGUERE et 59 ans pour PODOR. La simulation a été réalisée en pas de temps décadaire. Les résultats ont été analysés grâce au programme d'analyse fréquentielle AFREQ. Un exemple de sortie de ce programme est donné en annexe. La figure 63 montre pour chaque décade les fréquences des valeurs de ETR exprimées en mm et les fréquences des valeurs de ETR/ETP à DAHRA-CRZ, pour un sol brun sub-aride, sous végétation naturelle. La figure 64 montre pour chaque décade les fréquences des hauteurs d'eau disponibles dans un sol de type brun sub-aride, sous végétation naturelle. Les simulations ont également pu être réalisées pour un sol ferrugineux tropical peu lessivé.

Les simulations montrent que les fréquences de drainage profond, au-dessous de la côte 300 cm, sont très faibles. Pour DAHRA, la fréquence d'un drainage de 10 mm est de 0,05 pour la période du 20 août au 10 septembre, soit une période de retour de 20 ans. Pour LINGUERE, elle est de 0,10 pour la même période, soit une période de retour de 10 ans et de 0,05 pour 20 mm (1 fois tous les 20 ans). Pour PODOR, la fréquence observée est nulle.

L'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique obtenus par simulation confirme les constatations faites à partir des mesures :

- les ETR annuels sont très voisins de la quantité de pluie tombée. En l'absence de redistribution latérale, le type de sol joue sur la répartition de ETR dans le temps, mais pas sur sa valeur globale.

- Toujours dans le cas d'absence de redistribution latérale (seul cas simulé), les sols très sableux de type brun sub-aride, permettent un meilleur stockage de l'eau et son utilisation plus régulière pour la végétation que dans les sols plus riches en éléments fins.

- Le drainage profond est très réduit sous végétation naturelle et ne prend quelque importance que pour des précipitations supérieures à 600 mm ou dans des positions topographiques particulières. Ces résultats sont en accord avec les observations expérimentales de DANCETTE (1973).

La simulation du bilan hydrique du sol à l'aide du modèle permet de déterminer de façon satisfaisante les termes du bilan hydrique et de réaliser leur étude fréquentielle. Elle montre notamment que sous végétation naturelle la quantité d'eau reprise par l'évapotranspiration réelle est annuellement égale aux précipitations et que la réalimentation des nappes profondes est nulle ou négligeable.

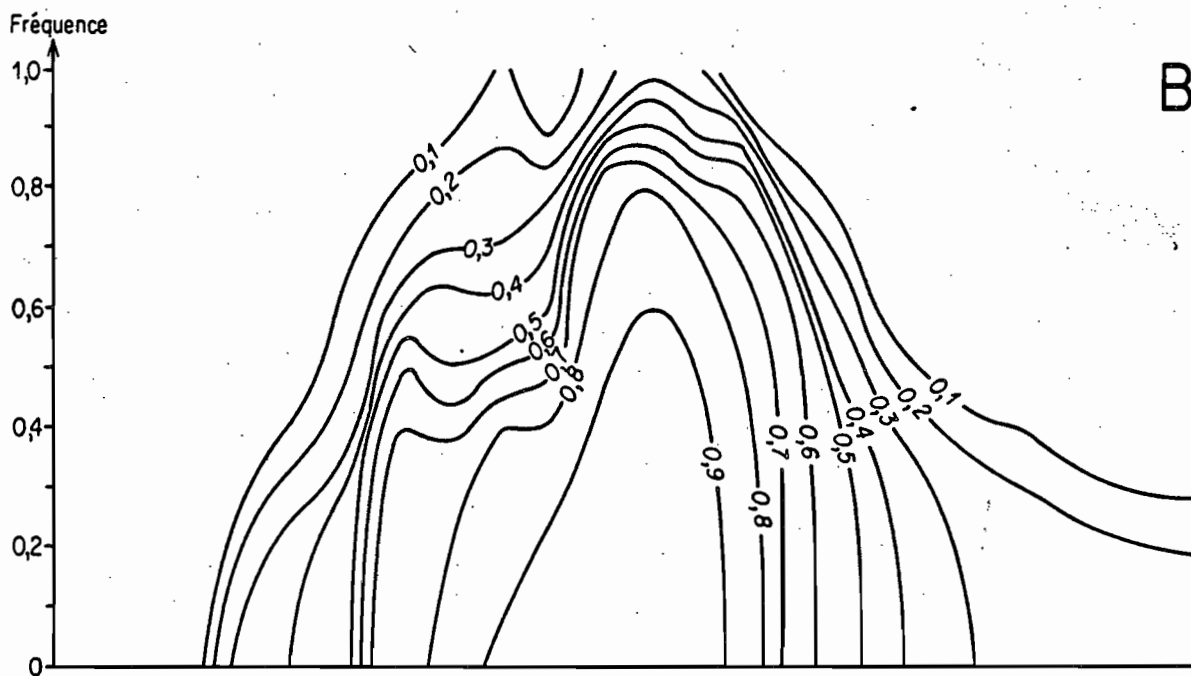
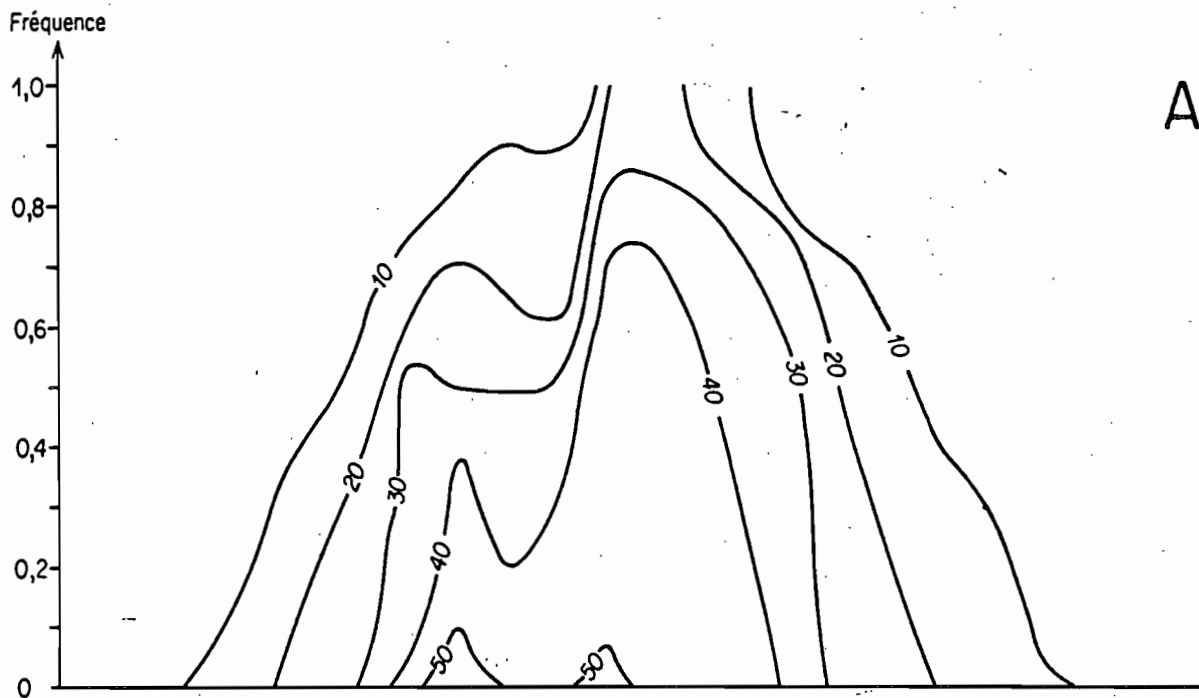


Fig. 63 - DAHRA-nord, simulation du bilan hydrique sur 23 années (1956-1978)

A - Fréquence de valeurs de ETR en mm décade<sup>-1</sup>.  
B - Fréquence des valeurs du rapport ETR/ETP.

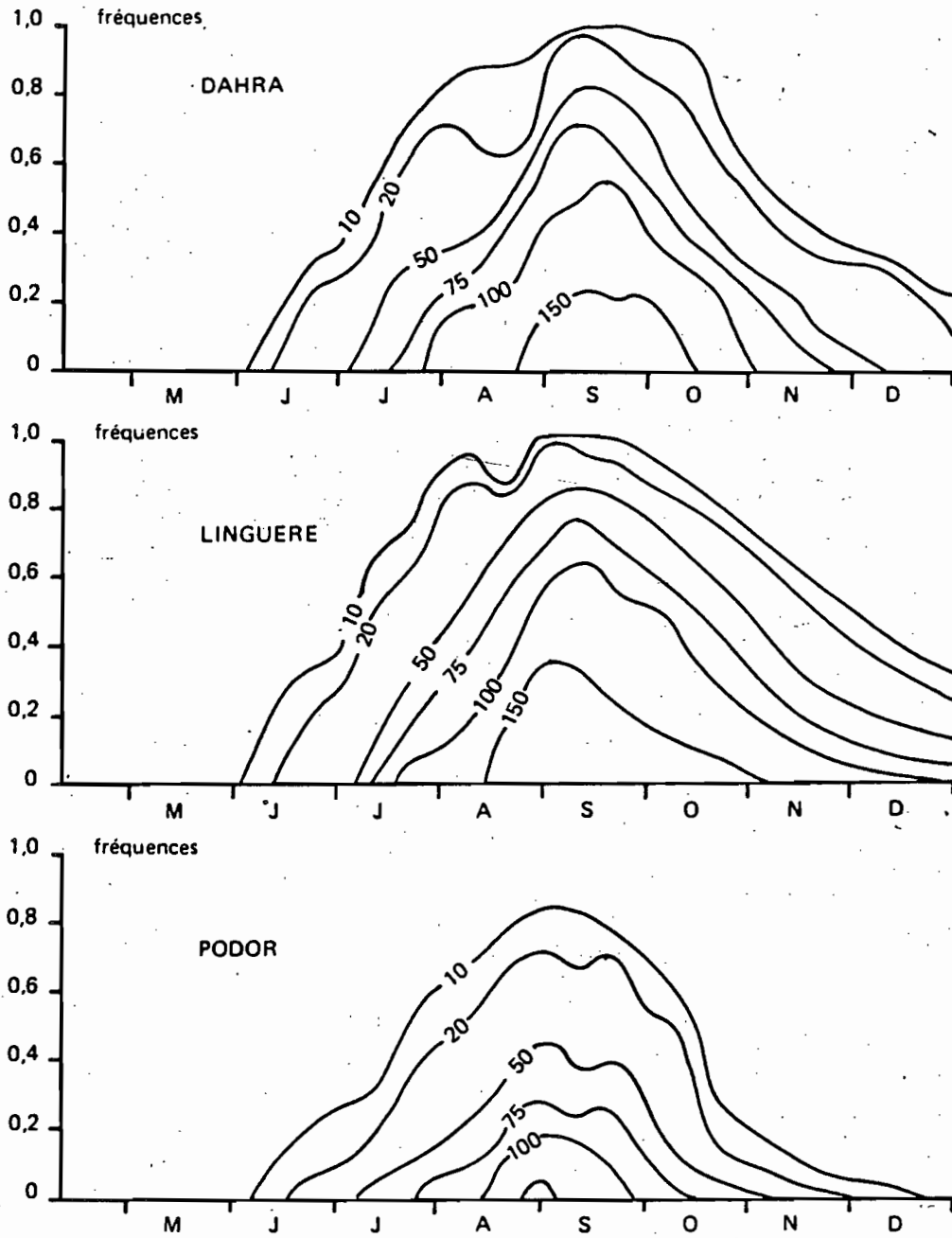


Fig. 64 - Fréquences pour chaque décade des hauteurs d'eau disponibles (en mm) dans un sol de type brun rouge subaride, sous végétation naturelle, pour trois stations (DAHRA, LINGUERE et PODOR).

Sur le plan pratique, en remplaçant les valeurs de K par des coefficients culturaux ETM/ETP connus, on peut tester l'adaptation des différentes cultures aux conditions hydriques de la zone et déterminer les compléments éventuels d'irrigation. Par contre, le modèle, ne prenant pas en compte séparément l'évaporation du sol et la transpiration, ne permet pas d'émettre d'hypothèses sur l'utilisation de l'eau par la végétation.

Sur les données de DAHRA nord, nous avons utilisé le modèle ARFEJ de conception différente, mis au point par RAMBAL (1980) pour les zones arides de Tunisie. Ce modèle permet de simuler correctement le bilan (CORNET et RAMBAL, 1981). La simulation donne les différents termes du bilan hydrique et la part relative de l'évaporation du sol nu et de la transpiration de la végétation dans l'ETR (voir tableau LVIII).

Précipitations (mm)	1975	1976	1977	1978
		487 924	383 1082	304 1068
Evapotranspiration réelle (mm)	375	352	284	357
Transpiration (mm)	285	237	287	278
Evaporation à partir du sol nu (mm)	90	115	97	79
E/ETR	0,24	0,33	0,34	0,22

TABLEAU LVIII - BILAN HYDRIQUE, DE LA PERIODE DU 1<sup>er</sup> JUIN AU 1<sup>er</sup> DECEMBRE, POUR LES 4 ANNEES D'OBSERVATIONS.

Les valeurs d'évapotranspiration réelle, de transpiration et d'évaporation sont obtenues par la simulation du modèle (d'après CORNET et RAMBAL, 1981)

La participation de l'évaporation du sol est de 28% de la perte d'eau totale en moyenne pour les 4 années. Son importance semble surtout liée à la distribution des précipitations. Ce chiffre est très éloigné de ceux donnés dans le cadre du Projet P.P.S., (STROOSNIJDER, 1977 ; PENNING DE VRIES et al., 1978) qui citent des chiffres voisins de 60 %. Ce chiffre nous paraît exagéré, car une parcelle maintenue nue par sarclages répétés conserve en fin de saison des pluies 58 % de l'eau infiltrée alors que la parcelle voisine sous végétation ne contient plus d'eau disponible. Par ailleurs, en 1977 la production aérienne nette a été de 216 g de matière sèche par m<sup>2</sup> ce qui correspond à une production totale voisine de 500 g de M.S. par m<sup>2</sup>. Si la transpiration a été de 187 mm, on obtient une efficience de 364 g d'eau transpirée par gramme de matière sèche produite. Pour 1978, un calcul similaire conduit à 335 g d'eau transpirée par gramme de matière sèche produite. Ces chiffres, bien qu'approximatifs, correspondent avec ceux donnés dans la littérature. LUDLOW (1976) donne pour les graminées en C<sub>4</sub> une efficience moyenne de 308 g. d'eau par g. de M.S. et pour les espèces en C<sub>3</sub> 700 g. d'eau par g. de M.S. LARCHER (1975) donne 300 g. d'eau par g. de M.S. pour les plantes en C<sub>4</sub> et 680 g pour les plantes en C<sub>3</sub>. Il en ressort que les résultats obtenus par le modèle semblent vraisemblables, seulement 30 % de l'eau en moyenne seraient perdus par évaporation directe.

#### 4. - ACTION DU BILAN HYDRIQUE SUR LA PRODUCTION VEGETALE

##### 4.1. - Corrélations entre la production et certains éléments du bilan hydrique

Les mesures de production végétale en zone aride montrent l'existence de fortes variations interannuelles, correspondant aux variations climatiques, notamment pluviométriques. L'aménagement et l'utilisation rationnelle par l'élevage des phytocénoses, sahéliennes entre autres, suppose une connaissance de leurs potentialités de production, cette connaissance devant prendre en compte la variabilité interannuelle. C'est pourquoi de nombreux auteurs ont cherché à déterminer les corrélations existant entre les éléments climatiques et la production végétale.

L'un des premiers éléments considérés est la pluviométrie annuelle. WALTER (1964), pour le Velds du Sud-Ouest Africain, où la pluviosité varie de 100 à 500 mm, trouve une production de 10 kg de matière sèche par hectare et par mm de pluie. Pour la zone sahélienne, BREMAN *et al.* (1975) donnent 2,6 Kg de matière sèche par ha et par mm, avec une production de  $360 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  pour 100 mm. Partant de la compilation des nombreuses mesures de biomasse données dans la littérature, LE HOUEROU et HOSTE (1977) proposent pour la zone sahélienne les relations :

$$Y = 2,58 P + 105,4$$

ou

$$Y = 2,643 P^{(1.001)}$$

dans lesquelles Y est la production de biomasse totale en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  et P la pluviométrie annuelle en mm. Les mêmes auteurs donnent pour la zone aride méditerranéenne :

$$Y = 8,68 P - 414,89$$

soit une production de  $8,68 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ , ce chiffre est à rapprocher de celui de WALTER pour le Sud-Ouest Africain.

BILLE (1975) donne pour une FETE-OLE la relation  $Y = 0,3 P - 9$ , Y étant exprimé en  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . En 1977 pour l'ensemble du Ferlo sableux, et en incorporant la production annuelle de feuilles des ligneux, il donne (BILLE 1977 b) la relation :

$$Y = 3 p + \frac{P^2}{300} \text{ ou } Y \text{ est exprimé en } \text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$$

GROUZIS et SICOT (1981), pour l'ensemble des groupements du bassin versant de la mare d'OURSIS (Haute Volta) obtiennent :

$$Y = 0,216 P + 13,5$$

dans laquelle Y est exprimé en  $g.m^{-1}$ .

A partir des mesures de BILLE et de nos propres mesures, pour FETE-OLE, sur 10 années, en excluant 1972 et 1973 année de sécheresse exceptionnelle, nous obtenons les relations suivantes :

(voir figure 65)

- groupement Ia	$Y = 0,98 P + 430$	$(r^2 = 0,42)$
- groupement IIIa	$Y = 6,93P + 112,4$	$(r^2 = 0,71)$
- ensemble de la parcelle	$Y = 3,3 P + 308,9$	$(r^2 = 0,91)$

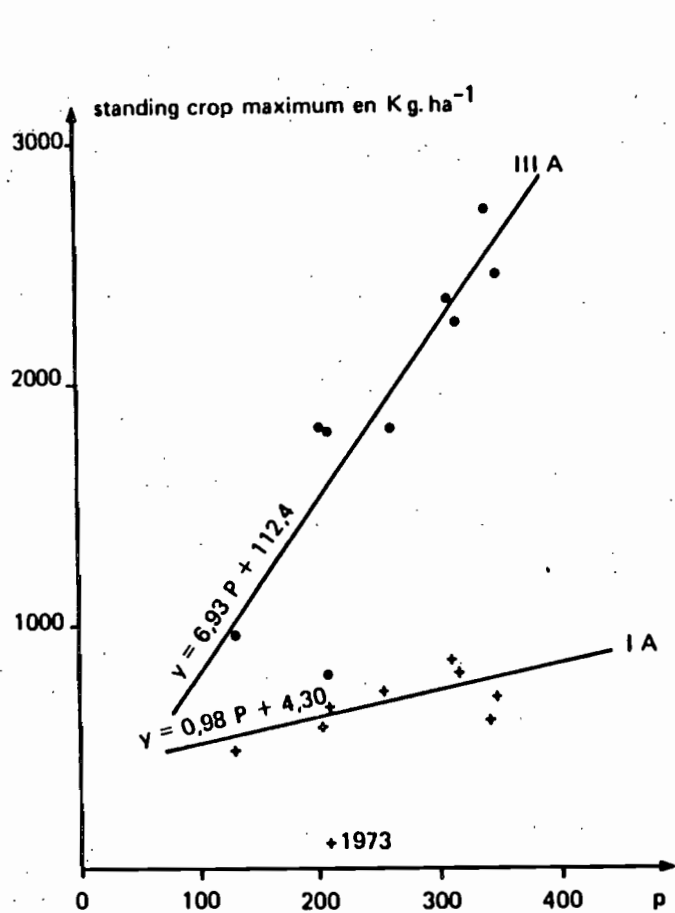
On voit que les productions par mm de pluie incidente varient fortement suivant les groupements. Leur composition spécifique et leur position topographique déterminent pour chacun une utilisation différente de l'eau.

Cependant, si l'on considère une unité de surface suffisante, intégrant divers groupements et l'ensemble des éléments du paysage on obtient des valeurs globales assez proche comme le montre le tableau LIX. Les valeurs obtenues pour l'ensemble de la parcelle de FETE-OLE se rapprochant nettement des valeurs moyennes données pour la zone sahélienne. Pour DAHRA, pour les 4 années étudiées (voir figure 67), il est impossible de dégager des corrélations. Pour l'ensemble de la parcelle le calcul donne :

$$Y = 1,209 P + 1\ 1819,45 \quad (r^2 = 0,192) \text{ la régression n'est pas significative.}$$

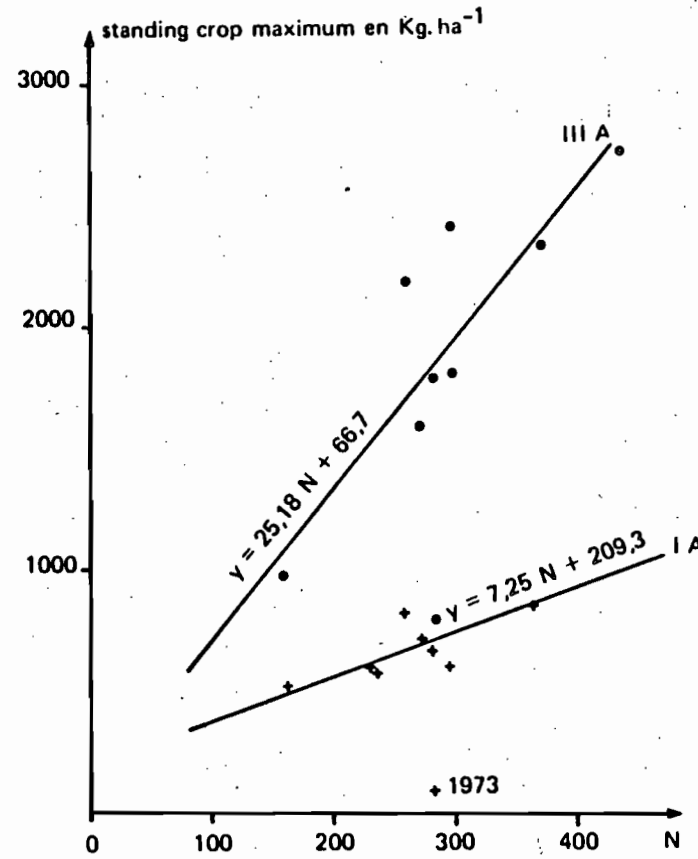
Tableau LIX - QUELQUES VALEURS DE PRODUCTION GLOBALE DE BIOMASSE VEGETALE POUR UN mm DE PLUIE INCIDENTE POUR LA ZONE SAHELIENNE.

BREMAN et al. (1971)	$2,6 \text{ kg.ha}^{-1} . \text{mm}^{-1}$
LE HOUEROU et HOSTE (1977 b)	$2,58 \text{ kg.ha}^{-1} . \text{mm}^{-1}$
BILLE (1975 et 1977 b)	$3,0 \text{ kg.ha}^{-1} . \text{mm}^{-1}$
GROUZIS et SICOT (1981)	$2,16 \text{ kg.ha}^{-1} . \text{mm}^{-1}$
CORNET (FETE-OLE)	$3,3 \text{ kg.ha}^{-1} . \text{mm}^{-1}$



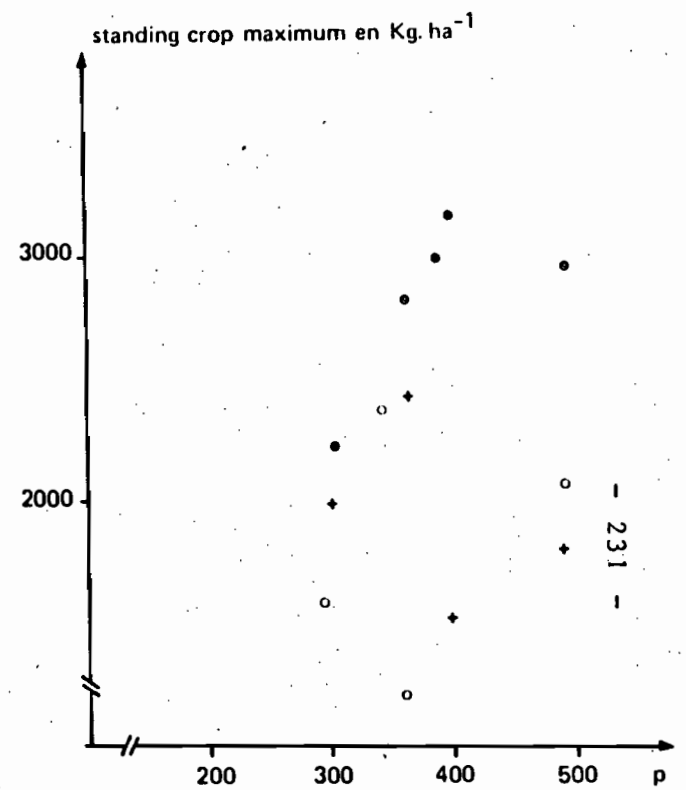
FETE OLE groupement IA +  
groupement III A •

Fig. 65 - Corrélations entre phytomasse érigée totale et pluviométrie annuelle (P en mm)



FETE OLE groupement IA •  
groupement III A +

Fig. 66 - Corrélations entre phytomasse érigée totale et durée de la saison des pluies (N en g.)



DAHRA groupement IB +  
groupement IIB •  
groupement IC o

Fig. 67 - Relation entre phytomasse érigée totale et pluviométrie annuelle (P en mm)



Un autre élément pouvant être pris en compte est la durée de la saison des pluies efficaces BILLE (1977a) donne pour FETE-OLE la relation :

$$Y = 9,5 N + 200 \quad Y \text{ exprimé en kg.ha}^{-1}$$

N exprimé en jours.

Toujours pour FETE-OLE (voir figure 66) nous obtenons :

$$\begin{array}{lll} \text{Groupement Ia} & Y = 7,25 N + 209,8 & (r^2 = 0,76) \\ \text{" IIIa} & Y = 25,18 N + 66,7 & (r^2 = 0,59) \\ \text{Ensemble de la parcelle} & Y = 9,48 N + 491,5 & (r^2 = 0,58) \end{array}$$

Pour DAHRA Nord, pour l'ensemble de la parcelle, on obtient :

$$Y = 13,66 N + 1079 \quad (r^2 = 0,89)$$

Différents travaux ont montré (voir le paragraphe suivant) que l'élément déterminant de la production végétale en conditions hydriques limitantes était la quantité d'eau évapotranspirée. On sait par ailleurs qu'en zone sèche, en moyenne pour une surface assez étendue, l'ETR est peu différent de la pluie infiltrée.

GROUZIS et SICOT (1981) ont étudié pour OURSI les corrélations entre lame d'eau infiltrée durant la période de végétation et production végétale, ils obtiennent la relation :

$$Y = 0,40 P_e - 34,6 \quad (r^2 = 0,33)$$

où Y est la biomasse totale produite en  $\text{g.m}^{-2}$  et  $P_e$  la pluie infiltrée.

A l'échelle mondiale, ROSENZWEIG (1968) propose, après compilation de données très variées, la relation suivante :

$$\log(\text{NAAP}) = (1,66 \pm 0,27) \log \text{AE} - (1,66 \pm 0,07)$$

dans laquelle NAAP est la productivité aérienne nette annuelle en  $\text{g.m}^{-2}$  et AE l'évapotranspiration annuelle en mm. Travaillant à la même échelle LIETH (1976) donne entre autres relations :

$$Y = 3000 (1 - e^{-0,0009696 (E-20)})$$

dans laquelle Y est la production primaire aérienne nette en  $\text{g.m}^{-2}$  et E l'ETR annuel en mm.

D'autres auteurs tels SIMS et SINGH (1978), pour le Nord-Ouest des Etats Unis utilisent une relation prenant en compte la pluviométrie et l'ETR.

$$Y = 9,79 + 0,13 P - 0,28 Pa + 0,59 AET$$

où

Y = biomasse maximale produite en g.m<sup>-2</sup>  
P = Moyenne pluviométrique en mm  
Pa = Pluviométrie de l'année en mm  
AET = ETR annuelle

FLORET et PONTANIER (1978) se basant sur les travaux de DE WIT (1958) ont montré que pour les zones arides de TUNISIE la production de biomasse est proportionnelle au rapport ETR/ETP, ils ont établi la relation :

$$P = 14\,878 \frac{ETR}{Eo} - 368 \quad (r^2 = 0,81)$$

dans laquelle :

P est la production en kg de matière sèche.ha<sup>-1</sup>  
ETR = L'évapotranspiration réelle mesurée en mm.  
Eo = Evaporation Piche en mm.

Cette relation permet une bonne estimation de la production en connaissant ETR et Eo.

On peut en fait varier la nature des relations mathématiques empiriques traduisant les corrélations entre éléments climatiques et la production de biomasse. Certains auteurs tels que LIETH (1976) ont fait de nombreuses tentatives. On ne doit cependant pas oublier que cette méthode possède des limitations propres à l'échelle d'utilisation, à la représentativité des éléments pris en compte et à la faible précision des résultats.

Au niveau des éléments considérés, depuis les travaux de DE WIT (1958) la plupart des auteurs considèrent que l'élément le plus pertinent, pour relier alimentation en eau et production, est le rapport ETR cumulée/ETP moyenne. L'ETR étant difficilement mesurable, elle peut être remplacée par des éléments variant dans le même sens, tels la pluie incidente ou la pluie infiltrée. Mais ces éléments ne sont proportionnels à l'ETR que dans des conditions particulières qu'il convient de vérifier. Par ailleurs, les liaisons entre les éléments climatiques et la production dépendent de la correspondance dans le temps des phases climatiques et des phases du cycle de production.

Ainsi les corrélations entre pluie incidente et production ne sont relativement étroites que dans le cadre de la production moyenne d'une zone assez vaste, intégrant plusieurs groupements et l'ensemble des positions topographiques, dans des conditions climatiques voisines. En effet,

c'est seulement à cette échelle que P et ETR peuvent être considérées comme peu différentes. Cela élimine les applications à des climats très différents (échelle mondiale) ou à des groupements particuliers dont l'alimentation en eau dépend essentiellement des conditions stationnelles.

Le processus de production est un phénomène complexe dépendant d'un grand nombre de variables extérieures et si l'eau paraît être une des variables essentielles dans les zones arides, elle n'est pas la seule. L'établissement de corrélations à partir d'un nombre restreint d'années de mesures n'est possible que si la répartition des pluies n'est pas trop différente, la précision obtenue est toujours faible.

En résumé l'étude empirique des corrélations existant entre les éléments du climat et la production globale de biomasse est intéressante dans la mesure où elle permet, d'une part de fournir des valeurs approximatives régionales, d'autre part de soulever un certain nombre de problèmes concernant le processus de production. Cependant, les retombées pratiques restent limitées. L'incertitude à la prévision, l'aspect global des résultats et l'échelle d'application restreignent son utilisation. Cela nous a conduit à étudier de façon plus détaillée le bilan hydrique et la production végétale, afin de tenter de fournir des relations plus satisfaisantes.

#### 4.2. - Détermination d'une fonction de production à partir des éléments du bilan hydrique

Le but poursuivi ici est de déterminer un ensemble de relations simples permettant de simuler aussi exactement que possible la production de biomasse de la végétation herbacée naturelle, à partir des éléments mesurés ou simulés du bilan hydrique et de quelques paramètres propres aux groupements végétaux et aisément déterminables. Ce modèle simple de production de biomasse doit permettre de fournir les simulations de production sur les périodes pour lesquelles on dispose des données climatiques; ceci en vue de la détermination des fréquences de production. Ces fréquences de production constituant une information importante pour la mise en valeur des parcours sahéliens.

##### 4.2.1. - Bases du modèle

La production de biomasse d'un couvert herbacé est sous la dépendance d'un certain nombre de facteurs qui influent sur la photosynthèse et la répartition des assimilats. Les nombreux travaux de physiologie et d'écophysiologie ont montré que la production photosynthétique dépend : de caractères génétiques propres au végétal, de la quantité de matériel photosynthétiquement actif et de facteurs extérieurs tels le rayonnement, la température, l'alimentation en eau, l'alimentation minérale...

Différents auteurs, notamment BAIER (1977), ANGUS *et al.* (1980), ont montré que l'on pouvait exprimer la production de biomasse durant un intervalle de temps par une suite de produits de fonctions des variables extérieures.

$$Y = k. W. V1. V2. V3...$$

Dans cette relation :

- Y représente la production de biomasse durant une période, par unité de surface
- k est un coefficient de production pour la végétation considérée
- W est une fonction de la biomasse présente
- V1, V2, V3... sont des fonctions des variables de l'environnement.

Selon BAIER (1977), ces fonctions sont de type polynomial et ANGUS *et al.* (1980) les définissent comme des fonctions de modulation de la production, dont les valeurs varient entre 0 et 1.

Nous considérons successivement les principaux facteurs du milieu agissant sur la production. En zone sahélienne, le rayonnement durant la période de croissance végétale est élevé (rayonnement global journalier supérieur à  $17\ 000\ \text{J.m}^{-2}$ ). Comme le souligne DE WIT (1958), le rayonnement ne semble pas constituer un facteur limitant pour la production dans ces zones. De même la température, qui durant la période humide fluctue peu autour d'une moyenne journalière de  $28^{\circ}\text{C}$ , est proche de l'optimum et intervient peu sur les variations de production.

L'alimentation hydrique, du fait de la faiblesse des précipitations et des grandes variations de sa répartition constitue un des facteurs essentiels de variation de la production. Le rôle de ce facteur a fait l'objet de très nombreux travaux. DE WIT (1958) et ROBELIN (1962), entre autres, ont montré que lorsque l'alimentation en eau est limitante, la production de biomasse est proportionnelle à la transpiration.

DE WIT (1958) donne la relation :

$$P = m \cdot TR \cdot E_o^{-1}$$

où P est la production de biomasse

TR la transpiration cumulée

$E_o$  l'évaporation moyenne d'un bac d'eau libre

m étant un coefficient de proportionnalité variant avec la culture ou la végétation considérée et avec le niveau de la fumure.

La figure 68 montre selon DE WIT l'allure générale de la courbe représentant la production P en fonction de  $TR/E_o$ .

Si, comme le soulignent HANKS (1974), SELIRIO et BROWN (1979), cette relation n'est pas établie de façon définitive, elle paraît concorder de façon satisfaisante avec l'ensemble des résultats expérimentaux. Elle est utilisée par de très nombreux auteurs pour expliciter la liaison entre alimentation en eau et production (HANKS *et al.*, 1969 ; ROSE *et al.*, 1972 ; MAC COWN, 1973 ; HANKS, 1974 ; VAN KEULEN, 1975 ; RAMBAL *et al.*, 1977 ; SELIRIO and BROWN, 1979 ; ANGUS *et al.*, 1980 ; FRANQUIN, 1981).

En raisonnant sur la relation de DE WIT, différents auteurs parmi lesquels HANKS *et al.* (1969) et FRANQUIN (1981) ont montré qu'elle pouvait s'exprimer sous la forme :

$$Y = m \cdot \frac{1}{ETP} \cdot \sum ETR$$

où la transpiration TR est remplacée par la somme des évapotranspirations réelles, et  $E_o$  par l'évapotranspiration potentielle moyenne (ETP) durant la période.

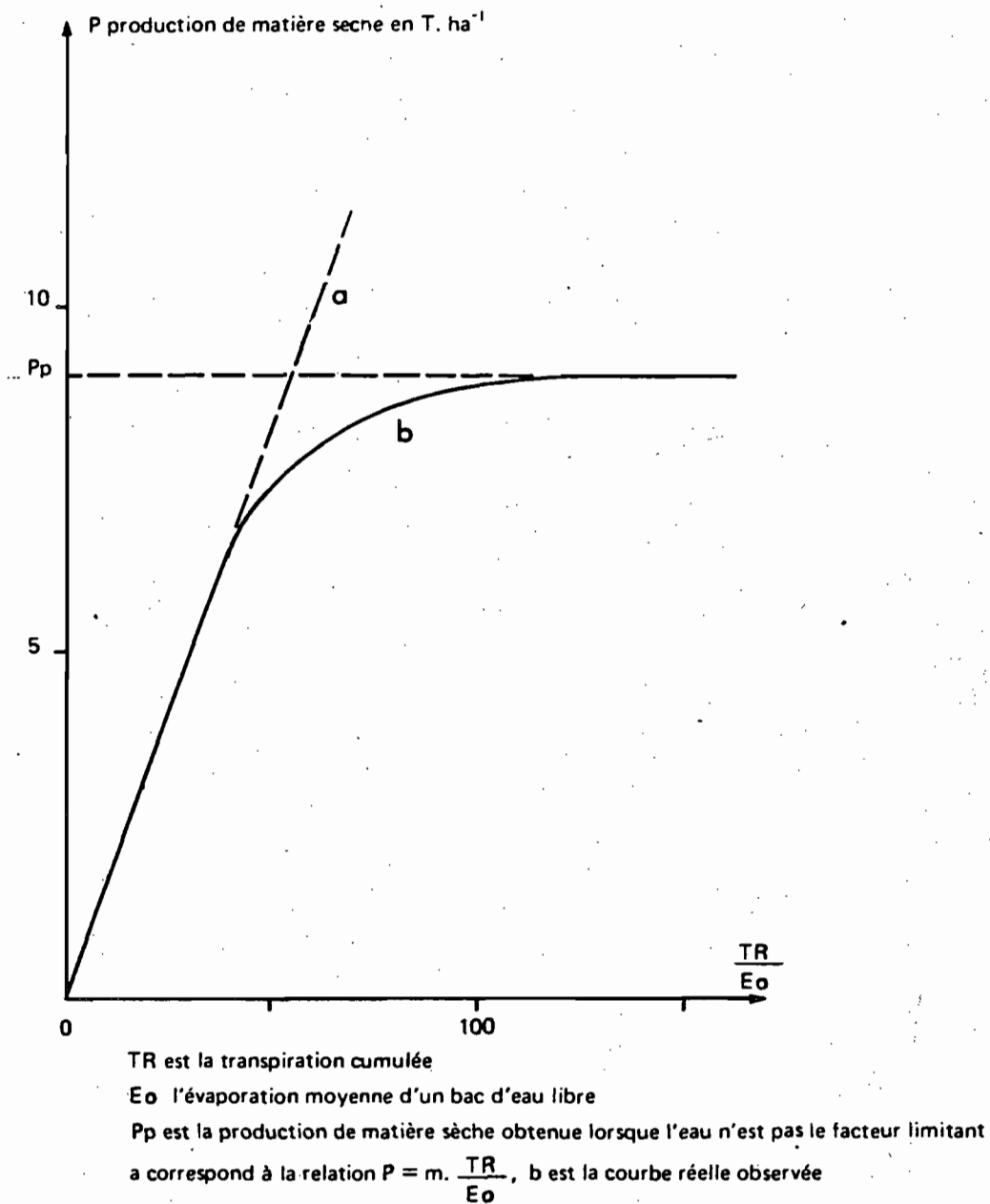


Fig. 68 - Relation entre  $TR/E_o$  et la production de matière sèche (d'après DE WIT, 1958).

Selon ROSE *et al.* (1972), la relation entre Y et ETR est quasi linéaire, le rapport  $\Sigma ETR/Y$  est relativement constant. Sa valeur dépend de la demande climatique d'une part, de la végétation et de niveau de la fumure d'autre part.

Cette relation traduit le fait que la production est proportionnelle à la somme des ETR, et que cette proportionnalité varie notamment en fonction de la demande climatique moyenne ( $\overline{ETP}$ ). L'introduction de  $\overline{ETP}$  dans la relation revient à corriger le rapport de proportionnalité en fonction de l'aridité plus ou moins forte de la période. On peut donc envisager de remplacer  $\overline{ETP}$  par le rapport  $\overline{ETR}/\overline{ETP}$ . Ainsi, durant une période de donnée la relation entre l'alimentation en eau et la production pourra être traduite par la relation :

$$Y = k_1 \cdot g \left( \frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \right) \cdot \Sigma ETR$$

$k_1$  est le coefficient de proportionnalité,  $g \left( \frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \right)$  ou  $g(X)$ , si l'on pose  $\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} = x$  est une fonction modulante.

Pour le groupement Ib de DAHRA nord les résultats de mesures montrent que les valeurs moyennes de  $\frac{Y}{\Sigma ETR}$  en fonction de  $\frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} = X$  sont les suivantes :

pour $X < 0,20$	$\frac{Y}{\Sigma ETR} = 0$	
$0,20 < X < 0,40$	$\frac{Y}{\Sigma ETR} = 0,10$	$\sigma = 0,06$
$0,40 < X < 0,60$	$\frac{Y}{\Sigma ETR} = 0,47$	$\sigma = 0,25$
$0,60 < X < 0,80$	$\frac{Y}{\Sigma ETR} = 0,61$	$\sigma = 0,37$
$X > 0,80$	$\frac{Y}{\Sigma ETR} = 0,77$	$\sigma = 0,26$

La nature de la fonction  $g(X)$  n'est pas connue, on sait seulement qu'elle passe par un maximum pour  $X = 1$  et qu'elle s'annule pour une valeur limite  $X_0$  pour laquelle la production de biomasse s'arrête. On peut assimiler cette fonction à une branche de parabole d'équation.

$$g(X) = a(X)^2 + b(X) + c$$

Si l'on choisit que la valeur maximum de  $g(X)$  soit égale à 1 et si l'on connaît expérimentalement la valeur limite  $X_0$  pour

laquelle la production cesse, les coefficients a, b, c sont parfaitement définis.

L'expression de la production en fonction de l'alimentation en eau peut être décrite par la relation :

$$Y = kl \cdot \left[ a \left( \frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} \right)^2 + b \frac{\overline{ETR}}{\overline{ETP}} + c \right] \Sigma ETR$$

Pour des conditions écologiques semblables la production dépend de la biomasse présente, qui conditionne d'une part le recouvrement et d'autre part la quantité de matériel photosynthétique. S'agissant de groupements herbacés composés essentiellement d'annuelles, le recouvrement croît de 0 en début de saison des pluies, à pratiquement 1, au moment de la biomasse maximale. Les mesures de recouvrement, réalisées par la méthode de points quadrats, montrent que sa variation en fonction de la biomasse présente peut être traduite par la relation :

$$R = 1 - e^{-\alpha B}$$

où R est le recouvrement relatif, B la biomasse et  $\alpha$  un paramètre variant selon les groupements étudiés ; ici il varie de  $4 \cdot 10^{-2}$  à  $6 \cdot 10^{-2}$  (CORNET et RAMBAL, 1981).

Les espèces annuelles constituant les groupements ont un cycle court dont la durée maximale paraît liée à un déterminisme interne. Certaines espèces présentent une sensibilité à la photopériode (PENNING DE VRIES, 1978 ; MERLIER, 1972). Leur croissance n'est pas illimitée et la production décroît en fin de cycle. DE WIT (1958) montre qu'il existe, dans le cas des cultures annuelles, une production maximum (voir figure 68). Cette valeur dépend de l'espèce végétale et de facteurs externes autres que le facteur eau, dont le plus important paraît être l'alimentation minérale. Cet auteur souligne qu'il est nécessaire de déterminer expérimentalement cette caractéristique pour pouvoir simuler la production d'une culture à partir du bilan hydrique. PENNING DE VRIES et VAN HEEMST (1975) ont montré que pour les Graminées dominantes des parcours sahéliens, les potentialités de production maximum sont très peu différentes d'une espèce à l'autre. D'autre part, les études des cycles d'éléments minéraux (BERNHARD-REVERSAT, 1981 ; PENNING DE VRIES *et al.*, 1978) ont montré que, dans les conditions naturelles, les quantités d'éléments nutritifs sont très faibles, mais relativement stables d'une année à l'autre. Ces éléments permettent de considérer qu'il existe une valeur BM de production maximale caractéristique de chaque groupement, qui correspond à la production maximum de ce groupement lorsque l'alimentation hydrique n'est pas limitante. Cette valeur dépend de l'équilibre de l'ensemble des autres facteurs supposés constants dans les conditions naturelles.



La production de biomasse d'un groupement végétal, croît proportionnellement l'accroissement de la biomasse présente. Mais comme le montre la figure 68, la proportionnalité entre production et transpiration décroît, au fur et à mesure que l'on se rapproche de la biomasse maximale. On peut écrire que la biomasse produite durant une période est fonction de la biomasse présente  $B_i$  en début de période et de la biomasse maximale caractéristique du groupement.

$$T = f(B_i, BM)$$

Nous avons déterminé empiriquement la relation

$$f(B_i, BM) = k_2 \sqrt{B_i (BM - B_i)}$$

Nous avons vu au paragraphe 3.4. du chapitre II que la courbe de production de biomasse en fonction du temps était une courbe typique en "S", présentant une phase de croissance rapide presque linéaire correspondant à la vitesse maximum de production. Si nous considérons la courbe pour une année humide, le point d'inflexion de la courbe, situé dans la phase linéaire de croissance, se situe environ à  $B = \frac{BM}{2}$ . Si l'on fait  $k_2 = \frac{2}{BM}$  on aura  $f(B_i, BM) = 1$  en ce point.

Par ailleurs, quelque soit l'année, la phase rapide de croissance correspond à la période où l'alimentation hydrique est optimum  $ETR/ETP \approx 1$  dont la production durant cette phase sera égale à :

$$Y = k \cdot \sum ETR \text{ d'où } k = \frac{Y}{\sum ETR}$$

D'après les mesures (cf. § 2.4 chapitre II) on observe que pour un même groupement cette valeur  $k = Y/\sum ETR$  varie peu d'une année à l'autre. Ainsi pour DAHRA Nord Ib nous aurons

$$1975 k = 0,87$$

$$1876 k = 1,04 \text{ soit } k \text{ moyen} = 0,95$$

$$1977 k = 0,94$$

$$\text{Pour DAHRA Nord IIb } k \text{ moyen} = 1,37$$

$$\text{Pour DAHRA Sud Ic } k \text{ moyen} = 1,15$$

Cela signifie que durant la phase linéaire de croissance rapide, au cours de laquelle l'alimentation en eau est bonne, la quantité de matière sèche produite par mm d'eau transpirée est relativement constante et caractéristique de chaque groupement.

La production d'un groupement herbacé durant une période déterminée pourra donc être traduite par la relation :

$$Y_i = k \cdot f(B_{i-1}, BM) \cdot g \left( \frac{\overline{ETR}_i}{\overline{ETP}_i} \right) \cdot \Sigma ETR_i$$

Dans laquelle :  $Y_i$  est la production de biomasse durant la période en  $g \cdot m^{-2}$  ;

$k$  est l'efficience moyenne de l'eau durant la phase rapide de croissance ;  $k = \frac{Y}{\Sigma ETR}$  en  $g \cdot m^{-2} \cdot mm^{-1}$  ;

$B_{i-1}$  est la biomasse en début de période en  $g \cdot m^{-2}$  ;

$BM$  la production maximale de biomasse lorsque l'eau n'est pas limitante en  $g \cdot m^{-2}$  ;

$\overline{ETR}_i / \overline{ETP}_i =$  L'évapotranspiration relative durant la période

$\Sigma ETR_i =$  l'évapotranspiration réelle cumulée durant la période (en mm)

$k$  et  $BM$  sont des caractéristiques du groupement déterminables expérimentalement,  $ETR$  et  $ETP$  sont des éléments du bilan hydrique mesurés ou obtenus par stimulation à l'aide du modèle BIJOU.

Cette relation permet de simuler l'accroissement de biomasse au cours d'une période déterminée. Si au cours d'une période, cette production de biomasse est nulle (à cause de la sécheresse par exemple,  $ETR/ETP$  très faible), la quantité de biomasse présente va décroître du fait de la sénescence et de la mort d'une partie des organes. Nous n'avons aucune connaissance précise sur ce mécanisme. Nous en sommes réduits à quelques observations. On constate que lors de l'arrêt de production, la quantité de biomasse décroît proportionnellement au temps et à la biomasse présente. Pour les groupements Ib et Iib de DAHRA nord nous avons  $D = 0.026 B_i$  ( $r^2 = 0.58$ ) où  $D$  est la décroissance de biomasse durant une période sèche en  $g \cdot g^{-1}$  et  $B_i$  la biomasse présente en début de période. Pour DAHRA sud Ic nous avons  $D = 0.05 B_i$  ( $r^2 = 0.39$ ). Nous introduisons cette relation dans le modèle, afin de tenir compte des périodes sèches intercalaires.

#### 4.2.2. - Entrées et sorties du modèle

##### ENTREES :

Les entrées du modèle sont les suivantes :

##### Variables liées au bilan hydrique :

Les variables sont  $ETR$  et  $ETP$  pour chaque période. Elles sont mesurées, ou obtenues par simulation à partir du modèle de bilan hydrique. Dans ce cas le modèle utilise directement les sorties en cartes perforées du modèle BIJOU.

##### Caractéristiques propres au groupement :

Ces caractéristiques sont :  $k$ , l'efficience hydrique moyenne durant la phase de croissance active déterminée expérimentalement ;

BM la production maximum dans le cas où le facteur hydrique n'est pas limitant. Cette valeur peut être déterminée expérimentalement. Dans les mesures réalisées sur le terrain, nous n'avons pas déterminé BM, cette valeur a été estimée en prenant le maximum de biomasse mesuré et en le majorant de 20 %.

#### Conditions initiales :

La production de biomasse durant une période étant proportionnelle à la biomasse présente en début de période, il est nécessaire en début de cycle d'initialiser une biomasse de départ correspondant à celle existant après la levée. Cette quantité de biomasse lors des mesures varie de 2 à 9 g.m<sup>-2</sup>, elle varie aussi de façon importante en fonction de la date de mesure. Nous avons choisi arbitrairement 3 g. m<sup>-2</sup> pour l'ensemble des groupements. En fait les simulations ont montré que cette valeur avait peu d'influence sur les résultats.

La simulation débute avec la levée : nous rappelons (cf. § 2.1.2. chap. II) que les conditions de levée dans les sols sableux de la zone étudiée sont : une pluie supérieure ou égale à 20 mm ou une pluie supérieure à 10 mm suivie d'une décade comportant au moins 10 mm de précipitations. Cela correspond en fait à la première décade où ETR/ETP supérieure 0,20.

La simulation de la production de biomasse débutera lorsque ETR/ETP décadaire sera supérieure à 0,20. Cette valeur peut être modifiée si le modèle est utilisé dans d'autres conditions.

#### LES SORTIES DU MODELE :

Les sorties du modèle sont :

- La biomasse présente en fin de chaque période (BP).
- La production de biomasse pour chaque période, (PB).
- La biomasse maximale obtenue au cours de l'année (B max).

Les sorties se font sous forme de tableau imprimé, mais l'on peut également obtenir la sortie des cartes perforées. Ces cartes sont alors utilisées directement par le modèle d'analyse fréquentielle AFREQ. Ici les calculs ont été faits avec un pas de temps décadaire, mais il est possible de modifier ce pas de temps pour l'adapter au pas de temps de mesure ou de simulation du bilan hydrique.

#### 4.3.2. - Calibration, validation et intérêt du modèle.

Le modèle appelé BIOPE (Production de biomasse périodique) a été écrit en Basic et utilisé sur le calculateur WANG du

Laboratoire d'écophysiologie du C.E.P.E. Une version a été réalisée en FORTRAN IV et mise en oeuvre sur l'ordinateur IBM 3033 du C.N.U.S.C. (Centre National Universitaire Sud de Calcul). Les mesures de l'année 1977 pour les groupements Ib, I Ib et Ic de DAHRA ont servi à la calibration du modèle, les autres années de mesures (1975, 1976, 1978) ont servi à sa vérification.

Les figures 69 et 70 montrent les comparaisons entre les valeurs mesurées et simulées de biomasse pour le groupement Ib de DAHRA nord. La figure 71 montre les mêmes comparaisons pour 1977 pour les groupement I Ib et Ic.

Les comparaisons des valeurs mesurées et des valeurs simulées appellent les commentaires suivants :

- Pour 1976 et 1977, les résultats de la simulation sont très satisfaisants ; on retrouve non seulement l'allure des courbes déterminées expérimentalement, mais les valeurs simulées sont très proches des valeurs mesurées.

- Pour 1975, la simulation reste satisfaisante et les valeurs simulées sont assez proches des valeurs mesurées, bien que nous ne connaissions pas l'intervalle de confiance attaché à ces mesures qui ont été réalisées par BILLE. Cependant, la décroissance de la biomasse se produit plus rapidement que ne le simule le modèle. Il semble que, bien que l'alimentation hydrique ne soit pas limitante, la biomasse chute rapidement en octobre. Cela paraît être dû soit au déterminisme spécifique de durée du cycle, soit à des conditions d'alimentation minérale déficiente non suffisamment prises en compte par le modèle.

- En 1978, les courbes de biomasse mesurées montrent une allure atypique (cf. § 3.4. Chap II) liée à l'existence de périodes sèches intercalaires importantes. La simulation rend bien compte de l'allure de ces courbes (cf. fig. 70), mais sous-estime nettement la croissance lors de la première phase pour les groupements Ib et I Ib. Cette sous-estimation est due au fait que l'efficacité de l'eau évapotranspirée  $k = Y/ETR$  est beaucoup plus élevée que la valeur moyenne notée pour les autres années. Cette différence de comportement peut être expliquée par la contribution importante durant cette phase (Cf. tableau XXIII) d'une espèce précoce à grand développement : *Aristida stipoides* habituellement peu abondante.

En toute rigueur, le modèle, calibré pour une marge étroite de pluviométrie 300 à 500 mm, ne devrait pas être utilisé pour des valeurs de pluviométrie très différentes. Cependant en année sèche, les modifications probables de  $k$  et de  $BM$  restent faibles devant la variation du terme lié au bilan hydrique. Ce qui permet de justifier son utilisation dans ce cas.

Nous avons utilisé le modèle pour la simulation de la production de biomasse à DAHRA nord, pour les 23 années (1956-1978) pour lesquelles nous disposions des données climatiques. Le tableau LX montre les fréquences de production obtenues.

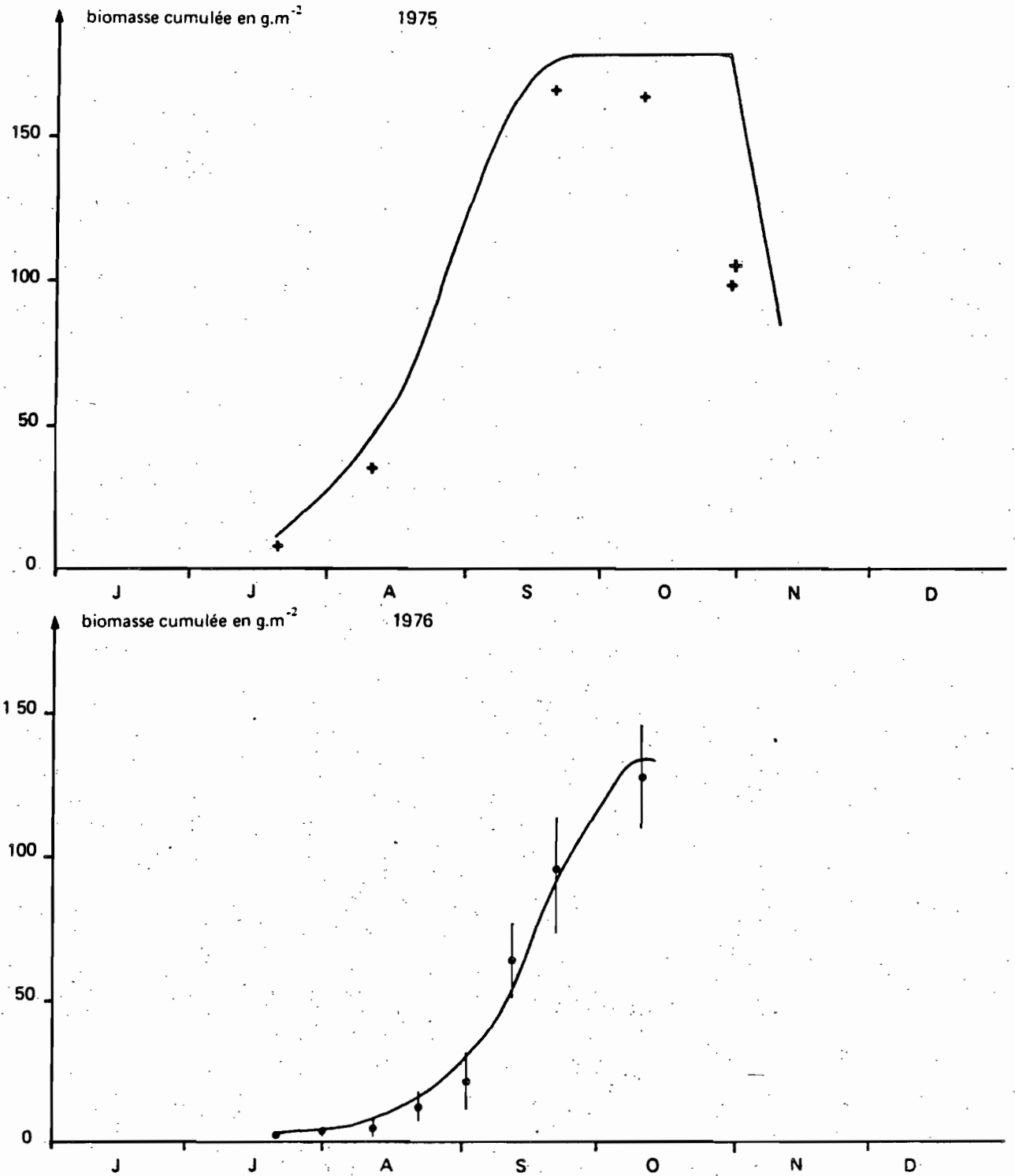


Fig. 69 Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées de biomasse pour le groupement I<sub>B</sub> de DAHRA NORD

- la ligne continue représente les valeurs  $K = 0,95 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$   $BM = 200 \text{ g.m}^{-2}$
- + valeurs mesurées (BILLE 1977<sub>b</sub>) intervalle de confiance non connu
- valeurs mesurées | intervalle de confiance

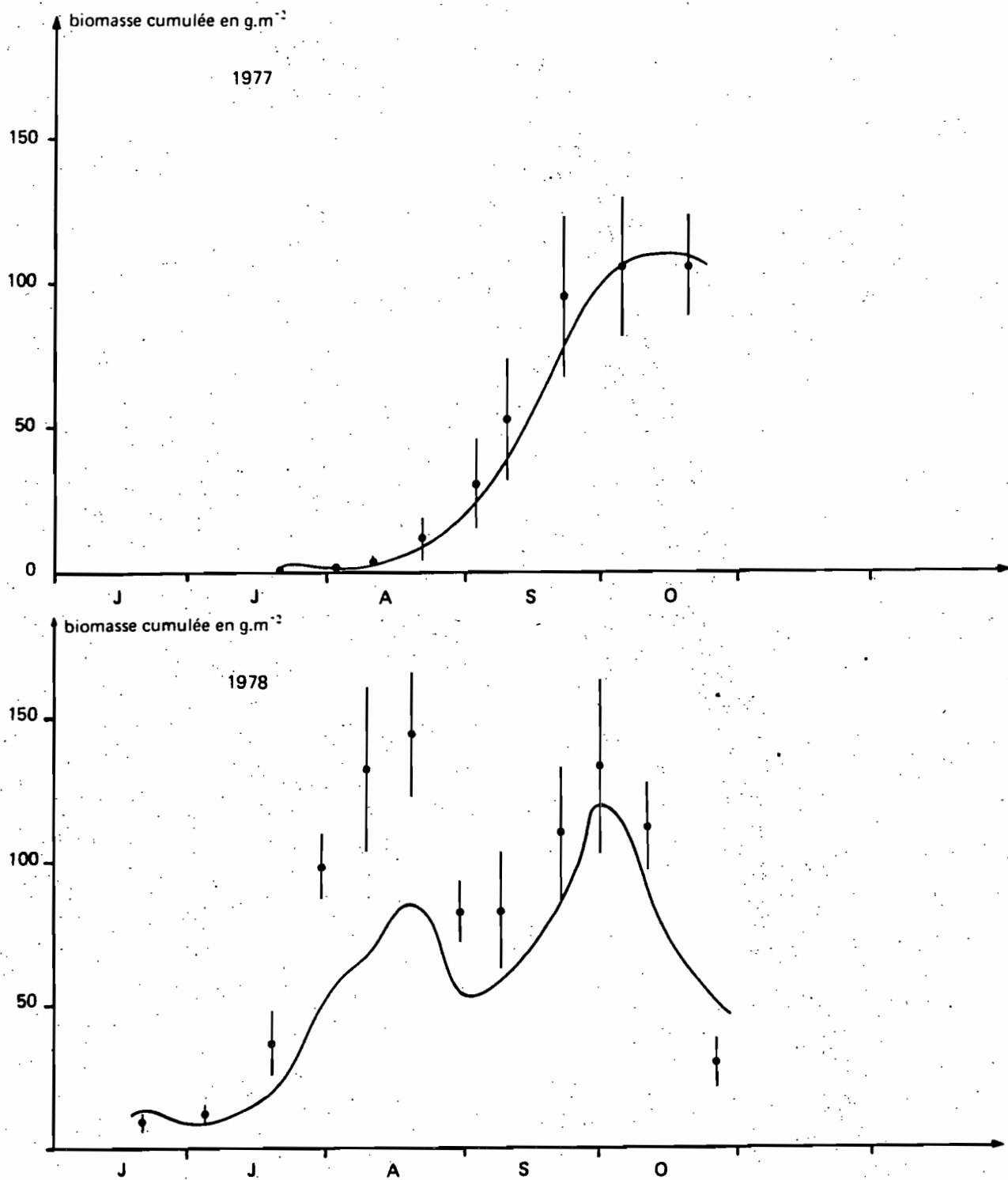


Fig. 70 Comparaison entre les valeurs mesurées et simulées de biomasse pour le groupement I<sub>B</sub> de DAHRA NORD

● valeurs mesurées | intervalle de confiance

la ligne continue représente les valeurs  $K = 0,95 g.m^{-2} . mm^{-1}$   
 $BM = 200 g.m^{-2}$

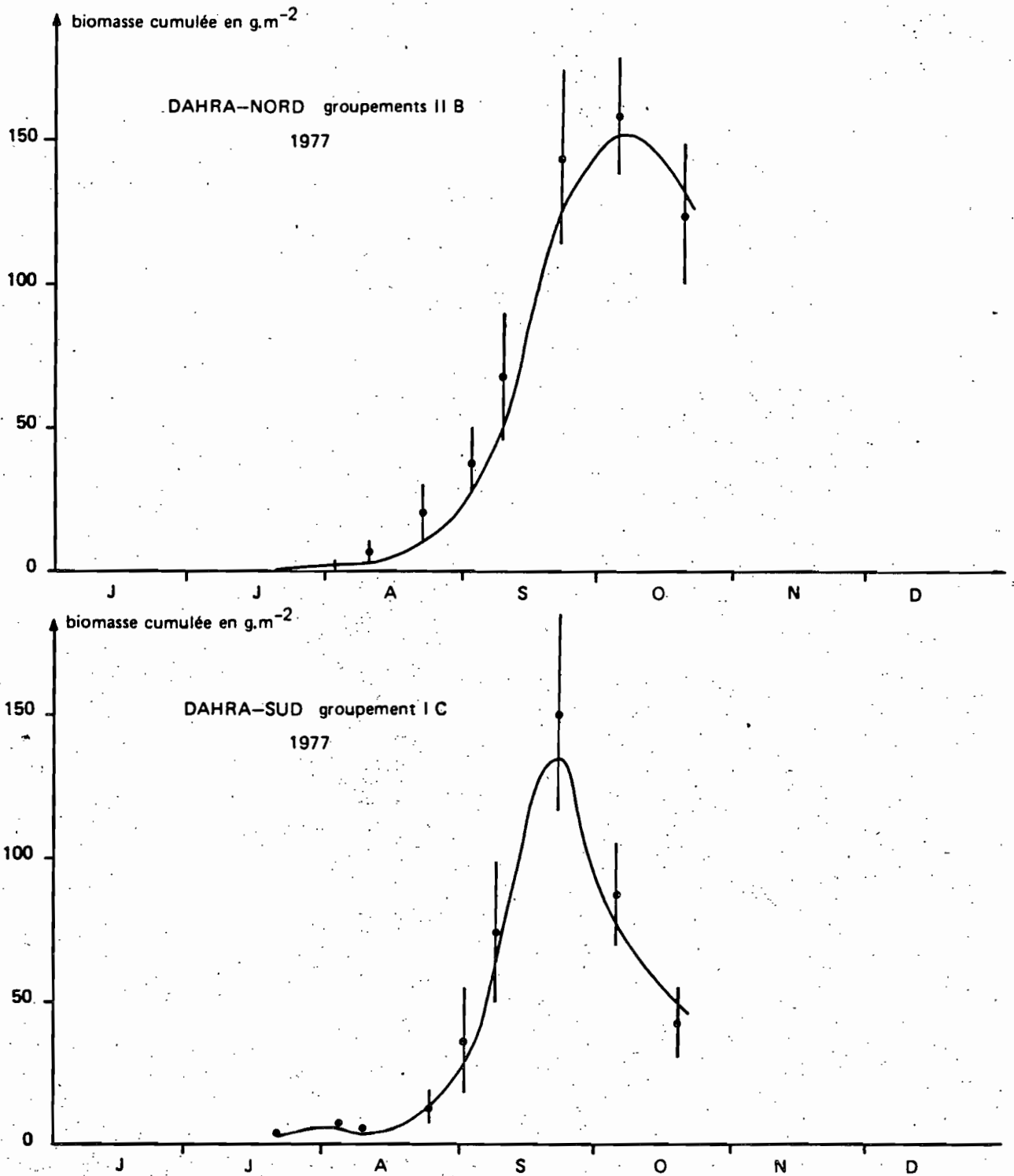


Fig.71. Comparaison des valeurs mesurées et simulées de biomasse

la ligne continue représente les valeurs simulées

valeurs mesurées, ● intervalle de confiance

pour Dahra Nord II B :  $K = 1,37 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $BM = 300 \text{ g.m}^{-2}$

pour Dahra Sud I C :  $K = 1,15 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,  $BM = 200 \text{ g.m}^{-2}$

Tableau LX : FREQUENCES DE PRODUCTION OBTENUES PAR SIMULATION SUR 23 ANS A DAHRA-NORD (1956-1978).

Groupements	Valeurs de la Production en kg.ha <sup>-1</sup>						valeur médiane
	<1000	1000 à 1500	1500 à 2000	2000 à 2500	2500 à 3000	>3000	
Ib	0,09	0,26	0,30	0,26	0,09	0	1730
IIb	0,09	0	0,22	0,22	0,13	0,34	2392
Ensemble de la parcelle	0,09	0,04	0,30	0,22	0,26	0,09	2166

Ainsi pour l'ensemble de la parcelle (5 ha) pour une production médiane de 2166 kg de matière sèche par ha, on constate que l'on aura environ :

- une année sur dix une production inférieure à 1000 kg.ha<sup>-1</sup>
- une année sur dix une production supérieure à 3000 kg.ha<sup>-1</sup>

soit une variation 1 à 3 avec une fréquence relativement importante. Les valeurs minimums obtenues par simulation sont 735 kg. ha<sup>-1</sup> en 1972 et 789 kg ha<sup>-1</sup> en 1970.

Lors de l'étude des pâturages de DAHRA, RAYNAL (1964) avait mesuré en 1961 une production de 1780 kg. ha<sup>-1</sup> pour le groupement à *Tephrosia*, correspondant au groupement Ib, la simulation donne une valeur de 1750 kg. ha<sup>-1</sup>. Il est à noter que la composition floristique de ce groupement n'a pratiquement pas varié. Par contre pour la parcelle de DAHRA sud, qui était occupé en 1961 par un groupement à *Diheteropogon hagerupii* et *Andropogon pseudapricus*, RAYNAL donnait une production de 2150 kg. Actuellement cette parcelle est occupée par le groupement Ic à *Tornia glochidiata* et la production fournie par simulation pour 1961 est de 1530 kg. ha<sup>-1</sup>.

En faisant varier le paramètre BM (Biomasse maximale lorsque l'eau n'est pas limitante) lors de la simulation on constate que pour 15 années sur 23, les variations des résultats sont très faibles (inférieures à 10 %). Par contre pour les 8 années correspondant aux années humides les valeurs de biomasse produites varient fortement avec BM.



En résumé, le modèle donne une simulation de la production de biomasse très satisfaisante pour les années moyennes ou sèches, durant lesquelles le facteur eau est le facteur limitant essentiel. Pour les années humides la valeur des résultats dépend de la bonne détermination du terme BM, et de sa stabilité dans le temps.

La détermination du terme BM peut être réalisée expérimentalement à condition de disposer de possibilités d'arrosage d'une petite parcelle. La stabilité dans le temps de cette valeur dépend des conditions d'équilibre. Des successions d'années sèches ou d'années humides entraînent des modifications de la quantité de matière retournant au sol, donc notamment des quantités d'azote disponible (BENHARD-REVERSAT, 1981), et des potentialités de production. Cela montre les limitations du modèle qui ne tient pas compte des facteurs limitants autre que l'eau. Une étude plus détaillée notamment du rôle de l'azote dans la production, serait nécessaire. Il est cependant intéressant de posséder un modèle permettant de simuler les valeurs moyennes et faibles de la production qui constituent des contraintes importantes pour les programmes de mise en valeur.

La figure 72 montre le schéma d'utilisation des différents modèles, ainsi que les éléments d'entrée et les résultats obtenus. Un modèle global comprenant à la fois la modélisation du bilan hydrique et la modélisation de la production biomasse est en cours de réalisation. Ce modèle présente l'avantage d'intégrer l'action de l'accroissement de biomasse sur le bilan hydrique. Le terme  $K = ETR/ETP$  n'est plus entré comme une donnée, mais calculé à partir d'une fonction du recouvrement, lui-même calculé à partir de la biomasse par une relation du type

$$R = 1 - e^{-\alpha B}$$

#### 4.2.4. - Discussion

La production de biomasse dans les phytocénoses sahéliennes dépend principalement de trois catégories de facteurs :

-La composition floristique et la structure de la végétation. Le tableau LXI montre que le rapport entre la biomasse totale produite (en  $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) et la somme des ETR durant la période de végétation, pour une même année, varie fortement avec le groupement considéré.

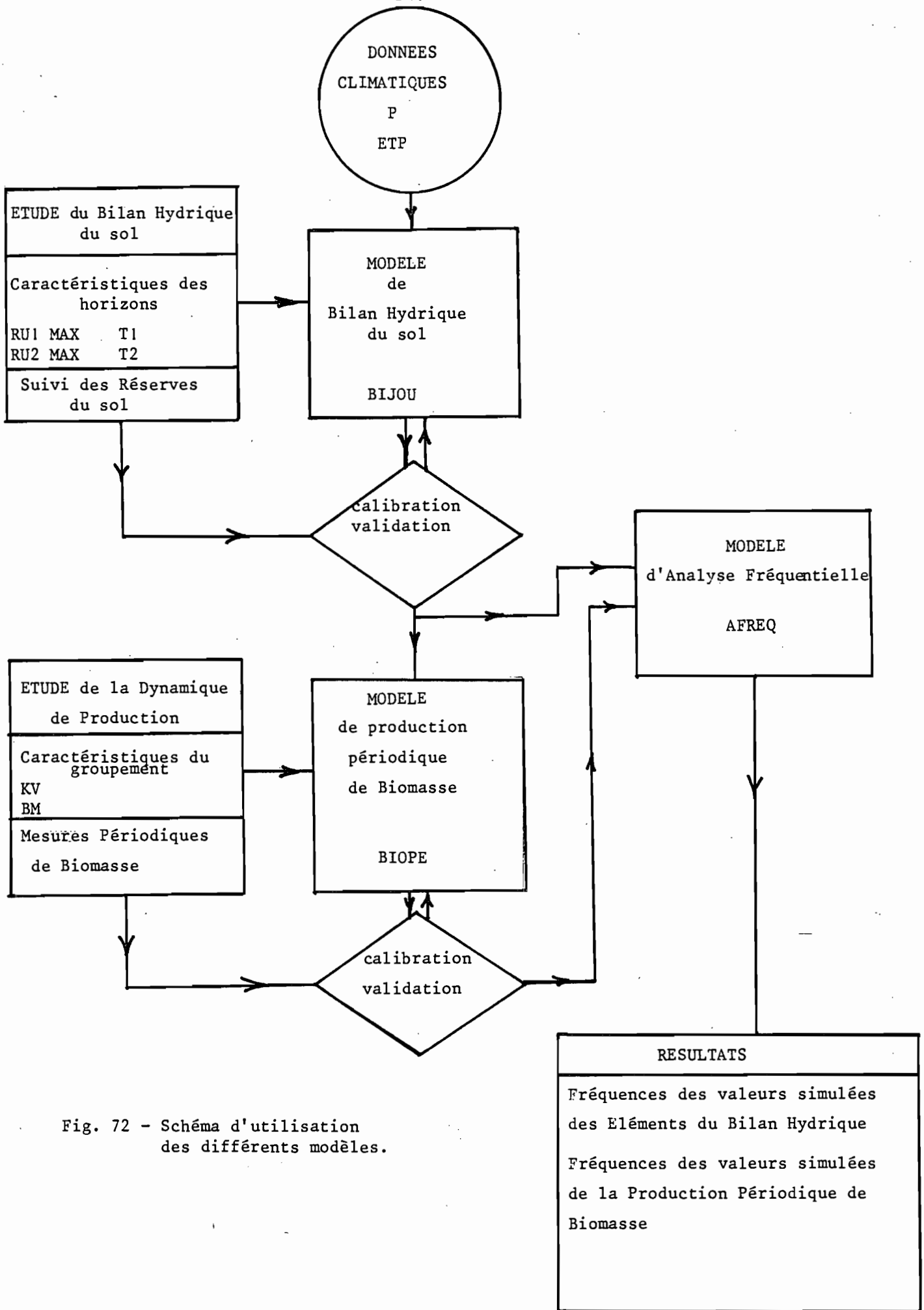


Fig. 72 - Schéma d'utilisation des différents modèles.

**TABLEAU LXI - EFFICIENCE DE L'EAU EVAPOTRANSPIREE DANS LES PRINCIPAUX GROUPEMENTS EN kg de M.S. ha<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>.**

FETE-OLE	Groupement Ia	Groupement IIa	Ensemble de la parcelle
1975	3,9	5,2	4,7
1977	6,9	8,4	8,8
DAHRA NORD	Groupement Ib	Groupement IIb	Ensemble de la parcelle
1975	3,8	6,2	4,8
1976	3,8	5,3	4,7
1977	3,5	4,9	4,4
1978	4,0	4,3	4,1
1956 - 1978 moyenne	4,6	6,2	5,6
DAHRA SUD	Groupement Ic		Ensemble de la parcelle
1975	4,6		4,7
1976	7,0		7,2
1977	5,4		5,5
1978	3,2		3,9

De même l'efficience moyenne de l'eau durant la phase de croissance rapide, qui semble constante d'une année à l'autre est caractéristique de chaque groupement. Elle paraît d'autant plus élevée, que la contribution des Graminées (de type C4) est plus importante. Elle est stable tant que les espèces dominantes sont du même type (par exemple Graminées fines) mais varie fortement lorsque l'espèce dominante est d'un type différent (exemple : la pullulation d'*Aristida stipoides* en 1978 à DAHRA nord).

- Les caractéristiques principales du climat : les variations interannuelles de la radiation solaire et de la température sont peu importantes, elles ne constituent pas un facteur limitant majeur. Les précipitations apparaissent donc comme le facteur le plus important de la production. Elles exercent leur action tant par leur quantité que par leur répartition. Au niveau moyen régional, la pluie incidente et la production semblent assez bien corrélées, avec une valeur moyenne de 2,5 à 3 kg de matière sèche par hectare et par mm de pluie. Cette valeur moyenne recouvre en fait de grandes variations stationnelles. Les valeurs expérimentales montrent que l'efficience de l'eau ou rendement du mm d'eau évapotranspiré varie de 3,2 à 8,8 kg de matière sèche ha<sup>-1</sup> mm (ETR)<sup>-1</sup>. FLORET et PONTANIER (1978), pour les zones arides de steppe à *Rantherium suaveolens* de Tunisie donnent des valeurs variant de 1,5 à 7,5 kg.ha<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup>. La moyenne est de 4,2 kg.ha<sup>-1</sup>.mm<sup>-1</sup> (RAMBAL, 1980). SZAREC (1979), pour des communautés végétales de la zone aride nord américaine, avec

217 mm de pluie, trouve une efficacité moyenne de  $4,2 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  avec un coefficient de variation de 0,63. A MIGDA, TADMOR *et al.*, (1974) donne une valeur de  $8,9 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  (C.V. = 0,46). Expérimentalement, nous n'avons pas suffisamment de valeurs pour étudier s'il y a une relation entre cette efficacité et la pluviosité annuelle. Nous avons donc utilisé pour le groupement Ib les valeurs obtenues par simulation. Le tableau LXII montre que ce rendement augmente avec la pluviosité jusqu'à un optimum, puis décroît ensuite pour les années humides.

TABLEAU LXII - EFFICACITÉ DE L'EAU ÉVAPOTRANSPIRÉE AU KG de MS. $\cdot\text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$  EN FONCTION DE LA VALEUR DE ETR DURANT LA PÉRIODE DE VÉGÉTATION ET DE LA PLUIE INCIDENTE DE L'ANNÉE (d'après la simulation).

Pluie	<300 mm	300 à 400 mm	400 à 500	>500
	4,3	4,9	4,9	4,5
ETR	<300 mm	300 à 400	400 à 450	>450
	3,9	5,0	4,8	4,3

FLORET et PONTANIER (1978) obtiennent expérimentalement des résultats comparables. Cette décroissance du rendement du mm d'eau transpirée, en année humide, peut être imputable à l'alimentation minérale qui deviendrait alors le facteur limitant principal (PENNING DE VRIES, 1978) ; mais on peut également penser qu'en année humide, la dominance d'espèces plus mésophiles entraîne une efficacité moindre. L'utilisation des valeurs obtenues par simulation doit être faite avec réserve, car il se peut que l'allure observée traduise seulement un biais du modèle.

-Les caractéristiques du sol : l'action du sol joue d'une part, par le niveau de la fertilité. Nous avons vu que ce niveau est généralement bas et relativement stable. Les modifications proviennent soit du fait de succession assez prolongée d'années sèches et humides, soit par ailleurs de la surexploitation soit dans le cas d'une mise en défens. Il agit d'autre part de façon importante par la nature du régime hydrique qui conditionne l'utilisation de la lame d'eau incidente. Le régime hydrique d'un sol sera d'autant plus favorable, qu'il sera capable d'absorber la totalité des précipitations et d'en restituer la plus grande partie en végétal. Ces propriétés de perméabilité et de capacité de stockage sont essentiellement liées, à la topographie, à l'état de surface et à la texture des sols.

De façon générale, on constate : que la quasi totalité des pluies infiltrées est évapotranspirée dans l'année et que la fraction d'eau perdue par évaporation directe varie suivant les sols (30 % en sol sableux de type brun rouge, 50 % et plus pour les sols argileux de type ferrugineux tropical à drainage moyen ou médiocre).

Le comportement des différents types de sols permet de les classer vis à vis de leur aptitude à assurer une meilleure alimentation en eau de la végétation. Les sols bruns rouges subarides paraissent les plus favorables : bonne perméabilité et bonne conservation des réserves. Les sols ferrugineux tropicaux à drainage moyen ou médiocre sont les plus défavorables, sauf lorsqu'ils sont en position topographique leur permettant de recevoir les eaux de ruissellement. Il est à noter que la fragilité des groupements végétaux dépend en grande partie des sols suivant un classement analogue.

En conclusion, l'étude de la production de biomasse en fonction du bilan hydrique en zone sahélienne a permis d'établir un modèle de production, donnant des résultats assez satisfaisants pour permettre son utilisation pour simuler la production durant les périodes pour lesquelles on dispose de données climatiques. Ceci à partir d'éléments mesurés ou obtenus par simulation du bilan hydrique, et de paramètres propres aux groupements, pouvant être assez aisément déterminés, par une courte période d'expérimentation.

## CHAPITRE IV

### APPLICATION A LA DETERMINATION DES POTENTIALITES

1 - ETUDE DES POTENTIALITES AGRONOMIQUES REGIONALES A PARTIR DES ETUDES FREQUENTIELLES DU BILAN HYDRIQUE CLIMATIQUE ET DU BILAN HYDRIQUE DU SOL.

L'établissement du plans régionaux de mise en valeur agricole suppose la détermination des cultures appropriées adaptées aux conditions de sol et de climat. En zone aride ou semi aride le choix des cultures repose sur la connaissance de leurs besoins en eau, de la durée de leur cycle, en comparaison avec les données climatiques locales.

L'analyse fréquentielle des pluies permet de répondre à deux questions dont l'intérêt agronomique est évident.

- Quelle est, pour une période déterminée, la hauteur d'eau que l'on peut espérer avec une certaine probabilité (cf. figure 26 hauteur de pluie décadaire pour les probabilités au non dépassement de 0,25, 0,50, 0,75 pour les stations de PODOR, LINGUERE et KAFFRINE) ?

- Quelle est la probabilité pour que la pluie soit supérieure ou égale à une hauteur d'eau donnée, ETP ou une fraction de ETP, et ceci pour une période quelconque de l'année. (cf. figure 32 : probabilités pour que P décadaire soit  $\geq$  ETP ;  $\geq$  0,5 ETP ;  $\geq$  0,3 ETP pour les stations de DAHRA et PODOR) ?

L'étude du bilan hydrique climatique permet de déterminer la durée et la position de la saison des pluies utile et de choisir les cultures dont le cycle est adapté avec une probabilité suffisante.

LHOMME et MONTENY (1979) ont mis au point une méthode de calage des cycles culturaux basée sur l'étude du bilan hydrique climatique. Caler un cycle cultural revient à déterminer la période climatiquement optimale pour la mise en place d'une culture, c'est-à-dire déterminer la date de semis qui assurera un bon rendement avec le maximum de chance. La méthode repose sur la détermination pour chaque phase de la culture des besoins hydriques. On calcule la probabilité moyenne que ces besoins soient effectivement couverts par l'apport pluviométrique. La moyenne arithmétique des probabilités attachées à chaque pas de temps est considérée comme la probabilité moyenne pour la phase analysée. Cette probabilité est ensuite utilisée comme indice climatique de rendement ; chaque phase est caractérisée par un indice et à chaque date de semis correspond une valeur de cet indice. On cherche à maximaliser la valeur des indices en fonction de ces dates, en considérant d'abord les phases réputées sensibles.

Comme le souligne DANCETTE (1979), l'idéal pour savoir si la pluviométrie est favorable à une culture est de faire le bilan hydrique complet au fur et à mesure de la saison, connaissant, période par période ; les pluies, les besoins en eau de la culture (avec seuil de tolérance) et la capacité de stockage de l'eau dans le sol pour une profondeur d'enracinement connue.

Le modèle BIJOU de bilan hydrique proposé permet de simuler ce bilan pour une culture dont les besoins en eau sont connus pour chaque période en fonction de l'ETP. Les besoins sont exprimés pour chaque période (décade par exemple) par le coefficient cultural K, tel que  $K = ETM/ETP$ , où ETM est l'évapotranspiration de la culture pour la période dans le cas d'une alimentation satisfaisante. ETP traduit la demande évaporative pour la même période.

Le tableau LXIII donne, d'après DANCETTE (1978) les valeurs des coefficients K, d'une part par rapport à l'évaporation du bac A, d'autre part, par rapport à ETP calculées, pour chaque période du cycle de deux cultures de mil au Sénégal, un mil SOUNA (souche III) de 90 j. et un mil SANIO (souche MAK) de 120 j. de cycle. Les valeurs de K sont données pour chaque décade de cycle.

TABLEAU LXIII - VALEURS DE K POUR UNE CULTURE DE MIL SOUNA ET UNE CULTURE DE MIL SANIO, PAR RAPPORT A ET BAC, ET A ETP CALCULEE (d'après DANCETTE, 1978).

Décade du cycle		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K <sub>B</sub> =	ETM SOUNA	0,32	0,45	0,58	1,05	1,07	1,10	0,90	0,80	0,69			
	ETBac SANIO	0,23	0,31	0,40	0,74	0,89	1,03	1,18	1,18	1,20	1,02	0,90	0,77
K =	ETM SOUNA	0,41	0,58	0,74	1,34	1,37	1,40	1,15	1,01	0,88			
	ETPc SANIO	0,29	0,40	0,51	0,95	1,13	1,32	1,51	1,52	1,54	1,30	1,15	0,99

Le modèle permet de calculer pour chaque décade le déficit évapotranspiration de la culture compte tenu du bilan hydrique :  $DET = ETM - ETR$ , exprimé en mm. Il donne également, le déficit relatif :  $DRET = \frac{ETM - ETR}{ETM}$ , exprimé en %. Ces deux grandeurs expriment le degré de satisfaction des besoins en eau.

Nous avons simulé le bilan hydrique de ces cultures pour LINGUERE, à partir de 45 années de données pluviométriques utilisables, pour un sol brun-rouge. Pour la culture de SANIO, nous avons considéré que le semis était effectué après la première pluie supérieure ou égale à 20 mm. Pour la culture de SOUNA, nous avons considéré trois cas :



TABLEAU LXIV - VALEURS DU DEFICIT D'EVAPOTRANSPIRATION (DET en mm) ET DU DEFICIT RELATIF (DRET EN %).  
 POUR LES FREQUENCES AU NON DEPASSEMENT DE 0,5 et 0,8 LINGUERE (1933-1977).

	Juin		Juillet			Aout			Septembre			Octobre			Novembre	
	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Fréquence = 0,5																
Souna 1 DRET	0,08	0,11	0	0	0	0,05	0,07	0,08	0,10	0,14	0,16	0	0	0	0	0
DET	0,5	0,6	0	0	0	4	4	5	5	8	7	0	0	0	0	0
Souna 2 DRET	0	0	0	0	0	0	0,06	0,06	0,09	0,19	0,21	0,16	0	0	0	0
DET	0	0	0	0	0	0	4	4	5	10	11	5	0	0	0	0
Souna 3 DRET					0	0	0	0,06	0,07	0,17	0,17	0,34	0,44			
DET					0	0	0	4	5	12	16	16	20			
SANIO DRET	0	0	0	0	0	0,01	0,05	0,05	0,14	0,21	0,35	0,45	0,64	0,59	0,67	0
DET	0	0	0	0	0	0,3	3	4	9	16	24	30	38	31	4	0
Fréquence = 0,8																
Souna 1 DRET	0,96	0,87	0,81	0,2	0,40	0,46	0,37	0,28	0,26	0,36	0,42	0,39	0,44	0	0	0
DET	6	6	6	5	22	33	20	19	16	19	21	18	3	0	0	0
Souna 2 DRET	0,96	0,87	0,61	0	0	0,13	0,23	0,22	0,22	0,36	0,42	0,54	0,56	0,41	0,38	0,05
DET	6	6	6	0	0	8	11	15	15	19	23	22	23	5	3	0,2
Souna 3 DRET					0	0	0	0,09	0,21	0,38	0,44	0,52	0,62			
DET					0	0	0	8	13	25	25	26	29			
SANIO DRET	0,96	0,87	0,79	0,03	0,15	0,23	0,17	0,21	0,28	0,48	0,62	0,75	0,80	0,85	1,00	0
DET	6	6	5	1	6	12	9	15	19	32	45	57	55	55	36	0

- Le semis précoce après la première pluie > 20 mm (SOUNA 1)
- Le semis tardif après la première pluie > 30 mm ou la deuxième pluie supérieure à 20 mm (SOUNA 2).
- Le semis tardif à date fixe : le 20 juillet (SOUNA 3).

Le tableau LXIV donne les valeurs du déficit d'évapotranspiration (DET en mm) et du déficit relatif (DRET) pour chaque cas de culture, pour les fréquences en non dépassement de 0,5 et de 0,8.

La simulation donne les fréquences observées des valeurs décennales de DET, DRET et des autres éléments du bilan hydrique. Nous ne connaissons pas les seuils de tolérance de déficit pour les diverses phases du cycle de la culture. DANCETTE (1978) considère un seuil de tolérance moyen de 20 % pour l'ensemble du cycle.

On constate que :

Pour SOUNA 1	DRET < 20 %	5 années sur 10
Pour SOUNA 2	DRET < 20 %	4 années sur 10
Pour SOUNA 3	DRET < 20 %	2 années sur 10
Pour SANIO	DRET < 20 %	1 année sur 10.

Ce qui signifie que pour la culture du mil SOUNA 1 (semi précoce après 20 mm de pluie), le rendement ne sera pas affecté par le déficit hydrique 5 années sur 10, alors que pour la culture de SANIO, le rendement sera affecté par le déficit hydrique 9 années sur 10. Cette dernière culture ne paraît donc pas adaptée à la région. En fait, seul le mil SOUNA est cultivé dans cette zone. On voit l'intérêt que présente l'étude du bilan hydrique et l'utilisation du modèle pour orienter la recherche de l'amélioration du mil vers des mils à cycle court adaptés aux conditions de la zone sahélienne. C'est le cas de nouvelles variétés de mils nains G.A.M. (Groupe d'Amélioration des Mils) (DANCETTE, 1979).

La comparaison des conditions de semis : SOUNA 1, SOUNA 2, SOUNA 3, montre l'importance de la date de semis pour la satisfaction des besoins hydriques du mil. Le semis après une première pluie de 20 mm paraît être le plus favorable avec toutefois un risque important de déficit en début de cycle lorsque le semis a lieu en juin. D'après les résultats, on peut préconiser : semis en juin après la première pluie si celle-ci est supérieure à 40 mm, ou après deux pluies consécutives supérieures à 20 mm. A partir de juillet, le semis doit être effectué après la première pluie supérieure à 20 mm, ces recommandations permettant d'assurer la meilleure probabilité de satisfaction des besoins en eau.

L'utilisation de la méthode de LHOMME et MONTENY (1979), non plus sur le bilan hydrique climatique, mais sur le bilan hydrique du sol simulé, permettrait de déterminer de façon plus précise le calage optimal des cycles culturaux.

La simulation montre en outre que les cultures de mil SOUNA laissent 5 années sur 10 une réserve d'eau utilisable supérieure ou égale à 70 mm et 8 années sur 10 une réserve supérieure à 30 mm. Si l'on accepte l'estimation de DANCETTE (1979) selon laquelle un arbre nécessite annuellement  $67,5 \text{ m}^3$  d'eau, on voit qu'un champ pourrait comporter entre 5 et 10 arbres/ha, ce qui est important lorsque l'on connaît le rôle de l'arbre dans la protection des sols (GIFFARD, 1974).

Lorsque la pratique de l'irrigation est envisagée la première question qui se pose, en relation avec le dimensionnement des installations et l'estimation des surfaces susceptibles d'être arrosées avec une quantité limitée d'eau, est, par rapport à son ETM, le besoin d'irrigation de telle espèce ou culture sur tel sol compte tenu des apports d'eau des pluies. Quelle quantité d'eau sera périodiquement nécessaire et quel sera le besoin de pointe ? L'utilisation du modèle peut fournir une réponse à ces questions. Ainsi, par exemple, pour l'irrigation du mil SOUNA semé le 20 juillet, la couverture totale des besoins en eau serait assurée 8 années sur 10 avec un apport  $< 125 \text{ mm}$  et une demande décadaire maximum de 58 mm.

Lorsque l'on connaît l'importance accordée dans ces zones à l'accroissement de la production agricole en liaison avec une meilleure gestion des ressources en eau, on voit l'intérêt que peut présenter l'utilisation d'un modèle simple de bilan hydrique.

2 - DETERMINATION DES CAPACITES DE CHARGE DES PARCOURS A PARTIR DES  
POTENTIALITES DE PRODUCTION DES PHYTOCOENOSSES NATURELLES ESTIMEES  
PAR MODELISATION.

2.1. - Aspects généraux.

La capacité de charge d'un pâturage est la quantité de bétail que peut supporter ce pâturage sans subir de détérioration. Le bétail doit rester en bon état d'entretien et même fournir une production de viande ou de lait durant son séjour en pâturage.

Cette capacité de charge dépend de la quantité de fourrage produit et de la valeur de ce fourrage comparées aux besoins des animaux. La valeur fourragère d'un pâturage dépend de la nature des plantes présentes et de leur stade végétatif qui conditionne la proportion de plantes consommables et la valeur alimentaire de la production consommable.

L'appétibilité des espèces est une notion très relative liée au stade phénologique, aux disponibilités fourragères du moment, aux conditions de pâturage, mais aussi à l'environnement : groupement végétal, lieu.... Seule l'observation des troupeaux au pâturages fournit des indications précises pour un lieu et une période. Le tableau XIII donne une indication de l'appétibilité des espèces pour les zébus, par parcelle. Sur le total de la production consommable par le bétail, quel est le pourcentage réellement exploitable ? Il est très variable et dépend de la période d'utilisation. Les pertes de biomasse en saison sèche, dues au piétinement et à l'action du vent sont élevées et difficilement chiffrables, une partie des pailles brisées et au sol pouvant être récupérée par le bétail. Par ailleurs, la consommation par la faune sauvage et notamment par la microfaune, peut être importante (LEPAGE 1972). Il est nécessaire de tenir compte également du fait qu'une fraction de la phytomasse doit être laissée sur place pour assurer la protection du sol et le maintien de la fertilité.

BOUDET (1975) estime que la productivité saisonnière exploitable en saison sèche représente 1/3 de la production primaire en fin de saison des pluies. Les spécialistes américains (MARTIN, 1975) estiment que seuls 40 % de la production de biomasse dans les zones arides et semi arides peut être exploité si l'on désire maintenir la productivité du pâturage. Des essais de détermination du taux d'exploitation ont parfois été réalisés à l'aide d'animaux en conditions contrôlées. Les taux d'exploitation optimale, définis pour les pâturages du C.R.Z. de DAHRA (VALENZA et FAYOLLE, 1965) sont les suivants : 60 à 65 % en fin de saison des pluies et 30 à 35 % en saison sèche. Nous adopterons ici les chiffres préconisés par BOUDET (1975), à savoir que 1/3 de la biomasse produite est exploitable, compte tenu de l'appétibilité des espèces, des pertes et de la nécessité de préserver la productivité des pâturages.

Ces taux, qui représente une valeur optimale approchée pour une exploitation rationnelle, est largement dépassé en saison sèche dans la zone sahélienne sénégalaise, d'autant que les surfaces réellement disponibles sont le plus souvent réduites en raison des feux de brousse (VALENZA et DIALLO, 1972).

La détermination de la valeur alimentaire de la phytomasse produite se heurte à de grandes difficultés, d'une part, une raison de la représentativité des échantillons analysés (variations suivant le stade phénologique, la composition floristique etc...), d'autre part, le manque de données précises concernant la digestibilité par les bovins tropicaux. La méthode classique est basée sur l'analyse bromatologique d'une partie aliquote de la biomasse, suivie de la détermination de la valeur énergétique ou valeur fourragère et du taux de matière azotée digestible à l'aide de tables. Ces résultats sont exprimés par kilogramme de matière sèche (kg, de MS), en unités fourragère (UF) et en grammes de matière azotée digestible (MAd).

Les valeurs moyennes données pour la région (RAYNAL, 1964 ; VALENZA et DIALLO, 1972 ; BILLE, 1977a) sont :

Fin de saison des pluies	0,6 à 0,8 UF et 80 à 90 g de MAd.
Saison sèche	0,3 à 0,6 UF et 3 à 20 g de MAd.

Pour le parcours D1a, correspondant à la parcelle de DAHRA nord, VALENZA et DIALLO (1972) donnent les valeurs suivantes :

Fin de saison des pluies	0,79 UF et 85 g de MAd.
Saison sèche	0,36 UF et 5 g de MAd.

Pour 1978, à partir des dosages d'azote total, nous obtenons :

- Pour le groupement Ib :

Saison des pluies (août)	85 g de MAd.
Saison sèche (février)	25 g de MAd.

- Moyenne pour l'ensemble de la parcelle :

Saison des pluies (août)	88 g de MAd.
Saison sèche (février)	21 g de MAd.

Les besoins des animaux sont exprimés pour une unité de bétail standard : l'Unité de Bétail Tropical, UBT (Livestock Standard Unit, LSU des auteurs de langue anglaise). Elle correspond à un bovin de 250 kg. Les besoins d'entretien d'une UBT sont classiquement estimés (BOUDET, 1975) à 2,8 UF et 160 g de MAd par jour.

La consommation journalière des bovins correspond en moyenne à 2,5 kg de matière sèche pour 100 kg de poids vif, soit 6,25 kg de MS par UBT. Le calcul montre que pour satisfaire aux besoins d'entretien, la valeur alimentaire du fourrage consommé doit être au minimum de 0,45 UF et de 25 g de MAD par kg de MS. Ces valeurs ne sont pas atteintes en fin de période sèche, ce qui conduit à une perte de poids des animaux. Ceux-ci compensent partiellement la pauvreté du pâturage par la consommation de feuilles de ligneux.

La détermination de la capacité de charge des parcours, en l'absence d'études expérimentales toujours souhaitables, peut être faite en comparant les besoins des animaux aux disponibilités représentées par la fraction exploitable de la production de biomasse. Cette capacité de charge peut être calculée soit à partir des besoins en azote, soit à partir des besoins énergétiques, mais la valeur alimentaire du fourrage variant beaucoup et étant peu connue, l'estimation la plus courante se fait à partir des besoins en matière sèche.

Exemple de calcul :

En 1978, la production du groupement Ib de DAHRA nord est de 1436 kg de matière sèche, la valeur fourragère est estimée à 0,45 UF par kg en saison sèche et la teneur en MAD à 25 g.kg<sup>-1</sup>.

Charge calculée à partir des besoins en MAD.

$$\frac{1436 \times 25}{3 \times 160} = 75 \text{ journées d'entretien pour 1 UBT}$$

Charge calculée sur la valeur fourragère

$$\frac{1436 \times 0,45}{3 \times 2,8} = 77 \text{ journées d'entretien pour 1 UBT}$$

Charge calculée sur le besoin de matière sèche

$$\frac{1436}{3 \times 6,25} = 77 \text{ journées d'entretien pour 1 UBT}$$

Si l'exploitation de ce groupement est effectuée uniquement en saison sèche (novembre à juin), ce qui correspond à 240 j. il faudra  $\frac{240}{75} = 3,2$  ha par UBT, soit une charge moyenne à 1'ha de 0,3 UBT.

Ceci suppose que la valeur alimentaire des pailles se maintient au cours de la saison sèche, ce qui n'est pas le cas. La teneur en matière azotée notamment devient très faible en fin de saison. De nombreux auteurs (GILLET, 1967 ; BOUDET, 1975 ; BILLE, 1977a) soulignent la nécessité d'un complément indispensable fourni par la végétation ligneuse. BILLE (1977a) estime ce complément à 40 kg de MS par ha et par an, ce qui représenterait environ 1/3 de la production annuelle de feuilles et de fruits pour FETE-OLE par exemple.

## 2.2. - Résultats

A partir des données climatiques disponibles, nous avons, à l'aide des modèles de bilan hydrique et de production de biomasse, simulé la production pour les trois principaux groupements de DAHRA. Nous avons utilisé d'une part les données de DAHRA portant sur 23 ans (1956-1978), d'autre part les données de LINGUERE portant sur 45 ans (1933-1977).

En effet, on peut penser que pour DAHRA les années sèches successives prennent une importance trop grande vis à vis d'un échantillon réduit.

Le tableau LXV montre les valeurs décennales de production de biomasse, et de biomasse présente, pour les fréquences au non dépassement de 0,5 et 0,8 pour le groupement Ib.

Le tableau LXVI montre pour ce même groupement la fréquence des niveaux de production que l'on peut espérer.

L'augmentation de la période de simulation diminue l'influence des années très sèches et augmente la fréquence des productions élevées. On peut penser que la prise en compte des années sèches de début du siècle (1913) ramènerait les fréquences vers des valeurs intermédiaires à celles obtenues dans les deux cas, mais nous ne disposons pas localement de ces données.

TABLEAU LXVI - PERIODICITE DES NIVEAUX DE PRODUCTION POUR LE GROUPEMENT Ib OBTENUE PAR SIMULATION A PARTIR DES DONNEES CLIMATIQUES DE DAHRA et LINGUERE.

Niveau de Production	DAHRA (23 ans)	LINGUERE (45 ans)
< 600 kg.ha <sup>-1</sup>	1 année/20	1 année/20
600 à 1000	1 année/20	1 année/20
1000 à 1500	5 années/20	3 années/20
1500 à 2000	6 années/20	3 années/20
2000 à 2500	5 années/20	8 années/20
> 2500 kg.ha <sup>-1</sup>	2 années/20	4 années/20

La production médiane pour DAHRA se situe entre 1514 et 1760 kg de MS. ha<sup>-1</sup>, et pour LINGUERE entre 2180 et 2300 kg de MS.ha<sup>-1</sup>. La production assurée 8 années sur 10 est de :

Pour DAHRA	1150 kg.ha <sup>-1</sup>
Pour LINGUERE	1450 kg.ha <sup>-1</sup>

TABLEAU LXV - VALEURS DECADAIRE DE LA PRODUCTION ET DE LA BIOMASSE PRESENTE POUR LES FREQUENCES AU NON DEPASSEMENT DE 0,5 et 0,8 POUR DAHRA (23 ANNEES) ET LINGUERE (45 ANNEES).  
Groupement Ib (valeurs en kg.ha<sup>-1</sup>).

	Juillet			Aout			Septembre			Octobre		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>Production déca-</b>												
<b>daire</b>												
DAHRA F = 0,5	0	57,9	95,9	111,5	113,7	279,3	349,0	274,8	184,7	0	0	0
F = 0,8	0	0	0	0	0	0	150,1	271,8	162,3	0	0	0
LINGUERE F = 0,5	17,2	42,9	101,8	168,3	256,2	367,5	380,1	344,8	259,1	107,2	38,7	0
F = 0,8	0	0	19,8	63,7	124,0	229,1	283,1	296,6	157,7	0	0	0
<b>Biomasse présente</b>												
DAHRA F = 0,5	34	97	145	295	328	610	968	1321	1514	1452	1498	1260
F = 0,8			65	85	170	305	567	760	1150	1018	753	550
LINGUERE F = 0,5	47	94	162	336	522	904	1289	1693	1970	2130	2180	2120
F = 0,8			82	167	274	542	847	1144	1307	1452	1322	983



Si l'on applique à ces valeurs le calcul de charge indiqué plus haut on obtient :

	DAHRA	LINGUERE
Charge médiane	0,25 UBT.ha <sup>-1</sup>	0,3 UBT.ha <sup>-1</sup>
Charge possible 8 ans/10	0,16 UBT.ha <sup>-1</sup>	0,21 UBT.ha <sup>-1</sup>

Ces charges sont calculées à partir des seuls besoins d'entretien du bétail. Ainsi 6,25 ha permettront d'assurer l'entretien annuel de 1 UBT 8 années sur 10. Les années excédentaires permettront une production animale (lait ou viande). Deux années sur 10, il serait nécessaire de disposer de ressources complémentaires pour assurer l'entretien du bétail, sous forme de surfaces mises en réserve, par exemple (BOUDET, 1977).

Le calcul du coefficient de variation effectué sur les productions annuelles simulées du groupement Ib à DHARA donne une valeur de 27,8 %. Le coefficient de variation des totaux pluviométriques annuels est très voisin de 29,7 %.

### 2.3. - Difficultés d'extension des résultats au niveau régional.

Si nous considérons le parcours Dal défini par VALENZA et DIALLO (1972), qui correspond à la végétation de la parcelle de DAHRA nord, cette unité comprend d'après notre étude :

- Le groupement Ib à *Tephrosia purpurea*
- Le groupement IIb à *Schoenfeldia gracilis*
- Un faciès de dégradation à *Zornia glochidiata* assimilable pour la production au groupement Ic
- Un faciès à Convolvulacées dont la production peut être reliée à celle du groupement IIb dont elle est égale à 75 %.

- Un groupement de couronnes d'arbres dont la production est en moyenne supérieure de 15 % à celle du groupement environnant. La production de l'hectare géographique de parcours Dal peut être calculée par la relation :

$PDal = (a+0,15.a.e) PI_b + (b+0,15.b.e+0,75.d) PIIb + (c+0,15.c.e) PIC$   
dans laquelle - PI<sub>b</sub>, PII<sub>b</sub>, PIC représentent les productions relatives des groupements Ib, IIb, Ic.

- a, b, c, d, e représentent les proportions des divers groupements et faciès.

Pour l'ensemble de la parcelle, on obtient à l'ha :

	Production	Charge
- Valeur médiane	2758 kg	0,4 UBT
- Valeur assurée 8 années/10	1780 kg	0,2 UBT

En tenant compte des variations des proportions relatives des groupements et faciès, nous obtenons, pour les 700 ha environ, occupés au C.R.Z. de DAHRA par le parcours Dal

	Production	Charge
- Valeur médiane	2200 kg.ha <sup>-1</sup>	0,32 UBT.ha <sup>-1</sup>
- Valeur assurée 8 années/10	1500 kg.ha <sup>-1</sup>	0,22 UBT.ha <sup>-1</sup>

Le calcul du coefficient de variation pour l'ensemble du parcours Dal est de 25,6 %, donc sensiblement inférieur au coefficient de variation d'un seul groupement ; il reste encore très proche du coefficient de variation de la pluviométrie.

Nous rappelons que le calcul des charges est donné avec toutes les réserves formulées plus haut.

On constate l'intérêt que présente ce type d'étude pour fournir des éléments de base aux projets d'aménagement ; cependant, deux difficultés apparaissent pour l'utilisation pratique des résultats.

- L'utilisation des résultats sur un plan appliqué demande leur intégration au niveau régional. Cette intégration suppose qu'il existe un inventaire et une cartographie des systèmes écologiques (FLORET et al., 1978). Or, dans le cas présent, cette cartographie n'a pas été effectuée. Les cartes existantes ont permis une stratification de l'échantillonnage et une vérification de la représentativité des stations, mais son insuffisance pour permettre l'intégration des résultats au niveau régional.

- Le calcul de charge à partir des productions calculées doit tenir compte des modalités d'exploitation qui influent sur la valeur du pâturage et le taux d'utilisation, cela nécessite la prise en compte des données humaines et économiques.

Le principe de l'utilisation de modèles pour obtenir les valeurs de production et leur fréquence conserve cependant toute sa valeur, mais cette utilisation nécessite de s'inscrire dans le cadre d'une étude intégrée des ressources naturelles.

3 - INTERET DE LA METHODE UTILISEE DANS LE CADRE DE L'ETUDE PHYTO-  
ECOLOGIQUE D'UNE ZONE EN VUE DE SON AMENAGEMENT.

"L'aménagement est le moyen de développer intégralement et harmonieusement les ressources naturelles". (BAUMER et REY, 1974). Il consiste, à partir d'un inventaire, à déterminer et à calculer les possibilités, puis à prévoir les structures permettant de les utiliser au mieux. De nombreux auteurs et notamment LONG (1974, 1975) ont montré l'intérêt des études écologiques et du diagnostic phytoécologique en particulier, appliqués à l'aménagement. Selon cet auteur, le diagnostic écologique appliqué au développement dans un espace rural doit s'intéresser :

- A la nature et à l'état des ressources renouvelables, ce qui consiste en l'inventaire et la cartographie des ressources végétales, animales, en eau et en sol, auxquelles il conviendrait d'ajouter les ressources humaines.

- Aux potentialités des divers milieux présents dans cet espace : évolution de production de la végétation spontanée ou cultivée dans les différents milieux ou systèmes écologiques.

- Aux niveaux de sensibilité des différents systèmes écologiques, ce qui consiste à étudier les tendances évolutives (stabilité, dégradation, influence de l'exploitation).

L'étude réalisée par l'équipe CEPE/ORSTOM en Tunisie est l'une des rares à avoir réalisé concrètement une étude complète comprenant ces trois étapes (FLORET et PONTANIER, 1978 ; FLORET et al., 1978).

Le premier point concernant l'inventaire et la cartographie a fait l'objet du plus grand nombre de travaux, tant de méthodologie que d'application. On peut citer en particulier les nombreuses études effectuées au Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques L. EMBERGER, qui ont permis la mise au point d'une méthode d'étude largement utilisée en France et à l'étranger.

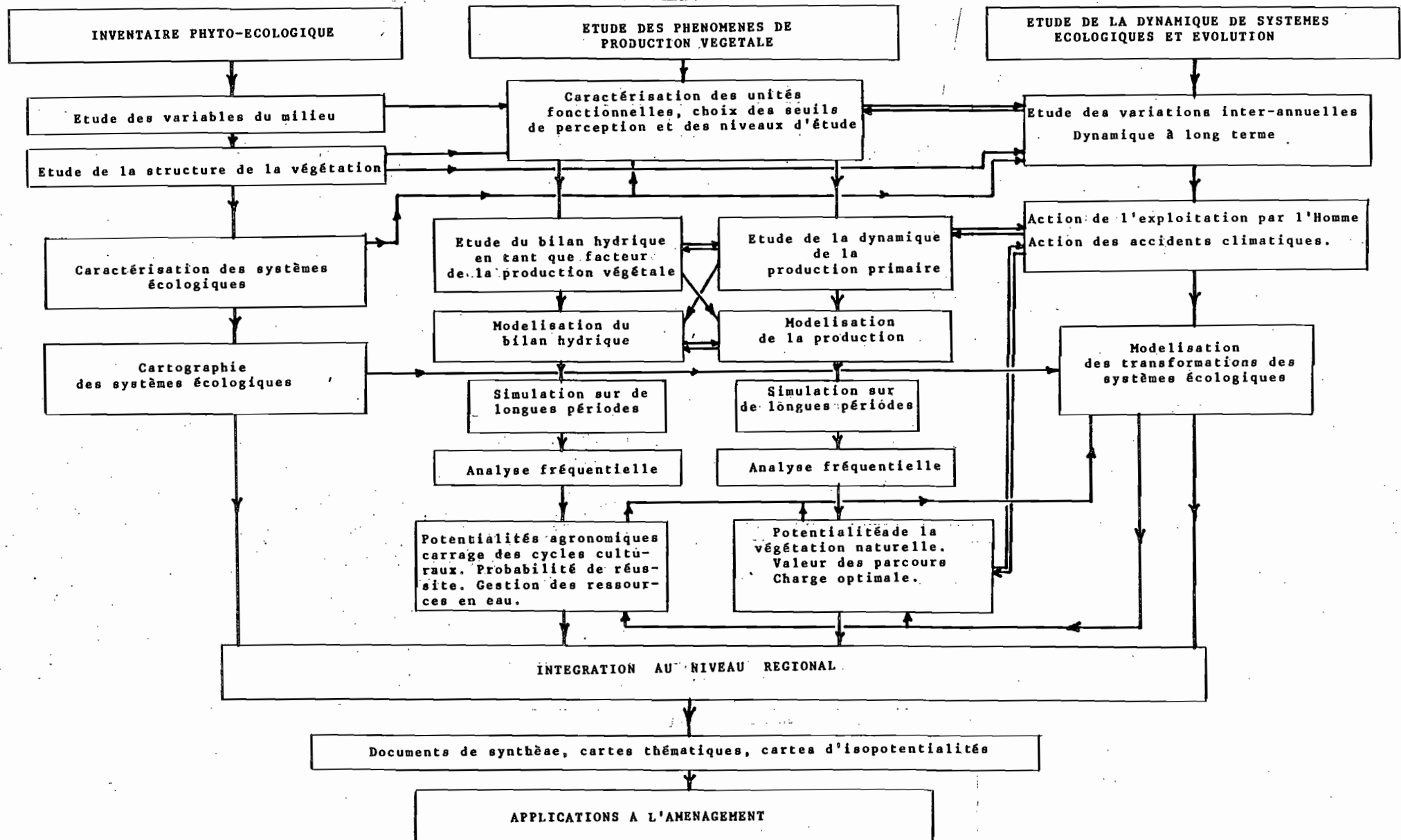
En zone sahélienne, l'Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire a réalisé un nombre important d'études d'inventaires des pâturages : Série d'Etudes Agrostologiques. Selon BOUDET (1977) la cartographie de 37 % de la zone sahélienne a été réalisée, apportant une contribution importante à la connaissance de la composition botanique des pâturages sahéliens. Cependant, comme le souligne KETELAARS (1978), il y a une difficulté concernant ces études agrostologiques, à savoir la courte durée disponible pour les réaliser, qui conduit trop souvent à négliger les aspects dynamiques de la végétation.

Le deuxième point qui concerne l'étude des potentialités a été étudié le plus fréquemment dans le cadre restreint de la parcelle d'essai, mais beaucoup moins dans le cadre plus vaste de l'étude phytoécologique, ne serait-ce que parce qu'il nécessite en général des études plus longues, et une approche plus expérimentale. Par ailleurs, il faut souligner la difficulté de prendre en compte une variabilité très importante liée à l'aspect aléatoire des variables climatiques. C'est dans cette perspective que notre travail a été entrepris, pour montrer que l'analyse des différents niveaux de variabilité et l'utilisation de modèles simples peut faire progresser l'étude de la connaissance des potentialités naturelles d'une zone.

Le troisième point qui vise à l'analyse et à la modélisation des possibilités d'évolution des systèmes écologiques a fait l'objet de quelques études (GODRON et LEPART, 1973 ; FLORET et al., 1978) à partir de l'utilisation des matrices de transition, qui permettent de simuler l'évolution dans le temps des surfaces occupées par les différents systèmes écologiques de la zone, à partir de scénarios d'exploitation différents.

La figure 73 montre une schématisation possible des divers aspects de l'étude phytoécologique d'une zone en vue de son aménagement et la place que devrait y occuper ce type d'étude.

Fig. 73 - SCHEMA D'ETUDE PHYTOECOLOGIQUE  
EN VUE DE SON AMENAGEMENT



## CONCLUSION

L'économie pastorale sahélienne repose sur l'élevage traditionnel des bovins, utilisant directement la production végétale naturelle. L'accroissement du cheptel et le relâchement des modes coutumiers d'exploitation ont conduit à une rupture des équilibres entre production et utilisation. L'avenir des populations sahéliennes dépend étroitement du maintien et de l'accroissement des ressources naturelles exploitables et de leur mise en valeur. Ces constatations conduisent à se poser la question de la contribution qu'une recherche phytoécologique pourrait apporter à un développement planifié. Les nombreuses études existantes montrent que cette contribution concerne trois aspects fondamentaux :

- L'inventaire des ressources naturelles et leur cartographie.
- La détermination des potentialités de production.
- La dynamique des systèmes écologiques soumis à diverses pressions d'exploitation.

Le présent travail, faisant suite aux mesures d'inventaire réalisées dans la zone entre 1969 et 1975, dans le cadre du P.B.I. (BILLE, 1977a ; POUPON, 1980), concerne les potentialités de production de la végétation.

Les mesures de production végétale réalisées dans cette zone montrent l'existence de fortes variations dans le temps et dans l'espace. Cette variabilité rend les études basées sur des corrélations statistiques globales délicates et peu pertinentes pour décrire les potentialités de production. Elles permettent tout au plus de situer le niveau moyen de production pour la zone (environ 3 kg de matière sèche par ha et par mm de pluie). Nous avons donc cherché à prendre en compte cette variabilité, d'une part par la stratification des niveaux d'étude, d'autre part par la recherche de modèles simples susceptibles de simuler les variations liées aux caractères aléatoires des éléments climatiques, cela en partant de l'hypothèse que le bilan hydrique est le facteur limitant principal de la production.

L'action de ce facteur peut être scindée en deux composantes :

- Le bilan hydrique climatique, dépendant du climat atmosphérique. Ils constitue un facteur de variation de la production végétale au niveau régional et interannuel. Le niveau d'étude est lié à l'échelle d'homogénéité des variables du climat.
- Le bilan hydrique édaphique qui dépend, en outre, des caractéristiques des sols, relief y compris, et de la végétation. Il permet d'expliquer les variations stationnelles de végétation et de production. Son échelle d'étude est liée, au niveau parcellaire, à l'homogénéité des caractéristiques de sol et de végétation.

Le climat de la région étudiée est de type sahélien, chaud et sec. La moyenne des températures annuelles est voisine de 28°C. Les amplitudes sont fortes en saison sèche (parfois supérieures à 20°C) et faibles en saison humide. Les précipitations annuelles varient de 300 mm au nord à 600 mm au sud, concentrées entre juillet et octobre ; août et septembre reçoivent plus de 50% du total annuel. Le nombre moyen de jours de pluie est faible, 20 à FETE-OLE, 30 à DAHRA. La variation interannuelle des totaux de pluie et de la répartition est élevée (coefficient de variation de la pluviométrie annuelle : 40 % pour PODOR, 30 % pour DAHRA). L'analyse fréquentielle des hauteurs de

pluie décadaire donne les hauteurs d'eau à espérer pour les différents niveaux de probabilité.

L'humidité de l'air est généralement faible, mais présente de grandes variations. Des valeurs égales ou inférieures à 5% sont fréquemment atteintes en saison sèche. La demande évaporatrice est élevée. La comparaison des diverses méthodes disponibles d'estimation de l'ETP nous a conduit à choisir l'utilisation du bac d'évaporation, moyen pratique, donnant des valeurs relatives très comparables et dont l'emploi tend à se généraliser en zone sèche. L'ETP annuelle moyenne varie de 2000 mm au sud à 2400 mm au nord, avec des variations interannuelles faibles (10 % environ). L'ETP journalière est très variable, elle varie de 3 à 6 mm en saison des pluies, et de 6 à 10 mm en saison sèche. Des valeurs très élevées (12 à 15 mm.j<sup>-1</sup>) sont observées durant de courtes périodes sous l'influence de l'*Harmattan*.

L'étude fréquentielle du déficit hydrique climatique permet de caractériser la saison humide et d'en définir les fréquences de durée. Elle montre que la zone peut être divisée en trois secteurs agroclimatiques, qui recoupent assez bien les secteurs climatiques définis par AUBREVILLE (1949). Pour le secteur nord, la probabilité que les pluies décadaires soient supérieures à l'ETP est constamment inférieure à 50 %. Pour les autres secteurs la période durant laquelle cette probabilité est supérieure à 50 % varie de 45 jours à KAFFRINE, à 20 jours à YANG-YANG.

Le FERLO sableux est constitué par des dépôts sableux quaternaires reposants sur le Continental terminal. La région est presque plate, l'altitude moyenne est voisine de 40 m. Les principaux facteurs de différenciation pédologiques sont le climat, le relief et le matériau constitutif. Les principaux types de sols sont les sols brun-rouge subaride, les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à lessivés et les sols intergrades. Les transitions sont souvent progressives. Au point de vue chimique, les sols sableux observés sont caractérisés par une très grande pauvreté en éléments nutritifs. L'étude des caractéristiques physiques et hydriques des sols montre que des variations texturales faibles entraînent des propriétés physiques et hydriques très différentes. La fraction 2-20 $\mu$  semble jouer un rôle important dans la rétention de l'eau. Les variations de texture et de matière organique permettent d'expliquer la quasi totalité des variations de propriétés. Il est donc possible, à partir de données pédologiques classiques, de déterminer, à partir des régressions simples, les valeurs des caractéristiques hydriques. La disposition des sols en catena, le long des toposéquences, entraîne des différences importantes vis-à-vis du stockage et de la rétention de l'eau, ce qui influe fortement la répartition de la végétation.

Le suivi de l'humidité des sols et la détermination du bilan hydrique montrent l'importance et la variété des facteurs agissants, ainsi que la diversité des situations existantes. Ils permettent de caractériser le régime hydrique des stations étudiées et d'en dégager quelques aspects plus généraux. Les toposéquences constituent bien des unités de base de fonctionnement, dans une zone où il n'existe pas d'axes d'écoulement hiérarchisés. Ces unités se répètent de façon plus ou moins constante suivant le type de paysage.

Le ruissellement est, dans ces zones, un élément important du bilan. Il constitue le phénomène majeur de redistribution de l'eau, jouant ainsi un rôle important dans la répartition de la végétation et la dynamique des sols. Il dépend de nombreux facteurs : caractéristiques des pluies, texture, structure et état de surface des sols ... Son étude a été assez souvent négligée en raison des difficultés de mesure en zone sèche. Une meilleure connaissance du bilan hydrique nécessiterait des recherches plus approfondies, avec



des approches différentes.

Le drainage profond représente une part faible du bilan hydrique en zone sahélienne. Il ne se produit que dans des positions topographiques privilégiées, ou durant des séquences pluvieuses longues (phénomène rare dans la zone). Cela pose le problème du rôle des averses exceptionnelles et des séquences pluvieuses prolongées dans la réalimentation éventuelle des nappes superficielles. Le drainage oblique existe, mais il est le plus souvent négligeable vis-à-vis des autres termes du bilan.

Globalement, à l'échelle d'une parcelle couverte de végétation naturelle, et pour des précipitations inférieures à 600 mm, l'ETR annuelle est égale aux précipitations. Au niveau stationnel, la topographie, les caractères du sol, de végétation et la redistribution de la pluie incidente conduisent à des différences importantes. D'une façon générale, en milieu et en fin de saison sèche, les valeurs de l'ETR sont très faibles, le rapport ETR/ETP est voisin de 0,02. On observe ensuite une croissance lente de l'ETR, avec l'humidification du sol, le débourrement des ligneux et l'installation de la couverture herbacée (1 à 3 mm. j<sup>-1</sup>), le rapport ETR/ETP étant compris entre 0,2 et 0,5. Cette phase coïncide avec la reconstitution des réserves du sol. Durant la période de végétation active (août et septembre) les valeurs de l'ETR varient de 3 à 6 mm par jour, avec un rapport ETR/ETP variant de 0,6 à 1,0. Par la suite, en relation avec le dessèchement des herbacées, le rapport ETR/ETP décroît rapidement. Ce dessèchement des herbacées ne correspond pas à l'épuisement total des réserves utilisables du sol ; il semble lié à un accroissement de la demande évaporative en octobre, et peut être à une régulation photopériodique de la durée des cycles. En début de saison sèche, l'ETR décroît lentement de 2 à 0,5 mm.j<sup>-1</sup>. Durant cette période, elle est essentiellement due à la transpiration du couvert ligneux qui ne perd ses feuilles que progressivement.

Les différents types de sols et les différents types de topographies présentent des efficacités très différentes pour l'alimentation en eau du couvert végétal.

La variabilité de la production végétale dépend de facteurs exogènes, tels que l'eau et les éléments nutritifs disponibles, mais aussi de facteurs propres tels que la composition floristique, la structure et le mode d'établissement du couvert végétal. La végétation de la zone étudiée est une formation herbeuse constituée d'un tapis herbacé plus ou moins continu, pouvant atteindre 50 cm à 1 m, composé à plus de 90 % d'espèces annuelles. Ce tapis est parsemé d'arbres ou d'arbustes, fréquemment épineux, dont la répartition est très liée au bilan hydrique, mais ne formant pas une strate continue. Excepté à DOLI-sud, la surface terrière des ligneux est inférieure à 2m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>. La présence des ligneux influence nettement la strate herbacée et sa production. La végétation, à petite échelle, ne marque pas de discontinuités brusques. La différenciation de cette végétation est cependant bien marquée, et, à grande échelle, apparaît une individualisation de groupements très liés aux conditions stationnelles : modelé, sol, exploitation ...

L'analyse factorielle des correspondances appliquée aux différents transects étudiés, permet, dans chaque cas, d'ordonner les relevés et les espèces et de montrer leur correspondance. La distribution des états de certaines variables écologiques relevée sur le terrain est mise en relation avec les résultats de l'analyse factorielle des correspondances, ce qui permet l'interprétation des premiers axes de l'analyse et l'explication d'une part importante de la diversité du tapis végétal. L'application de cette analyse sur les données de 4 années successives montre que l'on retrouve chaque année

les mêmes regroupements espèces-relevés et relevés entre eux, mais que leurs positions relatives varient sensiblement d'une année à l'autre.

Si la composition floristique d'un groupement est une donnée relativement constante justifiant son individualisation, les contributions spécifiques des espèces varient beaucoup. Ces variations sont essentiellement liées à la répartition des pluies en début de saison de végétation. Elles ont une grande importance pour la valeur fourragère des parcours. Une étude précise de la biologie des principales espèces pourrait apporter des éléments permettant d'expliquer ces variations à partir du régime des pluies.

La production de semences des thérophytes, bien que très variable d'une année à l'autre et d'un groupement à l'autre, est élevée. Elle se situe entre 5 et 30 % de production de biomasse épigée. Elle est moins affectée par la sécheresse que cette dernière. Le stock de graines dans le sol est très important. La germination a lieu lorsque l'humidité des horizons superficiels reste importante durant 7 à 10 jours. Toutes les graines fertiles ne germent pas. Il existe de nombreuses entraves d'ordre divers à la germination, qui semblent constituer des adaptations écologiques. Le nombre de plantules, très important, décroît rapidement pour se stabiliser à 400 et 1000 plantules par m<sup>2</sup>. Les grandes différences interannuelles de fréquences spécifiques, semblent dues, pour les graminées, plutôt à des différences de comportement lors du tallage et de la croissance, alors que pour les légumineuses, elles semblent dépendre du comportement germinatif. On connaît en fait peu de choses sur la mise en place du peuplement, alors que ce point est essentiel à la compréhension de la dynamique du couvert. L'approfondissement des connaissances écologiques des phytocoenoses sahéliennes nécessiterait la réalisation de recherches plus approfondies sur les modalités de germination et de mise en place du peuplement.

La production constituant un élément de base du fonctionnement de l'écosystème, nous devons nous intéresser non seulement à la valeur globale de la production primaire nette, mais également à sa dynamique. Nous proposons une méthode de détermination périodique de la production aérienne nette, dérivée de celle de WIEGERT et EVANS (1964), applicable aux formations herbues sahéliennes. Les caractères généraux de la production herbacée des phytocoenoses sahéliennes dépendent des caractéristiques de la végétation et du milieu : cycle court, tapis végétal hétérogène, précipitations rares et aléatoires, pauvreté quasi générale des sols. Les résultats montrent que l'allure de la production de biomasse est assez comparable d'une année à l'autre et d'un groupement à l'autre. Faible en début de saison des pluies, elle croît proportionnellement à l'accumulation de biomasse, passe par une phase linéaire de croissance rapide, avant de décroître avec la maturation des semences et le dessèchement des plantes. La quantité de biomasse produite dépend essentiellement de la durée de la phase linéaire de croissance. L'eau est le facteur limitant essentiel de la production. L'alimentation minérale et surtout azotée constitue le second facteur limitant, qui devient prépondérant en années humides. Le maintien du niveau de productivité d'une phytocoenose dépend de l'importance des restitutions, par retour au sol, d'une partie de la biomasse. Le feu et le surpâturage détruisent cet équilibre, et conduisent à une baisse de productivité.

Les observations réalisées durant les 4 années d'étude et leur comparaison avec les résultats d'études plus anciennes, montrent que la flore et la végétation des parcelles étudiées n'ont pas subi de bouleversements durant les années de sécheresse. Beaucoup d'espèces possèdent des adaptations

efficaces et variées : brièveté et plasticité du cycle, production importante de semences, faculté de rejets ... permettant une réinstallation rapide.

Chez les ligneux, l'action a été plus sensible : raréfaction de certaines espèces au profit d'autres, accentuation du caractère contracté de la répartition des ligneux. Les variations constantes de la végétation sahélienne en fonction des conditions climatiques, alliées à la diversité spatiale, semblent constituer un phénomène d'adaptation de ces phytocoenoses. Les facteurs anthropiques : déboisement, feu, surpâturage, réduisent les possibilités de récupération de la végétation, et constituent les facteurs essentiels de la dégradation des systèmes écologiques sahéliens. Bien qu'adaptée aux conditions de milieu, la végétation sahélienne est rendue fragile par une exploitation exagérée. Il est urgent de définir les seuils et les modes d'exploitation à respecter, en vue du maintien et de la régénération de la productivité des parcours sahéliens.

Le modèle de simulation du bilan hydrique proposé est un modèle simple, utilisant les seules données météorologiques existantes et les caractéristiques hydriques classiques des sols. Il est basé sur une relation de récurrence traduisant la conservation des flux d'eau dans chaque couche de sol. Le sol est découpé en deux couches, représentant deux réservoirs, caractérisés par leur épaisseur, leur réserve utile maximale et une constante de temps de redistribution. Le calcul de ETR est effectué à partir de la relation empirique de EAGLEMAN (1971), en fonction de l'ETP et de l'humidité relative du sol. Ce calcul prend en compte le recouvrement de la végétation par l'intermédiaire du coefficient K ( $K = ETR/ETP$ ). Le modèle détermine l'évolution du bilan hydrique à partir des conditions initiales, avec un pas de temps journalier. Le modèle ne possède pas de fonction de ruissellement, il n'est utilisé que dans le cas où ce dernier est négligeable, ou calculé par ailleurs.

La calibration et la validation du modèle ont été faites grâce aux valeurs mesurées de 1975 à 1978 à DAHRA. On note une très bonne concordance entre les résultats du modèle et les valeurs mesurées des réserves. Les valeurs mesurées et calculées de l'ETR ne représentent pas de différences significatives dans 78 % des cas. Le modèle ayant été calé et vérifié, nous l'avons utilisé pour simuler le bilan hydrique sur de longues périodes à partir des séries de données existantes. La simulation du bilan hydrique à l'aide du modèle permet de déterminer de façon satisfaisante les termes de ce bilan et de réaliser

leur étude fréquentielle. Cette étude confirme l'importance relative des différents flux, telle qu'elle avait été déduite des mesures et permet d'en donner les valeurs médianes, et les fréquences. Ainsi, un drainage de 10 mm peut se produire à DAHRA, dans le sol brun rouge sub-aride, environ 1 année sur 20.

En remplaçant le coefficient K par des coefficients cultureux connus, il permet de simuler le bilan hydrique d'une culture, de tester l'influence des dates de semis sur l'utilisation de l'eau, de déterminer les probabilités de rendement maximum ou de déterminer les besoins en eau d'irrigation. Les améliorations à envisager portent essentiellement sur la possible introduction d'une fonction de ruissellement ou sur un couplage avec un modèle hydrologique de surface, ainsi que sur l'interaction entre croissance végétale et accroissement de ETR.

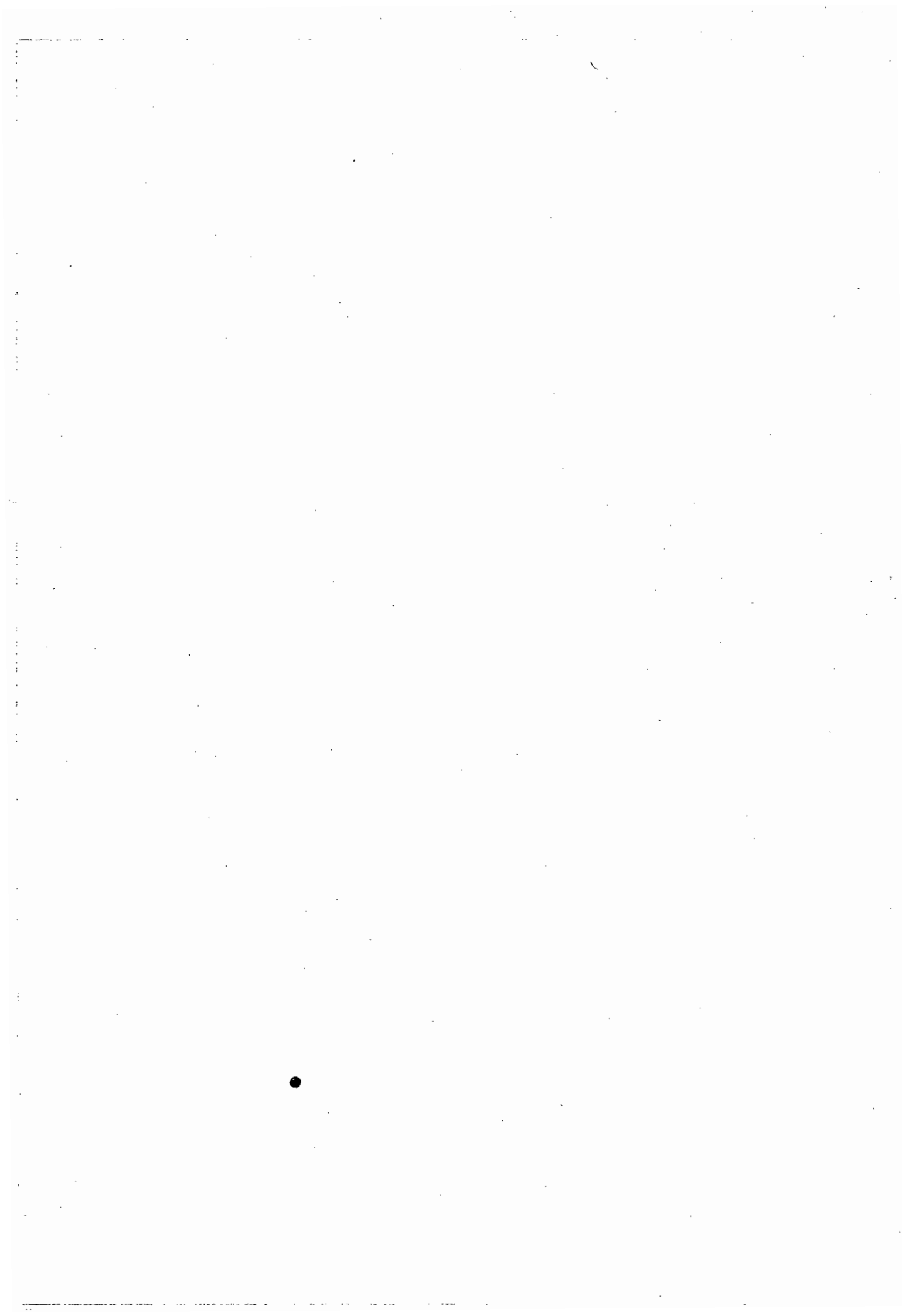
Partant de l'observation des courbes de production de biomasse et des travaux de différents auteurs, notamment de DE WIT (1958), nous avons établi un modèle de production périodique de biomasse en fonction du bilan hydrique. Le modèle est basé sur l'hypothèse que l'eau est le facteur limitant essentiel de la production et que lorsque l'eau n'est plus limitante, il existe une production maximale limite caractéristique du groupement et des

autres contraintes du milieu. Il traduit le fait que la production est proportionnelle à la somme des ETR et que cette proportionnalité varie notamment en fonction de la demande climatique et de la quantité de biomasse présente. Les entrées sont constituées par les variables ETR et ETP, mesurées ou obtenues par simulation à l'aide du modèle de bilan hydrique et par les caractéristiques du groupement : l'efficacité moyenne de l'eau durant la phase rapide de croissance et la production maximale de biomasse lorsque l'eau n'est pas limitante. Les sorties du modèle sont : la production de biomasse pour chaque période et la biomasse présente en fin de période.

La calibration et la validation du modèle ont été réalisées à partir de mesures de production effectuées à DAHRA de 1975 à 1978. Le modèle donne une simulation de production de biomasse très satisfaisante pour les années moyennes ou sèches durant lesquelles le facteur eau est limitant ; pour les années humides la valeur des résultats est moins bonne. Cela montre les limitations du modèle qui ne tient pas compte des autres facteurs de production. Il conserve cependant son intérêt pour la détermination des potentialités et des fréquences de production.

Nous avons utilisé le modèle pour simuler, à partir des résultats du bilan hydrique, la production durant les périodes pour lesquelles nous disposons des données climatiques. Les résultats donnent les valeurs de production à espérer aux divers seuils de probabilités. Ils peuvent être transformés en un calcul de charge optimale. L'absence d'inventaire et de cartographie préalable des systèmes écologiques empêche, dans le cas présent, de généraliser les résultats obtenus à une échelle régionale.

Le présent travail présente une approche d'étude nouvelle de la production végétale en zone sahélienne. Elle permet, par une recherche à différents niveaux, et par l'utilisation de modèles simples, de prendre en compte, au moins partiellement, les facteurs de variabilité de la production et de fournir des résultats en terme de fréquence utilisables pour les aménageurs. Elle aborde de nombreux points et fait apparaître les axes de recherche qui semblent à privilégier pour une meilleure compréhension de l'écologie des phytocoenoses sahéliennes. Les modèles doivent être perfectionnés, et le rôle de l'alimentation minérale et surtout azotée doit être étudié et intégré si possible au modèle.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- ADAM, J.G., 1956 - Rapport de mission : relevés effectués en septembre 1956 au Centre d'élevage de DAHRA, 17 p. *Dactylo.*, 7 croquis, IFAN, DAKAR
- ADAM, J.G., 1968 - Le Sénégal, in Conservation of vegetation in Africa south of the Sahara. Edited by Inga and Olov Hedbag, *UPSALA* 1968 : 65-69.
- ANGUS, J.F., KORNHER, A. and TORSSEL, B.W.R., 1980 - A systems approach to estimation of swedish ley production. *Progress report 1979/80; Swedish University of Agricultural Sciences, UPSALA*, 29 p.
- ARLERY, R., GRANIER, M. et LANGLOIS, R., 1954 - Application des méthodes de THORNTHWAITE à l'esquisse d'une description agronomique du climat de la France. *La météorologie* Oct. Déc. 1954 : 345-367.
- AUBREVILLE, A., 1949 - Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. *Soc. Ed. Géogr. Maritimes et Coloniales, PARIS*, 351 p.
- AUDRY, P., 1962 - Etude pédologique du Centre de Recherches Zootechniques de DAHRA-DJOLOFF (République du Sénégal). *Rapp. ORSTOM-DAKAR*. 131 p.
- AUDRY, P., 1967 - Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture. *C.R. Colloque Fertilité des sols tropicaux. TANANARIVE - Tome 2* : 1591-1613.
- AUDRY, P., COMBEAU, A., HUMBEL, F.X., ROOSE, E., VIZIER, J.F., 1972 - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Définition - Méthodologie Techniques - Limitations actuelles. Quelques voies de recherche possibles. *Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols O.R.S.T.O.M. PARIS n° 1*, 18 p.
- AUDRY, P., COMBEAU, A., HUMBEL, F.X., ROOSE, E., VIZIER, J.F., 1973 - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols : Définition - Méthodologie Techniques - Limitations actuelles, quelques voies de recherche possibles. *Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols O.R.S.T.O.M. PARIS n° 2*, 126 p. + annexes.
- BACHACOU, J., et CHESSEL, D., 1979 - Etude des structures spatiales en forêt alluviale rhénane. III Dispersion interspécifique et analyse des correspondances *Oecol. Plant.* 14,3, 371-388.
- BAGNOULS, F. et GAUSSEN, H. 1957 - Les climats biologiques et leur classification *Ann. Géogr.*, 66 : 193-200.
- BAIER, W., 1977 - Crop weather models and their use in yield assesement. *WMO, Technical Note n° 151 GENEVA*, 48 p.
- BALDY, Ch., 1978 - Utilisation d'une relation simple entre le bac de classe A et la formule de PENMAN pour l'estimation de l'ETP en zone soudano-sahélienne. *Ann. Agron.* 29,5 : 439-452.
- BARBEY, Ch. et COUTE, A., 1976 - Croûtes à Cyanophycées sur les dunes du Sahel mauritanien *Bull. IFAN*, 38, A, 4.



- BAUMER, M. et REY, P.A., 1974 - Pastoralisme, aménagement, cartographie de la végétation et développement intégral harmonisé dans les régions circum-sahariennes. *GENEVE, Institut d'Etude du Développement GENEVE - AFRIQUE Acta Africana* 13,1 : 1-18.
- BENZECRI, J.P., 1966 - Leçons sur l'analyse factorielle et la reconnaissance des formes, *Cours 3ème cycle I.S.U.P., Paris*, 70 p.
- BERNHARD-REVERSAT, F., 1970 - Etude de la litière et de sa contribution au cycle des éléments minéraux en forêt ombrophile de Côte d'Ivoire. *Oecol. Plant.* 5 : 247-266.
- BERNARD-REVERSAT, F., 1977 - Observations sur la minéralisation *in situ* de l'azote du sol en savane sahélienne (Sénégal) *Cah. ORSTOM, sér. Biol.*, 12, 4 : 301-306.
- BERNHARD-REVERSAT, F., 1981 - Biogéochimical cycle of soil nitroge en in a semi-arid savannah 20 p. *Dactylographiées à Paraitre*.
- BILLE, J.C., POUPON, H., 1972 a - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : Description de la végétation *La Terre et la Vie*, 26 : 351-365.
- BILLE, J.C. et POUPON, H., 1972 b - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : Biomasse végétale et production primaire nette. *La Terre et la Vie*, 26 : 366-382.
- BILLE, J.C., LEPAGE, M. et POUPON, H., 1972 a - Présentation de la zone d'étude de FETE-OLE (Sénégal) *Rapp. ORSTOM-DAKAR*, 49 p. *multigr.*
- BILLE, J.C., LEPAGE, M., MOREL, C. et POUPON, H., 1972 b - Recherches écologiques sur une savane sahélienne du Ferlo septentrional, Sénégal : Présentation de la région. *La Terre et la Vie*, 26 : 333-350.
- BILLE, J.C., 1973 - Graines et diaspores des plantes herbacées du Sahel. Production et dynamique *Rapp. ORSTOM DAKAR* 54 p. Ronéo.
- BILLE, J.C., 1975 - Mesure de la production herbacée en zone sahélienne. *Colloque sur l'inventaire et la cartographie des pâturages tropicaux africains, 3- 8 Mars 1975 BAMAHO* 4 p. Ronéo.
- BILLE, J.C., 1977a - Etude de la production primaire nette d'un écosystème sahélien. *Trav. Doc. ORSTOM, Paris*, 65 : 82 p.
- BILLE, J.C., 1977 b - Végétation et productivité de 5 sites sahéliens au Sénégal. *Document Technique de la Division des Sciences de l'Environnement et de la Production Végétale, CIPEA-ILCA, Addis-abeira*, 25 p. Ronéo.
- BOCOUM, M., 1971 - Production et dégradation de la strate herbacée dans le Dieri sénégalais (zone sahélienne) *Rapp. stage ORSTOM-DAKAR*, 39 p. Ronéo.
- BOUCHET, R. J., 1964 - Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. L'eau et la production végétale INRA Versailles pp. 151-232.

- BOUDET, G., et DUVERGER, E., 1961 - Etude des pâturages naturels sahéliens : le Hodh (Mauritanie). Maisons Alfort, IEMVT, 160 p.
- BOUDET, G., 1969 - Etudes des pâturages naturels du Dallol Maouri (Rép. du Niger). Maisons Alfort, IEMVT *Etude Agrostologique* No 26, 309 p.
- BOUDET, G., 1970 - Etude Agrostologique pour la création d'une station d'embouche dans la région de NIONO (Rép. du Mali). Maisons Alfort, IEMVT. *Etude Agrostologique* No 19, 269 p.
- BOUDET, G., 1972 a - Désertification de l'Afrique tropicale. *Adansonia* 2 : 505-524.
- BOUDET, G., 1972 b - Projet de développement de l'élevage dans la région de Mopti (Rép. du Mali) Maisons Alfort, IEMVT. *Etude Agrostologique* No. 37, 309 p.
- BOUDET, G., 1974 - Les Pâturages et l'élevage au Sahel. in *Le Sahel : Bases écologiques de l'aménagement. Notes Techniques du MAB* : 29-35 PARIS : *Presses de l'UNESCO*.
- BOUDET, G., 1975 - Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. I.E.M.V.T. *Ministère de la Coopération*, Paris. 258 p.
- BOUDET, G., 1977 - Les Pâturages sahéliens. Les dangers de dégradation et les possibilités de régénération. Principes de gestion améliorée des parcours sahéliens : 159-222. In *les Systèmes Pastoraux Sahéliens. Etude FAO : Production végétale et Protection des plantes n° 5 ROME* 389 p.
- BOUDET, G., 1978 - Etude de l'évaluation d'un système d'exploitation sahélien au Mali. A.C.C. *Lutte contre l'aridité en milieu Tropical DGRST-IEMVT* 116 p.
- BOUDET, G., 1980 - Systèmes de production d'élevage au Sénégal : Etude du couvert herbacé (1ère campagne) A.C.C. *LAT DGRST/IEMVT Rapport Multigr.* 48 p.
- BOURGES, J., FLORET, C., GIRARD, C., PONTANIER, R., 1979 - Etude d'un milieu représentatif du sud Tunisien (Type Segui) : La citerne Telman. *Rapport de Synthèse 1972-77. Ministère Agric. Tunisie IORSTOM* 87 p.
- BOURLIERE, F., 1978 - La savane sahélienne de FETE-OLE, Sénégal. in : *Problèmes d'écologie : structures et fonctionnement des écosystèmes terrestres* Masson éd., Paris : 187-229.
- BREMAN, H., L. DIARA, M.I. CISSE, and M. TOGOLA, 1975 - Les pâturages tropicaux africains. *Bamako, 3-8 Mars 1975, Addis Abeba, Centre International pour l'Elevage en Afrique (CIPEA-ILCA)*. : 195-213 (Version Française).
- BREMAN, H., and CISSE, A.M., 1977 - Dynamics of sahelian pastures in relation to drought and grazing *Oecologia (Berl.)* 28, : 301-315.
- BRIGAUD, F., 1965 - Le climat au Sénégal. in : *Etudes sénégalaises n° 9 - Connaissances du Sénégal. Fasc. 3 : Climats - Sols - Végétation . C.D.R.S. Saint-Louis, Sénégal* : 1-109.

- BROWN, D., 1954 - Methods of surveying and measuring vegetation, *Bull.* 42, Commonwealth Bureau of Pastures and Field Crops, Hurley, Berks, 223 p.
- BRUNET-MORET, Y., 1969 - Etude de quelques lois statistiques utilisées en hydrologie. *Cahiers ORSTOM, série hydrologie*, 6, 3.
- CHAMARD, P.C., 1973 - Essai sur les paléoclimats du Sud-Ouest Saharien au quaternaire récent in : La Désertification au Sud du SAHARA, *Colloque de NOUAKCHOTT*, 17-19 Déc. 1973. N.E.A. : 21-26.
- CHARREAU, C., 1963 - Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *Agron. Trop.* XIX : 63-120.
- CHEVALIER, 1911 - Essai d'une carte botanique, forestière et pastorale de l'AOF. *CR. Acad. Sc. Paris* 102 : 614-617.
- CHRISTIE, E.K., 1978 - Ecosystem processes in semiarid grassland. I Primary production and water use of two communities, possessing different photosynthetic pathway. *Aust. J. Agric. Res.* 29, 4, : 773-787.
- CHOICHEME, J., et FRANQUIN, P., 1967 - Etude agroclimatologique de l'Afrique sèche au Sud du SAHARA en Afrique Occidentale. *Rapport technique F.A.O. ROME 1967*. 325 p.
- COLLINET, J. et VALENTIN, C., 1979 - Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives. Applications agronomiques. *ORSTOM ABIDJAN*, 40 p. multigr.
- COMBEAU, A., 1961 - Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. - Applications à quelques types de sols tropicaux. *Rapp. ORSTOM - PARIS* 22 p ronéo + annexes.
- COMBEAU, A., et QUANTIN, P., 1963 - Observations sur la capacité au champ de quelques sols ferrallitiques. Rapprochement avec les courbes pF humidité. *Science du sol*. Versailles 1 : 1-7.
- COOK, C.W., and SIMS, P.L., 1975 - Drought and its relationship to dynamics of primary productivity and production of grazing animals. *Intern. Symp. on Inventory and Mapping of African Tropical Rangeland*, BAMAKO 3-8 Mars 1975, 20 p. Multigr.
- CORDIER, B., 1965 - Analyse factorielle des correspondances, *Thèse Faculté des Sciences de Rennes*, 65 p.
- CORNET, A., 1971 - Méthodes de détermination de la capacité de rétention en eau du sol. *Rapp. de D.E.A., ORSAY*, 34 p. Ronéo.
- CORNET, A., 1974 - Essai de cartographie bioclimatique à Madagascar. *Carte thématique ORSTOM n° 55* : 1 notice 28 p. + 1 carte.
- CORNET, A., 1977a - Détermination de l'évapotranspiration potentielle en vue de l'étude du bilan hydrique dans la zone sahélienne sénégalaise *Rapport ORSTOM DAKAR*, 14 p. Ronéo.

- CORNET, A., 1977b - Etude comparative du bilan hydrique d'une parcelle boisée et d'une parcelle herbeuse à Madagascar. *Bois et Forêts des Tropiques*, 176 : 3-15.
- CORNET, A., 1978 - Observations sur les précipitations dans la partie centrale du secteur sahélien sénégalais. *Notes Africaines*, DAKAR, 158 : 34-42.
- CORNET, A., et POUPON, H., 1978 - Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long du gradient climatique en zone sahélienne au Sénégal. *Bull. IFAN*, 39, A, 2 : 241-302.
- CORNET, A., 1979 - Measurement of the aerial herbaceous biomass and net primary aerial production of three grassland communities in the sahelian zone of Sénégal : *Communication at V<sup>o</sup> Symposium International of tropical Ecology KUALA-LUMPUR* avril 1979.
- CORNET, A., 1980 - Observations sur la capacité de rétention, ses relations avec les valeurs de potentiel et la texture des sols sableux du Nord du Sénégal. *Cah. O.R.S.T.O.M., Ser. Biol.* 42 : 54-59.
- CORNET, A., 1981 - Mesure de biomasse et détermination de la production nette aérienne de la strate herbacée dans trois groupements végétaux de la zone Sahélienne. *Acta Oecologica, Oecol. Plant.* : 2, 16, 3 : 251-266.
- CORNET, A., et RAMBAL, S., 1981 - Simulation de l'utilisation de l'eau par une phytocénose de la zone sahélienne au Sénégal, Test de deux modèles. *Comm. au 9<sup>ème</sup> Coll. Informatique et Biosphère*. Paris 23-24 avril 1981. 27 p. Multigr.
- CORRE, J.J. et RIOUX, J.A. 1969 - Recherches phytoécologiques sur les milieux psammiques du littoral méditerranéen français. *Oecol. Plant.* 4 : 177-194.
- C.S.A. (Conseil Scientifique pour l'Afrique au Sud du Sahara), 1956 - Réunion des spécialistes du C.S.A. en matière de phytogéographie. *Yangambi, Publ.* 22 : 34 p.
- DAGET, Ph., & POISSONET, J., 1964 - Quelques remarques sur l'étude des formations herbacées pastorales et sur l'expression des résultats, in *Compte rendu de la réunion de la division des recherches sur le terrain 12 et 13 Octobre 1964*, C.N.R.S.-C.E.P.E., Montpellier : 50-56.
- DAGET, Ph., 1968 - Quelques remarques sur les distributions de fréquences spécifiques dans les phytocénoses. *Oecol. Plant.* 3 : 299-312.
- DAGET, Ph., & POISSONET, J., 1971 - Une méthode d'analyse phytologique des prairies, critères d'application, *Ann. Agron.*, 22, 1 : 5-41.
- DANCETTE, C., 1970 - Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation dans un sol sableux du Sénégal. Intérêt Agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide. *Agron. Trop.* 25, 3 : 225-40.

- DANCETTE, C., 1973 - Principales études de l'IRAT au Sénégal, portant sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et sur leurs aptitudes à l'irrigation. *Agron. Trop.* 28, 9 : 887-893.
- DANCETTE, C. et MAERTENS, C., 1974 - Méthode d'estimation de la capacité au champ pour l'eau à partir du pF 3. *Science du Sol* 3 : 165-171.
- DANCETTE, C., 1976 - Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau de cultures. *Agron. Trop.* 31 - 4 : 321-338.
- DANCETTE, C., 1978 - Besoins en eau et adaptation du mil à la saison des pluies au Sénégal. *Rapport ISRA, CNRA BAMBEY Sénégal* 17 p. Multigr.
- DANCETTE, C., 1979 - Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.* 34, 4, : 331-355.
- DAUDET, F.A., et VALANCOGNE, Ch., 1976 - Mesure des flux profonds de drainage ou de remontées capillaires. Leur importance dans le bilan hydrique. *Ann. Agron.*, 27, 2 : 165-182.
- DAVID, D., POISSONET, P., et ROMANE, F., 1979 - Analyse de la structure horizontale d'un taillis de Bouleaux (*Betula verrucosa* Ehrh.) en Sologne *Oecol. Plant.*, 14, 3 : 237-247.
- DAVY, E.G., 1974 - Drought in West Africa. *WMO Bull.* 23 : 18-23.
- DEJONG, E., and MAC DONALD, K.B., 1975 - The soil moisture regime under natives grassland. *Geoderma.* 14, 3 : 207-221.
- DESCOINGS, B., 1973 - Les formations herbeuses africaines et les définitions de Yangambi considérées sous l'angle de la structure de la végétation. *Adansonia.* 2. 13 : 391-421.
- DESCOINGS, B., 1975 - Les types morphologiques et biomorphologiques des espèces graminoides dans les formations herbeuses tropicales. *Natur. Monsp.* 25 : 23-35.
- DE WIT, C.T., 1958 - Transpiration and crop yields. *Versl. Landbouwk Onderz (Agric. Res. Rep.)* 64, 6, Pudoc, WAGENINGEN.
- DULIEU, D., GASTON, A., et DARLEY, J., 1977 - La dégradation des pâturages de la région de N'DJAMENA (République du Tchad) en relation avec la présence de Cyanophycées psamophiles. Etude préliminaire. *Rev. Elev. méd. Vét. Pays Trop.* 30, 2 : 181-190.
- EAGLEMAN, J.R., 1971 - An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Météorol.*, 8 : 385-394.
- ELDIN, M., et DAUDET, A., 1967 - Etude de reboisement et de protection des sols. Notice explicative des cartes climatologiques. ORSTOM - Adiopodoume Côte d'Ivoire.

- ELDIN, M., 1971 - Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Chapitre : Le Climat. *Mémoire ORSTOM n° 50*.
- EMBERGER, L., 1955 - Projet d'une classification biogéographique des climats in *Coll. Intern. C.N.R.S. Régions écologiques du Monde*. Paris, 1954, 59 : 249-255.
- EMBERGER, L., 1966 - Réflexions sur le spectre biologique de RAUNKIAER. *Mém. Soc. Bot. Fr.* : 149-156.
- ESTEVE, J., 1978 - Les Méthodes d'ordination : éléments pour une discussion. *Biométrie et Ecologie*, LE GAY., J.M. et TOMASSONE, R., 1 : 223-246.
- FEODOROFF, A., 1969 - Infiltration et problèmes agronomiques. Quelques approches expérimentales. *La Houille Blanche* Paris, 8 : 869-884.
- FEODOROFF, A., 1972 - Hydrologie du sol. *Doc. Multigr.* 159 p.
- FEODOROFF, A., et GUYON, G., 1972 - Caractérisation physique et hydrodynamique des sols. *BTI, Paris*, 1972, 271-272 : 809-814.
- FITZPATRICK and NIX, 1969 - The climatic factor in australian grassland ecology : 3-26 in "Australian grasslands", ed. R.M. Moore ANU Press, CAMBERRA.
- FLORET, Ch., et PONTANIER, R., 1978 - Etude des relations climat-sol-végétation de quelques formations végétales naturelles du Sud Tunisien, (Production-bilan hydrique des sols). *Inst. Rég. Arides. Médenine, Dir. Ress. Eau et Sols Tunis, CEPE/CNRS Montpellier et ORSTOM - Paris*, 96 p. + annexes.
- FLORET, Ch., LE FLOC'H, E., PONTANIER, R. et ROMANE, F., 1978 - Modèle écologique régional en vue de la planification et de l'aménagement agropastoral des régions-arides. Application à la Région de ZOUGRATA. *Document Techn. n° 2, Inst. Rég. arides. Médenine, Dir. Ress. Eau et Sols Tunis, CEPE/CNRS Montpellier et ORSTOM Paris*, 73 p. + annexes.
- FRANQUIN, P., 1976 - La caractérisation fréquentielle du milieu agroclimatique. *D.G.R.S.T. Comité Equilibre et lutte biologique. Groupe de travail méthodologie note 12*, 32 p. Multigr.
- FRANQUIN, P., et FOREST, F., 1977 - Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.*, 32, 1 : 7-11.
- FRANQUIN, P., 1981 - Production de masse, production de nombre et rendement. *Cah. ORSTOM ser. Biol.* 42, 53-59.
- FRIEDEL, M.H., 1977 - The determination of an optimum sampling technique for biomass of herbaceous vegetation in a centralaustralian woodland : *Austral. Journ. of Ecol.* 2 : 429-433.
- GASTON, A., and F. BOTTE, 1971 - Etude agrostologique de la réserve pastorale de Tin Arkachen (Haute Volta) Maisons Alfort, IEMVT. *Etude Agrostologique n° 31*, 146 p.

- GASTON, A., 1976 - Travaux de phytoécologie en relation avec la lutte contre *Quelea quelea*. Bilan de quatre années : *Rapport final IEMVT* 203 p. + annexes.
- GIFFARD, P.L., 1974 - L'arbre dans le paysage sénégalais. Sylviculture en zone tropicale sèche. *C.T.F.T. - DAKAR*, 452 p. multigr.
- GILLET, H., 1961 - Pâturages sahéliens : le ranch de l'Ouadi Rimé (Tchad). *J. Agr. Trop. Bot. Appl.* 8 : 210.
- GILLET, H., 1967 - Essai d'évaluation de la biomasse végétale en zone sahélienne (végétation naturelle). *J. Agr. Trop. Bot. Appl.* 14 : 123-158.
- GILLET, H., 1968 - Le peuplement végétal du massif de l'Ennedi (Tchad). *Mém. Museum Nat. Hist. Nat.*, B, 17, 206 p.
- GODRON, M., 1966 - Application de la théorie de l'information à l'étude de l'homogénéité et de la structure de la végétation. *Oecol. Plant.* 1 : 187-197.
- GODRON, M., POISSONET, J., et POISSONET, P., 1967 - Méthode d'étude des formations herbacées denses. Essai d'application à l'étude du dynamisme de la végétation. *C.E.P.E., Montpellier, doc. n° 35*, 28 p.
- GODRON, M., 1968 - Quelques applications de la notion de fréquence en écologie végétale. *Oecol. Plant.*, 3 : 185-212.
- GODRON, M., DAGET, Ph., EMBERGER, L., LE FLOC'H, E., LONG, G., POISSONET, J., SAUVAGE, Ch., WACQUANT, J.P., 1968 - Code pour le relevé méthodique de la végétation et du milieu. *C.N.R.S., Paris*, 292 p.
- GODRON, M. et LEPART, J., 1973 - Sur la représentation de la dynamique de la végétation au moyen de matrices de succession. In : R. TUXEN (Editor) *Sukzessions Forschung. Ber. Symp. Int. Ver. Vegetationskunde, Rinteln* : 269-287, Cramer, Vaduz.
- GOODALL, D.W., 1969 - Simulating the grazing situation. *Biomathematics F. Heinmets id. M. DEKHER New-York*, vol. 1 : 211-236.
- GOUNOT, M., 1958 - Contribution à l'étude des groupements végétaux messicoles et rudéraux de TUNISIE. *Ann. Serv. Bot. et Agron. de Tunisie*, 31 : 282 p.
- GOUNOT, M., 1969 - Méthodes d'étude quantitative de la végétation. Masson, Paris, 314 p.
- GOUNOT, M., et YU, O., 1980 - Recherches sur la mesure de la productivité primaire épigée des Graminées prairiales. *Acta Oecologica, Oecol. Plant.* 1, 1 : 81-102.
- GRAS, R., 1962 - Propriétés physiques du sol et croissance des Pêchers. *Ann. Agron.* 13, 2 : 141-174.
- GRISOLLET, H., GUILMET, B. et ARLERY, R., 1962 - Climatologie, méthodes et pratiques. Paris GAUTHIER-VILLARDS 2ème édition 1973, 432 p.

- GROUZIS, M., 1979 - Structure, composition floristique et dynamique de la production de matière sèche de formations végétales sahéliennes (Mare d'OURSI - Haute Volta). A.C.C. *Lutte contre l'aridité dans l'OUDALAN*, D.G.R.S.T.-O.R.S.T.O.M., Rapport multigr. 56 p.
- GROUZIS, M. et SICOT, M., *Rapport d'activité 1981*, Centre ORSTOM, OUAGADOUGOU 8 p. Dactylo.
- HALLAIRE, M. et BALDY, Ch., 1964 - Potentiel matriciel de l'eau dans le sol et tension superficielle de l'eau. In eau et production végétale I.N.R.A. Paris : 15-25.
- HANKS, R.D., GARDNER, H.R. and FLORIAN, R.L., 1969 - Plant growth. Evapotranspiration relations for several crops in the Central Great-Plains. *Agron. Journ.* 61 : 30-34.
- HANKS, R.J., 1974 - Model for predicting plant yield as influenced by water use. *Agron. Journ.*, 66 : 660-665.
- HANSON, C.L., 1976 - Model for predicting evapotranspiration from natives rangelands in the Northern Great Plains. *Trans. of the ASAE*, 19, 3 : 471-481.
- HARPER, J.L., 1977 - Population biology of plants. Academic press. LONDON, 892 p.
- HUBERT, D., 1978 - Evaluation du rôle de la végétation des parcours dans le bilan écologique et agronomique des Causses. *Th. de Doct. Ing. C.E.P.E., Doc. 89*, 240 p. + annexes.
- HUMBERT, J., MERCIER, J.L., METTHEY, J., 1977 - Modélisation bidimensionnelle des transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. *Acte du 6ème Coll. sur les méthodes mathématiques appliquées à la géographie*. Besançon, 41 p.
- I.S.R.A., 1977 - Rapport d'activité. Etude d'amélioration du milieu, Bioclimatologie. C.N.R.A. - BAMBEY, 70 p. Ronéo.
- KETELAARS, J., 1978 - Problèmes concernant l'élevage au Sahel : implications pour la recherche faite dans le cadre du projet "Production primaire au Sahel". *Rapp. Prod. primaire Sahel.*, 71 p, multigr.
- LARCHER, W., 1975 - Physiological plant Ecology. Springer-Verlag, Berlin, 252 p.
- LAUENROTH, W.K., and SIMS, PL., 1973 - Effects of water and nitrogen stresses on a short grass prairie-ecosystem. *U.S.I.B.P. Grassland Biome Technical Report n° 232* Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 177 p.
- LEBRUN, J., 1966 - Les formes biologiques dans les végétations tropicales. *Mém. Soc. Bot. Fr.* : 164-175.
- LEBRUN, J., 1973 - Enumération des plantes vasculaires du Sénégal. *TEMVT* / MAISONS-ALFORT, *Etude Bot.*, 2 : 209 p.



- LEGRAND, E., 1979 - Etude expérimentale des propriétés germinatives de quelques semences sahéliennes. A.C.C. *Lutte contre l'aridité dans l'OU DALAN (Hte Volta)*, D.G.R.S.T.-O.R.S.T.O.M., Rapport Multigr. 39 p.
- LEGRAND, Ph., 1979 - Biomasse racinaire de la strate herbacée de formations sahéliennes (étude préliminaire). A.C.C. *Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan (Hte Volta)* D.G.R.S.T.-O.R.S.T.O.M., Rapport Multigr. 28 p.
- LE HOUEROU, H.N., 1977 - The grassland of Africa : Classification, production, evolution and developpment *OUTLOOK XIII international grassland congress, Leipzig 18-27 MAY 1977* 45 p. Multigr.
- LE HOUEROU, H.N., and HOSTE, C.H., 1977 - Rangeland production and annual rainfall relation in the mediterranean basin and in the african sahelo-sudanian zone. *Journal of Range Management* 30, 3 : 181-189.
- LE HOUEROU, H.N., 1980 - Le rôle des ligneux fourragers dans la gestion des parcours. *Communication au Coll. intern. sur les fourrages ligneux en Afrique. C.I.P.E.A. Addis abeda* 8-12 avril 1980, 30 p. multigr.
- LEPAGE, M., 1972 - Données préliminaires sur l'écologie des termites. *La terre et la vie*, 26 : 383-409.
- LEPRUN, J.C., 1971 - Nouvelles observations sur les formations dunaires sableuses fixées du FERLO nord occidental. *Ass. Sénégal. Et. Quatern. Ouest. Afr., Bull.Liaison* 31 : 69-78.
- LEVANG, P., et GROUZIS, M., 1980 - Méthodes d'étude de la biomasse herbacée de formations sahéliennes : application de la Mare d'OURSI, Hte Volta. *Oecol. Plant.* 1, 15, 3 : 231-244.
- LEVY, E.B. et MADDEN, E.A., 1933 - The point method of pasture analysis. *N.Z.J., Agric.*, 46 : 267-279.
- LHOMME, J.P. et MONTENY, B., 1979 - Analyse agroclimatique en milieu tropical. Exemple d'application : la région Nord-Est de Côte d'Ivoire et la riziculture pluviale. (à paraître).
- LEITH, H., 1976 - The use of correlation models to predict primary productivity from precipitation or evaporation. In *Water and plant life, Ecological studies 19* Springer-Verlag BERLIN : 392-408.
- LOMNICKI, A., BANDOLA, E., et JANKOWSKA, K., 1968 - Modification of the Wiegert-Evans Methodes for estimation of net primary production. *Ecology*, 49; 1 : 147-149.
- LONG, G., 1974 - Dianostic phyto-écologique et aménagement du territoire : I. Principes généraux et méthodes. MASSON, Ed., PARIS, 252 p.
- LONG, G., 1975 - Diagnostic phyto-écologique et aménagement du territoire : II. Aplication du diagnostic phyto-écologique. MASSON, Ed., PARIS, 222 p.

- LUDLOW, M.M., 1976 - Ecology of C<sub>4</sub> grasses. In water and plantlife : problems and modern approach. *Ecological studies* 19. Springer Verlag BERLIN : 364-386.
- MAC COWN, R.L., 1973 - An evaluation of the influence of available soil water storage capacity on growing season length and yield of tropical pastures using simple water balance models. *Agric. Meteor.* 11 : 53-63.
- MAC NAUGHTON, S.J., 1968 - Structure and function in California grasslands. *Oecology*, 49 : 962-972.
- MAINGUY, P., 1954 - Etude générale préliminaire de la station de DAHRA. *Rapp. Lab. Féd. Elevage*, DAKAR, 185 p. Multigr.
- MARCESSE, J. et COUCHAT, Ph., 1973 - Etude hydrodynamique des sols à l'aide d'un humidimètre à neutron automatique. *C.R. I.A.E.A.-SM*. 176/23 : 277-293.
- MARTIN, S.C., 1975 - Ecology and management of south western semidesert grass-shrub ranges. The status of our knowledge. *U.S.D.A. Forest service Research Paper RM-156*, FORT COLLINS, 39 p.
- MERLIER, H., 1972 - Etude phénologique des espèces de jachère du centre Sénégal. *Agron. Trop.*, 12 : 1229-1251.
- MICHEL, P., NAEGELE, A. et TOUPET, Ch., 1969 - Contribution à l'étude biologique du Sénégal septentrional. I. Le milieu naturel. *Bull. IFAN*, 1, 3 : 757-839.
- MICHEL, P., 1969 - Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. *Thèse Doc. Et., Univ. STRASBOURG*. 3 tomes, 1167 p.
- MIEGE, J. et TCHOUME, M., 1963 - Influence d'arrosages régulièrement répétés sur la germination des graines en saison sèche à DAKAR (Sénégal). *Ann. Fac. Sc. DAKAR* : 81-109.
- MILNER, C. et HUGHES, R.E., 1968 - Methods for the measurement of the primary production of grassland. *I.P.B. Hand book 6*, London, 70 p.
- NOY-MEIR, I., 1973 - Desert ecosystems : Environment and Producers *Annual review of ecology and systematic*, 4, 1 : 25-51.
- NOY-MEIR, I., 1974 - Stability in arid ecosystems and the effects of man on it. In : Structure, functioning and management of ecosystems. *Proc. of the first Intern. Congress of Ecology* : 220-225. PUDOC WAGENINGEN.
- NOY-MEIR, I., 1975 - Primary and secondary production in sedentary and nomadic grazing systems on the semi arid region : Analysis and modeling. *Department of Botany, Hebrew University, Final Report Project 7 (E-3)*.
- OGDEN (in HARPER) 1977 -
- OLSON, J.S., 1963 - Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44, 2 : 322-331.
- PEGUY, Ch. P., 1977 - La variabilité interannuelle du cycle hydrique exprimée par les "Calendriers de probabilité" : *La météorologie* 6, 11 : 95-99.

- PENMAN, J.L., 1963 - *Technical communication* n° 53. Commonwealth Bureau of Soils HARPENDEN. C.A.B., 124 p.
- PENNING DE VRIES, F.W.T. et VAN HEEMST, H.D.J., 1975 - Production primaire potentielle des terres non irriguées au Sahel. *Doc. ronéo.* 9 p. WAGENINGEN.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., 1978 - Résultats et perspectives du projet "Production Primaire au Sahel" (Esquisse à mi-chemin). *Rapport interne PPS MALI*, 37 p. Multigr.
- PENNING DE VRIES, F.W.T., KRUL, J.M. et Van KEULEN, H., 1978 - Productivity of Sahelian rangelands in relation to the availability of Nitrogen and Phosphorus from the soil. *Contribution to the WORKSHOP nitrogen cycling in west african ecosystems I.I.T.A.* IBADAN Nigeria. 14 p. Multigr.
- PEREIRA-BARETO, S., 1964 - Reconnaissance pédologique du Ferlo Sud (République du Sénégal : *ORSTOM DAKAR* 42 p. + 1 C.
- PERRIER, A., 1975 - Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles : I. Evaporation et bilan d'énergie des surfaces naturelles. *Ann. Agron.*, 26, 1 : 1-18.
- PEYRE DE FABREGUES, B., 1963 - Etude des pâturages naturels sahéliens : le ranch du Nord Sanam (Rép. du Niger). Maisons-Alfort, IEMVT. *Etude Agrostologique* n° 5 : 135 p.
- POISSONET, P. et POISSONET J., 1969 - Etude comparée de diverses méthodes d'analyse de la végétation des formations herbacées denses et permanentes, *document n° 50, C.N.R.S.-C.E.P.E., Montpellier*, 120 p.
- POISSONET, J. et CESAR J., 1972 - Structure spécifique de la strate herbacée dans la savane à palmiers Ronier de Lamto (Côte d'Ivoire). *Annales de l'Université d'Abidjan. Série E : écologie*, 5, 1 : 557-01.
- POUPON, H., 1978 - Analyse des données météorologiques recueillies à FETE-OLE (Nord Sénégal) de septembre 1969 à décembre 1977. *Doc. Tech. ORSTOM DAKAR*, 4, 21 p. Multigr.
- POUPON, H., 1980 - Structure et dynamique de la strate ligneuse d'une steppe sahélienne au nord du Sénégal. *Thèse de Doctorat, Travaux et Doc. ORSTOM, PARIS*, 115 : 351 p.
- RAMBAL, S., ROMANE, F., et AGUILAR-MARTIN, J., 1977 - Modélisation de la production de biomasse végétale de la steppe sud-tunisienne par une méthode globale d'estimation des paramètres et par filtrage non linéaire. In *Modélisation et Maîtrise des systèmes techniques, économiques et sociaux. Actes du Congrès de l'A.F.C.E.T. Ed. Hommes et Techniques* Vol. I : 536-548.
- RAMBAL, S., 1980 - Modélisation de l'utilisation de l'eau et de la production végétale d'une steppe à *Rhantherium suaveolens* Desf. de la zone aride sud-tunisienne. *Thèse Docteur-Ingénieur, U.S.T.L. Montpellier*, 188 p.

- RAPP, A., 1974 - A review of desertization in Africa. Water, vegetation and man. *S.I.E.S. Report n° 1 Stockholm : Secretariat for international Ecology* Sweden, 77 p.
- RAPP, A., LE HOUEROU, H.N., et LUNDHOLM, B., 1976 - Peut-on arrêter l'extension des déserts ? *Ecological Bulletins*, n° 24, NFR Stockholm 248 p.
- RAUNKIAER, C., 1905 - Types biologiques pour la géographie botanique. *Bull. Acad. R. Sc.*, Danemark, 5 : 347-437.
- RAYNAL, J., 1963 - Etude préliminaire de la végétation du ranch n° 1 de NDOLI (Sénégal). *Rapp. ORSTOM*, 19 p. ronéo.
- RAYNAL, J., 1964 - Etude botanique des pâturages du Centre de Recherches Zootechniques de DAHRA-DJOLOFF (Sénégal). *Rapp. ORSTOM.*, 99 p. ronéo. + annexes.
- RAYNAL, J. et RAYNAL, A., 1967 - Contribution à la connaissance de la flore sénégalaise. *Adansonia*, 2, 7 (3) : 301-355.
- RIJKS, D., 1973 - La mesure de l'évapotranspiration (communication au Séminaire de NAIROBI, Oct. 1973). *D.T.* 132 15 p. *Projet de recherche agronomique et de développement agricole pour la mise en valeur de la Vallée du Sénégal. OMVS FAO.*
- RIJKS, D., 1974 - Données météorologiques recueillies à Guédé, Kaédi et Samé. Juin 1973, mai, 1974, *DT* 126 10 p. 15 tabl. + 7 fig. *Projet pour le développement de la recherche agronomique et de ses applications dans le bassin du fleuve Sénégal OMVS FAO.*
- RIOU, C., 1973 - Le bac d'eau libre et l'évaluation des consommations d'eau des couverts végétaux. *Agron. Trop.*, 28, 9 : 855-857.
- RIOU, C., 1975 - La détermination pratique de l'évaporation. Application à l'Afrique Centrale. *Mém. ORSTOM*, 80, 236 p.
- ROBELIN, M., 1962 - Rapport entre augmentation de poids sec et transpiration en conditions de sécheresse. *C.R. Acad. Sc.* 254, 4 : 718-720.
- ROBERTY, G., 1952 - La végétation du Ferlo. *Bull. IFAN. A* : 777-798.
- RODIER, J.A., 1975a - L'hydrologie des régions sahéliennes et la sécheresse 1968/1973. *Etudes Scient.*, 49 p.
- RODIER, J.A., 1975b - Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel Tropical Africain. *Travaux et documents de l'ORSTOM n° 46 ORSTOM. Paris*, 121 p.
- ROOSE, E.J., 1979 - Pédogénèse actuelle d'un sol ferrugineux issu de granite sous une savane arborée du plateau Mossi (Hte Volta). *ORSTOM, Paris*, 121 p. Multigr.
- ROOSE, E.J., 1980 - Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrauliques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. *Th. de Doct. Université d'Orléans*. 587 Multigr.

- ROSE, C.W., BEGG, J.E., BYRNE, G.F., TORNELL, B.W.R. and GONCZ, J.H., 1972 - A simulation model of growth-fields environment relationships for townville stylo pasture. *Agric. Meteor.*, 10, 3 : 161-183.
- ROSENZWEIG, M.L., 1968 - Net primary productivity of terrestrials communities. Prediction from climatological data. *Am. Nat.*, 102 : 74-76.
- ROUX, G. et ROUX, M., 1957 - A propos de quelques méthodes de classification en phytosociologie. *Rev. de Stat. appl.* 14 : 59-72.
- ROWSE, H.R. and STONE, D.A., 1978 - Simulation of the water distribution in soil I. Measurement of soil hydraulic properties and the model for an uncropped soil. *Plant and soil.* 49 : 533-550.
- SCHNELL, R., 1976 - Flore et végétation de l'Afrique tropicale. T.1. Gauthier-Villars, PARIS, 448 p.
- SCHOCH, P.G. et DANCETTE, C., 1968 - Utilisation de l'évaporomètre piche pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. *Agron. Trop.* 9 : 967-873.
- SEGUIN, B., 1975 - Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France (Région d'Avignon). *Ann. Agron.* 26, 6 : 671-691.
- SELIRIO, I.S., and BROWN, D.M., 1979 - Soil moisture based simulation of forage yield. *Agric. Meteor.* 20 : 99-114.
- SHEPHERD, W.O., 1968 - Range and pasture management. *Report to the Government of the Sudan. Rep. Ta. N° 2468* FAO, Rome, 49 p.
- SICOT, M., 1978 - De la nécessité de compléter les mesures de teneur en eau des sols, par des mesures tensionométriques, pour l'établissement du bilan hydrique en milieu sahélien. *A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan* (Hte Volta) *DGRST-ORSTOM note technique* 11 p. Ronéo.
- SICOT, M., 1979 - Déterminisme de la production et des immobilisations minérales de la strate herbacée des parcours naturels sahéliens. *A.C.C. Lutte contre l'aridité dans l'Oudalan*, (Hte Volta) *DGRST-ORSTOM, Rapport multigr.* 13 p.
- SIMS, P.L. and SINGH, J.J., 1978 - The structure and function of ten western north american grasslands II. Intra seasonal dynamics in primary producer compartment. *J. of Ecology*, 66 : 547-572.
- SINGH, J.S., LAUENROTH, W.K. and STEINHORST, R.K., 1975 - Review and assesement of various techniques for estimating net aerial primary production in grasslands from harvest data. *The Botanical Review*, 41, 2, 181-232.
- SIRCOULON, J., 1974 - Les données climatiques et hydrologiques de la sécheresse en Afrique de l'ouest sahélienne. *SIES Report n° 2 Stockholm sweden*, 44 p.

- STROOSNIJDER, L., 1977 - Aspects of soil and water in the Sahel in Mali. *Communication at International Symposium on Rainfed agriculture in semi arid regions*, 17-22 april 1977, RIVERSIDE California : 32 p. Multigr.
- SZAREC, S.R., 1979 - Primary production in four north american desert : Indices of efficiency. *J. Arid. Environments*, 2 : 187-209.
- TADMOR, N.H., EYAL, E. and BENJAMIN, R.W., 1974 - Plant and sheep production on semi-arid annual grassland in Israel. *J. of Range Management*, 27, 6 : 427-432.
- THORNTHWAITE, C.W., 1944 - Report of the committee on transpiration and evaporation. *Trans. Am. Geophys. union*, 5, 687 p.
- THORNTHWAITE, C.W., 1948 - An approach toward a rational classification of climate. *The geographical review*, 38, 1 : 55-94.
- TOUTAIN, B., 1977 - Pâturage de l'O.R.D. du Sahel et de la zone de délestage au Nord-est de FADA N'GOURMA (Hte Volta) Tome II : les plantes, écologie, noms vernaculaires, intérêt fourrager, IEMVT, MAISONS-ALFORT, 120 p. + annexes.
- TROCHAIN, J., 1940 - Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal. *Mém. I.F.A.N.* 2 : 433 p.
- TROCHAIN, J., 1980 - Ecologie végétale de la zone intertropicale non désertique. Université Paul Sabatier, Toulouse, 468 p.
- VACHAUD, G., DANCETTE, L., SONKO, S. et THONY, J.L., 1978 - Méthode de caractérisation hydrodynamique in situ d'un sol saturé. Application à deux types de sols du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Ann. Agron.* 29, 1 : 1-36.
- VALENZA, J., DIALLO, A.K., 1972 - Etude des pâturages du Nord du Sénégal. I.E.M.V.T. *Etude agrostologique*, n° 34, 311 p.
- VAN DYNE, G.M., VOGEL, W.G., and FISSER, H.G., 1963 - Influence of small plot size and shape on range herbage production estimate. *Ecology* 44, 4 : 746-759.
- VAN KEULEN, H., 1975 - Simulation of water use and herbage growth in arid region. PUDOC Wageningen 176 pp.
- VALENZA, J., et FAYOLLE, F., 1965 - Note sur les essais de charge de pâturages en République du Sénégal. *Rev. elev. Med. Vét. Pays trop.* 18 : 321-327.
- WALLENTINUS, H.G., 1973 - Aboveground primary production of a *Juncetum gerardii* on a Baltic sea-shore meadow. *Oikos* 24 : 200-219.
- WALTER, H., 1964 - Productivity of vegetation in arid countries, the savahhan problem and bush encroachment after overgrazing. *Proceedings of the IUCN 9 th Technical Meeting (NAIROBI, Sept. 1963)*, IUCN Publications New Series n° 4, : 221-229.
- WIEGERT, R.G. et EVANS, F.C., 1964 - Primary production and the disappearance of dead vegetation on an old field in south eastern Michigan. *Ecology* 45, 1 : 49-63.



## ANNEXES





Annexe I : Description des stations météorologiques et du matériel utilisé

Annexe II : Texture du sol dans les principaux sites étudiés

Annexe III : Evaluation des populations d'algues par la méthode Reynaud et Roger (1977)

Annexe IV : Liste floristique

Annexe V : Transects représentatifs de la végétation des parcelles

Annexe VI : Variations des contributions spécifiques dans les principaux groupements

Annexe VII : Valeurs de l'ETP décadaire mesurées ou calculées

Annexe VIII : Caractéristiques hydriques des sols

Annexe IX : Quelques profils hydriques montrant l'évolution annuelle

Annexe X : Fiches pluviométriques des stations

Annexe XI : Evolution des réserves hydriques mesurées

Annexe XII : Tableaux de calcul du bilan hydrique

Annexe XIII : Simulation du bilan hydrique, exemple de sortie imprimée  
modèle Bijou Dahra-Nord Dune

Annexe XIV : Analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique, exemple  
de sortie imprimée ETR Dahra CRZ

ANNEXE I : Description des stations météorologiques  
et du matériel utilisé.

Nous donnons ci-dessous un aperçu de chaque station.

FETE-OLE : - Matériel

- de 1969 à 1974 abri météorologique simplifié
- depuis 1974 abri météorologique normalisé type ASECNA
- depuis 1969 un thermohygrographe mensuel Jules RICHARD  
étalonné tous les deux mois.
- depuis 1980 pluviomètre à lecture directe  
hauteur de la bague, 1,50 m.
- depuis 1975 pluviographe à augets basculeurs SIAP  
hauteur de la bague, 1,50 m.

- Observateur

Amath SOW - gardiennage et lecture du pluviomètre.

MBIDI : - Matériel

- un abri météorologique normalisé type ASECNA
- un pluviomètre type association  
hauteur de la bague, 1,50 m.
- thermomètre maxima - thermomètre minima
- thermomètre sec, thermomètre mouillé
- un évaporimètre "Piche"
- un bac à évaporation enterré de 1m<sup>2</sup>, type "ORSTOM normalisé"  
depuis juin 1975
- depuis fin 1975 un thermographe et un hydrographe hebdomadaire.
- depuis fin 1976 un anémomètre totaliseur situé à 2 m.

- Observateur

Oumar TANDIA

Agent technique des Eaux et Forêt

Mesures effectuées journallement à 8 h et 18 h.

DAHRA-CRZ :- Matériel

- un abri météorologique de type ASECNA normalisé
- Un pluviomètre type "association"  
hauteur de la bague, 1,50 m.
- un thermomètre maxima - un thermomètre minima
- un évaporimètre "Piche"
- un thermohygrographe mensuel Jules RICHARD  
étalonné tous les deux mois
- un bac à évaporation enterré de 1m<sup>2</sup>, type "ORSTOM normalisé"
- depuis novembre 1975 un anémomètre totaliseur situé à 2 m.

La station dont le poste pluviométrique existait depuis 1956  
était située à proximité d'arbres dont la taille était gênante. Elle a été  
déplacée en mars 1976 d'une centaine de mètres.

- Observateur

M. Ibrahima DEH chargé du Laboratoire de Reproduction et d'Insémination Artificielle - jusqu'en 1976.

Depuis 1976, M. Mamadou KA.

- Mesures effectuées journellement à 8 et à 18 h.

A partir de 1976 des pluviomètres à accumulation ont en outre été installés dans chaque parcelle.

DOLI : - Matériel

- un abri météorologique normalisé type ASECNA
- un pluviomètre "association"
- thermomètre maxima - thermomètre minima
- thermomètre sec - thermomètre humide
- un évaporimètre "Piche"
- un thermohygrographe mensuel Jules RICHARD  
étalonné tous les deux mois
- un bac à évaporation enterré de  $1m^2$ , type "ORSTOM normalisé"

Les mesures n'ont été effectuées correctement que la première année. On a dû les interrompre en 1977.

ANNEXE II : TEXTURE DU SOL DANS LES PRINCIPAUX SITES ETUDIES.

TABLEAU A TEXTURE DES SOLS FETE-OLE

Emplacement	Z en cm	EN % DE LA TERRE FINE					
		Argile	Limons fin	Limons grossier	Sable fin	Sable grossier	M.O.
Dune	0-10	3,9	3,1	4,6	54,9	33,8	0,40
	10-30	7,0	2,5	4,4	54,2	31,9	0,20
	30-50	10,0	1,9	4,8	48,8	34,6	0,15
	50-70	10,3	1,7	2,9	49,9	35,2	0,1
	70-100	10,0	1,5	2,4	47,9	38,2	0,1
Haut de pente	0-10	3,4	4,2	4,4	50,3	37,5	0,6
	10-30	4,9	3,4	2,9	50,3	36,4	0,2
	30-50	8,0	2,8	3,6	49,2	36,5	0,15
	50-70	9,1	2,4	2,7	45,9	39,8	0,1
	70-100	10,4	2,1	2,7	45,2	39,5	0,1
Pente	0-10	4,0	3,9	5,2	49,0	37,4	0,4
	10-30	6,9	3,6	5,7	48,7	34,9	0,2
	30-50	10,3	2,9	4,3	46,5	35,9	0,1
	50-70	12,8	2,4	3,5	44,6	36,4	0,09
	70-100	13,6	2,2	3,2	44,3	34,8	0,09
Bas de pente	0-10	4,7	4,4	2,7	51,0	37,2	0,60
	10-30	7,5	4,0	8,9	42,7	36,9	0,38
	30-50	9,9	3,9	4,2	45,8	37,3	0,2
	50-70	11,1	4,3	4,4	45,1	35,3	0,1
	70-100	15,4	3,0	3,4	43,2	35,2	0,1
Couronne de mare	0-10	4,3	5,1	6,7	45,9	38,0	1,2
	10-30	9,1	4,6	5,6	42,0	38,7	0,4
	30-50	12,8	2,8	5,5	41,2	37,7	0,3
	50-70	15,0	4,1	4,6	41,3	35,0	0,2
	70-100	15,0	4,3	4,6	43,1	33,0	0,15
Mare	0-10	11,3	9,2	6,0	34,9	38,8	1,4
	10-30	17,1	9,2	5,4	35,2	33,2	1,7
	30-50	20,5	9,3	4,7	34,2	31,5	0,6
	50-70	24,0	8,9	5,4	31,8	30,0	
	70-100	23,7	7,4	4,3	33,1	31,6	

B TEXTURE DAHRA NORD

Emplacement	Z en cm	EN % DE LA TERRE FINE					
		Argile	Limon fin	Limon gros	Sable fin	Sable gros	M.O.
Dune	0-10	2,3	1,8	0,5	44,7	50,6	0,50
	10-30	2,6	1,7	0,4	41,8	53,5	0,25
	30-50	3,4	1,3	0,9	46,5	48,0	0,20
	50-70	3,8	1,7	0,2	40,6	53,7	0,20
	70-100	4,2	1,5	0,7	43,1	50,5	0,20
Haut de pente	0-10	2,7	1,4	1,3	49,5	45,1	0,40
	10-30	3,5	1,6	0,8	51,2	42,9	0,20
	30-50	3,8	1,0	0,6	44,0	49,7	0,20
	50-70	4,8	1,2	0,6	48,1	45,3	0,20
	70-100	5,6	1,5	0,6	48,7	42,6	0,15
Pente	0-10	3,1	1,7	1,3	52,3	41,6	0,40
	10-30	6,5	1,0	0,9	56,5	35,1	0,20
	30-50	6,5	1,6	1,6	54,8	35,4	0,20
	50-70	6,9	1,5	2,7	47,9	41,6	0,20
	70-100	5,3	3,2	1,5	48,3	41,7	0,15
Bas de pente	0-10	3,2	2,0	2,0	57,3	35,5	0,30
	10-30	3,6	1,7	1,5	56,9	36,3	0,20
	30-50	4,6	1,6	2,5	57,9	33,4	0,20
	50-70	5,6	1,7	1,5	56,6	34,6	0,20
	70-100	6,4	1,5	1,7	56,3	34,1	0,15
Bas fond	0-10	3,3	2,4	2,0	53,2	39,1	
	10-30	3,2	2,1	1,7	53,3	39,7	
	30-50	4,7	1,8	0,6	50,9	42,0	
	50-70	4,1	2,4	1,0	47,8	47,7	
	70-100	4,7	2,9	1,6	47,0	43,8	

C - TEXTURE DAHRA SUD

Emplacement	Z en cm	EN % DE LA TERRE FINE					
		argile	limon fin	limon gros	sable fin	sable gros	M.O.
Replats	0-10	3,6	3,3	5,0	53,3	34,8	0,40
	10-30	7,4	3,0	4,5	50,8	34,4	0,30
	30-50	10,4	2,9	3,7	50,2	32,8	0,20
	50-70	11,2	2,3	3,5	47,1	36,0	0,20
	70-100	12,4	2,7	3,4	47,7	33,7	0,15
Bord de mare temporaire	0-10	4,2	4,3	3,2	54,2	34,2	0,70
	10-30	7,6	3,7	4,0	51,4	33,4	0,30
	30-50	8,3	4,4	3,2	49,5	34,7	0,30
	50-70	9,8	3,3	3,7	50,6	32,7	0,25
	70-100	11,9	2,9	2,6	49,6	33,0	0,20

D - TEXTURE DOLI SUD

Emplacement	Z en cm	Refus 2 mm	EN % DE LA TERRE FINE					
			argile	limon fin	limon gros	sable fin	sable gros	M.O.
Recouvrement argilo-sableux important	10	0	8,2	6,7	4,7	39,9	40,0	0,50
	20	0	13,5	7,4	7,2	34,3	21,9	0,50
	30	8,5 %	35,8	6,8	6,0	22,2	28,5	0,60
	50	23,1 %	28,2	8,6	8,8	16,5	37,1	0,40
	60	70,0 %	42,9	6,8	5,6	18,7	25,3	0,60
Recouvrement argilo-sableux faible	10	0	7,4	11,6	4,9	44,1	31,1	0,80
	20	60 %	15,9	11,2	9,3	34,8	28,4	0,60
	30	70 %	32,1	11,1	6,8	26,0	23,2	0,80
	50	88 %	42,3	9,3	4,6	18,6	24,3	0,80
	60	93 %	45,3	8,9	4,2	15,3	25,5	0,80

E TEXTURE DOLI NORD

Emplacement	Z en cm	EN % DE LA TERRE FINE					
		Argile	Limon fin	Limon gros	Sable fin	Sable gros	M.O.
Dune	0-10	3,8	3,3	2,6	41,0	49,3	
	10-30	6,7	2,3	3,5	36,6	40,4	
	30-50	8,1	2,3	2,9	36,9	49,8	
	50-70	8,5	2,0	1,2	33,0	55,3	
	70-100	8,0	1,6	1,4	31,9	57,1	
Haut de pente	0-10	4,1	2,6	5,3	43,6	44,0	0,50
	10-30	6,6	2,7	3,9	41,2	44,6	0,30
	30-50	10,1	2,2	3,6	38,1	45,5	0,30
	50-70	10,4	2,5	3,2	37,0	46,9	0,30
	70-100	9,7	2,3	3,7	36,8	47,4	0,25
Pente	0-10	4,2	3,1	4,3	43,1	45,3	0,40
	10-30	6,5	2,7	2,4	41,4	47,2	0,25
	30-50	10,4	4,1	3,9	36,5	44,8	0,40
	50-70	10,9	2,2	2,3	36,6	47,8	0,30
	70-100	11,4	4,2	2,5	38,7	43,1	0,20
Bas de Pente	0-10	4,8	3,2	1,3	40,7	50,0	
	10-30	5,2	3,2	1,4	42,8	47,4	
	30-50	7,2	3,4	3,5	40,7	45,2	
	50-70	9,5	3,2	4,5	37,2	45,6	
	70-100	8,8	2,6	4,1	35,2	49,5	
Bas fond	0-10	5,9	8,3	3,8	33,0	49,0	
	10-30	8,3	8,9	2,2	38,5	42,1	
	30-50	12,0	9,5	1,9	36,7	39,9	
	50-70	13,7	8,7	1,0	36,1	40,5	
	70-100	10,3	6,5	1,2	44,4	37,6	



ANNEXE III : Evaluation des populations d'algues par  
la méthode REYNAUD et ROGER (1977).

FETE-OLE Prélèvements de croûte (février 1979)

Espèces hétérocystées		
fixatrices d'azote	<i>Scytonema javanicum</i>	59 %
490 kg de matière fraîche	<i>Nostoc punctiforme</i>	0,3 %
par hectare		
Espèces homocystées		
non fixatrices	<i>Microcoleus sp.</i>	25,6 %
41 kg de matière fraîche	<i>Symploca sp.</i>	11,0 %
par hectare	<i>Pseudonaboena sp.</i>	4 %

DAHRA-SUD Prélèvements de croûte (février 1979)

	<i>Scytonema hoffmani</i>	17 %
Espèces hétérocystées	<i>Scytonema javanicum</i>	17 %
fixatrices d'azote	<i>Noctoc punctiforme</i>	0,6 %
	<i>Microchoete tenera</i>	16 %
	<i>Symploca sp.</i>	21 %
Espèces non fixatrices	<i>Pseudonaboena sp.</i>	43 %
	Algues vertes unicellu- laires	0,5 %
	Diatomées	1,7 %

On note également la présence de très nombreux filaments  
myceliens associés aux algues.

ANNEXE IV : LISTE FLORISTIQUE

FAMILLES	N°	E SPECES	TB	FO	DN	DS	NN	NS	AP
ACANTHACEES	1	<i>Blepharis linariifolia</i> Pers.	T	+		+			A
	2	<i>Lepidagathis anobrya</i> Nees	T					+	NA
	3	<i>Lepidagathis sericea</i> Benoist	T					+	NA
AIZOACEES	4	<i>Gisekia pharnaceoides</i> L.	T	+	+	+	+		A
	5	<i>Limbum diffusum</i> (Gay) Schinz.	T	+	+	+	+		A
	6	<i>Limbum pterocarpum</i> (Gay) Heimerl	T	+	+	+			NA
	7	<i>Limbum viscosum</i> (Gay) Fenzl.	T	+	+	+			A
	8	<i>Mollugo cerviana</i> (L) Seringe	T		+				
	9	<i>Mollugo nudicaulis</i> Lam.	T		+				
	10	<i>Sesuvium sesuvioïdes</i> (Fenzl.) Verde.	T		+				NA
AMARANTHACEES	11	<i>Trianthema portulacastrum</i> L.	T	+					PA
	12	<i>Achyranthes argentea</i> Lam.	T	+	+	+	+	+	PA
	13	<i>Aerva javanica</i> (Burm. F.) Juss et Schult	T	+					NA
	14	<i>Alternanthera nodiflora</i> R. Br.	T	+					NA
	15	<i>Cyatula prostrata</i> (L) Blume, Bijdr.	T	+					NA
	16	<i>Pandiaka angustifolia</i> (Vahl) Hepper	T	+				+	NA
AMARYLLIDACEES	17	<i>Pancratium trianthum</i> Herbert.	G	+			+		NA
ANACARDIACEES	18	<i>Lannea acida</i> A. rich.	P		+		+	+	PA
	19	<i>Ozoroa insignis</i> Del.	P				+	+	
ANNONACEES	20	<i>Sclerocarya birrea</i> (A. rich) Hochst.	P	+			+	+	A
APOCYNACEES	21	<i>Hexalobus monopetalus</i> (A. Rich) Engl. et Diels.	P				+	+	
ASCLEPIADACEES	22	<i>Adenium obesum</i> (Forsk.) Roem. et Schult.	P	+				+	TO
	23	<i>Calotropis procera</i> (Ait.) Ait. F.	P	+					NA
BIGNONIACEES	24	<i>Caralluma decaisneana</i> (Lem.) N.E. Br.	Hcr						NA
	25	<i>Raphionacme daronii</i> Berhaut	G					+	
	26	<i>Stereospermum kunthianum</i> Cham.	P					+	PA
BOMBACACEES	27	<i>Adansonia digitata</i> L.	P	+				+	PA
	28	<i>Bombax costatum</i> Pellegrin et Vuillet.	P				+	+	NA
BORRAGINACEES	29	<i>Heliotropium bacciferum</i> Forsk.	T	+					NA
	30	<i>Heliotropium pterocarpum</i> (DC et A.DC) Hochst et Steud.	T	+					PA
	31	<i>Heliotropium strigosum</i> Willd.	T	+	+	+	+	+	PA
BURSERACEES	32	<i>Commiphora africana</i> (A. rich.) Engl.	P	+	+		+	+	A
CAPPARIDACEES	33	<i>Boscia angustifolia</i> A. rich.	P					+	A
	34	<i>Boscia senegalensis</i> (Pers.) Lam. ex Poir.	P	+		+		+	PA
	35	<i>Cadaba farinosa</i> Forsk.	P	+				+	TA
	36	<i>Cleome monophylla</i> L.	T	+		+			A
	37	<i>Cleome tenella</i> L. F.	T	+	+				NA
	38	<i>Cleome viscosa</i> L.	T	+					A
	39	<i>Gynandropsis gynandra</i> (L.) Briq.	T	+					NA
	40	<i>Maerua angolensis</i> DC.	P	+	+	+	+	+	TA
	41	<i>Polycarpaea lincariifolia</i> (DC.) DC.	T	+	+	+	+		PA
	42	<i>Maytenus senegalensis</i> (Lam) Exell	P					+	NA
CESALPINIEES	43	<i>Bauhinia rufescens</i> Lam.	P					+	A
	44	<i>Cassia absus</i> L.	T					+	A
COCHLOSPERMACEES	45	<i>Cassia obtusifolia</i> L.	T	+	+	+	+	+	NA
	46	<i>Cassia mimosoides</i> L.	T	+	+	+	+	+	A
	47	<i>Cochlospermum tinctorium</i> A. Rich.	G					+	
	48	<i>Anogeissus leiocarpus</i> (DC) Guill. et Perr.	P					+	NA
	49	<i>Combretum aculeatum</i> vent.	P	+	+	+			TA
	50	<i>Combretum glutinosum</i> Perr. ex DC.	P	+	+	+		+	NA
COMBRETACEES	51	<i>Combretum micranthum</i> G. Don.	P	+				+	PA
	52	<i>Combretum nigricans</i> Lepr. ex Guill. et Perr. Var. <i>Eliotii</i>	P					+	A
	53	<i>Guiera senegalensis</i> J.F. Gmel.	P	+	+	+		+	PA
	54	<i>Terminalia avicennioides</i> Guill. et Perr.	P					+	NA

LISTE FLORISTIQUE (Suite)

FAMILLES	N°	ESPECES	TB	FO	DN	DS	NN	NS	AP
COMMELINACEES	55	<i>Commelina forskalaei</i> Vahl	T	+	+	+	+	+	TA
	56	<i>Blainvillea gayana</i> Cass.	T	+	+	+	+	+	NA
CONVOLVULACEES	57	<i>Ipomoea coccinosperma</i> Hochst. ex Choisy	T						NA
	58	<i>Ipomoea eriocarpa</i> R Br.	T	+					NA
	59	<i>Ipomoea heterotricha</i> F. Didr.	T					+	NA
	60	<i>Ipomoea pes-tigridis</i> L.	T	+	+	+	+	+	PA
	61	<i>Ipomoea vagans</i> Bak.	T		+				NA
	62	<i>Jacquemontia tamnifolia</i> (L) Griseb.	T		+	+	+		NA
	63	<i>Merremia aegyptiaca</i> (L) Urban.	T	+		+	+		NA
	64	<i>Merremia pinnata</i> (Hochst. ex Choisy) Hallier F.	T	+	+	+	+	+	PA
	65	<i>Merremia tridentata</i> (L.) Hallier F.	T		+			+	A
	CUCURBITACEES	66	<i>Citrullus colocynthis</i> (L.) Schrad.	T	+	+	+		
67		<i>Coccinia grandis</i> (L.) J.C. Voigt.	H	+	+	+			PA
68		<i>Corallocarpus epigaeus</i> (Rottb) C.B. Cl.	H	+					
69		<i>Ctenolepis cerasiformis</i> (Stocks) Hook. F.	T			+			
CYPERACEES	70	<i>Cucumis melo</i> var. <i>agrestis</i> Naud.	T		+	+			A
	71	<i>Momordica balsamina</i> L.	H		+				NA
	72	<i>Bulbostylis barbata</i> (Rottb) C.B. Cl. in Hook. F.	T	+		+	+	+	NA
	73	<i>Fimbristylis hispidula</i> sub. sp. <i>senegalensis</i> (Chern) Napper	T	+	+	+	+	+	PA
	74	<i>Cyperus amabilis</i> Vahl.	T	+				+	NA
	75	<i>Cyperus iria</i> L.	T	+					NA
	76	<i>Cyperus</i> s. sp.	T					+	
	77	<i>Kyllinga</i> sp.	T	+		+	+		PA
EBENACEES	78	<i>Diospyros mespiliiformis</i> Hochst.	P				+	+	PA
	79	<i>Acalypha segetalis</i> Müll. Arg.	T				+		NA
EUPHORBIACEES	80	<i>Chrozophora senegalense</i> (Lam.) A. Juss.	C				+		PA
	81	<i>Euphorbia balsamifera</i> Ait	P	+					NA
	82	<i>Euphorbia convolvuloides</i> Hochst. ex Benth	T				+		NA
	83	<i>Euphorbia forskalii</i> J. Gay	T	+					NA
	84	<i>Euphorbia polycnemoïdes</i> Hochst. ex Boiss.	T					+	NA
	85	<i>Phyllanthus pentandrus</i> Schum. et Thonn.	T		+	+	+	+	NA
	86	<i>Securinega virosa</i> (Roxb. ex Willd.) Baill.	P				+	+	NA
	87	<i>Monsonia senegalensis</i> Guill. et Perr.	T	+	+	+	+	+	A
	88	<i>Andropogon gayanus</i> Kunth	Hcc				+	+	TA
	GRAMINEES	89	<i>Andropogon pinguipes</i> Stapf.	T	+				+
90		<i>Andropogon pseudapricus</i> Stapf.	T					+	A
91		<i>Andropogon fastigiatus</i> Sw	T					+	A
92		<i>Aristida adscensionis</i> L.	T	+		+		+	A
93		<i>Aristida funiculata</i> Trin. et Rupr.	T	+					PA
94		<i>Aristida kerstingii</i> Pilger	T					+	PA
95		<i>Aristida mutabilis</i> Trin. et Rupr.	T	+	+	+	+		A
96		<i>Aristida sieberana</i> Trin.	H	+	+	+	+		PA
97		<i>Aristida stipoides</i> Lem.	T		+	+	+		NA
98		<i>Brachiaria deflexa</i> (Schumach.) Hubb. ex Robyns.	T		+			+	A
99		<i>Brachiaria distichophylla</i> (Trin.) Stapf.	T	+	+	+	+		TA
100		<i>Brachiaria lata</i> (Schumach) Hubb.	T	+	+	+			A
101	<i>Brachiaria ramosa</i> (L.) Stapf.	T	+	+			+	PA	
102	<i>Brachiaria xantholeuca</i> (Hack. ex Schinz) Stapf.	T	+	+	+	+		TA	
103	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.	T	+	+	+	+	+	A	
104	<i>Cenchrus prieurii</i> (Kunth) Maire	T	+	+	+	+		A	
105	<i>Chloris pilosa</i> Schumach. et Thonn.	T	+	+	+	+		TA	
106	<i>Chloris prieurii</i> Kunth	T	+	+	+	+		TA	
107	<i>Ctenium elegans</i> Kunth.	T				+		PA	
108	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> (L.) P. Beauv.	T	+	+	+	+	+	TA	

LISTE FLORISTIQUE (Suite)

FAMILLES	N°	ESPECES	TB	FO	DN	DS	NN	NS	AP
GRAMINEES (Suite)	109	<i>Digitaria argilacea</i> (Hitcch. et Chose) Fernal.	T	+			+	+	A
	110	<i>Digitaria gayana</i> (Kunth) Stapf ex A. Chev.	T				+	+	A
	111	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.	T	+	+		+	+	TA
	112	<i>Diheteropogon hagerupii</i> Hitcch.	T	+				+	A
	113	<i>Echinochloa colona</i> (L.) R. Br.	T	+					TA
	114	<i>Elionurus elegans</i> Kunth	T				+	+	NA
	115	<i>Eragrostis ciliaris</i> (L.) R. Br.	T	+			+		A
	116	<i>Eragrostis cilianensis</i> (All.) Vign.	T	+				+	PA
	117	<i>Eragrostis pilosa</i> (L.) P. Beauv.	T	+	+		+	+	A
	118	<i>Eragrostis gangetica</i> (Roxb.) Stend.	T						+
	119	<i>Eragrostis tremula</i> Hochst. ex Stend.	T	+	+		+	+	A
	120	<i>Hackelochloa granularis</i> (L.) O. Ktze	T					+	A
	121	<i>Leptothrium senegalense</i> (Kunth) Clayton	T	+					
	122	<i>Loudetia togoensis</i> (Pilg) Hubb.	T						+
	123	<i>Microchloa indica</i> (L.F.) P. Beauv.	T						+
	124	<i>Panicum walense</i> Mez	T	+					TA
	125	<i>Panicum laetum</i> Kunth.	T	+					TA
	126	<i>Panicum pansum</i> Rendle.	T				+		A
	127	<i>Pennisetum pedicellatum</i> Trin.	T	+				+	A
	128	<i>Pennisetum violaceum</i> (Lam) L. Rich	T		+				PA
	129	<i>Schizachyrium exile</i> (Hochst.) Pilger	T	+				+	PA
	130	<i>Schizachyrium nodulosum</i> (Hack) Stapf.	T						+
	131	<i>Schoenfeldia gracilis</i> Kunth	T	+	+		+	+	A
	132	<i>Setaria pallide-fusca</i> (Schumach.) Stapf et Hubb.	T					+	+
	133	<i>Sporobolus festivus</i> Hochst.	T						+
	134	<i>Sporobolus microprotus</i> Stapf.	T						+
	135	<i>Sporobolus pectinellus</i> Mez.	T			+		+	+
	136	<i>Sporobolus stolzii</i> Mez	T					+	
	137	<i>Sporobolus tenuissimus</i> (Schrank) O. Ktze.	T					+	+
	138	<i>Tragus berteronianus</i> Schult.	T		+				
	139	<i>Trichoneura mollis</i> (Kunth) Ekman	T	+	+				
	140	<i>Tripogon minimus</i> (A. Rich.) Hochst. ex Stend.	T	+					+
	141	<i>Endostemon tereticaalis</i> (Poir.) Ashby	T						+
	142	<i>Hemizygia bracteosa</i> (Benth.) Brig.	T	+					
	LABIEES	143	<i>Albuca nigritana</i> (Bak) Troupin	G					
144		<i>Aloe buettneri</i> A. berger	G						+
LILIACEES	145	<i>Asparagus flagellaris</i> (Kunth) Bak.	G						+
	146	<i>Dipcadi longifolium</i> (Lindl.) Bak.	G						+
LONGANIACEES	147	<i>Gloriosa superba</i> L.	G	+	+				+
	148	<i>Urginea indica</i> (Roxb.) Kunth	G				+		NA
MALVACEES	149	<i>Strychnos spinosa</i> Lam.	P				+	+	PA
	150	<i>Hibiscus diversifolius</i> Jacq.	T	+	+		+	+	A
MIMOSACEES	151	<i>Hibiscus sidiiformis</i> Baill.	T	+					PA
	152	<i>Sida alba</i> L.	T	+					NA
NYCTAGINACEES	153	<i>Sida cordifolia</i> L.	C						NA
	154	<i>Acacia ataxacantha</i> DC.	P	+					NA
OLACACEES	155	<i>Acacia macrostachya</i> Reichenb. ex Benth.	P				+	+	PA
	156	<i>Acacia senegal</i> (L.) Willd.	P	+	+		+	+	TA
MENISPERMACEES	157	<i>Acacia seyal</i> Del.	P				+	+	TA
	158	<i>Dichrostachys cinerea</i> (L.) Wight et Arn.	P	+	+		+	+	PA
NYCTAGINACEES	159	<i>Entada africana</i> Guill. et Perr.	P				+		A
	160	<i>Tinospora bakis</i> (A. Rich) Miers	PI	+			+	+	NA
OLACACEES	161	<i>Boerhavia erecta</i> L.	T	+					NA
	162	<i>Ximena americana</i> L.	P				+		NA

LISTE FLORISTIQUE (Suite)

FAMILLES	N°	ESPECES	TB	FO	DN	DS	NN	NS	AP
PAPILIONACEES	163	<i>Aeschynomene indica</i> L.	T	+					
	164	<i>Alysicarpus ovalifolius</i> (Schum. et Thonn) J. Léonard.	T	+	+	+	+	+	TA
	165	<i>Crotalaria atrorubens</i> Hochst. ex Benth.	T		+				
	166	<i>Crotalaria perrottetii</i> DC.	T	+	+	+	+	+	A
	167	<i>Crotalaria podocarpa</i> DC.	T		+				PA
	168	<i>Dalbergia melanoxylon</i> Guill. et Perr.	P	+					A
	169	<i>Indigofera aspera</i> Perr. ex DC.	T	+	+	+			A
	170	<i>Indigofera astragalina</i> DC.	T	+			+		PA
	171	<i>Indigofera bracteolata</i> DC.	C				+	+	A
	172	<i>Indigofera dendroides</i> Jacq.	C				+	+	
	173	<i>Indigofera leprieurii</i> Back. F.	T					+	+
	174	<i>Indigofera pilosa</i> Poir.	T	+	+	+	+	+	PA
	175	<i>Indigofera prieuriana</i> Guill. et Perr.	T				+	+	
	176	<i>Indigofera secundiflora</i> Poir.	T	+					A
	177	<i>Indigofera senegalensis</i> Lam.	T	+					A
	178	<i>Indigofera stenophylla</i> Guill. et Perr.	T					+	
	179	<i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir.	P						TA
	180	<i>Rothnia hirsuta</i> (Guill. et Perr.) Back	T			+			
	181	<i>Tephrosia bracteolata</i> Guill. et Perr.	T			+	+	+	PA
	182	<i>Tephrosia gracilipes</i> Guill. et Perr.	T					+	
183	<i>Tephrosia linearis</i> (Willd) Pers.	T			+	+		PA	
184	<i>Tephrosia platycarpa</i> Guill. et Perr.	T		+					
185	<i>Tephrosia purpurea</i> (L.) Pers.	C	+	+		+		A	
186	<i>Vigna reticulata</i> Hook. F.	T			+		+	A	
187	<i>Vigna sp.</i>	T					+	A	
188	<i>Xeroderris stuhlmannii</i> (Taub.) Mendonça et sousa	P					+	A	
PEDALIACEES	189	<i>Zornia glochidiata</i> Reichb. ex DC.	T	+	+	+	+	+	TA
	190	<i>Ceratotheca sesamoides</i> Endl.	T	+	+	+			A
POLYGALACEES	191	<i>Sesamum alatum</i> Thonning.	T	+	+	+			NA
	192	<i>Polygala irregularis</i> Boiss	C		+				NA
PORTULACACEES	193	<i>Portulaca foliosa</i> Ker-Gawl	T			+			NA
	194	<i>Portulaca oleracea</i> L.	T	+					NA
RHAMNACEES	195	<i>Ziziphus mauritiana</i> Lam.	P	+	+			A	
RUBIACEES	196	<i>Borreria chaetocephala</i> (DC) Hepper.	T	+					PA
	197	<i>Borreria radiata</i> DC.	T	+	+	+	+	+	NA
	198	<i>Borreria stachydea</i> (DC.) Hitch et Dalz.	T	+	+	+	+	+	PA
	199	<i>Crossopteryx febrifuga</i> (Afz ex G. Don) Benth.	P	+			+	+	NA
	200	<i>Feretia apodanthera</i> Del.	P	+			+	+	A
	201	<i>Gardenia ternifolia</i> K. Schum et Thonn.	P				+	+	A
	202	<i>Kohautia grandiflora</i> DC.	T	+					NA
	203	<i>Kohautia senegalensis</i> Schum. et Schlecht.	T	+	+		+		NA
	204	<i>Mitracarpus scaber</i> Zucc. in Schults Mant.	T					+	NA
	SCROPHULARIACEES	205	<i>Scoparia dulcis</i> L.	T	+				
206		<i>Striga aspera</i> (Willd) Benth.	T		+		+		NA
207		<i>Striga gesnerioides</i> (Willd) Vatke.	T		+				NA
SIMAROUBACEES	208	<i>Balanites aegyptiaca</i> (L.) Del.	P	+	+	+	+	TA	
STERCULIACEES	209	<i>Sterculia setigera</i> Del.	P	+			+	+	NA
	210	<i>Waltheria indica</i> L.	Cs	+	+		+		PA
TILIACEES	211	<i>Corchorus olitorius</i> L.	T	+			+		PA
	212	<i>Corchorus tridens</i> L.	T	+	+	+	+	+	A
	213	<i>Grewia bicolor</i> Juss.	P	+	+	+	+	+	A
	214	<i>Grewia lasiodiscus</i> K. Schum.	P	+				+	PA
	215	<i>Grewia tenax</i> (Forsk.) Fiori.	P	+				+	PA
TURNERACEES	216	<i>Wormskioldia pilosa</i> (Willd.) Schweing. ex. Urb.	T		+				

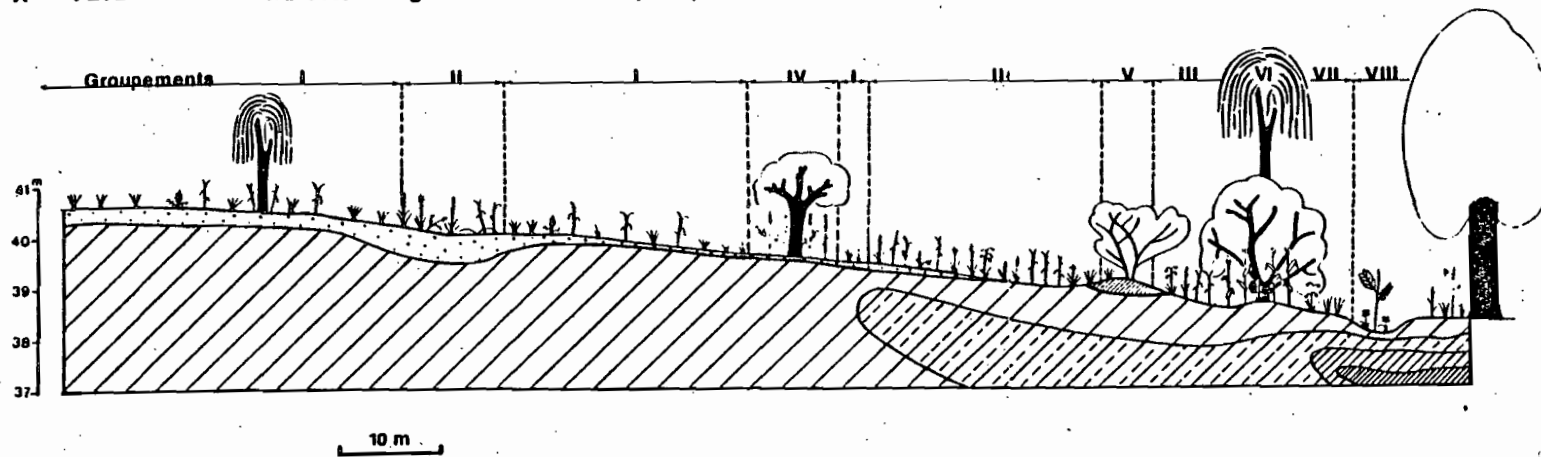
LISTE FLORISTIQUE (suite)

FAMILLES	N°	ESPECES	TB	FO	DN	DS	NN	NS	AP
VIOLACEES	217	<i>Hybanthus enneaspermus</i> (L.) F.U. Muell.	T	+					NA
	218	<i>Ampelocissus pentaphylla</i> (Guill et Perr) Gilg et Brandt.	CL			+			NA
VITACEES	219	<i>Cissus aralioides</i> (Welw) Planch	CL					+	NA
	220	<i>Cissus quadrangularis</i> L.	Ps					+	NA
ZYGOPHYLLACEES	221	<i>Cyphostemma cymosa</i> (Schumach et Thonn.) Descoings	Cl					+	NA
	222	<i>Tribulus terrestris</i> L.	T	+	+	+			TA

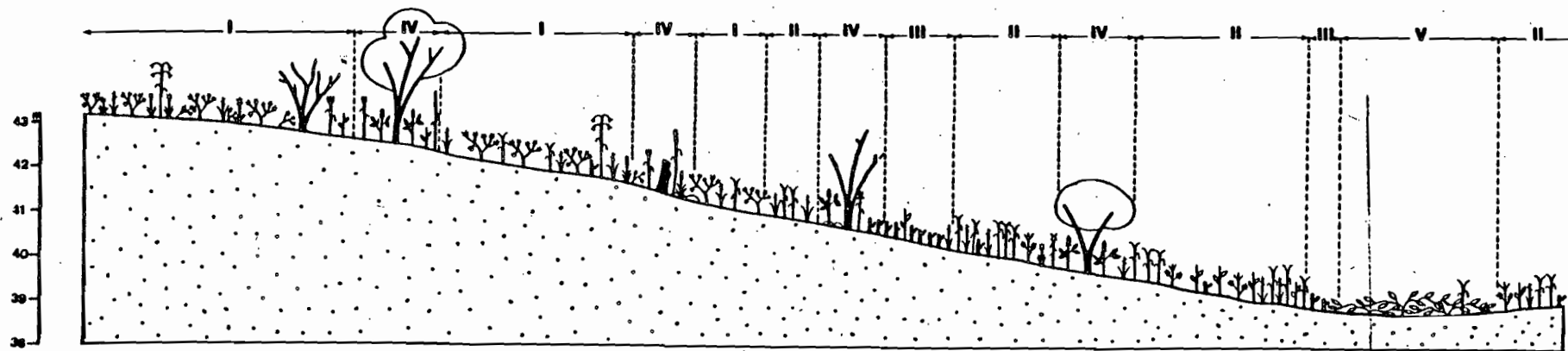
ABREVIATIONS EMPLOYEES DANS CETTE LISTE

T.B.	:	Types biologiques	
F.O.	:	FETE-OLE	
D.N.	:	DAHRA-NORD	
D.S.	:	DAHRA-SUD	
N.N.	:	NDOLI-NORD	
N.S.	:	NDOLI-SUD	
T.	:	Théophyte	
H	:	Hémicryptophyte	
G	:	Géophyte	
C	:	Chaméphyte	
P	:	Phanérophyte	
cr	:	Crassulescent	
ce	:	Cespiteux	
l	:	Limanescant	
s	:	Sarmenteux	
AP	:	Appetibilité	
TA	:	Très appétée	} espèces consommées
A	:	Appétée	
PA	:	Peu appétée	
NA	:	Non appétée	
To	:	Toxique	

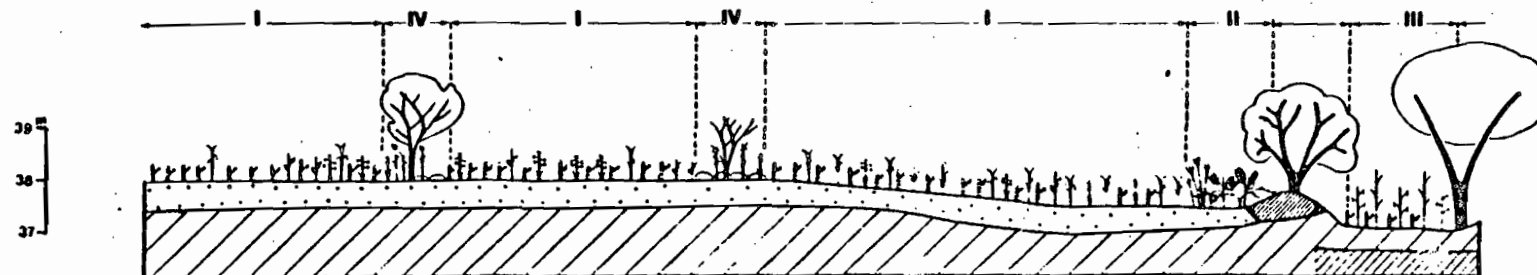
A — FÉTÉ-OLÉ Transect de végétation suivant une toposéquence



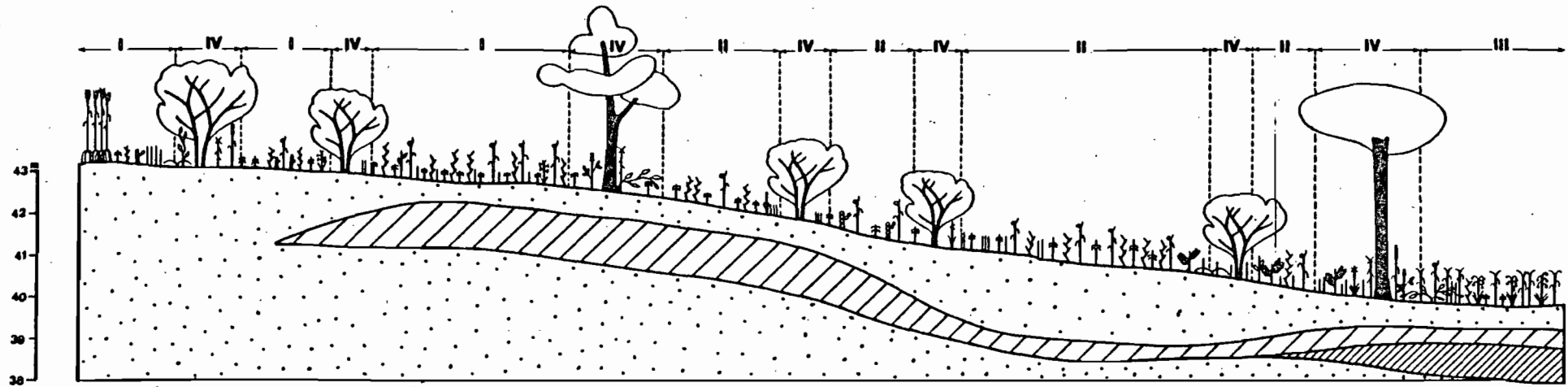
B — DAHRA-NORD Transect de végétation suivant une toposéquence



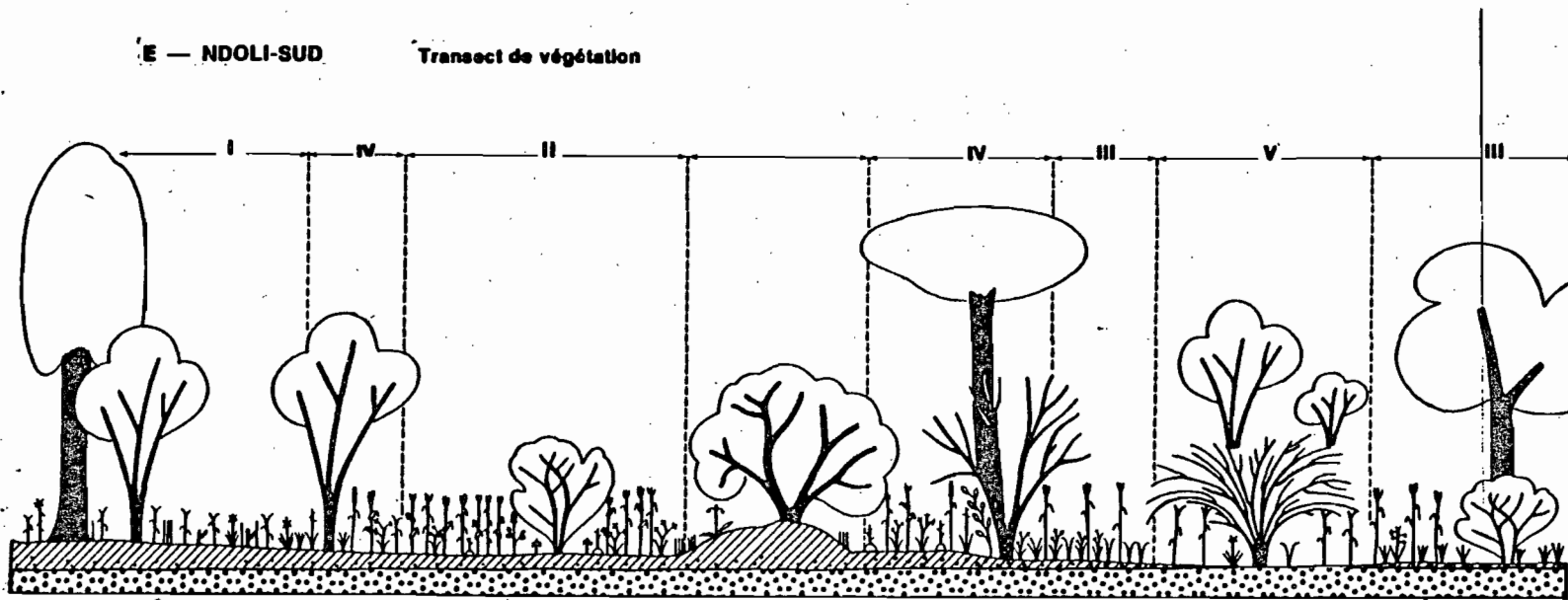
C — DAHRA-SUD Transect de végétation



D — NDOLI-NORD Transect de végétation suivant une toposéquence;



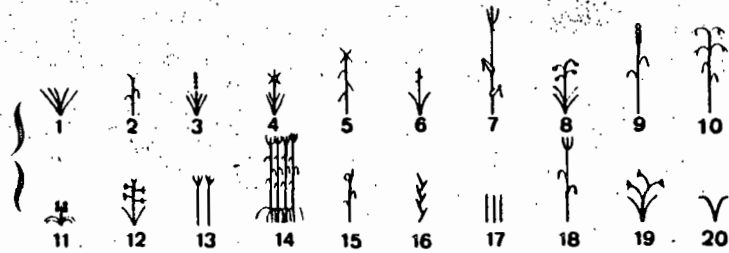
E — NDOLI-SUD Transect de végétation





## LÉGENDE

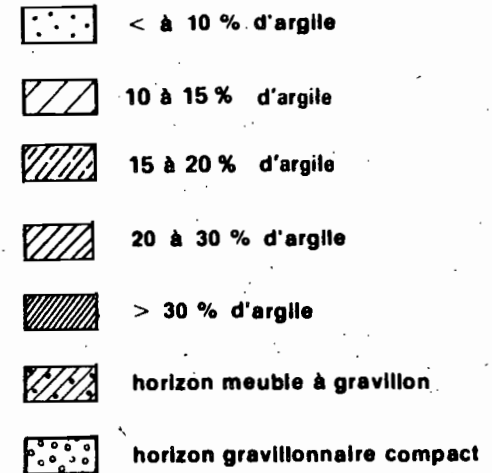
### GRAMINÉES



### AUTRES ESPÈCES



### SOLS



### GRAMINÉES

- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1 — <i>Aristida</i>                 | 11 — <i>Echinochloa colona</i>  |
| 2 — <i>Schoenfeldia gracilis</i>    | 12 — <i>Eragrostis</i>          |
| 3 — <i>Cenchrus</i>                 | 13 — <i>Chloris</i>             |
| 4 — <i>Dactyloctenium aegyptium</i> | 14 — <i>Andropogon gayanus</i>  |
| 5 — <i>Digitaria</i>                | 15 — <i>Ctenium elegans</i>     |
| 6 — <i>Brachiaria</i>               | 16 — <i>Schizachyrium exile</i> |
| 7 — <i>Diheteropogon hagerupii</i>  | 17 — <i>Ellonurus elegans</i>   |
| 8 — <i>Panicum</i>                  | 18 — <i>Andropogon</i>          |
| 9 — <i>Pennisetum</i>               | 19 — <i>Aristida kerstingii</i> |
| 10 — <i>Aristida stipoides</i>      | 20 — <i>Loudetia togoensis</i>  |

### AUTRES ESPÈCES

- |                                     |                                 |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| B — <i>Blepharis linariifolia</i>   | H — <i>Hibiscus</i>             |
| Z — <i>Zornia glochidrata</i>       | Ca — <i>Cassia</i>              |
| Al — <i>Alysicarpus ovalifolius</i> | Bo — <i>Borreria</i>            |
| M — <i>Merremia</i>                 | L — <i>Lepidagathis anobrya</i> |
| C — <i>Commelina forskalaef</i>     |                                 |
| Tp — <i>Tephrosia purpurea</i>      |                                 |
| T — <i>Tephrosia</i>                |                                 |
| Ac — <i>Achyranthes argentea</i>    |                                 |
| Ip — <i>Ipomœa</i>                  |                                 |
| I — <i>Indigofera</i>               |                                 |



*Acacia senegal*



*Grewia bicolor*



*Guiera senegalensis*



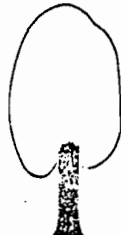
*Balaenia aegyptiaca*



*Combretum*



*Commiphora africana*



*Sclerocarya birrea*



*Dichroetichya cinerea*



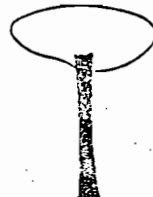
*Acacia macrobotrycha*



*Acacia stansantha*



*Terminalia siccoides*



*Lannea scida*



*Pterocarpus sribeocanus*

ANNEXE VI : Variations des contributions spécifiques dans  
les principaux groupements.

DAHRA NORD GROUPEMENT Ib DUNE

DATE	30-9-75			13-10-76			22-9-77			21-9-78		
	Espèces	P	CSP	R	P	CSP	R	P	CSP	R	P	CSP
<i>Brachiaria zantholeuca</i>	96	19,79	2	89	17,18	2	126	22,80	1	93	13,28	4
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	16	3,30	7	104	20,08	1	110	19,93	2	50	7,14	5
<i>Tephrosia purpurea</i>	74	15,26	3	80	15,44	3	6	1,09	12	98	14,00	3
<i>Aristida stipoides</i>	2	0,41	20	4	0,77	13	13	2,36	7	110	15,71	2
<i>Indigofera aspera</i>	6	1,24	13	5	0,97	11				124	17,71	1
<i>Cenchrus biflorus</i>	3	0,62	18	2	0,39	17	61	11,05	3	49	7,0	6
<i>Digitaria horizontalis</i>	58	11,96	4	72	13,90	4	59	10,69	4	23	3,28	10
<i>Cassia mimosoides</i>	17	3,50	6	17	3,28	8	3	0,54	17	31	4,43	7
<i>Gisekia pharmacoides</i>	2	0,41	20	1	0,19	20	48	8,70	5			
<i>Phyllanthus pentandrus</i>	104	21,44	1	48	9,27	5	46	8,33	6	2	0,29	20
<i>Merremia pinnata</i>	12	2,47	9	21	4,05	7	13	2,36	7	6	0,85	14
<i>Merremia tridentata</i>	8	1,65	12	32	6,18	6	4	0,73	14	6	0,85	14
<i>Cenchrus prieurii</i>	6	1,23	14	1	0,19	20	7	1,27	11	30	4,29	8
<i>Monsonia senegalensis</i>	14	2,89	8	6	1,16	10	3	0,54	17	8	1,14	12
<i>Lineum viscosum</i>							11	1,99	9			
<i>Schoenfeldia gracilis</i>	6	1,23	14	5	0,97	11	5	0,91	13	7	1,00	13
<i>Aristida murabilis</i>	1	0,21	22	3	0,58	14	2	0,36	22	29	4,14	9
<i>Eragrostis Tremula</i>	11	2,27	10	12	2,32	9	4	0,73	14	10	1,42	11
<i>Ipomoea pes-tigridis</i>	4	0,82	17	1	0,19	20	3	0,54	17	3	0,43	17
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	11	2,27	10	3	0,58	14	1	0,18	23	1	0,14	23
<i>Ceratothera sesamoides</i>	1	0,21	22	1	0,19	20	3	0,54	17			
<i>Lineum diffusum</i>	1	0,21	22	1	0,19	20	3	0,54	17			
<i>Corchorus tridens</i>	5	1,03	16	2	0,39	17				1	0,14	23
<i>Commelina forskalaei</i>							1	0,18	23	1	0,14	23
<i>Fimbristylis hispida</i>	3	0,62	18				10	1,82	10			
<i>Dipcadi longifolium</i>												
<i>Zornia glochidiata</i>	21	4,32	5	2	0,39	17				2	0,29	20
<i>Fernisetum violaceum</i>							1	0,18	23	2	0,29	20
<i>Trichoneura mollis</i>							1	0,18	23	6	0,85	14
<i>Borreria stachydea</i>	1	0,21	22	+1	0,19	20				1	0,14	23
<i>Kohautia senegalensis</i>				+3	0,58	14	+1	0,18	23			
<i>Crotalaria podocarpa</i>	1	+0,21	22									
<i>Chloris prieurii</i>	1	+0,21	22							3	0,43	17
<i>Indigofera pilosa</i>				+1	0,19	20						
<i>Tribulus terrestris</i>										1	0,14	23
<i>Aristida sieberana</i>										3	0,43	17
<i>Citrullus colocynthis</i>							4	0,73	14			
<i>Mollugo Cerviana</i>							1	0,18	23			
Nombre de lignes	2			2			3			3		
Nombre de Présences	485			518			550			700		
Précision en %	+ 3,7			+ 3,5			+ 3,6			+ 2,9		
Graminées	41,23 %			56,38 %			70,46 %			59,27 %		
Légumineuses	26,80 %			20,85 %			1,81 %			36,57 %		
Diverses	31,97 %			22,77 %			27,73 %			4,16 %		

P = Présences

CSP = Contribution spécifique présence

R = Rang

DAHRA NORD GROUPEMENT II<sub>b</sub> BAS DE PENTES

DATE	29-9-1975			23-9-1977			21-9-78		
Espèces	P	CSP	V	P	CSP	V	P	CSP	V
<i>Schoenfeldia gracilis</i>	191	25,92	1	88	13,19	2	248	29,35	1
<i>Brachiaria zantholeuca</i>	136	18,45	2	216	32,38	1	174	20,59	2
<i>Lernia glochidiata</i>	116	15,74	3	82	12,29	3	139	16,45	3
<i>Digitaria horizontalis</i>	23	3,12	9	69	10,34	4	35	4,14	7
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	26	3,53	8	19	2,85	7	66	7,81	5
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	75	10,18	4	11	1,65	10	1	0,12	17
<i>Cenchrus prieurii</i>	4	0,54	17	6	0,90	15	38	4,5	6
<i>Cenchrus biflorus</i>	9	1,22	12	32	4,80	5	11	1,30	11
<i>Chloris prieurii</i>	5	0,68	15	4	0,60	18	31	3,67	8
<i>Aristida mutabilis</i>	3	0,40	19	6	0,90	15	42	4,97	5
<i>Merremia pinata</i>	28	3,80	7	15	2,25	9			
<i>Monsonia senegalensis</i>	14	1,90	10	10	1,50	11	18	2,13	9
<i>Tephrosia platycarpa</i>	32	4,34	5	1	0,15	25	7	0,83	12
<i>Corchorus tridens</i>	30	4,07	6	3	0,45	20	6	0,71	13
<i>Phyllanthus pentanarius</i>	5	0,68	15	24	3,56	6	2	0,24	16
<i>Aristida stipoides</i>	2	0,27	20	10	1,5	11	14	1,66	10
<i>Cassia mimosoides</i>	13	1,8	11	9	1,35	13	2	0,24	16
<i>Gisekia pharaceoides</i>	1	0,14	22	18	2,70	8			
<i>Ipomoea pes-tigridis</i>	6	0,81	14	9	1,35	13	1	0,12	17
<i>Eragrostis tremula</i>	7	0,95	13	8	1,2	14	3	0,35	14
<i>Merremia tridentata</i>	4	0,54	17	3	0,45	20	1	0,12	19
<i>Ceratothera sesamoides</i>	1	0,14	22	4	0,60	18	2	0,24	16
<i>Indigofera aspera</i>	1	0,14	22	3	0,45	20	1	0,12	17
<i>Commelina forskalaei</i>							3	0,35	14
<i>Tribulus terrestris</i>				3	0,45	20			
<i>Fimbristylis hispida</i>	1	0,14	22	5	0,75	17			
<i>Limeum pterocarpum</i>				2	0,30	24			
<i>Citrullus colocynthis</i>	1	0,14	22	2	0,30	24			
<i>Trichoneura mollis</i>	1	0,14	22	1	0,15	25			
<i>Ipomoea vagans</i>									
<i>Crotalaria perrotetii</i>	2	0,27	20						
<i>Jacquemontia tannifolia</i>				1	0,15	25			
<i>Limeum viscosum</i>				1	0,15	25			
<i>Dipcadi longifolium</i>				1	0,15	25			
<i>Cucumis melo var. agrestis</i>				1	0,15	25			
Nombre de lignes	3			3			4		
Nombre de Présences	737			667			845		
Précision en %	± 3,2			± 3,6			± 3,1		
Graminées	55,22 %			68,80 %			78,34 %		
Légumineuses	32,47 %			14,54 %			17,52 %		
Diverses	12,31 %			16,66 %			4,14 %		

DAHRA SUD GROUPEMENT I<sub>c</sub> REPLATS

DATE	28-9-75						19-10-77			20-9-78		
Espèces	P	CSP	V	P	CSP	V	P	CSP	V	P	CSP	V
<i>Zornia glochidiata</i>	287	40,65	1				253	32,23	1	265	58,30	1
<i>Digitaria horizontalis</i>	37	5,24	6				201	25,60	2	29	6,39	3
<i>Eragrostis tremula</i>	126	17,85	2				83	10,57	3	28	6,17	4
<i>Schoenfeldia gracilis</i>	115	16,29	3				35	4,46	6	36	7,93	2
<i>Brachiaria xantholeuca</i>	42	5,95	4				66	8,40	5	18	3,96	7
<i>Dactyloctenium aegyptium</i>	38	5,38	5				68	8,66	4	24	5,29	6
<i>Chloris prieurii</i>	17	2,40	7				8	1,02	12	25	5,51	5
<i>Brachiaria distichophylla</i>	10	1,42	8				9	1,15	9	8	1,76	8
<i>Aristida mutabilis</i>	3	0,42	11				15	1,91	7	8	1,76	8
<i>Fimbristylis hispidula</i>	2	0,28	15				9	1,15	9			
<i>Commelina forskalaei</i>	5	0,71	10				14	1,78	8	7	1,54	10
<i>Alysicarpus ovalifolius</i>	7	0,99	9				9	1,15	9			
<i>Merremia pinnata</i>	1	0,14	18				1	0,13	16			
<i>Gisekia pharnacoides</i>	3	0,42	11				3	0,38	13			
<i>Portulaca foliosa</i>	1	0,14	18							3	0,66	11
<i>Digitaria gayana</i>	3	0,42	11				1	0,13	16			
<i>Dipcadi longifolium</i>										1	0,22	13
<i>Eragrostis pilosa</i>	2	0,28	15							2	0,44	12
<i>Cassia mimosaoides</i>	3	0,42	11				1	0,13	16			
<i>Bulbostylis barbata</i>							2	0,25	15			
<i>Ceratothera sesamoides</i>							3	0,38	13			
<i>Aristida stipoides</i>							1	0,13	16			
<i>Indigofera pilosa</i>	1	0,14	18				1	0,13	16			
<i>Elionurus elegans</i>	2	0,28	15									
<i>Phyllanthus pentandrus</i>							2	0,25	15			
<i>Impomoea pestigridis</i>	1	0,14	18									
Nombre de lignes	3						3			3		
Nombre de Présences	706						785			454		
Précision en %	± 3,7						± 3,3			± 4,6		
Graminées	55,93 %						62,03 %			39,21 %		
Légumineuses	42,20 %						33,64 %			58,30 %		
Diverses	1,87 %						4,33 %			2,49 %		

ANNEXE VII : VALEURS DE L'ETP DECADAIRE MESUREES OU CALCULEES

ETP décaidaire DAHRA CRZ en mm.jour<sup>-1</sup>

E T P Bac*						E T P Penman							
	1975	1976	1977	1978	moy.		1975	1976	1977	1978	moy.		
J	1		5,04	4,81	4,43	4,8	J	1		3,9	3,7	5,0	4,2
	2		5,03	7,48	4,40	5,6		2		3,6	4,6	4,5	4,2
	3		4,03	6,10	5,82	5,3		3		3,7	4,8	5,2	4,6
F	1		5,17	6,73	6,38	6,1	F	1		4,5	5,2	5,1	4,9
	2		5,16	8,20	5,83	6,4		2		4,7	5,0	5,4	5,0
	3		6,67	7,34	9,03	7,7		3		5,2	4,0	4,6	4,6
M	1		6,89	9,72	5,95	7,5	M	1		5,8	5,8	6,9	6,2
	2		6,49	10,83	6,11	7,8		2		5,2	4,9	7,0	5,7
	3		9,10	8,51	5,81	7,8		3		6,8	6,6	6,7	6,7
A	1		8,65	9,26	7,32	8,4	A	1		6,8	6,5	6,8	6,7
	2		9,00	7,02	8,27	8,1		2		7,1	6,7	7,4	7,0
	3		9,07	11,20	8,55	9,6		3		7,6	7,3	8,1	7,7
M	1		9,64	10,44	5,88	8,7	M	1		6,9	6,8	6,9	6,9
	2		9,72	-	8,94	9,3		2		7,4	6,3	8,3	7,3
	3		9,33	-	8,51	8,2		3		7,3	7,0	7,0	7,1
J	1		9,10	7,19	8,02	8,1	J	1		7,1	7,4	6,0	6,8
	2		7,90	7,16	6,97	7,3		2		6,9	7,2	6,7	6,9
	3		7,98	7,16	6,43	7,2		3		6,9	7,4	7,2	7,2
J <sup>t</sup>	1		7,72	6,40	6,07	6,7	J <sup>t</sup>	1		7,0	6,9	6,0	6,6
	2		6,29	7,66	4,78	6,2		2		6,0	6,2	5,9	6,9
	3		6,96	5,68	3,77	5,5		3		6,1	6,5	6,1	7,2
A <sup>t</sup>	1		7,03	7,16	3,69	6,0	A <sup>t</sup>	1		5,8	6,9	5,4	6,6
	2		5,77	6,06	4,74	5,5		2		5,2	5,8	5,7	6,0
	3		3,35	5,34	5,52	4,7		3		5,3	6,9	6,8	6,2
S	1	3,56	4,03	4,49	6,19	4,6	S	1	4,7	5,3	5,3	5,7	6,0
	2	3,95	3,70	3,40	5,51	4,1		2	5,1	5,0	4,3	5,3	5,6
	3	4,60	3,03	4,22	5,33	4,3		3	5,0	4,1	5,8	5,4	6,3
O	1	4,87	4,25	4,11	9,63	5,7	O	1	6,2	4,8	5,3	5,8	5,3
	2	4,51	6,16	4,86	8,29	6,0		2	4,8	5,3	6,0	5,0	4,9
	3	5,41	6,06	5,88	8,63	6,5		3	5,1	5,1	6,1	5,6	5,1
N	1	5,26	5,55	8,64	12,14	6,5	N	1	4,4	4,7	4,1	4,8	5,5
	2	4,39	6,24	6,86	13,47	5,8		2	4,1	,3	4,8	4,6	5,3
	3	5,15	6,06	2,96	6,08	5,1		3	3,9	4,4	4,6	4,2	5,5
D	1	5,77	5,40	6,07	3,77	5,3	D	1	3,9	3,9	3,9	3,6	4,5
	2	5,44	4,22	7,94	4,34	5,6		2	3,9	3,1	3,6	4,3	4,5
	3	5,37	3,89	5,95	3,60	4,7		3	3,6	3,5	4,7	4,5	4,3

\* Calculée selon la relation de RIOU (1975)

E T P décadaire MBIDI en mm.jour<sup>-1</sup>

E T P Bac						E T P Penman					
	1975	1976	1977	1978	moy.		1975	1976	1977	1978	
J	1	8,2	6,5	4,6	6,4	J	1				4,8
	2	9,4	5,7	4,2	6,4		2				4,6
	3	9,1	5,1	5,6	6,6		3				8,7
F	1	10,7	5,8	8,7	8,4	F	1				4,7
	2	11,1	5,5	6,7	7,8		2				5,0
	3	13,2	4,5	6,1	7,9		3				4,3
M	1	13,8	7,0	12,0	10,9	M	1				6,1
	2	10,9	6,8	11,4	9,7		2				6,2
	3	11,1	7,2	13,8	10,7		3				6,8
A	1	14,8	8,1	-	11,5	A	1				7,1
	2	13,3	8,1	-	10,7		2				7,7
	3	13,8	8,2	-	11,0		3				7,9
M	1	12,7	8,4	12,3	11,1	M	1				7,3
	2	10,5	9,6	13,3	11,1		2				7,0
	3	11,1	9,5	12,4	11,0		3				8,2
J	1	9,8	8,0	7,1	8,3	J	1				7,4
	2	8,1	8,4	5,2	7,2		2				6,6
	3	7,6	8,0	6,8	7,5		3				6,8
J <sup>t</sup>	1	-	7,3	5,3	6,3	J <sup>t</sup>	1				6,7
	2	-	7,3	7,9	7,6		2				6,0
	3	5,8	6,3	7,5	6,5		3				7,3
A <sup>t</sup>	1	5,6	5,1	5,0	4,7	A	1				6,0
	2	6,3	5,2	5,1	5,9		2				6,9
	3	5,2	5,3	5,4	6,8		3				7,3
S	1	5,6	6,4	6,0	4,4	S	1				5,8
	2	5,7	7,7	6,2	6,3		2				5,2
	3	5,8	5,1	5,0	5,4		3				5,0
O	1	6,3	4,7	7,9	5,3	O	1				5,3
	2	-	5,6	8,1	7,1		2				4,7
	3	7,9	5,8	6,8	6,2		3				5,1
N	1	7,6	6,2	5,8	7,2	N	1				4,1
	2	6,8	5,1	6,2	6,4		2				4,0
	3	6,8	5,2	6,4	6,7		3				3,7
D	1	6,7	6,0	6,0	4,1	D	1				3,3
	2	7,5	5,3	5,7	6,1		2				3,4
	3	9,9	7,9	6,7	4,7		3				4,0

ANNEXE VIII : CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS.

FETE OLE

Localisation	Profondeur en cm.	d.a.	Porosité totale en %	Humidité volumique en %			Stock d'eau en mm		Réserve utilisable en mm
				pF=4,2	pF=2,5	C.R.*	pF=4,2	C.R.*	
Dune	0 - 10	1,45	46,3	1,7	5,1	10,3	1,7	10,3	8,6
	10 - 30	1,61	40,4	3,2	7,1	13,0	6,4	26,1	19,7
	30 - 50	1,61	40,4	4,0	8,2	14,5	8,1	29,0	20,9
	50 - 70	1,61	40,4	4,2	8,5	14,7	8,4	29,3	20,9
	70 - 100	1,61	40,4	4,0	8,5	14,3	12,1	43,0	30,9
	100 - 150	1,60	40,7	4,5	9,6	14,9	22,4	74,4	52,0
	150 - 200	1,60	40,7	4,5	9,3	14,7	22,4	72,8	50,4
	200 - 250	1,60	40,7	4,6	9,1	14,5	23,2	72,0	48,8
	250 - 300	1,60	40,7	5,0	9,6	14,9	24,8	74,4	49,6
Pente	0 - 10	1,55	43,0	2,2	6,7	11,5	2,2	11,5	9,3
	10 - 30	1,64	39,3	3,0	7,4	14,1	6,0	27,9	22,0
	30 - 50	1,60	40,7	4,0	8,8	15,2	8,0	30,4	22,4
	50 - 70	1,60	40,7	4,8	10,9	14,5	9,6	33,0	23,4
	70 - 100	1,60	40,7	5,6	12,3	17,0	16,8	50,9	32,3
	100 - 150	1,60	40,7	4,8	11,2	16,0	24,0	80,0	56,0
	150 - 200	1,60	40,7	4,8	8,8	14,2	24,0	71,2	47,2
	200 - 250	1,60	40,7	4,8	9,6	14,4	24,0	72,0	48,0
	250 - 300	1,60	40,7	4,8	9,6	14,4	24,0	72,0	48,0
Bas de pente	0 - 10	1,59	41,1	2,4	7,2	12,6	2,4	12,6	10,2
	10 - 30	1,67	38,1	3,3	8,9	14,9	6,7	29,7	23,0
	30 - 50	1,80	33,4	4,5	11,9	17,6	9,0	35,3	26,3
	50 - 70	1,80	33,4	5,0	11,7	18,7	10,1	37,4	27,3
	70 - 100	1,70	37,0	6,8	15,3	19,7	20,4	59,2	38,8
	100 - 150	1,70	37,0	7,5	16,2	20,4	37,4	102,0	64,6
	150 - 200	1,70	37,0	7,7	15,5	19,7	38,3	98,6	60,3
	200 - 250	1,70	37,0	8,7	15,8	20,0	43,4	100,3	56,9
	250 - 300	1,70	37,0	7,8	12,8	17,5	39,1	87,6	48,5
Replat	0 - 10	1,48	45,2	1,9	5,9	10,8	1,9	10,8	8,9
	10 - 30	1,65	38,9	2,6	6,6	12,9	5,3	25,7	20,4
	30 - 50	1,61	40,4	3,7	7,9	13,8	7,4	27,7	20,3
	50 - 70	1,65	38,9	4,1	8,3	14,7	8,3	29,4	21,1
	70 - 100	1,58	41,5	4,4	7,7	14,4	13,3	42,7	29,4
Mare temporaire	0 - 10	1,68	37,8	8,1	18,3		8,1		
	10 - 30	1,93	28,5	9,3	23,0		18,6		
	30 - 50	1,90	29,6	9,3	23,4		18,6		
	50 - 100	1,93	28,5	9,7	26,4		48,5		

C.R. : Capacité de rétention.

C.R.\* : Valeurs calculées de la capacité de rétention.



CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS :

DAHRA

Localisation	Profondeur en cm.	d.a.	Porosité totale en %	Humidité volumique en %			Stock d'eau en mm		Réserve utilisable en mm
				pF=4,2	pF=2,5	C.R.	pF=4,2	C.R.	
<b>DAHRA NORD</b>									
Dune	0 - 10	1,63	39,6	2,1	3,6	8,6	2,1	8,6	6,5
	10 - 30	1,63	39,6	1,6	3,7	8,5	3,3	17,0	13,7
	30 - 50	1,63	39,6	1,6	4,1	9,3	3,3	18,6	15,3
	50 - 70	1,63	39,6	2,0	4,6	9,3	3,9	18,6	14,7
	70 - 100	1,58	41,5	1,9	4,7	7,9	5,7	13,7	18,0
	100 - 150	1,58	41,5	1,9		7,7	9,5	38,7	29,2
	150 - 200	1,58	41,5	2,0		9,6	10,3	48,2	37,9
	200 - 250	1,58	41,5	2,0		8,0	10,3	40,3	30,0
	250 - 300	1,58	41,5	2,0		7,6	10,3	37,9	27,6
Pente	0 - 10	1,58	41,5	1,9	3,8	13,0	1,9	13,0	11,2
	10 - 30	1,60	40,7	2,4	3,4	12,0	4,8	24,1	19,3
	30 - 50	1,60	40,7	2,6	3,0	12,2	5,1	24,3	19,2
	50 - 70	1,60	40,7	2,9	3,5	12,0	5,8	23,9	18,1
	70 - 100	1,60	40,7	2,9	3,7	11,2	8,6	34,7	26,1
	100 - 150	1,60	40,7	2,9		12,2	14,4	60,4	46,0
	150 - 200	1,60	40,7	2,4		10,7	12,0	53,8	41,8
	200 - 250	1,60	40,7	2,4		10,7	12,0	53,8	41,8
	250 - 300	1,60	40,7	2,4		10,7	12,0	53,8	41,8
Bas-fond	0 - 10	1,60	0,7	2,1	4,6	13,3	2,1	13,3	11,2
	10 - 30	1,60	40,7	1,6	4,3	10,9	3,2	21,9	18,7
	30 - 50	1,60	40,7	1,6	4,8	11,2	3,2	22,3	19,1
	50 - 70	1,60	40,7	1,8	5,1	10,7	3,5	21,4	17,9
	70 - 100	1,60	40,7	1,9	5,6	11,0	5,8	33,0	27,3
	100 - 150	1,60	40,7	1,3		9,3	6,4	46,2	39,8
	150 - 200	1,60	40,7	1,4		9,3	7,2	46,5	39,3
	200 - 250	1,60	40,7	1,4		9,3	7,2	46,5	39,3
	250 - 300	1,60	40,7	1,4		9,3	7,2	46,5	39,3
<b>DAHRA-SUD</b>									
Replat	0 - 10	1,55	42,6	1,9	5,1	14,3	1,9	14,3	12,4
	10 - 30	1,61	40,4	3,2	6,4	14,3	6,4	28,6	22,2
	30 - 50	1,63	39,6	5,2	9,3	15,0	10,4	30,6	20,2
	50 - 70	1,57	41,9	6,3	12,0	15,2	12,6	30,4	17,8
	70 - 100	1,60	40,7	6,6	12,2	15,4	19,7	46,1	26,4
	100 - 150	1,60	40,7	6,7	12,6	15,5	33,6	77,6	44,0
	150 - 200	1,60	40,7	6,4	12,6	17,1	32,0	85,6	53,6
	200 - 250	1,60	40,7	8,0	15,8	18,7	40,0	93,6	53,6
	250 - 300	1,60	40,7	8,0	15,0	18,6	40,0	92,8	52,8

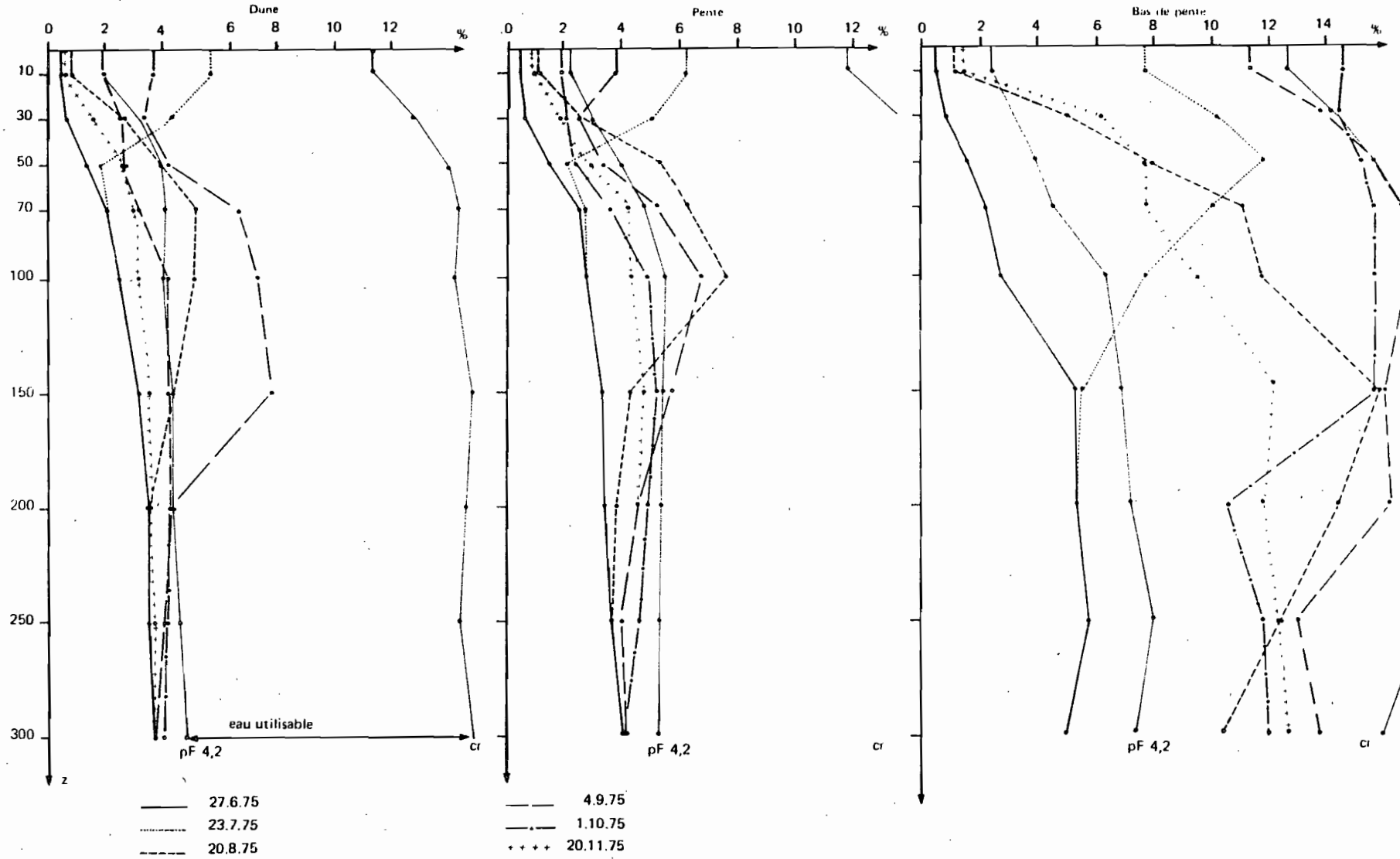
CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS :

DOLI NORD

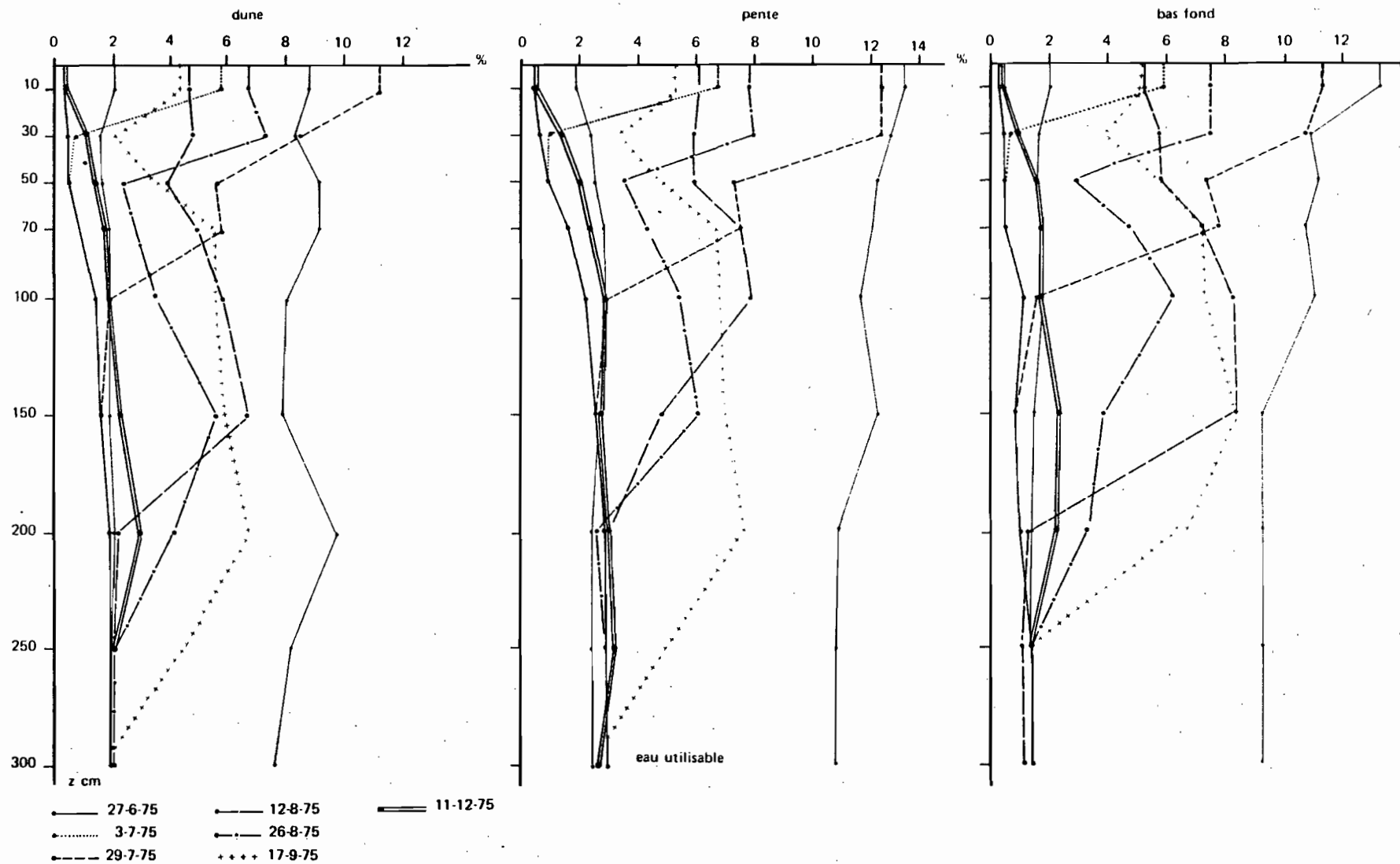
Localisation	Profondeur	d.a.	Porosité totale en %	Humidité volumique en %			Stock d'eau en mm		Réserve utilisable en mm
				pF=4,2	pF=2,5	C.R. <sup>z</sup>	pF=4,2	C.R. <sup>z</sup>	
<b>DOLI NORD</b>									
Dune	0 - 10	1,58	41,5	2,2	5,7	16,4	2,2	16,4	14,2
	10 - 30	1,59	41,1	3,0	6,7	14,5	6,0	28,9	22,9
	30 - 50	1,59	41,1	3,0	7,8	15,1	6,0	30,2	24,1
	50 - 70	1,60	40,7	4,0	7,8	15,7	8,0	31,4	23,4
	70 - 100	1,60	40,7	4,2	7,5	14,2	12,5	42,7	30,2
	100 - 150	1,60	40,7	4,3	7,7	13,8	21,6	68,8	47,2
	150 - 200	1,60	40,7	4,5	7,5	13,4	22,4	67,2	44,8
	200 - 250	1,60	40,7	4,5	7,6	13,4	22,4	67,2	44,8
	250 - 300	1,60	40,7	4,5		13,4	22,4	67,2	44,8
Pente	0 - 10	1,55	42,6	2,0	5,9	13,8	2,0	13,8	11,8
	10 - 30	1,57	41,9	2,7	6,4	12,6	5,3	25,1	19,8
	30 - 50	1,57	41,9	4,2	11,6	17,7	8,5	35,5	27,0
	50 - 70	1,61	40,4	4,7	9,3	15,0	9,3	32,8	23,5
	70 - 100	1,60	40,7	5,0	8,3	15,0	14,9	45,1	30,2
	100 - 150	1,60	40,7	5,4		15,0	27,2	75,2	48,0
	150 - 200	1,60	40,7	5,4		15,0	27,2	75,2	48,0
	200 - 250	1,60	40,7	5,6		15,0	28,0	75,2	47,2
	250 - 300	1,60	40,7	5,6		15,0	28,0	75,2	47,2
Bas-fond	0 - 10	1,55	42,6	2,9	9,8	15,3	2,9	15,3	12,4
	10 - 30	1,60	40,7	3,4	12,5	17,8	6,7	35,5	28,8
	30 - 50	1,67	38,1	4,8	15,0	21,4	9,7	42,8	34,1
	50 - 70	1,65	39,9	5,9	15,4	21,8	11,9	53,6	31,7
	70 - 100	1,70	37,0	4,4	13,4	18,7	13,3	133,5	42,8
	100 - 150	1,70	37,0	11,4	19,2	26,7	57,0	135,1	76,5
	150 - 200	1,70	37,0	12,4	19,9	27,0	62,0	136,0	73,1
	200 - 250	1,70	37,0	12,8		27,2	63,8	136,0	72,2
	250 - 300	1,70	37,0	12,8		27,2	63,8		72,2

# Annexe IX : Quelques profils hydriques montrant l'évolution annuelle

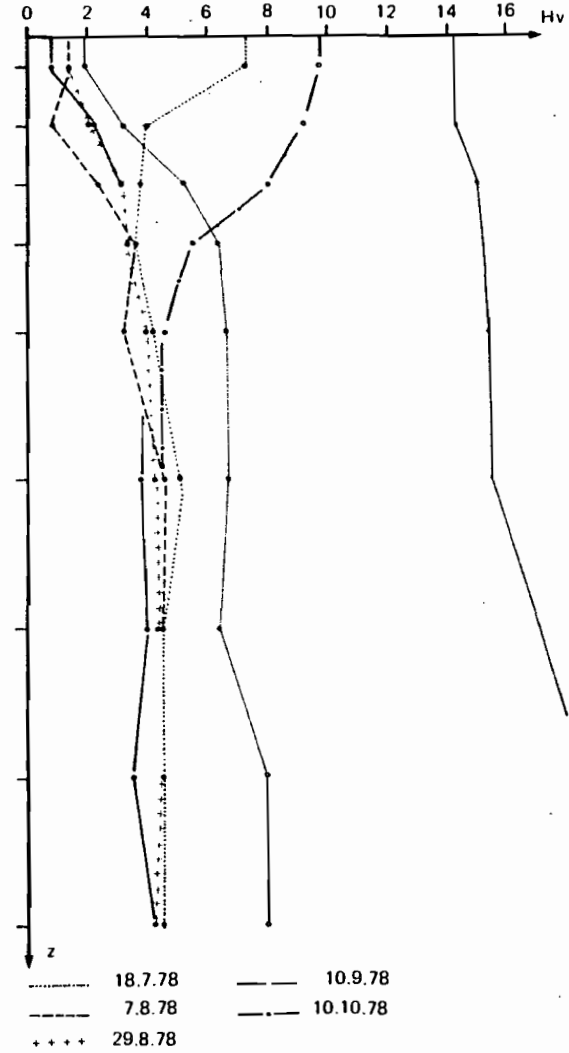
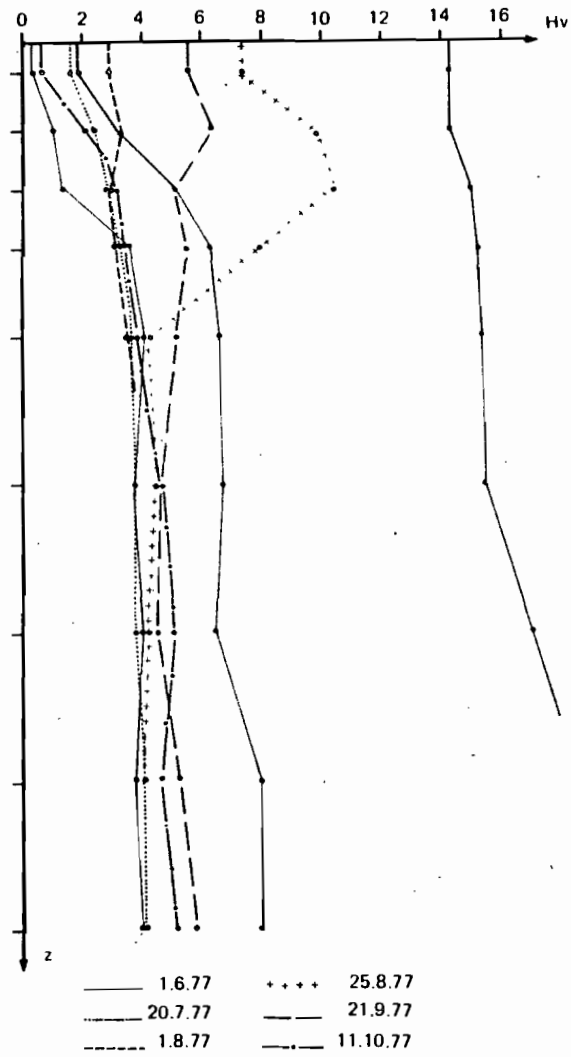
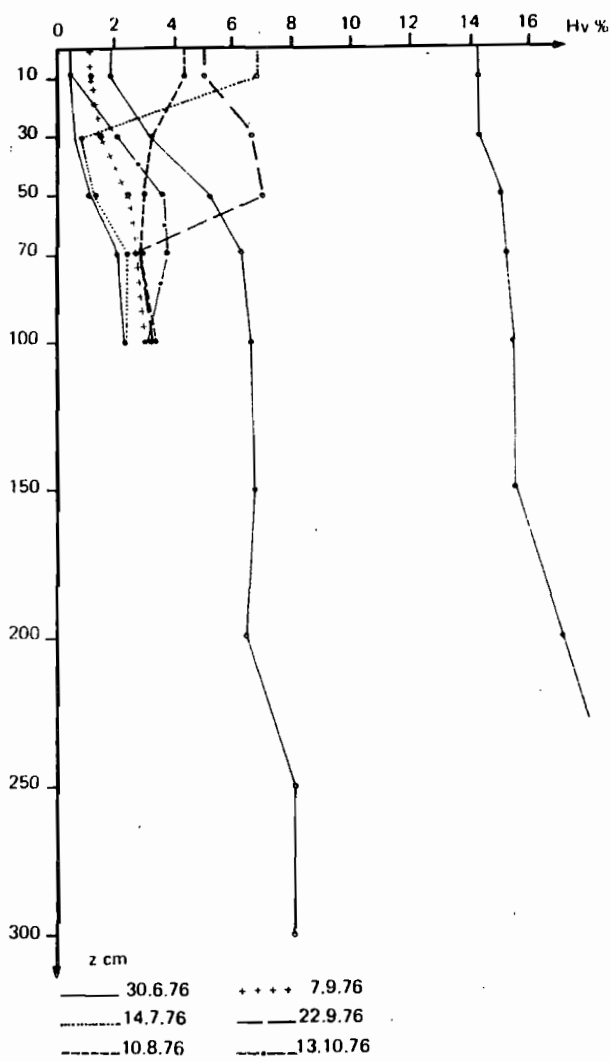
A Evolution des profils hydriques FETE-OLE 1975



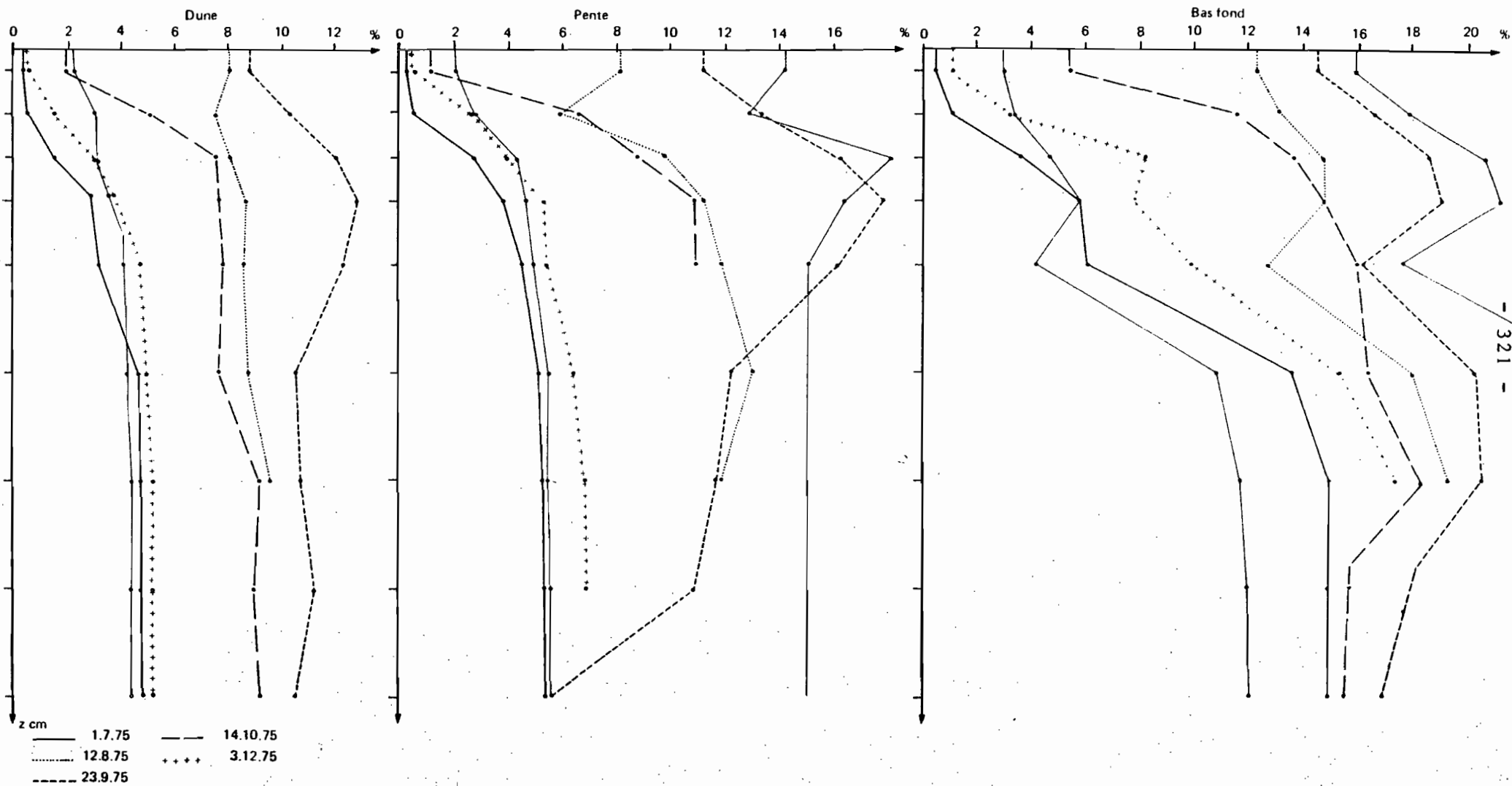
B Évolution des profils hydriques DAHRA NORD 1975



C Evolution des profils hydriques DAHRA SUD



D Evolution des profils hydriques DOLI NORD 1975



- 321 -

ANNEXE X : Fiches pluviométriques des stations

STATION : FETE-OLE

Coordonnées : 15°06 L.W., 16°14 L.N.

ANNEE : 1975

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1													1
2										5,0			2
3							14,8		6,2				3
4													4
5													5
6													6
7							30,9						7
8							1,8		9,0				8
9								5,6					9
10								0,2					10
Décade							47,5	5,8	15,2	5,0	0	0	Décade
11													11
12										10,6			12
13							5,4						13
14									6,0				14
15							20,1						15
16													16
17									21,6				17
18													18
19							8,8						19
20								17,0					20
Décade							38,3	17,0	27,6	10,6	0	0	Décade
21								10,0					21
22								4,0					22
23													23
24							32,2						24
25													25
26									12,0				26
27													27
28							1,0	35,0					28
29													29
30							14,4						30
31							35,6						31
Décade							83,2	49,0	12,0	0	0	0	Décade
Totaux							169,0	71,8	54,8	15,6	0	0	Totaux
Nombre de jours							10	6	5	2	0	0	Nombre de jours

Total : 311,2 mm

Nombre de jours : 23 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : FETE-OLE

ANNEE : 1976

COORDONNEES : 15°06 L.N., 16°14 1. N.

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1													1
2									30,0				2
3								28,0	2,0	15,0			3
4													4
5						7,0							5
6													6
7													7
8								20,0					8
9													9
10													10
Décade		0	0	0	0	7,0	0	48,0	32,0	15,0	0	0	Décade
11													11
12													12
13		3,4											13
14								37,0	4,0				14
15				0		15,0							15
16								27,0					16
17								13,0					17
18							15,0						18
19												6,0	19
20													20
Décade		3,4	0	0	0	15,0	15,0	77,0	4,0	0	0	6,0	Décade
21								55,0					21
22													22
23													23
24									69,0				24
25													25
26													26
27													27
28													28
29													29
30													30
31													31
Décade		0	0	0	0	0	0	55,0	69,0	0	0	0	Décade
Totaux		3,4	0	0	0	22,0	15,0	180,0	105,0	15,0	0	6,0	Totaux
Nombre de jours		1	0	0	0	2	1	6	6	1	0	1	Nombre de jours

Total : 346,4 mm

Nombre de jours : 18 j.



III TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : FETE-OLE

ANNEE : 1977

COORDONNEES : 15°06 L.W., 16°14 L.N.

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1													1
2						12,5			8,0				2
3									7,0				3
4													4
5													5
6							0,2						6
7													7
8													8
9													9
10													10
Décade						12,5	0,2	0	15,0				Décade
11									2,0				11
12													12
13								10,9	14,0				13
14													14
15								22,0					15
16													16
17								3,1					17
18								3,5	17,0				18
19													19
20													20
Décade						0	0	39,5	33,0				Décade
21													21
22													22
23													23
24													24
25													25
26								26,0					26
27													27
28													28
29													29
30													30
31													31
Décade						0	0	26,0	0				Décade
Totaux						12,5	0,2	65,5	48,0				Totaux
Nombre de jours						1	1	5	5				Nombre de jours

Total : 126,2 mm

Nombre de jours : 12 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : FETE-OLE

ANNEE : 1978

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1												2,0	1
2									34,0				2
3								93,5					3
4									4,0				4
5							4,0	20,0					5
6													6
7							13,0	33,5					7
8													8
9													9
10													10
Décade							17,0	147,0	38,0			2,0	Décade
11						20,0							11
12									10,0				12
13									9,0				13
14						15,0		5,0					14
15									24,0				15
16													16
17													17
18													18
19									3,5				19
20													20
Décade						35,0	0	5,0	46,5			0	Décade
21													21
22													22
23										25,0			23
24									19,4				24
25													25
26								3,0					26
27													27
28									2,2				28
29													29
30													30
31													31
Décade						0	0	3,0	21,6	25,0	0	0	Décade
Totaux						35,0	17,0	155,0	106,1	25,0	0	2,0	Totaux
Nombre de jours						2	2	2	8	1		1	Nombre de jours

Total : 340,1 mm

Nombres de jours : 19 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : DAHRA NORD

ANNEE : 1975

COORDONNEES : 15° 27 L.W., 15° 20 L.N.

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1													1
2													2
3							6,5		22,3				3
4													4
5													5
6													6
7							9,5						7
8													8
9								24,2					9
10								1,2					10
Décade							16,0	25,4	22,3	0			Décade
11													11
12													12
13							29,6		6,8				13
14													14
15							35,5						15
16									4,0				16
17									14,3				17
18								5,0		6,5			18
19							8,6						19
20													20
Décade							73,7	5,0	25,1	6,5			Décade
21													21
22													22
23						4,0		17,1					23
24								18,2					24
25							6,1		22,0				25
26							13,7		59,3				26
27													27
28													28
29							33,5	80,4					29
30							56,7						30
31								2,4					31
Décade						0	110,0	118,1	81,3	0			Décade
Totaux						4,0	199,7	148,5	128,7	6,5			Totaux
Nombre de jours						1	9	7	6	1			Nombre de jours

Total : 487,4 mm  
 Nombre de jours : 24 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : DAHRA NORD

ANNEE : 1976

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1											15,5		1
2									1,2	34,8	17,5		2
3													3
4								2,7					4
5										2,3			5
6													6
7													7
8								10,6	72,0				8
9													9
10									6,0				10
Décade						0	0	13,3	79,2	37,1	28,0	0	Décade
11													11
12							0,1						12
13													13
14							7,5	33,0					14
15						6,0		50,8	21,7				15
16									29,5				16
17							23,6						17
18			2,0									8,0	18
19													19
20								1,5					20
Décade			2,0			6,0	31,2	85,3	51,2	0	0	8,0	Décade
21			1,7					5,8					21
22													22
23								2,6					23
24									3,0				24
25								11,7	7,1				25
26										3,2			26
27													27
28							16,4		1,8				28
29													29
30	1,0												30
31													31
Décade	1,0		1,7			0	16,4	20,1	11,9	3,2	0	0	Décade
Totaux	1,0		3,7			6,0	47,6	118,7	142,3	40,3	28,0	8,0	Totaux
Nombre de jours	1		2			1	4	8	8	3	2	1	Nombre de jours

Total : 395,6 mm  
 Nombre de jours : 30 j.

STATION : DAHRA NORD

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

ANNEE : 1977

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1										7,5			1
2						2,5	2,9						2
3													3
4									30,1				4
5									40,1				5
6									9,1				6
7							1,7						7
8							11,3						8
9									X				9
10									X				10
Décade						2,5	15,9	0	79,3	7,5			Décade
11									1,0				11
12													12
13								8,4	5,1				13
14								31,2					14
15						7,7							15
16								47,2					16
17								3,7					17
18								15,6	20,2				18
19													19
20								15,5					20
Décade						7,7	0	121,6	26,3	0			Décade
21							8,4						21
22									2,0				22
23				1,5									23
24													24
25													25
26													26
27							26,1		6,6				27
28													28
29													29
30													30
31													31
Décade				1,5	0	0	34,5	0	8,6	0			Décade
Totaux				1,5	0	10,2	50,4	121,6	114,2	7,5			Totaux
Nombre de jours				1	0	2	5	6	8	1			Nombre de jours

Total : 305,4 mm

Nombre de jours : 23 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : DAHRA NORD

ANNEE : 1978

COORDONNEES :

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT.	OCT.	NOV	DEC	
1												13,2	1
2									37,0				2
3													3
4								4,0					4
5													5
6							5,0						6
7						1,5							7
8								3,0					8
9								3,0					9
10							22,0		13,0				10
Décade						1,5	27,0	10,0	50,0	0			Décade
11						25,0							11
12													12
13										5,0			13
14						22,0		21,0					14
15									15,0				15
16									17,0				16
17							27,0						17
18													18
19									18,0				19
20							19,0						20
Décade						47,0	46,0	21,0	50,0	5,0			Décade
21							4,0						21
22								4,0					22
23													23
24								4,0	19,0				24
25									21,0				25
26													26
27						8,0							27
28									7,0				28
29											4,3		29
30											2,6		30
31							18,0						31
Décade						8,0	22,0	8,0	47	0	6,9		Décade
Totaux						56,5	95,0	39,0	147	5,0	6,9	13,2	Totaux
Nombre de jours						4	6	6	8	1	2	1	Nombre de jours

Total : 362,6

Nombre de jours : 28 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : DAHRA SUD

ANNEE : 1976

COORDONNEES : 15° L.W, 15° 20 L.N.

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1											15,5		1
2									1,2	34,8	12,5		2
3													3
4								5,3					4
5										2,3			5
6													6
7													7
8								6,5	72,0				8
9													9
10									6,0				10
Décade								11,8	79,2	37,1	28,0	0	Décade
11													11
12							3,1						12
13													13
14							7,5	15,0					14
15						5,6		40,5	7,0				15
16													16
17							38,0		21,0				17
18												8,0	18
19			2,0										19
20			1,7					1,5					20
Décade			3,7			5,6	48,6	57,0	28,0	0	0	8,0	Décade
21								5,8					21
22													22
23								2,6					23
24									3,0				24
25								11,7	7,1				25
26													26
27										3,2			27
28							1,1						28
29									1,8				29
30	1,0												30
31													31
Décade	1,0		0			0	1,1	20,1	11,9	3,2	0	0	Décade
Totaux	1,0		3,7			5,6	49,7	88,9	119,1	40,3	28,0	8,0	Totaux
Nombre de jours	1		2			1	4	8	8	3	2	1	Nombre de jours

Total : 344,3 mm

Nombre de jours : 30 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : DAHRA SUD

ANNEE : 1977

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1										7,5			1
2						2,5	9,5						2
3													3
4									24,0				4
5									40,1				5
6									11,1				6
7							1,7						7
8							11,3						8
9													9
10													10
Décade						2,5	22,5	0	75,2	7,5			Décade
11									1,0				11
12													12
13								8,4	5,1				13
14								31,0					14
15						9,5							15
16								47,0					16
17								3,0					17
18								16,0	20,2				18
19													19
20								14,0					20
Décade						9,5	0	119,4	26,3	0			Décade
21							8,4						21
22									2,0				22
23				1,5									23
24													24
25													25
26													26
27									6,6				27
28							15,3						28
29													29
30													30
31													31
Décade				1,5	0	0	23,7	0	8,6	0			Décade
Totaux				1,5	0	12,0	46,2	119,4	110,1	7,5			Totaux
Nombre de jours				1	0	2	5	6	8	1			Nombre de jours

Total : 296,7

Nombre de jours : 23 j.



TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : DAHRA SUD

ANNEE : 1978

COORDONNEES :

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1												14,2	1
2									34,5				2
3									2,0				3
4								4,0					4
5													5
6							7,0						6
7						1,5							7
8								10,0					8
9								2,0					9
10							27,5		24,5				10
Décade						1,5	34,5	16,0	60,0	0			Décade
11						25,0							11
12													12
13										15,0			13
14						15,0		20,0					14
15									15,0				15
16									3,2				16
17							27,0		8,2				17
18													18
19									15,6				19
20							19,0						20
Décade						40,0	46,0	20,0	42,0	15,0			Décade
21							4,0						21
22								4,5					22
23										2,3			23
24									14,0				24
25									16,0				25
26													26
27							7,7						27
28									4,0				28
29											4,3		29
30								3,0			2,6		30
31							7,0						31
Décade						7,7	11,0	7,5	34,0	2,3	6,9	14,2	Décade
Totaux						49,2	91,5	43,5	136,0	17,3	6,9	14,2	Totaux
Nombre de jours						4	5	6	10	2	2	1	Nombre de jours

Total : 357,6  
 Nombre de jours : 30 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : N'DOLI

ANNEE : 1975

COORDONNEES : 15°09 L.W., 14°45 L.N.

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1									6,2				1
2									5,0				2
3							64,0		35,0				3
4													4
5													5
6							26,0		17,0	1,2			6
7													7
8								7,0					8
9													9
10								8,0					10
Décade							90,0	15,0	63,2	1,2			Décade
11													11
12													12
13							4,7		6,7				13
14							0,5		10,7				14
15							35,1	42,1	19,7				15
16													16
17									12,5				17
18										8,5			18
19							11,5						19
20							3,5	11,8					20
Décade							55,3	53,9	49,6	8,5			Décade
21								13,9					21
22										2,5			22
23								24,1					23
24								16,0	17,4				24
25								7,0	45,1				25
26							80,5						26
27													27
28							25,0						28
29								63,0					29
30							4,0						30
31								9,0					31
Décade							109,5	133,0	62,5	2,5			Décade
Totaux							254,8	201,9	175,3	12,2			Totaux
Nombre de jours							10	10	10	3			Nombre de jours

Total : 644,2 mm

Nombre de jours : 33 j.

TABLEAU PLUVIOMETRIQUE

STATION : N'DOLI

ANNEE : 1976

	JANV	FEV	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	
1										61,1			1
2													2
3								6,5					3
4										7,2			4
5													5
6													6
7									49,3				7
8								40,2					8
9									32,3				9
10								2,0					10
Décade								48,7	77,6	68,3			Décade
11							65,0						11
12													12
13													13
14						2,5	49,0	30,0					14
15								15,3					15
16									22,5				16
17								3,7	21,5				17
18							42,0						18
19							9,7						19
20							9,0						20
Décade						2,5	174,7	49,0	44,0				Décade
21								33,0					21
22									14,0				22
23								5,7	18,5				23
24										5,2			24
25									10,0				25
26													26
27							4,5						27
28					4,0	19,0	2,5		5,0				28
29													29
30							6,0						30
31													31
Décade					4,0	19,0	13,0	38,7	47,5	5,2			Décade
Totaux					4,0	21,5	187,7	136,4	169,1	73,5			Totaux
Nombre de jours					1	2	8	8	8	3			Nombre de jours

Total : 592,2 mm

Nombre de jours : 30 j.

TABLEAU Ia

FETE-OLE 1975

## Annexe XI : EVOLUTION DES RESERVES HYDRIQUES MESUREES

Site	Dune						Pente						Bas de pente					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU
29/6/75	1,4	0	14,8	0	70,0	0	1,8	0	16,1	0	71,5	0	2,2	0	17,3	0	113,0	0
4/7	4,4	1,1	14,8	0	70,0	0	5,4	1,6	16,1	0			6,8	2,1	17,3	0	113,1	0
23/7	13,9	5,8	15,9	0			16,5	8,5	19,7	0			28,7	19,6	74,6	35,2		
6/8	20,9	12,8	29,0	4,2	76,7	0	20,2	12,1	47,0	13,1	76,0	0	32,8	23,7	114,4	74,9	336,6	178,5
20/8	6,3	0	33,4	4,9	75,7	0	6,3	0	46,4	12,0	74,7	0	11,5	3,7	79,7	40,2	295,8	137,7
4/9	10,1	2,0	44,2	15,7	101,1	17,0	9,0	1,6	47,4	14,3	91,2	4,8	44,5	35,5	119,5	79,9	265,2	107,1
16/9	5,9	0	18,7	0			6,3	0	26,4	0			26,1	17,0	86,9	47,4	265,0	108,9
1/10	6,9	0	19,9	0	83,2	0	6,1	0	27,1	0	95,2	3,2	40,5	31,5	127,3	87,8	280,0	124,4
15/10	5,6	0	30,7	4,6			7,2	0,8	34,9	0,9			42,7	33,6	89,8	50,4		
20/11	3,8	0	21,3	0	76,4	0	4,9	0	27,3	0	93,9	0	14,5	6,4	61,1	25,6	260,7	98,6
21/12	3,0	0	18,0	0			3,1	0	26,6	0			13,8	5,7	63,3	23,9		

S = Réserve totale

RU = Réserve utilisable

Site	Dune						Pente						Bas de pente					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU
2/3/76	2,9	0	18,7	0	75,2	0	3,1	0	25,1	0	92,3	0	11,2	3,7	63,3	23,9	179,6	23,2
15/4	2,9	0	18,9	0			2,6	0	19,2	0			10,0	2,7	60,9	21,4		
29/5	2,7	0	18,7	0			1,8	0	17,3	0			5,0	0	57,7	18,1		
22/6	4,6	0	15,9	0	73,6	0	5,5	0	16,8	0	89,1	0	9,1	0	33,0	0	171,7	17,9
6/7	2,2	0	18,2	0			4,4	0	28,6	0			8,8	1,3	46,6	7,2		
22/7	20,6	12,4	50,4	21,9			19,3	11,2	36,8	7,5			24,7	15,6	64,6	25,2		
3/8	5,7	0	21,4	0			6,1	0	19,4	0			7,4	0	31,0	0		
18/8	27,4	19,2	80,5	52,0	145,6	60,0	25,4	17,3	88,0	53,6	230,4	134,4	45,7	36,7	124,5	87,0	321,3	163,2
30/8	11,3	3,5	59,7	11,0			8,3	1,0	83,8	49,4			15,9	6,8	91,3	51,9		
15/9	13,1	4,9	34,4	36,0			12,0	3,9	55,9	21,5			15,2	6,2	66,1	26,5		
19/9	13,7	5,5	26,0	1,4	80,0	0,8	15,9	7,8	44,2	9,9	152,7	56,0	43,1	34,0	84,7	45,3	290,7	132,6
15/10	6,2	0	20,5	0			4,6	0	22,7	0			11,3	3,0	68,6	29,1		
27/10	3,6	0	20,5	0									6,8	0	53,0	13,5		
11/11	2,4	0	21,2	0	76,0	0	2,9	0	25,0	0	131,2	35,2	4,8	0	46,7	8,3	288,2	130,1
9/12	2,2	0	20,3	0			2,8	0	28,1	0			5,0	0	35,8	0		

TABLEAU Ic

FETE-OLE 1977

EVOLUTION DES RESERVES HYDRIQUES MESUREES EN mm

Site	Dune						Pente						Bas de pente					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU
20/1/77	2,5	0	13,9	0	63,9	0	2,7	0	20,4	0	20,4	0	4,5	0	35,6	0	282,0	12,0
30/3	1,4	0	16,4	0	72,0	0	2,5	0	21,0	0	89,0	0	3,0	0	44,3	5,9	127,5	0
5/7	1,7	0	14,7	0			2,4	0	20,4	0			2,6	0	22,8	0		
19/7	1,7	0	10,3	0	64,0	0	1,6	0	15,7	0	88,0	0	1,8	0	15,5	0	89,2	0
6/8	1,6	0	9,8	0	58,0	0	1,5	0	13,2	0	77,0	0	1,8	0	13,3	0	78,0	0
17/8	14,9	6,7	14,0	0	53,5	0	18,9	10,9	20,2	0	71,0	0	40,4	31,3	53,8	22,1	69,5	0
30/8	5,0	0	17,2	0	58,4	0	13,5	5,5	27,4	1,9	76,2	0	13,4	4,7	84,2	44,7	127,5	14,4
13/9	6,1	0	15,6	0			6,3	0	33,3	0			9,6	0,5	96,1	16,5		
27/9	6,6	0	17,1	0			6,0	0	29,0	0			6,8	0	38,9	1,4		
21/10	2,3	0	16,8	0	62,4	0	3,9	0	18,3	0	79,6	0	4,3	0	28,0	0	103,7	0
9/11	2,7	0	13,8	0			2,3	0	12,1	0			2,1	0	23,3	0		
7/12	1,6	0	7,2	0	47,2	0	1,6	0	14,3	0	55,2	0	4,3	0	23,1	0	79,9	0

Site	Dune						Pente						Bas de pente					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU	S	RU
4/1/78	2,7	0	9,6	0	40,0	0	2,3	0	6,5	0	32,8	0	2,8	0	12,1	0	52,7	0
1/2	1,6	0	13,8	0			2,0	0	14,4	0			2,2	0	16,3	0		
2/3	2,2	0	8,5	0			2,0	0	7,6	0			1,8	0	11,5	0		
28/3	1,2	0	5,8	0	28,0	0	1,5	0	6,2	0	32,0	0	1,3	0	7,9	0	39,1	0
24/5	1,6	0	10,4	0	48,8	0	1,0	0	10,2	0	44,0	0	2,2	0	16,5	0	57,0	0
22/6	16,0	7,8	15,4	0	51,2	0	18,4	10,3	20,1	0	47,2	0	15,3	6,2	23,4	0,1	54,5	0
20/7	1,9	0	12,2	0	49,4	0	2,4	0	10,4	0	43,2	0	6,8	0	29,1	0	86,7	0
10/8	21,5	13,3	38,4	10,0	47,2	0	24,9	16,8	40,8	10,3	43,2	0	28,0	18,9	101,0	61,6	319,6	161,5
21/8	13,0	4,9	30,5	3,5	52,5	0	8,8	0,8	29,2	1,0	72,5	0	16,2	7,1	91,0	51,5	321,5	163,3
31/8	6,1	0	17,1	0	49,6	0	8,3	0,3	30,4	1,6	74,4	0	11,4	2,3	70,4	31,0	253,3	95,2
14/9	16,7	8,5	26,1	0			20,6	12,5	26,7	0			17,8	8,7	62,6	23,2		
19/9	12,7	9,5	19,1	0	68,8	0	23,0	14,9	24,0	0	72,8	0	42,1	33,1	109,1	62,6	244,8	86,7
12/10	3,7	0	19,0	0	64,0	0	5,7	0	19,5	0	68,0	0	9,1	0,7	41,1	2,1	113,1	0
24/10	18,7	10,5	17,6	0	66,4	0	19,1	11,0	20,5	0	63,2	0	20,5	11,4	27,2	0	77,4	0
22/11	3,6	0	16,5	0	60,0	0	3,6	0	18,2	0	64,0	0	10,8	2,7	33,3	0	79,4	0
21/12	2,1	0	12,3	0	41,6	0	2,1	0	12,7	0	44,0	0	4,8	0	25,5	0	70,5	0

Site	Dune						Pente						Bas fond					
Couche	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU
27/6	1,3	0	6,9	0	36,3	0	2,1	0	11,8	0	56,0	7,2	1,3	0	5,4	0	23,2	0
3/7	7,2	3,8	7,5	0	35,6	0	8,6	4,8	11,8	0	56,0	7,2	7,2	3,8	5,4	0	23,2	0
18/7	21,3	15,8	10,0	1,0			26,2	14,5	33,3	14,7			27,2	21,9	38,6	28,1		
29/7	29,0	23,1	28,9	16,0	36,3	0	36,9	30,2	38,8	19,3			33,2	27,9	35,2	23,7		
12/8	14,5	9,1	35,0	22,2	63,2	24,5	17,9	11,2	50,0	30,5			16,8	11,5	50,9	38,4	60,8	36,0
26/8	21,8	16,5	20,9	8,0	67,9	28,4	23,8	17,1	31,9	12,4	70,4	20,0	22,5	17,2	34,1	21,6	45,6	22,4
17/9	8,6	3,3	35,2	22,3	94,0	55,2	12,0	5,3	43,2	23,7	110,4	60,0	13,0	7,7	48,2	35,7	87,2	60,8
2/10	14,7	9,3	52,4	39,5	94,0	54,5	17,7	11,0	56,6	37,1			19,3	14,0	62,2	49,7	74,8	48,8
6/11	2,1	0	11,7	0,5			1,9	0	15,9	0			2,9	0	13,8	1,3		
11/12	2,6	0	12,2	0	46,6	7,1	3,4	0	17,6	0	64,0	14,4	2,2	0	12,0	0	33,6	9,6
Réserve à CR	25,6		60,9		165,1		37,1		82,9		221,9		35,2		76,7		225,0	
pF 4,2	5,4		12,9		40,4		6,7		19,5		50,2		5,3		12,5		28,0	



Site	Dune						Pente						Bas fond					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU
11/7/77	3,7	0	10,1	0	30,4	0	3,0	0	13,9	0	48,8	1,2	2,3	0	1,1	0	27,5	1,2
15/2	2,0	0	9,7	0	24,8	0	1,9	0	14,8	0	47,2	0,6	1,0	0	7,4	0	19,6	0
3/5	1,8	0	8,5	0	24,5	0	1,6	0	12,8	0	47,0	0	1,4	0	7,3	0	19,0	0
1/6	1,8	0	8,3	0	24,1	0	1,3	0	12,5	0	46,4	0	1,4	0	7,4	0	18,8	0
28/6	1,5	0	5,3	0	26,2	0	1,4	0	8,0	0	39,2	0	1,8	0	6,4	0	24,8	0
20/7	5,7	0,3	7,2	0	26,9	0	3,6	0	11,0	0	46,4	0	4,3	0,3	8,7	0	22,4	0
1/8	15,0	9,6	9,0	0			12,8	6,1	10,7	0			12,5	7,2	8,6	0		
8/8	10,4	5,1	9,5	0	31,6	0	8,5	1,8	14,9	0	45,4	0	10,6	5,3	9,1	0	22,4	0
25/8	16,3	10,9	47,9	35,0			16,8	10,0	54,4	34,9			20,5	15,2	63,3	50,9		
2/9	7,2	2,0	35,3	22,5	94,0	53,7	10,5	3,8	41,5	22,0	78,4	28,0	9,1	3,8	48,8	36,4	64,0	39,2
9/9	17,4	12,1	56,0	43,1			24,9	18,2	64,0	44,5			24,0	18,7	60,6	48,2		
22/9	17,3	11,9	48,9	28,1	108,2	67,9	19,0	12,3	43,5	24,0	102,8	52,4	20,0	14,7	47,8	35,4	77,6	49,6
5/10	7,2	1,8	22,3	9,5			10,0	1,3	16,2	0			4,3	0	19,1	6,6		
19/10	3,3	0	19,2	6,4	85,3	45,0	3,0	0	18,8	0,5	92,8	42,4	3,2	0	13,8	1,3	36,8	13,6

Site	Dune						Pente						Bas fond					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU
6/2	2,1	0	10,0	0	40,3	4,0	1,8	0	16,7	0	56,4	7,2	2,2	0	11,4	0,5	28,4	2,8
24/3	1,1	0	9,3	0	35,9	0	1,6	0	15,4	0	51,4	4,8	1,2	0	9,0	0	24,8	2,0
4/5	0,7	0	6,4	0			0,7	0	9,0	0			0,5	0	5,7	0		
1/6	1,0	0	5,4	0			0,8	0	6,5	0			0,7	0	3,4	0		
30/6	1,4	0	6,8	0	28,0	0	1,2	0	8,8	0	30,4	0	2,0	0	4,9	0	16,4	0
16/7	5,8	1,4	6,6	0			8,7	5,8	6,9	0			7,0	3,5	5,1	0		
27/7	10,9	5,5	9,3	0			11,9	5,2	10,2	0			6,4	1,9	6,1	0		
10/8	9,4	4,0	7,4	0			10,6	3,9	12,0	0			8,8	3,5	7,7	0		
25/8	19,7	14,3	56,3	43,5	39,2	3,0	23,1	16,4	66,2	46,7	51,2	5,6	25,6	20,3	60,4	47,9	34,0	8,0
7/9	4,2	0	22,9	10,0			5,2	0	26,6	7,1			5,2	0,3	23,0	10,5		
22/9	14,0	8,6	48,8	35,9	66,3	26,1	22,0	15,3	55,1	22,8	80,0	29,6	23,9	18,6	55,1	42,6	59,6	31,6
12/10	7,8	2,8	34,2	21,3	70,3	30,0	9,6	3,2	44,3	17,5	71,2	20,8	9,9	5,0	37,5	25,0	50,0	21,6
4/11	11,7	6,4	21,5	8,5			10,1	3,9	18,0	0,3			10,8	5,5	15,3	2,8		
18/11	3,4	0	16,0	3,3			3,2	0	17,5	0			3,1	0	13,4	1,5		
30/11	2,8	0	15,6	3,1	51,7	11,4	2,8	0	16,8	0	52,0	3,2	2,6	0	9,6	0	31,6	5,2
15/12	2,5	0	10,5	0	35,6	0	2,1	0	15,4	0	49,6	2,4	2,6	0	7,2	0	26,0	1,0

Site	Dune						Pente						Bas fond					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU
12/1/78	2,0	0	6,7	0	29,2	0	1,8	0	6,5	0	32,0	0	1,4	0	4,7	0	23,2	0
21/2	1,3	0	4,3	0			1,0	0	3,8	0			1,3	0	3,8	0		
30/3	1,0	0	3,4	0	15,4	0	1,0	0	3,0	0	13,6	0	1,1	0	3,4	0	16,0	0
27/5	0,8	0	2,3	0	11,0	0	1,0	0	2,2	0	12,0	0	1,0	0	3,0	0	14,4	0
20/6	13,0	7,7	13,6	1,9	22,1	0	14,4	7,7	19,6	1,9	18,0	0	14,7	9,4	13,6	2,0	23,2	1,5
3/7	4,7	0	9,7	0			3,0	0	15,7	0			3,0	0	9,2	0		
19/7	21,0	15,7	19,2	7,1			21,0	14,3	19,3	1,0			22,7	17,4	14,7	2,3		
30/7	4,9	0	9,3	0			4,7	0,3	7,3	0			5,0	0,3	8,3	0		
9/8	11,9	6,5	14,6	3,6	22,1	0	6,5	1,4	7,2	0	27,2	0	5,4	1,4	5,8	0	24,0	2,4
18/8	9,5	4,1	10,1	0			10,7	4,0	17,3	0			9,3	4,0	11,9	0,3		
22/8	8,6	3,3	10,8	0			10,5	4,7	16,1	0								
30/8	3,4	0	9,5	0	32,4	0	2,6	0	15,5	0	19,3	1,0	2,7	0	10,9	0	29,6	3,2
10/9	9,8	4,4	9,8	0			9,1	2,4	17,3	0			11,8	6,6	11,6	0		
21/9	25,4	20,1	33,7	20,8	59,8	20,5	25,6	19,0	33,3	13,7	67,2	16,8	31,5	26,2	21,3	8,8	44,8	16,8
30/9	11,6	6,2	33,6	20,8			13,7	7,0	32,0	12,5			14,4	9,1	28,2	16,7		
11/10	4,7	0	29,7	16,8														
26/10	6,0	1,3	18,3	5,5	62,5	22,1	5,6	0	25,1	5,9	76,8	26,4	3,2	0	15,7	3,2	48,0	20,0
22/11	1,6		9,3	0	33,2	0	2,6	0	16,0	0	51,2	6,4	1,6	0	11,4	0	32,0	4,8
19/12	8,0	2,6	13,4	1,0	29,2	0	6,7	0,3	14,6	0	44,8	0	7,0	1,8	12,4	0,3	34,4	6,4

TABLEAU III DAHRA SUD Replats EVOLUTION DE RESERVES HYDRIQUES EN mm

Année	1 9 7 6				1 9 7 7						1 9 7 8							
	0-30		30-100		Date	0-30		30-100		100-300		Date	0-30		30-100		100-300	
Couche	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU		S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU		S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU
					11/7	3,5	0	15,8	0									
23/3	1,6	0	20,1	0	17/2	2,7	0	14,8	0			30/3	1,3	0	13,5	0		
1/6	1,3	0	13,2	0	1/6	1,6	0	16,5	0	96,8	0	18/7	15,3	7,0	27,2	0	94,4	0
30/6	1,8	0	12,9	0	28/6	2,6	0	19,6	0			7/8	3,0	0	21,4	0		
14/7	8,4	5,0	15,0	0	20/7	6,4	0	23,5	0	77,6	0	17/8	9,9	1,6	24,9	0		
27/7	12,9	4,6	17,8	0	1/8	9,4	1,1	22,4	0			21/8	13,2	6,8	24,0	0		
10/8	10,8	1,5	21,6	0	9/8	5,8	0	22,4	0	84,8	0	29/8	5,6	0	24,8	0	88,0	0
25/8	11,3	3,0	23,9	0	25/8	26,9	18,6	49,6	13,6			10/9	28,1	19,8	39,5	5,6		
7/9	4,0	0	17,4	0	1/9	12,3	4,0	28,3	5,7	98,4	0	10/9	10,6	3,0	28,8	0	92,8	0
22/9	18,2	9,9	28,9	3,6	7/9	29,5	21,2	61,6	19,9			29/9	5,3	0	25,2	0		
14/10	4,5	0	27,9	0	21/9	18,5	10,2	36,4	0	100,8	0	10/10	5,3	0	25,4	0	77,6	0
4/11	10,7	4,7	25,1	0	18/10	4,8	0	24,6	0	96,9	0	27/10	6,6	0	26,5	0	80,8	0
18/11	6,4	0	25,8	0								21/11	2,9	0	27,5	0	80,0	0
30/11	3,2	0	18,7	0								18/12	7,0	0	21,9	0	76,0	0
16/12	3,7	0	15,1	0														

Site	Dune						Pente						Bas-Fond					
	0-30 cm		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300		0-30		30-100		100-300	
Date	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU	S <sub>1</sub>	RU	S <sub>2</sub>	RU	S <sub>3</sub>	RU
1/7/75	1,1	0	18,2	0	95,2	7,2	1,1	0	26,5	0	104,8	0	2,7	0	38,4	5,6	322,2	75,7
12/8/7	22,9	14,6	59,1	32,6	188,0	99,2	19,5	12,2	76,8	39,0	200,0	94,6	38,2	28,5	101,0	66,2		
23/9	29,0	20,8	86,5	59,9	216,0	127,2	37,2	29,9	115,3	82,6	201,6	91,0	47,2	37,6	129,6	94,7	404,6	158,1
14/10	12,1	4,1	53,8	27,3	176,0	87,2	13,7	7,2	71,3	38,7			28,3	18,7	109,8	74,9	352,7	106,2
5/11	5,6	0	38,5	12,0			13,9	6,6	89,4	56,6			5,6	0	52,2	14,1		
3/12	3,5	0	28,1	1,9	99,2	10,4	5,3	0	34,5	2,7			7,5	0	64,8	30,0	340,9	94,4
6/5/76	0,8	0	18,4	0	80,0	0	1,3	0	29,8	1,0	116,0	7,2	3,2	0	62,9	28,1	334,0	87,5
1/7	13,3	5,1	25,1	0,3	76,8	0	11,9	4,5	28,0	0	96,0	0	16,1	6,4	40,6	7,2	164,1	0
26/8	35,5	27,3	83,6	57,0	217,5	128,8	35,6	30,2	97,6	64,8	237,6	127,2	45,9	36,3	128,7	93,8	420,8	174,3
23/9	17,1	8,9	46,0	19,5	257,6	168,8	23,9	6,5	55,7	33,1	214,4	104,0	23,0	13,3	86,1	51,3	372,3	126,8
16/11	3,7	0	24,7	0	96,0	7,2	5,0	0	44,6	12,5	171,2	60,8	6,4	0	63,8	29,0	341,7	95,1
17/3/77	1,6	0	16,1	0	65,6	0	1,3	0	12,6	0	88,0	0	5,3	0	33,1	4,6	164,0	0
29/6	1,9	0	9,3	0	72,8	0	1,7	0	9,5	0	88,0	0	4,0	0	31,5	6,6	167,4	0
23/8	19,1	10,8	46,7	20,7	81,6	0												

ANNEXE XII : TABLEAUX DE CALCUL DU BILAN HYDRIQUE

Ia - CALCUL DU BILAN HYDRIQUE FETE-OLE 1975

Intervalle	29.6.75 4.7	4.7 23.7	23.7 6.8	6.8 20.8	20.8 4.9	4.9 16.9	16.9 1.10	1.10 15.10	15.10 20.11	20.11 10.11	10.11 21.12
Nb de jours	5j	19j	14	14	15	12j	15	14	36	31	
ETP	32,7	120,2	80,0	85,4	79,6	67,9	87,1	91,2	257,5	219,9	
P	14,8	71,0	83,2	5,8	72,2	15,0	33,6	15,6	0	0	
D U N E	ΔS	+ 3,0	+ 10,6	+ 26,1	- 10,5	+ 40,0	- 39,8	- 5,6	+ 2,7	- 11,2	- 5,5
	P-ΔS	+ 11,8	+ 60,4	+ 57,1	+ 16,3	+ 32,2	+ 54,8	+ 39,2	+ 12,9	+ 11,2	+ 5,5
	ETR	11,8	19,5	13,0	16,3	32,2	54,8	39,2	12,9	11,2	5,5
	ETR/j	2,4	1,0	0,9	1,2	2,1	4,6	2,6	0,9	0,3	0,18
	r		- 40,9	- 44,2							
P E N T E	ΔS	+ 3,6	+ 14,7	+ 37,0	- 15,8	+ 20,2	- 23,7	+ 4,5	+ 8,6	- 10,9	- 3,4
	P-ΔS	+ 11,2	+ 56,3	+ 46,2	+ 21,6	+ 52,0	+ 38,7	+ 29,1	+ 7,0	+ 10,9	+ 3,4
	ETR	11,2	19,5	13,0	21,6	52,0	38,7	29,1	7,0	10,9	3,4
	ETR/j	2,2	1,0	0,9	1,5	3,5	3,2	1,9	0,5	0,3	0,11
	r		- 36,8	- 33,2							
B. A. S de P E N T E	ΔS	+ 4,7	+ 166,1	+ 180,5	- 96,8	+ 42,2	- 51,0	+ 69,8	- 69,8	- 76,2	- 39,9
	P-ΔS	+ 10,1	- 95,1	- 97,3	+ 102,6	+ 30,0	+ 66,0	- 36,2	+ 85,4	+ 76,2	+ 39,9
	Q	0	+ 114,5	110,6	0	0	0	0	0	0	0
	ETR	10,1	19,5	13,3	28,0	30,0	66,0	80,0	85,4	76,2	39,9
	ETR/j	2,0	1,0	1,0	2,0	2,0	5,5	5,3	6,1	2,1	1,3
	D				- 74,6			+ 116,2			



IIa - CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DAHRA-NORD  
1975

Intervalle	27-6 au 3-7	3-7 au 18-7	18-7 au 29-7	29-7 au 12-8	12-8 au 26-8	26-8 au 17-9	17-9 au 2-10	2-10 au 6-11	6-11 au 11-12	11-12 au 6-2-76	
N de jours	6	15	11	14	14	22	15	35	35	57	
ETP <sub>c</sub>	34,2	73,5	48,9	66,2	60,8	103,2	77,8	175,0	180,7	283,1	
P	6,5	74,6	61,9	82,1	40,3	115,9	95,6	6,5	0	1,0	
D U N E	$\Delta S_1$	+ 5,9	+14,0	+ 7,8	-14,5	+ 7,3	-13,2	+ 6,1	- 12,6	+ 0,5	- 0,5
	$\Delta S_2$	+ 0,6	+ 2,5	+18,9	+ 6,1	-14,10	+14,3	+17,2	- 40,7	+ 0,5	- 2,2
	$\Delta S_3$	- 0,7	0	+ 0,7	+26,9	+ 4,7	+26,1	0	- 20,0	- 27,4	- 6,3
	$\Sigma \Delta s$	+ 5,8	+16,5	+27,4	+18,5	- 2,1	+27,2	+22,3	- 73,3	- 26,4	- 9,0
	P- $\Sigma \Delta s$	0,7	58,1	34,5	63,6	42,4	88,7	72,3	79,8	26,4	10,0
	ETR/j		3,8	3,1	4,5	3,0	4,0	4,8	2,3	0,75	0,18
P E N T E	$\Delta S_1$	+ 6,5	+17,6	+10,7	-19,0	5,9	-11,8	+ 5,7	- 15,8	+ 1,5	- 1,6
	$\Delta S_2$	0	+21,5	+ 5,5	+11,2	-18,1	+11,3	+13,4	- 40,7	+ 1,7	- 0,9
	$\Delta S_3$	0	0	0	+14,4	0	+30,0	0	- 20,0	- 26,4	- 7,6
	$\Sigma \Delta s$	+ 6,5	+39,1	+16,2	+ 6,6	-12,2	+29,5	+19,1	- 76,5	- 23,2	- 10,1
	P- $\Sigma \Delta s$	0	35,5	45,7	75,5	52,5	86,4	76,5	83,0	23,2	11,1
	ETR/j		2,4	4,1	5,4	3,75	3,9	5,1	2,4	0,66	0,19
B A S F O N D	$\Delta S_1$	+ 5,9	+20,0	+ 6,0	-16,4	+ 5,7	- 9,5	+ 6,3	-16,4	- 0,7	0
	$\Delta S_2$	0	+33,2	- 3,4	+15,7	-16,8	+14,1	+14,0	-48,4	- 1,8	- 0,6
	$\Delta S_3$	0	0	+20,0	+17,6	-15,2	+41,6	-10,4	-20,0	- 23,2	- 5,2
	$\Sigma \Delta s$	+ 5,9	+53,2	+22,6	+16,9	-26,3	+46,2	+ 9,9	-84,8	- 25,7	- 5,8
	P- $\Sigma \Delta s$	0,6	21,4	39,3	65,2	66,6	69,7	85,7	91,3	25,7	6,8
	ETR/j		1,4	3,6	4,7	4,8	3,2	5,7	2,6	0,7	0,12



IIB - CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DAHRA-NORD 1976

Intervalle	6-2 au 24-3	24-3 au 4-5	4-5 au 1-6	1-6 au 30-6	30-6 au 16-7	16-7 au 27-7	27-7 au 10-8	10-8 au 25-8	25-8 au 7-9	7-9 au 22-9	22-9 au 12-10	12-10 au 4-11	4-11 au 18-11	18-11 au 30-11	30-11 au 15-12	15-12 au 11.1.77	
n de j	47	41	28	29	16	11	14	15	13	15	20	23	14	12	15j	27	
ETPc	302,8	370,0	265,7	240,9	114,8	74,2	98,0	74,8	71,3	74,1	91,4	139,0	83,2	73,4	75,0	119,5	
P	3,7	0	0	6,0	7,6	23,6	29,7	105,4	1,2	129,2	49,0	31,2	0	0	0	8,0	
D U N E	$\Delta S_1$	- 1,0	- 0,4	+ 0,3	+ 0,4	+ 4,4	+ 5,1	- 1,5	+ 10,3	- 15,5	+ 9,8	- 6,2	+ 3,9	- 8,3	- 0,6	- 0,3	+ 1,2
	$\Delta S_2$	- 0,7	- 2,9	- 1,0	+ 1,4	- 0,2	+ 2,7	- 1,9	+ 48,9	- 33,4	+ 25,9	- 14,6	- 12,7	- 5,5	- 0,4	- 4,9	- 0,4
	$\Delta S_3$	- 4,4	- 2,6	- 2,7	- 2,6	- 2,0	0	0	+ 13,2	0	+ 27,1	+ 4,0	- 4,0	- 5,6	- 9,0	- 16,1	- 5,2
	$\Sigma \Delta S$	- 6,1	- 5,9	- 3,4	- 0,8	+ 2,2	+ 7,8	- 3,4	+ 72,4	- 48,9	+ 62,8	- 16,8	- 12,8	- 19,4	- 10,0	- 21,3	- 4,4
	$P-\Sigma \Delta S$	9,8	5,9	3,4	6,8	5,4	15,8	33,1	33,0	50,1	66,4	65,8	44,0	19,4	10,0	21,3	12,4
P E N T E	$\Delta S_1$	- 0,2	- 0,9	+ 0,1	+ 0,4	+ 7,5	+ 3,2	- 1,3	+ 12,5	- 17,9	+ 16,8	- 12,4	+ 0,5	- 6,9	- 0,4	- 0,7	+ 0,9
	$\Delta S_2$	- 1,3	- 6,4	- 2,5	+ 2,3	- 1,9	+ 3,3	+ 1,8	+ 54,2	- 39,6	+ 28,5	- 10,8	- 26,3	- 0,5	- 0,7	- 1,4	- 1,5
	$\Delta S_3$	- 2,0	- 8,0	- 8,0	- 8,0	0	0	0	+ 20,8	0	+ 28,8	- 8,8	- 2,0	- 7,2	- 10,0	- 2,4	- 0,8
	$\Sigma \Delta S$	- 3,5	- 15,3	- 10,4	- 5,3	+ 5,6	+ 6,5	+ 0,5	+ 87,5	- 57,5	+ 74,1	- 32,0	- 27,8	- 14,6	- 11,1	- 4,5	- 1,4
	$P-\Sigma \Delta S$	7,2	15,3	10,4	11,3	2,0	17,1	30,2	17,9	58,7	55,1	81,0	59,0	14,6	11,1	4,5	9,4
	ETR/j	0,15	0,37	0,37	0,39	0,13	1,55	2,2	1,2	4,5	3,7	4,00	2,6	1,0	0,9	0,3	0,3
B A S F O N D	$\Delta S_1$	- 1,0	- 0,7	+ 0,2	+ 1,3	+ 5,0	- 0,6	+ 2,4	+ 16,8	- 20,4	+ 18,7	- 14,0	+ 0,9	- 7,7	- 0,5	0	- 0,3
	$\Delta S_2$	- 2,4	- 3,3	- 2,3	+ 1,5	+ 0,2	+ 1,0	+ 1,6	+ 52,7	- 37,4	+ 32,1	- 17,6	- 22,2	- 1,9	- 3,8	- 2,4	+ 3,8
	$\Delta S_3$	- 3,6	- 2,8	- 2,8	- 2,8	0	0	0	+ 17,6	0	+ 25,6	0	- 9,0	- 9,0	- 10,0	- 5,6	+ 1,5
	$\Sigma \Delta S$	- 7,0	- 6,8	- 4,9	0	+ 5,2	+ 0,4	+ 4,0	+ 81,1	- 57,8	+ 76,4	- 31,6	- 30,3	- 18,6	- 14,3	- 8,0	- 5,0
	$P-\Delta S$	10,7	6,8	4,9	6,0	2,4	23,2	25,7	18,3	59,0	52,8	80,6	61,5	18,6	14,3	8,0	3,0
	ETR/j	0,23	0,17	0,18	0,21	0,15	2,1	1,8	1,2	4,5	3,5	4,0	2,7	1,3	14,3	0,5	0,12

IIC - CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DAHRA-NORD  
1977

Intervalle		11-1-77 au 15-2	15-2 au 3-5	3-5 au 1-6	1-6 au 28-6	28-6 au 27-7	20-7 au 1-8	1-8 au 8-8	8-8 au 25-8	25-8 au 2-9	2-9 au 9-9	9-9 au 22-9	22-9 au 5-10	5-10 au 19-10	19-10 au 12-1-78
N de jours		35	77	29	27	22	12	7	17	8	7	13	13	14	85j
ETP <sub>c</sub>		242,5	695,2	280,0	195,2	155,6	70,2	50,4	102,2	46,0	37,1	58,9	72,9	85,5	512,7
P		0	1,5	0	10,2	15,9	34,5	0	121,6	0	79,3	28,3	14,1	0	0
D U N E	$\Delta S_1$	-1,7	-0,2	0	-0,3	+4,2	+9,3	-4,6	+5,9	-9,1	+10,2	-0,1	-10,1	-3,9	-1,3
	$\Delta S_2$	-0,4	-1,2	-0,2	-3,0	+1,9	+1,8	+0,5	+38,4	+12,6	+20,7	-15,1	-18,6	-3,1	-12,5
	$\Delta S_3$	-5,6	-0,3	-0,4	+2,1	+0,7	+4,7	0	+62,4	0	+14,2	0	0	-22,9	-56,1
	$\Sigma \Delta S$	-7,7	-1,7	-0,6	-1,2	+6,8	+15,8	-4,1	+106,7	-21,7	+45,1	-15,2	-28,7	-29,9	-69,9
	P- $\Sigma \Delta S$	7,7	3,2	0,6	11,4	9,1	18,7	4,1	14,9	21,7	34,2	43,5	42,8	29,9	69,9
	ETR/j	0,22	0,04	0,02	0,42	0,41	1,6	0,59	0,88	9,7	4,9	3,3	3,3	2,1	0,82
P E N T E	$\Delta S_1$	-1,1	-0,3	+0,3	+0,1	+2,2	-9,2	+4,3	+8,3	-6,3	+14,4	-5,9	-9,0	-7,0	-1,2
	$\Delta S_2$	+1,1	-2,0	-0,3	-4,5	+3,0	-0,3	+4,2	+39,5	-12,9	+22,5	-20,5	-27,3	+27,3	+12,3
	$\Delta S_3$	-1,6	-0,2	-0,6	-7,2	+7,2	0	-1,0	+33,0	0	+24,4	0	0	-10,0	-60,8
	$\Sigma \Delta S$	-1,6	-2,5	-1,2	-11,6	+12,4	+8,9	-1,1	+80,8	-19,2	+61,3	26,4	-36,3	-14,4	-74,3
	P- $\Sigma \Delta S$	1,6	4,0	1,2	21,6	3,5	25,6	1,1	40,8	19,2	18,0	54,7	50,4	14,4	74,3
	ETR/j	0,05	0,05	0,04	0,80	0,16	2,1	0,16	2,4	2,4	2,6	4,2	3,9	1,0	0,87
B A S F O N D	$\Delta S_1$	-1,3	+0,4	0	+0,4	+2,5	+8,2	-1,9	+9,9	-11,4	+14,9	-4,0	-15,7	-1,1	-1,8
	$\Delta S_2$	-3,6	-0,1	+0,1	-1,0	+2,3	-0,1	+0,5	+54,2	-14,5	+11,8	-12,8	-28,7	-5,3	-9,1
	$\Delta S_3$	-7,9	-0,6	-0,2	+6,0	-2,4	0	0	+41,6	0	+13,6	0	0	-40,8	-13,6
	$\Sigma \Delta S$	-12,8	-0,3	-0,1	+5,4	+2,4	+8,1	-1,4	+105,7	-25,9	+40,3	-16,8	-44,4	-47,2	-24,5
	P- $\Sigma \Delta S$	12,8	1,8	0,1	4,8	13,5	26,4	1,4	15,9	25,9	39,0	45,1	58,5	47,2	24,5
	ETR/j	0,36	0,02	0,01	0,17	0,61	2,2	0,20	0,93	3,2	5,6	3,5	4,5	3,4	0,28

IId - CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DAHRA-NORD  
1978

Intervalle	12-1-78 au 21-2	21-2 au 30-3	30-3 au 27-5	27-5 au 20-6	20-6 au 3-7	3-7 au 19-7	19-7 au 30-7	30-7 au 9-8	9-8 au 18-8	18-8 au 22-8	22-8 au 30-8	30-8 au 10-9	10-9 au 21-9	21-9 au 30-9	30-9 au 11-10	11-10 au 26-10	26-10 au 22-11	22-11 au 19-12	
N de jours	40	37	58	24	13	16	11	10	9	4	8	11	11	9	11	15	27	27	
ETP <sub>c</sub>	229,2	231,2	455,6	184,2	82,3	85,9	62,0	53,0	50,9	23,6	48,8	67,5	60,3	47,7	104,3	126,5	194,2	237,1	
P	0	0	0	48,5	8,0	54,0	23,0	28,0	21,0	4,0	4,0	37,0	63,0	47,0	0	5,0	0	20,1	
D U N E	$\Delta S_1$	- 0,7	- 0,3	- 0,2	+ 12,2	- 8,3	+ 16,3	-16,1	+ 7,0	- 2,4	- 0,9	-5,2	+ 6,4	+15,6	-13,8	- 6,9	+ 1,3	- 4,4	+6,4
	$\Delta S_2$	- 2,4	- 0,9	- 1,1	+ 11,3	- 3,9	+ 9,5	- 9,9	+ 5,3	- 4,5	+ 0,7	-1,3	+ 0,3	+23,9	- 0,1	- 3,9	-11,4	- 9,0	+4,1
	$\Delta S_3$	- 6,0	- 7,8	- 4,4	+ 11,1	0	0	0	0	+10,3	0	0	+15,0	+12,4	+20,0	-10,0	- 7,3	-29,3	-4,0
	$\Sigma \Delta S$	- 9,1	- 9,0	- 5,7	+ 34,6	-12,2	+25,8	-26,0	+12,3	+ 3,4	- 0,2	-6,5	+21,7	+51,9	+ 6,1	-20,8	-17,4	-42,7	+6,5
	P- $\Sigma \Delta S$	9,1	9,0	5,7	13,9	20,2	28,2	49,0	15,7	17,6	4,2	10,5	15,3	11,1	40,9	20,8	22,4	42,7	13,6
	ETR/j	0,22	0,24	0,09	0,57	1,55	1,8	4,5	1,6	1,95	1,05	1,3	1,4	1,04	4,5	1,9	1,4	1,6	0,5
P E N T E	$\Delta S_1$	- 0,8	0	0	+ 13,4	-11,4	+18,0	-16,5	+ 2,0	+ 4,2	- 0,2	-7,9	+ 6,5	+16,5	-11,9	- 8,1	- 3,0	+4,1	
	$\Delta S_2$	- 2,7	- 0,8	- 0,8	+ 17,4	- 3,9	+ 3,6	-12,0	- 0,1	+10,1	- 1,2	-0,6	+ 1,8	+16,0	- 1,3	- 6,9	- 9,1	-1,4	
	$\Delta S_3$	- 9,0	- 9,2	- 1,6	+ 6,0	0	+ 9,2	0	+ 2,1	0	0	0	+17,0	+20,9	+14,6	- 5,0	-25,6	-6,4	
	$\Delta S$	-12,5	-10,0	- 2,4	+ 36,8	-15,3	+30,8	-28,5	+ 4,0	14,3	- 1,4	-8,5	+25,3	+53,4	+ 1,4	-20,0	-37,7	-3,7	
	P- $\Sigma \Delta S$	+12,5	10,0	2,4	11,7	23,3	23,2	51,5	24,0	6,7	5,4	12,5	11,7	9,6	45,6	25,0	37,7	23,8	
	ETR/j	0,31	0,27	0,04	0,48	1,80	1,45	4,7	2,2	0,75	1,35	1,6	1,1	0,87	4,1	0,96	1,4	0,88	
B A S F O N D	$\Delta S_1$	- 0,1	- 0,2	- 0,1	+13,7	-11,7	+19,7	-17,7	+ 0,4	+ 3,9	-6,6	+ 9,1	+19,7	-17,1	-11,2	- 1,6	+5,4		
	$\Delta S_2$	- 0,9	- 0,4	- 0,4	+10,6	- 4,4	+ 5,5	- 6,4	- 2,5	+ 6,1	-1,0	+ 0,7	+ 9,7	+ 6,9	-12,5	- 4,3	+1,0		
	$\Delta S_3$	- 3,6	- 3,6	- 1,6	+ 8,8	0	+ 0,8	0	0	+ 5,6	0	0	+15,2	+14,2	-10,0	-16,0	+2,4		
	$\Sigma \Delta S$	- 4,6	4,2	- 2,1	+33,1	-16,1	+26,0	24,1	- 2,1	+15,6	-7,6	+ 9,8	+44,6	+ 4,0	-33,7	-21,9	+8,8		
	P- $\Sigma \Delta S$	4,6	4,2	2,1	15,4	24,1	28,0	47,1	30,1	9,4	11,6	27,2	18,4	43,0	38,7	21,9	11,3		
	ETR/j	0,11	0,11	0,03	0,64	1,85	1,75	4,3	3,0	0,72	1,45	2,5	1,7	4,8	1,5	0,8	0,41		

III - CALCUL DU BILAN HYDRIQUE DAHRA-SUD REPL TS

Intervalle	23-3 4-5	4-5 1-6	1-6 30-6	30-6 14-7	14-7 27-7	27-7 10-8	10-8 25-8	25-8 7-9	7-9 21-9	22-9 13-10	13-10 4-11	4-11 18-11	18-11 30-11	30-11 16-12	16-12 11-14	
N de jours	42	28	29	14	13	14	15	13	15	21j	22	14	12	16	26	
ETP <sub>c</sub>	380,0	265,5	249,9	102,2	86,8	98,0	74,8	71,3	74,1	97,6	132,8	83,2	73,4	79,2	115,3	
P	0	0	5,6	10,6	38,0	12,9	65,4	12,9	106,0	49,0	31,2	0	0	0	8,3	
1	$\Delta S_1$	-0,5	+0,2	+0,5	+6,6	+4,5	+2,1	+0,5	-7,3	+14,2	-13,7	+6,2	-4,3	-3,2	+0,5	-0,2
9	$\Delta S_2$	-1,1	-5,8	-0,3	+2,1	+2,8	+3,8	+2,3	-6,5	+11,5	-1,7	-4,6	+0,7	-7,1	-3,6	+0,7
7	$\Delta S_3$	0	0	0	0	0	0	0	+20,0	0	-10,0	-10,0	0	0	0	
6	$\Sigma \Delta S$	-1,6	-5,6	+0,2	+8,7	+7,3	+1,7	+2,8	-13,8	+45,7	-15,4	-5,9	-13,6	-10,3	-3,1	+0,5
	P- $\Sigma \Delta S$	1,6	5,6	5,4	1,9	30,7	11,2	62,6	26,7	60,3	64,4	37,1	13,6	10,3	3,1	7,5
	ETR/j	0,04	0,2	0,19	0,14	2,4	0,8	4,2	2,05	4,0	3,1	1,7	0,97	0,86	0,19	0,29
Intervalle	11-1-77	17-2	18-3	1-6	28-6	20-7	1-8	9-8	25-8	1-9	7-9	21-9	18-10	18-10		
N de jours	37	29	75	27	22	12	8	16	7	6	14	27	163			
ETP <sub>c</sub>	258,9	267,0	701,8	195,2	155,6	70,2	57,6	95,0	40,7	31,8	63,7	153,2	978,0			
P	0	0	1,5	12,0	22,5	23,7	0	119,4	0	75,2	26,3	16,1	0			
1	$\Delta S_1$	-0,8	-1,4	-0,3	-1,0	+3,8	-3,0	-3,6	+21,1	-14,6	+17,2	-11,0	-13,7	-3,5		
9	$\Delta S_2$	-1,0	+0,7	+1,0	+3,1	+3,9	-1,1	0	+27,2	-1,3	+13,3	-25,2	-11,8	-11,1		
7	$\Delta S_3$	0	0	0	-6,4	-12,8	+7,2	0	+13,6	0	+7,4	-5,0	-3,9	-2,5		
7	$\Sigma \Delta S$	-1,8	-0,7	+1,3	-2,3	-5,1	+9,1	-3,6	+61,9	-15,9	+39,9	-41,2	-29,4	-17,1		
	P- $\Sigma \Delta S$	1,8	0,7	0,2	14,3	27,6	14,6	3,6	57,5	15,9	35,3	67,5	45,5	17,1		
	ETR/j	0,05	0,02	0,00	0,53	1,25	1,23	0,45	3,6	2,3	5,9	4,8	1,7	0,10		
Intervalle	30-3	5-7	18-7	7-8	17-8	2-8	29-8	10-9	20-9	29-9	10-10	27-10	21-11			
N de jours	97j	13	20	10	5	7	12	10	9	11	17	25	27			
ETP <sub>c</sub>	734,2	68,9	110,6	55,8	29,3	42,7	74,2	55,0	47,7	101,3	143,5	299,6	127,3			
P	49,2	61,5	34,0	32,0	4,5	0	63,0	42,0	34,0	0	+17,3	0	20,1			
1	$\Delta S_1$	+6,8	+7,2	-12,3	+6,9	+3,3	-7,6	+22,5	-17,5	-5,3	0	+1,3	-3,7	+4,1		
9	$\Delta S_2$	+6,0	+7,7	-5,8	+3,5	-0,9	+0,8	+14,7	-10,7	-3,6	+0,2	+1,1	+1,0	-5,6		
7	$\Delta S_3$	0	0	0	0	-3,2	-3,2	0	+4,8	0	-15,2	+3,2	-0,8	-4,0		
8	$\Sigma \Delta S$	+12,8	+14,9	-18,1	+10,4	-0,8	-10,0	+37,2	-23,4	-8,9	-15,0	+5,6	-3,5	-5,5		
	P- $\Sigma \Delta S$	36,4	46,6	52,1	21,6	5,3	10,0	25,8	65,9	42,9	15,0	11,7	3,5	25,6		
	ETR/j	0,38	3,6	8,65	2,2	1,1	1,4	2,15	6,5	4,8	1,4	0,69	0,14	0,95		

ANNEXE XIII : Simulation du bilan hydrique, exemple de sortie imprimée  
modèle Bijou Dahra-Nord Dune.

PERIODES	I	P	HD1	HD2	HD	HR	ETP	K	ETH	ETR	RS1	RS2	RDR	RDRC	D(RS)	ETR/ETP	ETH-ETR	RU1	RU2
•	241	80,4	82,0	46,1	128,1	1,00	4,5	1,00	4,5	4,2	77,7	46,1	0,0	0,0	114,1	0,95	0,2	68,0	46,1
•	242	0,0	72,0	51,8	123,8	1,00	4,5	1,00	4,5	4,2	67,8	51,8	0,0	0,0	0,2	0,95	0,2	68,0	51,8
•	243	2,4	64,9	53,1	122,0	1,00	4,5	1,00	4,5	4,2	64,6	53,1	0,0	0,0	3,4	0,95	0,2	68,0	53,1
•	244	0,0	64,6	53,1	117,7	0,97	4,7	1,00	4,7	4,5	60,2	53,1	0,0	0,0	7,8	0,95	0,2	68,0	53,1
•	245	0,0	60,2	53,1	113,3	0,94	4,7	1,00	4,7	4,4	55,7	53,1	0,0	0,0	12,3	0,94	0,3	68,0	53,1
•	246	22,3	70,1	59,0	131,1	1,00	4,7	1,00	4,7	4,5	67,7	59,0	0,0	0,0	0,3	0,95	0,2	68,0	59,0
•	247	0,0	67,7	59,0	126,7	1,00	4,7	1,00	4,7	4,5	63,2	59,0	0,0	0,0	4,8	0,95	0,2	68,0	59,0
•	248	0,0	63,2	59,0	122,2	0,96	4,7	1,00	4,7	4,5	58,8	59,0	0,0	0,0	9,2	0,95	0,2	68,0	59,0
•	249	0,0	58,8	59,0	117,8	0,93	4,7	1,00	4,7	4,4	54,3	59,0	0,0	0,0	13,7	0,94	0,3	68,0	59,0
•	250	0,0	54,3	59,0	113,3	0,89	4,7	1,00	4,7	4,4	49,9	59,0	0,0	0,0	18,1	0,94	0,3	68,0	59,0
•	251	0,0	49,9	59,0	108,9	0,86	4,7	1,00	4,7	4,4	45,5	59,0	0,0	0,0	22,5	0,93	0,3	68,0	59,0
•	252	0,0	45,5	59,0	104,5	0,82	4,7	1,00	4,7	4,3	41,2	59,0	0,0	0,0	26,8	0,92	0,4	68,0	59,0
•	253	0,0	41,2	59,0	100,2	0,79	4,7	1,00	4,7	4,3	36,9	59,0	0,0	0,0	31,1	0,91	0,4	68,0	59,0
•	254	0,0	36,9	59,0	95,9	0,76	5,1	1,00	5,1	4,6	32,3	59,0	0,0	0,0	35,7	0,89	0,5	68,0	59,0
•	255	0,0	32,3	59,0	91,3	0,72	5,1	1,00	5,1	4,5	27,9	59,0	0,0	0,0	40,1	0,88	0,6	68,0	59,0
•	256	6,8	34,7	59,0	93,7	0,74	5,1	1,00	5,1	4,5	30,2	59,0	0,0	0,0	37,9	0,89	0,6	68,0	59,0
•	257	0,0	30,2	59,0	89,1	0,70	5,1	1,00	5,1	4,4	26,0	58,7	0,0	0,0	42,3	0,87	0,7	68,0	59,0
•	258	0,0	26,0	58,7	84,7	0,67	5,1	1,00	5,1	4,3	22,3	58,1	0,0	0,0	46,6	0,85	0,8	68,0	59,0
•	259	4,0	20,3	58,1	84,4	0,66	5,1	1,00	5,1	4,3	22,5	57,6	0,0	0,0	46,9	0,85	0,8	68,0	59,0

ANNEXE XIV : Analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique, exemple de sortie imprimée ETR Dahra CRZ.

VARIABLE	QUANTILES								DECILES								VINGTILES
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	2.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.70	3.88	10.72	0.0	15.09	0.0	0.0
17	0.0	2.10	15.95	0.0	0.0	0.0	0.84	2.10	5.68	10.06	18.48	18.60	0.0	18.60	0.0	18.60	0.0
18	0.0	4.10	20.95	0.0	0.0	0.0	0.24	4.10	8.60	16.08	22.64	24.72	0.0	24.80	0.0	24.80	0.0
19	4.05	12.90	26.25	1.68	2.72	5.74	9.60	12.80	17.10	24.20	26.80	29.50	0.15	29.50	0.15	29.50	0.15
20	8.90	32.20	36.00	1.02	6.60	11.62	22.58	32.20	35.84	37.62	39.20	39.20	0.05	40.46	0.05	40.46	0.05
21	16.35	29.70	46.00	3.70	11.10	20.82	23.44	29.70	39.04	42.90	48.26	150.86	2.24	51.20	2.24	51.20	2.24
22	14.20	29.50	39.46	10.36	13.08	15.38	24.36	29.50	36.48	39.06	40.35	42.50	6.85	43.19	6.85	43.19	6.85
23	16.65	30.50	41.30	2.90	12.78	19.18	20.91	30.50	39.47	40.41	41.78	42.56	0.25	44.74	0.25	44.74	0.25
24	39.31	42.35	46.08	15.18	37.99	40.50	41.30	42.35	43.15	45.82	46.56	49.00	8.64	50.02	8.64	50.02	8.64
25	38.80	44.21	46.67	26.76	36.23	41.46	43.24	44.21	44.90	45.85	47.30	48.58	21.80	49.07	21.80	49.07	21.80
26	34.35	39.60	43.65	19.26	32.52	35.64	37.78	39.60	42.73	43.30	43.95	44.10	14.27	44.10	14.27	44.10	14.27
27	30.97	37.83	40.40	16.68	28.75	32.84	34.88	37.83	38.48	39.90	40.80	40.80	1.47	40.80	1.47	40.80	1.47
28	21.32	30.00	30.60	0.01	9.20	23.70	26.85	30.00	30.60	30.60	30.60	31.20	0.0	31.74	0.0	31.74	0.0
29	4.68	16.51	25.04	0.0	3.07	14.95	17.59	16.51	22.70	24.40	25.63	26.00	0.0	26.00	0.0	26.00	0.0
30	0.0	13.00	20.64	0.0	0.0	0.67	2.01	13.00	18.58	19.64	22.00	22.00	0.0	22.36	0.0	22.36	0.0
31	0.0	2.59	13.20	0.0	0.0	0.0	0.66	2.69	10.64	13.20	13.74	14.64	0.0	15.78	0.0	15.78	0.0
32	0.0	0.90	10.75	0.0	0.0	0.0	0.0	0.90	8.94	10.75	10.90	11.64	0.0	11.97	0.0	11.97	0.0
33	0.0	0.0	8.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.37	8.60	8.60	9.56	0.0	9.78	0.0	9.78	0.0
34	0.0	0.0	7.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.36	7.60	7.60	7.80	0.0	7.80	0.0	7.80	0.0
35	0.0	0.0	7.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.96	7.40	7.52	7.60	0.0	7.96	0.0	7.96	0.0
36	0.0	0.0	8.40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.52	8.52	8.60	0.0	8.60	0.0	8.60	0.0