

11530

C. I. E. H.

COMITE INTERAFRICAIN
D'ETUDES HYDRAULIQUES

B.P. 369
OUAGADOUGOU

I.R.A.T.

INSTITUT DE RECHERCHES
AGRONOMIQUES TROPICALES

Division Recherche Développement
B.P. 37
34980 SAINT-CLEMENT-LA-RIVIERE



VALORISATION AGRICOLE DES RESSOURCES PLUVIOMETRIQUES

Synthèse de l'atelier I.R.A.T. - C.I.E.H.
tenu à Ouagadougou
du 27-11-82 au 4-12-82

Etude financée par le Fonds d'Aide et de Coopération

Juillet 1984 /

7230

S O M M A I R E

A - PRESENTATION -	1
1 - RAPPEL DES OBJECTIFS -	2
2 - RESUME DU CONTENU DU DOSSIER -	3
2.1. Résumé du contenu de la première partie	3
2.2. Résumé du contenu de la seconde partie	4
B - I. PARTIE - BILAN DES CONNAISSANCES -	6
1 - LA DEMANDE EVAPORATIVE -	6
1.1. Introduction	6
1.2. Les référentiels disponibles	6
1.3. Utilisation pratique du référentiel technique disponible	17
1.4. Conclusion	23
1.5. Bibliographie	24
2 - LES BESOINS EN EAU DES CULTURES	27
2.1. Rappel de la définition de l'ETM et de son évaluation par l'utilisation des coefficients culturaux	27
2.2. Problèmes inhérents à la détermination des coefficients culturaux, exemple : les besoins en eau du mil	27
2.3. Les données disponibles	35
2.4. Critique des référentiels	44
2.5. Conclusion	46
2.6. Bibliographie	47
3 - L'OFFRE EN EAU : LA PLUVIOMETRIE	49
3.1. Introduction	49
3.2. Les données disponibles	49
3.3. L'utilisation du vecteur pluviométrique	49
3.4. La pluie efficace	50
3.5. Etude des périodes de sécheresse, pluvieuses et de seuils pluviométriques	52
3.6. Conclusion	52
3.7. Bibliographie	53
4 - LE SOL	56
4.1. Introduction	56
4.2. Considérations physiques le réservoir sol	56
4.3. La réserve utile	57
4.4. Effet des techniques culturales sur l'économie de l'eau	67
4.5. Considérations biologiques/l'extraction de l'eau par les racines	75
4.6. Conclusion	83
4.7. Bibliographie	83

1. The first of these is the

second of these is the

third of these is the

fourth of these is the

fifth of these is the

sixth of these is the

seventh of these is the

eighth of these is the

ninth of these is the

tenth of these is the

eleventh of these is the

twelfth of these is the

thirteenth of these is the

fourteenth of these is the

fifteenth of these is the

sixteenth of these is the

seventeenth of these is the



5 - METHODOLOGIE PERMETTANT L'ANALYSE DES RELATIONS EAU-SOL-PLANTE	88
5.1. Introduction	88
5.2. Les études de la pluviométrie	88
5.3. Méthode des intersections et périodes fréquentielles de végétation selon Franquin.	92
5.4. Modélisation du bilan hydrique	97
5.5. Exemple d'application pratique d'un modèle de croissance de culture de sorgho (SORGF) pour l'évaluation du risque climatique	115
5.6. Bibliographie	118
6 - CONCLUSION	124
C - II. PARTIE - PROJET D'ACTIONS DE RECHERCHE -	125
ACTION 11 : Carte de demande évaporative	129
ACTION 12 : Validation des coefficients cultureux et consignes d'utilisation pour le calcul des consommations hydriques des cultures pluviales et irriguées	130
ACTION 21 : Consommation hydrique à l'échelle du champ en conditions réelles de pluviométrie et de technique	131
ACTION 22 : Recommandations pratiques aux producteurs visant la réduction du risque climatique	132
ACTION 23 : Rôle des techniques pratiquées en conditions paysannes sur la réduction du risque pluviométrique	133
ACTION 24 : Référentiel agropédoclimatique régionalisé	134
ACTION 25 : Perfectionnement des modèles de simulation du bilan hydrique par la prise en considération de critères physiologiques et agronomiques déterminants	135
ACTION 3 : Proposition d'une action coordonnée inter-états zone sahélienne	136

ANNEXES

Méthodes de suivi agrométéorologique opérationnel des cultures et de calcul du bilan hydrique cumulé utilisés par AGRHYMET.

AVANT - PROPOS

Le CIEH se distingue des autres Centres internationaux d'étude et de recherche de par sa vocation essentiellement orientée vers la diffusion de référentiels techniques novateurs.

On citera notamment la première étude régionale de l'ETP Turc réalisée en 1972 pour le compte des pays membres du CIEH et, en 1974, l'édition et la diffusion des recueils des données contrôlées de pluviométrie journalière de l'origine à nos jours.

C'est dans cette optique, que l'atelier "valorisation des ressources pluviométriques" a été organisé par le CIEH à Ouagadougou et rassemblé des ingénieurs et chercheurs soucieux de la nécessité de faire passer dans la pratique un ensemble de connaissances immédiatement utilisables par le développement.

Participaient à cet atelier :

- | | |
|-------------|--|
| M. DANCETTE | - Bioclimatologue, IRAT/ISRA Sénégal, |
| M. FOREST | - Agroclimatologue, Hydraulique Agricole -
Division Recherche-Développement IRAT Montpellier, |
| M. GNOUMOU | - agrométéorologue, Direction de la météorologie
Nationale - Ouagadougou Hte-Volta |
| M. KONATE | - Directeur du service Agrométéorologie
Bamako - Mali |
| M. LIDON | - Agronome - Hydraulique agricole - Division
Recherche - Développement IRAT Montpellier |
| M. MEUNIER | - Chef des services techniques du CIEH Ouagadougou Hte Volta |
| M. MUSY | - Directeur des recherches - Centres AGRHYMET Niamey
Niger |
| M. NICOU | - Agronome spécialiste du travail du sol,
Directeur de l'Agence IRAT - Haute-Volta |
| M. QUIDEAU | - Agropédologue, chef du département agroclimatologie au
CIEH Ouagadougou Hte Volta. |
| M. SEDOGO | - Agronome, spécialiste de la fertilité, IVRAZ Hte Volta - |

Le Ministère du Développement Rural était représenté par des ingénieurs de la Direction des services Agricoles.

Le présent rapport a été réalisé, à la demande du CIEH par l'équipe pluridisciplinaire hydraulique agricole de la Division Recherche Développement de l'IRAT Montpellier.

Il a été conçu et mis en oeuvre par MM. B. LIDON et F. FOREST, Ingénieurs agronomes spécialisés en hydraulique agricole et agroclimatologie.

A - PRESENTATION -

1 - RAPPEL DES OBJECTIFS

L'objectif du présent document est de formaliser les débats et conclusions de l'Atelier organisé par le CIEH et l'IRAT du 27.11.82 au 4/12/82 à Ouagadougou sur le thème de la "valorisation agricole" des ressources pluviométriques" en faisant une synthèse :

- des acquis,
- des thèmes d'études s'avérant prioritaires pour mieux comprendre les mécanismes des relations eau-sol-plante et rendre opérationnel un certain nombre d'acquis détenu par la recherche.

L'approche proposée sous-entend que l'état hydrique de la plante dépend de 2 types de facteurs :

- le premier "physique",
- le second "biologique",

L'état d'humectation du sol colonisé par les racines varie en fonction de la distribution des pluies, de la structure du sol et de l'intensité de l'évaporation.

L'importance de la végétation, exprimée en terme de surface foliaire, détermine la quantité d'eau évapotranspirée chaque jour par la couverture végétale.

Elle dépend essentiellement de la période de semis et des techniques culturales au facteur variétal près.

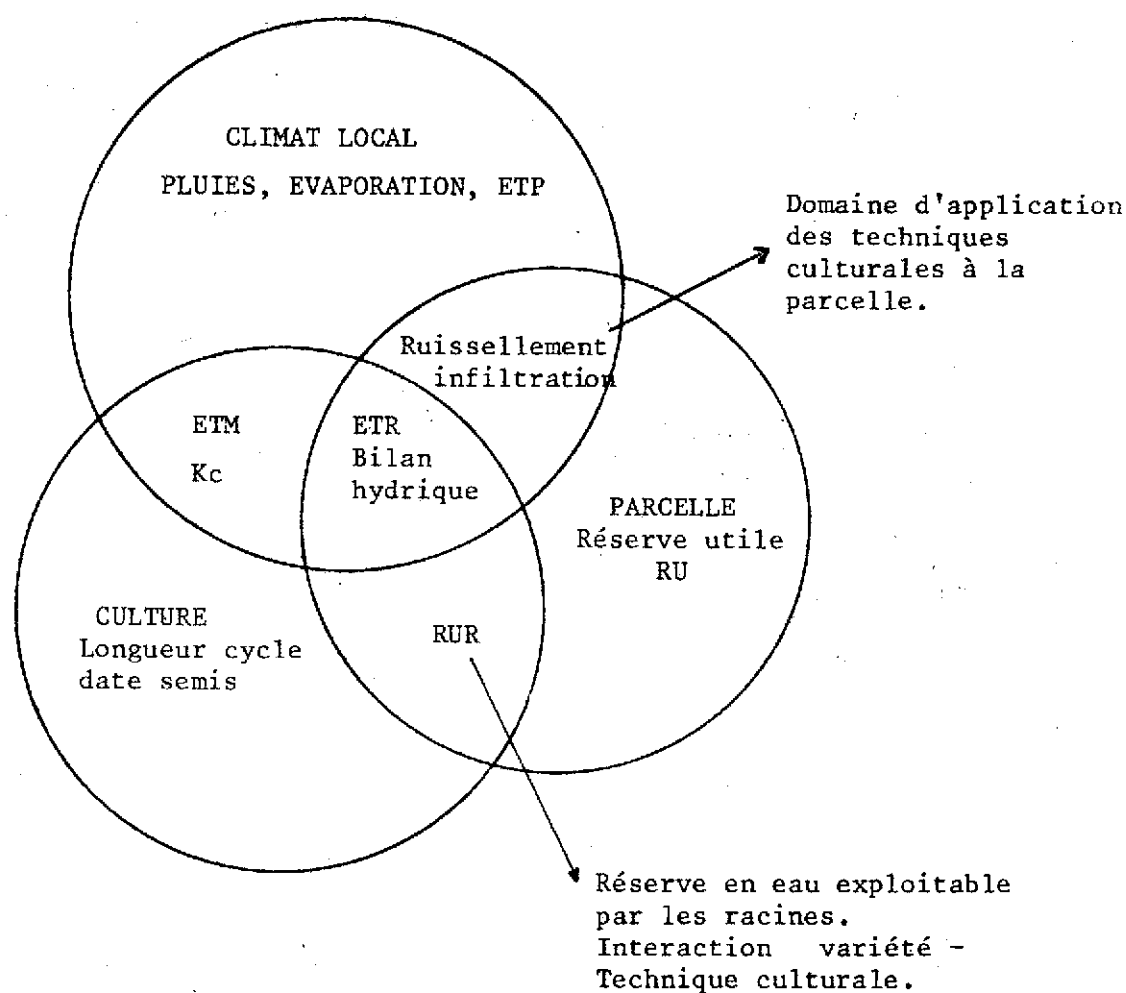
Lorsque l'humectation du sol est inférieure à l'évapotranspiration de la culture, le processus de sécheresse est déclenché.

Pour lutter contre ce processus il s'agit :

- de mieux connaître les techniques culturales susceptibles (par une augmentation du stock d'eau du sol ou un meilleur calage du cycle) de compenser les effets des aléas climatiques.
- de sélectionner des variétés adaptées à la sécheresse ce qui consiste à trouver des plantes qui supportent des périodes prolongées de manque d'eau et qui soient capables de reprendre leur croissance avec le retour de conditions hydriques favorables.

Afin d'être en mesure de rechercher et proposer des solutions vulgarisables il s'avère nécessaire de bien connaître les interactions internes au système climat-parcelle-plante, ce qui implique que soient connus qualitativement mais aussi quantitativement l'effet et l'action des éléments qui y contribuent.

LES RELATIONS CLIMAT - PARCELLE - PLANTE



REPRESENTATION SYMBOLIQUE DES
ELEMENTS INTERVENANT DANS L'ECONOMIE
ET LA VALORISATION DE L'EAU
A L'ECHELLE DE LA PARCELLE CULTIVEE

d'après F. Forest -

2 - RÉSUMÉ DU CONTENU DU DOSSIER

Ce dossier est composé de 2 parties :

- l'une se proposant de faire un bilan aussi exhaustif que possible des connaissances en matière de relations eau-sol-plante et des endroits où cette information est disponible.
- l'autre axée sur la définition d'axes de recherche qui permettraient de mieux appréhender les relations eau-sol-plante et de déboucher sur des méthodologies d'application des résultats de la recherche qui soient vulgarisables.

2.1. Résumé du contenu de la première partie

Le chapitre I fait le bilan des connaissances sur les notions d'évaporation et d'évapotranspiration en régions chaudes. La demande évaporative est présentée comme un critère régional d'estimation de l'aridité d'un milieu et une variable primordiale du bilan hydrique de la culture (fig. 1)

Le chapitre II s'intéresse à la consommation de l'eau par les cultures au cours de leur processus de croissance et développement. Le concept d'évapotranspiration maximale ETM est présenté comme un outil opérationnel utilisable pour les actions de développement à condition que certaines précautions soient prises en compte. Un cycle de culture est alors caractérisable par quatre variables : La date de semis, les besoins en eau ETM au cours des phases successives de croissance, la durée du cycle séparant le semis de la production et enfin le niveau des techniques culturales appliquées.

Le chapitre III concerne l'état hydrique de la parcelle cultivée. Comment évolue la quantité d'eau retenue par le sol et exploitable par les racines (RU) ? Quel est l'impact sur le statut hydrique de la culture des différentes techniques de travail du sol ? Le rôle de la profondeur d'enracinement est ici largement souligné.

Il semblerait, d'après les connaissances acquises, que le facteur profondeur de l'enracinement soit prépondérant par rapport aux facteurs "texture" et "structure" du sol. Ainsi, par exemple, la réserve en eau utilisable par le sorgho en sol sableux est largement supérieure à celle obtenue en sol ferrugineux pourtant plus argileux du seul fait d'une différence significative d'espérance de descente de l'enracinement (présence fréquente d'un horizon compact).

Le chapitre IV propose une démarche de simulation du bilan hydrique considéré en région Soudano-Sahélienne et Sahélienne comme un facteur de production. Suffisamment précis au regard de la complexité des situations rencontrées, les modèles de bilan hydrique permettent d'évaluer des indices de production et ainsi de diagnostiquer, chaque année, la part de la fluctuation du rendement revenant respectivement :

- à l'insuffisance des pluies,

- à l'insuffisance de la profondeur de l'enracinement.
- à la réalisation d'une technique culturale...

2.2. Résumé du contenu de la seconde partie

L'objectif de la seconde partie du dossier est d'identifier des axes programmes de portée régionale qui viseraient :

- à mieux faire connaître les acquis disponibles,
- à recommander des recherches sur des objectifs précis susceptibles d'avoir un impact opérationnel sur la gestion technique des exploitations agricoles.

Quatre types de projets ont été identifiés (termes de référence) :

- Axes de travail communs et complémentaires, réalisable dans le cadre des programmes propres à chaque organisme.
 - . Cartes ETP (Penman et Classe A) travail de fond Agrhymet avec appui IRAT.
 - . Coefficients culturaux : synthèse et analyse des données disponibles (travail débuté par IRAT).
- Des actions communes réalisables à court terme.
 - . Avertissement agricole : réflexion sur la méthodologie (Mali et Haute-Volta). Test de la méthodologie d'utilisation d'une simulation de toute la suite probable de la campagne (IRAT - AGRHYMET - CIER).
 - . Vérification de la validité des coefficients K pour une même culture, dans des conditions climatiques différentes (Sénégal, Mali, Haute-Volta, Niger).
- Des projets de recherche et d'étude coordonnés.
 - . Techniques culturales et économie de l'eau. En retenant 3 niveaux d'intensification, une approche de type binôme en a été proposée.
 - . Mesures de besoins en eau des cultures - Il est apparu que les besoins en eau d'un certain nombre de cultures sont relativement mal connus. Aussi semblerait-il souhaitable d'effectuer au Sénégal, Haute-Volta, Mali... un certain nombre de mesures complémentaires.
 - . Constitution d'un référentiel agropédoclimatique dont l'intitulé pourrait être : "le risque en agriculture pluviale dans les différentes situations de sol et de pluviométrie en zones semi-arides : proposition de règles opératoires en vue d'accroître les chances de réussite des campagnes agricoles".

L'objectif en serait, au niveau actuel de connaissance du milieu que nous possédons, d'essayer de synthétiser en un recueil pratique et opérationnel :

- les seuils pluviométriques liés au travail du sol et au semis,
- les références stations (rendements),
- l'interaction fertilisation-risque climatique,
- une synthèse de ces données par culture,
- la définition d'une méthodologie de suivi et diagnostic.

L'objectif de cette étude serait d'aboutir pour l'Afrique de l'Ouest Soudano-Sahélienne à un référentiel du type de ceux proposés par la FAO dans le domaine de l'irrigation (besoins en eau, réponse à l'irrigation etc...).

Il ne serait peut être pas nécessaire qu'il soit exhaustif mais surtout opérationnel.

- des études à caractère plus fondamental - Le grand point d'interrogation au cours de cet atelier a été l'interaction physiologie de la plante/besoins en eau. Les modèles dits physiologiques (type Arkins) semblent beaucoup trop sophistiqués pour être utilisables ; néanmoins leur approche semble plus souple que l'utilisation de coefficients K. Aussi il est apparu opportun d'essayer de mettre au point une méthodologie d'évaluation des besoins en eau de la plante qui, sans remettre en cause l'approche actuelle, permette de tenir compte de son évolution physiologique réelle et ainsi d'expliquer plus précisément l'interaction du niveau de satisfaction des besoins en eau de la plante sur le rendement.

B / 1. PARTIE - BILAN DES CONNAISSANCES -

1 - LA DEMANDE EVAPORATIVE

1.1. Introduction

Généralement connue sous la définition d'ETP, la demande évaporative se veut être une notion parlante pour l'agriculteur. Elle traduit, exprimée en millimètre de hauteur d'eau évaporée et/ou transpirée par le système sol-plante, l'effet des facteurs climatiques qui conditionnent le retour de l'eau vers l'atmosphère, et par conséquent l'activité de la plante et l'état de la disponibilité de l'eau dans le sol.

L'ETP de référence est définie comme correspondant à la quantité maximum d'eau qui peut être évaporée par un gazon uniforme maintenu court dont les réserves en eau du sol ne sont pas limitées (définition de Penman 1948).

Jusqu'à présent, l'estimation de la demande évaporative d'un climat est obtenue de nombreuses manières : mesures d'ETP gazon, calcul ETP selon Penman, Turc, Blaney Criddle, évaporation Bac Classe A ou Colorado.

La multiplicité de ces méthodes, leur limite, ainsi que la diversité des approches font qu'il est actuellement difficile d'obtenir un bon référentiel de la demande climatique utilisable sur l'ensemble de la zone d'action du CIEH.

1.2. Les référentiels disponibles

Parmi la variété des méthodes, les agrométéorologues ont privilégié en Afrique de l'Ouest deux méthodes :

- l'évaluation de l'ETP par mesure de l'évaporation d'un bac de type Classe A,
- le calcul de l'ETP Penman.

1.2.2. Les données Bac Classe A -

1.2.2.1. Rappel de la méthode de mesure -

L'évaporation Bac Classe A revient à mesurer l'évaporation qui, sur une nappe d'eau libre (cf. figure 1), résulte de l'effet combiné du facteur radiatif, du vent, de la température et de l'humidité.

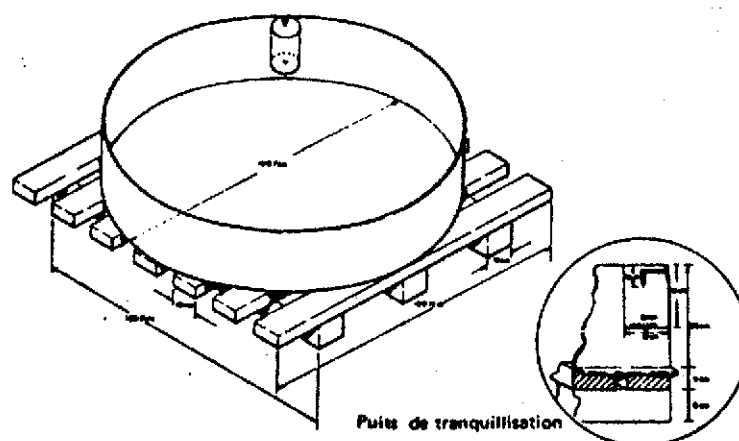


Figure 1 - Bac d'évaporation Classe A -

Pourtant, pour une même situation et de ce fait soumis aux mêmes conditions climatiques, l'eau perdue par une plante ou par un Bac variera significativement du fait (cf. C.E. Houssam 1973, WMO Note 126) :

- que la réflexion des radiations solaires ne représente que 5 à 8 % sur une nappe d'eau libre alors qu'elle est de l'ordre de 25 % sur la plupart des végétaux.
- que le stockage de chaleur par le Bac n'est pas négligeable ce qui peut provoquer une évaporation presque identique la nuit et le jour alors que la plupart des plantes ne transpirent que le jour.
- que la turbulence, la température et l'humidité de l'air n'est pas la même au-dessus d'une culture et d'une nappe d'eau libre.
- que des échanges de chaleur peuvent avoir lieu à travers les parois du Bac.

Les effets paroi jouent semble-t-il un rôle important dans les phénomènes d'évaporation et expliquent les fortes valeurs obtenues en zone désertique ou sub-désertique. A Kaédi (Mauritanie) par exemple, l'évaporation au mois d'Avril atteint 18.7 mm/j alors que pour la même période, l'ETP Penman a pour valeur 7.6 mm/j.

Dans ce cas, si le flux de chaleur conduit au sol par conduction peut être négligé, le Bac étant posé sur un caillebotis, les échanges d'énergie radiative et convective au niveau des parois y sont importants ; toutefois ces transferts restent très difficiles à quantifier.

- d'autant que la couleur du Bac et l'importance des grillages de protection peuvent avoir une influence.
- que l'environnement du Bac (sur une zone cultivée ou nue) a une grande importance.

Ces imperfections font qu'il est très difficile, pratiquement impossible, de modéliser le fonctionnement physique du bac et de mettre au point mathématiquement des formules permettant de relier E_v Bac et ETP Penman par exemple.

Néanmoins, du fait de sa relative facilité à mettre en place dans le cadre d'un projet, cette méthode de mesure est retenue.

1.2.2.2. Description du Bac Classe A -

- Le Bac d'évaporation Classe A est circulaire (121 cm de diamètre et 25,5 cm de profondeur),
- Il est réalisé en acier galvanisé
- Le Bac doit être placé sur des claies en bois de telle sorte que son fond soit à 15 cm au dessus du niveau du sol,
- Le sol est relevé jusqu'à arriver à 5 cm du fond du Bac,
- Le Bac est placé de niveau,
- Il doit être rempli d'eau dont le niveau ne doit pas varier de plus de 5 à 7,5 cm du bord,
- L'eau doit être régulièrement changée pour éviter toute turbidité excessive,
- Si le Bac est galvanisé il doit être repeint chaque année avec de la peinture aluminium.

Faute de respecter ces recommandations, la valeur des mesures sera remise en cause. Cela constitue un handicap certain, particulièrement dans les zones sahéliennes où les disponibilités en eau sont plus que réduites.

1.2.2.3. Correction des mesures -

Sont exposées ci-dessous les corrections proposées par la FAO (Bulletin 24). Elles ont pour objectif d'évaluer une évapotranspiration culture de référence à partir de l'évaporation Bac.

$$ET_0 = K_p E_v \text{ Bac.}$$

Les valeurs de ce coefficient de correction sont données par le tableau 1 pour différentes conditions :

- d'humidité,
- de vent,
- d'environnement.

L'environnement immédiat des Bacs A utilisés en zone tropicale est très variable d'une station à l'autre : sol nu ou pelouse irriguée. La comparaison des valeurs obtenues dans chaque cas pour une même période peut mettre en évidence des différences importantes.

Rijks (1974), à Guédé au Sénégal, a montré l'effet du couvert sur la mesure d'un Bac A, tout au long d'une année (fig. 2).

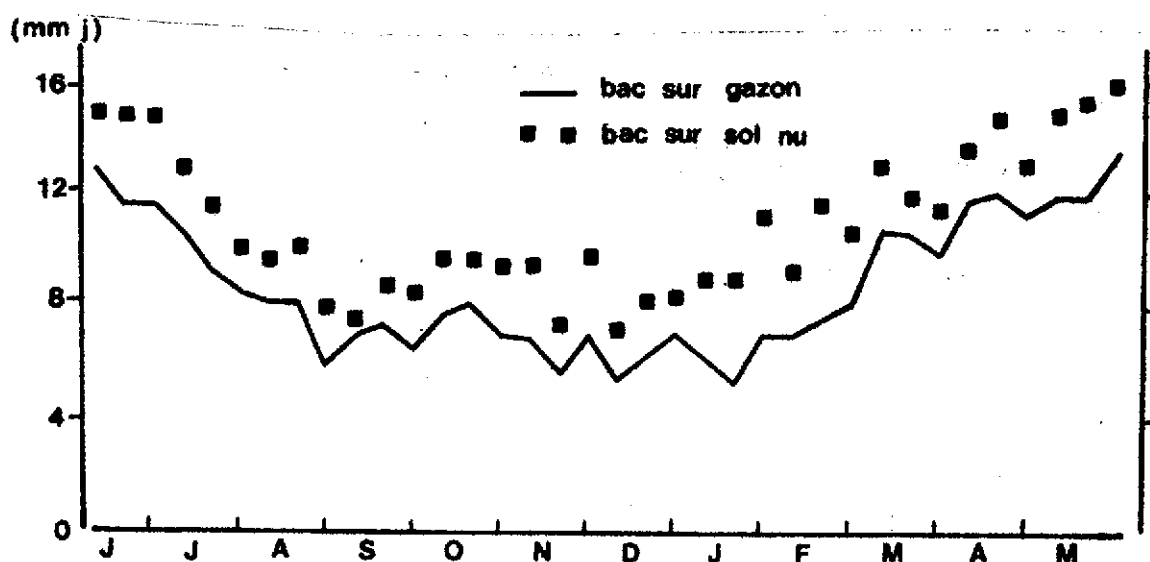


Figure 2 - Evaporation d'un Bac Classe A à Guédé 1974-1975 -

Ces valeurs de K_p sont données :

- pour un Bac situé dans un endroit où il n'y a pas de végétation ayant plus d'un mètre à moins d'environ 50 cm.
- pour un Bac dont l'environnement immédiat (- de 10 m) est soit un gazon entretenu, soit du sol nu,
- pour un Bac sans protection, ce qui est pratiquement impossible en zone Soudano-Sahélienne du fait de l'importance non négligeable que représente l'abreuvement des oiseaux.

Pratiquement dans la mesure où l'environnement des stations agro-météorologiques est pratiquement toujours le même en saison des pluies, période au cours de laquelle le suivi de l'Ev Bac nous intéresse, les coefficients culturaux que l'on utilisera pour calculer les besoins en eau de la plante intègrent ces facteurs de correction. Il n'en sera bien sûr pas de même si on veut utiliser les Ev Bac en saison sèche.

Tableau 1 - Coefficient de correction Bac Classe A -
Environnement du Bac

d'après bulletin FAO N° 44

CRITERE	S O L E N H E R B E				S O L N U			
+ Humidité moyenne en %		faible < 40	Moyenne 40-70	élevée > 70		faible < 40	Moyenne 40-70	élevée > 70
. Vent km/jour	Distance surface sol nu (sens du vent dominant en m)				Distance surface sol nu (sens du vent dominant en m)			
+ faible . < 175	1	55	65	76	1	7	8	5
	10	65	75	85	10	6	7	8
	100	7	8	85	100	55	65	5
	1000	75	85	85	1000	5	6	7
+ modéré . 175-425	1	5	6	65	1	65	75	8
	10	6	7	75	10	55	65	3
	100	65	75	8	100	5	6	5
	1000	7	8	8	1000	45	55	6
+ fort . 425-700	1	45	5	6	1	6	65	7
	10	55	6	65	10	5	55	6
	100	6	65	7	100	45	5	6
	1000	65	7	75	1000	4	45	55
+ très fort . > 700	1	4	45	5	1	5	6	65
	10	45	55	6	10	45	5	55
	100	5	6	65	100	4	45	5
	1000	55	6	65	1000	35	4	45

1.2.2.4. Les données disponibles -

Le tableau 2 ci-dessous récapitule les sources d'information disponibles en Afrique Soudano-Sahélienne.

Tableau 2 - Base de données Bac classe A -

ORGANISMES	OBSERVATIONS
ASECNA	Cahier d'observation - critique des résultats pratiquement impossible (pas de donnée environnement).
Service Météo Nationale	Idem -
Services Agrométéo-nationaux	Conditions d'environnement des mesures respectées données non corrigées
AGRHYMET	Stockage de l'ensemble de ces données (au niveau des pays membres du CILSS).
Institut de Recherche Agronomique (ex. IRAT)	Base de données dans conditions d'environnement la plupart du temps respectées.

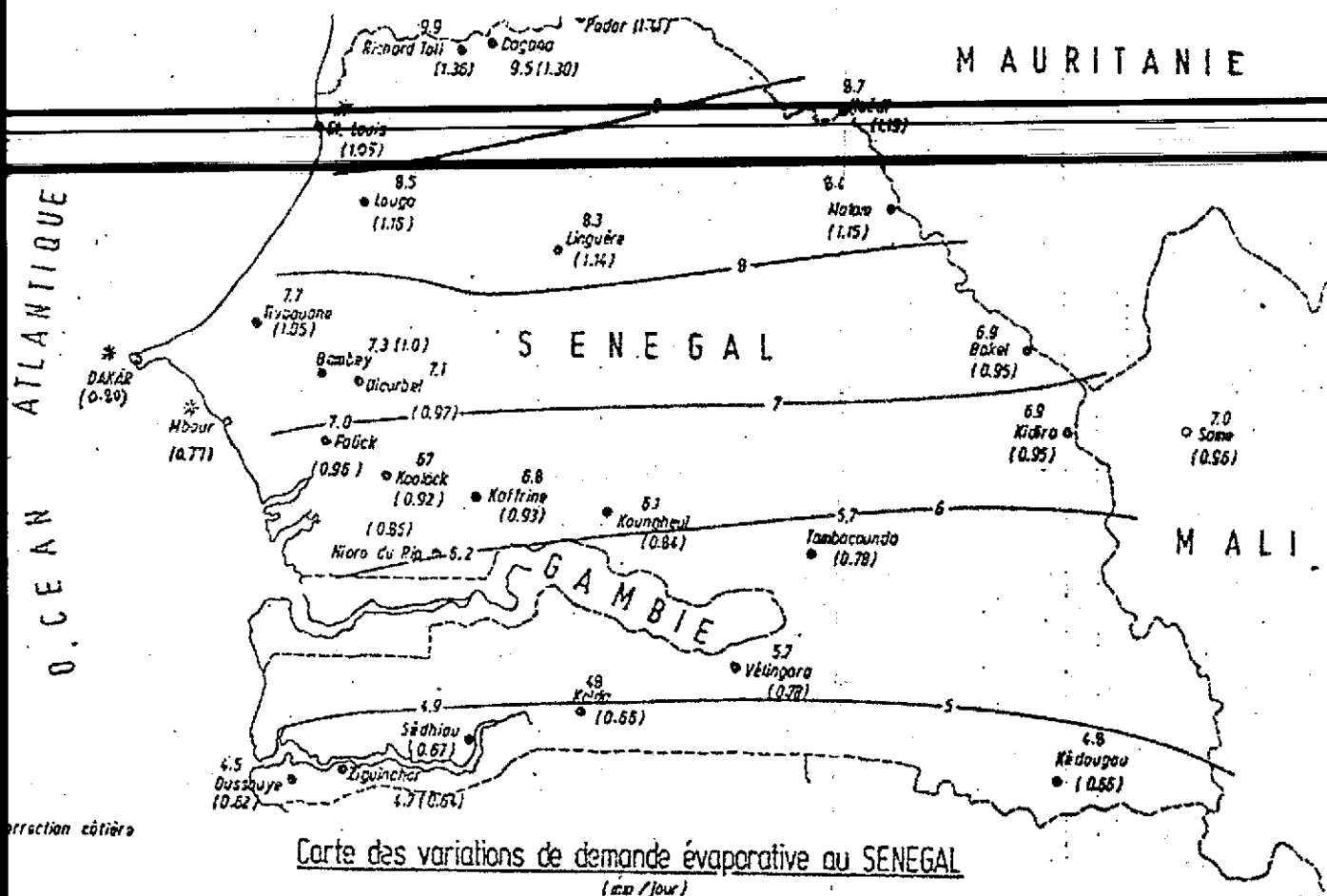
On notera qu'aucune véritable synthèse régionale des données Bac n'a été effectuée. Pourtant, en reprenant la méthodologie appliquée par Dancette au Sénégal, un certain nombre de gradients pourraient être définis.

Dans le cas du Sénégal (cf. figure 3), le gradient Nord-Sud est exprimé pour chaque station étudiée par un coefficient se rapportant à la station agronomique de référence localisée en zone Centre (Bambey).

On notera l'influence cotière qui entraîne une légère réduction de la demande évaporative sur une bande estimée par l'auteur à 25 km.

En terme pratique, les besoins en eau des différentes cultures dont on a précisé la valeur des coefficients cultureux peuvent dorénavant être connus en tout point du Sénégal.

Figure 3



Carte des variations de demande évaporative au SENEGAL

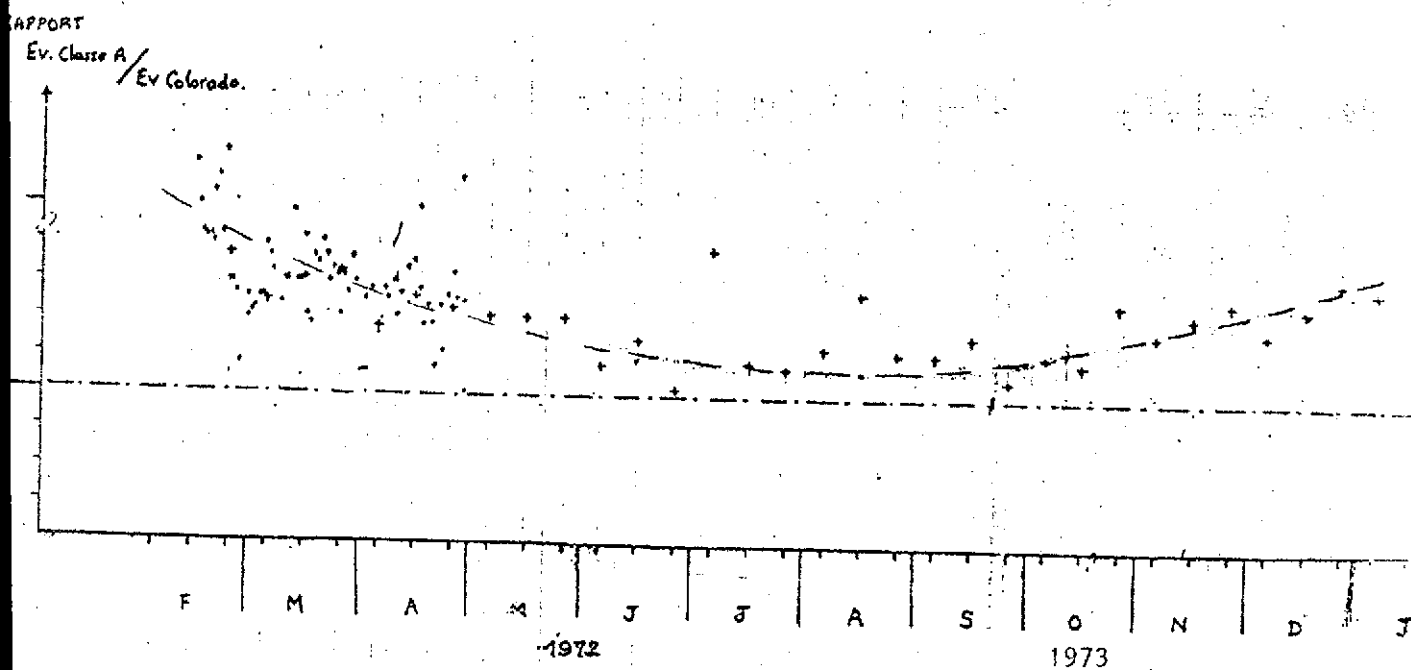
(mm/jour)

pendant les mois d'hivernage (Juin à Octobre compris)

Période 1972-1976

d'après travaux Dancette

Figure 4 : Rapport EVA/Colorado à Tillabéry - Niger 1972-1973.



d'après travaux Valet.

1.2.2.5. Passage du Bac Classe A au Bac Colorado -

Bien qu'actuellement quelque peu abandonné un certain nombre de mesures Bac Colorado sont disponibles. Comme pour le Bac Classe A, la FAO propose des coefficients de correction pour évaluer ET_0 compte tenu de l'environnement.

Néanmoins, et tout à fait logiquement avec les remarques faites en 1221, l'étude du rapport Ev Bac/ Ev Colorado ne fait pas apparaître de relation simple de liaison comme le montre la figure 4.

1.2.3. Les données ETP Penman -

1.2.3.1. La formule de Penman -

La formule de Penman est basée sur une modélisation des facteurs radiatifs et aérodynamiques explicatifs de l'évapotranspiration. Elle a pour atout d'avoir déjà été largement utilisée à travers le monde avec des résultats satisfaisants.

Une des difficultés majeures d'utilisation, outre le nombre important de paramètres climatiques requis, est le calcul proprement dit en particulier si les paramètres sont exprimés en unités différentes de celles utilisées originellement par Penman. Il est indispensable dans ce cas d'adopter des coefficients de conversion appropriés. Malgré les développements des calculatrices de bureau et des micro-ordinateurs, des méthodes de terrain simple restent indispensables comme fiche de calcul (exemple celle proposée par FAO/UNESCO/OMM), ou des formules simplifiées.

(voir en annexe 1 le modèle de fiche utilisé par AGRHYMET)

1.2.3.2. Erreurs d'estimation des termes de l'ETP Penman

Mis à part les erreurs de mesures, les estimations du rayonnement global et de l'albedo sont souvent incertaines :

. Le rayonnement global :

Devant la difficulté de mesurer le rayonnement global, de nombreuses formules se proposent de le calculer à partir de la durée d'insolation.

La forme générale de ces formules est :

$$R_g = I_{ga} \left(a + b \frac{h}{H} \right)$$

où : R_g = rayonnement global en W/m^2

I_{ga} = rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère en W/m^2

h = durée d'insolation en dixième d'heure,

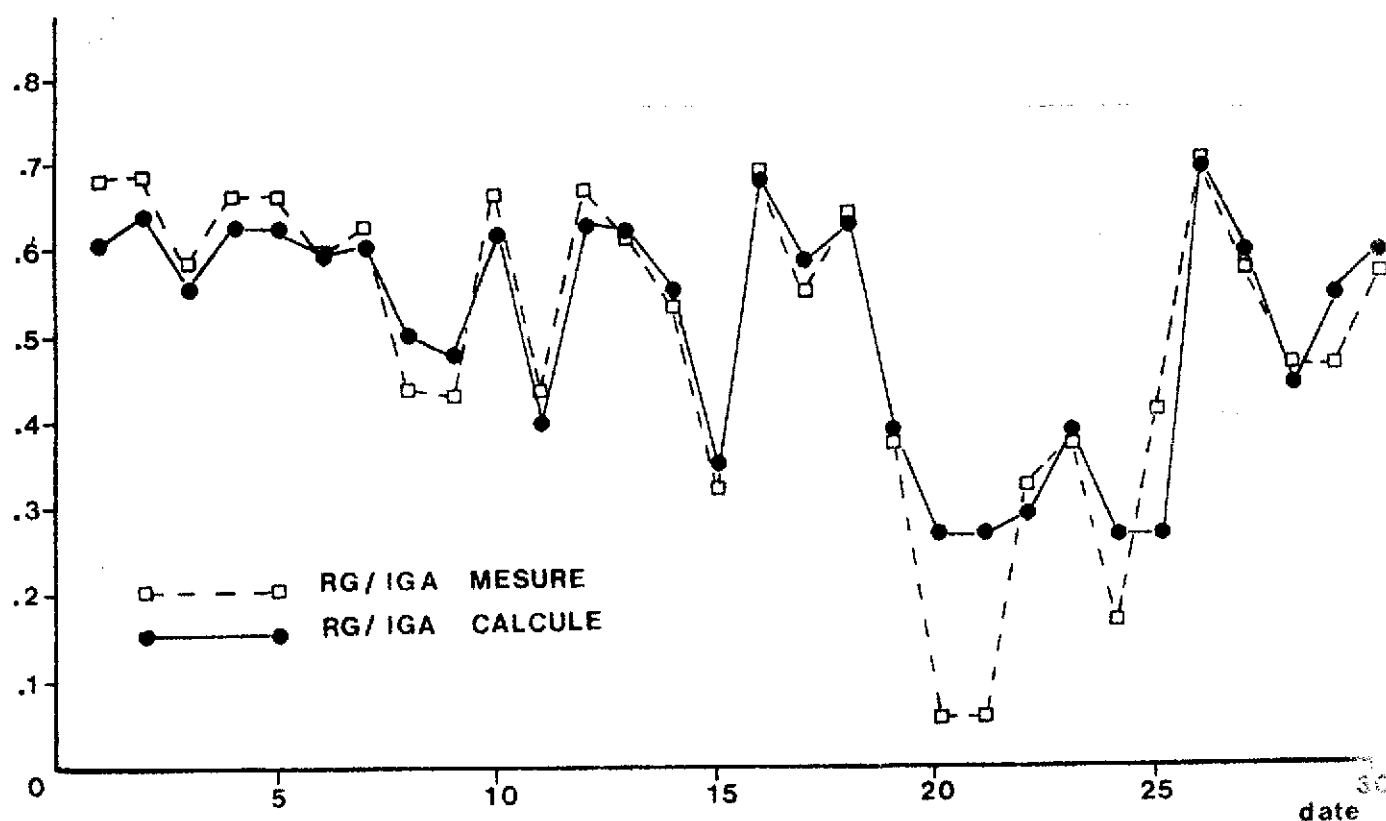
H = durée maximale d'insolation.

I_{ga} et H ne sont fonction que de la date. La connaissance de h , une fois précisés les facteurs a et b , suffit donc à générer le rayonnement.

Il est apparu que a et b variaient en fonction de la station et, pour une station donnée, en fonction de la saison. Certains auteurs proposent d'intégrer la latitude, sans obtenir de résultats satisfaisants. En fait, il apparaît que vu les variations dans la méthode de mesure de l'insolation (qualité du papier, appréciation par l'observateur des parties plus ou moins brûlées), vu les variations d'altitude, vu les phénomènes régionaux (brumes sèches en Côte d'Ivoire), la meilleure méthode consiste à calculer les coefficients pour chaque microclimat.

A titre d'exemple (cf. fig. 5), les valeurs de rayonnement du mois d'Avril 1976 sont générées à l'aide de la relation d'automne et mettent en évidence des décalages au niveau journalier. Pour les trois décades, les pourcentages $\frac{R_g \text{ calculé} - R_g \text{ mesuré}}{R_g \text{ calculé}}$ sont en valeur absolue de 2,5 - 5,1 %

et 7,4 %. Pour le mois ce pourcentage atteint 2,6 %. On peut donc penser que ces formules permettent de calculer, avec une précision satisfaisante, des valeurs du rayonnement à condition que la période soit assez longue.



D'après travaux Auckenthaler

Figure 5 - Rayonnement calculé/mesuré Avril 1976.
(Station de Mon Caprice / Réunion) -

D'autres causes d'erreurs possibles sont l'équation empirique donnant le pouvoir évaporant de l'air, l'incertitude sur la valeur de la constance psychrométrique ou l'erreur commise sur la valeur numérique de la pente de la courbe de tension de vapeur obtenue avec l'hypothèse de l'égalité des températures de la surface évaporante et de l'air.

Ces incertitudes et la difficulté à obtenir les données nécessaires au calcul de l'ETP ont fait qu'en région tropicale africaine la mesure de l'évaporation du bac A lui a souvent été préférée (cf. travaux C. DANCETTE).

1.2.3.3. Les données disponibles -

Si ce n'est le document publié par l'ICRISAT* relatif aux besoins en eau des cultures en zone Soudano-Sahélienne qui donne à une trop grande échelle pour être utilisable sur le terrain des cartes d'évapotranspiration potentielle mensuelle moyenne, aucun document ne fait une synthèse précise des calculs d'ETP Penman.

Le tableau 3, néanmoins, récapitule les institutions qui détiennent une partie de l'information.

Tableau 3 - Base de donnée ETP Penman (non exhaustif) -

ORGANISMES	OBSERVATIONS
AGRHYMET	- Programme de calcul informatisé ETP Penman - Calcul en cours pour l'ensemble des pays du CILSS
CIEH	- Programme calcul informatisé -
IRAT	- " "
ICRISAT	- Programme calcul informatisé et un certain nombre de traitement effectués
ORSTOM	- Programme calcul informatisé un certain nombre de traitement effectués (exemple étude CIEH/tams)
FAO	- Programme calcul informatisé

Il est certain qu'un document de synthèse précis et largement diffusé serait dans ce domaine indispensable.

* SM. VIRMANI - SJ. REDDY - MS. ROSE -

Manuel de climatologie pluviale de l'Afrique Occidentale - Données pour des stations sélectionnées.

Tableau 4. Evapotranspiration journalière moyenne mensuelle Penman -(mn/jour)-

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Agades	4.45	5.75	6.16	6.75	7.03	6.81	6.53	5.74	5.66	5.45	4.84	4.19
N'Guigmi	3.83	4.59	5.20	5.72	5.95	5.98	5.43	4.71	4.88	4.83	4.21	3.97
Gao	4.56	5.88	6.87	7.32	7.93	7.63	6.80	5.71	6.11	5.86	4.91	4.54
St. Louis	4.22	4.59	5.49	5.17	4.75	4.70	4.62	4.52	4.60	4.54	4.24	4.66
Tahoua	5.90	6.65	6.83	7.47	7.72	7.58	6.00	4.89	5.47	6.11	6.19	5.13
Abéché	4.55	5.44	6.11	6.86	6.54	5.84	4.90	3.83	4.59	5.28	5.19	4.95
Matam	3.06	3.74	4.57	5.20	5.73	6.20	5.02	4.37	4.56	4.42	3.48	2.95
Mopti	4.72	5.82	6.78	7.43	6.80	6.29	4.99	4.48	4.53	4.76	4.50	4.27
Zinder	4.44	5.48	5.95	6.39	6.39	6.15	5.08	4.12	4.87	5.39	4.81	4.39
Dakar	4.59	4.78	5.16	5.76	5.36	5.51	5.14	4.55	4.75	4.81	4.96	4.88
Birni N'Konni	4.58	5.45	5.85	6.24	6.42	6.09	4.74	4.22	4.53	4.83	4.46	4.25
Niamey	5.20	5.98	6.68	6.96	7.08	6.76	5.04	4.23	4.58	5.52	5.06	4.61
Maradi	3.77	4.37	4.94	5.55	6.02	5.87	4.65	3.91	4.35	4.33	3.83	3.46
Fort Lamy	4.70	5.77	6.64	7.21	6.85	5.84	4.43	3.74	4.44	5.14	5.24	4.53
Maiduguri	4.66	5.68	6.48	6.95	6.70	5.74	4.34	3.64	4.32	5.04	4.96	4.27
Thies	4.31	5.22	6.16	6.39	5.79	5.14	4.39	3.71	3.99	4.16	3.92	3.59
Segou	4.44	5.30	5.93	6.05	6.31	5.70	4.53	3.96	4.25	4.59	4.42	4.14
Sokoto	4.17	4.81	5.43	6.03	5.90	5.41	4.18	3.62	4.14	4.70	4.42	3.90
Kayes	4.34	4.97	5.98	6.56	6.97	5.93	4.66	3.81	4.15	4.47	4.07	3.91
Maroua	4.21	5.41	5.96	5.97	5.80	4.71	3.94	3.38	3.71	4.53	4.47	4.16
Nongo	3.60	4.53	4.74	4.99	5.18	4.45	3.77	3.05	3.60	4.03	3.66	3.46
Kano	4.17	4.96	5.67	6.55	6.60	5.47	4.38	3.70	4.44	4.88	4.49	3.94
Kaele	4.89	5.81	6.23	6.33	5.97	5.91	4.04	3.56	3.80	4.39	4.87	4.70
Quaradougou	4.56	5.34	6.09	6.39	6.08	4.92	4.29	3.60	3.96	4.77	4.45	4.23
Am Timan	3.82	4.20	4.79	5.30	5.15	4.28	3.49	3.21	3.62	3.97	3.76	3.58
Bouso	3.74	4.47	4.86	5.26	4.58	4.11	3.47	3.06	3.53	3.96	3.84	3.37
Tambacounda	4.02	4.76	5.54	5.86	6.23	4.87	3.67	3.43	3.54	3.84	3.72	3.67
Garoua	4.75	5.68	6.87	7.06	6.02	4.69	4.12	3.83	3.98	4.93	5.28	4.73
Pala	4.15	4.81	5.48	5.47	5.07	4.17	3.61	3.34	3.54	4.26	4.54	4.21
Navrongo	4.57	5.18	5.73	5.73	5.32	4.63	3.87	3.68	3.93	4.68	4.60	4.08
Bamako	4.85	5.80	6.59	6.62	5.96	5.05	4.00	3.58	3.95	4.36	4.29	4.35
F. Archambault	3.65	4.40	4.83	5.04	4.61	3.62	2.95	2.99	3.29	3.78	3.94	3.64
Bobo Dioulasso	4.76	5.62	6.07	5.69	5.25	4.35	3.94	3.79	3.88	4.43	4.28	4.39
Moundou	3.93	4.70	4.89	4.98	4.59	3.79	3.31	3.14	3.30	3.80	4.02	3.74
Kaduna	6.30	6.64	6.22	5.80	5.05	4.06	3.42	3.05	3.76	4.31	4.77	5.55

D'après rapport technique sur une étude d'agrométéorologie de l'Afrique
Sèche au Sud du Sahara en Afrique Occidentale.
J. COCHEME Météorologie - P. FRANQUIN Agronome.

1.2.4. Autres données d'ETP disponibles -

On rappellera l'étude de Lemoine et Prat (CIEH) dans laquelle est calculé pour l'ensemble des pays du Comité l'ETP Turc. Si cette approche est peut-être encore opérationnelle pour s'appliquer à l'hydrologie ou l'hydrogéologie, l'orientation des travaux en agroclimatologie vers l'utilisation du Bac A ou de l'ETP Penman ont quelque peu marginalisé l'intérêt de ce travail. Il en est un peu de même du Piche, quoique de nombreuses méthodes de raisonnement des traitements phytosanitaires y aient recours comme paramètre de décision.

1.3. Utilisation pratique du référentiel technique disponible

1.3.1. Les référentiels réellement disponibles -

Suivant les coefficients cultureux utilisés (leur origine), le choix du référentiel de la demande climatique est primordial pour une estimation correcte des besoins en eau des cultures comme le rappelle le tableau 5 ci-dessous :

Tableau 5 - Choix du référentiel - Demande évaporative suivant les coefficients cultureux disponibles -

Référentiel Demande évaporative	Coefficients Cultureux Bac	Coefficients cultureux * F.A.O.
BAC A	Utilisation directe (validité régionale**)	Correction valeurs Bac avant utilisation $Ev\ Bac + ET_0$
PENMAN	Utilisation après correction des coefficients cultureux	Utilisation directe

* précision du coefficient cultural...

** voir plus loin, à vérifier.

Les incertitudes dans la correction des coefficients cultureux font que sans possibilité de passage d'un référentiel à l'autre le nombre de données réellement disponible est faible.

Tableau 6 - Demande évaporative annuelle sur 13 stations -

Pays	Station	latitude	longitude	Altitude (m)	ETP (mm)	Ev. bacA (mm)
MAURITANIE	Kaedi	16°08 N	13°31 W	53	2 164	4 365
COTE D'IVOIRE	Ferke	09°35 N	05°12 W	323	2 052	2 025
"	Bouake	07°41 N	05°02 W	369	1 824	1 581
HAUTE-VOLTA	Bam	13°20 N	01°30 W	264	1 871	3 668
"	Bobo-Dioul.	11°30 N	04°13 W	432	2 147	2 405
"	Saria	12°16 N	02°22 W	250	1 782	3 025
MALI	Sikasso	11°21 N	05°41 W	374	1 720	2 025
"	Segou	13°24 N	06°09 W	288	1 819	2 705
SENEGAL	Bambey	14°42 N	16°28 W	20	1 866	3 175
"	Séfa	12°47 N	15°32 W	10	1 781	2 585
"	Guédé	16°33 N	14°45 W	8	1 687	4 012
NIGER	Maradi	13°28 N	07°25 W	368	1 704	2 709
"	Tillabéry	14°12 N	01°27 W	209	2 082	4 372

$\frac{Ev. bacA}{ETP}$ (%)

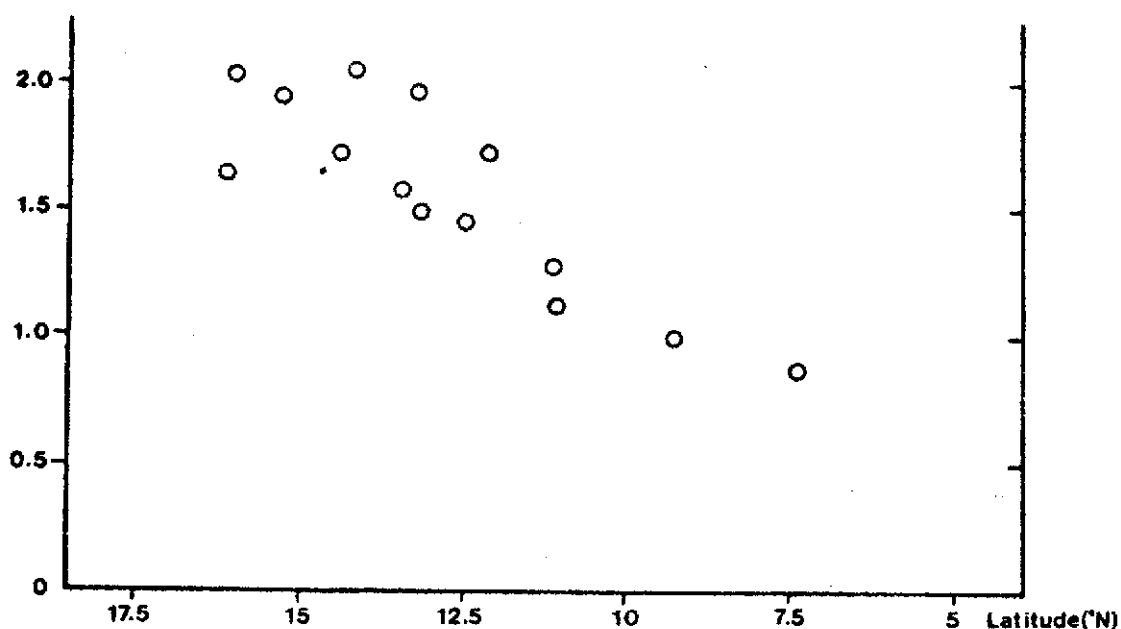


Figure 6 - Variation du rapport $\frac{Ev. bac A}{ETP Penman}$ avec la latitude

d'après travaux Imbernon et Auckenthaler

1.3.2. Comparaison ETP Penman / Ev Bac -

L'analyse des données d'ETP et Ev Bac A sur un échantillon de 13 stations (tableau 6 réparties entre 17° et 7° de latitude Nord met en évidence : l'étroite liaison entre l'évaporation du bac A et la latitude du lieu dans la zone sahélo-soudanienne et tropicale humide (17° N à 7° N)

Le rapport de ces deux estimateurs $\frac{\text{Ev Bac A}}{\text{ETP Penman}}$ est illustré sur la (fig. 6), on constate une augmentation quasi-linéaire de ce rapport avec la latitude entre 7° et 17° N.

Baldy (1978) fig. 9 a mis en évidence une relation étroite pour la Haute-Volta entre ce rapport et l'humidité relative de l'air à l'échelle du mois. Une liaison du même type apparaît à Kaédi (fig. 7), mais aucune corrélation à Ferkessedougou (fig. 8). Une relation de ce genre ne peut donc avoir qu'une représentativité locale.

En conséquence, la latitude, intégrant toutes les variables climatiques, sera retenue pour le moment pour expliquer les variations du rapport $\frac{\text{Ev Bac A}}{\text{ETP Penman}}$ dans la zone Soudano-Sahélienne et tropicale humide.

La sensibilité du Bac A à son environnement, sa forte variabilité suivant un gradient Nord-Sud, le développement technologique des moyens de mesure (capteurs et intégrateurs), et de calcul (micro-ordinateurs), sont autant d'arguments pour préférer l'ETP Penman à l'évaporation du Bac A.

1.3.3. Variabilité de la demande évaporative -

1.3.3.1. Variabilité spatiale -

Si l'on considère la zone géographique réservée aux cultures pluviales, qui s'étend depuis la limite de la forêt au Sud, jusqu'aux confins du désert la variation de la demande évaporative est de l'ordre de 2000 mm/an. Le gradient évalué à 150 mm pour 100 km est distribué d'une manière plus ou moins homogène en fonction des spécificités géomorphologiques des zones :

- effet de bordure sur la côte Atlantique réduisant la demande évaporative ,
- effet d'augmentation de la demande évaporative due à l'importance des surfaces cuirassées dans la région centre Haute-Volta.

Le gradient évaporatif (+ 1,5 mm/km) comparé au gradient pluviométrique (- 1,3 mm/km) peut expliquer l'intensité de la dégradation des conditions écologiques attendues de la baisse de la pluviométrie. :

A une réduction de 100 mm de la pluviométrie correspond en effet une augmentation de 115 mm des besoins hydriques, qui se réalise au détriment de la production végétale et de la recharge en eau du sol et des nappes. L'ampleur de la désertification, constatée au cours de la récente période de sécheresse peut être en partie expliquée par la nature de ces deux gradients. Inversement toute augmentation de la pluviométrie aura des effets bonificateurs amplifiés sur le développement de la végétation.

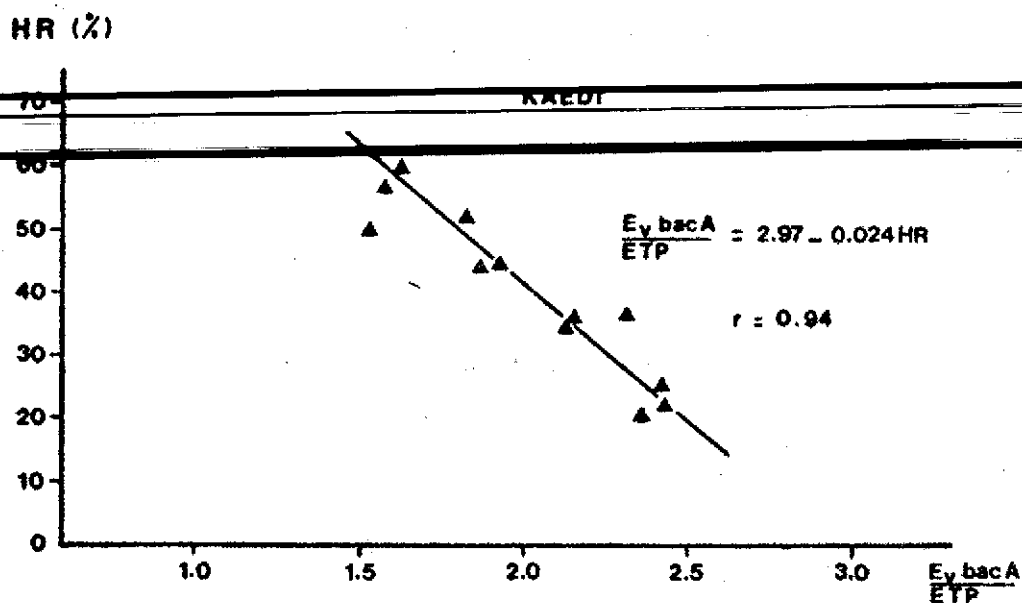


Figure 7 - Relation entre le rapport $\frac{E_v \text{ Bac A}}{ETP \text{ Penman}}$ et l'humidité relative de l'air au cours d'une année à Kaédi.

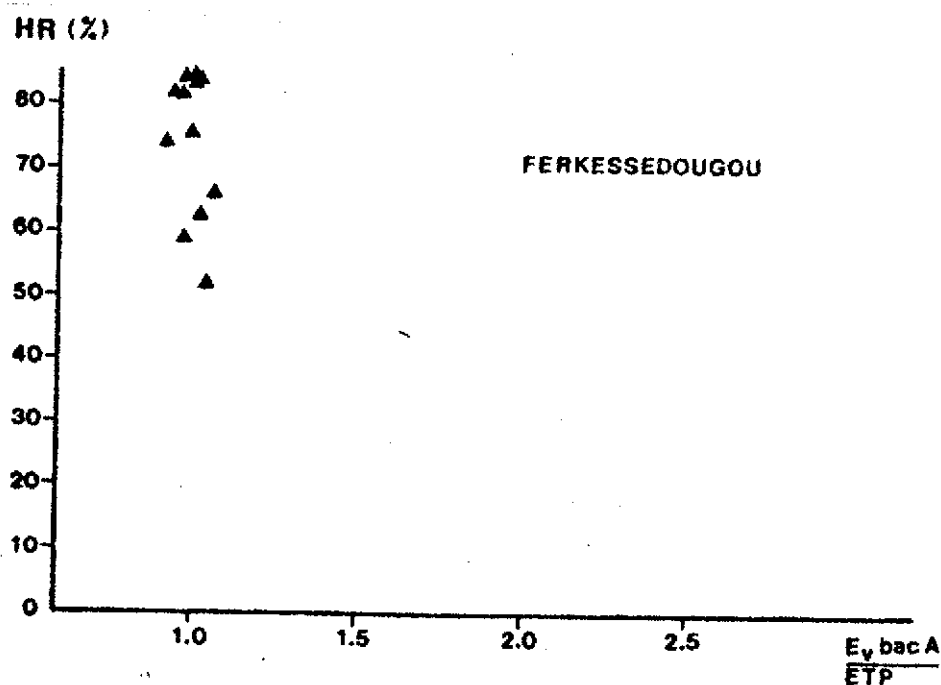


Figure 8 - Relation entre le rapport $\frac{E_v \text{ Bac A}}{ETP \text{ Penman}}$ et l'humidité relative de l'air au cours d'une année à Ferkessedougou.

d'après travaux Imbernon et Auckenthaler

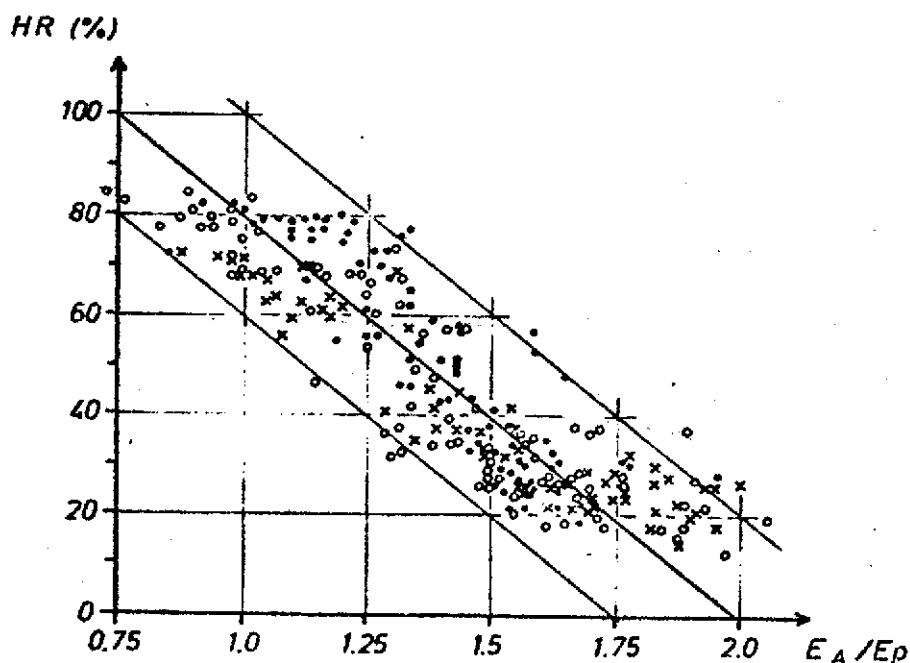


Figure 9 - Relation entre le rapport Bac A/Penman (E_A/E_p) et l'humidité relative. Valeurs mensuelles 1968-1975 pour trois stations de Haute-Volta.

*Relation between pan A/Penman rate and relative humidity
Monthly values for eight years and three stations in Upper Volta.*

- Ouagadougou
- × Dori
- Bobo-Dioulasso

- BALDY, AGRHYMET 1978 -

Pratiquement, dès que l'on veut raisonner à l'échelle décadaire, la maille des stations de référence est tellement lâche que l'utilisation d'un gradient évaporatif est insuffisant ne permettant que d'obtenir des ordres de grandeur et justifierait un renforcement des points de mesure.

1.3.3.2. La variabilité dans le temps -

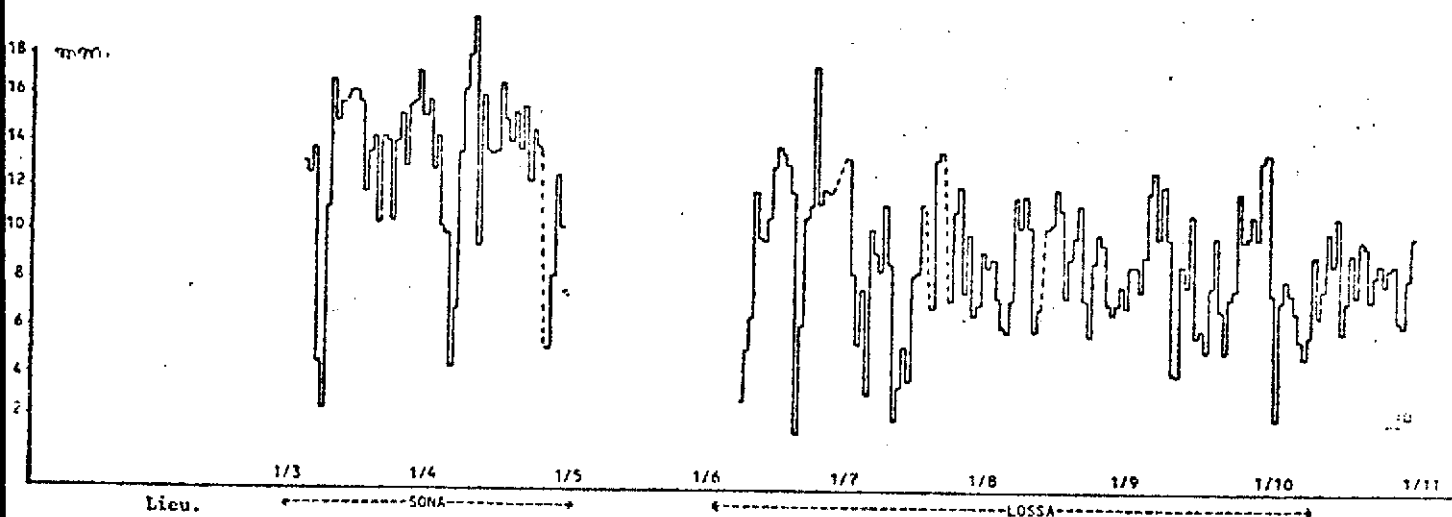
La demande évaporative varie pour un lieu donné, en fonction du temps. Selon les régions, on peut considérer deux, ou trois périodes distinctes :

- saison pluvieuse et nuageuse à faible demande évaporative,
- saison sèche et fraîche " " "
- saison sèche et chaude à forte demande évaporative.

Cette variabilité de la demande évaporative est aussi particulièrement bien mise en évidence à l'échelle de la journée (fig. 10). Toutefois, plus la région concernée est située vers le sud, moins la variabilité est élevée. (fig. 11).

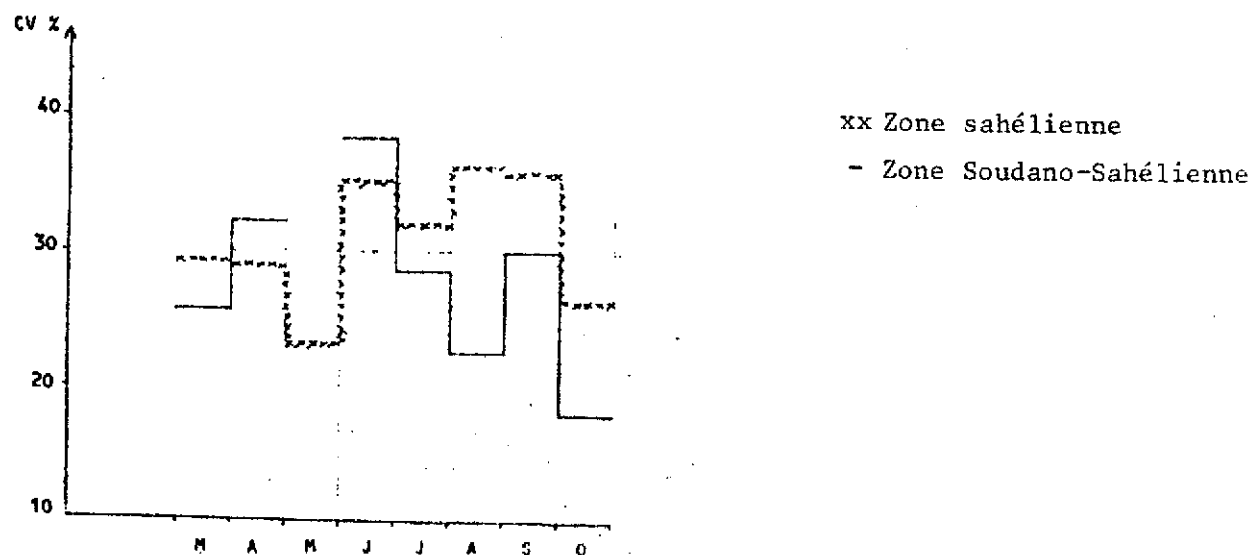
Figure 10- Evolution journalière du Bac Classe A - 1978 -

Variabilité de demande évaporative - zone sahélienne -



d'après travaux de Michaux

Figure 11 - Coefficients de variation du Bac Classe A



d'après travaux de Michaux .

Compte tenu de l'utilisation pratique habituelle qui est faite de la demande évaporative (utilisation comparative avec la pluviométrie dont la variabilité dans le temps est très importante surtout en zone tropicale), il est couramment estimé que des moyennes interannuelles sur des périodes de 10 jours sont amplement suffisantes.

Néanmoins, en particulier lorsqu'on veut étudier le bilan hydrique des cultures notamment en début de cycle, il s'avère qu'il serait intéressant de pouvoir disposer de la demande évaporative de l'année étudiée et peut-être pour généraliser la démarche d'être en mesure de corriger l'évaluation de la demande évaporative en fonction de la pluviométrie mesurée au cours du pas de temps de l'étude.

1.4. Conclusion

Il ressort de ce tour d'horizon sur la connaissance de la demande évaporative la nécessité :

1 - de faire une synthèse des données disponibles :

- . Carte ETP Penman,
- . Carte Ev Bac,
- . Détermination des relations ponctuelles
Ev Bac/ETP Penman.

2 - de recherche des méthodes permettant de s'affranchir des contraintes et difficultés des mesures de la demande évaporative actuelle.

- . Formule de Penman simplifiées applicables régionalement,
- . Test de matériel à capteur et intégrateur permettant de mesure Penman.

Cela permettra de diminuer la maille des points de relevé actuels.

3 - d'étudier la variation de l'ETP en fonction de paramètres tels que la pluviométrie ou la pluviosité afin tout en se servant de moyennes interannuelles d'être en mesure d'enrichir l'information disponible.

1.5. Bibliographie

- AUCKENTHALER J. - 1982 -
Note sur la relation insolation-rayonnement global à la Réunion - Note interne IRAT.
- BALDY CH.M. - OUEDRAOGO J.P. - 1976 -
Etude agrométéorologique, Ministère des travaux publics République de Haute-Volta.
- BALDY CH.M. - 1978 -
Utilisation d'une relation simple entre Bac Classe A et la formule de Penman pour l'estimation de l'ETP en zone Soudano-Sahélienne - Agronomie Tropicale 29(5), 439-452.
- BONNEL F. - 1975 -
Modélisation de l'évolution de la température de surface et de l'évaporation d'un bac évaporométrique. Thèse à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'état de Gembloux.
- BROCHET P. - GERBIER N. - 1977 -
Une méthode opérationnelle pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. La météorologie, VIème série n° 11, 25, 81.
- BOUCHET R.J. - 1963 -
Evapotranspiration réelle et potentielle, General Assembly Berkeley, AIHS, Publ. 62, 132-142.
- CHAROY J. - 1971 -
Les cultures irriguées au Niger. Résultat de 7 années de mesures et d'expérimentations (1963-1970) Agronomie-Tropicale vol. 26, n°9, 973-1002.
- COCHEME J. - FRANQUIN P. -
Projet conjoint d'agro-climatologie FAO/UNESCO/OMM - une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au Sud du Sahara en Afrique Occidentale Rome 1967.

- DANCETTE C. - VILLIOT P. - 1971 -
Mesures du rayonnement global à Bambey et corrélation avec ~~les durées d'insolation réelle et possible~~. Application à l'agriculture. Ministère du développement rural. République du Sénégal.
- DANCETTE C. - 1973 -
Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal Agr. Trop. Vol. 31, n° 4, 321-338.
- DJERRARI A. - 1982 -
Utilisation des évaporomètres en vue d'estimer l'évaporation potentielle et l'évapotranspiration réelle d'un couvert végétal. Thèse présentée à l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- DOORENBOS J. - W.O. PRUITT -
Guidelines for predicting crop water requirements - bulletin FAO n° 24.
- HILLEL D. -
L'eau et le sol - Principe et processus physique - 1974.
- IMBERNON J. - AUCKENTHALER J. -
Analyse critique de deux référentiels traduisant la demande évaporative en région tropicale - ETP selon Penman et évaporation du Bac A.
- JOUVE Ph. - 1979 -
Terminologie et démarche générale pour déterminer les besoins en eau des cultures.
- LEMOINE L. - PRAT J.C. -
Cartes d'évapotranspiration potentielle calculée d'après la formule de TURC pour les pays membres du CIEH.
- LHOMME J.P. - MONTENY B.A. - 1980 -
Etude de l'évapotranspiration réelle instantanée de deux couverts végétaux en zone intertropicale humide. Arch. Für Meteorologie Geophys. Bioklimatol. ser. B.
- PRIESTLEY C.H.B. - TAYLOR R.J. - 1972 -
On the assesment of surface heat and evaporation using large scale parameters. Mon. Wheather Rev, vol.100 n° 2 p. 81 - 92.
- RIJKS - 1974 -
Bilan climatique de l'année 1974 sur les stations de Richard-Toll, Guédé et Kaédi.

- RIOU C. - 1972 -

Etude de l'évaporation en Afrique Centrale - Thèse présentée
à l'Université Paris VI.

- S.M. VIRMANI - S.J. REDDY - M.S. BOSE -

Manuel de climatologie pluviale de l'Afrique Occidentale
Données pour des stations sélectionnées.

2 - LE BESOINS EN EAU DES CULTURES

2.1. Rappel de la définition de l'ETM (Evapotranspiration réelle maximale) et de son évaluation par l'utilisation des coefficients cultureux

L'évapotranspiration réelle maximale d'une culture se veut être l'évaluation de la consommation en eau d'une surface cultivée dont les plantes sont bien alimentées en eau avec une croissance de l'appareil végétatif (externe et racinaire) se réalisant dans de bonnes conditions d'alimentation minérale et sanitaire.

L'expérience et la pratique agricole dans les zones arides et semi-arides soulignent le caractère "idéal" de la notion ETM compte tenu de la multiplicité des conditions favorables devant être rassemblées.

D'une façon générale, l'ETM a été évaluée jusqu'ici à partir de la demande évaporative par l'utilisation de coefficients cultureux représentant pour chaque décade du cycle de la culture le rapport entre la consommation maximale mesurée au champ et la demande évaporative. Le calcul des coefficients cultureux est bien sûr lié à une méthode expérimentale (évapotranspiromètre, bilan "in situ"), dont la mise en oeuvre se trouve inévitablement confrontée à un problème de représentativité.

Plus récemment et pour permettre d'introduire des notions de densité de semis dans l'ETM (facteur très important en zone aride) on a été amené (dans le cadre de la même démarche que celle initiée par Penman pour la demande évaporative), à introduire la notion de LAI (index foliaire) description physique du végétale (travaux Ritchie, Arkins, recherche en cours ICRISAT).

2.2. Problèmes inhérents à la détermination des coefficients cultureux : exemple les besoins en eau du mil

2.2.1. *Conditions générales des mesures*

Les besoins en eau du mil ont été mesurés entre 1973 et 1977, au CNRA de Bambey, dans la zone centrale du Sénégal. A Bambey, la pluviométrie annuelle moyenne sur 60 ans est de 630 mm, avec un écart type de 180 mm ; dans 80 % des années on peut atteindre ou dépasser 470 mm ; le record de sécheresse est de 362 mm en 1968. Les variétés testées ont des longueurs de cycle végétatif de 75, 90 et 120 jours. Avec les travaux de 1981 et 1982, on pourra rajouter bientôt des variétés de 65 jours.

Le dispositif de mesure est installé sur un sol sableux profond ferrugineux tropical faiblement lessivé d'appellation vernaculaire "dior" en profondeur à partir de 60 à 70 cm, ce sol devient plus argileux avec une tendance "dek" d'après l'appellation locale. La réserve en eau utile est de l'ordre de 100 mm par mètre de sol, intermédiaire entre les sols dior (70 mm et les sols dek 120 mm) ; la perméabilité est bonne.

~~Les parcelles au nombre de 4 répétitions par traitement ont une surface de 196 m².~~

La culture se fait en bonnes conditions agronomiques : fumure forte préconisée, labours, traitements phytosanitaires si nécessaires, sarclages, gardiennage contre les oiseaux etc... (VIDAL 1963, RAMOND 1968, JACQUINOT 1971, CHOPART et NICOU 1976).

Les écartements sont ceux adoptés en vulgarisation : 100 x 100 cm ou 90 x 90 cm (mils sanio de 120 jours et souna de 90 jours). Ces écartements sont moins bien définis pour les nouveaux mils nains à faible tallage : 50 x 20 cm ou 45 x 15 cm pour ceux que nous avons testés.

L'irrigation en complément des pluies est réalisée par aspersion au moyen de sprinklers d'angle, à secteur réglable. Les apports d'eau sont contrôlés avec des pluviomètres installés juste au-dessus de la végétation au niveau de tous les points de mesure en particulier et à raison de 4 pluviomètres par parcelle de 196 m². Les bilans hydriques ont été effectués de deux façons différentes :

a/ En place, au moyen de tubes d'accès de 4 mètres de profondeur et de relevés périodiques (hebdomadaires le plus souvent) d'humidité du sol au moyen d'humidimètres à neutrons. A chaque campagne, on part d'un sol asséché au maximum sur la plus grande profondeur possible. En 1976, et 1977, les flux ont été contrôlés par des tensiomètres "soil moisture" installé soit verticalement jusqu'à 150 cm de profondeur, soit horizontalement, de 150 à 400 cm de profondeur, à partir d'une fosse. Les mesures de bilan hydrique ont été très facilitées par des saisons des pluies exceptionnellement déficitaires et telles que le sol, n'a jamais été humecté trop profondément (moins de 150 cm le plus souvent). En veillant à ce que les irrigations apportées en complément des pluies soient modérées, pour qu'elles ne provoquent pas de percolations incontrôlées ou de ruissellement, nous avons pu maîtriser correctement les bilans hydriques. Il faut préciser que le terrain est relativement plat et que des lames verticales sont enfoncées autour des tubages, pour les protéger du ruissellement.

b/ au moyen de cuves de végétation (évapotranspiromètres) de 4 m² de surface et d'un mètre de profondeur. Dans l'ensemble, après une première campagne "à blanc", de mise en place et de contrôle en 1972, les évapotranspiromètres n'ont pas donné sur 5 ans de résultats différents de ceux de la première méthode de bilan hydrique "en place". Ils étaient prévus pour pallier le risque de percolations profondes en cas de saisons des pluies normales à excédentaires qui auraient condamné l'emploi du bilan hydrique "in situ". Il n'était pas évident au départ que l'usage des cuves de végétations s'avèrerait inutile du fait de la sécheresse et il reste indispensable d'en prévoir sur ce genre de dispositif de mesure des besoins en eau. A noter que des tubes d'accès pour sonde à neutrons ont été installés au milieu des cuves et ont permis de faire des bilans de consommation, en attendant l'amorce du drainage gravitaire.

Il s'avère en effet que la saturation des cuves dès le début de la culture, afin d'assurer le drainage et de procéder au bilan hydrique, n'est pas souhaitable et peut induire des différences de traitement et donc de comportement des plantes, par rapport au reste de la parcelle de garde non soumise à cet excès d'arrosage.

2.2.2. Principaux résultats -

Les besoins en eau du mil et les conditions d'obtention des résultats sont résumés dans le tableau 2, sous forme de moyenne de 4 répétitions ; les coefficients de variation sont en général inférieurs à 10 %, tant pour les consommations hydriques globales que pour les rendements en grain et en paille (ces coefficients de variation sont précisés plus loin dans le tableau 7) ; compte tenu des attaques de chandelles par les oiseaux, les rendements grain sont parfois moins homogènes que ceux des pailles.

Tableau 7 - Principaux résultats de besoins en eau portant sur les mils de 120 à 75 jours de durée de cycle obtenus au CNRA de Bambey au Sénégal.

Culture année Pluviométrie Pmm	Traitement et dose d'irrigation complémentaire i	Besoins en eau en mm et coef- ficients $K' = \frac{ETRM}{Ev \text{ Bac}}$	Rendement en kg/ha ramenés à 0 % d'humidité		
			Grain	Rachis	Paille
Mil SANIO de 120 j 1976 P = 399	Arrosé ETRM i = 215	562 $K' = 0,75$	1 882	1 282	13 504
Mil SANIO 120 j 1977 P = 374	Arrosé ETRM i = 283	628 $K' = 0,77$	1 566	1 332	13 343
Mil SOUNA-3 90 j 1973 P = 400	Arrosé ETRM i = 68	417 $K' = 0,72$	2 480	1 254	6 393
Mil SOUNA-3 90 j 1974 P = 492	Arrosé ETRM i = 73	416 $K' = 0,74$	2 789	1 514	5 460
Mil NAIN 75 j 1974 P = 447	Arrosé ETRM i = 51	320 $K' = 0,67$	1 957	1 970	5 444
Mil NAIN 75 j 1975 P = 510	Non arrosé Pluies excédentaires ETR = ETM	327	1 563	1 267	5 075

d'après C Dancette.

2.2.3. Critique des résultats

Au cours de la saison des pluies, la demande évaporative peut fluctuer brutalement, du fait de sécheresses inattendues ou au contraire de séquences excessivement pluvieuses.

Quant aux besoins en eau, ils varient surtout en fonction du degré et de la rapidité de couverture du sol par la végétation. Des variétés hâtives à croissance et développement accélérés, ou semées à des densités élevées, couvrent plus rapidement le sol que d'autres ; elles expriment en début de cycle des besoins hydriques plus importants que les variétés à cycle plus long ou semées à densité plus faible.

Les besoins en eau décroissent aussi avec le vieillissement de la culture. Cette sénescence peut coïncider avec une demande évaporative faible au coeur de la saison des pluies : c'est le cas d'une variété très hâtive de 75 jours levée dès la première pluie. La sénescence peut coïncider au contraire avec une demande évaporative de plus en plus élevée en fin de saison des pluies ou début même de saison sèche ; c'est le cas des variétés de mil sanio de 120 jours.

C'est pourquoi, là encore, il convient de ramener les besoins en eau à la demande évaporative (évaporation d'eau libre en bac normalisé classe A installé sur un sol nu) et de calculer les coefficients : $K' = \frac{ETRM}{Ev \text{ Bac}}$

Dans le tableau 8, les coefficients K' sont exprimés pour des durées de 15 ou 30 jours, au cours de chaque année de mesure et en moyenne sur 2 ans.

Tableau 8 - Evolution des coefficients $K' = \frac{ETRM}{Ev \text{ Bac}}$ au cours du cycle, pour des variétés de mil de 120 jours à 175 jours.

PERIODE EN JOURS	MIL SANIO de 120 jours			MIL SOUNA de 90 jours			MIL NAIN de 75 jours		
	1976	1977	MOY.	1973	1974	MOY.	1974	1975	MOY.
0 - 15	0.15	0.30	0.23	0.26	0.38	0.32	0.44	0.49	0.47
16 - 30	0.35	0.44	0.40	0.49	0.66	0.58	0.61	0.80	0.71
0 - 30	0.25	0.37	0.31	0.38	0.52	0.45	0.53	0.65	0.59
31 - 45	0.77	0.70	0.74	1.09	1.01	1.05	0.84	1.10	0.97
46 - 60	1.07	0.99	1.03	1.26	0.94	1.10	0.79	0.65	0.72
31 - 60	0.92	0.84	0.88	1.18	0.98	1.08	0.82	0.88	0.85
61 - 75	1.12	1.24	1.18	0.98	0.82	0.90	0.75	0.80	0.77
76 - 90	1.24	1.15	1.20	0.72	0.65	0.69			
61 - 90	1.18	1.20	1.19	0.85	0.74	0.80			
91 - 105	1.09	0.94	1.02						
106 - 120	0.71	0.82	0.77						
91 - 120	0.90	0.88	0.89						

D'après C Dancette .

Les variations entre les différentes variétés de mil font ressortir que :

- les valeurs maximales moyennes sont 1,20 pour sanio, 1,10 pour souna, 0,97 pour mil nain.
- les valeurs moyennes varient elles aussi de façon pratiquement linéaire avec la durée du cycle (fig. 11).

Ces deux faits peuvent être liés à la taille respective de ces mils, qui est de l'ordre de 3 à 3,5 m pour les Sanio, 2 à 2,5 m pour les Souna et de 1 à 1,3 m pour les mils nains. De plus, la surface d'une culture de sanio est beaucoup plus irrégulière et en "vague" que celle des mils Souna et nain (ce dernier est le plus homogène). Tout cela pose le problème des advections d'énergie et donc de la dimension des parcelles de mesure de besoins en eau.

Il se peut aussi que les différences trouvées soient vraiment liées à la physiologie et à l'architecture des plantes testées, d'où intérêt de développer les recherches sur l'index foliaire qui est une approche de ce problème.

A partir des valeurs K' retenues et de l'évaporation du bac normalisé classe A, il est intéressant de chiffrer les besoins en eau moyens du mil, en mm/jour, cette donnée étant agronomiquement plus explicite que les coefficients K' , (figure 12) ; on s'aperçoit très bien des exigences hydriques plus fortes en début de cycle, pour les variétés de cycle plus court, mais nettement moins élevées en fin de cycle. On peut se poser la question du semis retardé pour les variétés précoces, en vue de s'affranchir du risque de sécheresse en début de cycle quand les pluies sont encore mal installées. Pour l'arachide à Bambey, ou plus au Sud, au Sénégal c'est une excellente solution (F. FOREST et C. DANCETTE 1982). Pour le mil, la question est plus délicate, avec les problèmes de semis en sec, de maladies ou d'attaques de prédateurs. Toutefois en 1981, nous avons pu constater à Bambey, que le mil ne souffrait pas d'un retard de culture de l'ordre de 15 jours, en cas de pluies de semis survenant à des dates proches de la normale. En revanche des retards plus importants, de l'ordre du mois, s'avèrent souvent catastrophiques. Heureusement, le retard de 10 à 15 jours permet déjà de s'affranchir en grande partie du risque de sécheresse en début de cycle, dans les zones où la pluviométrie est voisine de celle de Bambey (470 mm ou plus dans 80 % des années, et 630 mm en moyenne).

- Mil Sanio de 120 jours -

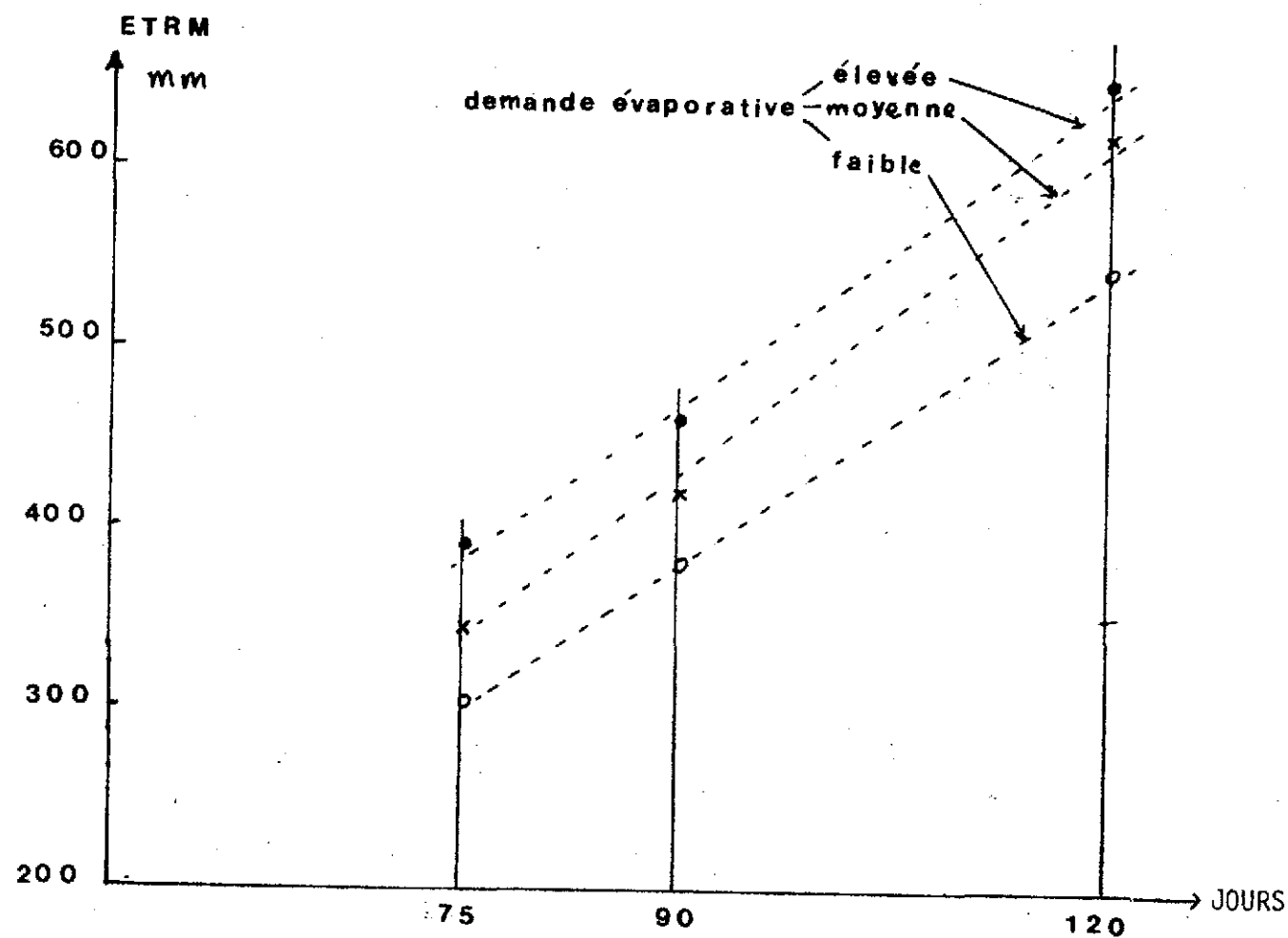
Moyenne donc entre 592 et 604 mm, soit 598 mm

- Mil Souna de 90 jours -

Moyenne entre $\frac{417}{1.01} = 413$ et $\frac{416}{0.98} = 424$, soit 418 mm

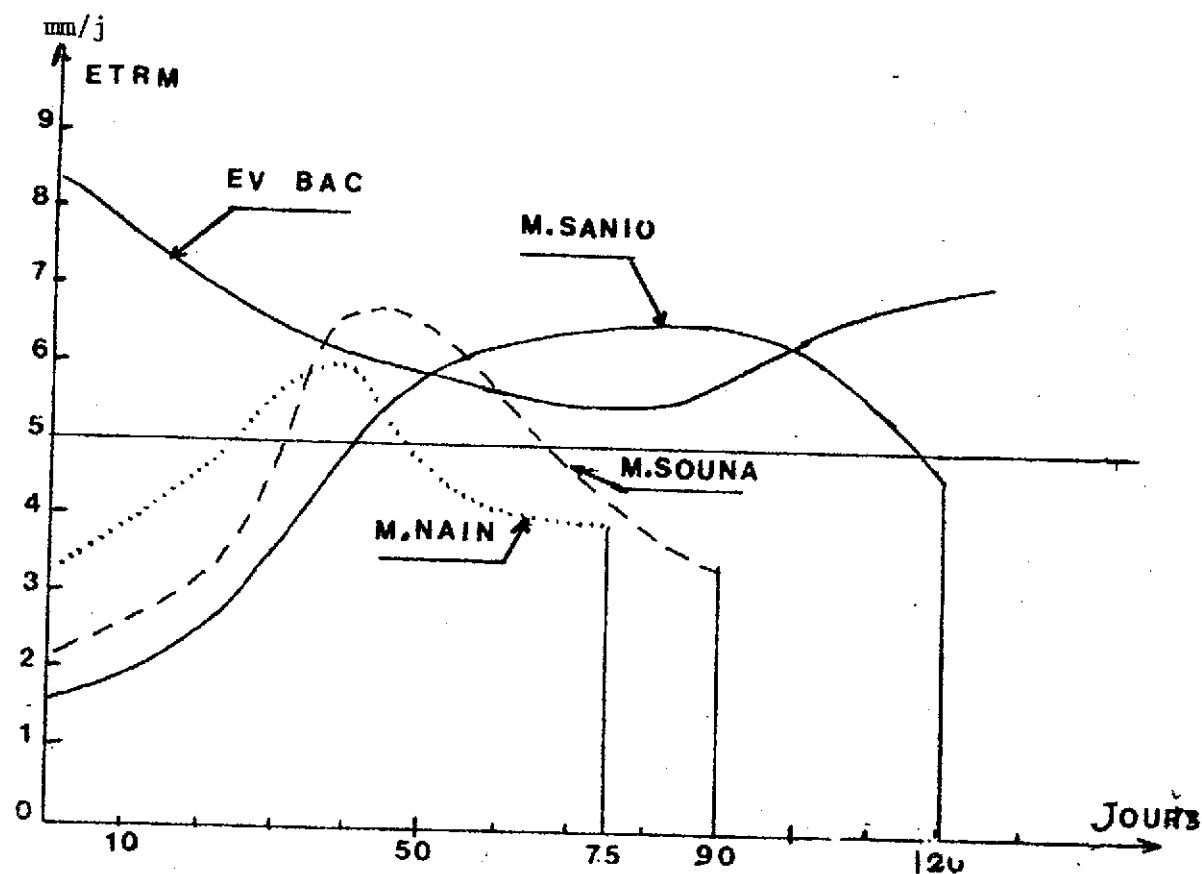
Figure 11

VARIATION DES BESOIN EN EAU GLOBAUX DU MIL EN FONCTION
DE LA DUREE DU CYCLE VEGETATIF ET DE LA DEMANDE EVAPORATIVE



d'après C. Dancette .

Figure 12 - Exemple de comparaison des besoins en eau (ETRM) de trois variétés de mil calculés à partir de Ev Bac moyen (sur 10 ans) - (Bambey, Sénégal).



d'après C. Dancette .



- Mil pain de 75 jours -

Là, les écarts sont un peu plus grands ; il faut préciser qu'en 1974 et 1975, les variétés n'étaient pas encore bien fixées génétiquement et qu'entre ces deux années le matériel végétal avait été modifié avec l'adoption d'un composite d'allure différente (structure dite "céréalière"). On peut cependant retenir la moyenne entre :

$$\frac{320}{0.98} = 327 \text{ et } \frac{327}{0.90} = 393 \text{ soit } \underline{345 \text{ mm}}$$

De la même façon, les extrêmes peuvent être chiffrés, en retenant les demandes évaporatives la plus faible et la plus élevée sur 10 ans :

tableau 9 - Valeurs moyennes et extrêmes des besoins en eau du mil à Bambey
Totaux en mm.

	ETRM minimale	ETRM moyenne	ETRM maximale
Mil SANIO de 120 j	544	598	628
Mil SOUNA de 90 j	380	418	460
Mil NAIN de 75 j	304	345	390

2.2.4. Généralisation des résultats - comparaison avec
les besoins en eau du mil mesurés au Niger

Cette comparaison est délicate, car la variété utilisée au Niger à Tillabéry (variété P3 Kolo) est différente de celles utilisées au Sénégal (Souna 3 ou Sanio). Il semblerait que cette variété P3 kolo soit en fait intermédiaire entre les 2 variétés sénégalaises tant pour la longueur de cycle végétatif (104 jours) que pour le rendement en paille (considéré comme un indice de vigueur végétative).

Les conditions d'aridité de Tillabéry sont aussi plus marquées qu'à Bambey, avec une pluviométrie de 210 mm seulement au lieu de 480 mm à Bambey, pendant les années de mesure. Dans le tableau 10, nous livrons au lecteur les résultats obtenus sur les 2 sites, tout en déplorant qu'une comparaison rigoureuse n'ait pu être faite, à la même latitude et aussi avec la même variété. Cette comparaison, qui pourrait valider ou non la méthode d'utilisation des coefficients cultureux et surtout préciser son domaine de validité, est envisagée pour les années à venir, dans un axe, Sénégal - Mali Haute-Volta, Niger.

Tableau 10 - Besoins en eau du mil au Sénégal et au Niger
comparaison des coefficients culturaux

	Coefficients culturaux par décade												total cycle	rendementsK/ha grain	paille	Pmm	irrig. mm	ETRM mm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
Mil SADIO 120 Jours Bamby Moyenne 2 ans	0.21	0.30	0.45	0.68	0.90	1.05	1.16	1.19	1.18	1.06	0.90	0.75	0.76	1724	13424	387	249	595
Mil SONNA 90 Jours Bamby Moyenne 2 ans	0.31	0.42	0.60	1.02	1.10	1.00	0.92	0.84	0.70	-	-	-	0.73	2635	5927	446	70	417
Mil P3 YULO 104 Jours Tillabéry-Niger 1972	0.40	0.48	0.52	0.68	0.75	0.82	0.82	0.74	0.65	0.54	0.46	-	0.62	2230	9000	210	400	630

d'après C. Dancette .

Pour plus de précisions sur ce problème de la généralisation des résultats des besoins en eau, on pourra se reporter à une synthèse en cours portant sur les besoins en eau des principales cultures pluviales en zone Soudano-Sahélienne,

2.3. Les données disponibles

Deux sources d'information permettent actuellement de disposer de coefficient culturaux pour l'Afrique de l'Ouest Soudano-Sahélienne.

- le référentiel IRAT/Bac Classe A
- le référentiel FAO/bulletin n° 44)

2.3.1. Le référentiel IRAT/Bac Classe A

2.3.1.1. Les données

Les tableaux 11, 12, 13, 14 récapitulent les coefficients culturaux mesurés en Afrique de l'Ouest Francophone pour :

- l'arachide, tableau 11
- le niébé, "
- le soja, "
- le mil, tableau 12
- le sorgho, "
- le maïs, tableau 13
- le riz pluvial, "
- le cotonnier, tableau 14
- les jachères d'herbe. "

ARACHIDE	DECADES ET NUMERO D'ORDRE												Total cycle.	Rendements K/ha		Pluvios. en mm.	Dose d'ir- rigation en mm.	Consomma- tion totale en mm.	Observa- tions.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		grain ou gousse	fânes				
V - 55437 hâtive - 109 jours Tillabéry / Niger 1972	0,36	0,38	0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,73	0,73	0,70	0,56	-	0,56	2 970 (gousse)	-	272	365	58	cycle al- longé (nor- malement 90 jours).
V. 55437 90 jours Bambey/Sénégal 1974	0,41	0,57	0,67	0,90	0,83	0,78	0,77	0,65	0,65	-	-	-	0,69	2 945 (gousse)	3 300	492	72	40	
V - 57422 105 jours Bambey/Sénégal 1973	0,23	0,41	0,65	0,93	1,06	1,04	0,93	0,93	0,92	0,90	0,90	-	0,79	3 660 (gousse)	4 988	400	182	54	
V - 28206 120 jours Bambey/Sénégal 1976/77	0,26	0,38	0,48	0,64	0,83	0,97	1,07	1,00	0,93	0,78	0,74	0,65	0,73	3 699 (gousse)	3 902	374	259	55	
NIÉBÉ																			
Niébé V- 58-57 126 jours Guédi-OMVS 1972-73	0,30	0,55	0,75	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,54	0,52	0,50	0,62	320 A 1 392 (grain)	/	67 A 124	/	746	
Niébé - B 21 75 jours Bambey/Sénégal 1975	0,38	0,60	0,95	1,08	1,00	0,80	0,75	0,72	-	-	-	-	0,76	1 320 (grain)	3 400	535	20	335	
Niébé MOUGRE 75 jours Bambey - 1982	0,42	0,60	0,74	0,97	1,06	1,08	0,80	0,57	-	-	-	-	0,76	1 715 (grain)	3 451	452	0	322	irrigation difficile.
SOJA																			
44 A 73 110 jours Djibelor 1978	0,66	1,00	1,28	1,40	1,44	1,20	0,75	0,52	0,45	0,42	0,40	-	0,80	5 050 (gousse)	2 100	1 490	<50	314	Drainage difficile.

Tableau 11

Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev. Bac normalisé classe A}}$

obtenus en Afrique de l'Ouest francophone sur arachide, niébé et soja.

M I L	DECADES ET NUMERO D'ORDRE												Total cycle	Rendements Kilos/ha		Pluviom. en mm.	Dose irri- gation en mm.	Consommation totale en mm.	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille				
MIL SANIO 120 jours Bambey (2 ans) 1976 et 1977	0,21	0,30	0,45	0,68	0,90	1,05	1,16	1,19	1,18	1,06	0,90	0,75	0,76	1/ 2 035	1/ 13 950	1/ 399	1/ 215	1/ 562	
														2/ 1 623	2/ 14 425	2/ 374	2/ 283	2/ 628	
MIL SOUNA 90 jours Bambey (2 ans) 1973 et 1974	0,31	0,42	0,68	1,02	1,10	1,08	0,92	0,84	0,78	-	-	-	0,73	1/ 2 690	1/ 6 680	1/ 400	1/ 68	1/ 417	
														12/ 2 948	12/ 5 760	2/ 492	2/ 73	2/ 416	
MIL NAIN GAM 75 jours Bambey (2 ans) 1974 et 1975	0,45	0,55	0,75	0,95	0,95	0,80	0,70	0,68	-	-	-	-	0,65	1/ 2 151	1/ 5 940	1/ 447	1/ 51	1/ 320	
								(53)						2/ 1 721	2/ 5 650	2/ 510	2/ 0	2/ 327	
P 3 KOLO 104 jours Tillabéry-Niger (1 an)	0,40	0,48	0,52	0,68	0,75	0,82	0,82	0,74	0,65	0,54	0,46		0,62	2 230	9 000	210	400	630	
SORGHO																			
V - 137 - 62 133 jours Tillabéry-Niger 1972	0,52	0,54	0,60	0,62	0,70	0,75	0,80	0,84	0,84	0,84	0,84	0,80	0,70	2 890	18 000	273	630	845	Fréquence d'irrigat. insuffisante.
												0,40							
V - 137 - 62 110 jours Maradi - Niger (5 ans)	0,40	0,60	0,80	1,10	1,20	1,20	1,20	1,20	1,10	0,90	0,70	-	0,95	potentiel de 4 000	?	582 sur 5 ans	60 à 250	500	Référence Bac la terre type ORSTOM
V - 126 150 jours Mogtado - Haute-Volta 1968	0,60	0,70	0,76	0,88	1,04	1,12	1,24	1,24	1,00	0,92	0,92	0,92	0,91	1 525	7	701 Juin à Octobre	?	682	
V - CE 67 90 jours Bambey - 1975	0,37	0,44	0,50	0,88	0,96	0,90	0,82	0,78	0,68	-	-	-	0,70	2 000 à 2 500 sol sableux + fumier	7 000	542	0	390	Grande hétérogénéité sol peu favorable
V - ? FAO - OMVS Richard Toll 1972	0,30	0,55	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	"	"	"	"	"	détruit (oiseaux)	-	-	-	-	culture détruite par les oiseaux

Tableau 12 - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$ obtenus en Afrique de l'Ouest francophone, sur mil et sorgho.

MAÏS	DECADES ET NUMERO D'ORDRE												Total du cycle	Rendements en kg/ha		Pluvio- métrie en mm.	Dose d'irriga- tion en mm.	Consomma- tion tota- le en mm.	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille				
MAÏS V. MASSA Yamba V. KOLO P3 100 jours. Mogtado / Haute-Volta 1968 - (billons)	0,76	0,84	0,92	1,10	1,20	1,26	1,26	1,20	1,06	0,68	-	-	0,92	4 330	?	701 (juin à octobre) 128 en mai	?	?	?
MAÏS V. BDS Bambey - 110 jours (à plat) - 1975 Sol Dior / Sénégal Moyenne 2 essais	0,39	0,45	0,50	0,58	0,74	0,79	0,93	0,93	0,91	0,86	0,66	-	0,70	1 250 et 1 546	2 200 et 2 300	544	81	624	Sol peu favorable
MAÏS V. MAKKA Guédié/Sénégal FAO-OMVS 1972 - (billons)	0,30	0,40	0,64	0,85	0,90	0,90	0,85	0,80	0,62	0,45	-	-	0,67	1 280	?	124 (très aride)	?	635	
RIZ PLUVIAL																			
Diverses variétés Djibouty-Casamance 1973-1976	0,60	0,80	1,02	1,10	1,20	1,20	1,18	1,12	0,90	0,80	0,76	-	0,97	2 660 à 4 795	3 470 à 4 500	1 170 à 4 500	< 100	340 à 440	V. 5383 V. 1KP V. 3026 V. 144 B9
Riz de casier semis direct - TN n°1 Guédié 1972/1973 FAO-OMVS	0,50	0,80	1,10	1,16	1,20	1,20	1,20	1,20	1,18	1,06	0,72	0,30	0,97	2 750 à 4 320	-	1 972-94 1 973-124	?	1 306 913	
SE 349 D 122 jours * Bouaké/Côte d'Ivoire 1975	10,90	10,92	10,96	10,98	11,00	11,02	11,07	11,37	11,43	11,43	11,37	11,03	1,12	potentiel 6 000	?	?	9 mm/j sauf pluie	440	
MOROBEKEMAN 145 jours Bouaké/Côte d'Ivoire 1975	0,80	0,86	0,93	0,97	1,02	1,08	1,17	1,15	1,34	1,40	1,34	1,28 à 1,22	1,14	potentiel 4 500	?	?	9 mm/j sauf pluie	542	

Tableau 13 - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$ obtenus en Afrique de l'Ouest francophone, sur maïs et riz pluvial.

* Bouaké est mentionné bien que n'appartenant pas aux zones climatiques soudanienne et sahélienne.

COTONNIER	DECAIES ET NUMERO D'ORDRE												Cycle total	rendements Kg/ha		Pluvio. en mm.	Dose irrigation en mm.	Consommation totale en mm.	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille				
V. ALLEN 131 jours Tillabéry /Niger Site 1 - 1972	0,24	0,38	0,62	0,78	0,88	0,94	1,00	1,00	1,00	0,96	0,88	de 10,62 à 0,44	0,71	2 130	-	222	835	925	vigueur médiocre sol peu profond
IDEM Niger Site 2 - 1972	10,54	10,58	10,66	10,76	10,88	10,98	11,07	11,07	arrêt des irrigations				-	1 530	-	222	470	785 (réserves sol)	sol plus profond bonne vi- gueur ETM/80
ALLEN 333 125 jours OMVS - Gambia Sénégal 1972/3	0,24	0,30	0,36	0,60	0,76	0,81	0,82	0,84	0,82	0,81	0,74	0,40	0,63	1 040 à 1 430	-	1972 - 80 1973 - 124	-	1972-725 1973-706	
HLI et A. 333 130 jours Maradi/Niger 1966-70	10,44	10,52	10,62	10,74	10,84	10,96	11,01	11,03	11,03	11,01	10,96	0,93 à 0,87	0,84	entre 2 000 et 4 000	-	582	-	645	Référence: bac entamé "ORSTOM"
BJA SM 67 135 jours Bambey/Sénégal 1976	10,42	10,48	10,58	10,70	10,82	10,92	11,02	11,10	11,15	11,20	11,20	1,13 à 0,46	0,85	2 781	-	399	-	738	
BJA 119 jours Moptado/Haute-Volta 1968	10,78	10,82	10,88	10,96*	11,20	11,20*	11,16	11,14	11,04	10,90	10,84	10,78	10,97	2 450	-	919	-	566	interpolati- on der- nière ré- colte à 146 jours.
JACHÈRE D'HERBE																			
100 jours Bambey/Sénégal 1980	10,58	10,72	10,80	10,87	10,93	10,95	10,95	10,93	10,84	10,75	-	-	10,83	-	4 500 m.s.	407	161	534	

Tableau 14 - Coefficients K' = $\frac{\text{Besoins en eau}}{\text{Ev Bac normalisé classe A}}$, obtenus en Afrique de l'Ouest francophone sur cotonnier et jachère d'herbe.

2.3.1.2. Critique des données et commentaires

Il ne faut pas s'étonner si les coefficients K' sont souvent assez différents, même pour une semblable variété, en début de cycle. Au début de la culture, le sol est pratiquement nu et l'évapotranspiration est essentiellement de l'évaporation à la surface du sol. Cette évaporation dépend alors de la nature du sol et du rythme des apports hydriques ; un sol fréquemment humecté est bien plus affecté par l'évaporation qu'un sol recevant un gros apport puis "s'automulchant" jusqu'à l'apport survenant bien plus tard (10 à 15 jours par exemple).

Pourtant les deux rythmes d'apport peuvent avoir le même effet favorable sur la jeune culture encore très peu exigeante en eau. Il y a là une faiblesse de la méthode basée sur les coefficients cultureux qui ne peut pas prendre parfaitement en compte, en attendant la couverture totale du sol par la végétation, la nature du sol et le rythme des apports d'eau. Cependant, à ce stade de faible consommation, les erreurs d'estimation de K' ont une importance assez limitée. Une solution consisterait à moduler pendant les 20 ou 30 premiers jours les coefficients, en fonction de la fréquence des apports ou encore à décomposer le "complexe culture" en ces deux composantes : sol nu d'une part et couvert végétal d'autre part.

Dans le cas de Maradi au Niger, il s'agissait d'un bac enterré de type ORSTOM. Les différences par rapport au bac normalisé classe A sont toutefois peu importantes : de 2 à 5 % à Bamby selon la période de l'année.

On manque assez souvent de données sur les rendements en paille qui permettent pourtant d'avoir une idée de la vigueur de la culture et de sa représentativité.

Il existe des risques d'erreur sur les mesures de besoins en eau et donc sur les coefficients cultureux. Il convient donc d'être très vigilant sur les conditions d'obtention des résultats. Citons entre autres :

**Des risques de percolation* : certaines quantités d'eau peuvent échapper au bilan de consommation, d'où une évapotranspiration surestimée. C'est le cas du sorgho à Tillabéry, avec des fréquences d'irrigation insuffisantes, d'où des doses un peu trop fortes compte tenu de la capacité de rétention du sol, et des risques de percolation d'ailleurs signalés par les auteurs de cette expérimentation.

**Des défauts du drainage* : parfois les cuves d'évapotranspiration drainent mal, lors des séquences trop pluvieuses ; c'est le cas de Djibelor au Sénégal pour le riz pluvial et le soja. Il y a alors des risques d'engorgement et l'évapotranspiration peut être surestimée momentanément ; par la suite, le drainage se prolongeant au delà de la période normale et de façon excessive, l'évapotranspiration est au contraire sous estimée. En moyenne, sur une période suffisamment longue, le bilan peut heureusement être correct. A Djibelor, ces difficultés étaient partiellement résolues en recourant simultanément au drainage gravitaire classique, à un drainage accéléré par des bougies poreuses mises en dépression, à l'élimination de l'eau stagnant en surface, à des contrôles piézométriques ; le bilan n'était clos que lorsque la nappe de la cuve était suffisamment rabattue.

L'exemple du cotonnier montre bien qu'il est hasardeux de généraliser à une zone trop vaste, des coefficients cultureux identiques, alors que la pluviosité et la demande évaporative peuvent être très différents: tableau n°15 et figure 13.

Tableau 15 - Variabilité géographique des coefficients cultureux K' du cotonnier en fonction de la pluviosité et de la demande évaporative.

Station	Coefficient culturel global K'	Pluviosité en mm.	Evaporation bac en mm/jour.
Guédé	0,63	102	9,1
Tillabéry	0,71	222	9,9
Maradi	0,84	582	5,9
Bamby	0,85	399	6,4
Mogtédo	0,97	919	4,9

d'après Imbernon et Auckhenthaler .

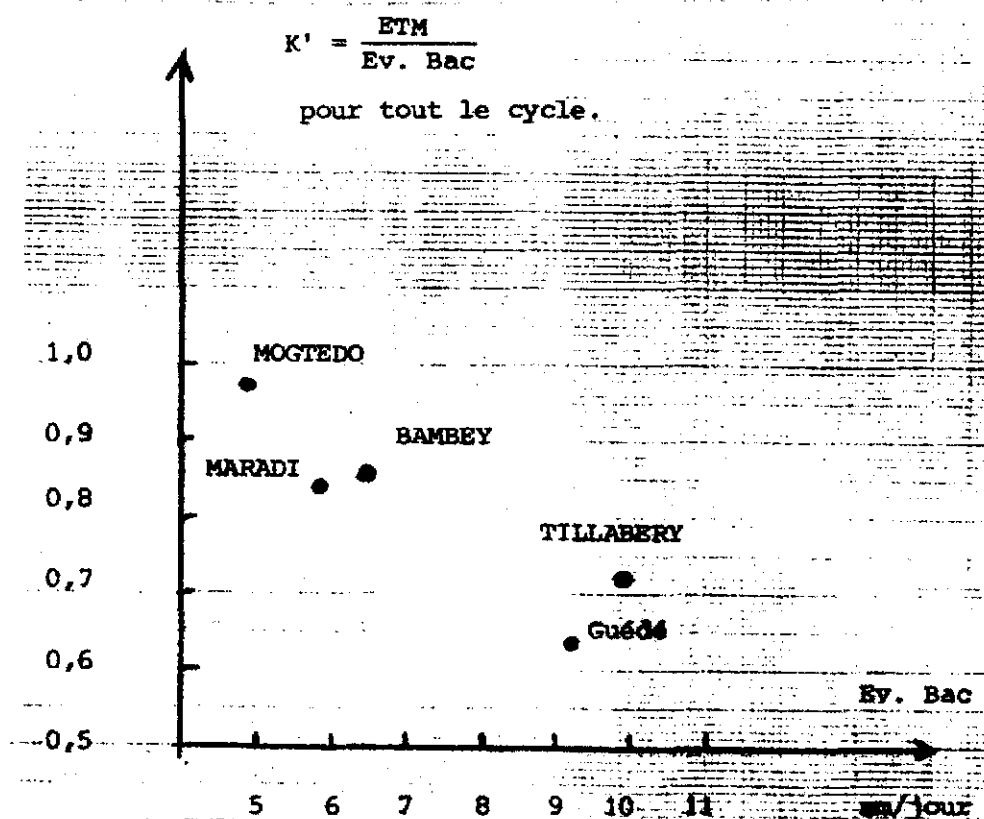


Figure 13 - Variabilité du coefficient culturel pour le cotonnier en Afrique Tropicale de l'Ouest.

2.3.1.5. Proposition d'une méthode d'utilisation pratique de la base de donnée

Dans la pratique, l'utilisateur ne trouvera pas exactement la série des coefficients K correspondant à sa situation. Aussi, une technique simple de création du vecteur K est proposée (F. FOREST). Elle s'inspire de la variation de la valeur des coefficients culturaux mesurés pour différentes longueurs de cycle. L'exemple ci-dessous en explicite le principe :

- Maïs de 90 jours -

Il faut faire sauter 2 valeurs de K et pour tenir compte de la plus grande rapidité de croissance de la plante, les 2 valeurs sont supprimées en début de cycle.

exemple :

Référence Maïs 110 j	0,37	0,44	0,53	0,67	0,80	0,90	0,96	0,99	0,98	0,88	0,70
Situation étudiée Maïs 90 j	-	0,44	0,53	-	0,80	0,90	0,96	1,09	0,98	0,88	0,70

et la valeur maximale (0,99) est augmentée d'une unité (10 %) pour mieux prendre en compte le raccourcissement et la période sensible.

- Maïs de 140 j -

Les 5 valeurs sont ajoutées en début de cycle par interpolation. On réduit de 10 % les valeurs rencontrées à partir de la valeur de pointe soit :

0,37	0,40	0,44	0,48	0,53	0,60	0,67	0,73	0,80	0,90	0,96	0,89	0,88	0,78	0,60
réduction de 10 %														

2.3.2. Le référentiel FAO -

2.3.2.1. La méthode proposée (d'après bulletin FAO n°24)

Les valeurs des coefficients culturaux données par cette méthode se rapportent à l'utilisation d'une demande évaporative de référence étant :

- soit le bac Classe A ou Colorado corrigé,
- soit l'ETP Penman.

Cette méthode repose sur une schématisation du développement de la culture en 4 périodes :

- | | |
|--|--|
| - période 1 : période initiale | - Levée et début de la colonisation du champ (couverture du sol < 10 %). |
| - période 2 : période de développement | - Colonisation du champ par la culture (couverture du sol < 80 %). |
| - période 3 : période de pleine végétation | - Durant cette période le sol est complètement couvert. Elle prend fin au début de la phase de maturation (changement de couleur sur chute de feuilles). |
| - période 4 : fin de cycle | - De la fin de la période, précédente à la maturité complète ou la récolte. |

La valeur des coefficients culturaux pendant ces différentes périodes est calculée :

- en se référant à la figure 14 pour l'évaluation du K_c en phase 1 en fonction de la fréquence de la pluie.

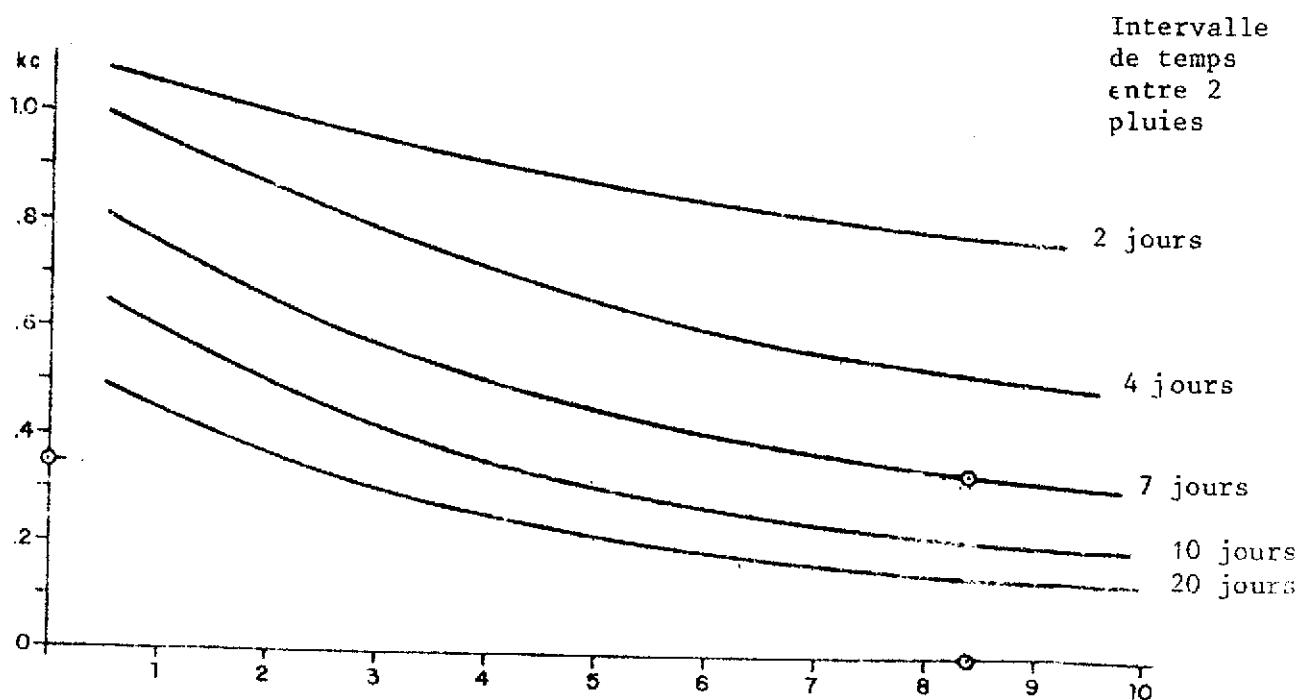


Figure 14 -

Coefficient K_c au cours de la période initiale.

E_{To} durant la période en mm/jour.

par interpolation entre les valeurs Kc (phase 1 et phase 3) pour déterminer les valeurs de la phase 2.

- en se référant au tableau 16 pour les valeurs de Kc en phase 3.
- par interpolation entre les valeurs Kc (phase 3 et valeur du tableau 16) en phase 4.

Tableau 16 - Valeur des coefficients culturaux - (phase 3 et 4 proposé par la FAO)

Culture	phase de la culture	Vent 0-5 m/s	Vent 5-8 m/s
Maïs	3	1.05	1.1
	4	55	55
Coton	3	1.05	1.15
	4	65	65
Mil	3	1.0	1.05
	4	3	3
Arachide	3	95	1.0
	4	55	55
Sorgho	3	1.0	1.05
	4	5	5

2.3.2.2. Difficultés d'utilisation -

La principale difficulté d'utilisation d'une telle méthode est de bien connaître le déroulement du cycle de la culture. Le découpage en 4 phases sera, sans une bonne connaissance de terrain, souvent arbitraire.

L'autre problème qu'on est amené à se poser est la véritable valeur et le domaine d'application de tels coefficients culturaux définis à partir d'une méthode très générale.

2.4. Critique des référentiels

2.4.1. Comparaison des valeurs des coefficients culturaux obtenus à partir du référentiel IRAT/FAO.

Il s'agit d'abord de rappeler que ces coefficients culturaux ne sont pas comparables tels quels ; les uns étant une évaluation de l'ETM à partir du Bac A, les autres à partir de ETo. On pourra d'ailleurs regretter que très souvent lorsque des coefficients culturaux sont donnés, leur origine n'est pas spécifiée.

Pour un mil de 90 jours dans les conditions de Bambey au Sénégal, la comparaison entre ces coefficients culturaux est donnée par le tableau 17.

Tableau 17 - Comparaison des valeurs coefficients culturaux -

Décade	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kc Bac A	0,31	0,42	0,68	1,02	1,10	1,08	0,92	0,84	0,78
Kc F.A.O. ETo=ETP Perman	0,35	0,35	0,65	1	1	1	0,8	0,6	0,3
Kc F.A.O* corrigé Bac A (ETo=K _p EU BAC A)	0,41	0,41	0,76	1,18	1,18	1,18	0,94	0,71	0,35
Biais coef. F.A.O./Bac %	32	2	12	14	7	9	2	18	55

Ce tableau montre qu'en cours de cycle les différences sont peu importantes et peut-être négligeables compte tenu de la sensibilité des méthodologies utilisant ces données (bilan hydrique etc...)

En début de cycle la valeur du Kc dépendra essentiellement du déroulement de la campagne pluviométrique.

En fin de cycle la valeur attribuée au Kc n'a que peu d'importance compte tenu de la faible influence de cette période sur l'élaboration du rendement. Toutefois pour des cycles longs (>100 j) le biais des valeurs FAO/BAC pourra devenir trop élevé pour être acceptable. (cf. chap. V).

2.4.2. Définition d'un référentiel Kc Afrique de l'Ouest

Comme nous l'avons vu un certain flou existe actuellement dans la détermination de la valeur des coefficients culturaux et de leur domaine d'applicabilité. Aussi semblerait-il intéressant de proposer pour l'Afrique de l'Ouest :

- Une étude comparative des coefficients culturaux pour une même culture (longueur cycle et architecture identique) dans des sites situés dans des zones écologiques différentes afin de faire effectivement le point sur les possibilités d'extrapolation des valeurs trouvées en un site.
- Une synthèse des valeurs de coefficients culturaux proposés pour les cultures et longueur du cycle habituellement pratiquée en Afrique de l'Ouest.

* Coefficient de correction Bac A 0,85 à Bambey en saison des pluies (méthode F.A.O.).

$$(ET_o = K_p \text{ EU BAC A}) \quad K_p = 0,85$$

2.5. Conclusion

- La vérification de la possibilité d'extrapolation des données Kc d'un site à l'autre et le cas échéant la proposition d'une méthode de correction apparaît comme devoir être la priorité dans ce domaine.
- La seconde priorité semble devoir être la constitution d'une base de donnée "besoin en eau en agriculture pluviale semi-aride.
- Alors que pour les cultures irriguées l'approche coefficients culturaux semble tout à fait satisfaisante, pour les cultures pluviales, un certain nombre de lacunes semble devoir être soulignée. Il apparaît en effet que le coefficient cultural tel que défini actuellement ne peut tenir compte :
 - . de la densité du semis,
 - . de la variété de la culture (port,...),
 - . du passé de cette culture (stress hydrique etc...).

Jusqu'à présent une approche aussi précise n'était pas indispensable, ce qui n'est plus le cas dans la mesure où l'utilisation du bilan hydrique est devenu un outil de diagnostic en milieu paysan et qu'il est devenu nécessaire de tenir compte des contraintes techniques imposées par le milieu.

2.6. Bibliographie

- BERNARD E.A. -

"La détermination des pertes d'eau par évapotranspiration dans les projets d'aménagement intégré du Fleuve Sénégal" Rapport de mission Avril 1967.

- CHAROY J. -

"Les cultures irriguées au Niger-Résultats de 7 années de mesures et d'expérimentations (1963-1970)".
SEHA TARNA in Agro Trop. vol XXVI n°9 septembre 1971.

- COCHEME J. - FRANQUIN P. -

"Une étude d'agrocimatologie de l'Afrique sèche au Sud du Sahara en Afrique Occidentale" FAO-UNESCO WMO Rome 1967.

- DANCETTE C. -

"Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal" in isotopes and radiation techniques in soil physics and irrigation studies - AIEA SM. 1976/36 - Vienna 1973.

- DANCETTE C. -

"Cartes d'adaptation à la saison des pluies des mils à cycle court dans la moitié Nord du Sénégal" Comité consultatif AIEA Bamby 10-14 Novembre 1975 FAO-AIEA Tech. doc. n° 192 - Vienna 1976.

- DANCETTE C. -

"Besoins hydriques de cultures pluviales et politique agricole de l'eau, dans les zones Centre et Nord du Sénégal" - ISRA CNRA Bamby-juillet 1976.

- DANCETTE C. -

"Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des cultures" IRAT-CNRA Bamby 1973 In AGRO. TROP. n° 4 - octobre , décembre 1976.

- DANCETTE C. -

"Besoins en eau et adaptation du mil à la saison des pluies au Sénégal ISRA-CNRA Bamby - Colloque AAASA-IBADAN - Février 1978.

- DANCETTE C. -

"Estimation des chances de réussite de 3 types d'arachide (90,105 et 120 jours) à partir de l'analyse pluviométrique - programme Brunet Moret (ORSTOM) le cas de Bamby" - ISRA-CNRA Bamby Juillet 1978.

DOORENBOS J. - PRUITT W.O. -

"Crop water requirements" irrigation and drainage paper
n° 44 - FAO Rome 1975.

- FOREST F. -

"Bilan hydrique et prospective décadaire des besoins en eau
des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne" -
Cahiers pédagogiques et opérationnels - Ministère de la
Coopération - Paris 1974.

- FRANQUIN C. - FOREST F. -

"Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle
des termes du bilan hydrique".
AGRO. TROP. XXXII n° 1 - 1977.

- GILLET N. - JENNY -

Rapports de campagne 1967-68 de la station expérimentale
d'hydraulique agricole (SEHA) de Mogtado - Haute-Volta
IRAT - Paris 1969.

- KALMS J.M. - VALET S. -

"Détermination des besoins en eau de différentes cultures
vivrières et industrielles, dans les conditions pédoclimatiques
des terrasses du Niger à Tillabéry" - Rapport INRAN - Niamey
Juillet 1975.

- LEGOUPIL JC - 1974 -

Etudes des besoins en eau des cultures et recherche de
la valorisation maximale de l'eau en milieu méditerranéen
Périmètre irrigué du Haut Cheliff

- RIJKS D. -

"Agro météorologie" Chapitres 2, 3 et 4 notamment PNUD, FAO
OMVS-AGP/REG 114 - Rapport technique n° 2 - Rome 1976.

- RIJKS D. -

"Besoins en eau des cultures - compte rendu des travaux
réalisés à Guedé et à Kaédi - 1971/1974 - DT n° 130 - Juillet 1974

- ROCHE M. - al. -

"Etude méthodologique pour l'utilisation des données climatolo-
giques de l'Afrique Tropicale" Livre III notamment :
"évapotranspiration et déficits hydriques" CIEH - Ministère de
la Coopération ORSTOM- Paris 1974.

3 - L'OFFRE EN EAU : LA PLUVIOMETRIE

3.1. Introduction

La pluviométrie est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser agroclimatologiquement une région ou une situation agricole. La caractéristique principale de ce paramètre est que sa moyenne n'a aucune valeur en tant que tel : Londres reçoit en moyenne moins de pluie que Sokoto qui est en climat semi-aride.

A pluviométrie il faut donc associer :

- la répartition de la pluviométrie dans le temps,
- la loi de distribution de la pluviométrie (probabilité).
- la variabilité spatiale de la pluviométrie.

3.2. Les données disponibles

La pluviométrie est le domaine où une véritable base de données (critiquées) existe et est opérationnelle.

- publications du CIEH - pluviométries journalières jusqu'à 1965.
- données ASECNA (non critiquées),
- études ICRISAT Rainfall climatology of Africa.

La pluviométrie journalière constitue une base de travail indispensable pour l'agrométéorologie. Aussi, compte tenu des problèmes de transfert de l'information rencontrés en Afrique, on ne peut que souhaiter que, même si une banque de données pluviométriques informatisées est créée, des publications type CIEH à diffusion importante soient maintenues.

Ce qui est beaucoup moins bien connu est l'intensité des précipitations qui est un paramètre relativement important particulièrement en début de cycle (eau réellement infiltré sur la parcelle).

3.3. L'utilisation du vecteur pluviométrique

3.3.1. *Sa variabilité spatiale -*

C'est le principal problème auquel on se heurte en région tropicale : l'extrême variabilité de la pluviométrie journalière sur une petite zone. Si pour des études générales cet aspect n'est pas à soulever, il devient extrêmement important dans le cas de suivi de culture de diagnostic à la parcelle ou d'avertissement. Actuellement aucune méthode (type krigeage) n'est utilisable par l'agrométéorologie permettant par un coefficient d'abattement d'évaluer la pluie efficace sur une zone d'étude.

menée par le CIEH sur la station de Saria qui devrait permettre une première approche.

3.3.2. Variabilité interannuelle de la pluviométrie -

Ce problème est relativement bien abordé compte tenu des séries de données disponibles.

Les lois de distribution sont généralement :

- . normales (pluviométries annuelles),
- . racines normales ou Log. normales (pluviométries mensuelles),
- . loi gamma (pluviométrie décadaire).

Le seuil d'occurrence de la pluviométrie habituellement choisi est le quintile faible (seuil de pluviométrie dépassé 8 années sur 10) ; pourtant, compte tenu de la sécheresse et de la série de pluviométries exceptionnellement basses enregistrée ces dernières années on est amené à remettre en cause ce seuil.

Il est certain que la publication de synthèses pluviométriques contenant une analyse statistique de la variabilité de la pluviométrie seraient d'une grande utilité (cf. publication CIEH bulletin décadaire, Rainfall Climatology of West Africa ICRISAT).

3.4. La pluie efficace

La pluie efficace est définie comme celle qui est utilisée par les plantes. Une partie de l'averse du fait de la succession des apports ou de l'intensité de l'averse est perdue par ruissellement ou infiltration en dessous de la zone des racines.

Aussi à des fins pratiques a-t-on été amené à définir la notion de pluie efficace

3.4.1. Les modèles de ruissellement -

Malgré des études menées dans ce sens par l'ORSTOM (Roose) et par le CIEH et l'IRAT (Saria), aucun modèle de ruissellement n'est actuellement disponible permettant de calculer les pertes suivant :

- . le type de sol,
- . le type de culture,
- . le travail du sol.

La méconnaissance quantitative de ce phénomène handicape surtout en début de campagne, une bonne connaissance de l'offre en eau et toute modélisation de l'alimentation en eau des cultures. Aussi, une action de recherche permettant de mieux connaître ce phénomène semble prioritaire.

3.4.2. Méthodologie d'évaluation de la pluie efficace -

Cette méthodologie est employée pour évaluer les besoins en eau d'irrigation de complément d'une culture à l'aide d'un bilan hydrique simplifié (première approche dans le calcul d'un projet) et est proposé par la SATEC (détermination des besoins en eau d'irrigation des plantes cultivées J. ARRIGHI DE CASANOVA).

La méthode proposée pour déterminer la fréquence de ces pluies efficaces repose sur l'hypothèse suivante : toutes choses égales par ailleurs, pour une période donnée de la saison de croissance des cultures, en un site donné la pluie efficace varie d'année en année comme la pluviométrie totale.

On peut adopter les coefficients du tableau ci-dessous pour déterminer la pluviométrie efficace d'une fréquence donnée pendant la saison de croissance d'une culture, en fonction de la pluviométrie annuelle moyenne. Les mêmes coefficients sont valables pour un mois quelconque (voir tableau 18).

tableau 18 - Coefficients moyens applicables à la pluviométrie efficace -

Pluie annuelle Moyenne (mm)	FREQUENCE (%)				
	50	60	70	80	90
100	0.84	0.72	0.61	0.50	0.38
200	0.90	0.81	0.71	0.62	0.51
300	0.93	0.85	0.78	0.69	0.58
400	0.95	0.89	0.82	0.74	0.65
500	0.96	0.90	0.83	0.75	0.67
600	0.97	0.91	0.84	0.78	0.70
700	0.97	0.92	0.86	0.80	0.72
800	0.97	0.93	0.87	0.81	0.73
900	0.98	0.93	0.88	0.82	0.75
1.000	0.98	0.94	0.89	0.83	0.77
1.200	0.98	0.95	0.91	0.85	0.79
1.400	0.99	0.95	0.91	0.86	0.80
1.600	0.99	0.95	0.91	0.87	0.82
1.800	0.99	0.95	0.92	0.88	0.83
2.000	0.99	0.95	0.92	0.89	0.85

On notera qu'aucune étude comparative des différentes méthodes de détermination de la pluie efficace et de leur applicabilité en Afrique de l'Ouest n'a été réalisée. (Renfro. Equation, US Bureau of reclamation method, potential evapotranspiration/précipitation - Ratio method India, USDA SCS Methods)

3.5. Etude des périodes de sécheresse, pluvieuses et de seuils pluviométriques

L'étude de l'interaction de la pluviométrie sur l'activité agricole a amené à déterminer pratiquement un certain nombre de seuils au delà desquels l'activité est soit possible soit remise en cause :

- | | |
|---------------------------|--|
| Exemple : seuil de labour | - pluviométrie > 20 mm |
| seuil de semis | - déterminé en fonction du nombre de jours sans pluie probable. |
| seuil de sécheresse | - 10-15 jours sans pluie en phase sensible pour le riz pluvial à Bouaké. |
| seuil de surplus d'eau | - période de pluviométrie trop longue avant la récolte (sorgho). |

L'étude de ces seuils et de leur fréquence d'apparition n'a pas été entreprise jusqu'ici bien qu'elle puisse apporter des éléments importants pour l'estimation des risques en culture pluviale.

Un certain nombre de modèles journaliers reproduisant les caractéristiques d'une série pluviométrique ont été mis au point et devraient permettre d'appliquer à l'Afrique de l'Ouest une approche statistique de ces événements. T.A. BUISSAULT (1978) a fait une synthèse de ces modèles. On remarquera que tous, superposent deux processus :

- un processus pour décrire la succession des jours secs et pluvieux,
- un processus pour répartir les hauteurs de pluie dans les jours pluvieux.

3.6. Conclusion

Même si parmi les données permettant de comprendre les relations eau-sol-plante, la pluviométrie semble au premier abord le paramètre le mieux connu, il apparaît :

- * que des études méthodologiques devraient permettre d'en améliorer l'utilisation :
 - . pluie moyenne sur une zone donnée,
 - . pluie efficace,
- * que l'étude statistique des jours sans pluie ou avec trop de pluie pourrait améliorer la connaissance des risques climatiques en agriculture.

3.7. Bibliographie

- Aménagement du territoire -
 "Quelques données agroplyuimétriques de 16 stations du Sénégal. Période 1932-1965". Ministère du plan et du développement
 Dakar-Avril 1967.
- BIRIE HABAS J. - DANCETTE C. -
 "Projet d'études pluviométriques appliquées à l'agriculture Sénégalaise.
 A - analyse fréquentielle des pluies,
 B - application possible : station d'avertissements agro-météorologiques" - IRAT Sénégal-CNRA Bambey - Avril 1973.
- BRUNET - MORET -
 Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale - Rapport de synthèse - Avril 1968.
- BUIHAND T.A. - 1978 -
 Some remarks on the use of daily rainfall models - J. Hydrol. (Amsterdam), 36 (3/4) : 295-308.
- CAQUOT A. - 1941 -
 Ecoulement des eaux pluviales - Compte rendu de l'Académie des Sciences , Séance du 20 octobre 1941.
- CIEH - ORSTOM -
 Précipitations journalières (1 volume par états membres du CIEH).
- CIEH - MINISTERE FRANCAIS DE LA COOPERATION - F. FOREST -
 Bilan hydrique efficace décadaire - 1974 -
- CORNET A. -
 "Données météorologiques dans les différents points d'étude" - Documents techniques ORSTOM-Dakar rapports annuels de 1975 à 1978.
- COX D.R. - MILLER H.D. - 1968 -
 The theory of stochastic processes. Mehuen London, 2ème édition, 398 p.
- CREUTIN D. - OBLED C. - TOURASSE P. - 1980 -
 Analyse spatiale et temporelle des épisodes pluvieux cevenols. La météorologie. VIème série, n° 20-21 : 233-242.

- CROLEY T.E. - al. - 1978 -

Raiston creek hourly precipitation model water Resour. Res. 14 (5): 485-490.

- DANCETTE C. -

Utilisation de l'analyse statistique de la pluviométrie pour obtenir les chances de réussite des cultures d'arachide - Exemple de Bambey - DDC ISRA 12 p.

- DELHOMME J.P. - 1978 -

Kriging in the hydrosociences. Advances in water resources, vol. 1 n° 5 : 251-265.

- DESBORDES M. - RAOUS P. - 1976 -

Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques. La houille blanche n° 1 : 37-43

- DE LANNOY -

"Données météorologiques recueillies au Centre pour le développement de l'horticulture à Cambérène". CDH-DGPA-MDR puis ISRA - rapports annuels de 1973 à 1980.

- DUPONT DE DINECHIN -

Quelques données sur la variabilité des pluies de septembre en Haute Volta - Août 1971.

- GIGOU -

Etude de la pluviosité en Côte d'Ivoire, Application à la riziculture pluviale.

- RC. HILLS - JHT. MORGAN -

Rainfall statistics : an interactive approach to analysing rainfall record for agricultural purposes.

- ICRISAT -

Rainfall climatology of west africa - MIK Sivakumar - S.M. Virmani and S.J. Reddy.

- IRAT - ISRA -

Rapports annuels d'activité "météorologie des stations ISRA CNRA Bambey - 1964 à 1981 compris.

- MASSON J.M. - 1977 -

Persistance des états pluvieux en fonction de leur durée. Analyse de 52 années d'enregistrements pluviométriques à Montpellier - Bel Air Cahiers de l'ORSTOM, Série hydrologie XIV(2) : 173-189.

- RIJKS D. -

"Etudes portant sur l'analyse de la régularité des pluies, dans le bassin du fleuve Sénégal". FAO-OMVS - Mars 1972.

- RIJKS D. -
"Données météorologiques recueillies à Richard-Toll, Guédé,
Samé, Kaédi - FAO - OMVS Dakar - rapports annuels 1970 à 1975.
- ROMUALD ROBERT -
Pluviométrie et culture cotonnière en moyenne Côte d'Ivoire.
- SECK M. -
"Les orages dans la région occidentale de l'Afrique". Thèse
Faculté de Sciences de l'Université de Paris - Octobre 1969.
- SECK M. -
"Etude des principaux facteurs agrométéorologiques au Sénégal"
Météo Nationale - TP U.T. Sénégal - Agro. Trop. Vol. XXV n° 3 -
Mars 1970.
- REDDY S.J. - SIVAKUMAR MYK. - VIRMANI S.M. -
Rainfall climatology of west Africa : Niger ICRISAT information
Bulletin n° 5.
- WILLIOT P. -
"Quelques résultats sur la pluviométrie des stations de Vélingara,
Kolda et Sédhiou - Séfa. Application à l'agriculture" -
IRAT Sénégal - CNRA de Bambey - 1971.
- WOODHEAD - WAWERN ES. - LAWES EF. -
Expected rainfall and Kenya Agriculture confidence limits for large
areas at minimum cost.

4 - LE SOL

4.1. Introduction

Les progrès réalisés depuis quelques décennies dans divers domaines : génétique, fertilisation, défense des cultures ont fait que l'eau est devenue dans les régions arides et subhumides, l'un des principaux facteurs limitants de la production végétale.

Sa valorisation est un problème complexe dépendant non seulement de la connaissance des besoins en eau de la plante et de l'apport pluviométrique mais aussi du rôle tampon que joue le "réservoir" sol et des répercussions qu'il aura sur les possibilités réelles d'alimentation hydrique des cultures.

Dans ce chapitre nous nous proposons d'examiner les moyens mis en oeuvre pour étudier les relations eau-sol.

4.2. Considérations physiques: le réservoir sol

4.2.1. *Humidité volumique et humidité pondérale -*

Le sol est considéré comme un système dispersé intégrant les trois phases, solides, liquides, et gazeuses.

L'eau liquide occupe les espaces disponibles que l'on caractérise par les notions de micro et macroporosité.

Il est possible de connaître à un instant t la quantité d'eau exprimée en poids dans 100 grammes de sol. Peu coûteuse, cette méthode a l'inconvénient de détruire le sol.

$$a / H_{\text{massique}} = \frac{M_w}{M_s} \frac{\text{Masse d'eau}}{100 \text{ g sol sec}} \quad (\text{passé à l'étuve}).$$

Il est possible, grâce à l'utilisation de la sonde à neutron de connaître la teneur en eau à l'instant t exprimée en cm^3 d'eau pour 100 cm^3 de sol en place.

$$b / H_{\text{volumique}} = \frac{V_w}{V_t} \quad (V_w : \text{volume de l'eau}, V_t : \text{volume total}).$$

La relation entre (a) et (b) définit la densité apparente du sol à l'état sec.

$$c / \frac{H_v}{H_m} = \frac{V_w}{V_t} \times \frac{M_s}{M_w}$$

Comme 100 g d'eau occupent 100 cm^3 .

$$V_w = M_w$$

$$d / \frac{H_v}{H_m} = \frac{M_s}{V_t} = \rho_a$$

C'est la définition de la densité apparente du sol à l'état sec.

4.2.2. Signification de la densité apparente sèche pour l'alimentation hydrique de la plante -

Elle est de peu d'intérêt puisqu'elle caractérise le sol en place non amélioré. Elle est utilisée pour comparer les sols entr'eux. C'est donc un critère de nature pédologique.

4.2.3. Densité du solide (densité moyenne des particules) -

C'est le rapport de la masse totale de terre sèche au volume en cm^3 qu'occuperait l'échantillon de sol à l'état sec.

$$\rho_s / \rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (V_s : \text{Volume de la partie solide})$$

4.2.4. Relation entre porosité et densité apparente -

$$\rho_t = \frac{M_t}{V_t} : \text{densité apparente} = \frac{\text{Masse totale}}{\text{Volume total}}$$

La porosité, c'est l'indice du volume relatif des pores dans le sol

$$f / f = \frac{V_f}{V_t} \quad (V_f : \text{volume des pores})$$

d'où :

$$f = \frac{V_t - V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{M_s} \times \frac{M_s}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

4.3. La réserve utile

4.3.1. Définition -

La réserve utile (RU) est le volume d'eau utile maximum que peut stocker le sol. Elle correspond à la différence entre l'humidité à la capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement.

La capacité au champ : C'est la limite en deça de laquelle l'eau est retenue par capillarité dans la microporosité du sol et au-delà de laquelle l'eau s'écoule par gravité dans la macroporosité. Dans ce cas interviennent alors les phénomènes de percolation induisant des pertes d'eau par drainage profond, d'engrais par lixiviation, et les phénomènes de destruction par diminution de la COHESION.

En grandimétrie du sol étudié cette humidité est mesurée aux pF 2.5 , 2.8 ou 3.

Le point de flétrissement : C'est l'humidité qui correspond au volume d'eau fortement retenu par les forces capillaires et que les racines ne peuvent plus extraire (pF = 4,2).

On a donc $RU \% = pF (3 \text{ ou } 2,8 \text{ ou } 2,5) - pF 4,2$ (en pondéral).

Mais il est traditionnel d'exprimer la RU en millimètres, ce qui permet un calcul de bilan rapide lors des irrigations ou des pluies exprimées dans la même unité.

Il faut en ce cas connaître la densité apparente et :

$$RU \text{ mm} = RU \% \times DA \times e / 100$$

e = épaisseur de l'horizon en millimètres.

4.3.2. La réserve en eau utile mobilisable par la plante -

En terme pratique, on notera que la réserve réellement utilisable par la plante sera étroitement liée au volume de sol exploité par les racines.

En terme agricole, on soulignera que l'aptitude à l'enracinement devient faible à nulle lorsque la densité apparente atteint la valeur $\rho_a = 2$ (cas des horizons cuirassés ou indurés fréquents en Afrique de l'Ouest vers la profondeur 50 cm).

4.3.2.1. Effet de l'enracinement -

Une plante est caractérisée par une capacité d'enracinement. On citera les plantes à enracinement superficiel telles que le riz et les cultures maraîchères et les plantes à enracinement profond (> 1 m) arachide, mil, sorgho, maïs, coton, niébé.

On calculera la RU réelle de la plante à partir de la RU sur 1 m par la formule.

$$RU \text{ plante} = RU \text{ 100} \times \frac{Z}{100}$$

4.3.2.2. Effet des techniques culturales -

Le labour augmente la porosité du sol en créant une fissuration artificielle.

Tableau 18 - Effet du travail du sol sur la porosité -
(exemple du Sénégal)

TYPE DE SOL OU SITE	POROSITE GLOBALE	
	Témoin	Labour
Sol Diorsableux	38,1	44,5
Dek argilosableux	40,0	46,4
Nioro du Rip (ferrugineux tropical)	42,6	47,2
Sefa (sol beige)	44,9	47,9
Dune fleuve Sénégal (Dieri)	45	50

La porosité globale estime le volume relatif disponible pour l'air l'eau et par suite pour le développement des racines. C'est à ce niveau que le labour influence le mode d'alimentation en eau et fertilisante de la plante en augmentant le terme $\frac{Vf}{Mt}$ (en humide) et $\frac{Vf}{Ms}$ (en sec).

4.3.3. Evaluation et mesure de la réserve utile -

4.3.3.1. Estimation d'une valeur fiable de la RU. -

On ne reviendra pas sur la critique des différentes méthodes (mesures sur échantillon ou in situ) de calcul de la réserve utile mais plutôt compte tenu de l'hétérogénéité des sols sur le degré de fiabilité des mesures. En effet, dans ce type de population, la moyenne est souvent un très mauvais estimateur et risque même de conduire à de grossières erreurs si la distribution est très dispersée.

Aussi plusieurs approches semblent envisageables suivant l'échelle à laquelle on travaille parcelle ou région.

4.3.3.2. Approche à l'échelle de la parcelle

Exemple d'étude en cours de réalisation sur le périmètre de Ferké II
(P. LANGEILLIER Mai 1983) -

Habituellement la RU, est simplement déterminée en prenant la valeur moyenne de tous les prélèvements. Compte tenu du type d'échantillon, la méthode testée propose d'y substituer la médiane qui est la valeur centrale des mesures faites.

La distribution de la population sera étudiée par le biais de la distribution de la moyenne de l'échantillon ; on pourra ainsi calculer l'effectif minimum à prélever compte tenu de la confiance de ce type d'échantillonnage.

D'un point de vue pratique et économique, on testera diverses méthodes de détermination de la RU sans passer par les pF.

- Pour les points de flétrissement :

- . On considère qu'à la récolte le sol est au point de flétrissement. L'humidité est alors déterminée de deux façons différentes :

- a) séchage à l'air libre (ce qui impose de travailler en milieu de saison sèche) -
- b) séchage à l'étuve.

- . Ces humidités devront être corrélées à l'humidité à pF 4,2.

- Pour la capacité au champ :

- . On considère qu'en septembre mois de fortes précipitations le sol est à la capacité au champ. L'humidité du sol en place est alors déterminée à l'étuve uniquement.

- . Elle sera corrélée à l'humidité à pF (2,5 ou 3).

La RU sera déterminée en attribuant à la parcelle la plus petite des valeurs de RU rencontrées à condition que l'unité du sol auquel elle s'applique occupe au moins un tiers de la surface totale de la parcelle.

Au stade actuel d'avancement des travaux, on ne dispose que des humidités des sols en place après séchage à l'air libre et à l'étuve. A titre d'exemple l'étude statistique de ces premières données a été effectuée.

Elle permet de constater que :

- les intervalles de confiance de la moyenne et de l'écart type ont une précision suffisante .
- les intervalles de confiance de la moyenne mais surtout de l'écart-type des échantillons Air libre et Etuve sont comparables les dispersions sont donc identiques et le séchage Air libre pourra remplacer le séchage étuve

- Il en ressort que l'effectif minimum à prélever est identique dans presque tous les cas entre les deux méthodes Air libre ou étuve.
- les sols de type 4 (Sols ferrallitiques typiques jaunes ou modaux) présentent la plus mauvaise dispersion, et surtout pour le premier horizon.

En prenant 40 échantillons dans les séries 6* et divers, on s'assure d'une précision d'estimation de la moyenne de 10 %, ce qui est très largement suffisant pour le sujet qui nous occupe. Par contre, pour obtenir le même degré de précision dans la série 4, il faudrait prendre 100 échantillons (ce qui est très supérieur aux effectifs des autres horizons, mais il vaut mieux donner la primeur au premier).

Localement des relations ont été mises au point qui permettent de relier réserve utile et teneurs en éléments fins du sol. C'est le cas de la Vallée du Goulbi de Maradi où GILLET et CHAROY ont mis au point ce type de relation.

Quatre classes de sol, ont été déterminées en fonction de la plasticité. La relation existant entre la capacité de rétention, la plasticité, la teneur en argile et limon et les pF est la suivante :

- | | |
|------------------------|--|
| - sols non plastiques | $A + \frac{L}{2}$ en % de 5 à 12 pF 2,5** |
| - sols peu plastiques | $A + \frac{L}{2}$ en % de 12 à 22 pF 2,5 à 3 - |
| - sols plastiques | $A + \frac{L}{2}$ en % de 22 à 50 pF 3 - |
| - sols très plastiques | $A + \frac{L}{2}$ en % de 50 à 72 pF 3 - |

Dans ces limites, la teneur en eau à la capacité de rétention s'établit comme suit :

- | | |
|--------------------------------------|-----------------------|
| - sols non plastiques | $Y = 0,901 x - 0,77$ |
| - sols peu plastiques | $Y = 0,821 x + 0,194$ |
| - sols plastiques et très plastiques | $Y = 0,330 x + 10,98$ |

La teneur en eau au point de flétrissement s'établit à pF = 4,2 pour les 4 types de sols :

$$Y = 0,254 x + 0,403$$

Y = humidité pondérale en %
 x = teneur en % $A + \frac{L}{2}$

* Sols série 6 : sols ferrallitiques remaniés

* A = teneur en argile

** pF à la capacité de rétention

4.3.3.3. Evaluation de la RU au niveau du terroir -

Il s'agit dans la plupart des cas d'effectuer un zonage pour déterminer la vocation agricole des sols. Compte tenu de la sensibilité des principales méthodologies de suivi de l'alimentation hydrique des cultures au paramètre RU, il semble qu'on puisse se limiter à n'envisager que 4 classes de RU données par le tableau 19.

tableau 19 - Principales classes de RU -

Classe de R.U.	Situations agropédologiques caractéristiques
30 mm	. enracinement limitant
50 mm	. sol à texture limitante
80 mm	. sol argilosableux sans limitation pédologique
120 mm	. sol tendance argileuse sans limitation pédologique.

Dans le cadre de cette démarche les figures 14 et 15 évaluent la RU moyenne pour différents types de sol au Niger et au Sénégal.

De la même façon les figures 16, 17, 18 évaluent surtout la place dans la toposéquence et les conditions agropédoclimatiques la R.U. du sol.

4.3.3.4. Evaluation de la R.U. au niveau régional -

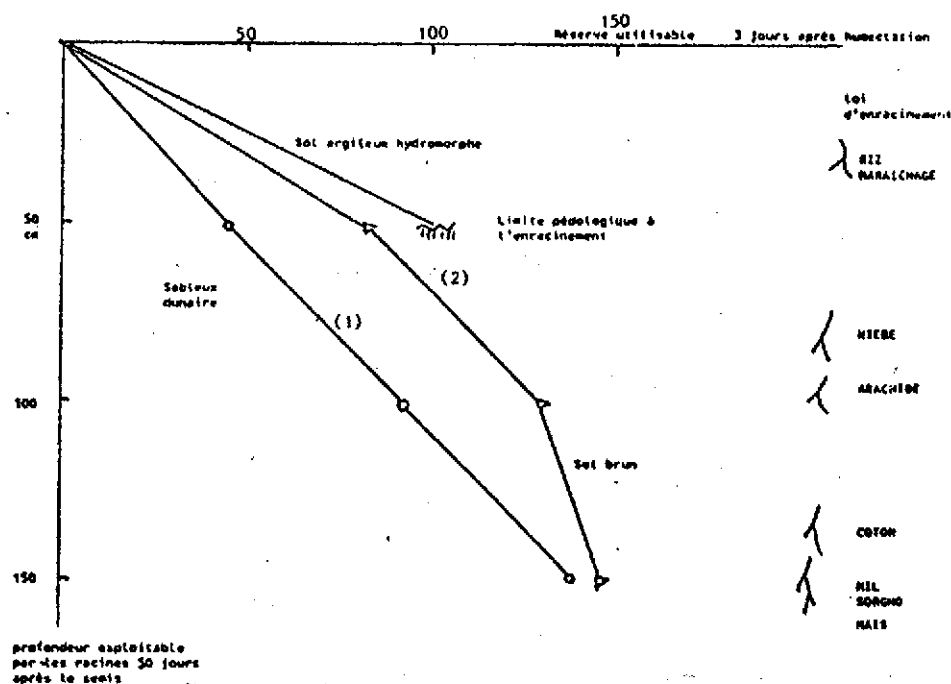
A ce niveau, compte tenu des connaissances dont on dispose actuellement toute généralisation hâtive retenant une valeur unique de la R.U. nous semble contestable.

Le plus judicieux semble de raisonner à plusieurs niveaux de R.U. (établissement de 3 ou 4 cartes d'aptitude pour une culture, 1 carte par RU).

Nous en donnerons pour exemple le zonage d'aptitude pédoclimatique à la riziculture pluviale en Côte d'Ivoire (Workshop riz pluvial Bouaké, étude IRAT en cours de parution).

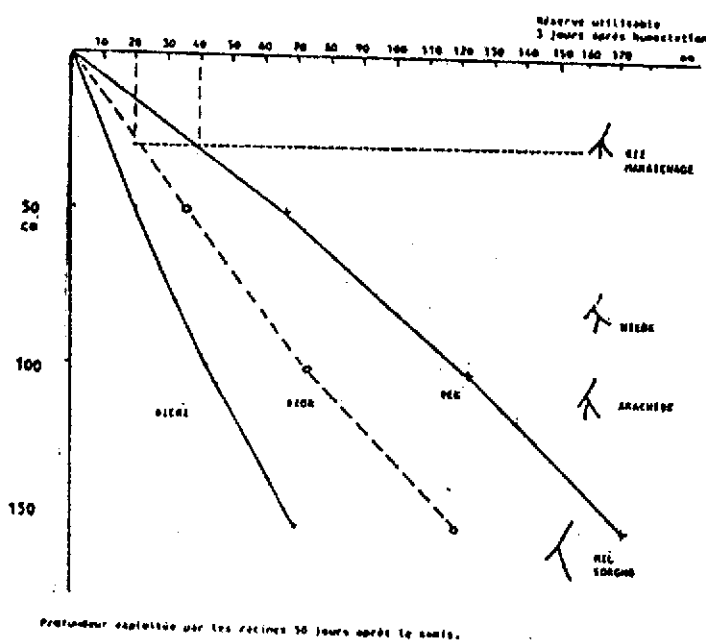
Il est certain que les suivis d'hivernage par la télédétection dans l'infrarouge thermique devrait permettre la définition d'une RU "paramètre".

Figure 14 - Caractérisation des principaux types de sol des terrasses du Niger.



d'après F. FOREST

Figure 15 - Caractérisation des principaux types de sol sableux du Sénégal.

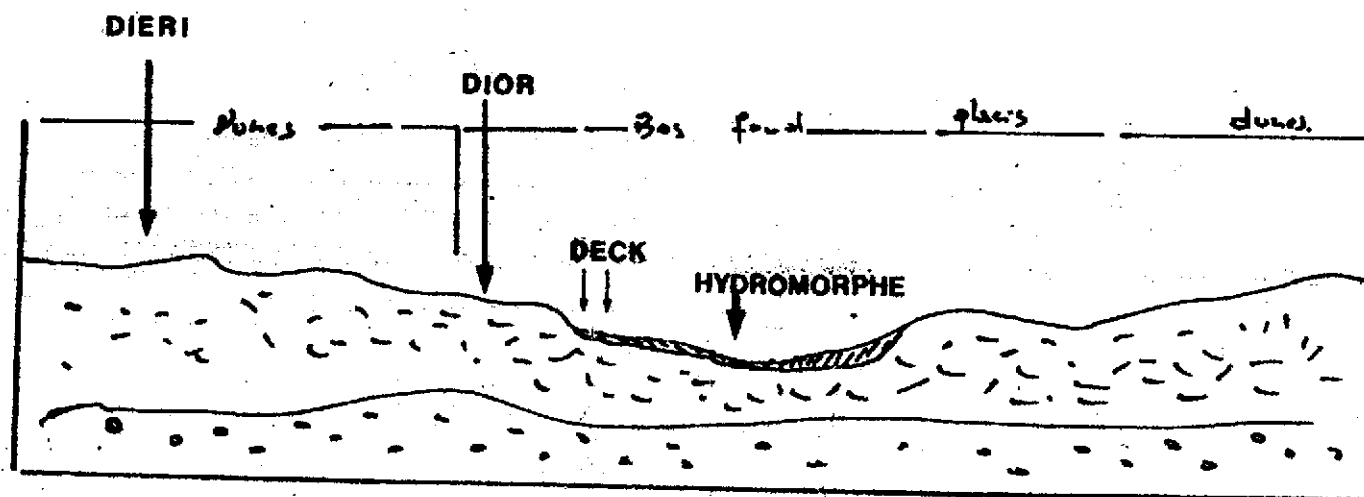


d'après F. FOREST.

Fig. 16 : TOPOSEQUENCE SAHELIEENNE SUR DEPOT SABLEUX EOLIEN

PLUVIOMETRIE $0 < P < 600 \text{ mm}$

TYPE SOL	CODE	TEXTURE	Lame d'eau en mm (sur 0-100 mm)			RU (0-100 cm)
			Capacité rétention	Point flétrissement	pa	
Sableux dunaire	Diéri	sable	56 mm	10 mm	1.4	46 mm
Sableux grossier	Dior	sable + limon	105 mm	25 mm	1.5	80 mm
Argilo-sableux	Deck	argile+limon	162 mm	36 mm	1.6	126 mm
Hydromorphe	Hyd	argile	182 mm	94 mm	1.6	88 mm



Toposéquence en zone sahélienne
sur dépôt éolien

Fig. 17 : TOPOSEQUENCE SOUDANO SAHELIEENNE SUR SOCIE CRISTALLIN
ET AFFLEUREMENT CUIRASSE 600 < P < 1000 mm

Code	Type	Texture	Capacité de rétention (mm)	Capacité au point Flétrissement (mm)	Densité apparente	Réserve utile mm sur (0-100 cm)
FCU	Ferrugineux sur cuirasse	gravillonnaire	132	62	1,5	70
FGL	Ferrugineux sur glacis	argilo-sableux	173	99	1,6	74
FBG	Ferrugineux brun bas glacis	argileux	291	171	1,5	120
V	Vertisol	argileux	349	200	1,7	149
HYD	Hydromorphe	argileux	182	94	1,5	87

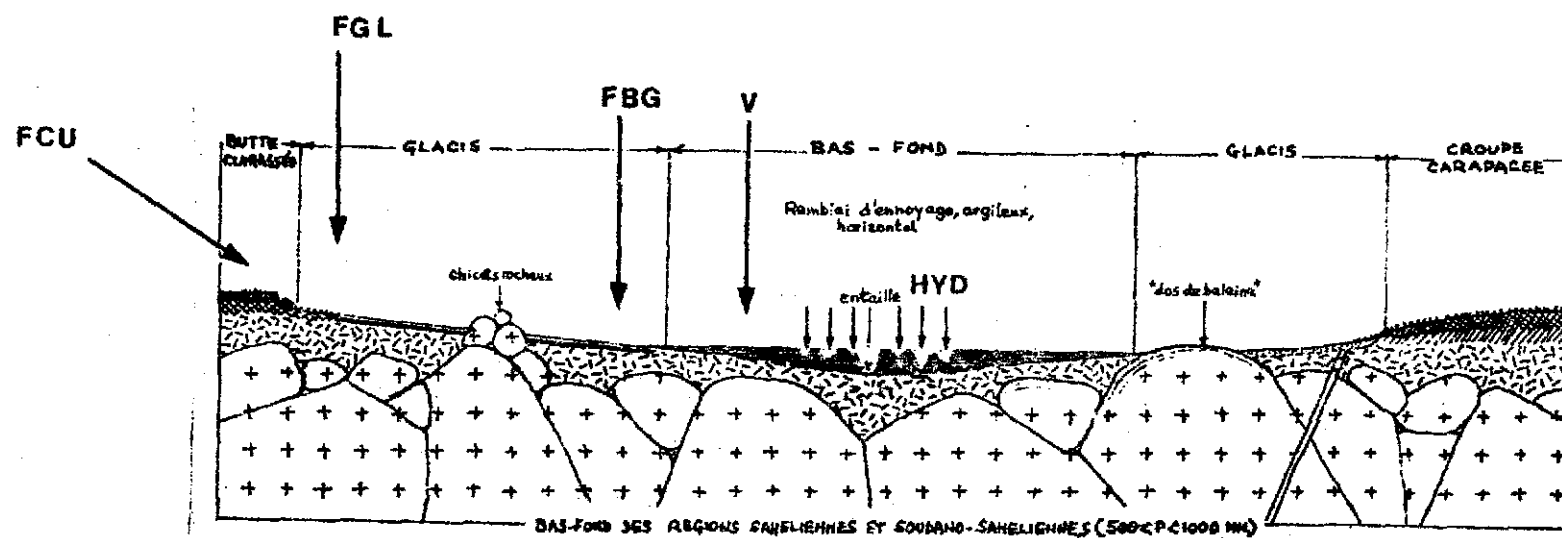
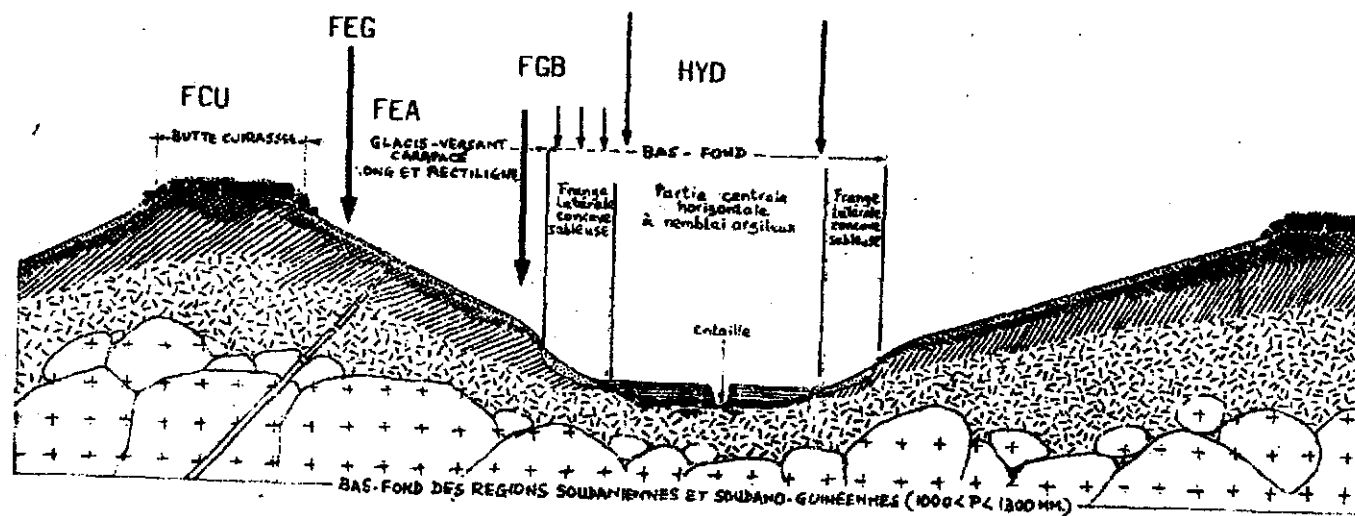


Fig. 18 : TOPOSEQUENCE SOUDANAIENNE SUR SOCLE CRISTALLIN ET BUTTES
CUIRASSEES 1000 < P < 1300 mm

CODE	TYPE SOL	TEXTURE	Capacité rétention	Point de flétrissement	densité apparente	réserve ut. 0-100 cm en mm
FCU	Ferrugineux sur cuirasse	gravillonnaire	132	62	1,5	70
FEG	Ferrallitique gravillonnaire	argile + concretions	148	98	1,6	50
FEA	Ferrallitique ancien	argileux	271	181	1,5	90
FGB	Ferrugineux brun bas glacis	argileux	291	171	1,6	20
HYD	Hydromorphe vertique	argileux	347	200	1,8	47



4.4. Effet des techniques culturales sur l'économie de l'eau *

4.4.1. Rôle des techniques culturales sur l'économie et la valorisation de l'eau -

L'intérêt de la mise en oeuvre des techniques culturales se pose en termes très différents selon que la parcelle est cultivée depuis un laps de temps déterminé, ou que les cultures sont pratiquées sous rotation, ce qui est le cas pour la majorité des agriculteurs. Il a aussi été démontré que la productivité d'une culture de sorgho tendait vers une limite basse même en conditions optimales de fertilisations (fig. 19) minérales. Seule l'apport de matière organique semble garantir une stabilité du rendement.

Les techniques culturales ne peuvent avoir une rentabilité à moyen terme, que si elles intègrent la gestion de la fertilité et en particulier la réincorporation en sol de la matière organique.

En terme de valorisation de l'eau, il semble que le maintien du rendement passe par l'obtention chaque année d'un enracinement profond. A ce niveau le rôle de la préparation du sol par un travail approprié au type de sol et à la culture pratiquée est primordial.

Ainsi on démontre que malgré la fluctuation de la pluviométrie, la production d'arachide est supérieure si l'on réalise le labour (fig. 20). On peut admettre que le gain de production correspond à une augmentation de la consommation hydrique de la plante donc à un accroissement de la réserve en eau stockée et exploitée par les racines entre deux épisodes pluvieux.

Par ailleurs, ce qui est la caractéristique de l'arachide, le labour n'empêche pas qu'il y ait un effet dépressif de l'excès d'eau sur la production mais on peut admettre qu'il l'atténue.

En terme économique, le travail du sol a pour effet de réduire la variabilité du rendement et d'accroître sensiblement le rendement espéré.

Le problème qui se pose au développeur est d'évaluer le gain net espéré et de savoir s'il couvre le coût de l'investissement.

Le lecteur notera qu'en année sèche, le labour n'autorise pas un gain élevé de production. Ce qui signifie que cette technique ne peut être valablement appliquée que dans les situations favorables où elle pourra être rentabilisée.

4.4.2. Amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol -

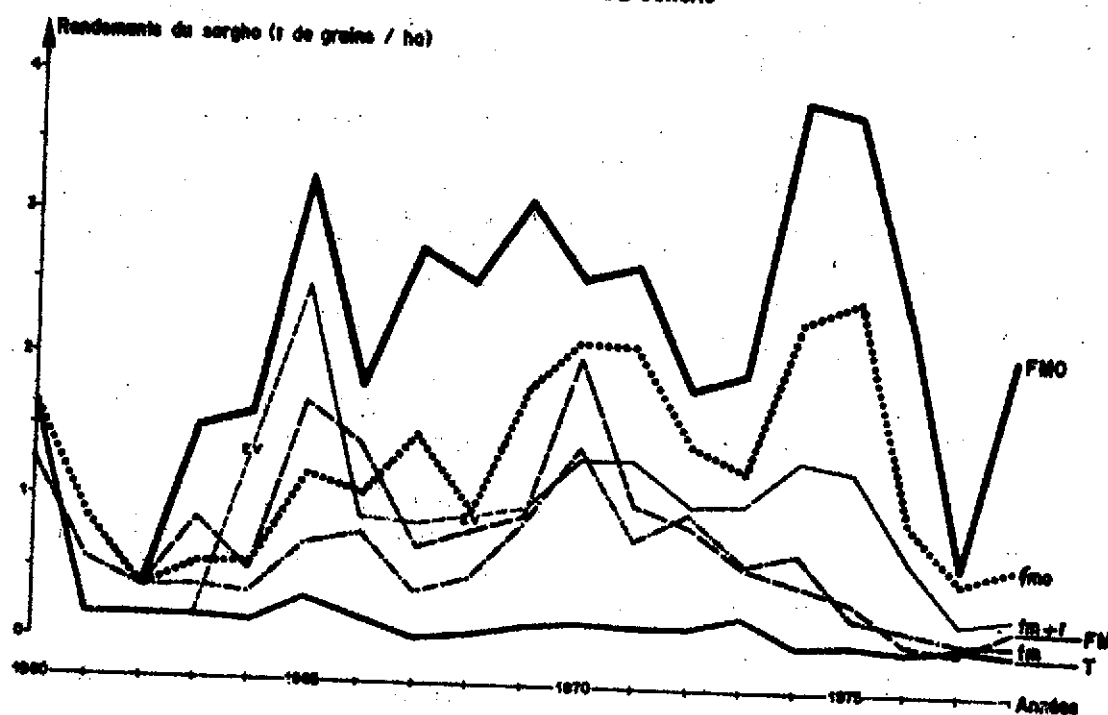
Il s'agit là d'un rôle habituellement reconnu au labour. Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour le mettre en évidence et en mesurer l'importance ; les plus courantes sont les mesures comparatives effectuées sur témoin non travaillé et sur sol labouré de :

- . perméabilité in situ,
- . relevés de profils hydriques,
- . ruissellement.

* Résumé d'après C. Charreau et R. Nicou Bulletin Agronomique N°23

Figure 19

ESSAI ENTRETEN DE LA FERTILITE - SARIA MONOCULTURE DE SORGHO



d'après Pichot et Sédogo .

DESCRIPTION DE L'ESSAI

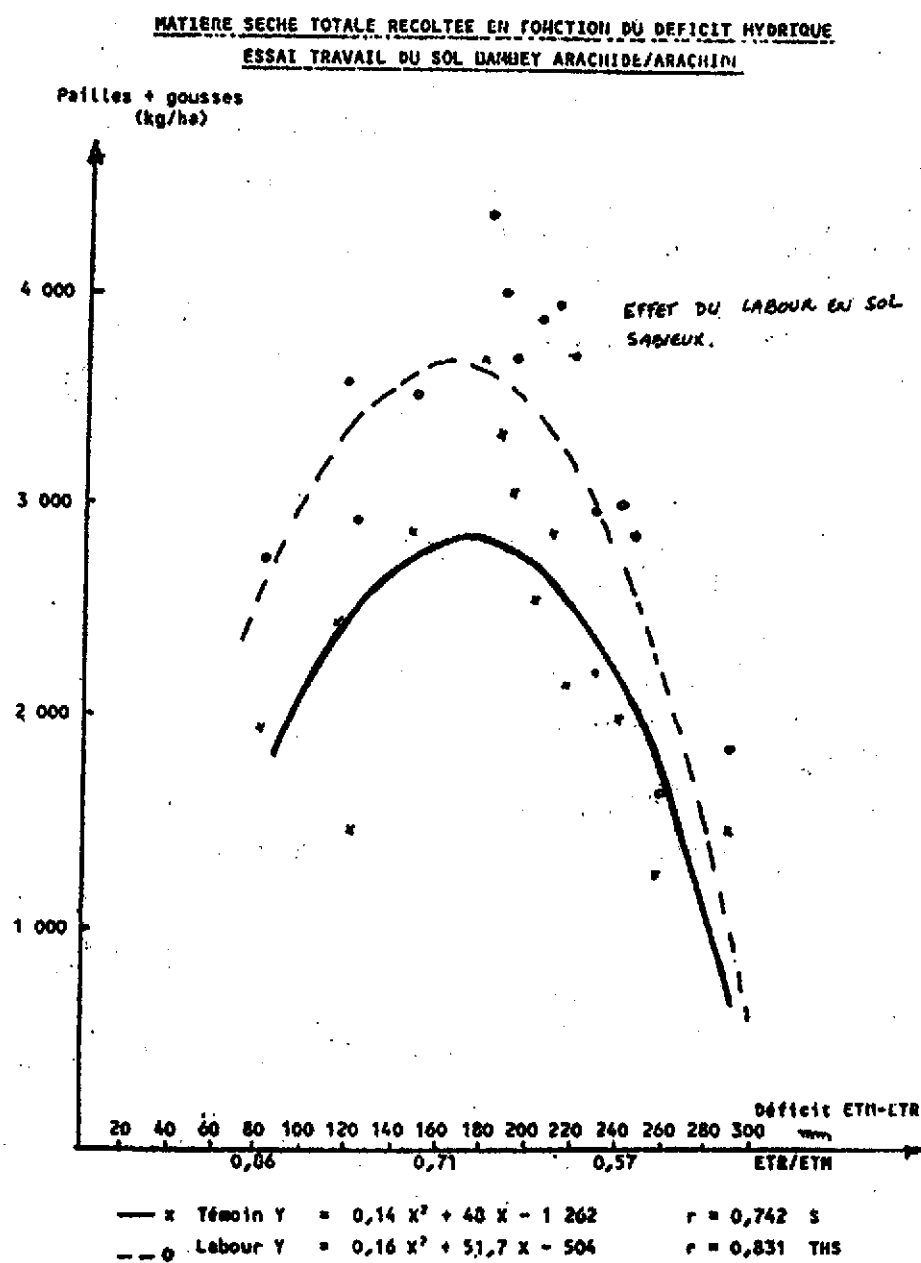
L'essai réalisé par l'IRAT depuis 1962 comprend 6 traitements principaux appliqués à trois situations agricoles distinctes :

- . Monoculture de sorgho
- . Alternance sorgho - cotonnier
- . Alternance sorgho - légumineuse (arachide ou niébé).

Traitement

T	Témoin sans engrais
fmr	fumure minérale faible + recyclage des résidus de récolte tous les 2 ans
fm	fumure minérale faible seule
FM	fumure minérale forte seule
fmo	fumure minérale faible + 5 tonnes de fumier tous les 2 ans.
FMO	fumure minérale forte + 40 tonnes de fumier tous les 2 ans.

Figure 20 : Effet du labour sur la valorisation de l'eau et le rendement.



Résultats ISRA (JF POULAIN - R. NICOU - JL CHOPART)

Les travaux de terrain et d'expérimentation ont été réalisés ou sont en cours de réalisation :

- Bambey - suivi de la progression du front d'humidité,
- Sefa - expérience en case d'érosion,
- Saria - expérience en case d'érosion,
- Samanko - bilan hydrique in situ.

L'amélioration de l'infiltration observée à Séfa ou Saria sur des sols en pente faible (2 %) peut ne pas avoir la même importance dans d'autres situations pédoclimatiques : topographie plane, pluies moins fortes, sol plus perméable. Ces conditions sont à peu près celles de Bambey où il est rare, sur ce relief dunaire aplani, d'observer des ruissellements importants, sinon très localisés. On ne saurait donc faire de cette amélioration de l'infiltration sur le labour une règle générale en zone tropicale sèche Ouest-africaine. Cette zone comporte en effet d'importantes superficies à relief peu accentué, et à sols sableux très perméables ; les phénomènes de ruissellement y sont relativement rares ; ils sont faibles et localisés et le problème de l'infiltration de l'eau dans le sol ne s'y pose pas de façon aiguë.

Pour les autres régions de la zone où les phénomènes de ruissellement peuvent prendre une certaine ampleur, il importe d'apprécier l'incidence agromique d'une amélioration de l'infiltration de l'eau dans les sols. Elle ne se traduit pas forcément, en effet, par des effets bénéfiques pour la plante : ceux-ci n'interviennent que lorsque les réserves hydriques du sol sont insuffisantes et l'alimentation en eau déficitaire. Pour reprendre l'exemple de Sefa, tel n'est pas le cas pendant la majeure partie de l'hivernage, où la pluviométrie est largement supérieure à l'évapotranspiration potentielle et l'humidité du sol toujours voisine de la capacité de rétention. Dans ces conditions, le surplus d'eau qui s'infiltre dans le sol, grâce au labour, n'est pas réellement utile à la plante mais contribue à augmenter le lessivage vertical. Ceci est cependant un moindre mal et doit être préféré à l'augmentation du ruissellement, susceptible sur pentes longues, d'aggraver dangereusement l'érosion.

Il y a cependant des périodes de sécheresse et de déficit des réserves hydriques du sol. C'est à ce moment qu'une amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol peut être très bénéfique pour la plante. Ces périodes peuvent se situer au milieu de la saison des pluies, mais elles interviennent le plus souvent en début de saison des pluies, lorsque le régime des pluies n'est pas encore bien établi, et en fin de saison, si celle-ci se termine prématurément ou si le cycle végétatif de la plante est trop long par rapport au cycle des pluies.

Pour l'infiltration des premières pluies, les labours de fin de cycle présentent un intérêt particulier par rapport aux labours de préparation en début de saison. A défaut de labour, on peut aussi favoriser cette infiltration en effectuant un pseudo-labour aux dents, en sec : cette technique, recommandée par la CMDT au Mali, permet d'effectuer ensuite, sur sol humide, le labour de préparation à plus grande profondeur.

Cependant, là encore, si l'on se fonde sur les résultats de l'expérimentation en cases d'érosion menée pendant quinze ans à Séfa, il n'y a pas lieu, semble-t-il, d'exagérer l'importance du ruissellement pour les toutes premières pluies : sauf cas de tornades violentes, de pentes très fortes ou de sols très peu perméables, celles-ci s'infiltrent en totalité dans le sol sec. Il faut attendre que le sol soit suffisamment humidifié et sa structure superficielle suffisamment modifiée par les premières pluies, pour que le ruissellement apparaisse. Il suffit habituellement, pour cela, d'une hauteur d'eau de 50 mm à 100 mm de pluies cumulées.

L'amélioration de l'infiltration de l'eau dans le sol par le labour ne paraît donc jouer, dans la pratique agronomique, un rôle aussi général et aussi important qu'on aurait pu initialement le penser, bien que ce rôle puisse être décisif dans certaines conditions particulières.

De ce fait, on a actuellement du mal à quantifier l'effet du labour sur l'économie de l'eau (manque de synthèse, manque de modèle de ruissellement...).

Reste à examiner le dernier mécanisme pouvant expliquer la meilleure résistance des plantes à la sécheresse après labours, même lorsque les problèmes de ruissellement ne se posent pas.

4.4.3. *Amélioration de l'utilisation par la plante des réserves hydriques du sol*

On a examiné plus haut l'influence que pouvaient exercer les propriétés physiques des sols et, en particulier, le porosité, sur le développement des systèmes racinaires des végétaux. Or, ainsi que l'ont montré un certain nombre d'auteurs la répartition de l'enracinement dans le profil a des répercussions très nettes sur l'utilisation des réserves hydriques du sol, et notamment les couches profondes du sol.

On peut donc s'attendre à ce que le labour, par les modifications de porosité et de structure qu'il entraîne pour le sol, et l'amélioration consécutive de l'enracinement pour la plante, ait un rôle important dans ce domaine. Ceci pourrait suffire à expliquer, en dehors de toutes autres considérations, que lors de périodes de déficit en eau, l'alimentation hydrique des plantes soit mieux assurée sur sol labouré que sur témoin non travaillé.

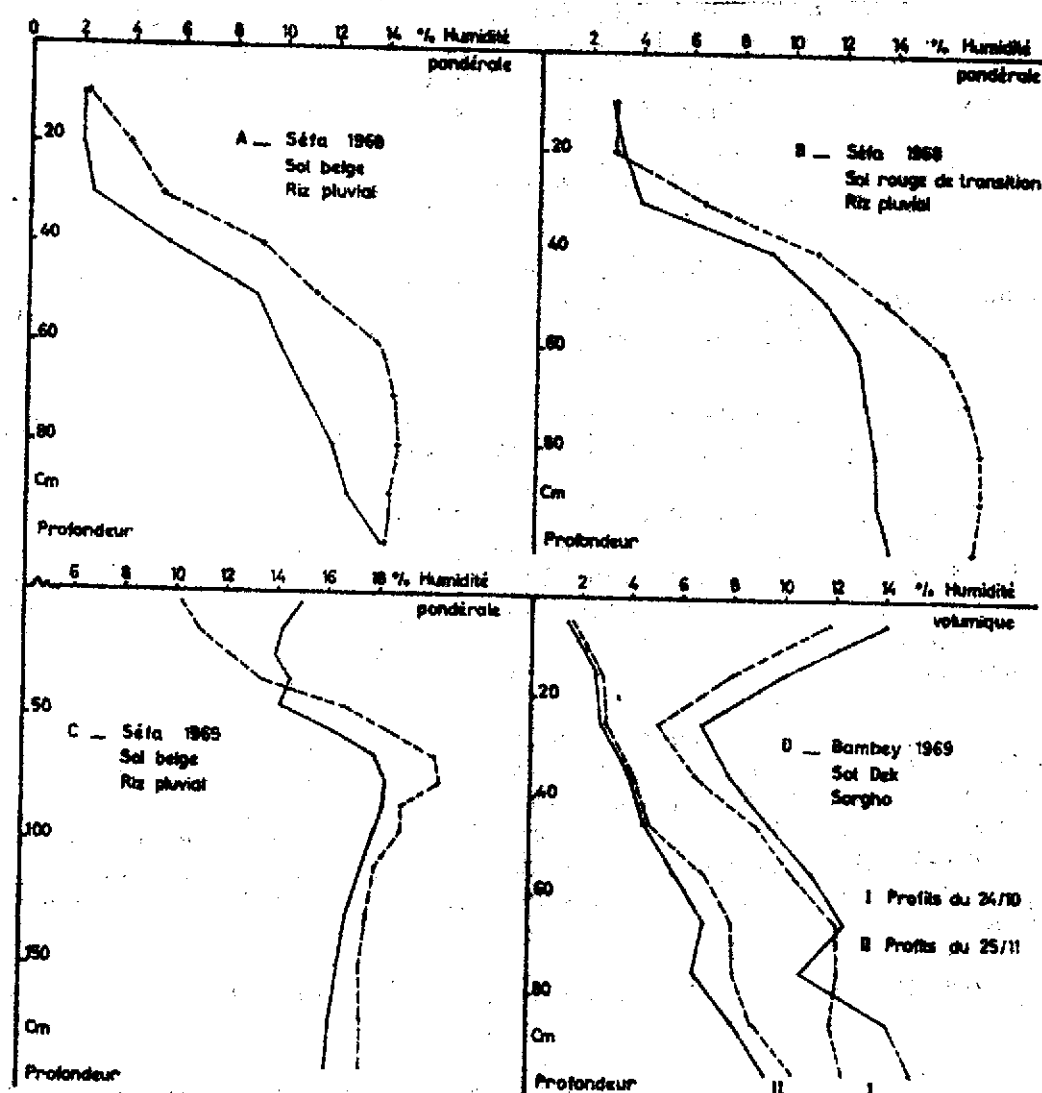
Divers résultats obtenus au Sénégal viennent à l'appui de cette hypothèse.

En 1968, ont été mis en place à Séfa plusieurs essais sur différents types de sols dans le but d'étudier comparativement le comportement du riz en présence ou absence de labour de préparation.

Au mois d'août intervint une sécheresse d'une sévérité exceptionnelle pour ce lieu et cette époque de l'année. Des profils hydriques furent relevés à la fin de cette période de sécheresse sur sol beige et sur sol rouge de transition. Sur la figure 21, on peut comparer les profils hydriques des témoins (grattage) et des sols labourés.

Figure 21 - Comparaison des profils hydriques sous labour (—) et sous grattage superficiel (---) après périodes de sécheresse

D'après SEGUY (1970) A et B, NICOU, SEGUY, HADDAD (1970) C, CHOPART (1970) D -



Il apparaît que, dans les deux situations, le sol sous labour est nettement plus asséché que sous grattage superficiel (témoin), et ceci jusqu'à plus d'un mètre de profondeur. Les différences de stock d'eau entre les deux traitements se situent, pour cette profondeur entre 30 mm et 40 mm (cf. tableau 20).

tableau 20 - Comparaison des stocks d'eau du sol sous labour et sous grattage à Séfa en 1968 - (en mm).

Profondeur (cm)	S O L B E I G E			S O L R O U G E		
	Labour	Grattage	Différence	Labour	Grattage	Différence
0 - 30	9.0	15.5	6.5	13.0	17.0	4.0
30 - 50	21.7	32.0	10.3	31.5	37.0	5.5
50 - 100	88.5	103.7	15.2	100.3	127.1	26.8
0 - 100	119.2	151.2	32.0	144.8	181.1	36.3

Dans ces essais, la profondeur du labour était de 30 cm et la majeure partie de la masse racinaire se trouvait dans la couche 0 à 30 cm. Cependant, l'exploitation plus poussée des réserves hydriques ne concerne pas la seule couche labourée : bien au contraire, l'opposition entre grattage et labour tient surtout à la différence d'exploitation, par le riz, des réserves hydriques des horizons profonds du sol où l'on trouve pourtant fort peu de racines. Tout se passe comme si le système racinaire du riz installé sur labour "pompait" plus efficacement l'humidité des couches inférieures.

Cette fourniture d'eau supplémentaire a permis au riz installé sur labour de résister beaucoup mieux à la sécheresse que le riz sur sol non travaillé. Ces résultats ont été confirmés l'année suivante par MM. NICOU, SEGUY et HADDAD sur riz pluvial à Sefa.

Des résultats analogues ont été trouvés par CHOPART à Bambey, sur sorgho. Il s'agissait d'étudier l'enracinement du sorgho en deux conditions de fertilité :

- un témoin non travaillé et non fumé,
- un traitement avec labour de préparation et fumure minérale forte.

On constate que les humidités qui étaient plus élevées sous labour au moment de la récolte (en raison d'une nature de sol un peu plus argileuse et d'une capacité de rétention un peu plus forte) deviennent, un mois plus tard, plus faibles que sous grattage. Les bilans ont été calculés et fournissent les résultats suivants : tableau 21.

Tableau 21 - Evolution comparée des stocks d'eau du sol sous sorgho labouré ou non, à Bambey, en 1969. (en mm) -

Profondeur (cm)	Labour (+ fumure)			Témoin			Différence d'évapotranspiration entre labour et témoin
	Profil du 24.10	Profil du 25.11	Différence	Profil du 24.10	Profil du 25.11	Différence	
0 - 50	71,5	22,8	48,7	60,0	23,4	36,6	12,1
50 - 100	95,4	54,7	40,7	89,0	64,4	24,6	15,8
0 - 100	166,9	77,5	89,4	149,0	87,8	61,2	27,9

Le sorgho installé sur labour (et ayant reçu une fumure minérale) a donc extrait, en un mois, d'une couche de sol de un mètre d'épaisseur, 28 mm d'eau de plus que le témoin.

Tous ces exemples confirment que le labour peut jouer, indirectement un rôle important dans l'alimentation hydrique des plantes, par le biais d'un meilleur enracinement et d'une possibilité d'exploitation plus poussée des réserves hydriques des couches profondes du sol.

Ce mécanisme d'intervention sur le régime hydrique nous paraît à la fois plus important et plus général que les deux autres précédemment cités. C'est à lui, dans la majorité des cas, qu'on doit faire appel pour expliquer la meilleure résistance à la sécheresse des plantes installées sur labour.

4.4.4. Modélisation de l'effet des techniques culturales sur l'économie de l'eau

De ce qui est exposé ci-dessus pour le labour et qui pourrait être repris pour le mulchage, l'effet des façons superficielles telles que sarclage, la densité de semis et l'interaction de la fertilisation il ressort qu'actuellement on est pratiquement incapable de connaître de façon quantitative l'effet du labour sur l'alimentation hydrique des cultures et d'en modéliser l'effet.

4.5. Considérations biologiques / l'extraction de l'eau par les racines

Contrairement aux techniques culturales, un certain nombre de travaux menés notamment au Sénégal permettent aujourd'hui d'avoir un début de base de données quantifiées de l'enracinement pour différents niveaux d'intensification et différentes cultures.

4.5.1. *Effet du labour sur l'enracinement -*

Comme nous l'avons vu si l'effet du labour sur l'amélioration de l'exploitation de l'eau du sol par la plante n'est pas quantifié, néanmoins un certain nombre de données susceptibles d'expliquer en partie la meilleure implantation d'une culture sur sol labouré sont disponibles.

De nombreuses observations de profils culturaux ont été faites au Sénégal pendant les saisons de culture en comparant témoins non travaillés et sols labourés. Toutes ces observations sont concordantes et font ressortir une nette influence du labour sur le développement racinaire de toutes les plantes cultivées : mil, sorgho, maïs, riz pluvial, arachide, cotonnier. On observe en particulier une fasciculation plus importante et une densité plus grande de petites racines.

Pour un certain nombre de cultures (mais pour un sol donné), ces résultats de mesure sont disponibles.

On notera de plus que si le labour provoque une réaction identique de l'enracinement pour les diverses espèces de céréales étudiées, il agit de même à l'intérieur d'une même espèce pour différentes variétés. L'exemple le plus probant est celui du riz pluvial à Séfa en 1969. Les résultats très démonstratifs de cet essai ont été repris sur la figure 22.

4.5.2. *Bases de données / système racinaire -*

Pour un certain nombre de culture (étude au champ des systèmes racinaires de principales cultures pluviales au Sénégal J.L. CHOPART) arachide, mil, sorgho, riz pluvial, le développement du système racinaire a été quantifié et permet d'avoir une idée de la valeur de la RU réellement utilisable par la plante.

4.5.2.1. *Arachide -*

L'évolution de la profondeur d'enracinement (Z) en cm a été étudiée en fonction du nombre de jour après le semis (t) et pour être ajustée à une droite du 7ème au 50ème jour.

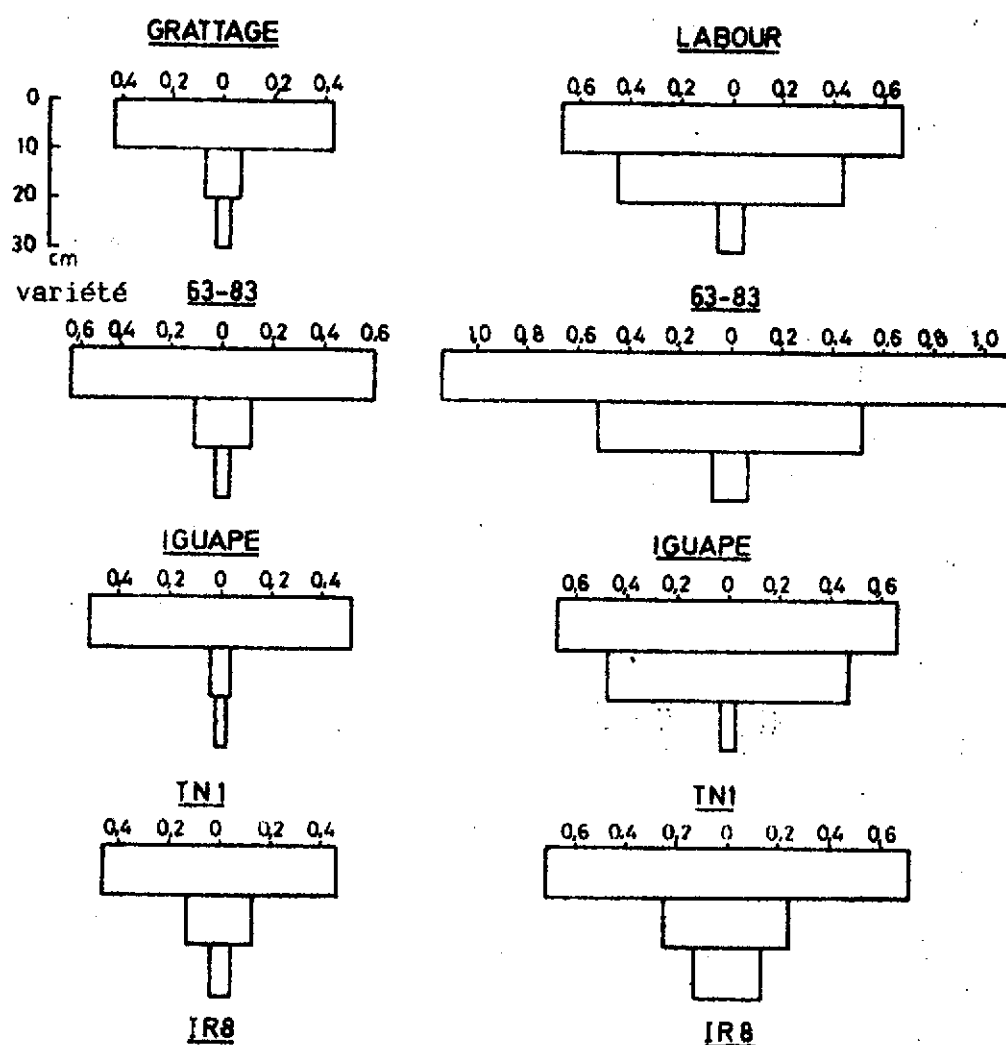
- parcelle témoin $Z = 2,04 t + 12$ ($n = 16$, $R = 0,962$)
- parcelle labourée $Z = 2,72 t + 9,7$ ($n = 32$, $R = 0,972$)

La vitesse d'avancement du front est constante entre le 7ème jour et le cinquantième jour. Elle est plus rapide sur sol labouré.

n = effectif de l'échantillon

R = coefficient de corrélation linéaire

Figure 22 - Influence du labour sur les densités d'occupation racinaires (g/dm^3) de différentes variétés de riz pluvial (d'après NICOU, SEGUY, HADDAD, (1970) -



Au cinquantième jour, au moment de la fin de la floraison utile, la profondeur en sol sableux atteint 150 cm sur labour et 115 cm sur parcelle témoin. (figure 23).

En terme de valorisation de l'eau, il est possible de comparer les réserves utiles disponibles au moment de la formation des gousses.

Tableau 22 - Comparaison des RU en fonction de l'enracinement

Parcelle	Z	RU (100 cm)	RU réelle
Témoin	115	80	92 mm
Labour	150	50	120 mm

Soit un gain de RU égal à 30 mm, qui, autoriserait 10 jours supplémentaires de résistance à la sécheresse.

Il faut souligner l'intérêt des sols sableux pour lesquels on peut espérer un enracinement en profondeur, ce qui n'est pas le cas pour l'ensemble des autres sols des régions tropicales.

4.5.2.2. Le mil -

L'évolution du profil racinaire est représentée à la figure 24. Contrairement à l'arachide, cette évolution se poursuit tout au long de la végétation.

La vitesse de descente des racines, après 15 jours, est de l'ordre de 1,5 à 2 cm/jour.

On notera que pendant les 15 premiers jours après la levée l'enracinement reste superficiel. Au cours de cette période, le mil semble donc plus sensible à la sécheresse en raison d'une faible profondeur racinaire.

En terme de modélisation, ce résultat signifie qu'il conviendrait de limiter la réserve utile à $RU = 30 \text{ mm}$ pendant cette période.

Figure 73 - Evolution du front racinaire de l'arachide

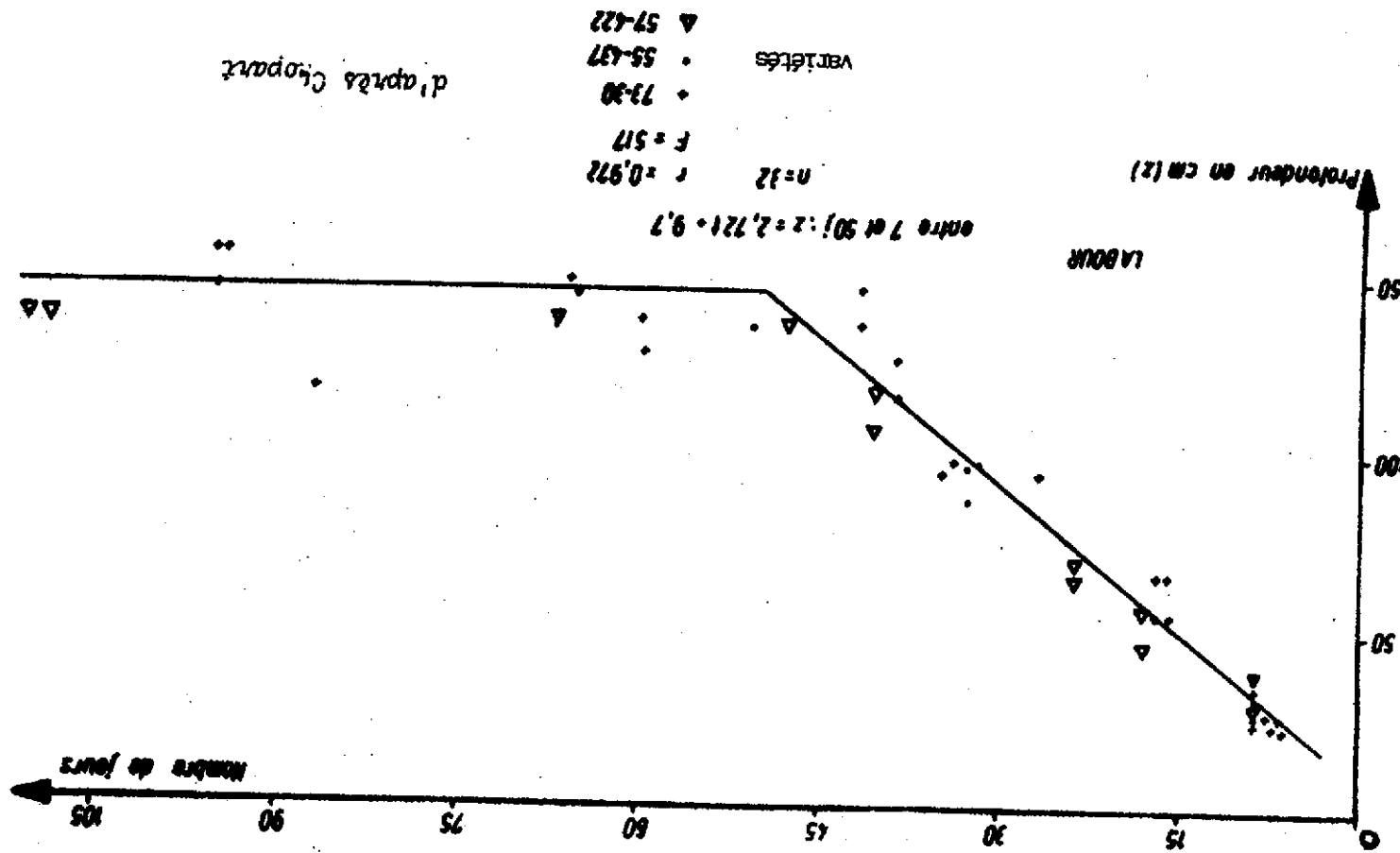
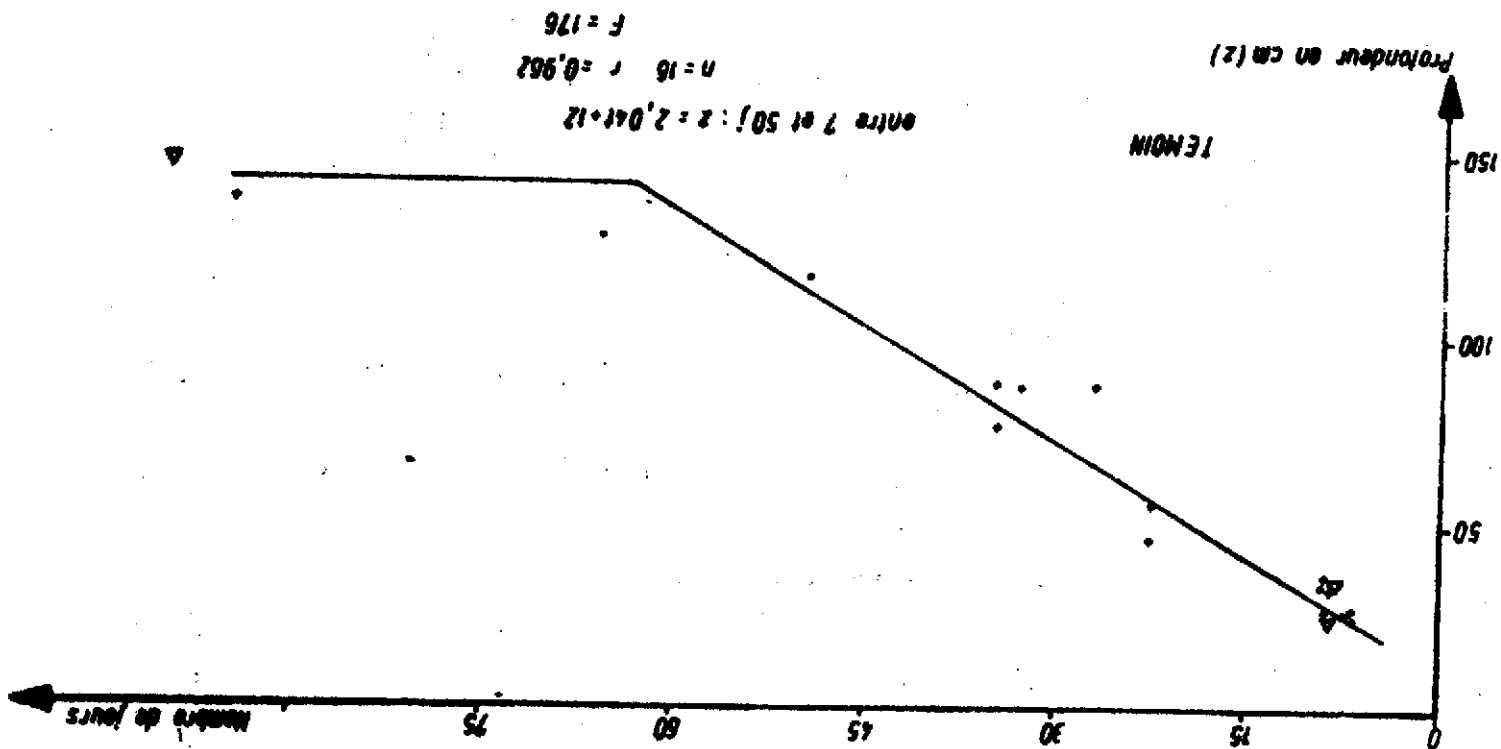
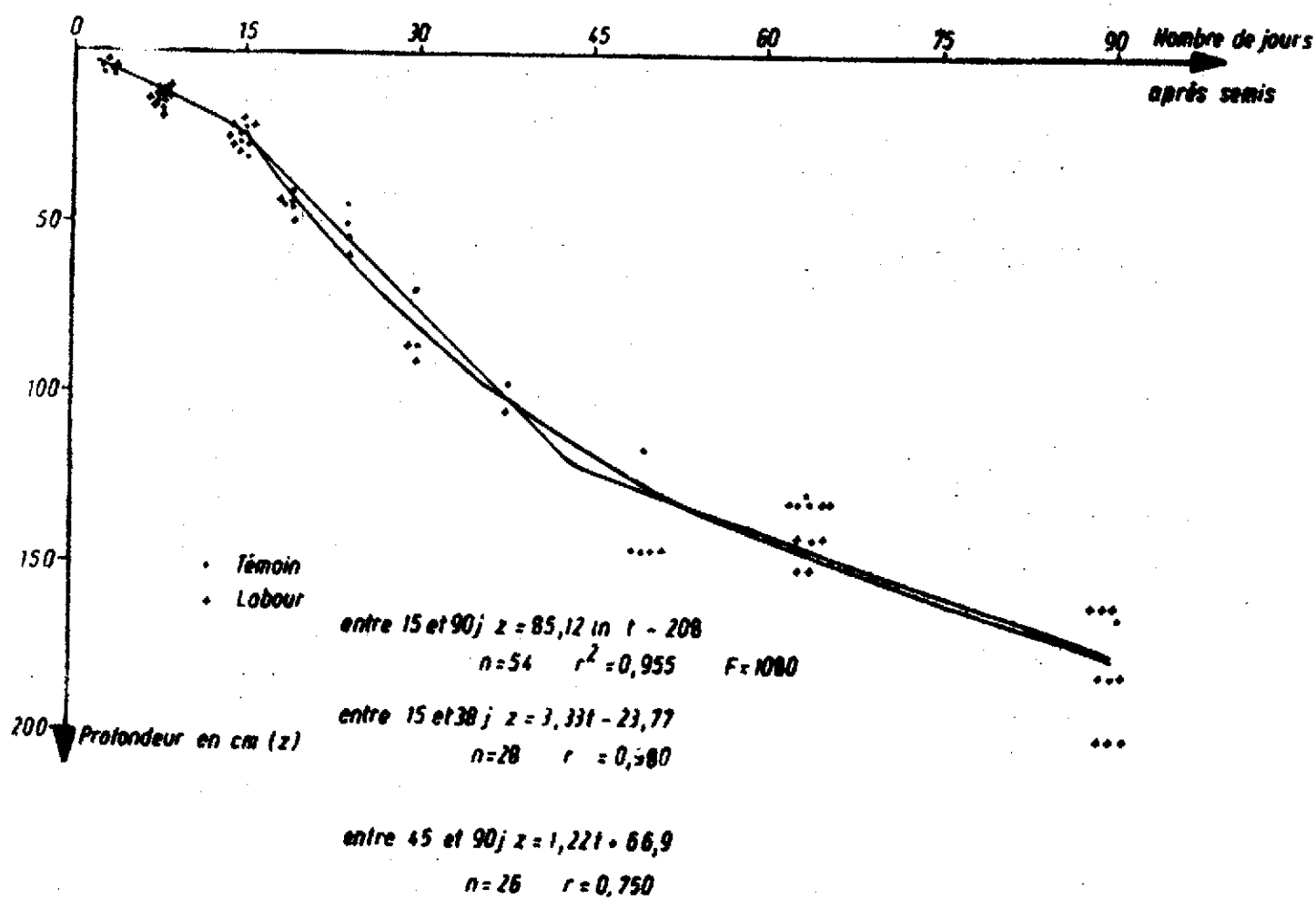


Figure 24 - Evolution du front racinaire du mil Souna -



d'après J.L. Chopart .

4.5.2.3. Le riz

Cette culture répond significativement au travail du sol. Le grattage, en comparaison du labour, n'autorise qu'un nombre total de racines par pied au mieux égal à la moitié (320 avec labour, 160 avec grattage). La profondeur d'enracinement atteint après 50 jours, 50 cm avec le grattage (1 cm/j) et 75 cm avec le labour (1,5 cm/j). Cette observation correspond à une augmentation de 50 % de la réserve utilisable au cours des deux premiers mois du cycle.

On notera qu'à cet accroissement de la profondeur d'enracinement (fig. 25 et 26) est associée une augmentation de la masse des parties aériennes, c'est à dire des éléments qui contribuent au rendement.

Par son effet sur la profondeur d'enracinement, le travail du sol assure une meilleure utilisation de l'eau et par suite une plus grande productivité de la plante. C'est à ce niveau que l'on devra, dans l'avenir, évaluer l'impact des techniques culturales sur l'économie de l'eau.

4.5.2.4. Le riz pluvial -

Pour le riz pluvial, il apparaît une nette différence de vitesse d'enracinement en fonction du type variétal (fig. 27).

L'effet du labour est plus au moins important selon la variété. Cette observation rejoint les préoccupations actuelles des sélectionneurs pour lesquels il y a un espoir de mettre au point des variétés ayant une forte aptitude à l'enracinement en profondeur.

D'une manière générale, on notera que la réserve utile 50 jours après le semis est relativement faible en raison de la profondeur des racines limitée à 50 cm. Le choix de sol est donc pour le riz pluvial déterminant comme le montre le tableau 23.

Tableau 23 - Variation de la réserve utile - la fonction du type de sol -

SOL	Z (50 JAS)	RU
Sableux	50 cm	30 mm
Argilo-sableux	50 cm labour	60 mm
Vertiques	50 cm impératif	80 mm *

* Dans la pratique, on constate que l'obtention d'un enrachement profond sur ce type de sol est irréaliste. La profondeur racinaire est le plus souvent limitée à 25 cm, soit une réserve utile de 40 mm. Ceci met en évidence l'importance du choix du sol et du mode de travail de la terre si l'on veut "valoriser le potentiel hydrique de ces sols".

Figure n° 25 - Evolution du nombre de racines par pied du sorgho 6318 -
d'après J.L. Chopart .

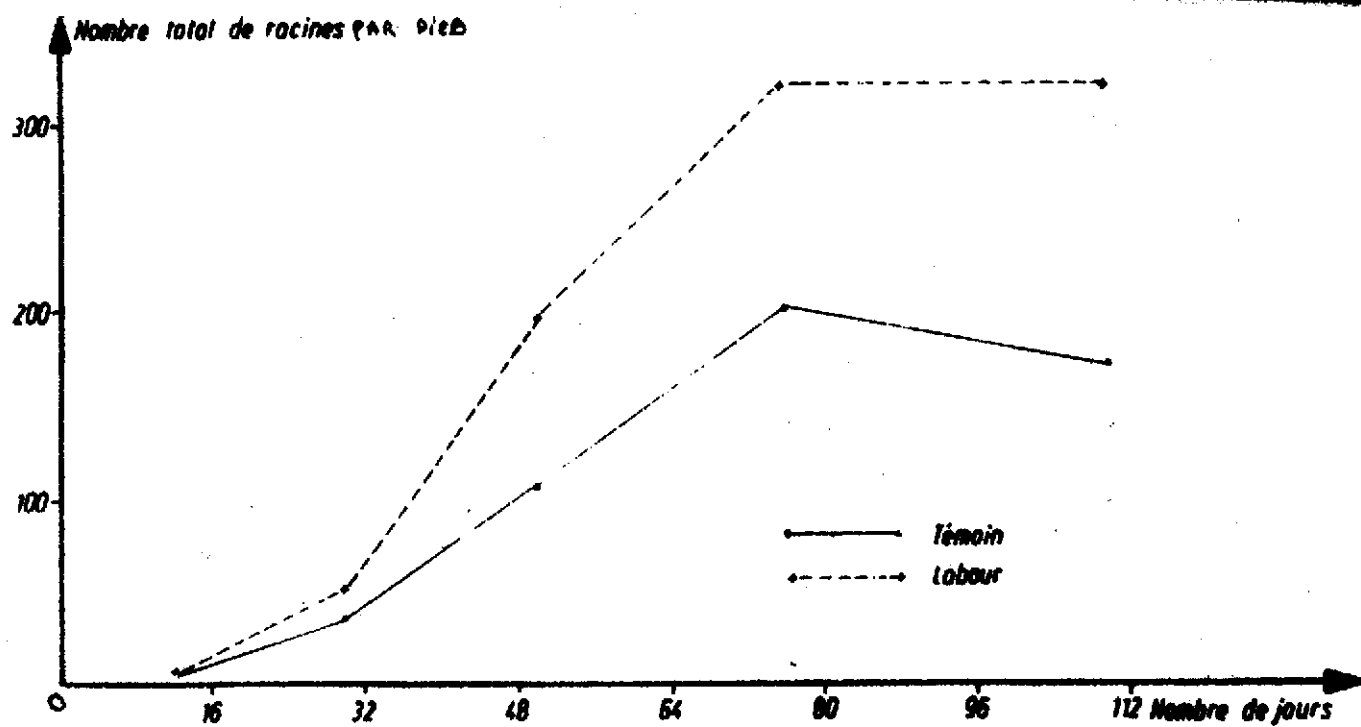


Figure n° 26 - Evolution du front racinaire du sorgho 6318 -

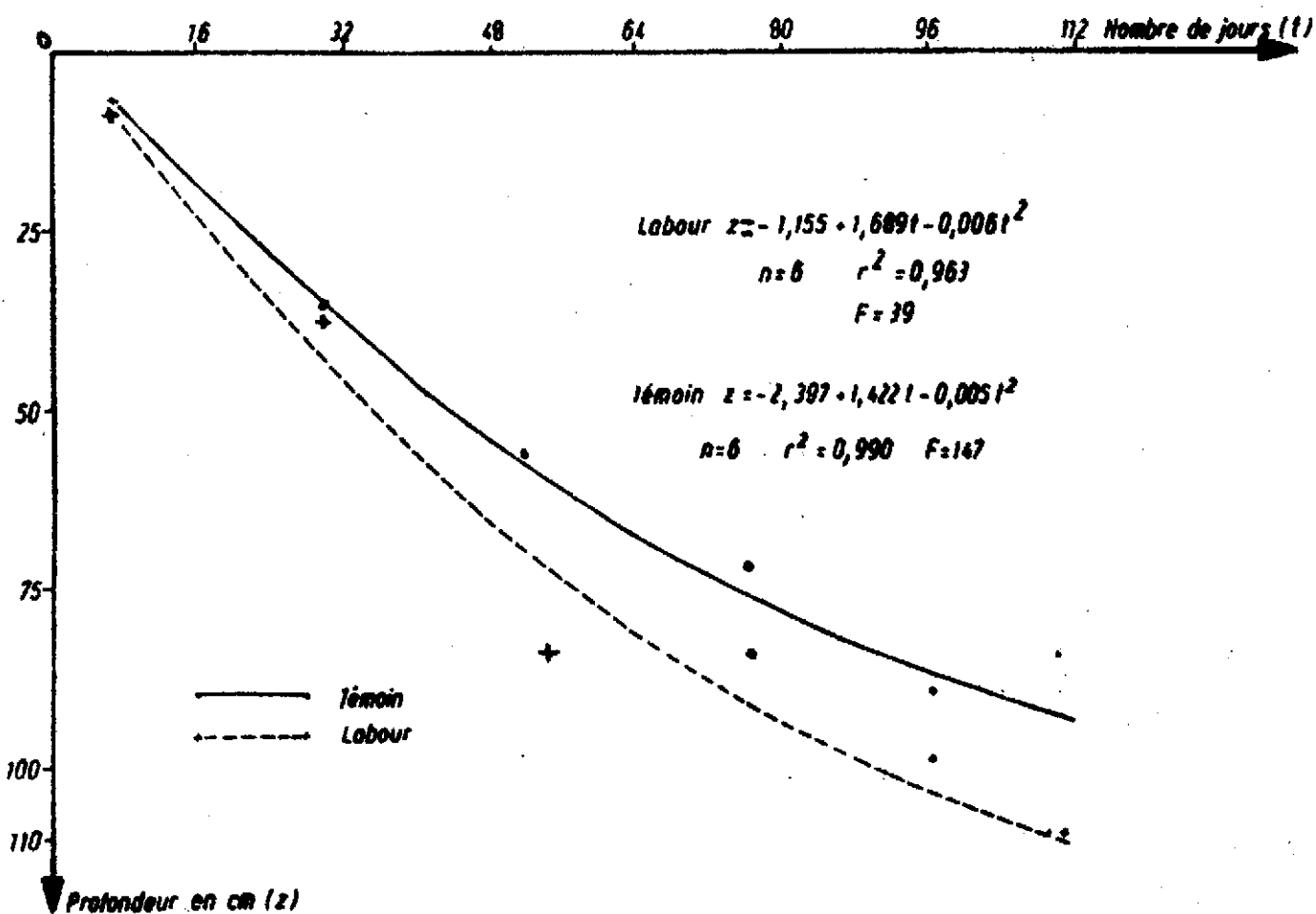
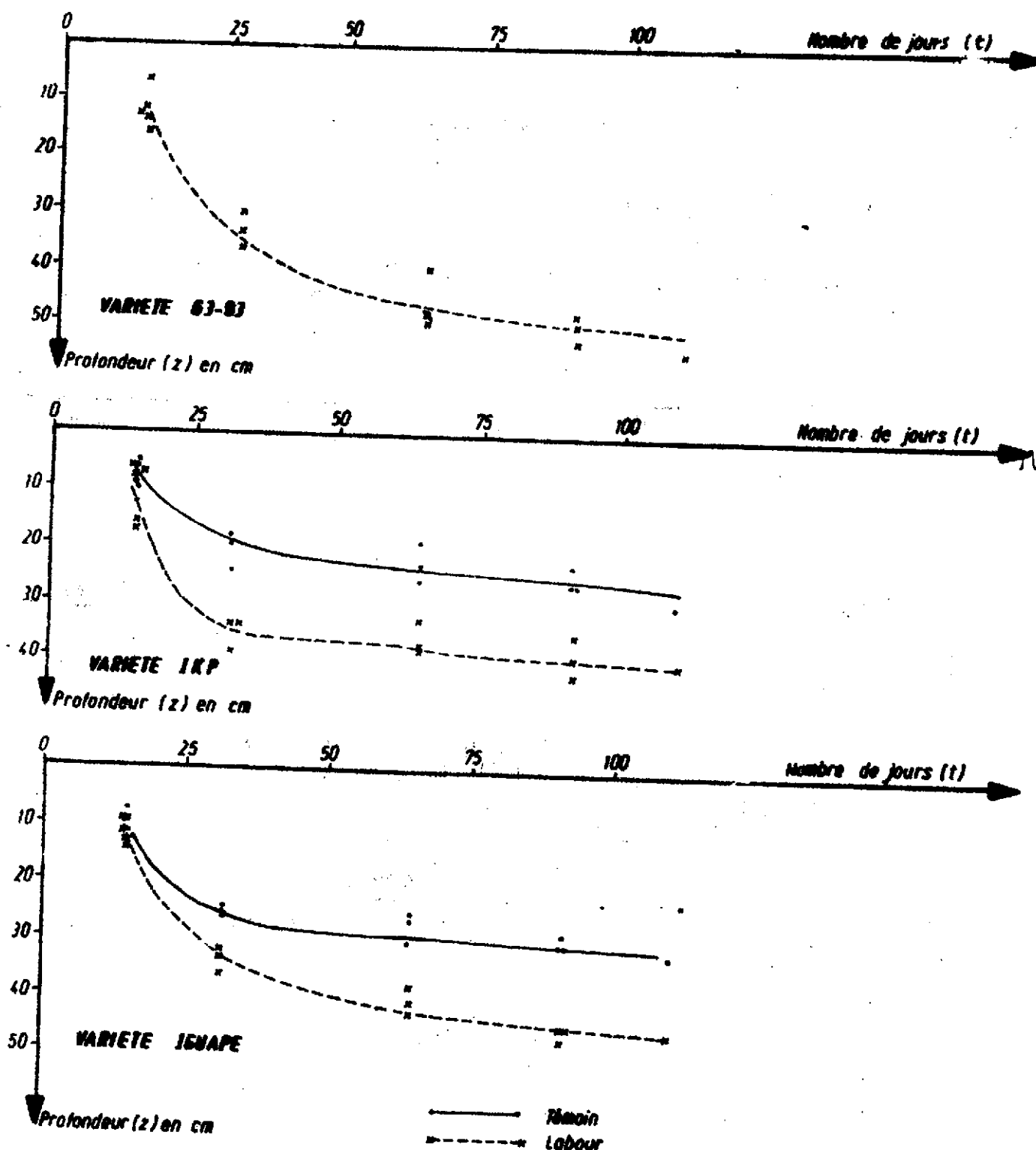


Figure 27 - Evolution du front racinaire du riz *PROVIA* (Variété 63-83, IRP)
 IGUAPEO -

d'après J.L. Chopart.



4.6. Conclusion

De ce chapitre sur le stockage de l'eau dans le sol, il est nettement ressorti que si l'effet des techniques culturales sur l'économie de l'eau, est reconnu, il est quantitativement très mal appréhendé, de telle sorte que schématiser l'effet des techniques culturales sur l'économie de l'eau est pratiquement impossible.

Compte tenu de leur importance sur l'économie de l'eau et dans tout processus d'intensification de l'agriculture pluviale, une meilleure connaissance de ces phénomènes a été retenue comme prioritaire afin, en particulier, d'être à même de conseiller l'agriculteur en début de campagne.

L'interaction technique culturale et fertilisation sur l'économie de l'eau étant complexe, il a paru plus opportun de réaliser l'étude pour 3 niveaux d'intensification représentant trois alternatives proposées à l'agriculteur.

La réalisation de ce type d'essai dans des zones agro-écologiques différentes (sol, climat), ce qui pourrait être réalisable dans le cas d'un programme de recherche inter-état, devrait permettre à court terme de mieux appréhender ce phénomène.

4.7. Bibliographie

- ABDELLATIF - NOUR M. - WEIBEL DE. - 1976 -
Evaluation of root characteristics in grain sorghum
agron. J. 70, 217-218
- BALDY - 1973 -
Progrès récent concernant l'étude du système racinaire
du blé (triticum sp) Ann agron. 24 - 241-276.
- BARLEY KP. - GREACEN EL - 1967 -
Mechanical resistance as a soil factor influencing the growth
of root and underground shoots . Adv. Agron. 19.
- BLONDEL D. - 1965 -
Premiers résultats sur l'influence de la densité apparente
du sol sur la croissance racinaire de l'arachide et du sorgho.
Ses conséquences sur les rendements. Coll. sur la cons. et
l'amél. de la fert. des sols, Khartoum OUA/STR4, comm. 37 173-181.
- BONZON B. - PICARD D. - 1969 -
Matériels et méthodes mis en oeuvre sur le centre ORSTOM
d'adiopodoumé pour l'étude de la croissance et du développement
en pleine terre des systèmes racinaires. Cah. ORSTOM sér. Biol.,
9, 3-18.

- CHARREAU C. - 1969 -

Influence des techniques culturales sur le développement de l'érosion et du ruissellement en Casamance. Agron. Trop., 24 836-842.

- CHARREAU C. - NICOU R. - 1971 -

L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche ouest africaine et ses incidences agronomiques. Agron. trop 26, 209-225, 531-565, 903-978, 1183-1247.

- CHETTERJEE R.K. - RATTAN LAL. - 1968 -

Growth and yield of maize, influence by soil and physical conditions. Indian J. Agric. Sci., 35.

- CHOPART J.L. - 1970 -

Morphologie et croissance de l'enracinement du sorgho (sorghum vulgare) en deux conditions de fertilité. Doc. mult. IRAT Sénégal 97 p.

- CHOPART J.L. - 1975 -

Influence du labour et de la localisation de l'engrais en profondeur sur l'adaptation à la sécheresse de différentes cultures pluviales au Sénégal. Doc. mult. ISRA CNRA Bambey Sénégal 172 p.

- CHOPART J.L. - 1977 -

Caractérisation de certains paramètres morphologiques de systèmes racinaires à partir d'échantillons représentatifs. Doc. mult. INRA Toulouse et IRAT Montpellier, 82 p.

- CHOPART J.L. - 1980 -

Relations entre la résistance mécanique du sol à la pénétration et le développement racinaire du mil cultivé en conditions naturelles. Doc. Mult. ISRA CNRA Bambey Sénégal (à paraître).

- CHOPART J.L. - MAUBOUSSIN J.C. - NICOU R. - 1970 -

Effets du labour sur quelques caractéristiques de l'arachide en 1970. Doc. mult. IRAT CNRA Bambey Sénégal, 9 p.

- CHOPART J.L. - NICOU R. - 1973 -

Effets dépressifs de cultures répétées de sorgho dans les sols sableux du Sénégal. Premiers essais d'explication. African Soil 17 - 181 - 188.

- CHOPART J.L. - NICOU R. - 1976 -

Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal - Conséquences sur leur alimentation hydrique. Agron. Trop. 20, 7-28.

- CHOPART J.L. - NICOU R. - VACHAUD G. - 1979 -
 Le travail du sol et le mulch pailleux - influences comparées sur l'économie de l'eau dans le système arachide-mil au Sénégal. In "Isotopes and radiation in research on soil plant relationships". International atomic energy agency. ed. Vienna, 199-211.
- CHOPART J.L. - 1980 -
 Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide - mil - sorgho - riz pluvial) 162 p + annexes.
- DANCETTE C. - 1979 -
 Principales contraintes hydriques et pédoclimatiques concernant l'adaptation des cultures pluviales dans la moitié Sud du Sénégal, in "Soils and climatic ressources and constraints in relation to food crop production in west Africa", proc. Symp. Ibadam 1979, IITA Ibadan édit.
- DANCETTE C. - NICOU R. - 1975 -
 Economie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal Doc. mult. IRAT Sénégal (doc. provis. 20p.)
- FOREST F. - POULAIN J.F. -
 Etude du ruissellement et de ses conséquences au niveau du bilan hydrique des cultures pluviales - rapport 1976 1977 CIEH-IRAT.
- HILLEL D. - TALPAZ H. - 1976 -
 Simulation of root growth and its effect on the pattern of soil upake by a non uniform root system. Soil sci. 121, 307-311.
- HILLEL D. - TALPAZ H. - VAN KEULEN H. - 1976 -
 A macroscopic scale model of water uptake by a non uniform root system and water and salt movement in the soil profile soil sci. 121, 242-245.
- LIDON B. - G. SOLA - P. MORANT - M. SEDOGO -
 Etude du ruissellement à la parcelle et de ses conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales en sol peu profond - rapport 1978 (43 p) CIEH-IRAT.

- LIDON B. - QUIDEAU P. - SOLA G. - MORANT P. - SEDOGO M. -

Etude du ruissellement sur sol ferrugineux de la région
centre Haute-Volta/Résultats de quatre années (1978-1981).
de mesures à la station de SARIA. Mars 1983 CIEH-IRAT. 65 p.

- MEREDITH H.L. - PATRICKS W.H. - 1961 -

Effects of soil compaction on subsoil root penetration and
physical properties of three soils in Louisiane. Agron. J.,
52, 163-167.

- MILLER E.C. - 1916 -

Comparative study of the root system and leaf of corn and
sorghum Agric. Res. , 6, 311-347.

- MIRREH M. E. - KETCHESON J.W. - 1973 -

Influence of soil water matric potential and resistance to
penetration for corn root elongation. Can. J. soil sci.,
53, 383-388.

- NICOU R. - 1974 -

Contribution à l'étude et à l'amélioration de la porosité des
sols sableux et sablo-argileux dans la zone tropicale sèche.
Conséquences agronomiques Agron. trop. 29, 1100-1127.

- NICOU R. - 1975 -

Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux
et sablo-argileux de la zone tropicale sèche. Agron. trop. 30,
325-343.

- NICOU R. - 1977 -

Le travail du sol dans les terres exondées du Sénégal. Motivations
contraintes, Doc. mult. ISRA CNRA Bambey, Sénégal 51 p.

- NICOU R. - THIROUIN H. - 1968 -

Mesures sur la porosité et l'enracinement. Premiers résultats.
Doc. mult. IRAT Sénégal 52 p.

- NICOU R. - SEGUY L. - HADDAD G. - 1970 -

Comparaison de l'enracinement de quatre variétés de riz pluvial
en présence ou absence de travail du sol. Agron. trop. 25, 639-659.

- NICOU R. - CHOPART J.L. - 1979 -

Les techniques d'économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal
in "soil physical properties and crop production in the tropics",
J. Wiley & sans édit, 375-384.

- REYNIERS F.N. - TRUONG B. BOIS J.F. - BONNIN E. - THOMIN G. - 1979 -
~~Caractérisation de l'enracinement de riz pluvial in situ~~
 avec le phosphore 32. In "Isotopes and radiation in
 research on soil plant relationships" AIEA ed. Vienne,
 635-647.
- ROOSE EJ. - ARRIVETS - POULAIN J.F. -
 Etude du ruissellement, du drainage et de l'érosion sur
 deux sols ferrugineux de la région Centre Haute-Volta.
 Bilan de trois années d'observation à la station de Saria
 (1971, 72 , 73).
- ROOSE EJ. -
 Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest 10 années
 de mesure en petites parcelles expérimentales.
- SEGUY L. - 1970 -
 Influence des facteurs pédologiques et des techniques
 culturales sur la croissance et la production du riz pluvial
 en Casamance (Sénégal méridional). Doc. mult. IRAT Paris 97 p.
- TOURTE R. - 1951 -
 Préparation du sol et enfouissement de la végétation naturelle
 comme engrais vert. Leur influence sur les rendements du mil
 au Sénégal. Ann. cent. natl. rech. agron. Bambey, Sénégal
 120 -125.
- TOURTE R. - CHARREAU C. - NICOU R. - POULAIN J.F. - 1967 -
 Le rôle des facteurs mécaniques (travail du sol) dans la
 création et l'amélioration du profil cultural en zone
 tropicale sèche - incidence sur la production agricole.
 Actes du colloque sur la fertilité des sols tropicaux,
 Tananarive, 2, 1547-1569.
- VAN BAVEL C.H.M., STIRK G. - BRUST K. 1968 -
 Hydraulic conductivity properties of a clay loam soil
 and the field mesure of water uptake by roots. Soil sci.
 soc am. proc. 32, 310-317.
- VAUCLIN H. - HAVERKAMP R. - VACHAUD G. - 1975 -
 Transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère
 Simulation et prévision. Proceedings of a meeting on
 efficiency of water and fertilizers use in semi-arid regions
 Bambey - Sénégal AIEA Vienne, 195-213.

5 - METHODOLOGIES PERMETTANT L'ANALYSE DES RELATIONS EAU-SOL-PLANTE

5.1. Introduction

De tout temps le niveau des récoltes a fluctué d'une année à l'autre mais ce n'est que tout récemment que l'on a "redécouvert" les influences du temps sur la croissance et le développement des cultures. Les approches sont diverses et à l'heure actuelle la terminologie utilisée dans cette branche de la recherche est assez confuse. On distinguera pour notre part :

- les approches pluviométriques appliquées principalement à la détermination des possibilités de réalisation de façons culturales.
- les approches fréquentielles d'analyse du climat (analyse fréquentielle de FRANQUIN) permettant de déterminer les périodes favorables aux interventions culturales de façon probabiliste.
- les modélisations :
 - . de bilan hydrique de la culture avec ou non explication quantitative du rendement.
 - . de simulation de la croissance avec explication du rendement par sa structure.

De toutes ces méthodes c'est la simulation du bilan hydrique qui retiendra notre attention dans la mesure où c'est actuellement la méthode la plus opérationnelle compte tenu de l'état d'avancement des connaissances et du développement de la microinformatique.

5.2. Les études de la pluviométrie

5.2.1. *Application de l'étude fréquentielle des pluies* *exemple : application à la riziculture pluviale* *en Côte d'Ivoire (Gigou 1973)*

5.2.1.1. Principe -

En Côte d'Ivoire, de nombreux sols ont une réserve utile très faible alors que le climat permet des évapotranspirations élevées au moins une grande partie de l'année.

Aussi, dès que les pluies ne sont pas très régulières, l'alimentation en eau des plantes est difficile et la production de certaines cultures, le riz pluvial ou le maïs en particulier peut-être compromise. Pour minimiser les risques et caler les cycles de façon optimum, une étude fine des précipitations est indispensable. L'étude des pluies mensuelles ou décadaires moyennes est insuffisante, car une sécheresse qui se produirait tous les 3 ou 5 ans, à une période critique, pourrait être un obstacle grave à l'agriculture, même si les pluies moyennes à cette époque sont abondantes.

Une étude fréquentielle s'avère de ce fait indispensable.

5.2.1.2. Etude fréquentielle de la pluviométrie -

Il est admis que les hauteurs pluviométriques d'une courte période de l'année suivent une loi gamma incomplète tronquée. De ce fait les hauteurs pluviométriques observées sont ajustées à de telles lois.

5.2.1.3. Application à la riziculture pluviale/définition d'indices climatiques.

* Principe

Le but final d'une telle étude est de connaître la loi de répartition des rendements au cours des années, ce qui permet de décider de l'intérêt économique de la culture.

L'expérience suggère que, en l'absence de progrès technique, le facteur principal de variation du rendement est la pluviosité. Donc si l'on pouvait définir pour chaque station la loi qui lie le rendement à la pluviosité de l'année, le problème serait pratiquement résolu. Malheureusement, cette fonction f n'est connue que dans ses très grandes lignes : aussi une telle étude n'est pas possible actuellement. L'expérience permet cependant de concevoir des normes de pluie minima au-dessous desquelles il est presque certain que le rendement sera faible et que la culture ne sera pas économiquement rentable. On peut donc compter le pourcentage des années où les pluies sont inférieures aux normes, ce qui a un grand intérêt économique à partir de l'étude fréquentielle des pluies.

* Conception des indices climatiques

Pour être facilement utilisables, tous les indices doivent être homogènes à des probabilités de réussite, ainsi, le produit de deux indices correspondant à deux phases de la croissance donne un indice correspondant à l'ensemble des deux phases qui est lui-même homogène à une probabilité de réussite.

Le problème est donc de choisir des indices pour chaque phase de la croissance dont la sévérité doit être en rapport avec l'importance de cette phase.

Dans le cas le plus simple, on peut prendre la probabilité de recevoir des pluies supérieures à une certaine hauteur pendant une période choisie.

Dans les autres cas, on prend le produit de telles probabilités pour construire un indice plus sévère pendant une phase on peut :

- choisir des valeurs de pluie plus grandes pour les mêmes périodes,
- passer de périodes adjacentes à des périodes se recouvrant partiellement,
- choisir des périodes de plus courtes durées avec des pluies moyennes journalières identiques.

Les premières valeurs seront à priori choisies en fonction de nos connaissances actuelles. On essaie alors l'indice obtenu dans les stations connues et le corrige éventuellement.

* Application à la riziculture pluviale/définition d'un indice climatique

On appelle P_0 la probabilité de ne pas avoir de pluie pendant une période étudiée : $1-P_0$ la probabilité de recevoir des pluies pendant cette période.

Les indices suivants ont été définis :

- pour la période de besoins intenses : on appelle P_1, P_2, \dots, P_9 les probabilités de recevoir plus de 20 mm de pluies dans les 9 périodes de 12 jours (glissant de 6 jours en 6 jours) étudiées pendant cette période.

On définit T_f : $P_1 \times P_2 \times P_3 \dots P_9$

- pour le tallage, $Itall$: produit des $1-P_0$ des périodes de 12 jours (glissant de 6 jours en 6 jours) étudiées pendant cette phase. Le nombre de périodes varie avec la longueur du cycle :

- . cycle court (110 jours) $Itallc$: 4 périodes,
- . cycle moyen (130 à 135 jours) $Itallm$: 7 périodes,
- . cycle long (150 à 155 jours) $Italll$: 10 périodes.

- pour le semis c'est la probabilité P_s de recevoir plus de 20 mm dans les 12 jours qui suivent le semis.

Ensuite, pour chaque longueur de cycle et pour chaque date de semis, on peut définir :

- . l'indice $I_v = Itall \times T_f$ pour la période qui va du tallage au début maturation.
on le note I_{vc}, I_{vm} et I_{vl} respectivement pour les cycles courts, moyens et longs.
- . l'indice global $I_c = P_s \times I_v$.

On sera à même de générer un indice caractéristique du cycle :

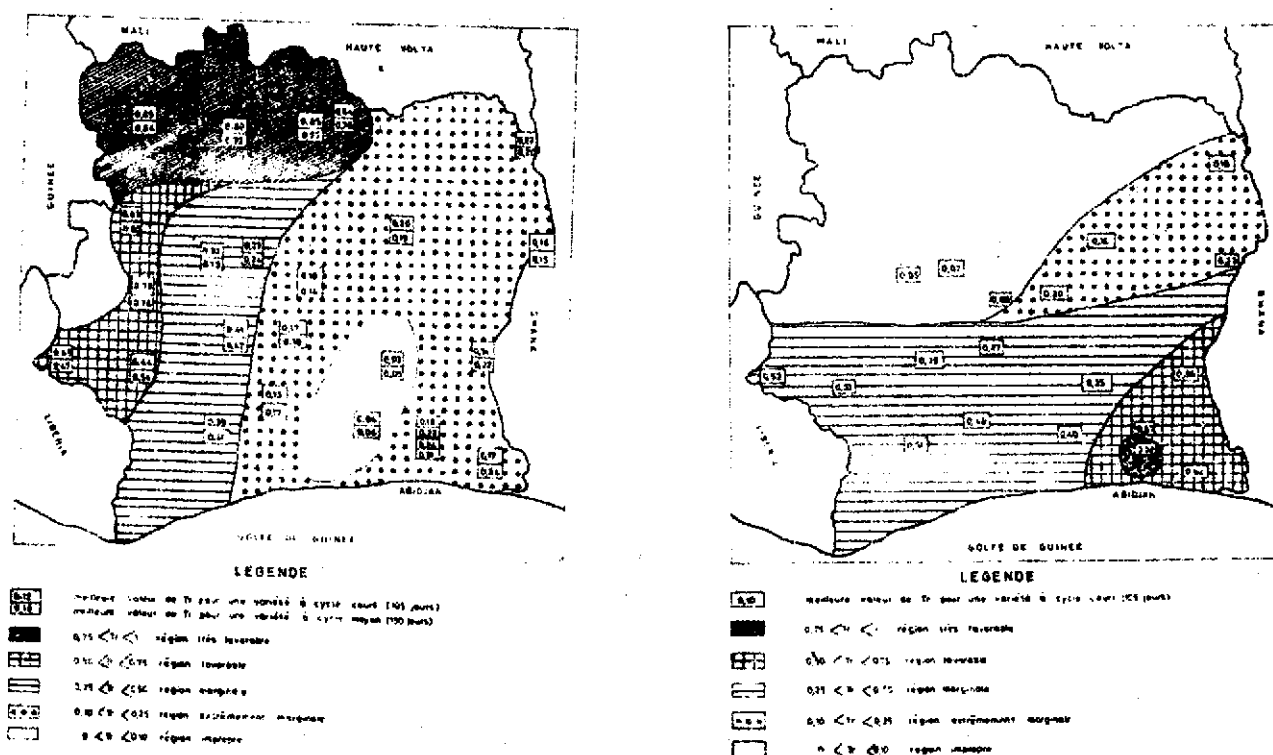
$$T_t = P_s \times Itall \times T_f$$

L'analyse de cet indice suivant les classes données par le tableau 24, a ainsi permis de définir une carte d'aptitude climatique à la riziculture pluviale en Côte d'Ivoire fig. 27.

Tableau 24 : Interprétation de l'indice -

Bornes de l'indice T_c	Aptitude à la riziculture pluviale
0,75 - 1	Très favorable
0,5 - 0,75	Favorable
0,25 - 0,5	Marginale - médiocrement favorable la riziculture ne doit être pratiquée que sur des bons sols.
0,1 - 0,25	Région extrêmement marginale riziculture ne peut être envisagée que sur très bons sols
0 - 0,10	Région impropre à la riziculture pluviale.

Figure 27 - Carte d'aptitude climatique à la riziculture pluviale -



1er cycle

Cycle unique ou deuxième cycle
d'après Gignou

5.2.1.4. Conclusion -

Ce type d'approche a permis de mieux appréhender l'interaction du climat sur les cultures.

On remarquera néanmoins :

- que les indices définis sont agronomiquement discutables et que la prise en compte de la RU du sol permettrait par simulation du bilan hydrique de retenir des indices, tels que le taux de satisfaction des besoins en eau, beaucoup plus significatifs (cf. 5.4.3.).

les résultats du zonage mais surtout ne permet pas d'appréhender l'espérance de production.

Le développement de la micro-informatique et de logiciels de simulation du bilan hydrique et d'analyse fréquentiels des résultats a, du fait de la plus grande pertinence agronomique des indices calculés, quelque peu enrichi ce type d'approche.

C'est plutôt vers la définition de seuils de réalisation des façons culturales ou l'étude de périodes de pluie ou sécheresse que l'approche pluviométrie est utilisée.

5.3. Méthode des intersections et période fréquentielle de végétation selon Franquin

5.3.1. Principe *

"Les principes qui sont à la base de cette méthode consistent à ne considérer dans le bilan, lors du déroulement de la saison humide, que quelques événements remarquables et les périodes qu'ils délimitent, ces événements étant choisis aussi indépendants que possible des conditions de sol et de végétation afin de pouvoir être déterminés sans ambiguïté par intersection de courbes climatiques.

La construction sur une même figure des courbes de pluviométrie P et d'évapotranspiration potentielle ETP (fig. 28)* détermine les positions de deux événements de nature purement climatique (dans la mesure où l'ETP peut être considérée comme telle) : B1 et B2 projections sur l'axe des temps des points d'intersection des deux courbes. L'intervalle B1 B2 délimite ce qu'on appellera la "période humide", caractérisée par cette condition que P y est globalement supérieure à ETP, et donc ETR l'évapotranspiration réelle, égale en principe à ETM l'évapotranspiration maximale de la culture.

Cette période humide est une fraction de la saison humide définie, distinctement de la saison pluvieuse comme le temps continu de l'année durant lequel le stock d'eau disponible dans une profondeur de sol donnée n'est pas nul. Caractérisée, en d'autres termes, par la permanence d'eau disponible dans le sol (quel qu'en soit le degré de disponibilité), la saison humide débutera donc au moment, noté A, où le déficit maximal du sol (supposé nu à cette époque en cas de cultures annuelles), atteint durant la saison sèche, commence à décroître sous l'effet des pluies. Elle se terminera au moment, noté C2, où ce déficit maximal se trouvera de nouveau réalisé, la culture ayant épuisé les réserves utilisables. Les points A1 et C1 situent approximativement la première et la dernière pluie (fig.28).

Contrairement à celles de B1 et B2 la position de C2 est contingente non seulement au climat, mais aussi à la végétation et au sol, ne pouvant donc être obtenue par intersection de courbes climatiques.

* D'après analyse agroclimatique en régions tropicales /méthode des intersections et période fréquentielle de végétation (in agronomie tropicale par P. FRANQUIN 665-667).

Sans grand intérêt pour des cultures annuelles, cet évènement ne sera donc déterminé que si nécessaire en faisant, à partir de B2 le bilan climatique entre : d'une part, l'ETP (ou l'ETM) : d'autre part, les pluies postérieures à B2 augmentées de l'excès de P sur ETP (ou ETM) entre B1 et B2 excès supposé stocké dans le sol en tout ou partie.

Le cas de A2 début de la saison humide, n'est pas aussi net. On pourra, en première approximation, le considérer comme indépendant de la nature du sol. Sans doute, l'évaporation d'un sol nu dépend-elle de son albedo (coefficient de réflexion pour la radiation), de sa texture et de ses micro et macro-structures. Mais on peut justifier (FRANQUIN 1969) de situer sa position au moment où la pluviosité croissante devient égale à la moitié de l'évapotranspiration potentielle : $P = ETP/2$.

Compte tenu donc de ce que l'évaporation d'un sol nu dépend aussi de ses caractères spécifiques et de ce que les formules d'estimation de l'ETP se vérifient à 10 % à 15 % près, on admettra en première analyse que, quelle que soit la formule (TURC et PENMAN notamment), le déficit du sol nu en général commence à diminuer, en régions tropicales, au moment approximatif où P devient égale à ETP/2 lui restant ensuite supérieure. Les positions dans le temps de l'évènement A2 étant, on le verra figurées en fréquence, on aura d'ailleurs toujours la ressource de se fixer une fréquence tenant compte des caractères du sol.

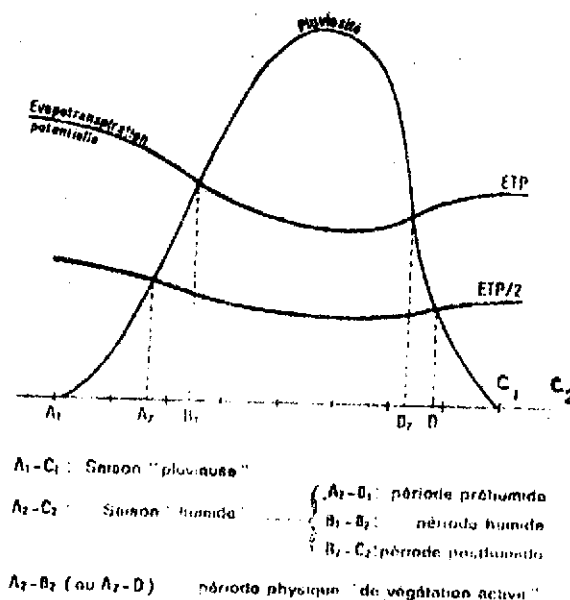
Ainsi, les évènements remarquables A2, B1, B2, C2 découpent la saison humide en trois périodes (fig.28) :

La période "préhumide" A2 B1, durant laquelle P est globalement inférieure à ETP (mais supérieure à ETP/2) et donc ETR à ETP :

La période "humide" B1 B2, durant laquelle P est globalement supérieure à ETP, et donc ETR égale à ETM (évapotranspiration maximale de la culture) :

La période "post-humide" B2 C2 durant laquelle P redevient globalement inférieure à ETP, et ETR généralement à l'ETM en dépit des réserves accumulées dans le sol entre B1 et B2.

Figure 28 - Découpage de la saison des pluies -



5.3.2. *Interprétation agronomique.*

Ce modèle de découpage de la saison humide d'après ses événements climatiques majeurs s'interprète bien au plan agronomique. Cette interprétation ayant déjà été développée, on rappellera seulement que :

La période préhumide A2 B1 est celle des semis : le semis devient en effet possible sans aléas, en principe dès l'instant où le sol reconstitue son stock d'eau utile, c'est à dire dès l'instant A2, qu'il est possible de situer à tout niveau de probabilité ; la considération de cet événement donne du début de la période de végétation active une définition plus concrète que la fixation d'une première pluie dite "efficace" (pour des conditions déterminées) : l'analyse fréquentielle de la position de A2 est d'ailleurs faite une fois pour toutes, quels que soient la cultura, le sol, le niveau de technicité, le rendement minimal espéré, etc... en sorte que l'on dispose d'une gamme de probabilités sur laquelle jouer selon les exigences :

La période antérieure A1 A2 est celle du semis dit "en sec" qui bénéficiera des faux départs de la saison humide (lorsque, après avoir dépassé ETP/2 P redevient significativement inférieure) : c'est surtout celle de préparation du sol en début de saison, quand il n'est pas possible de l'effectuer en fin de saison humide précédente : cette préparation devient de plus en plus aisée en direction de A2 puis de B1 pour devenir très difficile et même impossible au-delà en sol lourd :

La période humide B1 B2 est celle où les besoins en eau des cultures, alors en état de végétation très active, peuvent en principe être satisfaits entièrement, au moins globalement sinon à tout instant : ou bien alors ils ne le seront pas du fait du ruissellement ou bien ils le seront et il pourra y avoir comblement du déficit dans la zone exploitée par les racines et même drainage au-delà : le rendement photosynthétique et donc l'efficacité de l'eau seront d'autant plus élevés que les cultures présenteront au temps B1 un indice de surface foliaire plus fort, ce qui est une des raisons de la supériorité généralement constatée des semis précoces :

D'autre part, B2 détermine la fraction utile de la floraison des plantes à type de floraison axillaire indéfinie, comme le cotonnier et l'arachide : on constate aussi que les variétés photopériodiques (ou de cycle long) de mil et de sorgho (type de floraison terminale finie) traditionnellement cultivées donc bien adaptées épient au voisinage de la position moyenne de B2 : cet événement représente donc dans la plupart des cas la fin de la "période de végétation active" commencée en A2 les phénomènes de fructification maturation se déroulant pour l'essentiel après B2 :

La période posthumide B2 C2 durant laquelle se développe la fructification-maturation s'ouvrira en conditions d'autant meilleures pour le maintien d'un état de végétation favorable au rendement que les pluies de cette période seront plus prolongées, mais surtout que le sol aura été plus profondément humecté par l'excès l'eau de la période B1 B2 : un point D d'intersection (fig. 28) entre les courbes de P et de ETP/2 peut encore être considéré postérieurement à B2, bien qu'il n'ait pas une

signification agronomique aussi forte que celle de son symétrique A2 : on peut admettre, en effet, que tant que les pluies après B2 ne sont pas redevenues inférieures à ETP/2 l'addition à la lame de ces pluies d'une lame d'eau puisée dans le sol par la culture permet à celle-ci de satisfaire son évapotranspiration maximale (ETM) : la fin de la période de végétation active sera dans ce cas non pas B2 mais D.

5.3.3. Expression fréquentielle -

Le principal intérêt de cette figuration simple des conditions hydriques est sans doute qu'elle se prête bien au traitement fréquentiel, évènements et périodes qu'ils délimitent pouvant être analysés statistiquement.

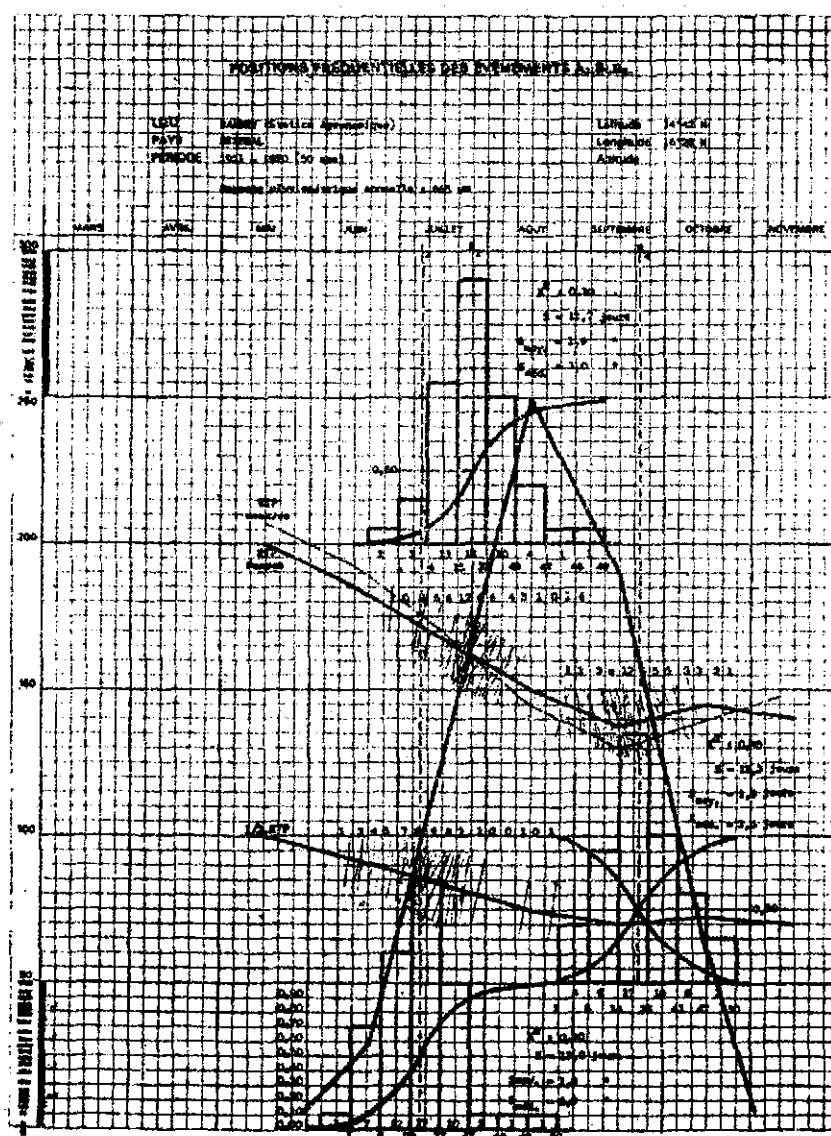
Si, en effet, on fait varier annuellement courbes de pluviométrie et d'évapotranspiration potentielle, on aura pour chaque année une position (déterminée par intersection) particulière dans la saison de chacun des évènements A2 B1 B2 D (C2 ayant une importance moindre et se prêtant mal à cette détermination parce que trop contingent au sol et à la végétation).

Pour chacun de ces évènements, on construit un histogramme de fréquences d'intersections histogramme qui se rapprochera plus ou moins de celui d'une loi normale. Normal ou non, on en tirera la courbe, (ajustée en cas de normalité empirique sinon) de probabilité totale ou fréquences relatives cumulées, courbe de répartition en S plus ou moins régulière si elle n'est qu'empirique (figure 29) mais que l'on pourra dans une certaine mesure lisser de ses irrégularités mineures.

En pratique, on ne fera généralement varier, chaque année que la courbe P des pluies, celle d'ETP, beaucoup plus stable, étant fixée à sa valeur moyenne, et on ne tracera chaque année, au moyen d'une pointe fine que les intersections de la courbe P variable avec les courbes fixes d'ETP et d'ETP/2. Après quoi, on dénombre les intersections dans chaque pentade calendaire (période de 5 jours représentée par le côté d'un carreau) et on les totalise, afin d'obtenir des diagrammes plus réguliers, par périodes successives de 10 ou 15 jours en choisissant la position de ces périodes (à partir des pentades, on peut constituer les décades de deux façons et les quinzaines de trois) qui fournit l'histogramme de distribution le plus symétrique. De cet histogramme, on passe par cumul à la sigmoïde (courbe en S) des fréquences cumulées, relatives de préférence afin de les rendre comparables.

Bien que, pour leur exploitation, il ne soit pas indispensable que les distributions d'intersections répondent à la loi normale, cette circonstance sera plus favorable et, pour certaines applications du moins l'hypothèse en sera testée. En cas d'ajustement significatif, il sera en effet possible d'affecter des limites de confiance à la moyenne, à la médiane ou à tout autre quantile (l'erreur sur la médiane, par exemple, est égale à l'erreur sur la moyenne multipliée par $3.1416/2$) et de travailler avec les courbes de densité et surtout de répartition ajustées et non plus empiriques (observées). Les fonds de graphiques employés pour ces constructions pourront avantageusement comporter une bande graduée en échelle.

Figure 29



Courbes moyennes de P (pluie), d'ETP et d'ETP/2 et leurs intersections A₁, B₁ et B₂. De part et d'autre de ces intersections moyennes, intersections des courbes annuelles (variables) de P avec les courbes moyennes (constantes) d'ETP et ETP/2. Ces intersections ont été dénombrées, pour chaque événement (A₁, B₁, B₂), dans les pentades successives, puis regroupées par décades qui constituent les intervalles de classes des histogrammes de fréquences. Ces histogrammes rappelant la loi normale. Il a été possible d'estimer l'écart-type d'une intersection (S), celui de la moyenne (S_m) et celui de la médiane (S_m). Les positions des médianes (verticales en trait discontinu) sont en bon accord avec les intersections moyennes. Les sigmoïdes de fréquences relatives cumulées ont été lissées de leurs irrégularités mineures. Celle de B₂ a été reproduite symétriquement.

gaussienne permettant de traduire la sigmoïde ajustée de fréquences cumulées en sa droite de Henri : la probabilité que l'évènement considéré (A2, B1, B2 ou D) soit réalisé au plus tard (ou déjà réalisé) à une date donnée (en abscisse) sera lue en ordonnée. On opérera de même avec la sigmoïde empirique si la distribution n'est pas gaussienne.

5.3.4. Conclusion -

Cette méthode a pour principal intérêt d'estimer de façon fréquentielle :

- la durée de l'hivernage utile (durée des cycles de cultures possibles),
- la durée des phases préparatoires (labour, préparation du sol).

Il est certain que cette approche est plus "géographique" (caractérisation du milieu) qu'agronomique bien qu'elle en constitue un préalable indispensable pour la compréhension des problèmes d'économie de l'eau.

On pourra remarquer que des approches de ce type sont réalisées par utilisation de bilans hydriques simplifiés intégrant plusieurs niveaux de RU (exemple travail du BDPA en Côte d'Ivoire).

En tout état de cause, si l'on recherche une compréhension et un diagnostic précis des problèmes d'économie de l'eau, cette technique est insuffisante et on devra avoir recours au bilan hydrique.

5.4. Modélisation du bilan hydrique

Quatre types de modèle vont être successivement étudiés par ordre de complexité :

- le modèle F. FOREST (cf. cahiers opérationnels, 1974).
- le modèle de Frères et Popov (étude FAO n° 17 : production végétale et protection des plantes),
- le modèle Bilan hydrique développé par l'IRAT à partir des travaux de F. FOREST et Franquin (ORSTOM),
- le modèle développé par Ritchie utilisant la LAI et ceux du même type développé par ARKIN doté d'un sous-programme simulation de développement physiologique de la culture.

5.4.1. Bilan hydrique efficace et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-Sahélienne (F. FOREST)

5.4.1.1. Objectif

L'objectif de cette approche est de jouer le rôle de "carnet de bord" pour le responsable agricole qui l'utilise. Son objectif est par une simulation "manuelle" du bilan hydrique d'apporter à la fin de chaque décade :

- un bilan hydrique et agroclimatique quantifié spécifique du sol et de la culture.
- une estimation de la probabilité d'évolution de la situation hydrique permettant, principalement en début de campagne de raisonner des choix techniques envisageables.

5.4.1.2. Organigramme du bilan -

La figure 30 et le tableau 25 donnent l'organigramme de calcul et de prise de décision proposés par cette méthode.

Tableau 25 - Signification des symboles utilisés dans les fiches de calcul -

SYMBLES	SIGNIFICATION
RU (mm)	Réserve maximale utile du sol ; à considérer avant la date du 29 juillet.
RMU (mm)	Réserve maximale utile au sol ; à considérer après la date du 29 juillet.
P (i) (mm)	Pluviométrie observée et cumulée de la décade ième.
i	Prend la valeur 1 pour la première décade où est réalisé le bilan hydrique. (généralement 1 mois)
RS (i - 1) (mm)	Valeur de la réserve en eau à la fin de la décade (i - 1) ou valeur de la réserve en eau au début de la décade (i).
OGE (i) (mm)	Valeur de la quantité d'eau offerte au sol au cours de la décade (i), sous la forme $P(i) + RS(i - 1)$.
$M = \frac{OGE(i)}{RT(i)}$	Humidité relative au sol.
$A = \frac{ETP(i)}{RT(i)}$	Indice d'aptitude à la mise en réserve de l'eau au cours de la décade. $A < 1$ aptitude significative. $A > 1$ aptitude nulle.
ETR (i) (mm)	Consommation réelle en eau de la plante ou évapotranspiration réelle du système plante-sol.
ETP (i) (mm)	Demande maximale d'eau du climat, ou évaporation potentielle climatique du système plante-sol.
$\frac{ETR(i)}{ETP(i)}$	Indice de satisfaction des besoins vitaux de la plante au cours de la décade i.
K (stade)	Seuil de satisfaction des besoins en eau de la plante pour un stade donné du cycle végétatif.
ETM (stade) (mm)	Consommation maximale de la plante à un stade végétatif donné.
X (mm)	Quantité minimale de pluie espérée en décade (i + 1) pour que les besoins en eau soient réellement satisfaits, pour une culture à un stade végétatif donné.
Nb. (%)	Probabilité exprimée en nombre d'années sur 100 pour que la pluviométrie P (i + 1) en cours de la décade (i + 1) soit réellement égale ou supérieure à X.
RT (.) (mm)	Prend la valeur RT (1) ou RT (2).
RT (1)	Capacité de rétention structurelle du sol ; à considérer avant le 29 juillet.
RT (2)	Capacité de rétention structurelle du sol ; à considérer après la date du 29 juillet.
K1	Coefficient culturel / stade
C	Longueur du cycle en décades.

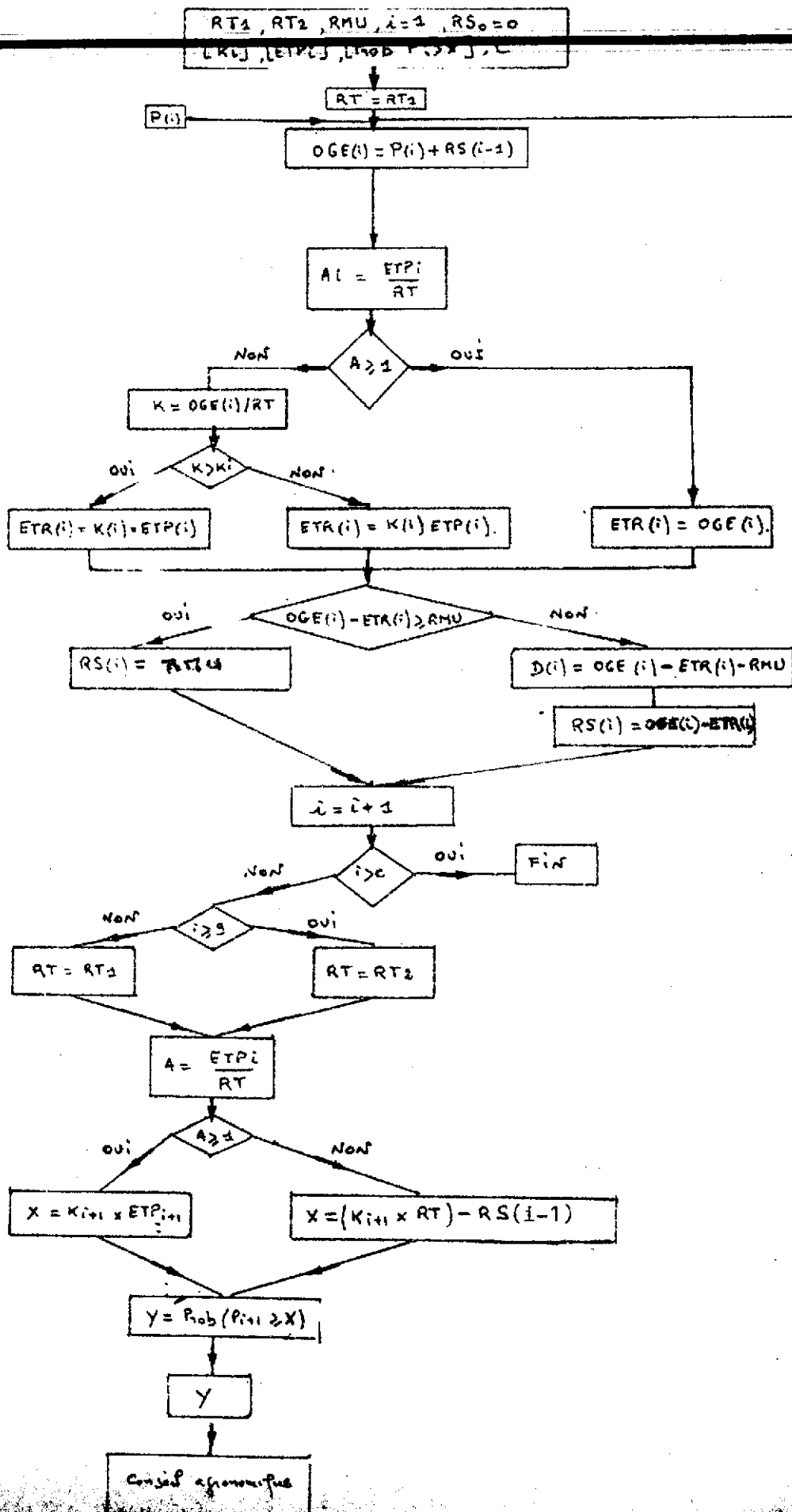
d'après F Forest

Figure 30

Organigramme du bilan hydrique efficace et prospective décadaire.

Bilan hydrique décadaire i

Prospective décadaire i+1



On remarquera que de par sa conception ce bilan :

- est avant tout décisionnel (réalisation ou non de façons culturales, évaluation prospective des risques sécheresse).
- qu'il est extrêmement simple dans sa modélisation de l'alimentation en eau de la culture pluviale proposée à ce jour et largement diffusée. On notera que c'est cette approche qui est retenue par le projet agrométéo pilote d'avertissement en temps réel testé actuellement au Mali. Sa limite nous semble être sa non prise en compte de l'influence des choix techniques sur l'espérance de rendement (ou indice de rendement). Les décisions qu'il permet de prendre seraient vraisemblablement améliorées en tenant compte de seuils pluviométriques nécessaires pour la réussite des façons culturales et d'une analyse prospective de la conséquence des choix sur le rendement final (analyse fréquentielle d'un indice de rendement simulé).

5.4.2. Le modèle Frère et Popov (étude FAO n° 17 production végétale et protection des plantes).

5.4.2.1. Objectifs de la méthode -

La méthode consiste en la simulation d'un bilan hydrique simplifié conçu de façon à fournir :

- une surveillance qualitative des conditions de la récolte par étapes successives.
- une estimation quantitative des rendements moyennant la disponibilité de données moyennes sur la productivité de la culture dans la région considérée.

5.4.2.2. Index de rendement -

L'index* utilisé par AGRHYMET pour le bilan hydrique cumulatif des cultures (cf Annexe 2), indique sous forme de pourcentage et cumulativement comment les besoins en eau d'une culture annuelle ont été satisfaits, et ce jusqu'à un stade quelconque de son cycle végétatif. Il tiendra d'autre part compte d'éventuels excès pluviométriques (pluies supérieures à 100 mm).

La figure 31 explicite le calcul de cet index fait décadairement :

RU	- réserve utile du sol
RS	- stock d'eau du sol
Pi	- pluie à la décade i
Ki	- coefficient cultural simplifié au cours de la décade i
ETPi	- évapotranspiration potentiel à la décade i
Ii	- Index de rendement
Bi	- Besoin en eau de la culture
S/D	- surplus ou déficit

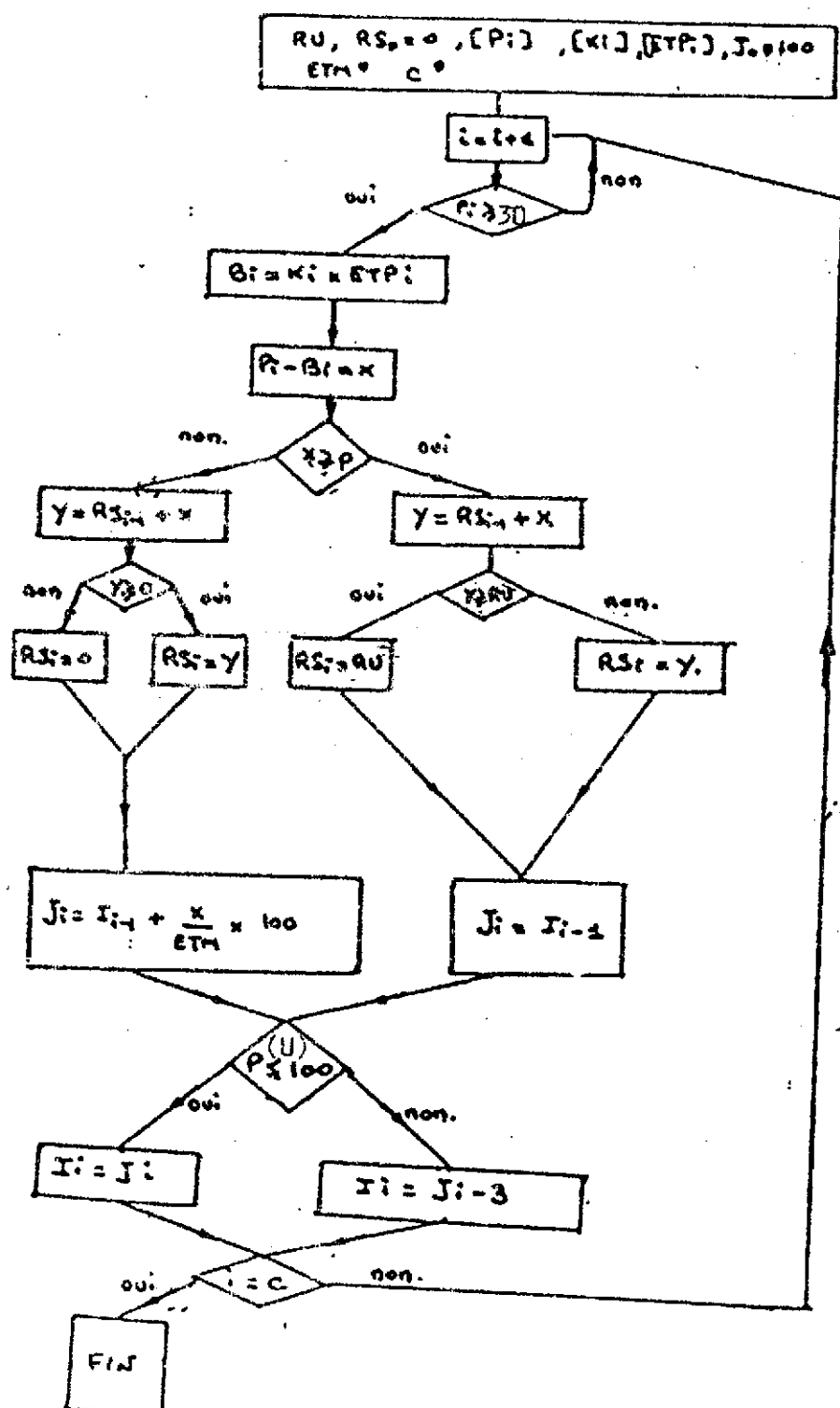
* Définition donnée par Frère et Popov - Bulletin FAO n° 17 -

FIG 31

ORGANIGRAMME DE CALCUL DE L'INDEX DE RENDEMENT F.A.O.

On considère que le suivi prend place lorsque le RU du sol est reconstituée et en particulier, qu'il s'effectue lorsque au moins 30 mn de précipitations sont touchées en une seule décade.

$I_0 = 100$

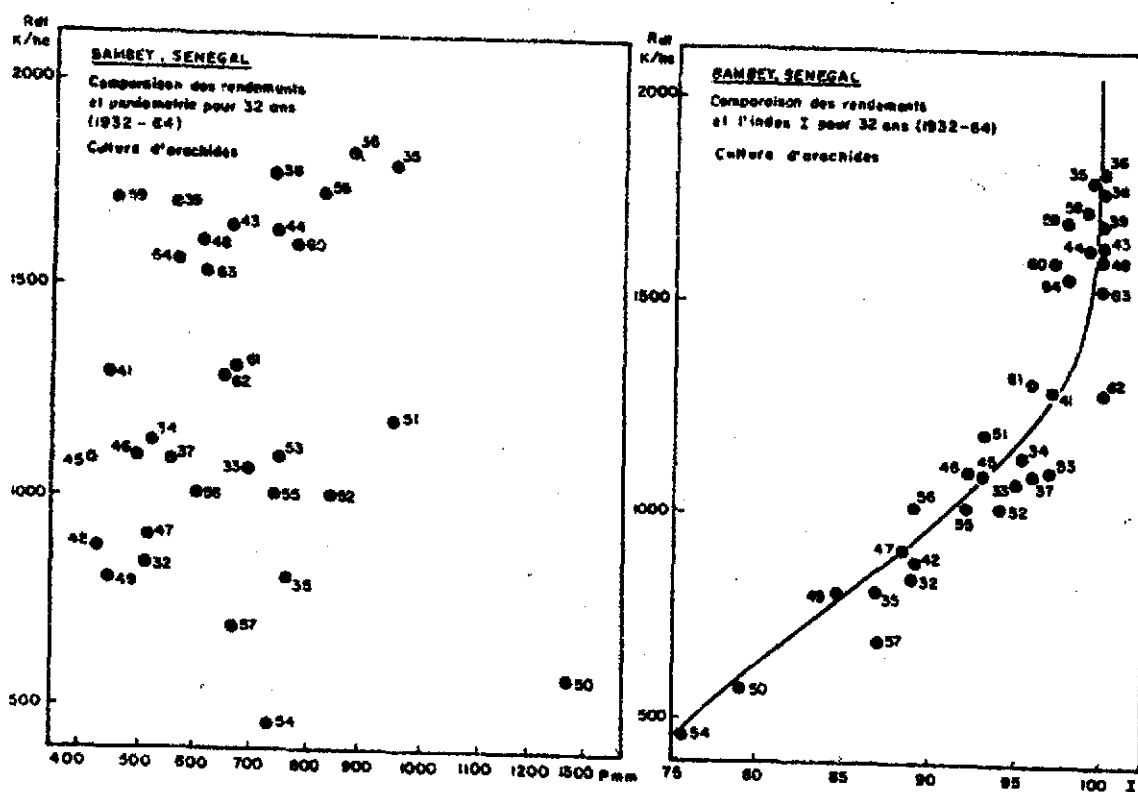


ETM = Besoins en eau sur tout le cycle
C = década récolte.

L'application de cette méthode aux résultats obtenus à Bambey (cf. fig. 32) montre tout l'intérêt de cette méthode par rapport à une approche purement pluviométrique.

- il n'y a pas de corrélation évidente entre les précipitations saisonnières totales et le rendement,
- la distribution des précipitations sur les différentes décades est très importante,
- les récoltes minima (700 kg/ha) se produisent au cours des années les plus sèches (300-400 mm) aussi bien qu'au cours des années les plus humides (1200 - 1300 mm),
- cette série de données a permis de quantifier l'effet négatif sur l'index des excès de précipitations,
- une bonne corrélation existe entre l'index, et le rendement.

Figure 32 - Application de l'indice FAO à l'étude des rendements de l'arachide à Bambey.



d'après Frère et Popov.

Il est certain que l'établissement de corrélations liant index et rendement ne pourra se faire que lorsque des données statistiques précises seront disponibles pour la région.

5.4.2.4. Utilisation de ce type de modèle comme outil de diagnostic -

L'utilisation agronomique de ce type de modèle paraît difficile dans la mesure où :

- il n'intègre pas une véritable gestion de l'offre en eau au niveau du sol (pas de report de réserve d'une décade à l'autre).
- il ne tient pas compte des périodes critiques au cours desquelles tout rationnement de l'alimentation en eau de la culture sera à même d'influencer de façon importante le rendement.

Aussi, compte tenu de l'intérêt que représente cette démarche il serait certainement intéressant de développer des modèles reportant la réserve en eau d'une décade à l'autre et/ou permettant, suivant la phase physiologique, de pondérer le calcul de l'indice I.

Le tableau 26 en est un exemple : application de l'indice de calcul FAO à une modélisation développée par l'IRAT. (avec report de réserve).

Tableau 26 - Application de l'indice FAO à une modélisation de bilan hydrique type IRAT.

ANNEE : 1979
RESERVE MAXIMALE UTILISABLE : 60. MM
ARCHIVE 905

PERIODES :	P	HR	K	ETM	ETR	RES	I	DR
JUIN ** 1ERE	31.4	0.00	0.00	0.0	-24.6	6.8	0.0	0.0
JUIN ** 2EME	78.7	0.00	0.00	0.0	-3.9	76.1	0.0	5.5
JUIN ** 3EME	4.4	0.00	0.00	0.0	-23.4	56.6	0.0	.5
JUIL ** 1ERE	39.5	0.00	0.00	0.0	-21.0	59.0	0.0	16.1
JUIL ** 2EME	29.1	0.00	0.00	0.0	-3.2	76.7	0.0	8.1
JUIL ** 3EME	26.4	1.00	.35	23.1	23.1	56.9	00.0	23.2
AOUT ** 1ERE	18.8	.95	.40	22.8	22.8	52.9	00.0	0.0
AOUT ** 2EME	0.0	.66	.75	39.0	35.1	17.8	98.7	0.0
AOUT ** 3EME	108.9	1.00	1.00	55.0	51.8	28.2	97.6	46.7
SEPT ** 1ERE	14.4	.53	1.00	49.0	37.5	5.0	93.8	0.0
SEPT ** 2EME	96.8	1.00	1.00	45.0	42.9	37.1	93.1	21.8
SEPT ** 3EME	12.0	.61	1.00	47.0	39.3	9.9	90.5	0.0
OCTO ** 1ERE	26.5	.45	.90	49.5	34.5	1.9	85.5	0.0
OCTO ** 2EME	0.0	0.00	.70	39.2	1.9	0.0	73.1	0.0
OCTO ** 3EME	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOVE ** 1ERE	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOVE ** 2EME	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOVE ** 3EME	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DECE ** 1ERE	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DECE ** 2EME	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
DECE ** 3EME	0.0	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

→ INDICE Poroy

5.4.3. Le modèle de bilan hydrique développé par
l'IRAT (F. FOREST) à partir des travaux de
F. FOREST et P. FRANQUIN (ORSTOM)

5.4.3.1. Présentation -

La méthodologie proposée est basée sur une caractérisation des conditions hydriques de la culture par l'établissement, selon une échelle de temps plus ou moins fine du bilan hydrique dans tous ses termes.

$$I + P - R - DR + H - ETR = 0$$

où P = Pluviométrie
R = Ruissellement
I = Irrigation
DR = Drainage
H = Variation du stock
ETR = Evaporation du couvert végétal

5.4.3.2. Description -

L'originalité du modèle BIP est :

- de tester un seuil pluviométrique pour le semis et le labour,
- de faire appel à un système de simulation de l'humectation du sol,
- d'utiliser à la fois pour le calcul de l'évapotranspiration réelle :

- . des coefficients culturaux
- . l'algorithme d'Eagelman

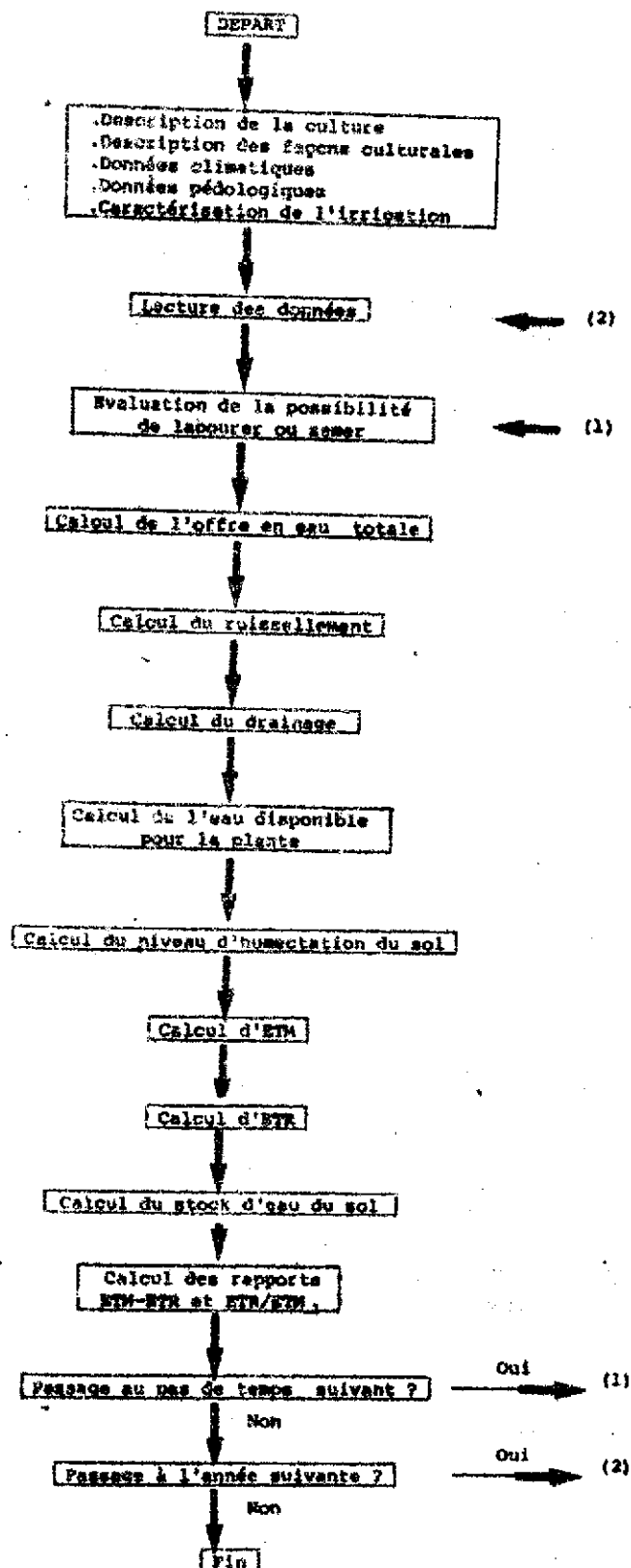
$$Kc = \frac{ETM}{ETR}$$

La figure 33 donne le diagramme de ce modèle. Des données d'entrée sont répertoriées dans le tableau 27 et son rentrées sous le mode conversationnel (figure 34).

tableau 27 - données utilisées par le modèle BIP -

Description de la culture	Façons culturales	Données climatiques	Données pédologiques	Caractérisation de l'irrigation
.Culture	.date de semis (ou repiquage)	.Pluies journalières	.Réserve utile	.dose mise en culture
.longueur du cycle		.ETP	.seuil de ruiss.	
.coefficients culturaux	.travail du sol		.capacité de rétention	.dose irrigation
.Période de végétation	.Pluie de semis		.Coefficient de ruiss.	
.Vitesse d'enracinement			.seuil travail du sol.	

Figure 33 - Organigramme général des étapes de la simulation du bilan hydrique par B.I.P. (IRAT).



LE CONTENU DU FICHIER PLUIES EST IL CORRECT ?
SI OUI RETURN, SI NON CONSULTEZ PAR SCREEN PLUIES

LE PAS EST IL 5 OU 10 JOURS ? INDIGUER:

57

65

106.

Figure 34.

NOM DU PAYS ET DE LA STATION :

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

XXXXXXXXXX

PERIODE DE SERIES NO + 101 ET NOMBRE JOURS A ETR :

XXXX

2803

SEUIL DE PLUVIOMETRIE POUR LADOUR ET SERIES ?(mm)

XXXX

1530

LE BILAN HYDRIQUE EST CALCULE POUR UN CYCLE DE CULTURE DONNE A VOTRE CHOIX

NOMBRE DE SITUATIONS ET NOMB DE LA CULTURE ?

TAPER N ET LE NOMB :

XX XXXXXXXXXXXXXXX

02 PIX 135 :

RESERVE UTILISABLE NR ET CAPACITE RETENTION X :

XXXX

03800

DUREE DU CYCLE :

XXXXJOURS

135

COEFFICIENT ET SEUIL DE RUISSELLEMENT :

XXXX

4020

ETP DECADEAIRE 1ER SEMESTRE(10VALEURS) :

45 43 58 54 54 58 62 64 64 64 63 62 61 59 58 53 51 48

ETP DECADEAIRE 2EME SEMESTRE(10VALEURS) :

48 47 46 45 45 45 44 47 50 52 53 53 53 53 54 55 54 48

LES COEFFICIENTS CULTURAUX SONT :

.78 .78 .80 .80 .80 .90 .95 .95 1.10 1.10 1.10 1.10 1.25 1.25 1.30 1.30 1.30 1.30
1.30 1.30 1.25 1.25 1.10 1.10 .80 .80 .78 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00

DOSE D'IRRIGATION AU SERIES ? EN CULTURE ? :

XXXXXXXXXX

NOUVELLE ANNEE DEBUT,FIN :

XXXXXXXXXX

19741983

LES BESOINS SONT DONNES SELON LE PAS 5 OU 10

RAPPEL DU PAS :

5JOURS

DUREE DES PHASES PHYTOLOGIQUES :

LEV IDV FL1 FL2 MAT

DUREE PHASE LEVEE ET VITESSE RACINAIRE RM/J:

XXXX

1510

CROISSANCE ,DEBUT FLEUR,PLEINE FLEUR,MATURATION :

XXXXXXX

15103435

DUREE PHASE DE LEVEE :15JOURS

" " " " CROISSANCE :15

" " " " INIT FLEUR :30

" " " " PLEINE FLEUR:30

" " " " MATURATION :35

LE CYCLE EST IL LE PREMIER A GERER,SI OUI TAPER 0

SINON TAPER DUREE DU DECALAGE EN JOURS :

XXXXJOURS

DONNER LE NOMBRE DE PERIODES POUR LESQUELLES

LE DETAIL DU BILAN EST UTILE (RINI :4,NAYI :72

XX

L'utilisation du bilan hydrique a permis :

- des études de zonage; exemple zonage riz pluvial Côte d'Ivoire (fig. 36).
- l'estimation de l'importance de l'alimentation hydrique des cultures et d'une façon plus générale des conditions climatiques sur l'espérance des rendements selon les choix techniques :
 - . choix entre cycle 1 et 2 en région Centre Côte d'Ivoire déterminé par le facteur rayonnement (fig. 36)
 - . efficacité de la fumure (fig. 37).
- la constitution d'un référentiel technique production climat (fig. 37 cas du sorgho) à partir des résultats des essais de longue durée disponibles en Afrique.
- évaluation des thèmes de recherche et réorientation, exemple du Sénégal où la modélisation du bilan hydrique a permis la redéfinition de la carte d'adaptation variétale de l'arachide.
- étude de projets (canne à sucre Guinée, Madagascar, Réunion... étude de faisabilité projet riz Mopti).

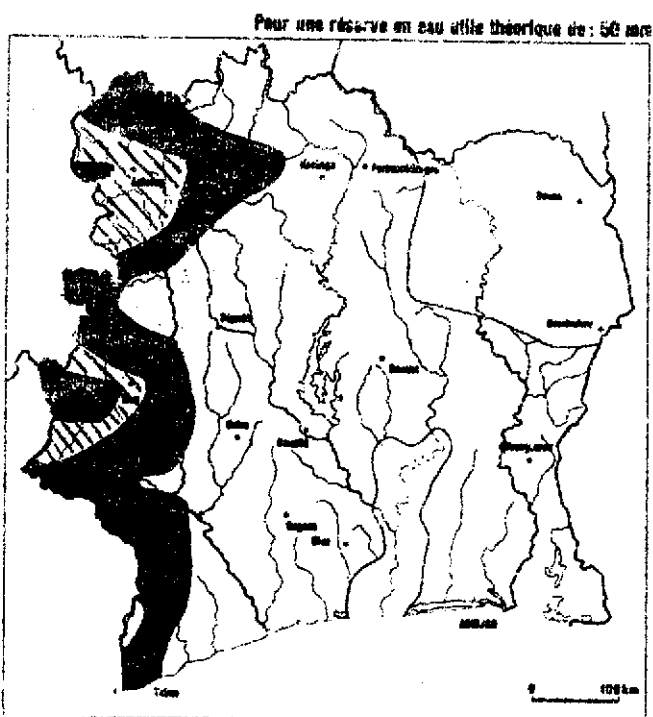
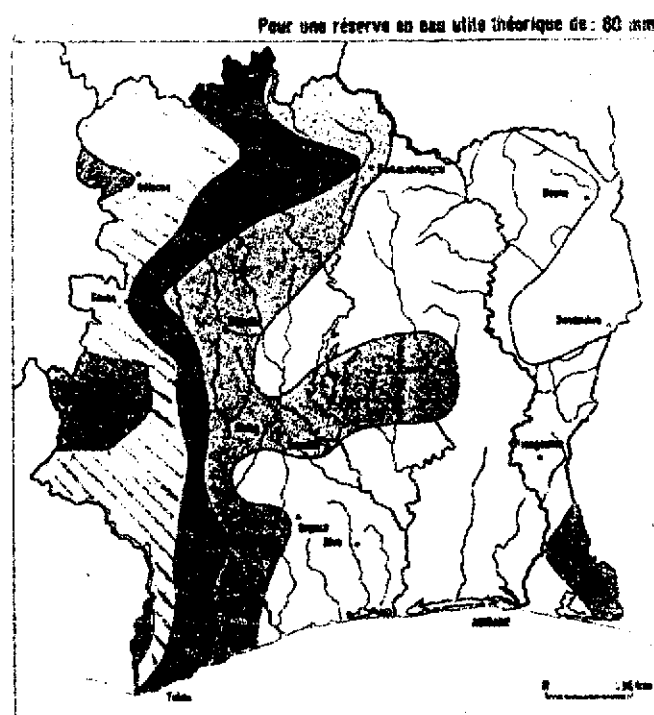
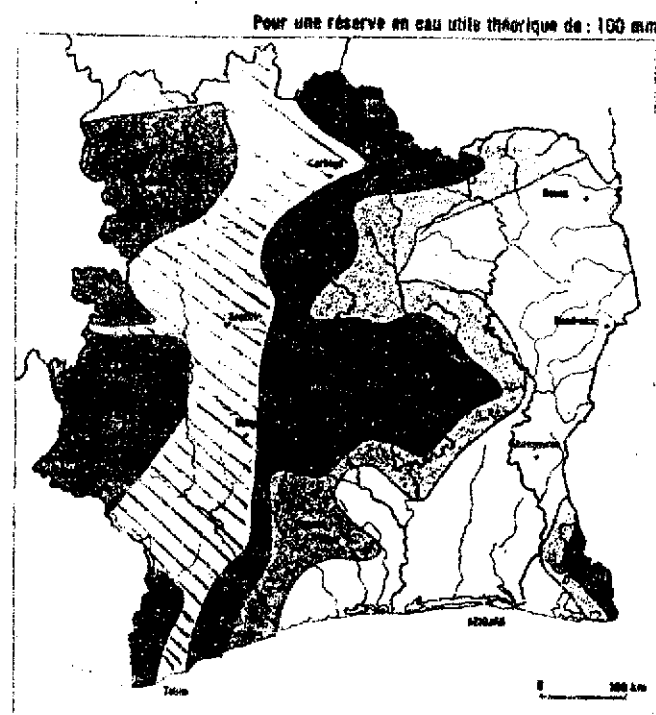
Actuellement, les travaux de recherche dans ce domaine se proposent d'en élargir l'application :

- au diagnostic à la parcelle (en particulier dans le cadre d'opération de Recherche Développement).
- à la mise au point de conseils aux producteurs.

Le risque climatique pris systématiquement en compte à l'échelle régionale ou du terroir, pour une culture pure ou un système plus complexe permet de hiérarchiser les situations agrotechniques envisagées. Sans perte de temps, des propositions concrètes peuvent être transmises à la profession (exemple d'application à l'arachide au Sénégal, fig. 38) et des axes prioritaires confiés à la recherche d'accompagnement.

Exemple : Proposition d'une variété à cycle plus court (paysan) et recherche sur les niveaux d'intensification à donner à la culture principale (semis prioritaire), la culture secondaire... compte tenu du risque de lessivage et de déficit hydrique.

Figure 36 - APPLICATION DU BILAN HYDRIQUE AU ZONAGE AGROPEDOCLIMATIQUE - APTITUDE A LA RIZICULTURE PLUVIALE EN COTE D'IVOIRE - F. Forest & Volat.



CLASSE APTITUDE

Très favorable		1.
Favorable		2.
Moyenne		3.
Marginale		4.
Très marginale		5.
Impropres		6.

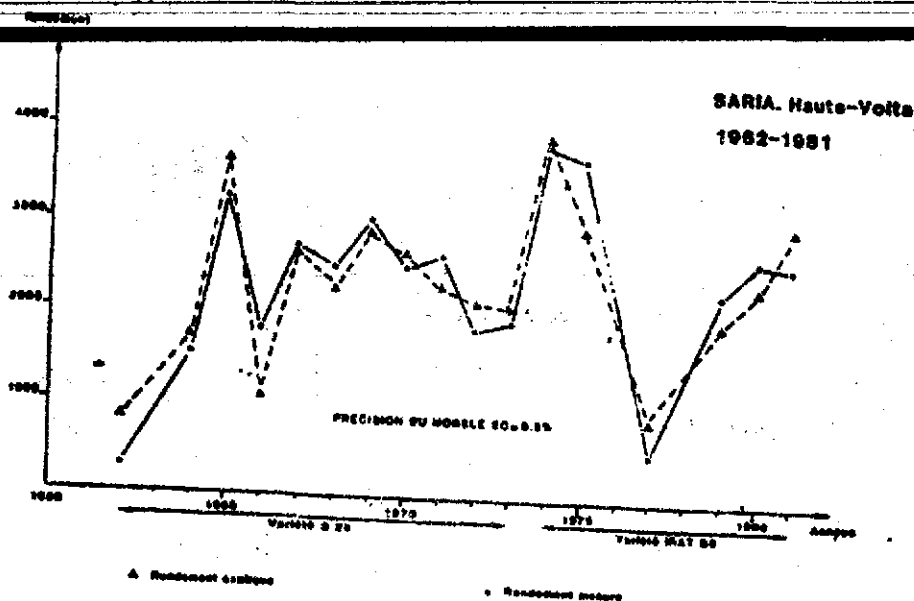
POURCENTAGE DE SATISFACTION DES BESOINS EN EAU AU COURS DU CYCLE DE CULTURE

Sécheresse par été	Humidité par été
1. $\geq 95\%$	$> 85\%$
2. $> 90\%$	$\geq 85\%$
3. $\geq 85\%$	$\geq 80\%$
4. $\geq 80\%$	$\geq 75\%$
5. $\geq 70\%$	$\geq 55\%$
6. $< 60\%$	$< 55\%$

Figure 37 - Application de la modélisation du bilan hydrique à l'explication des rendements.

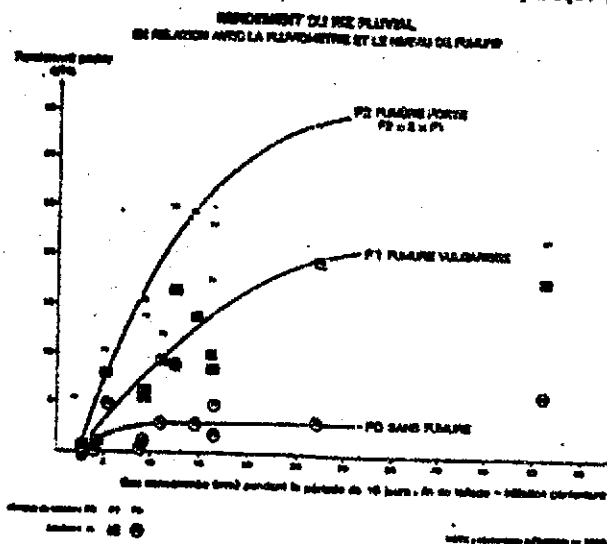
110.

- EXPLICATION DU RENDEMENT DE GRAIN D'UNE SÉRIE ANNUELLE DE CÉRÉALES
PAR MODÉLISATION DU BILAN HYDRIQUE.



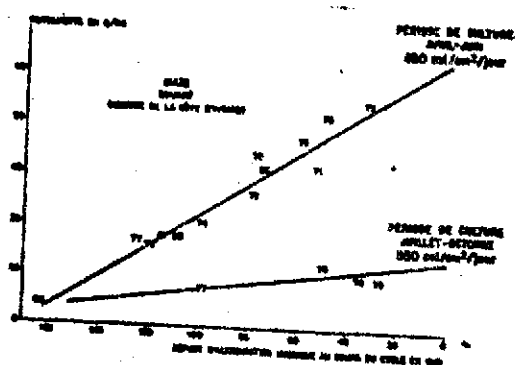
Forest Lidon.

- RENDEMENT DU RIZ PLUVIAL EN RELATION AVEC LA PLUVIOMETRIE ET LE NIVEAU DE FUMURE (Modélisation du bilan hydrique par S.I.P.)



Forest Kalms.

- RENDEMENT DU MAIS EN RELATION AVEC LA PLUVIOMETRIE ET L'ENSOLEILLEMENT (Bilan hydrique simulé par S.I.P.)



Forest Marchand Kalms

Le bilan hydrique appliqué à l'échelle de la parcelle permet de situer le poids de l'influence des conditions hydriques sur le rendement final. Le diagnostic ainsi opéré permet de clarifier le problème de l'explication du rendement et de hiérarchiser les facteurs limitants.

Il faut néanmoins reconnaître que la modélisation appliquée au milieu réel se heurte :

- à une méconnaissance de la dynamique de l'eau en milieu réel (déjà signalée dans le chapitre sol).
- à une méconnaissance du développement physiologique de la culture (longueur des différentes phases, influence du photopériodisme...) et influence réelle sur les besoins en eau.
- à un manque d'homogénéisation des bases de données. Actuellement, un grand nombre de modèles sont disponibles grâce au développement de l'informatique et on peut affirmer que plus que la valeur et la précision de la modélisation, c'est certainement la capacité à décrire le milieu et à interpréter pratiquement agronomiquement les résultats qui font la valeur d'une modélisation.

5.4.3.5. *Limite actuelle d'application du bilan hydrique des cultures comme outil de diagnostic*

5.4.3.5.1. *Paramétrage et modélisation du milieu réel -*

Ce paragraphe ne fait que reprendre des lacunes de connaissance déjà citées dans ce rapport :

- méconnaissance de la dynamique de l'eau du sol en milieu réel,
 - . Interaction des façons culturales suivant les types de sol,
 - . interaction de la fertilisation,
- méconnaissance du développement physiologique des cultures,
 - . durée des différentes phases physiologiques souvent imprécises,
 - . effet du photopériodisme sur la physiologie et la consommation en eau des cultures,
 - . réponse des cultures pluviales à l'alimentation en eau,
 - . effet de la sécheresse sur le développement physiologique des cultures et interaction sur leur consommation en eau ultérieure.
- approche par trop souvent non adaptée à la problématique pluviale.
 - . pas de méthodologie pratique permettant de quantifier les besoins en eau d'une culture ayant subi un stress hydrique et de ce fait en retard dans son développement végétatif.

5.4.3.5.2. Le manque d'homogénéisation des bases de donnée

Pour illustrer ce problème nous aurons recours à un exemple consistant à comparer l'utilisation de diverses bases de données (FAO, EvBac, Penman) pour simuler le bilan hydrique d'une culture dont l'alimentation hydrique a été suivie à la sonde à neutron, ce qui permet de comparer réalité et résultats de la simulation.

Pour évaluer les besoins en eau de la plante deux référentiels sont utilisés :

- d'une part celui rassemblé par l'IRAT (travaux de Dancette) basé sur le Bac classe A.

$$ETM(i) = K'c \times EVA(i) \text{ (période } i)$$

- d'une part celui proposé par la FAO (DOORENBOS, Revue n°24).
EVA corrigé permet de calculer ETo

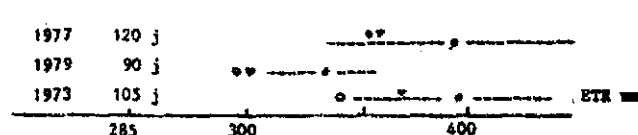
$$ETM(i) = Kc \times ETo$$

La simulation comparative sera effectuée pour 3 variétés de cycle différent (120, 105, et 90 jours).

Les résultats comparatifs explicités au tableau (38) permettent de faire les observations suivantes :

Tableau 38 -

ANNEE	CYCLE	PARAMETRES		Date semis	ETM (mm)	ETR / ETM						ETR Cycle (mm)
						J A S						
						1-15	16-30	31-33	36-80	81-105	cycle	
1973 RU = 100 Sol Dior / Deck	105 j	K'c	Bac A	5/07	530	94	<u>46</u>	88	85	<u>43</u>	70	372
		Kc	Bac corrigé		407	98	<u>58</u>	95	88	66	83	337
		Bilan	in situ		510	<u>62</u>	83	84	100	<u>59</u>	74	392 ± 10 %
1979 RU = 80 mm Sol Dior	90 j	K'c	Bac A	11/07	390	<u>76</u>	87	<u>56</u>	89	88	77	300
		Kc	Bac corrigé		371	<u>95</u>	95	<u>64</u>	85	75	80	295
		Bilan	in situ		393	<u>61</u>	71	<u>73</u>	100	100	86	338 ± 6 %
1977 RU = 100 Sol Dior/Deck	120 j	K'c	Bac A	7/07	558	89	<u>63</u>	75	80	<u>30</u>	45	360
		Kc	Bac corrigé		498	90	<u>82</u>	77	78	<u>52</u>	71	356
		Bilan	in situ		556	100	<u>58</u>	86	94	<u>32</u>	70	389 ± 13 %



Association K'c (IRAT) et Bac classe A
Kc (FAO) Bac classe A corrigé
Bilan hydrique "in situ"

- Le paramétrage type IRAT donne un résultat acceptable sur 2 bilans (1973-1977).
- 2 - Le paramétrage FAO est satisfaisant l'année 1977.
 - 3 - Les périodes de déficit hydrique de début de cycle sont très mal appréciées avec le paramétrage FAO, un peu mieux estimé avec celui de l'IRAT.
 - 4 - Les périodes de déficit en pleine période de développement (1977-1979) sont bien expliquées par le paramétrage IRAT.
 - 5 - Enfin de cycle, le paramétrage FAO sous estime le déficit hydrique (1977-1973). Celui de l'IRAT le surestime quelque peu.

On notera que, pour la durée de cycle de 120 jours le paramétrage FAO est très imprécis (à attribuer en particulier à l'évaluation des coefficients culturaux).

* CONSEQUENCES PRATIQUES

A l'échelle régionale, pour le zonage les 2 référentiels se valent. Il convient toutefois de disposer des valeurs du Bac.

A l'échelle de la parcelle, en vue de l'explication du rendement, le paramétrage IRAT donne une image assez fidèle des périodes de déficit hydrique. *paramétrage*

Si on dispose d'un Bac Classe A, on recommandera les coefficients K_c IRAT.

Dans l'hypothèse inverse, il sera logique d'utiliser les coefficients de la FAO avec un estimateur de la demande climatique, en l'occurrence l'ETP-gazon. Dans le cas de Bambey (zone = sahélienne) cette procédure (tableau 39) ne semble pas fonctionner, comme le montre les bilans pour les années 77 et 79.

Tableau 39 -

Année 1977 Arachide 120 j	ETM	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	$\frac{ETR}{ETM}$	ETR Cycle
K _c - FAO ETP gazon	497	98	100	78	78	65	77	349
In situ	556	100	<u>58</u>	86	94	<u>32</u>	70	389
Année 1979 Arachide 90 j								
K _c - FAO ETP Gazon	343	98	98	73	87	76	83	286
Bilan in situ	393	<u>61</u>	71	73	100	100	86	338

Ce résultat signifie que le choix de l'ETP Gazon comme référentiel n'est pas fiable à l'échelle de la parcelle. Des travaux complémentaires devraient préciser les régions où le référentiel est acceptable. On sait en effet que lorsqu'on se dirige vers des zones humides, l'ETP tend vers la valeur du Bac classe A et peut même la dépasser. Dans ces zones, il semblerait que le paramétrage FAO (Kc, ETP Penman) puisse être acceptable. Pour les régions plus au Nord, le problème reste posé et il convient de souligner l'imprécision de ce type de paramétrage dans les régions Soudano-Sahéliennes et encore plus sahéliennes.

Une solution envisageable consisterait à étudier la relation entre la variabilité de l'ETP et la distribution des pluies. On disposerait dans cette hypothèse d'un estimateur pondéré de l'ETP pour chaque période de calcul du bilan. Une opération de recherche serait à lancer en priorité si l'on veut améliorer la qualité des modélisations du bilan hydrique ayant recours à l'ETP.

5.5. Exemple d'application pratique d'un modèle de croissance pour une culture de sorgho SORGF pour l'évaluation du risque climatique

5.5.1. Objectif : évaluation directe d'un rendement -

La difficulté à laquelle se heurte l'utilisation du bilan hydrique en est l'interprétation. Sur un certain nombre d'essai de longue durée, des régressions (pas toujours statistiquement justifiées) ont été calculées et permettent en fonction du taux de satisfaction en eau des cultures d'évaluer le rendement final. (riz pluvial, maïs Bouaké, arachide Bambey, sorgho Saria) ; mais on reste souvent gêné, en particulier dans un contexte technique différent, pour définir, ne serait-ce qu'un indice de rendement.

Pour pallier à cette lacune le modèle SORGF (Texas A & M University) a associé à un modèle de bilan hydrique (RITCHIE), un modèle de croissance (VANDERLIP et ARKIN) permettant un calcul direct du rendement.

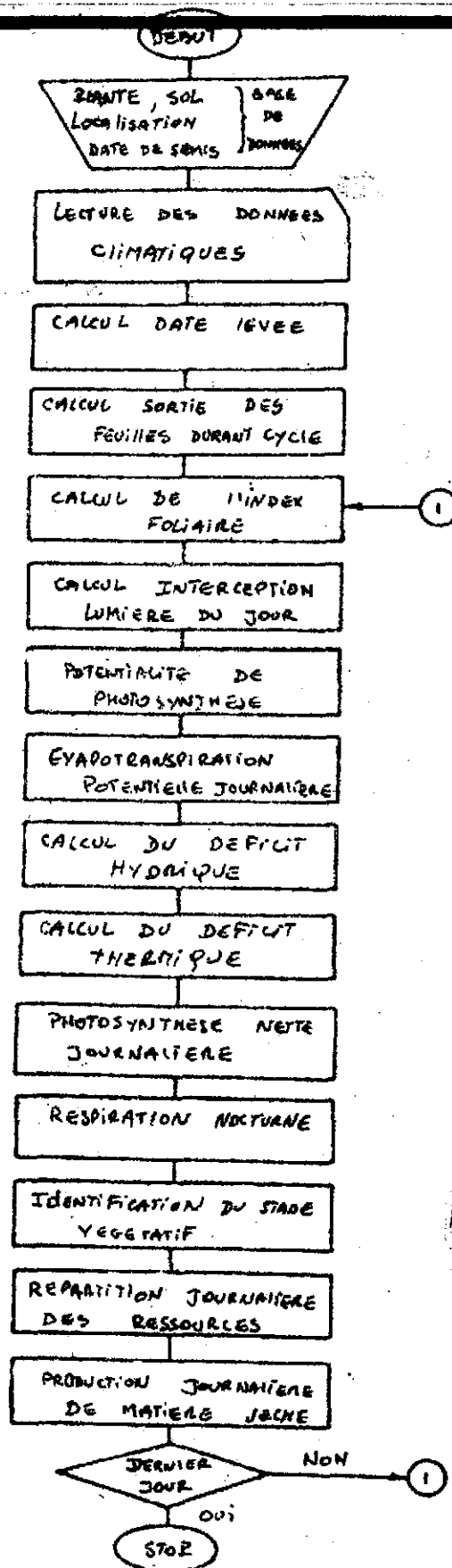
5.5.2. Description du modèle -

La figure 39 schématise les différents sous-programmes utilisés pour simuler chaque jour la croissance de la plante et la gestion de l'eau du sol. L'approche est physique et biochimique (à rapprocher de celle faite par Penman pour l'ETP).

Elle permet par l'utilisation entre autre d'un certain nombre d'algorithme de calculer le développement :

- le développement de l'enracinement, (poids et profondeur),
- des feuilles (nombre, poids et surface),
- des tiges et organes reproducteurs,
- en grain.

FIGURE 39 ORGANIGRAMME DU MODELE DE SIMULATION JOURNALIERE
DU RENDEMENT D'UNE CULTURE DE SORGHO (ARMIN ET AL.)



On notera à ce propos que, dans l'état actuel des connaissances en matière de physiologie (en particulier résistance à la sécheresse). C'est sur cet aspect que tout essai d'application en Afrique risque de se heurter.

5.5.3. Application de la modélisation/prévision des rendements -

L'application de tels modèles peut être faite à 2 niveaux :

- détermination pour une culture donnée de la variabilité des rendements en fonction des conditions climatiques.
- évaluer l'espérance de rendement final au cours d'une campagne (suivi d'hivernage).

Dans tous les cas, soit pour obtenir une bonne stabilité de la valeur des paramètres statistiques déterminés (variabilité des rendements), soit pour obtenir des probabilités conditionnelles, (suivi d'hivernage), les seules données climatologiques mesurées s'avèrent insuffisantes. Aussi dans ce type d'application a-t-on recours à générer des données climatologiques (pluviométrie, ensoleillement, température minimum et maximum de l'air) en utilisant d'une part des chaînes de Markov (cf chapitre pluviométrie) et en utilisant des fonctions empiriques pour générer les données climatologiques journalières. On notera que, outre le fait que le modèle de croissance permet de tenir compte des stress hydriques sur le développement de la plante et donc sur ses besoins en eau ultérieurs, le fait de décrire le végétal permet, le cas échéant, d'être à même de recalculer le modèle.

Cette méthodologie est opérationnelle et a été testée au Texas. Sans penser à l'appliquer telle quelle dans les conditions africaines, il semble néanmoins que :

- son approche synthétique (modélisation physique et biochimique) des relations eau-sol-plante
- sa possibilité d'intégrer des paramètres relativement simples et descriptifs du milieu (recalage à partir de données recueillies au champ).
- son utilisation de données climatologiques simulées.

Sont des axes de travail qui tout en valorisant les résultats et l'approche déjà faite, permettrait d'améliorer et en particulier d'assouplir les modélisations du risque climatique actuellement utilisées.

5.6. Bibliographie

- ARKIN G.F. - TAYLOR H.M. 1981 -
 Root Zone modification : systems considerations and constraints.
 In : ASAE Monograph N. 4 "Modifying the Root Environment to
 Reduce Crop Stress", American Society of Agricultural Engineers,
 St. Joseph, MI 49085.
- ARKIN G.F. - WANDERLIP R.L. - RITCHIE J.T. - 1976 -
 A dynamic Grain Sorghum Growth Model. Trans. of the ASAE
 19(4) : 622-630.
- ARKIN G.F. - WIEGAND C.L. - HUDDLESTON R. - 1979 -
 The future role of a crop model in large area yield estimating.
 Proc. of the Department of Comm.
- ARKIN G.F. - MAAS S.J. - RICHARDSON C.W. - 1980 -
 Forecasting grain sorghum yields using simulated weather data
 and updating techniques . Trans. of the ASAE 23(3) : 676-680.
- BAIER W. - 1973 -
 Crop-weather analysis model : review and model development
 J. of applied meteorology, 12(6) : 937-947.
- BAIER W. - 1979 -
 Note on the terminology of crop-weather models.
 Agric. meteorology, 20 : 137-145.
- BAKER D.N. - 1980 -
 Simulation for research and crop management. in : world
 soybean research conference II : Proceeding . Edited by
 Fredrick T. Corbin, Westview Press, Boulder, CO 80301, pp. 533-546.
- BAKER D.N. - LAMBERT J.R. - PHENE C.J. - McKINION J.M. - 1976 -
 GOSSYM : a simulator of cotton crop dynamics . In : proceedings
 of seminar on agricultural industrial complexes. Scientific
 research institute of planning, Riga, USSR, October 1, 1978.
- BAKER D.N. - LANDEVAR J.A. - WHISLER F.D. - REDDY V.R. - 1980 -
 Plant responses to environmental conditions and modeling
 plant development . Proc. of weather and Agriculture Symposium
 Kansas City, MO, October 1-2, 1979, University of Missouri -
 Columbia, pp. 69-109.

- BERNDT R.D. - WHITE B.J. - 1976 -
A simulation-based evaluation of three cropping systems on cracking-clay soils in a summer rainfall environment.
Agric. Meteorol. 16 : 211-229
- DECOURSEY D.G. - 1978 -
Erosion simulation for land use management - ASAE paper n. 78-2082, ASAE, St Joseph, MI 49085.
- DUGAS W.A. - ARKIN G.F. - 1980 -
Evaluating sorghum production strategies using climatic data and crop models . Agronomy abstracts. p.11.
- EAGLEMAN J.R. - 1971 -
An experimentally derived model for actual evapotranspiration agric. meteorol. 8 (4.5) pp; 385-394.
- FOREST F. - KALMS J.M. - 1982 -
Influence des conditions d'alimentation hydrique sur la production du riz pluvial - région centre Côte d'Ivoire.
- FOREST F. - 1982 -
Influence du régime pluviométrique sur le déficit hydrique et la production de la canne à sucre - zone des hauts de St Paul IRAT - Réunion.
- FOREST F. - 1981 -
Evolution de la pluviométrie en zone Soudano-Sahélienne en cours de la période 1940-1979 conséquences sur le bilan hydrique des cultures pluviales au Sénégal - Agro Trop.XXXVII-1
- FOREST F. - LUCQUIAUD -
Caractérisation agroclimatologique d'un système d'agriculture pluviale intégrant les cultures de maïs-riz pluvial - soja IRAT - CNABRL.
- FOREST F. -
Essai de quantification de l'influence des aléas pluviométrique sur l'espérance de production en riziculture sous submersion zone de Djenne - Mali 1981.
- FOREST F. -
Influence du régime pluviométrique sur la variabilité du bilan hydrique des cultures pluviales en Afrique du l'Ouest- IRAT.

- FOREST F. - DE MIRANDA - 1979 -

Une analyse de la variabilité de la production de mil en milieu réel (Maradi-Niger) par la simulation des bilans hydriques.

- FOREST F. - 1979 -

Analyse fréquentielle des facteurs pédoclimatiques influençant la culture pluviale de la canne à sucre - GUINEE - IRAT.

- FOREST F. - 1982 -

Potentialités du milieu naturel - Moyen Ouest Malgache - IRAT

- FRANQUIN P. -

Analyse agroclimatique en régions tropicales - méthodes des intersections et période fréquentielle de végétation. DOC ORSTOM Bondy.

- FRANQUIN P. - FOREST F. -

Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique - Agronomie tropicale XXXII - 1.

- FRERE M. - 1972 -

A method for the practical application of the Penman formula for the estimation of potential evapotranspiration and evaporation from a free water surface, FAO ROME.

- FRERE M. - POPOV G.F. - 1976 -

Programme d'observation de l'évolution des cultures et de la prévision des récoltes dans la région sahélienne. FAO ROME AGP/Ecol. 9.

- FRERE M. - RIJKS J.Q. - REA J. - 1975 -

Estudio agroclimatológico de la zona andina FAO ROME.

- FRERE M. - RIJKS J.Q. - REA J. - 1978 -

Estudio agroclimatológico de la zona andina WMO GENEVE.

- GENERAL ACCOUNTING OFFICE - UNITED STATES - 1979 -

Agriculture weather information is not effectively communicated to users. Reports CED 79-110, Washington, DC 27pp.

- GIGOU -

Yatenga, Fara-Poura en Haute-Volta, Siné Saloum au Sénégal Opération Haute Vallée, CMDT au Mali, CIDT en Côte d'Ivoire...).

- JAMES R.C. - SILVERMAN B.A. - EDDY R.L. - 1979 -

Simulation of sorghum growth as affected by cloud seeding. In : the design of HIPLEX-1. United states dept. of Interior, Bureau of reclamation denver, CO.

- LIDON B. - DABIRE A.B. - 1980 -

Evaluation des techniques de conservation des eaux et du sol CIEH - IPD - 28 p. - Opération Recherche-Développement Yatenga/Sabouna.

- LECOUPIL JC - J CHAGGY - F FOREST - 1979 -
Evapotranspiration Besoin en eau des cultures Relation
eau sol.
Estimation fréquentielle des conditions d'alimentation
hydrique en culture pluviale et irriguée .Bilan hydrique .
- MAAS S.J. - ARKIN G.F. - 1978 -
User's guide of sorgf : A Dynamic grain sorghum growth model
with feedback capacity. Research center program and model
Documentation N. 78.1 (blackland research center at temple, TX)
Texas agricultural experiment station.
- MAAS S.J. - ARKIN G.F. - 1979 -
Sorghum advisory pilot project : Application of operational
weather forecasts to predicting management-Oriented crop status.
Preprints of the fourteenth conference on agriculture and FOREST
Meteorology and fourth conference on biometeorology, Minneapolis,
MN, American Meteorological Society pp.7-10.
- MAAS S.J. - ARKIN G.F. - 1980 -
TAMW : A wheat growth and development simulation model. Research
Center program an model documentation n. 80-3 (Blackland Research
Center at Temple TX), Texas Agricultural Experiment Station.
- MANALO E.B. - 1975 -
Agroclimatic survey of Bangladesh. Bangladesh rice research
institute/IRRI.
- MATTEI F. - 1978 -
Wheat crop biology research. Rapport final FAO (Romeo).
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - 1976 -
Climate and food (climatic fluctuation and U.S. Agricultural
Production). Report of the committee on climate and weather
fluctuations and agricultural production, Board of agriculture and
Renewable resources, commission on natural resources, national
research council, Washington DC, 212 pp.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - 1977 -
Supporting Papers : World Food and nutrition study Volume II
Commission on international relations, national research Council
Washington DC 299 pp.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - 1980 -
Weather information systems ofr on-farm decision making. Report
of the committee on weather information systems, board of
agriculture and renewable resources, Commission on natural
resources, national research Council Washington DC 80 pp.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES - 1981 -
Managing climatic resources and RIJKS. Panel on the effective
use of climate information in decision making, climate board,
Assembly of mathematical and pysical sciences, national research
Council Washington DC 51 pp.

- POPOV G.F. - 1978 -

Agroclimatological monitoring for crop forecasts in the Sahelian zone. Conference technique FAO/WMO ROME.

- ROBERTSON G.W. - 1968 -

A biometeorological time scale for a cereal crop involving day and night temperatures and photoperiod. Int. J. Biometeorology 12(3) : 191-223.

- RICHARDSON C.W. - 1981 -

Stochastic Simulation of Daily Precipitation, temperature and solar radiation water resources research 17(1) 182 -190.

- SAMMONS R. - 1980 -

Microcomputers for the farm and Ranch - Texas agricultural extension service Bulletin - 1332 Collège station, TX 4 pp.

- STAPPEL H. - ARKIN G.F. - 1980 -

CORNF : A dynamic growth and development model for maize (zea mays L.). Research center program and model documentation n. 80-2 (Blackland Research center at Temper TX), Texas agricultural Experiment station, 91 pp.

- STINSON D.L. - ARKIN G.F. - HOWELL T.A. - RICHARDSON C.W. - WILLIAMS D.L. - 1981 -

Modeling grain sorghum rotation cropping and associated runoff and sediment losses. Trans. of the ASAE 24 (3) : 631-635, 642.

- TOJATE E. - FAUCHY J. - SCHOCH P.C.

Vers une évaluation des rendements de l'arachide par la pluviométrie annuelle. 7 p. multigr. CNRA Bombay 1965.

- VANDERLIP R.L. - ARKIN G.F. - 1977 -

Simulating accumulation and distribution of dry matter in grain sorghum - Agron. J. 69:917-923.

- VANDERLIP R.L. - SCHMIDT B. - 1981 -

Effects of changing timing, frequency and amounts of precipitation on grain sorghum yield in western Kansas. Report to Kansas water resources board, office of atmospheric resources management of the United States Dept. of interior, water and Power resources Service, Manhattan, KS 22 pp.

- WHITEMAN P. - 1979 -

Technical report based on the activities of the jumla agricultural Farm 1977-78.

- WIT G.T. - BROUWER R. - PENNING de VRIES, F.W.T. -

A dynamic model of plant and crop growth. In : P.F. Wareing et J.R. COOPER (Eds) Potential crop production, a case study. Baingmann Educational Books Londres.

- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION 1977 -

Expert meeting on crop weather models. Report. Ottawa,
Canada - 11-15 October .

- ZAVALITA L.R. - LACEWELL R.D. - TAYLOR C.R. - 1980 -

Open Loop stochastic control of grain sorghum Irrigation
Levels and Timing. Amer. J. Agr. Econ. 62 (4) 785.792.

CONCLUSION

A travers ce récapitulatif des connaissances acquises dans le domaine des relations eau-sol plante en culture pluviale, l'importance et l'intérêt d'être à même d'appréhender en terme de risque climatique l'activité agricole est nettement ressortie.

Malgré les imperfections des méthodes proposées et les problèmes d'homogénéité et dans certain cas de manque de précision des données, le problème est tellement crucial, qu'actuellement les méthodologies disponibles, même si elles ne permettent bien souvent que de caractériser par un indice le degré de succès de la culture, sont opérationnelles dans la mesure où elles permettent d'éviter de grossières erreurs que seules des années d'expérimentation classique auraient permis de déceler.

Alors que jusqu'à présent c'est avant tout comme outil de recherche que les méthodologies d'évaluation du risque climatique étaient utilisées, c'est maintenant le développement qui, face à la fréquence des sécheresses, devient le premier des utilisateurs potentiels. Cela implique d'être à même de donner une information beaucoup plus synthétique (en clair proposer des espérances de rendement) et d'être en mesure de décrire les contraintes réelles du milieu.

Aussi est-on amené à envisager une approche beaucoup plus synthétique dans :

- la description des contraintes climatiques (banque de données homogène, simulation de situations),
- la prise en compte du travail du sol sur l'économie de l'eau (quantification),
- l'agrophysiologie des cultures pluviales (résistance à la sécheresse, développement physiologique),
- l'agronomie, explication du rendement d'une culture.

Pour réduire le décalage entre les réponses actuellement fournies et la demande du développement, compte tenu de la conjoncture économique et malgré l'urgence de ce problème, vouloir lancer des recherches fondamentales semble utopique. Par contre, valoriser les résultats déjà disponibles sous l'angle d'une modélisation systématique, proposer dans les Etats membres du CIEH qu'une composante risque climatique et modélisation soit prise en compte dans le cadre des travaux sur l'économie et la valorisation de l'eau semble une approche tout à fait réaliste qui permettrait, compte tenu de la diversité des situations étudiées, d'aboutir rapidement à des résultats pratiques.

C'est dans cette optique d'approche synthétique des problèmes et de démarche commune de la part des organismes nationaux de recherche travaillant sur ces thèmes que les propositions d'études faites au cours du présent atelier ont été élaborées.

C / II. PARTIE - PROPOSITIONS D'ACTIONS DE RECHERCHE -

La première partie du dossier fournit un inventaire représentatif des données techniques connues mais encore sous utilisées ou utilisables au niveau du développement ce qui fait que l'agroclimatologie n'en est pas encore au stade opérationnel. En vue de résoudre ce décalage entre la recherche et l'utilisation, trois types d'action sont proposées (voir tableau récapitulatif 29) et sommes à l'appréciation des membres concernés.

- 1) Des actions "référentiel de données" visant la diffusion de manuels opérationnels de calcul de la demande évaporative et des coefficients culturaux FAO et IRAT.
- 2) Des actions "référentiel de terrain" à partir desquelles une meilleure connaissance des interactions plante-sol-pluviométrie-technique culturale pourra être obtenue.

Ces actions nécessitent d'une part l'utilisation des dispositifs d'observation de terrain déjà en place dans certains organismes ou programmes (ISRA, IVRAZ, AGRHYMET) et, d'autre part l'implantation de points d'observation dans le cadre d'actions pilotes de recherche développement (YATENGA, Para-Poura en Haute-Volta, Siné Saloum au Sénégal, Opération Haute-Vallée, CMDT au Mali, CIDT, en Côte d'Ivoire...).

Les objectifs de recherche seront très appliqués :

- étude de la consommation en eau des cultures de plein champ pour l'évaluation "in situ" des coefficients culturaux K_c . Un dispositif régional axé sur une plante prioritaire (sorgho ou maïs) et fondé sur une méthodologie commune (mesures indice foliaire, observations de l'appareil végétatif, du système racinaire...) permettra de recueillir les éléments essentiels à l'amélioration du diagnostic hydrique et mieux expliquer les fluctuations du rendement.

3) Une action coordonnée Interétats -

Compte tenu de l'acquis des programmes développés depuis ces dernières années en zones Soudano-Sahélienne (Sénégal, Niger, Hte Volta, Mali, Agrhymet) il apparaît intéressant, utile, voire indispensable de procéder à un examen global des actions en cours et de procéder à une synthèse et évaluation des résultats disponibles, puis de proposer la mise en place d'un programme coordonné inter-états d'actions de recherche sur l'économie de l'eau.

Ce programme coordonné inter-états économie de l'eau aurait pour objectifs l'acquisition des données de bases indispensables à la compréhension et à la modélisation des relations eau-sol-plante. Dans une seconde phase d'actions effectuées au niveau régional, il serait proposé des applications pratiques et concrètes des résultats aux problèmes réels de la recherche et du développement.

Il serait basé sur :

- le dispositif déjà existant regroupant :
 - . le réseau des services nationaux de l'agrométéorologie,
 - . le réseau d'évaluation mil, maïs, sorgho, niébé de l'institut du Sahel,
 - . les stations des instituts nationaux de recherche agronomique
 - . l'appui du CIEH,
 - . l'appui de l'IRAT/GERDAT
- Des résultats en partie disponibles sur les principales cultures vivrières qui permettent d'être immédiatement opérationnels.
- La mobilisation du potentiel technique et méthodologique de l'IRAT/GERDAT en matière d'économie et valorisation de l'eau,
- Une priorité accordée à la formation d'ingénieurs ou de techniciens nationaux.

Pour être réalisé ce programme nécessiterait la mise en place de recherches et expérimentations complémentaires qui seules permettront de finaliser avec suffisamment de fiabilité cet objectif de compréhension et de modélisation des relations eau-sol-plante.

Pour chacune de ces actions des fiches techniques sont ci-après proposées :

Elles regroupent :

- des actions de travail communs et complémentaires :
 - . carte de demande évaporative ETP Penman, Ev Tac (action 11),
 - . perfectionnement des modèles de simulation du bilan hydrique par la prise en considération de critères physiologiques et agronomiques déterminants (action 25).
- des actions communes réalisables à court terme :
 - . Validation des coefficients cultureux et consignes d'utilisation pour le calcul des consommations hydriques des cultures pluviales et irriguées (action 12).
 - . Recommandations pratiques aux producteurs visant la réduction du risque climatique (action 22).
- des projets de recherche et d'étude coordonnés à proposer au financement :
 - . projet coordonné de recherche inter-états - économie et valorisation de l'eau (action 3).

. Référentiel agropédoclimatique régionalisé (action 24).

- Des études plus fondamentales :

. Consommation hydrique à l'échelle du champ en conditions réelles de pluviométrie et de techniques (action 21),

. Rôle des techniques culturales pratiquées en conditions paysannes sur la réduction du risque climatique (action 23).

Pour chacune de ces actions une évaluation financière du coût a été réalisée donnant une idée de l'ordre de grandeur des moyens financiers à mettre en oeuvre, essentiellement en équipements complémentaires et frais de coordination, qui pour la plupart permettront de valoriser des investissements déjà réalisés .

Tableau 29 -

Inventaire des actions -

PROPOSITION DE

PROGRAMME VALORISATION DES RESSOURCES PLYVIOMETRIQUES
EN REGIONES SEMI-ARIDES

TYPE ACTION	THEME DES ACTIONS	AGRICULTURE	CHAMP APPLICATION	OBJECTIFS FINALISES	INTERVENANTS	COORDINATION PROPOSEE
11	Cartes de demande évaporative - EIP Penman (10 jours) - EV Bac Classe A - Modalités pratiques d'utilisation	Pluvial strict irrig. Compl. irrig. totale	Etudes projets Zonages régionaux Diagnostic hydrique	Utilisation des référentiels existants Formation - Explication des Différences régionales (Agronomie).	GERDAT - ORSTOM ISRA - IVRAZ - INRAH IDESSA - ICRISAT-FAO	AGRHYMET
12	Validation des coefficients culturaux (FAO) et IRAT et consignes utilisation	pluvial irriguée	Etudes projets, choix des cultures optimisation irrigation.	Mode de calcul pratique actualisé des besoins en eau homogène à l'échelle régionale	GERDAT - AGRHYMET -	CIEN
21	Consommation hydrique à l'échelle du champ en conditions réelles de pluie et de techniques culturales	Pluvial strict	Projets de développement en cours. Structure de recherche d'accompagnement	Correction des coefficients culturaux et identification des techniques économes en eau.	AGRHYMET - réseau Inter-états GERDAT	Institut du Sahel - CIEN
22	Recommandations pratiques aux producteurs visant la réduction du risque climatique et évaluation des résultats.	Pluvial strict	Projets de développement en cours. Opérations recherche-développement	Appropriation effective par le producteur de règles de décision optimisant les chances de réussite de ses interventions culturales.	GERDAT CIEN IPD ISRA	FAO AGRHYMET
23	Rôle des techniques culturales pratiquées en milieu paysan sur la réduction du risque climatique.	Pluvial	Actions - projets de recherche - système recherche-développement	Evaluation circonstanciée du rôle effectif du labour, buttage, billonnage, sarclage... en conditions variables de régime pluviométrique.	ISRA - IVRAZ - IDESSA GERDAT IPD	Institut du Sahel
24	Référentiel agropédoclimatique régionalisé - synthèse des connaissances	Pluvial	Structure de planification Etudes de projets - Relation recherche - Milieu réel - Cellule de suivi des projets	Evaluation "ex-post" des projets de développement - Réorientation des actions de recherche - Conseil à la vulgarisation.	ORSTOM FAO	Institut du Sahel
25	Perfectionnement des modèles de simulation du bilan hydrique par la prise en compte des critères physiologiques et agronomiques déterminants.	Pluvial irrigué	Centres recherche - Opérations pilotes Recherche-développement	Explication du rendement en conditions de culture paysannes. Réorientation des recherches (sélection, fertilisation techniques culturales).	GERDAT ORSTOM ICRISAT	ONM Institut du Sahel
3	Action coordonnée de recherches inter-états économie et valorisation de l'eau - PROJET INTERAFRICAIN	Pluvial	Reseau pilote AGRHYMET actions recherche - développement Projet de développement pilote.	Acquisition de données de bases indispensables pour la mise en oeuvre d'une politique d'économie et de valorisation de l'eau en milieu paysan.	CIEN GERDAT/INAT AGRHYMET	Institut du Sahel

CARTE DE DEMANDE EVAPORATIVE

- ETP Penman
- Ev Bac A

Coordination AGRHYMET Responsable action -
Contractants FAO - GERDAT - CIEH - IRAN *

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Actualiser les connaissances sur l'ETP Penman à l'échelle régionale.
- Cartographier les valeurs décadaires à l'aide de modèle de krigeage.
- Comparer ETP et évaporation Bac classe A
- Diffuser un manuel d'utilisation des données actualisées.

LOCALISATION DES ACTIVITES

- Centre AGRHYMET NIAMEY -
- Intervention du CENTRE GERDAT MONTPELLIER
CENTRE FAO ROME
CENTRE CIEH OUAGADOUGOU

DUREE PREVISIBLE

- Deux ans y compris la publication des cartes.

DISPOSITIONS FINANCIERES

- Moyens pour le rassemblement, la critique et le traitement des données - (AGRHYMET).	50.000
- Contribution contractuelle des intervenants	
. temps recherche	
. Mission à Niamey IRAN	50.000
CIEH	20.000
FAO	30.000
GERDAT	30.000
ORSTOM	100.000
. édition cartes	100.000
. édition manuel utilisation	20.000
- Diffusion (sera à négocier en cours avancement des travaux).	
TOTAL.....	400.000 FF.

* Instituts de Recherches Agronomiques Nationaux.

VALIDATION DES COEFFICIENTS CULTURAUX
ET CONSIGNES D'UTILISATION POUR LE CALCUL
DES CONSOMMATIONS HYDRIQUES DES
CULTURES PLUVIALES ET IRRIGUEES

Coordination : CIEH
Sous-contractants : GERDAT
AGHRYMET
FAO

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Proposer un mode pratique de calcul des évapotranspirations réelles maximales ETRM des cultures pluviales et irriguées.
- Proposer des règles d'utilisation des coefficients, K_c (FAO) et K'_c (IRAT),
- Définir les limites de la méthode.

LOCALISATION DES ACTIVITES

- Travail effectué par chaque centre intervenant sous la coordination du CIEH.

DUREE PREVISIBLE

- 1 an y compris la publication des cartes

DISPOSITIONS FINANCIERES

- | | |
|---|-------------|
| - contribution temps chercheur - coût calcul | |
| GERDAT x AGRHYMET x FAO = 3 x | 30.000 |
| - contrôle des documents, édition, publication | |
| CIEH | 50.000 |
| - diffusion (à négocier avec source
financement en cours d'avancement
de l'action). | _____ |
| TOTAL.... | 140.000 FF. |

CONSUMMATION HYDRIQUE A L'ECHELLE
DU CHAMP EN CONDITIONS REELLES
DE PLUVIOMETRIE ET DE TECHNIQUES

Coordination : Institut du Sahel

Sous contractants : GERDAT/ISRA/IVRAZ/AGRHYMET MALI.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- réaliser le suivi hydrique de parcelles cultivées (plein champ) avec le recours à des méthodes de diagnostic simple.
- observer certains paramètres explicatifs du comportement de la couverture végétale en particulier développement externe (feuille, tige, fleur) et développement racinaire.
- Identifier les principaux critères caractérisant :
 - . la profondeur enracinable
 - . la texture
 - . le comportement vis à vis des pluies.

LOCALISATION DES ACTIONS

- 1 zone pilote au Sénégal (Département système ISRA)
- " " en Haute Volta (Yatenga, Fara-Poura)
- " " au Mali (Zone pilote AGRHYMET)

DUREE PREVISIBLE

3 années minimum

DISPOSITIONS FINANCIERES

- Coordination, programmation par Institut du Sahel
 - . Réunion pour montage programme (Bamako)
 - 1 représentant ISRA
 - IVRAZ
 - AGRHYMET MALI
 - GERDAT MONTPELLIER
- . Fonctionnement des 3 opérations pilotes pendant 3 ans
 - Techniciens (4 mois saison des pluies) 30.000
 - Mission appui GERDAT/CNEARC 60.000
 - Intervention chercheur national local 30.000
 - Logistique (3 x 10.000) 30.000
- . Evaluation annuelle par GERDAT 30.000

*Possibilité d'affecter des ingénieurs en formation (DEA séjour de 3 mois).

TOTAL..... 240.000 FF

RECOMMANDATIONS PRATIQUES AUX PRODUCTEURS
VISANT LA REDUCTION DU RISQUE
CLIMATIQUE

Coordination : FAO AGRHYMET
Sous-contractants : AGRHYMET MALI
Appui technique : IRAT GERDAT Montpellier
DRA Mali.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- sur la base des données agrométéorologiques, orienter les options agricoles des paysans quant au choix des cycles de culture, les dates de semis et leur combinaison en fonction des techniques culturales.
- en cours de saison des pluies, évaluer le statut hydrique de la culture et proposer les actions optimisant les chances de réussite de la culture à travers une utilisation cohérente des facteurs de production.

LOCALISATION DES ACTIVITES

- Projet pilote AGRHYMET - Haute Vallée du Niger

DUREE PREVISIBLE

- Trois ans.

DISPOSITIONS FINANCIERES

- Atelier de conception et programmation animé par FAO-AGRHYMET à Bamako.	
1 rept AGRHYMET Niamey	
GERDAT Montpellier	
DRA Mali	40.000
- suivi des données agrométéorologiques, interprétation à Bamako	3 x 10.000
	30.000
- Suivi agroclimatologique des parcelles	
1 observateur	
suivi par ingénieur AGRHYMET - Mali	10.000
- équipement de terrain	50.000
- Appui technique DRA Mali	3 x 5.000
	15.000
- Mission moyenne durée GERDAT	30.000
- Atelier de synthèse en fin de projet	80.000
- Interprétation annuelle des résultats - diffusion d'une document vulgarisable	10.000
TOTAL.....	265.000 FF.

ROLE DES TECHNIQUES CULTURALES PRATIQUEES EN
CONDITIONS PAYSANNALES SUR LA REDUCTION
DU RISQUE CLIMATIQUE

Coordination : Institut du Sahel
Sous-contractants : GERDAT, IVRAZ, ISRA, IPD.

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Mettre en place un ou des dispositifs expérimentaux permettant d'analyser les composantes du rendement en fonction de différents modes de travail du sol.
- Evaluer précisément l'effet des techniques culturales sur l'infiltration, l'humectation du profil, la descente et la vitesse racinaire à l'aide des méthodes de diagnostic confirmées et validées par la recherche agronomique.
- Comparer l'effet des techniques culturales en fonction de leur dates de réalisation (compatibles avec les disponibilités de l'exploitation).

LOCALISATION DES ACTIVITES

- Station de recherche agronomique SARIA Hte Volta
- Centre de recherche AGRHYMET Niamey Niger
- Opération Recherche-Développement Yatenga Hte Volta
- Opération recherche-développement Siné-Saloum ISRA-SENEGAL.

DUREE PREVISIBLE - 3 ans

DISPOSITIONS FINANCIERES

Moyens , équipements pour chaque dispositif

. Bilan hydrique in situ	50.000
. batterie tensiomètres	20.000
. diagnostic racinaire	10.000
. observations LAI (thermo infrarouge)	30.000
. petit équipement	10.000

Suivi fonctionnement du dispositif

. 1 observateur x 3 mois	6.000
. Déplacements	2.000
. Analyses laboratoires (pédo. plante)	6.000
. entretien des équipements (1 révision)	10.000

Appui technique annuel

. 1 mission GERDAT et rapport d'évaluation	30.000
. appui chercheur national	5.000

TOTAL 3 ans/dispositif	179.000	FF.
x 4 dispositifs	720.000	FF.

REFERENTIEL AGROPEDOCLIMATIQUE REGIONALISE

Coordination : Institut du Sahel

Sous contractant : GERDAT/ORSTOM

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Les résultats de production sont directement influencés par les conditions de sol et de pluviométrie. Des séries de rendement de longue durée obtenues en conditions maîtrisées seront à analyser sous l'angle des rapports eau-sol-plante.
- A partir des référentiels station, en déduire des informations à usage pratique.
 - . seuil pluviométrique pour la réussite des semis ,
 - . seuils critiques (ETR/ETM minimum) de tolérance à la sécheresse.
 - . efficacité de la fertilisation en fonction des risques d'excès d'eau, des niveaux techniques.

LOCALISATION DES ACTIONS

Rassemblement des données

- | | |
|-------------------|-----------|
| . CNRA Bambey | SENEGAL |
| . IDESSA Bouaké | C. IVOIRE |
| . IVRAZ Saria | H. VOLTA |
| . IVRAZ Farako Ba | H. VOLTA |
| . DRA Sotuba | MALI |
| N'Tarla | MALI |
| M'PESOB | MALI |
| . INRAN Maradi | NIGER |

DUREE PREVISIBLE 3 ans

DISPOSITIONS FINANCIERES

Contribution du GERDAT à la constitution du référentiel production/sol/pluviométrie pour le maïs , riz pluvial, sorgho, mil, niébé coton - Temps chercheur	60.000
Contribution de l'ORSTOM à la caractérisation des situations pédoclimatiques - temps chercheur	50.000
Atelier de synthèse évaluation des résultats à Bamako - GERDAT ORSTOM	50.000
Dossier technique finalisé remis à l'Institut du Sahel frais de montage, coordination, contrôle par le GERDAT.	20.000*
TOTAL.....	180.000 FF.

* Non pris en compte les coûts d'édition.

PERFECTIONNEMENT DES MODELES DE
SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE PAR LA PRISE
EN CONSIDERATION DE CRITERES
PHYSIOLOGIQUES ET AGRONOMIQUES DETERMINANTS

Coordonnateur : AGRHYMET

Sous contractant : GERDAT - ORSTOM

OBJECTIFS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES

- Intégrer les composantes techniques culturales (densité de semis, travail du sol, sarclage...) dans le diagnostic simulé du bilan hydrique, à travers une estimation plus précise du coefficient cultural considéré comme un indicateur de la LAI (Indice foliaire).
- Définir une méthodologie de diagnostic au champ et en temps réel, susceptible d'utiliser les modèles comme outil de prévision et d'aide à la décision.

LOCALISATION DES ACTIVITES

Centre AGRHYMET Niamey
Terrain de Lavalette Montpellier

DUREE PREVISIBLE - 3 ans

DISPOSITIONS FINANCIERES

- Equipement suivi hydrique et agrophysiologique (Niamey Montpellier)	
. Matériel mesure ultra infra-rouge	2 x 50.000
. Matériel suivi hydrique tensiométrique	2 x 20.000
- Fonctionnement annuel des dispositifs	
. personnel observation logistique	2 x 10.000
. analyses laboratoires	2 x 5.000
- Elaboration - perfectionnement des modèles	
. temps recherche	2 x 10.000
-	
TOTAL 3 ANS.....	150.000
- Evaluation - Dossier méthodologique AGRHYMET	20.000
TOTAL.....	310.000 FF.

PROPOSITION D'UNE ACTION COORDONNEE
INTER ETATS ZONE SAHELIEENNE *

Coordonnateur : Institut du Sahel , AGRHYMET , CIEH
Sous contractant : Instituts nationaux, recherche agronomique et
agrométéorologie.

1. OBJECTIF SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUES

Les études sur les relations eau-sol-plante et l'économie de l'eau ont fait l'objet, depuis quelques années, en zone sahélienne d'un développement particulier. Le Sénégal, le Niger et la Haute Volta sont dans ce domaine de recherches, particulièrement avancés ; le Mali prépare actuellement la mise en place d'un important programme d'actions de recherche sur l'économie de l'eau et si les autres pays du Sahel n'ont pas de programme bien identifié, les problèmes de valorisation de l'eau, tant pluviale que souterraine ou de surface, ne s'en posent pas moins avec beaucoup d'acuité.

Il apparaît maintenant intéressant, utile voire indispensable de procéder à un examen global des actions en cours et de procéder à une synthèse et évaluation des résultats disponibles, puis de proposer la mise en place d'un programme coordonné inter-états d'actions de recherche sur l'économie de l'eau. Ce programme coordonné inter-états économie de l'eau aura pour objectifs l'acquisition des données de bases indispensables à la compréhension et à la modélisation des relations eau-sol-plante. Dans une seconde phase d'actions effectuées au niveau régional, il sera proposé des applications pratiques et concrètes des résultats aux problèmes réels de la recherche et du développement. En effet, la mise au point d'un modèle du suivi du bilan hydrique des sols sous cultures sera :

- Pour la recherche agronomique, un outil :

- d'aide à l'évaluation qualitative et quantitative de la résistance à la sécheresse des principales cultures vivrières et/ou agro-industrielles ;

- d'aide à la mise au point de techniques culturales (travail du sol,...) valorisant au mieux les ressources en eau ;

- d'aide à la détermination du rôle de l'eau en tant que facteur de production dans l'élaboration quantitative et qualitative du rendement.

* Proposition élaborée par J.C. LEGOUPIE Coordonnateur du Groupe Eau GERDAT

- Pour le développement, un outil :

- d'aide à la décision pour le déclenchement des opérations agricoles (labour, choix des variétés et zonage, calage des semis...etc...) ;

- d'avertissement agricole en fonction des événements climatiques

- de planification (intrants, logistique).

- de prévision de rendement et des explications de l'élaboration du rendement en fonction des événements climatiques et principalement pluviométriques. Par exemple, dans une situation donnée, la chute de production et en particulier celle des rendements, est-elle due à des facteurs climatiques (sécheresse) ou non. S'il n'y a pas d'explication d'ordre hydrique ou climatique on s'attaquera aux autres causes : engrais, variétés, mauvaises techniques culturales, manque d'encadrement.

2. LES INTERVENANTS POTENTIELS

L'objet de ce présent document est de proposer un programme d'actions coordonnées et directement opérationnelles sur le terrain car ce programme sera basé sur :

- un dispositif déjà existant regroupant :

. le réseau d'évaluation mil, maïs, sorgho, niébé de l'Institut du Sahel,

. le réseau des services nationaux de l'agro-météorologie aidé et appuyé par l'AGRHYMET.

. l'appui IRAT-GERDAT,

. les stations des Instituts nationaux de recherche agronomique

. l'appui du CIEH.

- Des résultats en partie disponibles sur les principales cultures vivrières qui permettent d'être immédiatement opérationnels,

- Des chercheurs compétents, et un modèle bilan hydrique disponible qui a été mis au point par l'IRAT et testé avec succès dans de nombreuses conditions écologiques. (Ce modèle bilan hydrique IRAT sera mis à disposition du programme).

- Une volonté de formation d'ingénieurs ou techniciens nationaux.

La mise en place de recherches et expérimentations complémentaires sera nécessaire pour finaliser avec suffisamment de fiabilité l'objectif de compréhension et de modélisation des relations eau-sol-plante. Ceci nécessitera le déblocage d'un financement particulier pour :

- des équipements complémentaires (matériel agro-météorologique micro-informatique - matériel de culture - kit de prospection hydro-pédologique.

- . des charges de fonctionnement
- . des missions d'appui
- . la formation des ingénieurs et techniciens nationaux.

3. PROPOSITION DE MODALITES POUR LA MISE EN OEUVRE DU PROGRAMME

(Résumé d'après proposition élaborée par M.J.C. LEGOUPIL , Service Hydraulique Agricole IRAT/ Coordonnateur groupe EAU-GERDAT - Juin 1983)

3.1. Proposition d'un réseau inter-états de points d'essais

3.1.1. Les contraintes

Les points d'essais et d'études qui constitueront le réseau inter-états de base "économie de l'eau" devront répondre aux critères suivants :

- être représentatifs d'une zone agro-pédoclimatique importante,
- disposer de résultats de rendements sur les principales cultures vivrières de la zone sahélienne (mil, sorgho, maïs, niébé, etc...) sur une séquence pluriannuelle aussi longue que possible,
- disposer des enregistrements agroclimatiques sur une période au moins aussi longue que celle concernant les cultures,
- disposer d'une infrastructure locale permettant la mise en oeuvre de ce programme sans avoir à prévoir de nouveaux et importants investissements.
- disposer, localement, des chercheurs (recherche agronomique) et/ou des ingénieurs (agrométéorologie) qui assureront l'exécution sur le terrain du programme,
- pouvoir accueillir 1 ou 2 stagiaires par an et par sites d'essais de façon à ce que le volet formation puisse s'appuyer sur ces bases terrain .

3.1.2. Les organisations ou structures pouvant servir de support à ces bases-terrains

3.1.2.1. Le CILSS (Comité Permanent inter-états de lutte contre la Sécheresse dans le Sahel -

Le CILSS est une organisation régionale regroupant huit pays du Sahel (Cap Vert, Mauritanie, Gambie, Mali, Niger, Haute Volta, Sénégal, Tchad). Le CILSS est chargé entre autre, de la coordination de l'ensemble des actions menées contre la sécheresse, de la mobilisation des ressources pour le financement d'opérations dans le cadre de la coopération sous régionale...

Le CILSS regroupe deux institutions oeuvrant dans ce domaine :
le Centre AGHRYMET et l'Institut du Sahel.

LE CENTRE AGRHYMET (Centre d'Agrométéorologie et d'hydrologie opérationnelle) est basé à Niamey (Niger) ; il a pour mission :

- . de former des agents spécialisés dans le domaine de l'agrométéorologie et de l'hydrologie,
- . de rassembler, traiter et diffuser des données agrométéorologiques et hydrologiques.

L'AGRHYMET a mis en place récemment, avec l'appui de l'OMM un programme de formation de jeunes Ingénieurs et techniciens en agrométéorologie, ainsi qu'un programme d'appui aux Services Nationaux d'Agrométéorologie. L'objectif de ce programme est de mettre au point un réseau d'avertissements agrométéorologiques et de prévision de récolte en fonction des événements climatologiques, de plus le programme AGRHYMET évoluera vers la mise en place de dispositifs pilotes sur le suivi agrométéorologique de la culture du mil selon un dispositif réseau inter-états.

Il y a donc une complémentarité exemplaire entre les objectifs des actions en cours de l'AGRHYMET et les objectifs du programme d'études de base proposé ici pour la compréhension et la modélisation des relations eau-sol-plante. Ce dernier programme viendrait donc conforter et appuyer le projet AGRHYMET en lui donnant un aspect agronomique plus accentué.

L'INSTITUT DU SAHEL basé à Bamako (Mali) est chargé de coordonner d'harmoniser et de promouvoir la recherche scientifique et technique ainsi que la formation dans le cadre de la lutte contre la sécheresse.

L'institut du Sahel a mis en place en 1981 (sur financement FED et pour une durée de 4 années), un projet régional d'amélioration des mils, sorghos, maïs et niébés dont un des buts était d'identifier pour chaque zone écologique, le matériel végétal le plus performant. Pour réaliser ce projet, un réseau régional d'expérimentations a été mis en place ; il comprenait 93 essais en 1981 et 140 en 1982 répartis selon les strates pluviométriques des huit pays sahéliens du CILSS.

Ce réseau régional peut et doit être un support pour la mise en place et la réalisation du programme proposé en économie de l'eau ; ce programme constituera une prolongation intéressante de l'évaluation variétale en permettant de relier les rendements obtenus à la pluviométrie (l'eau étant considérée comme un facteur déterminant de l'élaboration du rendement). Le programme "économie de l'eau" permettra donc une valorisation des résultats du projet régional en cours.

3.1.2.2. L'IRAT (Institut de Recherches Agronomiques Tropicales)

L'IRAT est intéressé à plusieurs titres à la mise en place et au fonctionnement de ce programme "relation eau-sol-plante-économie de l'eau" :

- L'IRAT intervient en coopération dans les instituts nationaux de recherches agronomiques des pays du Sahel (excepté au Cap Vert, Gambie et Tchad). Plusieurs chercheurs de l'IRAT participent aux programmes "économie de l'eau" du Sénégal (Centre Nord Bambey - Vallée du Fleuve Sénégal, Siné Saloum du Niger (Maradi, Niamey, Lossa) Casamance), de Haute Volta (Saria, Farako Ba) du Mali (programme en cours de mise en place) de Mauritanie (Vallée du Fleuve, Kaédi).

L'IRAT constitue donc un lien commun aux différents programmes mis en oeuvre au niveau des structures nationales de recherches agronomiques.

L'IRAT dispose à Montpellier, en France, d'un département hydraulique Agricole qui :

- . Coordonne et appuie scientifiquement les actions de recherches eau-sol-plante des agents IRAT détachés auprès des structures nationales.
- . dispose d'un modèle informatique de bilan hydrique (modèle FOREST IRAT/DRD). Ce modèle de simulation de bilan hydrique des sols sous cultures a déjà été testé avec succès en de nombreuses occasions et dans diverses écologies. Il a permis entre autre de mettre en évidence les termes du bilan hydrique pas du tout connus ou insuffisamment connus qui devront faire l'objet d'études complémentaires entrant dans le cadre de ce programme inter-états sur "l'économie de l'eau". L'IRAT mettra le logiciel de ce programme à la disposition des différents organismes concernés par le projet.
- . peut servir de base technique pour la formation en France de jeunes ingénieurs et/ou techniciens nationaux.

L'IRAT constitue donc un partenaire technique pour la mise en place et l'appui au fonctionnement d'un tel programme inter-états "économie de l'eau".

3.1.2.3. LE CIEH (Comité Interafricain d'études hydraulique)

Le CIEH regroupe l'ensemble des pays du Sahel à l'exception du Cap Vert et de la Gambie ; entre autre il regroupe d'autres pays : la Côte d'Ivoire, le Togo, le Bénin, le Gabon, le Cameroun, le Congo.

Le CIEH a 3 objectifs :

- assurer un échange permanent d'information en matière d'hydraulique entre les états membres,
- promouvoir les études générales d'intérêt commun, rechercher leur financement et assurer ou contrôler leur réalisation,
- appuyer techniquement les états membres qui en font la demande.

Le CIEH s'est aussi penché sur le problème de la formation, et, à ce titre, organise des séminaires.

Le CIEH peut donc intervenir concrètement dans le programme "économie de l'eau" avec un double rôle :

- . recherche du financement conjointement avec le CILSS,
- . appui technique à la réalisation, et surtout effectuer un suivi de l'opération pour en assurer le transfert et l'extrapolation des résultats dans les autres pays intéressés du CIEH.

3.1.2.4. Les structures nationales de la recherche agronomique et des services de l'agrométéorologie

C'est sans aucun doute sur ces structures nationales que concrètement s'appuiera le programme inter-états "économie de l'eau". Par leur important réseau de stations de recherches agronomiques et de stations agrométéorologiques, ces structures nationales permettront la mise en place de points d'essais qui constitueront le réseau "économie de l'eau".

Pour les pays du Sahel ayant sur ce thème un programme de recherche actuellement en cours, on peut citer les organismes responsables de sa mise en oeuvre :

- | | |
|-------------|---|
| SENEGAL | <ul style="list-style-type: none"> . ISRA (Institut Sénégalais de la Recherche Agronomique) . Direction de la Météorologie Nationale - Service ou Division de l'agrométéorologie |
| NIGER | <ul style="list-style-type: none"> . INRAN (Institut National de la Recherche Agronomique Nigérienne - Centre AGRHYMET) . Direction Nationale de la Météorologie Nationale - Division Agrométéorologie. |
| HAUTE VOLTA | <ul style="list-style-type: none"> . IVRAZ (Institut Voltaïque de la Recherche Agronomique et Zootechnique) . Direction Nationale de la Météo Nationale - Division de l'Agrométéorologie . |
| MALI | <ul style="list-style-type: none"> . IER (Institut d'Economie Rurale) - Division de la Recherche Agronomique . Direction de la Météo Nationale - Division de l'agrométéorologie. |
| MAURITANIE | <ul style="list-style-type: none"> . CNRADA (Centre National de la Recherche Agronomique et du Développement Agricole) . Direction de la Météorologie Nationale - Service de l'Agrométéorologie. |

3.1.3. Proposition pour la constitution d'un réseau inter-états pour l'étude des relations eau-sol-plante économie de l'eau.

Cette proposition ne constitue qu'une approche de ce réseau qui devra pouvoir être augmenté au cours du temps. Compte tenu des contraintes et des différents partenaires intéressés à la mise en oeuvre d'un tel programme, on peut retenir un réseau de base qui serait le suivant :

SENEGAL : ISRA et Direction de la Météorologie Nationale

- 1) Centre National de Recherches de Bambey (P = 600 mm)
service SR Climatologie
- 2) Centre de Recherches de Kaolack (P = 700-900 mm)
programme économie de l'eau

NIGER : INRAN et Direction de la Météorologie Nationale + AGRHYMET

- 1) UECL Lossa-Sona (Unité expérimentale cultures irriguées) (P = 550-600 mm)
- 2) Station de Tarna Maradi (P = 700-800 mm)

HTE VOLTA : IVRAZ et Direction Nationale de la Météorologie Nationale

- 1) Station de recherches agronomiques de SARIA (P = 800 mm)
- 2) Station de recherches agronomiques de Farako Ba (Bobo Dioulasso) (P = 1200 mm)

MALI : IER - Division recherche agronomique et Division agrométéorologique de la Direction Nationale de la Météorologie.

- 1) Station de SOTUBA (Bamako) (P = 700-800 mm)
- 2) Station de Sikasso (P = 1200 mm)

3.1.4. Proposition pour une organisation structurelle du programme inter-états "économie de l'eau"

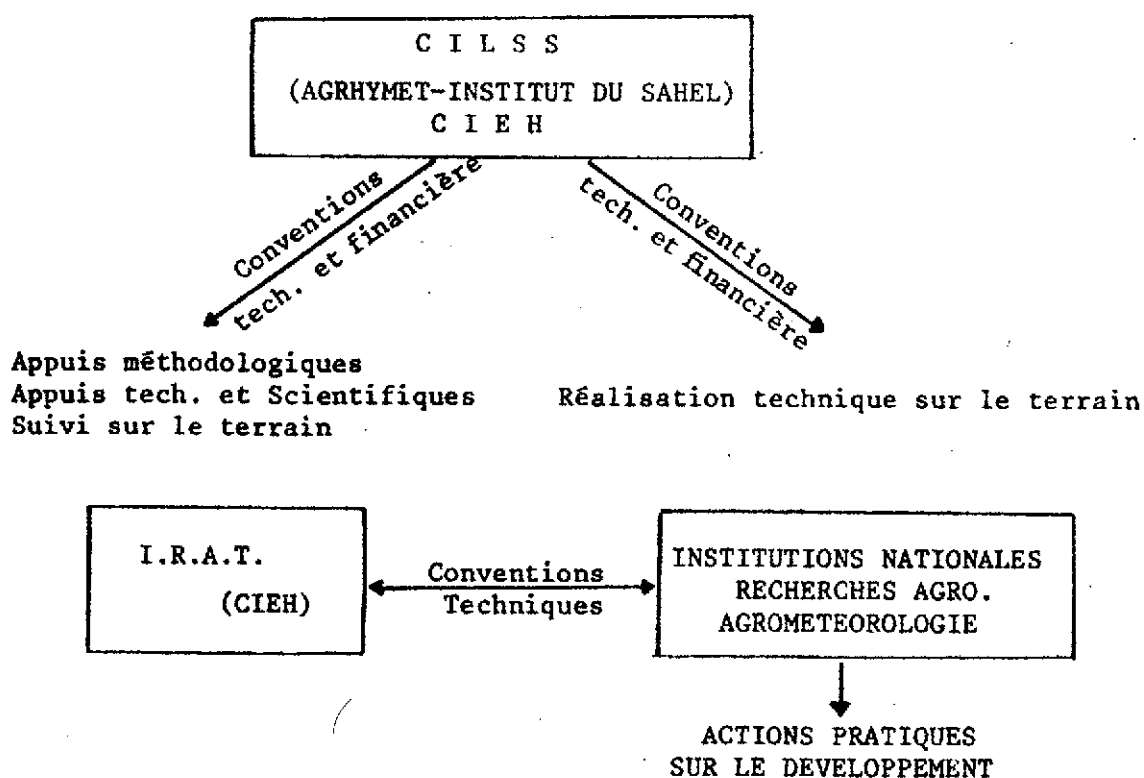
Cette proposition est donnée ici, à titre indicatif, pour être critiquée, amendée, etc...

Il faut classer les possibles partenaires et acteurs de ce programme de recherche en 3 types d'organismes :

- (1) Organismes de coordination pour la recherche de financement et pour le suivi et l'évaluation technico-économique du projet,
- (2) organismes de coordination et d'appuis techniques aux actions de terrain
- (3) Organismes de réalisation des actions sur le terrain

Des relations de type triangulaire devront exister entre ces 3 types d'organismes.

COORDINATION FINANCIERE - SUIVI - EVALUATION TECH. FINANCIERE



Dans cette proposition d'organisation structurelle du programme :

Le CILSS et le CIEH ont à la fois un rôle de recherche, mobilisation des fonds, et un rôle de suivi évaluation technico-financière du programme. Le CIEH aura en plus, un rôle plus technique consistant à prévoir le transfert et l'extrapolation des résultats dans les autres pays membres du CIEH.

Ces deux organisations inter-états agiront de concert et passeront des conventions techniques et financières avec d'une part l'IRAT et d'autre part, les Institutions Nationales accueillant le programme.

L'IRAT aura à jouer un rôle de coordination technique de l'opération car c'est un élément commun à presque toutes les opérations de recherches en cours ; l'IRAT assurera un appui méthodologique, technique et scientifique aux opérations de terrain. Par sa base de Montpellier, l'IRAT assurera un appui logistique et constituera une base technique pour le volet formation du projet.

Pour exécuter ce programme l'IRAT sera lié :

- avec le CILSS et le CIEH par un protocole technico-financier,
- avec les structures nationales par un protocole uniquement technique.

4. MISE EN PLACE ET DEROULEMENT DU PROGRAMME

On distinguera schématiquement, 3 phases dans le déroulement de ce programme qui est prévu sur une période de 4 années (il y a recouvrement de ces 3 phases qui ne sont donc pas strictement successives).

- . PHASE 1 : a) Premier zonage agro-pédoclimatique des pays concernés,
- b) Détermination de la représentativité des points d'essais retenus par rapport au zonage primaire :
Mise au point (et standardisation) des méthodes de détermination de la demande évaporative et des besoins en eau des cultures. Domaine de validité de l'approche des besoins en eau basé sur les coefficients cultureux : petites mais très importantes expérimentations complémentaires portant sur les besoins en eau et la généralisation des résultats.
- c) Caractérisation hydrique et hydrodynamique du réservoir sol des points d'essais.
- d) Calage et test de la simulation du bilan hydrique (modèle F. FOREST de l'IRAT/DRD) et analyse statistique des résultats sur toute la séquence pluriannuelle où sont à la fois disponibles les résultats de rendement des cultures vivrières et des données quotidiennes de pluviométrie.
Détermination de la relation rendement-pluviométrie.
Durée de cette phase 1 = 12 mois.

- . PHASE 2 : a) Actions de recherches pour l'amélioration du statut hydrique des cultures en condition pluviale.
Il s'agit d'évaluer qualitativement et quantitativement l'influence de techniques culturales sur l'enracinement d'une part et sur l'évolution (hydrique) du réservoir sol. Les techniques testées seront (par exemple) :
 - . labour de fin de cycle,
 - . binage, sarclage, désherbage chimique,
 - . influence de la date de semis,
 - . modulation des apports d'engrais en fonction des espérances de pluie, des risques de lessivage, etc...
 - . mise au point de systèmes de cultures cohérents visant à une meilleure gestion de l'eau.
- b) Actions de recherches pour l'amélioration de nos connaissances sur l'évaluation de la résistance à la sécheresse.
Ces actions auront pour objectifs d'aider à la sélection et à l'amélioration d'espèces plus résistantes à la sécheresse.
Cette phase 2 aura une durée de 3 années ; elle devra permettre de mieux analyser le rôle qualitatif et quantitatif de l'eau en tant que facteur de production dans l'élaboration du rendement.

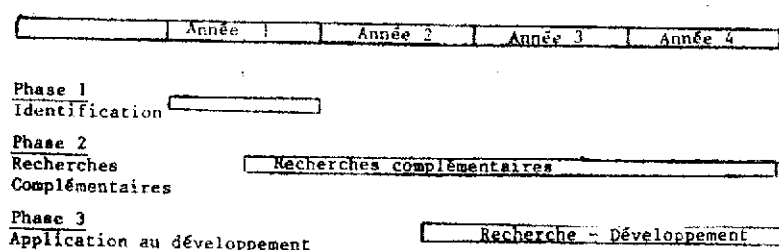
- . PHASE 3 : Application des résultats obtenus aux problèmes réels du développement.

Les résultats obtenus en phase 1 et 2 devront permettre de déboucher très rapidement sur une application pratique aux problèmes réels du développement. Les résultats obtenus dans le cadre de ce programme inter-états auront une application pratique et spécifique au niveau des opérations régionales de développement agricole. Ces applications seront donc du ressort des structures nationales :

- . Création au niveau national d'un réseau d'avertissements agricoles qui sera un outil d'aide à la décision pour le déclenchement des opérations de techniques culturales (labour, semis, etc...),
- . planification des intrants (logistique des opérations de développement),
- . prévision des récoltes en fonction des événements climatologiques et principalement pluviométriques.

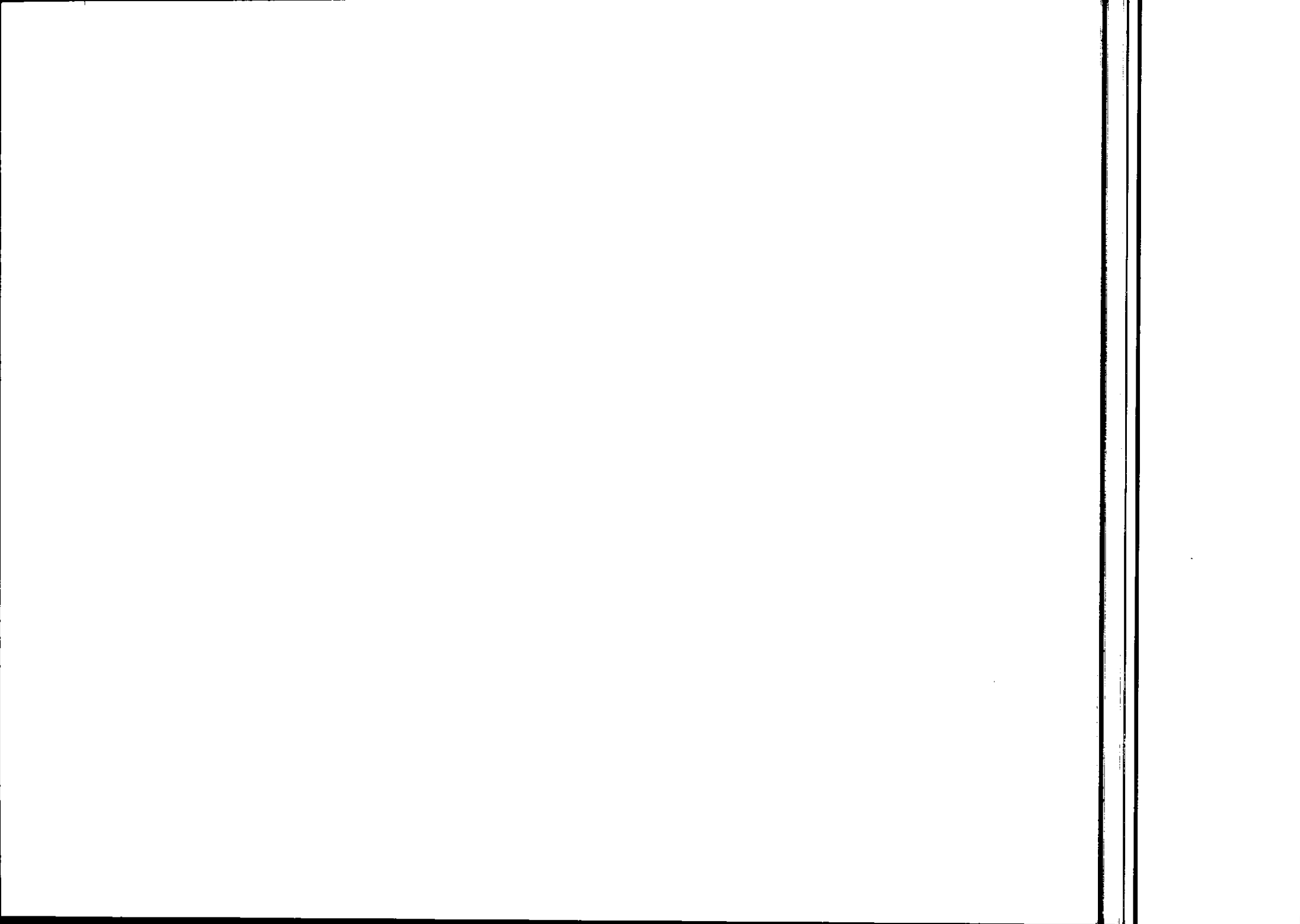
Cette phase commencera en année 2 et se poursuivra dans le cadre de ce projet jusqu'à sa fin (année 4), puis les structures nationales devront assurer le relais du projet.

CALENDRIER DE REALISATION -



5. MOYENS A METTRE EN OEUVRE

Compte tenu de la diversité des intervenants, de la diversité de leurs moyens tant du point de vue humains qu'en équipements mobilisables seule une concertation régionale permettra de définir l'importance et la répartition des enveloppes financières.



Méthode de suivi agrométéorologique
et de bilan hydrique cumulatif des
cultures utilisées par AGRHYMET.

DU..... AU....., 1983

ARRONDISSEMENT/DISTRICT :

DEPARTEMENT/REGION :

DATE :

La fiche permet le suivi de 3 cultures au maximum par station

CULTURES		PHASES DEVELOPPEMENT		ENNEMIS DES CULTURES		DEGATS SEC		ERESSE	
00	PREPARATION	/	PAS D'OBSERVATION	/	PAS D'OBSERVATIONS	/	PAS D'OBSERVATION		
01	FONIO	0	PREPARATION	0	PAS DE DEGATS	1	ETAT VEGETATIF BON		
02	MIL	1	SEMIS	1	DEGATS LEGERES CRIQUETS/SAUTERIAUX	2	FLETRISSEMENT LEGER		
03	SORGHO	2	REPIQUAGE	2	" GRAVES "	3	FLETRISSEMENT PERSISTANT		
04	MAIS	3	RESSEMIS TOTAL	3	" LEGERES OISEAUX	4	DESSECHEMENT PARTIEL		
05	RIZ PLUVIAL	4	LEVÉE - FEUILLES	4	" GRAVES "	5	DESSECHEMENT TOTAL		
06	RIZ IRRIGUE	5	TALLAGE - RAMIFIC.	5	" LEGERES INSECTES				
07	COTONNIER	6	EPIAISON - FLORAISON	6	" GRAVES "				
08	ARACHIDE	7	MATURATION EN COURS	7	DEGATS IMPORTANTS MALADIE				
09	NIEBE-HARICOT	8	MATURITE	8	MAUVAISES HERBES - MOYEN				
10	POIS D'ANGOLE	9	RECOLTE	9	" " - GRAVE				
11	IGNAME								
12	PATURAGES								
13	D'HIVERNAGE								
14									
15									

PRECIPITATIONS		1ère CULTURE		2e CULTURE		3e CULTURE		ASPECT GENERAL DES CHAMPS	
TOTAL DECADE.....,		1	1	4	4	7	7	/	PAS D'OBSERVATION
NOMBRE JOURS.....								1	BON
								2	MOYEN
								3	MAUVAIS
								4	TRES MAUVAIS
								5	PERTE TOTALE

NOTE EXPLICATIVEFICHE DE SUIVI AGROMETEOROLOGIQUE DES CULTURES 01

- | | |
|-----|---|
| I | AVANT-PROPOS |
| II | LES OBSERVATIONS |
| III | COMMENT COMPLETER LA FICHE |
| IV | PLANCHES ILLUSTRANT LES PHASES DE DEVELOPPEMENT DES CULTURES. |

I - AVANT-PROPOS

- La fiche de suivi agrométéorologique des cultures élaborée au cours de la réunion technique de planification des opérations du Programme AGRHYMET (Niamey, 10-16 mars 1983) permet de transcrire de manière concise et simple différentes observations effectuées sur les cultures. Le travail de l'observateur est capital car c'est en grande partie de la précision, de la rigueur et de la régularité de ses observations que découleront les conclusions du groupe de travail pluridisciplinaire responsable du suivi de la campagne agricole nationale.
- Au cours de la campagne agricole, l'observateur complète chaque décade et en double exemplaires une fiche. Il expédie l'original au Service Central dont il dépend et conserve le double dans ses archives. Les observations doivent être effectuées le dernier jour de la décade correspondant à la période d'observation c'est-à-dire le 10e, le 20e et le dernier jour du mois. Pour une culture donnée, les observations seront représentatives de l'état de cette culture dans plus de la moitié des champs situés autour du village ou de la station.
- La fiche permet le suivi de 3 cultures au maximum par station ou poste d'observation. Bien que le choix de ces 3 cultures soit laissé à la discrétion des autorités compétentes, il est important de souligner que la priorité devrait être donnée aux principales cultures vivrières comme le Sorgho et le Mil.

II - LES OBSERVATIONS2.1. Phases de développement

L'observateur pourra se référer à la série de dessins tirés du Manuel des instruments météorologiques et des observations météorologiques et

phénologiques (Projet CILSS/FAO/USAID - GCP/RAF/128), joints à cette notice pour déterminer la phase de développement correspondant à une décade donnée. Notons qu'une même phase de développement peut s'étaler sur plusieurs décades.

- 0 Préparation : il va de soi qu'il ne s'agit pas d'une phase développement proprement dite, mais de la préparation du champ en vue du semis. Cette préparation se fait soit à la houe, soit par labour animal ou mécanique.
- 1 Semis : celui-ci est pratiqué soit à sec, soit après la première pluie utile qui permet une humectation suffisante du sol.
- 2 Repiquage : pour le riz ou même le Sorgho de décrue, on procède parfois au repiquage de plants semés en pépinières.
- 3 Ressemis total : il peut arriver qu'un semis soit suivi d'une période de sécheresse qui aboutit à la destruction de pratiquement tous les plants. Dans ce cas, le cultivateur est obligé de procéder à un nouveau semis (ressemis total).
- 4 Levée - formation de feuilles : cette phase correspond à l'apparition de la jeune plantule et au développement foliaire de la plante. Cette phase peut s'étaler sur plusieurs décades.
- 5 Tallage - Ramification : à la base de la tige principale du Fonio, Mil, Sorgho et Riz se développent de nouvelles pousses (talles) dont le nombre sera fonction de la variété et des conditions de cultures. Chez le Maïs, il n'y a pas de formation de talles tandis que pour l'arachide, le cotonnier, le niébé..., on parlera de ramification de la plante.
- 6 Epiaison - Floraison : cette phase inclut la formation de l'épis ou de la panicule, la floraison et la fécondation.
- 7 Maturation en cours : c'est au cours de cette phase que le grain, qui prend naissance au moment de la fécondation, se développe et mûrit. Aussi longtemps que le grain n'est pas devenu "vitreux" (c'est-à-dire dur et cassant), on dira que la maturation est en cours. Chez l'arachide, le niébé et le pois d'angole, on parlera de "maturation en cours" aussi longtemps que les gousses contenant les amandes ou les graines ne sont pas prêtes pour la récolte.
- 8 Maturité : la plante est prête pour la récolte.
- 9 Récolte : on parlera de récolte lorsqu'elle aura été faite dans plus de la moitié des champs situés autour du village ou de la station.

2.2. Ennemis des cultures

- Par dégâts légers occasionnés par des criquets/sauteriaux, des oiseaux ou des insectes, on entend des dégâts qui n'affectent que quelques plants (moins de 5% des plants attaqués) et qui n'ont pas une incidence majeure sur la production finale.
- La notion de dégâts graves implique que la majorité des champs soient affectés (plus de 50% des plants attaqués) et que la production finale

risque d'être fort compromise. Ceci est également valable dans le cas de dégâts importants dus à des maladies. Il est assez fréquent que l'on ait une infestation combinée de différents parasites (maladies + oiseaux...). Dans ce cas, l'observateur transcrira dans sa fiche l'observation du dégât dont la gravité est la plus grande à la fois par son étendue et son incidence sur la production finale.

- La présence de mauvaises herbes sera qualifiée de moyenne si on en trouve de manière sporadique dans les champs (il n'y en a pas partout). En d'autres termes, le sarclage est effectué à intervalles assez réguliers. La présence de mauvaises herbes sera qualifiée de grave si elles ont envahis tout le champ.

2.3. Dégâts sécheresse

- 1 Etat végétatif bon : l'approvisionnement en eau de la plante est satisfaisant et celle-ci présente un port dressé.
- 2 Flétrissement léger : le flétrissement qui se caractérise par un affaissement des feuilles (perte de turgescence) n'affecte la plante que de manière temporaire au cours de la période d'observation (décade).
- 3 Flétrissement persistant : le flétrissement est devenu chronique ; la plante a perdu sa forme naturelle correspondant à un approvisionnement en eau satisfaisant.
- 4 Déssèchement partiel : la plante a perdu une partie importante de son contenu en eau. Au symptôme du flétrissement s'ajoute l'enroulement des feuilles et une modification de la couleur des parties végétatives de la plante.
- 5 Déssèchement total : la plante est détruite.

2.4. Aspect général des champs

Compte tenu des différentes observations faites dans les champs (ennemis des cultures, dégâts sécheresse, régularité de la levée...), l'observateur donnera une appréciation générale sur l'état de la culture.

- 1 Bon : les dégâts occasionnés par les ennemis des cultures sont minimes ; il n'y a pas de dégâts dus à la sécheresse ; les plantes ont un bel aspect et leur distribution dans le champ est régulière (il n'y a pas de surfaces vides).
- 2 Moyen : on constate des dégâts légers occasionnés par les ennemis des cultures et/ou un flétrissement léger. De plus, la distribution des plantes dans les champs n'est pas régulière (il y a des surfaces vides).
- 3 Mauvais : on constate des dégâts graves occasionnés par les ennemis des cultures et/ou un flétrissement persistant.
- 4 Très mauvais : en plus d'éventuels dégâts graves occasionnés par les ennemis des cultures, on observe un déssèchement partiel des plantes.

- 5 Perte totale : les champs sont totalement détruits par les ennemis des cultures et/ou par un dessèchement total.

2.5. Précipitations

Indiquer le total des précipitations de la décade en mm et dixième ainsi que le nombre de jours où la pluviométrie enregistrée a été supérieure à 1 mm.

III - COMMENT COMPLETER LA FICHE (EXEMPLE)

Imaginons que nous sommes le 30 juin 1983 dans le village de Menika qui est rattaché administrativement à l'arrondissement de Niolo, Département de Namey. L'observateur effectue ce jour là les observations couvrant la troisième décade de juin, c'est-à-dire la période allant du 21 au 30 juin 1983. Les 3 cultures qui seront suivies au cours de la campagne agricole sont le Sorgho, le Mil et le Maïs. Les différentes observations relevées ce jour là sont :

Cultures	Phases développement	Ennemis des cultures	Dégâts Sécheresse	Aspect général des champs
Sorgho	Levée-feuilles	pas de dégâts	Etat végétatif bon	Bon
Mil	Levée-feuilles	Dégâts légers insectes	Etat végétatif bon	Moyen
Maïs	Semis	Pas d'observations	Pas d'observations	Pas d'obs.

Le total des précipitations pour la décade est de 30,5 mm répartis sur trois jours.
Les différentes étapes à suivre pour la transcription de ces observations sur la fiche sont les suivantes :

- 1) La période d'observation : du 21 au 30 juin 1983
- 2) Station ou village : Menika
- 3) Arrondissement/district : Niolo
- 4) Département/Région : NAMEY
- 5) Date : 30 juin 1983
- 6) Pour chaque culture observée, cocher sous la rubrique CULTURES le nombre correspondant (par exemple 03 pour le Sorgho) ainsi le chiffre correspondant à l'observation faite en ce qui concerne les PHASES DE DEVELOPPEMENT (4 pour le Sorgho), les ENNEMIS DES CULTURES (0 pour le Sorgho) les dégâts sécheresse (1 pour le sorgho) et l'ASPECT GENERAL DES CHAMPS (1 pour le Sorgho). Le nombre et les chiffres sont reportés (dans l'ordre indiqué par les flèches) dans les cases réservées à la 1ère culture observée c'est-à-dire les cases 1 1 et 2 2. La même opération est répétée pour la 2e et 3e culture observée.
- 7) Les précipitations : total décade 30,5 mm - nombre de jours : 3

La fiche, complétée en double exemplaires, se présente de la manière suivante :

DU 21... AU 30... JUIN, 1983

STATION } MENIKA.....
VILLAGE }

ARRONDISSEMENT/DISTRICT : NILOLO...

DEPARTEMENT/REGION : NAMEY.....

DATE : 30 JUIN 1983.....

La fiche permet le suivi de 3 cultures au maximum par station

CULTURES		PHASES DEVELOPPEMENT		ENNEMIS DES CULTURES		DEGATS SECHESSES	
00	PREPARATION	/	PAS D'OBSERVATION	X/	PAS D'OBSERVATIONS	X/	PAS D'OBSERVATION
01	FONIO	0	PREPARATION	X0	PAS DE DEGATS	X1	ETAT VEGETATIF BON
X02	MIL	X1	SEMIS	1	DEGATS LEGERS CRIQUETS/SAUTERIAUX	X2	FLETRISSEMENT LEGER
X03	SORGHO	2	REPIQUAGE	2	" GRAVES "	3	FLETRISSEMENT PERSISTANT
X04	MAIS	3	RESSEMS TOTAL	3	" LEGERS OISEAUX	4	DESSECHEMENT PARTIEL
05	RIZ PLUVIAL	X4	LEVÉE - FEUILLES	4	" GRAVES "	5	DESSECHEMENT TOTAL
06	RIZ IRRIGUE	5	TALLAGE - RAMIFIC.	X5	" LEGERS INSECTES		
07	COTONNIER	6	EPIAISON - FLORAIISON	6	" GRAVES "		
08	ARACHIDE	7	MATURATION EN COURS	7	DEGATS IMPORTANTS MALADIE		
09	NIEBE-HARICOT	8	MATURITE	8	MAUVAISES HERBES - MOYEN		
10	POIS D'ANGOLE	9	RECOLTE	9	" " - GRAVE		
11	IGNAME						
12	PATURAGES						
13	D'HIVERNAGE						
14							
15							

1ère CULTURE		2e CULTURE		3e CULTURE	
1	1 0 3 4	2	2 0 1 1	7	7 0 4 1
4	4 0 2 4	5	5 5 1 2	8	8 / / /

PRECIPITATIONS	
TOTAL DECADE..30.., 5..MM	
NOMBRE JOURS...3.....	

ASPECT GENERAL DES CHAMPS	
X/	PAS D'OBSERVATION
X1	BON
X2	MOYEN
3	MAUVAIS
4	TRES MAUVAIS
5	PERTE TOTALE

DONNEES SYNTHETIQUES D'OBSERVATIONS

LES CHAMPS TRADITIONNELS

PAYS : LOCALISATION :	VILLAGE : DISTANCE PLUVIOMETRE : KM																																										
CULTURE : VARIETE : <input type="checkbox"/> INCONNUE <input type="checkbox"/> TRADITIONNELLE <input type="checkbox"/> AMELIOREE	DUREE CYCLE : JOURS																																										
SURFACE DU CHAMP : TOPOGRAPHIE : <input type="checkbox"/> PLAT <input type="checkbox"/> PENTE <input type="checkbox"/> BAS-FONDS SEMIS EFFECTUE EN SEC ? <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON																																											
SOL : <input type="checkbox"/> SABLEUX <input type="checkbox"/> LIMONEUX <input type="checkbox"/> ARGILEUX <input type="checkbox"/> LATERITIQUE <input type="checkbox"/>																																											
PREPARATION TERRAIN : <input type="checkbox"/> AUCUNE <input type="checkbox"/> HOUE <input type="checkbox"/> LABOUR ANIMAL <input type="checkbox"/> LABOUR MECANIQUE																																											
DATE DU SEMIS : Nombre RESSEMS : Date(s) :																																											
CULTURE ASSOCIEE 1 : CULTURE ASSOCIEE 2 :																																											
FERTILISATION : <input type="checkbox"/> INCONNUE <input type="checkbox"/> NULLE <input type="checkbox"/> ORGANIQUE <input type="checkbox"/> MINERALE																																											
DENSITE : AU SEMIS Distance A, en mètres : Distance B, en mètres : Distance C, en mètres : Distance D, en mètres : $Surface = \frac{A + C}{2} \times \frac{B + D}{2}$, en m ² : Nombre de poquets vivants + morts : Nombre de poquets non productifs : Nombre de poquets des cultures associées :	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>CARRE 1</th> <th>CARRE 2</th> <th>CARRE 3</th> <th>CARRE 4</th> <th>TOTAUX</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td rowspan="4" style="text-align: center; font-size: 2em;">X</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(A)</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(B)</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(C)</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(D)</td></tr> </table>	CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	TOTAUX					X																	(A)					(B)					(C)					(D)
CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	TOTAUX																																							
				X																																							
				(A)																																							
				(B)																																							
				(C)																																							
				(D)																																							
DENSITE : A LA RECOLTE Distance A, en mètres : Distance B, en mètres : Distance C, en mètres : Distance D, en mètres : $Surface = \frac{A + C}{2} \times \frac{B + D}{2}$, en m ² : Nombre de poquets vivants + morts : Nombre de poquets non productifs : Nombre de poquets des cultures associées :	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>CARRE 1</th> <th>CARRE 2</th> <th>CARRE 3</th> <th>CARRE 4</th> <th>TOTAUX</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td rowspan="4" style="text-align: center; font-size: 2em;">X</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(A)</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(B)</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(C)</td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td>(D)</td></tr> </table>	CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	TOTAUX					X																	(A)					(B)					(C)					(D)
CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	TOTAUX																																							
				X																																							
				(A)																																							
				(B)																																							
				(C)																																							
				(D)																																							
RENDEMENTS GRAIN <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th></th> <th>CARRE 1</th> <th>CARRE 2</th> <th>CARRE 3</th> <th>CARRE 4</th> </tr> <tr> <td>Poids Grain Kg</td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>: Surface M²</td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> <tr> <td>± 10.000 = Bdt Kg/Ha</td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>			CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	Poids Grain Kg					: Surface M ²					± 10.000 = Bdt Kg/Ha																										
	CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4																																							
Poids Grain Kg																																											
: Surface M ²																																											
± 10.000 = Bdt Kg/Ha																																											

NOTE EXPLICATIVE

~~Fiche 02 - Données synthétiques d'observations des champs traditionnels.~~

- I - AVANT-PROPOS
- II - LES OBSERVATIONS
- III - COMMENT COMPLETER LA FICHE

I - AVANT-PROPOS

- Conformément aux conclusions de la réunion technique de planification des opérations du Programme AGRHYMET (Niamey, 10-16 mars 1983), une fiche -02- permettant la transcription des données synthétiques d'observations des champs traditionnels a été élaborée à partir de fiches utilisées précédemment par le Programme AGRHYMET pour le suivi agrométéorologique. Ces données sont un complément d'informations à celles recueillies dans la fiche -01-. Il a toutefois été reconnu que la fiche -02- était peu adaptée à un suivi opérationnel des cultures basé sur des informations provenant d'un nombre élevé de stations. Ceci explique le caractère facultatif de ces observations agrométéorologiques spécialisées.
- Une fois les mesures effectuées, l'observateur complètera une fiche en double exemplaire pour chaque culture et expédiera, en fin de campagne agricole, l'original au Service Central dont il dépend.

II - LES OBSERVATIONS

Les observations seront effectuées dans des champs traditionnels aux alentours de la station agrométéorologique. Elles porteront sur trois cultures identiques à celles choisies dans le cadre du suivi opérationnel des cultures (fiche -01-).

En ce qui concerne la mesure de la densité au semis et à la récolte ainsi que le calcul du rendement, l'observateur se référera aux instructions contenues dans le Carnet d'Observations sur cultures pluviales en milieu rural sahélien (Programme AGRHYMET 1982).

III - COMMENT COMPLETER LA FICHE (EXEMPLE)

Imaginons que nous sommes au Sahel, dans le village de Menika, arrondissement de Niolo.

La première culture observée est le sorgho (variété traditionnelle) d'un cycle d'une durée de 130 jours. Cultivé en association avec du niébé, il a été semé après une première pluie utile le 20 juin 1983. Le champ, dont la

préparation a été faite à la houe, est un terrain plat d'une superficie de 0,5 hectares (5000 m²) avec un sol du type "limoneux". Un apport de matière organique (fumier) a été réalisé avant la préparation du sol pour le semis. Le pluviomètre le plus proche du champ se trouve à une distance de 1 km.

Après avoir effectué les mesures de densité au semis et à la récolte ainsi que le calcul du rendement, l'observateur complètera la fiche en double exemplaire. Celle-ci se présentera alors de la manière suivante :

DES CHÈRES TRADITIONNELLES

PAYS : SAHEL.....

VILLAGE : MANIKA.....

LOCALISATION : ARRONDIS. DE NILO

DISTANCE PLUVIOMETRE : 1..... KM

CULTURE : SORGHO.....

DUREE CYCLE : 130..... JOURS

VARIETE : ☐ INCONNUE ☒ TRADITIONNELLE ☐ AMELIOREE

SURFACE DU CHAMP : 0,5 HECT (5000 m²)

TOPOGRAPHIE : ☒ PLAT ☐ PENTE ☐ BAS-FONDS

SEMIS EFFECTUE EN SEC ? ☐ OUI ☒ NON

SOL : ☐ SABLEUX ☒ LIMONEUX ☐ ARGILEUX ☐ LATERITIQUE ☐

PREPARATION TERRAIN : ☐ AUCUNE ☒ HOUE ☐ LABOUR ANIMAL

☐ LABOUR MECANIQUE

DATE DU SEMIS 20. JUIN. 83 Nombre RESSEMIS : Date(s) :

CULTURE ASSOCIEE 1 : NIEBE..... CULTURE ASSOCIEE 2 :

FERTILISATION : ☐ INCONNUE ☐ NULLE ☒ ORGANIQUE ☐ MINERALE

DENSITE : AU SEMIS

Distance A, en mètres :

Distance B, en mètres :

Distance C, en mètres :

Distance D, en mètres :

Surface = $\frac{A + C}{2} \times \frac{B + D}{2}$, en m²

Nombre de poquets vivants + morts :

Nombre de poquets non productifs :

Nombre de poquets des cultures associées :

CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	TOTAUX
8,4	9,0	8,2	8,7	
9,4	9,7	10,0	9,6	
8,0	8,5	9,7	8,7	
9,7	10,1	10,0	9,5	
83,1	86,6	84,5	83,1	337,3 (A)
50	45	39	49	183 (B)
0	2	3	3	8 (C)
24	20	21	25	90 (D)

DENSITE : A LA RECOLTE

Distance A, en mètres :

Distance B, en mètres :

Distance C, en mètres :

Distance D, en mètres :

Surface = $\frac{A + C}{2} \times \frac{B + D}{2}$, en m²

Nombre de poquets vivants + morts :

Nombre de poquets non productifs :

Nombre de poquets des cultures associées :

CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4	TOTAUX
8,4	9,0	8,2	8,7	
9,4	9,7	10,0	9,6	
8,0	8,5	9,7	8,7	
9,7	10,1	10,0	9,5	
83,1	86,6	84,5	83,1	337,3 (A)
48	40	38	45	171 (B)
8	5	4	10	27 (C)
20	18	17	21	76 (D)

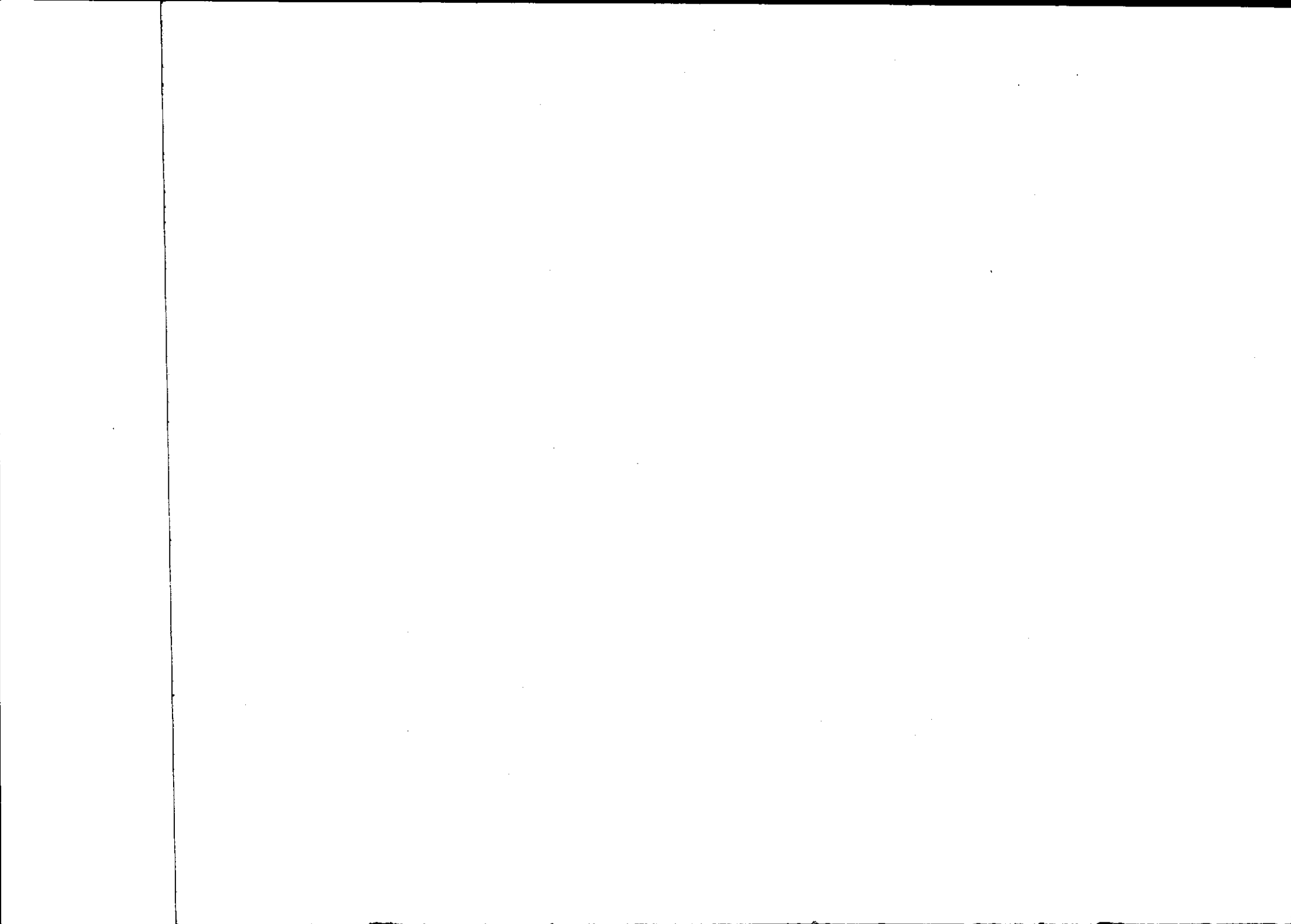
RENDEMENTS GRAIN

	CARRE 1	CARRE 2	CARRE 3	CARRE 4
POIDS GRAIN Kg	4	3,5	3	4
Surface M²	0,048	0,040	0,035	0,048
10.000 = Rdt Kg/Ha	480	400	350	480

METHODE DE CALCUL DU BILAN HYDRIQUE
CUMULATIF DES CULTURES

STATIONS	JANVIER			FEBVIER			MARS			AVRIL			MAY			JUN			JULIET			AOUT			SEPTEMBRE			OCTOBRE			NOVEMBRE			DECEMBRE		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
MATAM 1978	P _n												1	1	2	10	17	23	36	44	-9	68	70	64	50	41	31	20	14	9	PN 554					
	P ₀												0	0	0	0	23	11	33	46	17	41	10	6	23	21	29	0	14							
	J _D												0	0	0	0	2	1	2	5	2	5	1	1	3	2	2	0	2							
	ETP															65	62	59	53	51	52	46	43	47	43	45	49	49	48	54						
	K _c																		0.3	0.4	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0	0.6	0.5									
	B																		16	20	26	37	43	47	43	27	25				Σ B = 284 mm					
	P ₀ -B																		17	26	-9	4	-33	-41	-19	-6	4									
	R _s																		17	43	34	38	5	0	0	0	0									
	S/D																		0	0	0	0	0	-36	-19	-6										
	I																		100	100	100	100	100	87	80	78	78									
TIGUINCHOR 1978	P _n												1	3	6	23	40	62	115	121	124	176	180	176	130	111	85	35	26	PN 1547						
	P ₀												0	0	2	46	35	115	107	100	202	218	56	149	81	87	74	34	72							
	J _D												0	0	1	3	4	6	6	5	7	9	5	7	5	7	6	3	5							
	ETP												64	61	62	52	48	44	41	35	31	35	34	38	37	39	40	41	41	45						
	K _c															0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.6	0.5								
	B															16	14	17	17	19	29	28	34	38	37	35	24	10				Σ B = 320 mm				
	P ₀ -B															30	21	97	87	81	173	150	22	111	74	52	50	14								
	R _s															30	51	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60								
	S/D															0	0	97	87	81	173	190	22	111	44	52	50	14								
	I															100	100	100	100	100	97	94	94	94	94	94	94	94								
NIAMEY 1978	P _n												11	16	19	20	26	32	50	61	70	69	70	67	45	40	16	12	7	2	PN 636					
	P ₀												1	5	8	71	18	10	27	35	41	54	51	90	37	40	26	21	3	0						
	J _D												1	0	4	4	1	2	2	2	4	6	2	4	2	6	2	3	1	0						
	ETP												35	36	82	64	64	61	55	54	59	49	46	52	46	51	54	58	58	64						
	K _c															0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.6	0.5									
	B															25	21	26	24	30	39	47	49	36	52	44	31	22				Σ B = 461 mm				
	P ₀ -B															39	50	-8	-14	2	-4	-3	5	5	38	-7	9	-1								
	R _s															39	60	52	38	36	32	29	34	39	60	63	60	59								
	S/D															0	29	0	0	0	0	0	0	17	0	2	0									
	I															100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100								
ABEICHE 1978	P _n												7	9	10	14	20	25	49	50	52	63	65	61	40	32	24	10	4	1	PN 542					
	P ₀												4	11	14	23	18	58	51	48	134	9	29	28	15	32	6	0	3							
	J _D												1	1	2	1	2	3	2	3	5	1	2	5	3	4	1	0	1							
	ETP												75	78	80	68	63	59	59	57	59	49	47	50	47	50	52	55	59	59						
	K _c															0.3	0.4	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.5										
	B															17	20	26	24	41	45	44	28	25								Σ B = 280 mm				
	P ₀ -B															55	54	81	-19	-30	38	-37	17	-25												
	R _s															55	60	60	41	11	49	12	29	7												
	S/D															0	49	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
	I															100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100									
DORI 1978	P _n												7	9	10	14	20	25	49	50	52	63	65	61	40	32	24	10	4	1	PN 542					
	P ₀												4	11	14	23	18	58	51	48	134	9	29	28	15	32	6	0	3							
	J _D												1	1	2	1	2	3	2	3	5	1	2	5	3	4	1	0	1							
	ETP												75	78	80	68	63	59	59	57	59	49	47	50	47	50	52	55	59	59						
	K _c															0.3	0.4	0.5	0.8	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.6	0.5										
	B															20	24	29	47	48	47	50	28	25								Σ B = 318 mm				
	P ₀ -B															38	27	19	87	-39	-18	-22	-13	7												
	R _s															38	60	60	60	21	3	0	0	7												
	S/D															0	5	19	87	0	0	-19	-13	0												
	I															100	100	100	100	100	100	100	100	94	90	90										

Bilans hydriques cumulatifs pour une sélection de stations de la région sahélienne



2.2. Précipitation actuelle (P_A)

La précipitation actuelle représente l'ensemble des précipitations reçues au cours de chaque décade, c'est-à-dire de 1 au 10, de 11 au 20 et de 21 à la fin du mois. Les valeurs de précipitation sont arrondies au millimètre entier. Les précipitations pénètrent dans le sol et restaurent les réserves d'eau du sol jusqu'à un certain niveau choisi pour une station donnée (voir paragraphe 2.8 ci-dessous). Toute quantité d'eau pénétrant dans le sol au delà du seuil choisi percolera dans des couches profondes et sera éliminée du bilan d'eau. Par hypothèse également la précipitation est supposée tomber sur une surface horizontale éliminant de ce fait le ruissellement latéral.

2.3. Nombre de jours pluvieux (J_A)

L'observation du nombre de jours pluvieux permet de mieux comprendre la distribution des précipitations au cours de la décade. Par exemple, une précipitation totale de 150 mm tombant sur 1 ou 2 jours impliquera une précipitation intense et probablement peu effective et des dommages probables aux cultures alors que la même quantité reçue sur 8 jours est beaucoup plus profitable aux cultures. De même, 30 mm tombant en 1 jour peuvent signifier une sécheresse, particulièrement si cette quantité tombe au début de la première décade et à la fin de la seconde. Pour cette raison si un seul jour pluvieux survient au cours de la décade, il convient d'en indiquer la date.

2.4. Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle prise comme référence dans cette étude est la quantité maximum d'eau qui peut être évaporée par un gazon uniforme maintenu court dont les réserves en eau du sol ne sont pas limitées comme défini par Penman en 1948. Son calcul s'effectue en suivant la méthode exposée au point 3. Cette annexe représente l'expérience acquise par la FAO au cours des dix dernières années dans l'utilisation de la formule de Penman. Quelques légères modifications introduites dans le calcul de la fonction utilisant le vent et le déficit de saturation pour les climats chauds et secs ne sont généralement pas appliquées dans le cas présent. En effet, les cultures pluviales sont pratiquées dans des environnements qui sont généralement plus humides, au moins au cours de la saison culturale.

Les données climatologiques de température, tension de vapeur ou humidité relative de l'air, durée d'insolation et vitesse du vent permettront le calcul de l'évapotranspiration potentielle pour des intervalles mensuels. Les valeurs décadaires seront ensuite déduites graphiquement ou à l'aide d'un mini-ordinateur. Ceci est aisé parce que la variabilité de l'évapotranspiration potentielle est beaucoup plus faible que celle de la précipitation et que les fluctuations journalières d'évapotranspiration se compensent habituellement au cours de la décade. Lorsque les éléments nécessaires pour le calcul de la formule de Penman ne sont pas disponibles, il est possible d'utiliser avec précaution la formule de Thornthwaite. Des bonnes

mesures d'évaporation effectuées avec le bac "Classe A" semblent toutefois préférables. ~~Les valeurs d'évaporation obtenues par le bac "Classe A" doivent~~ être affectées d'un coefficient égal à 0,70-),75 pour obtenir une estimation de l'évapotranspiration potentielle au cours des mois humides qui correspondent à la saison où sont pratiquées les cultures pluviales.

Dans beaucoup de cas il ne sera pas possible de calculer l'évapotranspiration potentielle pour toutes les stations où des données pluviométriques seront disponibles. Cependant, étant donné que l'évapotranspiration potentielle est beaucoup moins variable dans l'espace que la précipitation en particulier sur des valeurs cumulatives, les valeurs d'évapotranspiration décadaires calculées pour une station pourront être utilisées dans des stations voisines pourvu que les conditions d'altitude, de température, d'humidité, d'insolation et de vent soient similaires, ce qui est généralement le cas dans les plaines ou sur les plateaux. La situation est cependant complètement différente dans les régions montagneuses où les variations d'altitude et d'exposition modifieront tous ces facteurs ainsi d'ailleurs que la distribution des précipitations.

2.5. Coefficients culturaux (Kc)

La définition de l'évapotranspiration potentielle, expliquée au paragraphe précédent, implique l'existence d'une strate végétale courte et complètement développée. Les plantes cultivées et en particulier les cultures annuelles passent par plusieurs stades de végétation depuis la levée jusqu'à la maturation.

Le premier stade végétatif débute à la levée et va jusqu'à l'apparition des organes de reproduction (épis pour les céréales à petits grains et panicule terminale pour le maïs). Au cours de cette période (figure 2) l'évapotranspiration maximum réelle de la culture représente une fraction de l'évapotranspiration potentielle. Cette fraction, qui varie de 0.3-0.4 au stade de la levée à 0.9-1.0 au moment de l'épiaison, est appelée coefficient cultural.

Le second stade végétatif se caractérise par une couverture dense et uniforme et couvre une période de ± 40 jours autour de la floraison. Au cours de cette période, qui correspond au taux maximum d'évapotranspiration, le coefficient est de 1.0 ou même légèrement plus élevé, allant jusqu'à 1.1 ou 1.2 d'après les cultures.

Le troisième stade végétatif débute avec la formation des grains. Au cours de cette période le grain se développera et arrivera à maturité. En même temps, l'appareil végétatif se dessèchera progressivement. Les besoins en eau de la culture diminuent également et le coefficient cultural passera de 0.9 à 0.4-0.5 au stade de maturité de la culture.

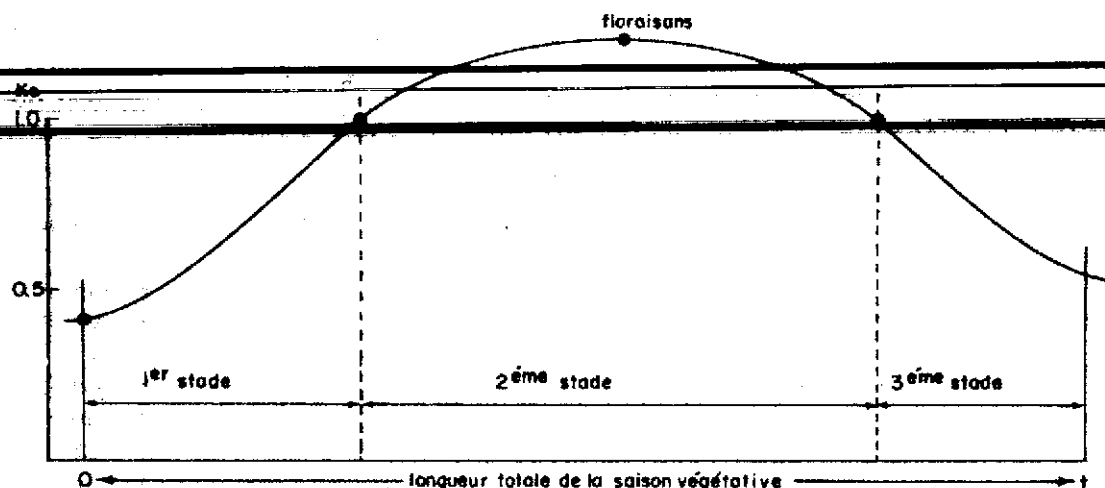


Figure : Evolution du coefficient cultural K_c au cours des divers stades végétatifs

Le tableau 1 représente l'évolution générale du coefficient cultural pour les cultures céréalières.

	Le coefficient cultural varie		
	de		à
1er stade végétatif	0.3-0.4		0.9
2ème stade végétatif	1.0	1.1-1.2	1.0
3ème stade végétatif	0.9		0.4-0.5

L'adaptation des coefficients culturels aux diverses cultures spécifiques doit être faite en tenant compte des principes généraux exposés ci-dessous. Il peut être difficile pour une organisation qui centralise l'information destinée à la surveillance des cultures aux niveaux provinciaux, nationaux et internationaux d'attribuer des coefficients culturels pour chaque culture et chaque décade de l'année. C'est pourquoi il est indispensable que l'inventaire préliminaire des données rassemblées dans ce but contienne des informations très précises sur les variétés cultivées dans les différentes régions, la durée de leur cycle végétatif et leurs dates habituelles de semis.

Dans les régions semi-arides, où la brièveté de la saison des pluies conditionne impérativement la longueur de la saison culturale, la situation est un peu plus simple que dans les régions tropicales humides, où les semis peuvent être échelonnés sur une période plus longue. Il convient de mentionner que l'ensemble de cette activité repose autant sur des informations phénologiques que météorologiques.

En région sahélienne, les coefficients culturaux utilisés pour une culture de Sorgho/mil d'un cycle de 130 et 90 jours sont :

Cycle de 130 jours :

0,3 0,3 0,4 0,4 0,5 0,7 0,8 1,0 1,0 1,0 0,9 0,6 0,5

Cycle de 90 jours :

0,3 0,4 0,5 0,8 1,0 1,0 1,0 0,6 0,5

2.6. Besoins en eau des cultures (B)

Les besoins en eau des cultures s'obtiennent en multipliant l'évapotranspiration potentielle pour une décade donnée par le coefficient cultural pour cette même décade. Etant donné que le coefficient cultural est ajusté d'après la longueur du cycle végétatif de la culture donnée, il est possible de calculer dès le début de la saison culturale les besoins en eau totaux de la culture pour la saison en totalisant les besoins de chaque décade.

2.7. Différence entre la précipitation actuelle et les besoins en eau (Pa - B)

Cette différence exprime la quantité d'eau disponible pour les cultures sans toutefois tenir compte de l'eau disponible dans le sol (voir paragraphe 2.8.). On peut constater ici que l'effet d'une précipitation donnée sera différent au cours des différents stades de développement de la culture.

2.8. Réserve d'eau utile dans le sol (Rs)

Ce chiffre exprime en mm la quantité d'eau présente dans le sol et qui peut être directement utilisée par la culture. En d'autres mots, il s'agit de la quantité d'eau se situant entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. La quantité d'eau utile présente dans le sol dépendra de :

- la profondeur du sol exploitée par les racines de la culture ;
- les caractéristiques physico-chimiques du sol.

La profondeur du sol exploitée par les racines mérite une attention spéciale. Elle dépendra à son tour du stade de développement de la culture, de la présence de couches dures, d'une nappe phréatique élevée, d'horizons salinisés, etc.

Du point de vue de la culture ceci dépendra aussi largement du type d'environnement dans lequel la culture est pratiquée. Un riz pluvial cultivé en Asie du Sud Est possède un système racinaire superficiel généralement limité à une profondeur inférieure à 25 cm. Le mil poussant dans les régions semi-arides produit les racines actives jusqu'à 60-80 cm de profondeur et les racines du blé cultivé dans la pampa argentine peuvent atteindre facilement 1 mètre de profondeur. En termes de disponibilité en eau et compte tenu des sols

où sont pratiquées ces cultures, cela signifie une capacité utile de rétention d'eau du sol de 20, 60 et 150 mm respectivement au stade de développement maximum de la culture. Pour une même profondeur de sol, la capacité de rétention sera également influencée par la texture du sol. La proportion entre les argiles et les matériaux plus grossiers du sol définira des capacités de rétention en eau différentes. Une couche de 50 cm de sol sableux, par exemple, retiendra probablement moins de 30 mm d'eau alors que la même épaisseur de sol limoneux pourra retenir 60 ou 80 mm.

En accord avec les remarques exprimées plus haut sur les stades de développement de la culture, il serait logique de faire varier la profondeur d'enracinement et donc la quantité d'eau exploitable d'après le stade de développement de la culture. En établissant la présente méthode, il a été tenu compte de ce qu'au début du cycle végétatif le coefficient cultural est assez bas, ce qui permet en général à la plante de disposer de suffisamment d'eau. De ce fait et en vue de simplifier le processus de calcul, on a adopté pour un lieu et une culture donnée une capacité de rétention en eau constante.

Travaillant à l'échelle du village ou du secteur agricole, on pourrait envisager une capacité de rétention en eau variable en fonction du stade végétatif. Cette approche devrait alors se baser sur les mesures expérimentales de profondeur d'enracinement. Celles-ci sont rarement disponibles.

La figure 3 montre des capacités de rétention en eau utilisées dans certains cas précis par la FAO. Ces chiffres sont évidemment des exemples et chaque valeur de cet important facteur doit être mesurée ou estimée avec soin.

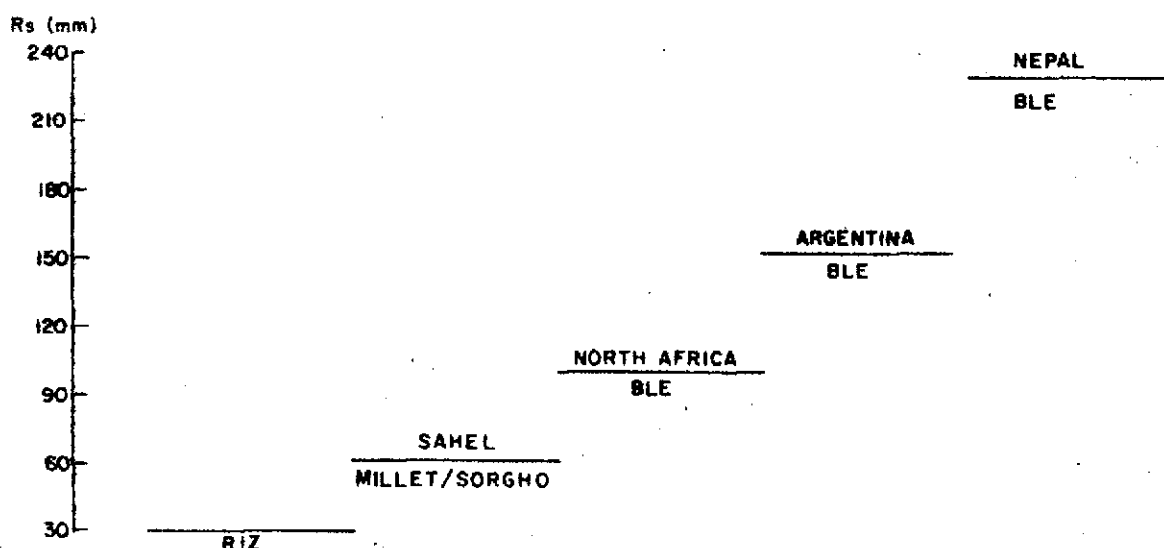


Figure 3 : Exemples de capacité de rétention en eau du sol pour certaines cultures et régions choisies.

2.9. Excès ou déficits d'eau (S/D)*

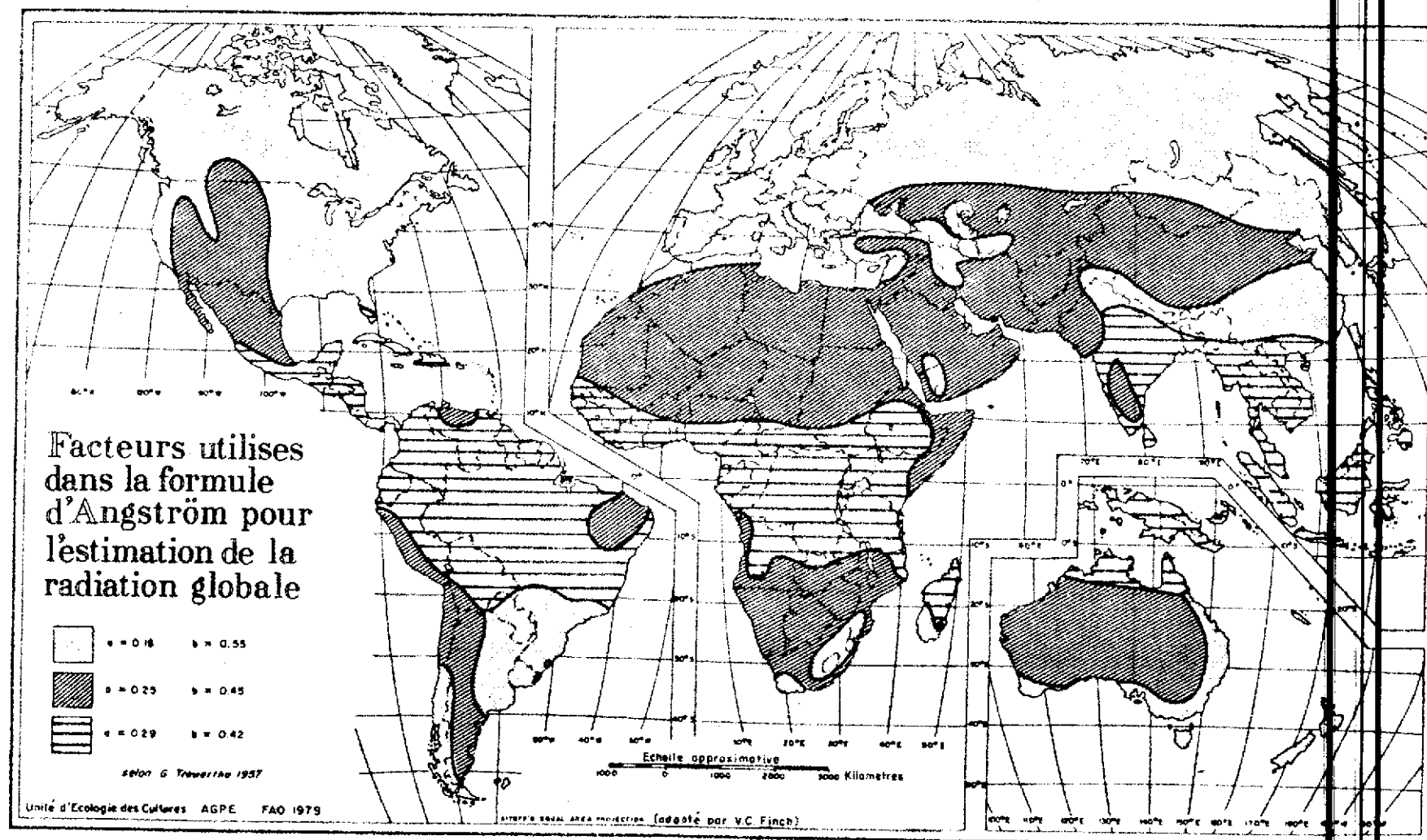
Cette ligne indique les excès et les déficits d'eau (marqués -) par rapport à la capacité de rétention en eau du sol tels qu'ils résultent des calculs précédents. Les excès se réfèrent aux quantités dépassant le seuil choisi pour la capacité de rétention en eau. Les déficits se réfèrent aux quantités d'eau n'ayant pu satisfaire les besoins en eau de la plante, la réserve d'eau utile dans le sol ayant été réduite à zéro. Par ailleurs, en se basant sur l'expérience acquise sur le terrain il semble bien que tout excès d'eau de 100 mm au cours d'une décade résultera dans une réduction de l'index (voir paragraphe 2.10).

2.10. Index (I)

L'index indique sous forme de pourcentage et cumulativement comment les besoins en eau d'une culture annuelle ont été satisfaits, et ce jusqu'à un stade quelconque de son cycle végétatif.

On suppose que le semis prend place lorsque la réserve d'eau du sol est suffisante. Dans les régions où la période active de végétation est inférieure à 180 jours, le semis s'effectue généralement lorsqu'au moins 30 mm de précipitation sont tombées au cours d'une seule décade. Un index de 100 est alors attribué pour la décade du semis. Cet index restera 100 au cours des décades successives à moins qu'un excès de plus de 100 mm ne survienne pour une seule décade ou qu'un déficit apparaisse dans la ligne E/D (voir figure 1). Si un excès de plus de 100 mm survient, l'index est diminué de 3 unités pour cette décade et devient 97 où il restera jusqu'à ce qu'une autre période critique survienne. Si après deux décades les réserves en eau tombent à 0 et qu'un déficit de 20 mm apparaît, le quotient entre 20 et les besoins totaux en eau : 400 mm, comme calculé précédemment (voir paragraphe 2.6.) sera de 0.95. Ceci correspond à un besoin en eau non satisfait de 5 % et l'index de 97 calculé précédemment tombera à 92. Le calcul se poursuit ainsi jusqu'à la fin de la saison (maturation de la culture) en tenant compte de ce que l'index au cours de la première décade a une valeur de 100 et que cette valeur par après ne pourra que rester égale à elle-même ou diminuer. L'index à la fin de la saison végétative reflètera les contraintes cumulatives auxquelles aura été soumise la culture et qui sont dues aux excès ou déficits d'eau. Cet index sera généralement lié au rendement final de la culture à moins que d'autres calamités, telles que maladies, forts vents, aient eu des effets déterminants. L'index est directement lié au rendement et permet d'obtenir une première approximation du rendement et ce, très tôt dans la saison.

Il sera également possible de déduire de l'index des données quantitatives mais celles-ci devront être basées sur les rendements potentiels de la culture qui varient d'un endroit à l'autre en fonction des conditions de l'environnement. De ce fait l'établissement de corrélations liant l'index tel que défini plus haut et le rendement ne pourra se faire que lorsque des données statistiques précises seront disponibles pour la région. Ceci démontre l'importance des données statistiques de rendement pour les différentes régions d'un pays et pour les diverses cultures principales pratiquées. Alors que la méthode permet de bonnes estimations qualitatives, la prédiction quantitative devra s'appuyer sur de bonnes données statistiques de rendement et de production.



9. UNE METHODE D'APPLICATION PRATIQUE DE LA FORMULE DE PENMAN POUR L'ESTIMATION DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ET DE L'EVAPORATION D'UNE SURFACE D'EAU LIBRE

3.1 INTRODUCTION

La formule mise au point par Penman en 1948 pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration d'une nappe d'eau libre a été largement utilisée dans le monde avec des résultats généralement satisfaisants. Cette méthode a été utilisée entre autres dans beaucoup de projets exécutés par la FAO.

Une des difficultés majeures d'utilisation, outre le nombre important de paramètres climatiques requis, est le calcul proprement dit, en particulier si les paramètres sont exprimés en unités différentes de celles utilisés originellement par Penman. Il est indispensable dans ce cas d'adopter des coefficients de conversion appropriés. Malgré les développements des calculatrices de bureau et des miniordinateurs, une méthode de calcul simple reste très utile, en particulier pour les travaux de terrain.

3.2 COEFFICIENTS UTILISES DANS LA FORMULE

La formule originale a été mise au point à Rothamsted et correspond aux conditions climatiques de l'Angleterre méridionale. Quelques ajustements de coefficients ont été adoptés pour tenir compte de l'expérience mondiale de la FAO dans l'utilisation de la formule.

3.2.1 Les coefficients a et b , utilisés dans la formule d'Angström pour l'estimation du rayonnement global à partir de la durée d'insolation, font l'objet de nombreuses discussions. Beaucoup d'essais réalisés au sein de projets FAO ont démontré que trois jeux de coefficients permettent d'obtenir de bons résultats dans les grandes zones climatiques. Ces coefficients sont :

a		b	
0.18	+	0.55	pour les zones froides et tempérées
0.25	+	0.45	pour les zones semi-arides chaudes
0.29	+	0.42	pour les zones tropicales humides

La carte (figure 4) basée sur les travaux de Irewartha (1962) montre, à titre indicatif, les zones climatiques considérées.

3.2.2 Les valeurs du rayonnement à la limite de l'atmosphère ont été calculées en se basant sur une constante solaire de $2.00 \text{ cal. cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$.

3.2.3 Les estimations de l'évapotranspiration potentielle et de l'évaporation d'une nappe d'eau libre réalisées dans des environnements arides caractérisés à l'échelle du mois par des températures minimum moyennes

supérieures à 5°C et des différences entre température maximum moyenne et température minimum moyenne de plus de 12°C, montrent en générale une sous-estimation due à la disponibilité d'une énergie accrue apportée par des phénomènes d'advection.

En vue de compenser cette sous-estimation qui ne se vérifie que dans les climats extrêmes, le coefficient affectant la vitesse du vent à 2 m du sol (U) a été modifié de la manière suivante :

Température moyenne minimum mensuelle	Différence entre t_0 maximum moyenne mensuelle et t_0 minimum moyenne mensuelle	Coefficient de U
-	$T_M - T_m \leq 12^\circ\text{C}$	0.54
> 5°C	$12^\circ < T_M - T_m \leq 13^\circ\text{C}$	0.61
> 5°C	$13^\circ < T_M - T_m \leq 14^\circ\text{C}$	0.68
> 5°C	$14^\circ < T_M - T_m \leq 15^\circ\text{C}$	0.75
> 5°C	$15^\circ < T_M - T_m < 16^\circ\text{C}$	0.82
> 5°C	$16^\circ < T_M - T_m$	0.89

Les tableaux VIII et IX ont été divisées en 6 pour tenir compte des coefficients pour le calcul de l'évaporation et de l'évapotranspiration potentielle.

3.2.4 La littérature a proposé de nombreux autres coefficients pour le calcul du rayonnement effectif de grande longueur d'onde. Les résultats de la recherche dans ce domaine n'ont toutefois pas encore apporté de conclusions définitives ; on a utilisé les coefficients proposés initialement par Brunt (1939).

3.3 Description de la feuille de calcul

En vue de faciliter les calculs de la formule de Penman on a réalisé deux feuilles de calcul permettant le calcul graduel de l'évapotranspiration potentielle et de l'évaporation d'une nappe d'eau libre entre les latitudes de 50°N et de 50°S. Des copies spécimen sont jointes à la présente note.

Les deux feuilles diffèrent l'une de l'autre par les coefficients d'albedo choisis, 0.25 et 0.05 respectivement pour le calcul de l'évapotranspiration et de l'évaporation. Une autre différence se trouve dans le second terme de l'équation où le terme constant ajouté au vent (U) est respectivement 1.0 et 0.5 (Penman, 1963).

La formule s'exprime de la façon suivante dans chacun des deux cas :

a) Evapotranspiration potentielle

$$E_T = \frac{\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \left[0.75 R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_K^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_d}) (0.10 + 0.90 \frac{n}{N}) \right] + 0.26 (e_0 - e_d) (1.00 + 0.54 U)}{\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} + 1.00}$$

b) Evaporation d'une nappe d'eau libre

$$E_o = \frac{\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \left[0.95 R_A \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_K^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_d}) (0.10 + 0.90 \frac{n}{N}) \right] + 0.26 (e_0 - e_d) (0.50 + 0.54 U)}{\frac{p_0}{p} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} + 1.00}$$

3.4 Légende des symboles utilisés

Les paramètres entrent en ligne de compte dans la formule sont exprimés dans les unités suivantes :

- E_T = évapotranspiration potentielle exprimée en millimètres pour une période donnée ;
- E_o = évaporation d'une nappe d'eau libre exprimée en millimètres pour une période donnée ;
- p_0 = pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer exprimée en millibars ;
- p = pression atmosphérique moyenne au niveau de la station considérée exprimée en millibars ;
- Δ = variation de la tension de vapeur saturante en fonction de la température exprimée en millibars par degré Celsius ;
- γ = constante psychométrique pour la psychromètre à ventilation forcée. Cette constante est égale à 0.66 ;
- 0.75 et 0.95 = facteurs exprimant la réduction du rayonnement global due à l'albédo pris respectivement égal à 0.25 et 0.05 ;
- R_A = radiation de courte longueur d'onde reçue à la limite de l'atmosphère et exprimée en mm d'eau évaporable (1 mm = 59 calories). La constante solaire est prise égale à 2.00 cal.cm⁻².min⁻¹ ;
- N = moyenne journalière au cours des différents mois de la durée d'insolation astronomiquement possible exprimée en heures et dixièmes ;
- n = durée d'insolation ;
- σT_K^4 = rayonnement du corps noir fonction de la température, exprimé en mm d'eau évaporable ;
- e_d = tension de vapeur en milibar ;
- e_a = tension de vapeur saturante au dessus de l'eau ;
- U = vitesse du vent en m/s.

ETUDES AGROCLIMATOLOGIQUES (FAO / UNESCO / OMM)

EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (PENMAN)

Pays . MALI . Station . NIARO . Période . M.A.I.

Latitude . 15.12 . Longitude . 2.19 . Altitude . 235 .

T_a
 (1 of 186) 15,9

a 8,5

b 12,8

$\frac{a+b}{2}$ 9,66

$c + b \times \frac{0,75}{0,9 + 0,1}$ 0,44

$\frac{a+b}{2} \times \frac{0,75}{0,9 + 0,1}$ 6,52 (1-0) T_a
 mm

r_e 34 σT_e^4 17,65 \times 0,24 \times 0,69 = Rayonnement effectif = 2,92 mm

$q_{a,mb}$ 16,2 \times $0,96 - 0,078 \sqrt{q_{a,mb}}$ 16,2

$q_{a,mb}$ 53,2 (VII)

u_m/sec 3,5 $\times (q_{a,mb})^{0,75} \times 1,00$ 0,943 \times 37 = Terme aerodynamique = 34,89 mm

T_{max} 44,4

T_{min} 26,7

$T_{max} - T_{min}$ 17,7

Si la différence $> 12^\circ C$ utiliser les coefficients à utiliser sur la table VII

$\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{h_0}{p} =$ 4,615 \times 3,6 $+$ 34,89 = 9,172 mm/jour

$\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{h_0}{p} =$ 4,615 \times 1,00 = 4,615

$\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{h_0}{p} =$ 2,843 mm/jour

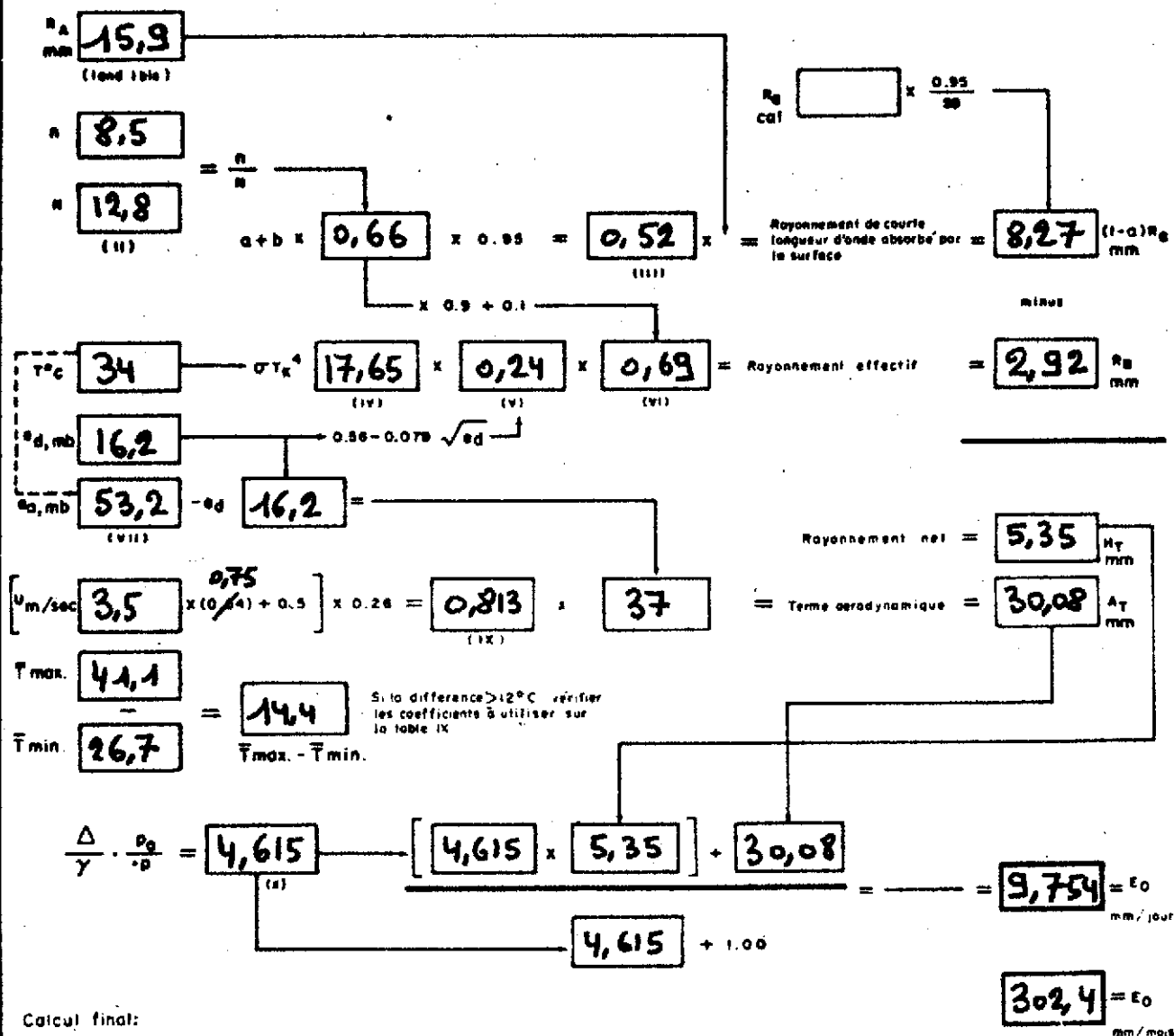
Calcul final: $\left[\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{h_0}{p} \right]^{h_4 + h_5}$ = Evapotranspiration Potentielle

* Les chiffres romains indiquent le numéro de la table correspondante.

ETUDES AGROCLIMATOLOGIQUES (FAO / UNESCO / OMM)

EVAPORATION D'UNE NAPPE D'EAU LIBRE SELON PENMAN

Pays .. **MALI** Station .. **NiORO** Periode .. **MAI**
 Latitude .. **15.12** Longitude .. **- 9.19** Altitude .. **235**



Calcul final:

$$\frac{\left[\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{p_0}{p} \right] H_T + A_T}{\left[\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{p_0}{p} \right] + 1} = \text{Evaporation d'une nappe d'eau libre}$$

* Les chiffres romains indiquent le numéro de la table appropriée

2
10
11

12

13

14

15

16

17

18

19