

CN0100255
P420
DAN

1577-80

REPUBLIQUE DU SENEGAL

LITTÉRATURE

MINISTRE DE L'ÉDUCATION
ET DE LA CULTURE

DÉLÉGATION GÉNÉRALE

À LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

AGRICULTURE MÉCANISÉE

À L'ÉCONOMIE DE L'ÉLEVAGE EN ZONE SAHÉLIENNE

10

DIARRHÉE, TUBERCULOSE ET ANÉMIE (P. 10)

Avril 1977

Centre National de Recherche Agronomique
de Banjul

INSTITUT SENÉGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES
(I.S.R.A.)

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Cette synthèse sera en partie reprise dans l'ouvrage intitulé "Agriculture in semi arid environments", édité par G.H. EANNEL, A.E. HALL et H.W. LAWTON. Ravu et traduit Par A.E. HALL, Plant sciences, University of California, Riverside, (U.S.A), ce texte fera l'objet du chapitre IV :

"Agroclimatology applied to water management in the sudanian and sahelian zones of Africa"

signé : C. DANCETTE, adapté par A.E. HALL.

AGROCLIMATOLOGIE APPLIQUEE A L'ECONOMIE DE L'EAU
EN ZONE SOUDANO-SAHELIENNE

C. DANCETTE (I.R.A.T.) - Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (I.S.R.A)
C. N. R. A. BAMBEY - SENEGAL

A INTRODUCTION

B - CONNAISSANCE DU MILIEU ET DE LA PLANTE

I - Demande évaporative

II - Besoins en eau des cultures

III - Saison des pluies utile pour l'agriculture

C - EXEMPLES D'APPLICATION A L'AGRICULTURE SENEGALAISE

I - Choix concernant les techniques de culture

II - Choix concernant la sélection des plantes

III - Choix concernant une gestion nationale de l'eau en agriculture

D - CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AVENIR

A - INTRODUCTION

La zone semi-aride considérée s'étend au Sud du Sahara, en Afrique de l'Ouest, et concerne essentiellement, de l'Ouest vers l'Est : le Sud de la Mauritanie, le Sénégal, le Mali, la Haute Volta, le Niger, le Nigeria et le Tchad. Elle s'agit d'une bande géographique de latitude Nord comprise entre 12 et 18 degrés et de longitude comprise entre 17° Ouest et 23° Est. La unique saison des pluies, peut s'étaler de 2 à 3 mois au Nord à 5 ou 6 mois au Sud entre les mois de Mai et Octobre, avec une pluviométrie totale variant très schématiquement entre 200 mm au Nord et 1200 mm au Sud. La zone est soumise à une très forte demande évaporative: l'évapotranspiration potentielle annuelle (ETP) est comprise en gros entre 2200 mm au Nord et 1600 mm au Sud.

Pour une caractérisation plus précise de la zone, le lecteur peut se référer avec profit à l'étude très complète de COCHEME et FRANQUIN, 1967.

Un des objectifs de cette synthèse est de montrer comment les agronomes, en s'appuyant d'une part sur une base climatologique solide et d'autre part sur leur connaissance de la plante et du sol, peuvent intervenir rationnellement dans une région donnée, en vue d'améliorer la gestion agricole des ressources hydriques. La démarche qui va être exposée a été adoptée par les chercheurs de l'Institut de Recherches agronomiques tropicales et des cultures vivrières (IRAT) et par les Instituts de Recherches agricoles de certains des Etats mentionnés ci-dessus. C'est en particulier au Sénégal, où œuvre l'Institut sénégalais de Recherches agricoles (ISRA) que cette démarche a été plus spécialement testée et appliquée.

L'agriculture dite "pluviale" est surtout concernée par les pages qui suivent. Sans sous-estimer l'importance que prend l'irrigation dans les contrées soudano-sahéliennes, l'agriculture pluviale reste primordiale. Cependant, l'agriculture irriguée est aussi intéressée par les résultats de cette étude ; on effectue l'irrigation permet de pallier certaines aléas pluviométriques que tous les travaux d'adaptation des cultures au milieu naturel ne permettront pas d'éviter à coup sûr. De plus, la nature du couvert cultivé en saison des pluies, n'est pas sans influence sur la reconstitution des réserves hydriques utilisables en irrigation (bassins des fleuves et barrages, nappes peu profondes etc. . .).

En zone tropicale semi-aride, plus qu'ailleurs, tout doit être réuni dans le domaine de la gestion de l'eau, pour assurer non seulement la survie de la population, mais plus encore l'amélioration de son niveau de vie. Par le biais des spéculations et des techniques agricoles retenues, les responsables nationaux peuvent intervenir efficacement sur :

, l'alimentation vivrière et le pouvoir d'achat des paysans,
 la protection et l'amélioration d'un paysage rural favorable aux cultures et à l'habitat,

le maintien et l'amélioration du capital hydrique (réserves du sol et recharge des nappes).

Le choix agricole est le facteur clé de cette gestion saine de l'eau et les agronomes doivent répondre à des questions cruciales du genre :

, vaut-il mieux laisser une zone en friche ou la cultiver ?
 La cultiver chaque année ou temporairement ?

quelle variété et quelles techniques adopter pour assurer la satisfaction des besoins en eau et la bonne réussite de cette culture ?

Dans ces conditions, quelle quantité d'eau sera-t-elle consommée ?

compte tenu des pluies espérées, quelle quantité d'eau sera épargnée par la culture et mise en réserve dans le sol ? Comment sera utilisée cette réserve (réserve de sécurité pour la culture de l'année suivante ? utilisation immédiate par une culture secondaire ou "dérobée" ? utilisation par les arbres ? recharge des nappes peu profondes ?)

quelle quantité d'eau peut être récupérée dans la nappe, sans entamer dangereusement le capital, à des fins d'alimentation hydrique des hommes, des animaux ou des cultures irrigables ?

Tous ces problèmes interfèrent et entraînent l'agroclimatologiste bien loin de la simple analyse climatologique ou tout simplement pluviométrique. Le développement agricole étant l'objectif final, une collaboration intense doit s'établir avec les météorologistes bien sûr, mais aussi avec les agro-socio-économistes, les phytotechniciens et les sélectionneurs, les physiciens du sol et les agronomes en général. Les questions, les réponses, les décisions prises dans le domaine précis de l'économie de l'eau en zone semi-aride, découlent d'un travail d'équipe, à l'écoute du monde paysan, de ses besoins et de ses contraintes. Dans les pages qui suivent, ces problèmes seront abordés avec le souci permanent de leur trouver des solutions simples et rapidement applicables.

B - CONNAISSANCE DU MILIEU ET DE LA PLANTE

I - DEMANDE EVAPORATIVE

L'économie de l'eau suppose que l'on sache d'abord chiffrer les portes d'eau potentielles par évaporation, au niveau de l'eau, d'un sol humide, d'un organe végétal bien alimenté en eau (transpiration). Ces portes d'eau potentielles caractérisent l'aridité du milieu ; plus ces pertes d'eau sont élevées dans une zone climatique donnée, plus le climat de cette zone est dit "aride". Cette évaporation potentielle, que nous appelons aussi demande évaporative, ne dépend donc que du climat régional, et peut être estimée directement :

- . mesure de l'évaporation (EV) de l'eau à la surface d'une nappe d'eau libre,
- . mesure de l'évapotranspiration potentielle (ETP) d'un couvert végétal pérenne et continu, homogène en taille, densité et vigueur, et toujours bien approvisionné en eau.

La demande évaporative peut aussi être calculée :

- . à partir de diverses formules empiriques établies à partir de relations existant entre les mesures directes d'évaporation ou d'évapotranspiration, et certains facteurs météorologiques usuels (température, humidité relative de l'air, durée d'insolation, vitesse du vent etc...)

- . à partir de formules plus rigoureuses basées sur une analyse physique du processus de l'évaporation : formule de Penman par exemple.

L'objet de cette synthèse n'est pas de détailler tous les procédés de mesure ou de calcul de la demande évaporative, qui ont fait l'objet de nombreuses études en Afrique Tropicale de l'Ouest (BALDY 1976, Cochemé et Franquin 1967,

Bernard - 1956 et 1967, DANCETTE 1973, Gleizes 1964, RIJKS 1970 à 1975, IRAT Niger et Charoy, Gillet 1970 et 1971, IRAT Haute-Volta 1966-1969 Riquier 1963, Ridu 1972, Roche et al. non daté etc...).

Il faut préciser tout d'abord, que pour les besoins immédiats de l'agriculture, il peut être superflu et même illusoire de vouloir mesurer avec une précision absolue les pertes d'eau potentielles au niveau d'une grande surface d'eau, ou au niveau d'un couvert végétal dit "de référence". L'utilisateur a surtout besoin d'une mesure, relativement aisée à effectuer et peu coûteuse, facile à standardiser et à généraliser, qui permette de comparer valablement des lieux d'aridité différents. Le gradient de demande évaporative, une fois chiffré et si possible cartographié, permet d'étendre à l'ensemble d'une région les résultats de mesure des besoins en eau des cultures, obtenus

localement. Quant aux besoins en eau des cultures, il suffit de les mettre en relation avec des mesures de référence de demande évaporative (coefficients de culture établis tout au long du cycle).

Les avantages et inconvénients de quelques mesures de référence de demande évaporative peuvent être rapidement passés en revue, du point de vue de leur utilisation en zone soudano-sahélienne :

Évaporomètre Piche

Il s'agit d'une mesure simple faite depuis très longtemps dans les stations météorologiques ; les séries d'observation sont donc longues. Par contre cet appareil est souvent mal utilisé (mauvaise fixation, rondelles "buvard" encrassées, rebords du tube ébréchés etc...), la mesure dépend essentiellement du type d'abri, qui a pu hélas varier au cours ^{de la position} des périodes, de l'évaporomètre dans l'abri est importante. En général les réponses de cet appareil sont exacerbées, c'est-à-dire qu'il donne des valeurs très faibles par temps humide et très fortes par temps sec : on peut passer par exemple de 2mm/jour à plus de 15 mm/jour, lorsque l'évaporation en bac normalisée passe de 5mm/jour à 12mm/jour. Il convient donc de l'utiliser avec une extrême précaution. En conditions très bien contrôlées, des corrélations peuvent être établies avec d'autres mesures ou calculs plus sûrs, ce qui permet d'estimer la demande évaporative, là où l'évaporation "Piche" est la seule donnée disponible. Il ne faut donc pas condamner le "Piche" systématiquement. La formule d'ETP, dite du Piche corrigé (Bouchet 1964) peut être calculée à partir d'un évaporomètre installé en abri classique ou en abri simplifié (type A.M.P.S. mis au point par les bioclimatologistes de Uorsailles-France). Cette formule a été testée au Sénégal et dans d'autres États francophones (Schoch 1968) ; elle est intéressante en saison sèche (coefficient de formule relativement constant) mais plus délicate à utiliser en saison des pluies. L'intérêt des Abris météorologiques Piche simplifiés est indéniable pour des comparaisons rigoureuses de climats locaux. Ainsi, la demande évaporative peut être comparée entre plusieurs sites différemment protégés par les arbres (champs têtés dégagés, clairières, parcelles "brise-vent", parcelles à arbres dispersés etc. . .) ; cinq sites ont ainsi été comparés dans le Centre du Sénégal (Schoch 1966), et trois autres sont en cours d'étude en Casamance.

3ac d'évaporation

Il était assez peu répandu dans les pays d'Afrique francophone ; les météorologistes, surtout préoccupés autrefois de sécurité aérienne, le trouvaient un peu trop difficile à utiliser (nécessite d'avoir de l'eau à proximité, pour le remplir et le nettoyer régulièrement). L'évaporation mesurée avec cet appareil dépend du climat bien sûr, mais aussi des caractéristiques

do l'appareil lui même et de son installation : il s'agit donc toujours d'une mesure ayant une valeur relative et non absolue, comme d'ailleurs pour tous les instruments de mesure. Pour comparer valablement les données entre elles, il faut effectuer les mesures dans des conditions de milieu bien définies : dimensions et couleur du bac, support et environnement immédiat, protection (oiseaux et divers animaux assoiffés), **propreté**, horaires de mesure (facteur température) etc... Les évaporations peuvent différer sensiblement (plus ou moins 20 % parfois) d'un type de bac ou d'utilisation, à l'autre.

Heureusement, des comparaisons systématiques ont été faites entre bacs différents en Afrique tropicale, ce qui permet de se ramener à des conditions vraiment comparables :

- . bacs ORSTOM enterrés et bacs normalisés classe A,
- . bacs placés sur sol nu non arrosé ou sur sol enherbé arrosé,
- . bacs de couleur variée, protégés par plusieurs sortes de cages etc...

(RIOU 1972, RIJKS 1975, DANCETTE 1973, DOORENBOS 1975).

Au Sénégal, essentiellement pour des raisons de standardisation et d'harmonisation avec un vaste réseau international, le bac normalisé classe A est utilisé de préférence à tout autre. Par ailleurs, il est plus facile à contrôler et à entretenir qu'un bac enterré. Une coordination assurée entre la Direction de la météorologie Nationale et l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) permet d'étoffer et d'homogénéiser le réseau, ce qui est de la plus grande utilité pour l'agriculture pluviale et irriguée (SECK 1970).

Mesures d'évapotranspiration potentielle (ETP) sur couvert végétal de référence - (Gazon)

Cette mesure se veut plus directement appliquée aux besoins de l'agriculture ; elle vise à chiffrer la demande évaporative au niveau d'un matériel végétal vivant et non plus d'un matériau inerte. De nombreuses mesures d'ETP gazon ont été faites en Afrique Tropicale par l'IRAT, l'ORSTOM, la F.A.O. (Office de mise en valeur du Fleuve Sénégal) ; Tchad (Fort-Lamy), Niger (Maradi), Haute Volta (Mogtédou) Sénégal (Séfa, Bambey, Richard-Toll). Ces mesures, bien qu'intéressantes, sont parfois décevantes parce que délicates, coûteuses et discutables. Il s'est avéré illusoire de vouloir préconiser une plante de référence.

La plante retenue doit être adaptée au climat, au sol, à la qualité de l'eau d'irrigation, autant de facteurs très variables dans l'espace et parfois dans le temps. L'IRAT vers 1970, a abandonné ces mesures en milieu semi aride. Par ailleurs, les corrélations existant entre l'évaporation d'eau

libre dans un bac et l'ETP d'un gazon de référence, sont bonnes, lorsque toutes les précautions voulues sont prises (graphiques n° 1, 2 et 3). Alors, Pourquoi ne pas simplifier le travail, en adoptant la mesure d'évaporation en bac, plus aisée, plus sûre, moins coûteuse et plus facile à normaliser ? RIJKS, signalait ainsi que pour une même période à Richard-Toll (Sénégal), 99 % des données d'évaporation en bac avaient pu être retenues comme correctes, contre 65 % seulement des données de mesure d'ETP gazon (divers accidents).

Il faut insister sur le fait que les besoins hydriques d'une culture annuelle (évapotranspiration maximale ou ETM) ne peuvent être confondus avec l'ETP mesurée ou calculée. L'ETP se rapporte à un couvert végétal dense, homogène, pérenne, d'une hauteur fixée (15 à 20 cm) alors que l'ETM se rapporte à une culture, c'est-à-dire à un complexe sol-plante dans lequel le sol a un rôle prépondérant en début de cycle (évaporation sol nu), puis négligeable ensuite par rapport à la transpiration du végétal. C'est ce que montrent les schémas n° 4 et 5. La notion d'ETP, relativement pratique pour la détermination des besoins en eau de cultures herbacées pérennes et pour caractériser l'enveloppe des besoins de cultures successives irriguées (dimensionnement de périmètres d'irrigation par exemple), l'est moins pour les cultures annuelles de cycle plutôt court qui nous intéressent ici.

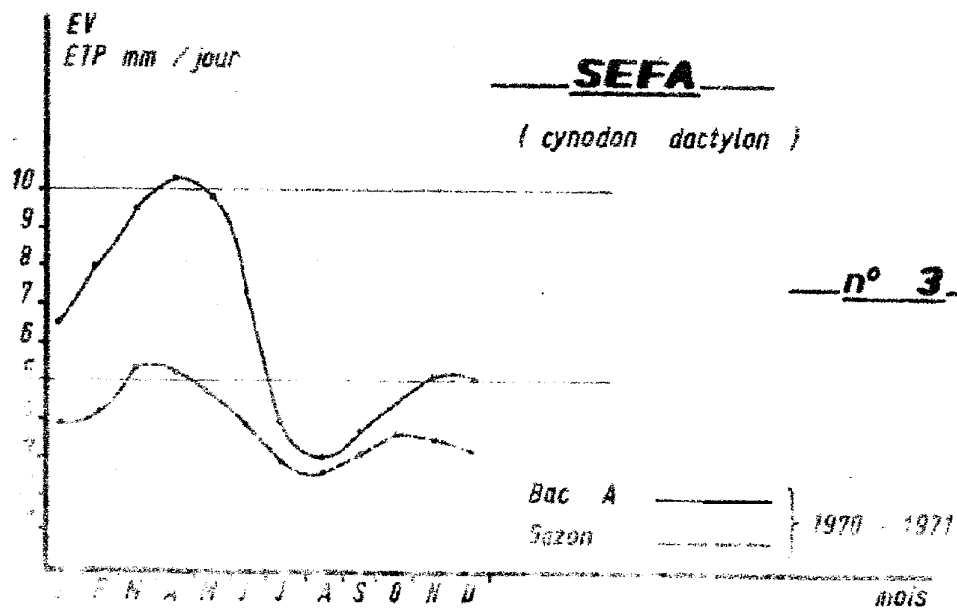
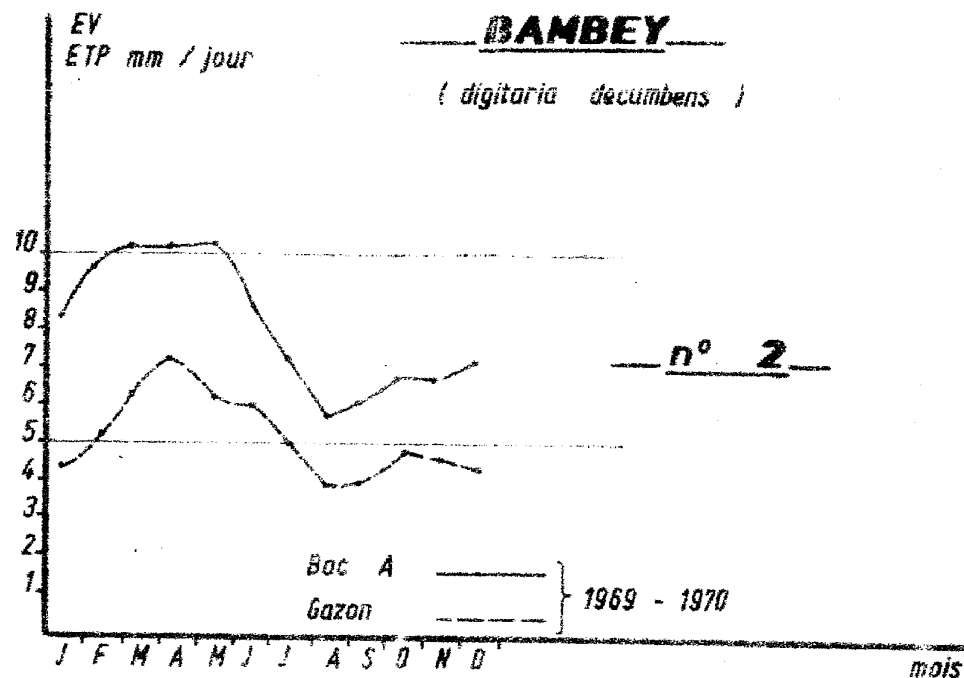
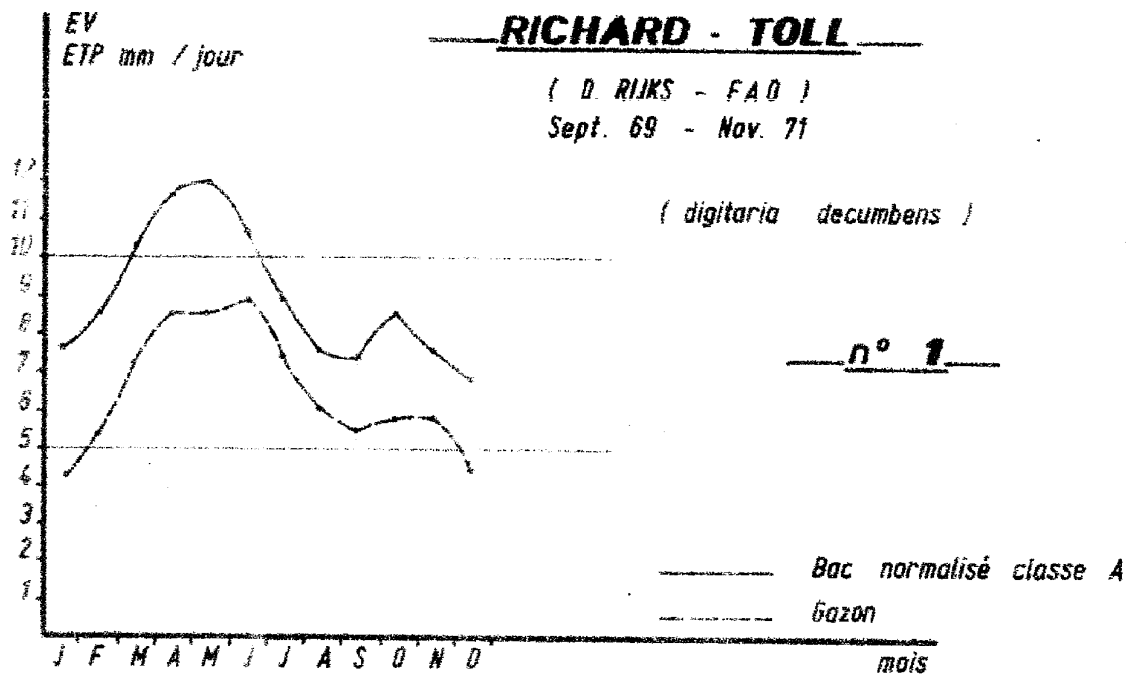
Formules empiriques

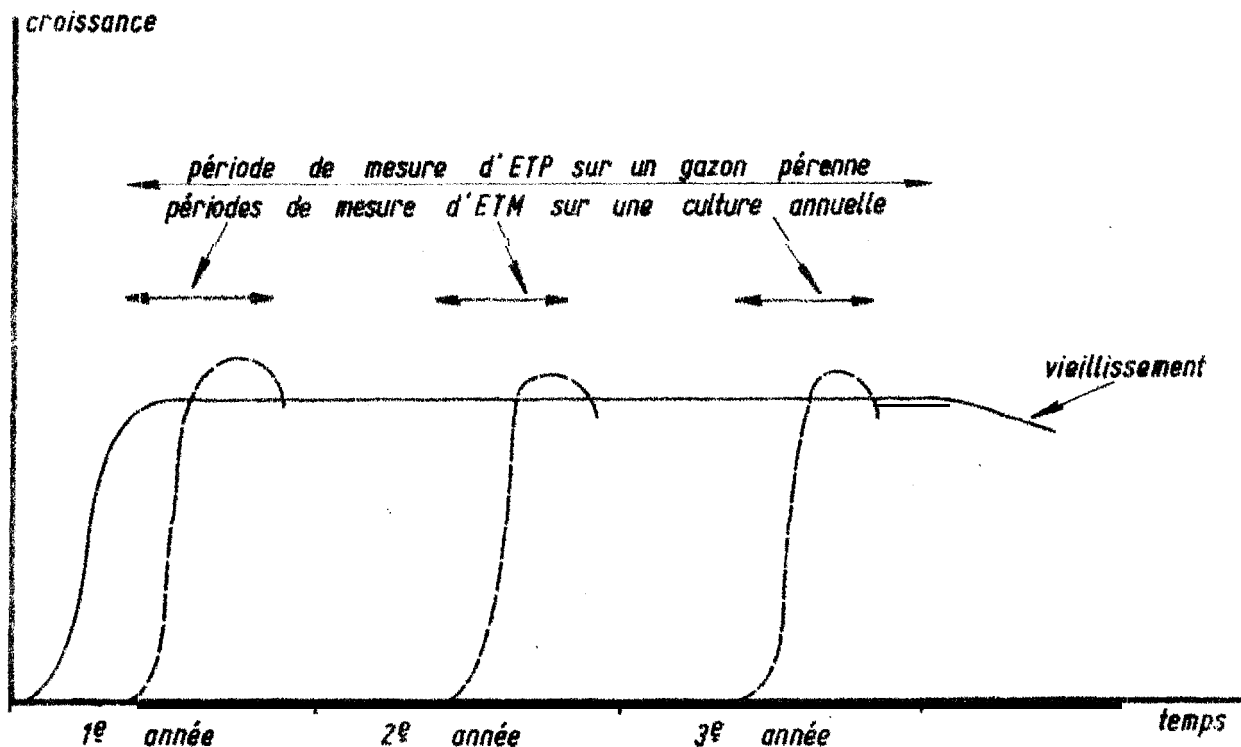
Ces formules (Thornthwaite, Turc, Blaney-Cridde, Prescott etc...) visent à calculer l'ETP à partir de données climatiques usuelles (Coopération 1964, RIQUIER 1963...). Souvent très valables dans leur zone climatique d'origine, elles le sont moins une fois transposées dans d'autres zones ; il faut alors les corriger ou les "étalonner". Comparées entre elles, pour une même période et situation, elles diffèrent souvent (Schoch, IRAT 1965). Parfois valables à l'échelle de l'année, elles estompent fréquemment certains phénomènes saisonniers marquants. Elles font appel à des données climatiques souvent rares (réseau peu dense), incomplètes, quelquefois douteuses. Lorsqu'une donnée importante pour le calcul manque, on l'estime fréquemment à partir d'une autre formule plus ou moins bien adaptée ; c'est le cas du rayonnement global par exemple, que l'on estime à partir de certaines corrélations établies un peu partout dans le monde (coefficients différents) avec les durées d'insolation réelle et possible. Dans l'ensemble cependant, correctement appliquées à la région étudiée, on peut espérer avec les meilleures formules, lorsqu'on les compare entre elles ou avec la formule de Penman, ne pas avoir d'écarts dépassant 20 % (GIRARD, ROCHE 1974)..

Formule de Penman

Très utilisée en Afrique tropicale (BERNARD pour la vallée du Fleuve Sénégal, COCHEME et FRANQUIN, BALDY, RIOU etc... déjà cités), elle permet, à partir d'une étude rigoureuse du phénomène, de calculer l'évaporation potentielle à la surface d'une grande étendue d'eau. Pour l'appliquer

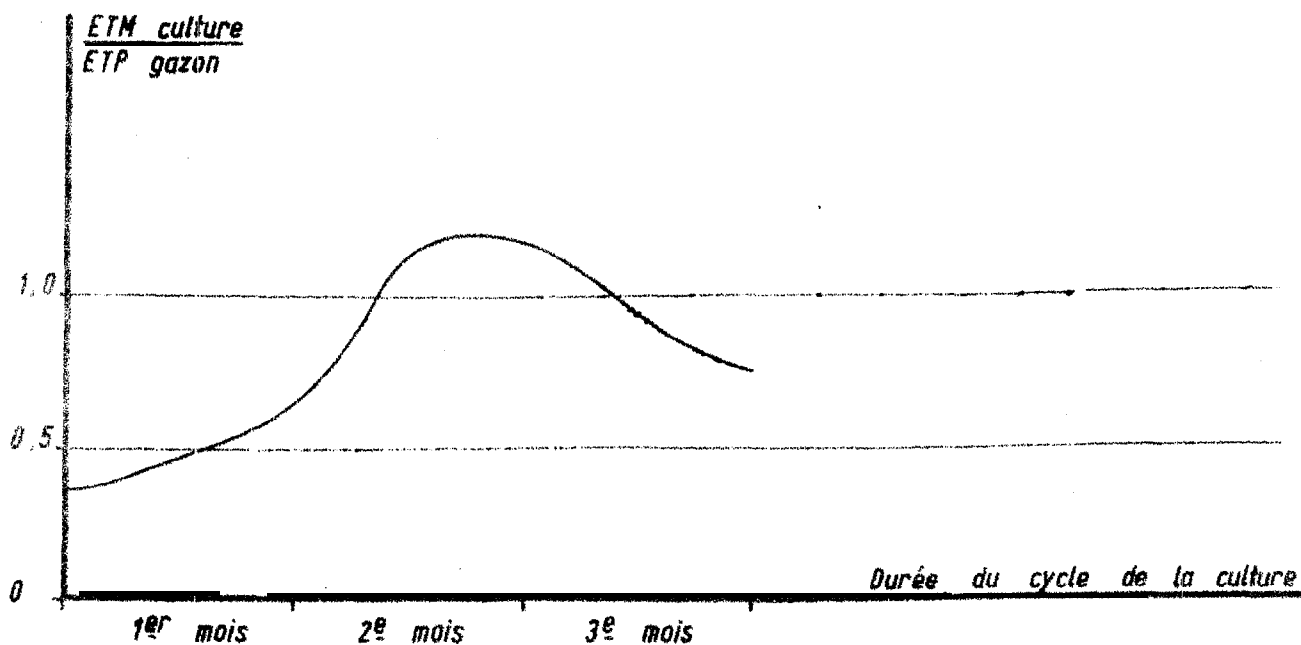
COMPARAISON ENTRE L'EVAPORATION BAC NORMALISEE CLASSE A ET L'ETP GAZON AU SENEGAL





— Schéma n° 4 —

DIFFERENCES ENTRE CULTURE ANNUELLE ET GAZON PERENNE



— Schéma n° 5 —

DIFFERENCES ENTRE EVAPOTRANSPIRATION MAXIMALE D'UNE CULTURE ANNUELLE ET ETP D'UN GAZON PERENNE

à un couvert végétal, il faut utiliser des valeurs d'albédo différentes (0,25 en gros, au lieu de 0,05 pour l'eau). Cependant, ces valeurs d'albédo diffèrent d'un type de couvert végétal à l'autre. Pour plus de précision, il faudrait; donc très bien connaître le bilan radiatif, ce qui est rarement le cas. Valable, pour une grande surface (suppression de l'effet d'oasis) il est normal que l'on ne retrouve pas avec cette formule l'évaporation mesurée dans un bac (effets de température et de protection de l'eau par les parois) : il faut donc se méfier de toute comparaison abusive. Comme pour les autres formules empiriques (et en beaucoup plus grave même), les données nécessaires sont nombreuses et complexes ; souvent manquantes, il faut alors les estimer à partir d'autres formules plus ou moins valables. Tout ceci conduit à de nombreuses approximations qui peuvent limiter gravement la précision de la formule.

Discussion

Soit le praticien veut comparer ses mesures de besoins hydriques des cultures à une mesure qui traduise la demande évaporative et qui soit d'ordre purement climatique (et instrumental...) ; soit il veut estimer les besoins hydriques d'une culture, à partir de la seule connaissance locale de la demande évaporative ; soit, il souhaite classer facilement différentes situations géographiques, d'après leur aridité respective.

Pour satisfaire ces divers besoins, nous pouvons recommander de faire dans toutes les stations agroclimatiques, au moins des mesures directes d'évaporation d'eau libre, si possible en bac normalisé classe A. Pour se raccrocher au réseau mondial, il faut bien sûr appliquer rigoureusement les normes de l'organisation Météorologique Mondiale. Pour diverses raisons de commodité, en zone semi-aride, le bac classe A peut être installé sur un sol nu non arrosé, dans un terrain bien dégagé.

Puisque toutes les stations agronomiques dignes de ce nom, disposent d'un parc météorologique, il est souhaitable d'y faire en abri météorologique normalisé des relevés de température, humidité relative (thermomètres sec et mouillé), vitesse du vent (totalisée à 2 mètres de hauteur), de durée d'insolation (héliographe Campbell-stokes) à défaut de bilan radiatif complet : (pyranomètres type Kipp et Zonen), et enfin de pluviométrie. Ces données serviront éventuellement aux divers calculs de formule, ou de corrélation avec la demande évaporative.

En effet, la démarche empirique suivante est assez séduisante : des corrélations établies un peu partout dans le monde, permettent de calculer à partir des données climatiques citées, l'évaporation de l'eau libre non plus à la surface d'une grande étendue d'eau, mais dans un bac normalisé classe A (Christiansen 1966), ce qui est au moins quelque chose de bien défini et de pratique.

En ce qui concerne l'agriculture pluviale, si l'agronome disposa en général de données climatiques limitées dans le temps et dans l'espace, la pluviométrie est par contre, et heureusement, mieux connue. Le réseau pluviométrique, toujours insuffisant certes, couvre assez bien les territoires, sur des périodes permettant souvent l'interprétation statistique. L'idéal serait donc de pouvoir estimer pendant la saison des pluies, la demande évaporative, à partir des simples données de pluviométrie.

Demande évaporative et pluviométrie

Dans une agriculture essentiellement pluviale, il importe à des fins de meilleure adaptation des cultures, de définir en priorité la demande évaporative pendant la saison des pluies (Juin à Octobre surtout). Pour la seule saison des pluies donc, il est logique que la demande évaporative soit sous la dépendance d'une humidification générale du climat, consécutive à l'arrivée des pluies (remontée vers le Nord du Front Inter Tropical et installation de la "mousson" communément appelée en Afrique Tropicale Francophone, "hivernage") ; ces pluies vont de pair avec une diminution des durées d'insolation (et donc du rayonnement), avec une diminution des températures diurnes vers la surface du sol (évaporation de l'eau du sol et transpiration des plantes), avec une importante augmentation de l'humidité relative de l'air (masses d'air humide venant du Sud, mais aussi évapotranspiration des cultures bien alimentées par les pluies) et enfin avec une réduction très nette de la vitesse moyenne du vent.

Toutes ces modifications climatiques résultent des pluies ou du moins leur sont concomitantes.

Une première tentative (DANCETTE 1973) a été faite au Sénégal pour établir cette liaison entre la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle mesurée sur gazon. Cette tentative a porté d'abord sur la totalité de la saison des pluies : relation graphique globale entre la pluviométrie moyenne par jour, pendant toute la saison des pluies et l'ETP moyenne pendant la même période. Ceci avait permis d'esquisser une carte, encore imparfaite certes, de l'ETP moyenne au Sénégal, pendant la saison des pluies utile pour l'agriculture (notion qui sera explicitée un peu plus loin). Puis les recherches ont porté sur les données mensuelles brutes, ce qui est pratique, mais qui présente cependant quelques inconvénients :

ces données ne sont pas forcément représentatives du mois entier, si la pluie ainsi comptabilisée tombe par exemple lors des derniers jours du mois,

la pluie d'un mois, si elle est excédentaire, peut influencer, par le biais des réserves hydriques du sol, sur l'évapotranspiration et donc sur la demande évaporative du mois suivant, même si par ailleurs ce dernier mois a une pluviométrie nulle ou très faible.

Si X est la pluviométrie mensuelle moyenne en mm/jour et Y l'ETP mensuelle en mm/jour, l'équation de régression peut s'écrire :

$$Y = 5.8 - 0.22 X, \text{ avec } r \text{ calculé de } 0.64 \text{ Pour } r \text{ table } = 0.42$$

au seuil de 0.01

Plus récemment, DANCETTE et HALL 1977, ont étudié au Sénégal, les corrélations entre la pluviométrie et l'évaporation de l'eau libre mesurée dans un bac normalisé classe A installé sur un sol nu non arrosé. Les mesures effectuées dans 3 stations agronomiques différentes, dont six de l'ISRA, bien réparties à l'intérieur du Sénégal, et deux de l'Office de Mise en Valeur du Sénégal, situées dans la vallée du Fleuve (Kaédi en Mauritanie et Samé au Mali) ont pu être utilisées. Cette fois-ci, il a paru judicieux de tenir compte non seulement de la pluviométrie de la saison ou du mois **considéré, mais** aussi :

de la pluviométrie annuelle pour la période (P_m), de la station ; elle diminue progressivement du Sud vers le Nord, plus l'influence du F.I.T et de la mousson est faible,

de la continentalité (C) de la station, chiffrée par une distance en kilomètres ds l'océan.

a) Relation globale

Pour simplifier les calculs, les mois de Juin à Octobre compris ont été retenus. Cependant, les mêmes calculs ont été faits en ne retenant que les mois pendant lesquels la saison des pluies était bien installée : c'est-à-dire Juin à Octobre ou Juillet à Octobre selon les cas. Dans une autre tentative, seules les durées exactes, au jour près, de la saison des pluies, ont été retenues. Dans les 3 cas, les relations sont restées très voisines ; aussi a-t-on préféré adopter la première solution qui consistait à garder, pour toutes les stations, une durée globale allant de Juin à Octobre compris.

La corrélation multiple suivante a été établie :

$$Ev = 10.4 - 0.1947 P - 0.0037 P_m + 0.0031 C$$

Ev est l'évaporation moyenne en mm/jour pendant les 5 mois ; P la pluviométrie moyenne en mm/jour pendant les 5 mois, P_m la pluviométrie annuelle en mm/an et C la continentalité en km, ont été définis plus haut. Le coefficient de la corrélation est 0.857 et F égale 60.42.

Par ailleurs, en recherchant la meilleure représentation de la famille de régression, entre seulement l'évaporation bac et la pluviométrie moyenne des 5 mois considérés, la meilleure équation trouvée a été celle-ci :

$$Ev = 10.4 - 2.76 L_n P$$

$$L_n P \text{ (} r = 0,92 \text{ et } F = 180,98 \text{)}$$

b) Relations mensuelles

Pour les relations à établir mois par mois, il a paru utile de distinguer les mois de transition du début de la saison des pluies ; ce sont les

muis de Mai et Juin pour le Sud du Pays et les mois de Juin et Juillet ailleurs.

Ces mois se distinguent des mois de pleine saison des pluies, qui sont Juillet, Août, Septembre et Octobre pour le Sud et Août, Septembre et Octobre dans le reste du pays.

. mois de transition :

$$E_v = 11,9 - 0,75 P - 0,003 P_m + 0,007 C$$

$$(r = 0,72 \text{ et } F = 55,35)$$

. mois de pleine saison des pluies

$$E_v = 8,9 - 0,40 P - 0,0032 P_m + 0,0019 C$$

$$(r = 0,78 \text{ et } F = 126,70)$$

c) Intérêt

La relation globale, valable pour la totalité de la saison des pluies, permet de caractériser la demande évaporative dans les différents postes pluviométriques du Pays, et donc d'en chiffrer le gradient grossièrement Sud-Nord. Cette relation ayant été calculée pendant 6 années très déficitaires en pluie (1971 à 1976) on peut craindre qu'elle ne s'applique pas forcément à toute la période (1931-1976). Aussi, dans l'attente d'une confirmation pour une période de mesure englobant des années normales et excédentaires en pluies, la demande évaporative à l'échelle du Sénégal, a été calculée pour 27 stations et seulement pour les dernières années. Cette demande évaporative est donc forte et caractéristique d'années de sécheresse. Mais ce qui importait, c'était de pouvoir mettre en évidence le gradient géographique. Par ailleurs, il vaut mieux dans la pratique, pouvoir s'adapter à des années de forte demande évaporative (ces années figurent dans l'ensemble parmi les 20 % d'années très sèches), ce qui rendra d'autant plus facile l'adaptation aux années de demande évaporative faible ou moyenne.

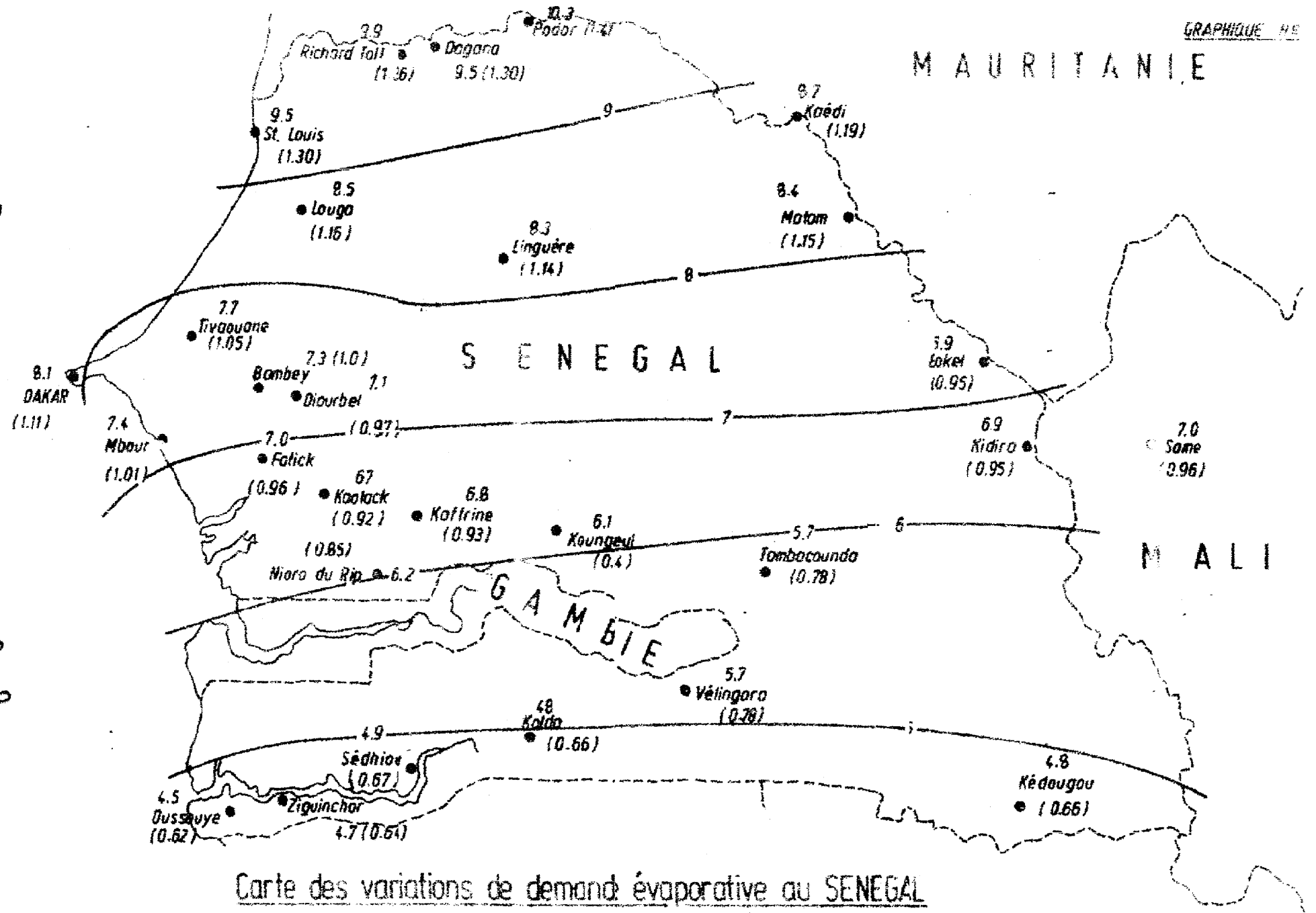
La carte jointe (graphique n° 6) exprime donc schématiquement les variations géographiques de la demande évaporative pendant l'hivernage, pour les années de sécheresse allant de 1971 à 1975. A côté de chaque station, un coefficient indique le rapport entre la demande évaporative de cette station, et celle de Bambey, Centre de mesure des besoins en eau des principales cultures pluviales du Sénégal (excepté pour le riz du plateau).

Cette dernière démarche étant trop globale, il faudra par la suite, chiffrer l'évaporation pas mois pas mois, à partir des relations établies pour les mois de transition et pour les mois de pleine saison des pluies. Tout cela fait l'objet d'un travail d'équipe entrepris pour le Sénégal par DANCETTE, HALL et VASIC. La encore, il sera très utile de vérifier ultérieurement si ce genre de relations est valable pour les autres pays soudano-sahéliens et si oui, de pouvoir y étendre les cartes de demande évaporative, mois par mois.

Dans les pages qui suivent, l'intérêt pratique de cette détermination, sera souligné,

MAURITANIE

ATLANTIQUE
OCEAN



Carte des variations de demande évaporative au SENEGAL
 (mm / jour)
 pendant les mois d'hivernage Juin à Octobre compris

II - BESOINS EN EAU DES CULTURES

Il convient tout d'abord de préciser que pour l'agronome, une culture est un ensemble complexe englobant à la fois la plante, le sol et les techniques adoptées par l'agriculteur, dans des conditions climatiques données. Les besoins en eau diffèrent bien sûr en fonction de nombreux facteurs :

La plante :

Des différences apparaissent au niveau de l'espèce et de la variété, compte tenu de ses caractéristiques physiologiques et aussi de sa longueur de cycle.

- . le sol : le sol nu en début de culture évapore plus ou moins d'eau selon sa texture et sa structure.
- . les techniques culturales : la fumure et les traitements phytosanitaires influent sur la vigueur de la plante, et donc sur sa consommation hydrique. Il en est de même pour les travaux du sol : la labour qui permet une meilleure implantation racinaire (CHARREAU, NICOU 1971) les sarco-binages qui modifient l'évaporation du sol nu et éliminent la concurrence hydrique des adventices. Les semis réalisés en sol sec avant la pluie, ou en sol humide après la première pluie utile, influent sur les besoins en eau de même que le démarrage et l'éclaircissage des cultures (MONNIER 1976) sans parler de techniques plus complexes = paillage, cultures associées et "relais", utilisation d'antitranspirants et de réducteurs de croissance etc...
- . la distribution des apports hydriques : doses et fréquences.

Mesure des besoins en eau

Les mesures faites en particulier par l'IRAT au Niger (Tarna), en Haute-Volta (Mogtédo), au Sénégal, continuées ensuite par les Instituts nationaux (INRAN au Niger et ISRA au Sénégal), sont toujours faites à un niveau de technicité élevé : les variétés testées sont des variétés sélectionnées vulgarisables, les niveaux de fertilité sont ceux préconisés par la recherche et par le développement et enfin les conditions d'entretien sont correctes (travail du sol, traitements sanitaires etc...). On estime en effet que si les besoins en eau sont connus dans ces conditions, et par la suite satisfaits par une bonne adaptation des cultures aux pluies ou par des irrigations complémentaires, ils seront inférieurs dans des conditions de technicité médiocre, et d'autant plus facilement satisfaits ; le problème des adventices est plus complexe cependant. L'objectif est de tout mettre en oeuvre, dès maintenant, pour assurer ces niveaux de technicité optimaux tant des points de vue purement agronomique, qu'économique. Il faut préciser que les niveaux de "fumure forte" adoptés (en particulier au Sénégal) sont nettement rentables (malgré

les hausses des engrais chimiques) qu'ils n'ont rien d'exagéré, et qu'ils demanderaient même à être rehaussés lorsque la restitution au sol des résidus de culture est insuffisante, non seulement des rendements satisfaisants doivent être obtenus, mais encore le capital de fertilité des sols doit être maintenu sinon amélioré (GANBY et SIBAND 1974, PIERI 1976).

Dispositif de mesure des besoins en eau et méthodes utilisées

De grandes parcelles sont adoptées pour réduire les advections d'énergies et les effets de bordure : 150 m² au Niger, 200 m² et plus au Sénégal.

a) Evapotranspiromètres

De 2 à 4 m² de surface et en général d'1 mètre de profondeur, ils sont installés au centre des parcelles. Un dispositif de drainage permet de recueillir l'eau excédentaires (D). Le facteur ruissellement étant éliminé, on peut écrire : besoins en eau ou ETA = Pluie + Irrigation - D

Il est inutile d'insister sur la description de cette technique ; on signalera le bon contrôle des percolations et la relative simplicité (de mesure, mais pas d'installation...). Il est difficile d'assurer une bonne homogénéité des plantes entre l'intérieur et l'extérieur des cuves ; le sol set remanié, le régime de percolation est perturbé par le fond de la cuve et diffère beaucoup de celui du sol "en place" etc... (DANCETTE 1974). Les évapotranspiromètres ont beaucoup servi au Niger (CHAROY et GILLET 1970) et en Haute-Volta (JENNY 1969) pour la mesure des besoins en eau des cultures maraichères (oignons, tomates, piments etc...). Ils ont donné de mauvais résultats pour la canne à sucre, du fait de l'irrégularité de la végétation. Au Sénégal, comme ailleurs, ils ont surtout servi pour mesurer l'ETP d'un gazon, ce qui peut être appliqué assez valablement à l'ETM (évapotranspiration maximale) d'une culture fourragère herbacée. Par la suite, l'utilisation des évapotranspiromètres a répondu à deux fins, au Sénégal :

Mesure d'ETM sur riz pluvial en Casamance : dans une zone où la pluviométrie est très forte (1200 à 1500 mm en 4 à 5 mois) et où les cultures ne consomment guère plus de 4 à 500 mm, les excès hydriques sont abondants d'où : ruissellement et percolation. Seuls les évapotranspiromètres sont facilement utilisables et permettent de maîtriser ces excès d'eau. Par ailleurs, le remaniement du sol et sa profondeur limitée ne sont pas trop gênants pour une plante comme le riz, en bonnes conditions de travail du sol et de fertilité. Un dispositif de drainage accéléré (bougies poreuses installées au fond de la cuve et mises en dépression) n'a pas apporté de grandes différences, par rapport à un système de nappe permanente à un niveau constant.

. Mesures de secours, pour les cultures du Centre du Sénégal. A Bambeï où la pluviométrie normale est de 640 mm, et où les ^{sont} sols/perméables et profonds (sable), les percolations peuvent atteindre facilement 3 ou 4 mètres de profondeur ; on n'était pas sûr de pouvoir les chiffrer par les procédés qui seront décrits plus loin. Il fallait donc se replier sur cette technique des évapotranspiromètres. Cependant, depuis 1972, date d'implantation du dispositif, il n'a pas été nécessaire de recourir à cette technique, du fait d'une pluviométrie exceptionnellement déficitaire. Par ailleurs, pour assurer le drainage des cuves dès le début de la culture, afin d'établir le bilan de consommation, il faut les saturer sur un mètre, ce qui implique un traitement différent du reste de la parcelle ; pour pallier cet inconvénient, elles ne sont pas saturées mais leur réserve hydrique est estimée, tant qu'elles ne drainent pas, grâce à des tubes d'accès pour humidimètre à neutrons, installés au milieu des cuves. Ainsi, les besoins hydriques mesurés avec les évapotranspiromètres peuvent en définitive être assez voisins de ceux mesurés par la méthode décrite ci-après.

b) Bilan hydrique "en place"

Les conditions naturelles sont parfois très bonnes en zone soudano-sahélienne pour établir des bilans de consommation hydrique précis, au moyen d'humidimètres à neutrons. Ces conditions favorables, comme celles que l'on rencontre au C.N.R.A de Bambeï (Sénégal), sont les suivantes : sols sableux relativement homogènes (surtout verticalement) et profonds, profils hydriques initiaux très secs après 8 à 9 mois de totale sécheresse, absence de cailloux et de zones d'infiltration préférentielle, relief assez plat, pluies réparties de telle sorte que l'humectation du sol est souvent progressive et pas trop rapide.

De plus, des précautions spéciales permettent d'améliorer encore les bilans : grandes parcelles isolées les unes des autres par des talus, tubages d'accès entourés de lames verticales empêchant tout ruissellement qui puisse fausser le bilan, étalonnage spécial de l'humidimètre pour les mesures de surface (12 et éventuellement 22 cm de profondeur), mesures profondes (4 m) s'il le faut, irrigations précises (par des sprinklers à angle réglable) effectuées en l'absence de vent et contrôlées par des pluviomètres en nombre suffisant, relevés hydriques réalisés si possible sur profil ressuyé (un jour ou deux après une grosse pluie), piétinements évités dans la zone de mesure (comme tout ce qui provoque des hétérogénéités de végétation) etc...

Des tensiomètres, installés en liaison avec le laboratoire de mécanique des fluides de Grenoble (Vachaud 1973 et Royer 1974) permettent de s'assurer de la direction des flux et surtout de savoir si à un niveau donné, il

peut y avoir des percolations que l'humidimètre à neutrons seul n'aurait pas permis de déceler. Par ailleurs, l'usage simultané d'humidimètres et de tensiomètres, a permis de caractériser la dynamique de l'eau dans le sol (conductivité hydraulique par la méthode du drainage interne).

Pour faire des bilans de consommation hydrique précis, basés sur la relation $ETM = \text{Pluie} + \text{Irrigation} - \Delta Q$ (évolution du stock d'eau dans le sol), il faut être sûr qu'il n'y a pas percolation en dessous de la limite de mesure d'humidité et pouvoir ainsi déterminer exactement ΔQ , qui correspondra soit à une consommation de la réserve en eau du sol (signe négatif), soit au contraire à une mise en réserve supplémentaire (signe positif). Lors des relevés, le profil hydrique initial, très sec, doit donc être retrouvé, à un niveau de sécheresse tel qu'il ne puisse y avoir percolation, ce qui oblige à faire des mesures parfois très profondes (graphique n° 7), dans le domaine d'évolution des profils. Si la saison est très pluvieuse, le sol peut s'humecter en dessous de la profondeur des tubes d'accès (4m) et tout bilan hydrique devient impossible, ce qui oblige à recourir aux évapotranspiromètres ou à des techniques plus sophistiquées.

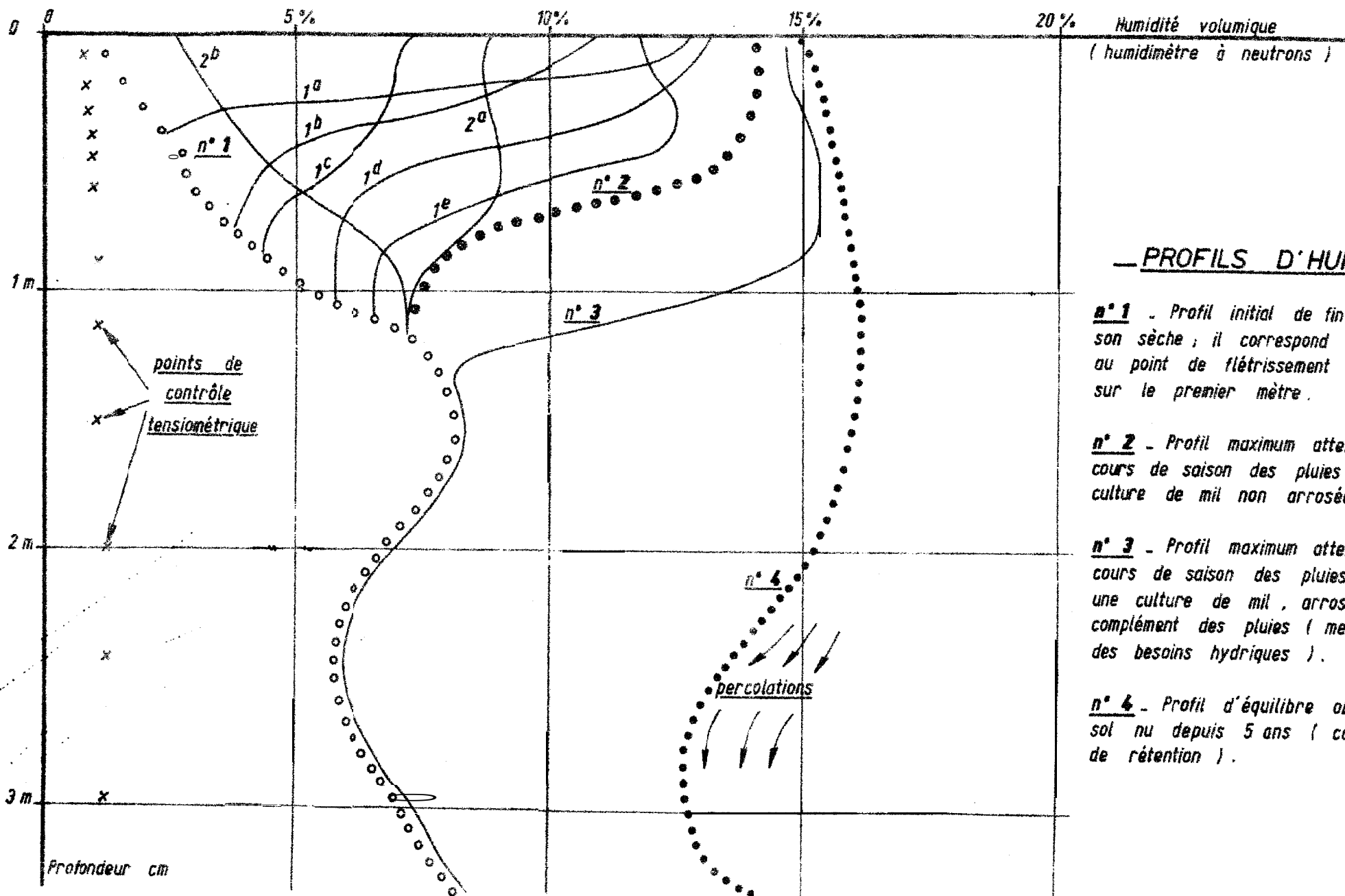
Ainsi, la solution future, à l'étude au Sénégal (Vachaud et A.I.E.) consisterait à coupler systématiquement à une profondeur donnée (en dessous de la zone d'enracinement utile des cultures) des relevés de tensiométrie et d'humidimétrie. Connaissant la perméabilité du sol à une humidité donnée et le gradient de charge hydraulique, le drainage vertical peut être chiffré. Pratiquement, une fois bien caractérisé le sol, cela permettrait de s'affranchir de relevés hydriques trop profonds, et d'abandonner les évapotranspiromètres.

Une solution moins élégante consisterait à mesurer les besoins en eau des cultures, plus au Nord, pour éviter les pluies excédentaires et mieux maîtriser l'irrigation, en limitant l'évolution maximale des profils, à une profondeur raisonnable (1 à 1.5 m par exemple).

Il convient de mentionner une autre technique de mesure des besoins en eau, assez élégante, mise au point par un chercheur du Centre d'Etude Nucléaire de Cadarache (Marcesse 1967), appliqué par T.M. DUC au Sénégal, sur canne à sucre, et sur diverses cultures vivrières au Niger (Kalme, Valet 1975).

L'irrigamètre à neutrons décrit par le graphique n° 8, est basé sur :

- . une bonne connaissance de la réserve en eau utile E_u du sol (obtenue par différence entre les humidités volumiques à la capacité au champ et au flétrissement permanent.)
- . une estimation de la profondeur d'enracinement efficace de la culture.



Humidité volumique
(humidimètre à neutrons)

PROFILS D'HUMIDITE

n° 1 - Profil initial de fin de saison sèche ; il correspond en gros au point de flétrissement permanent, sur le premier mètre.

n° 2 - Profil maximum atteint en cours de saison des pluies sous culture de mil non arrosée.

n° 3 - Profil maximum atteint en cours de saison des pluies sous une culture de mil, arrosée en complément des pluies (mesures des besoins hydriques).

n° 4 - Profil d'équilibre obtenu en sol nu depuis 5 ans (capacité de rétention).

DOMAINE D'EVOLUTION TYPIQUE DES PROFILS HYDRIQUES EN SOL SABLEUX CULTIVE OU NU

Graphique n° 7

E / M. S.

réserve hydrique du sol
 en mm, sur une profondeur
 d'enracinement efficace donnée

(i) = irrigation

Pluie
 ? percolation ?

niveau de la capacité au champ

réserve en eau
 facilement
 utilisable RFu

réserve en
 eau utile
 Eu

niveau du point de flétrissement permanent

temps

PRINCIPE DE L'IRRIGAMETRE A NEUTRONS TYPE "MARGESSE"

Graphique n° 8

- . une estimation de la réserve en eau facilement utilisable par la culture (RFu) RFu égale par exemple $2/3$ de Eu, pour une plante comme la canne à sucre (DANCETTE, RIDDERS, DUC 1970 et 1971 et VALET - Niger 1974)
RFu égale $1/3$ de Eu, pour les plantes plus exigeantes comme le riz, le maïs etc...
- . des relevés systématiques d'humidité, tout au long du cycle cultural, qui permettent de situer le niveau des réserves hydriques du sol, sur la profondeur retenue, et de le réajuster à un niveau légèrement inférieur à celui de la capacité au champ (pour réduire les risques de percolation) par une dose d'irrigation adéquate.

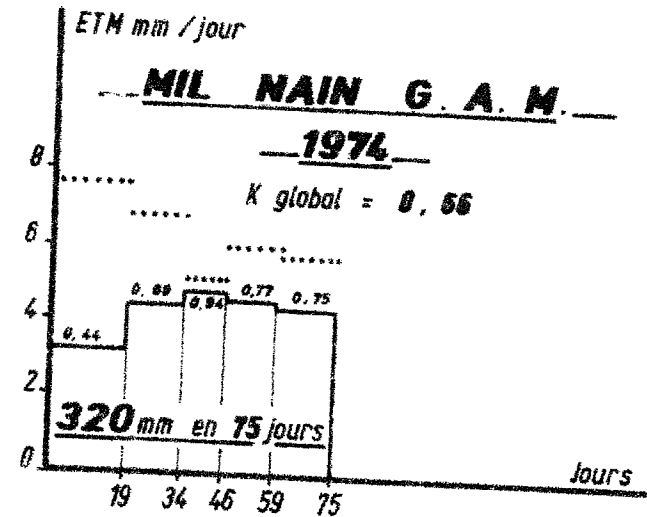
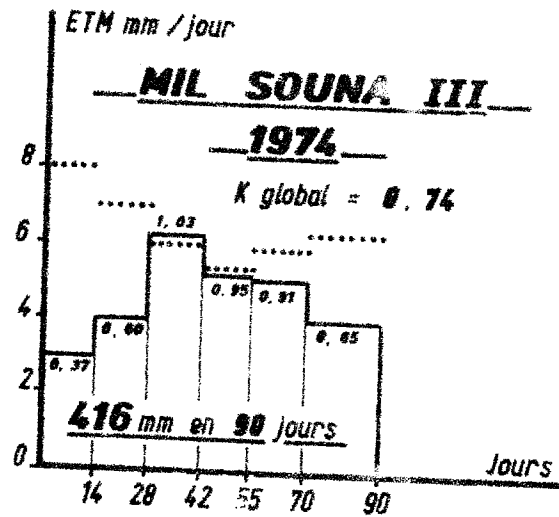
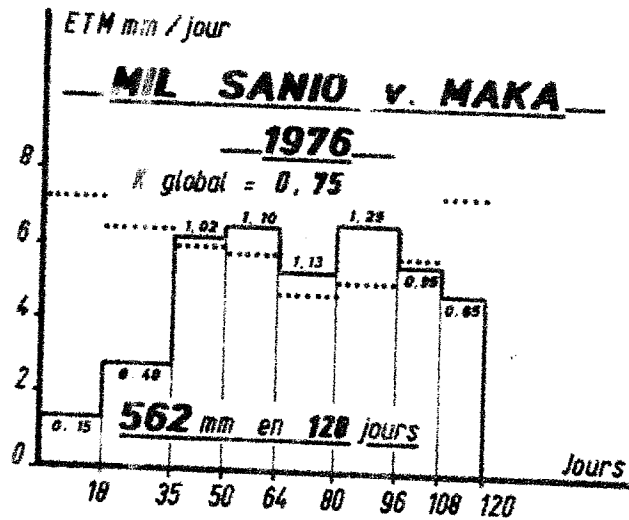
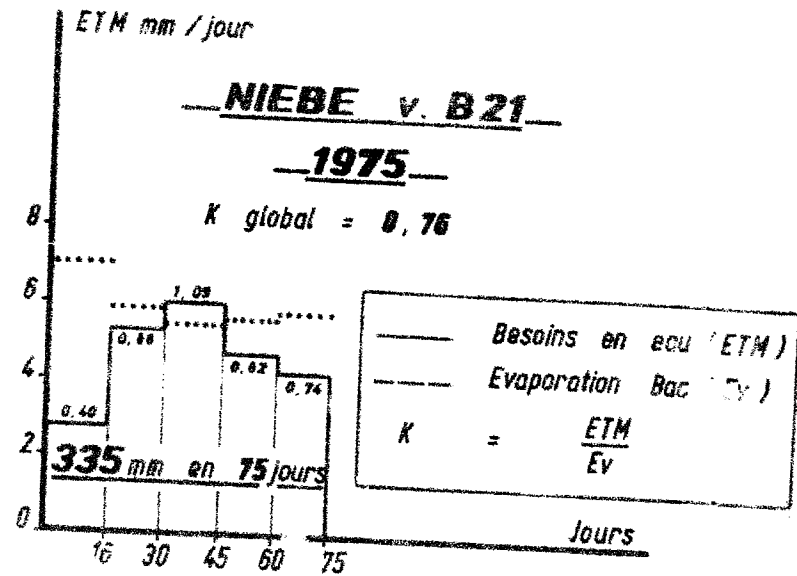
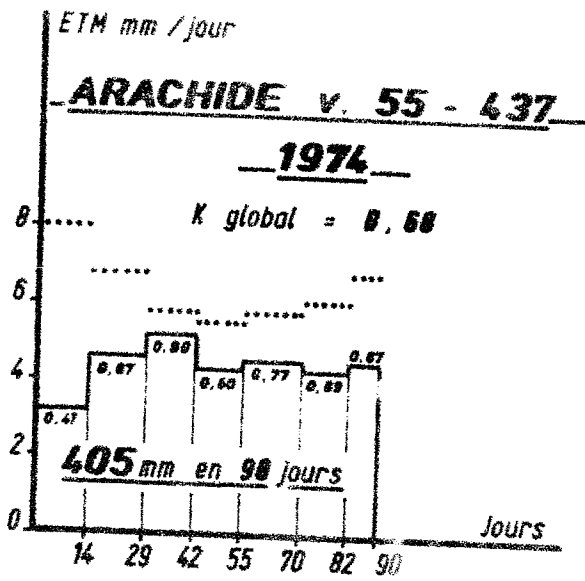
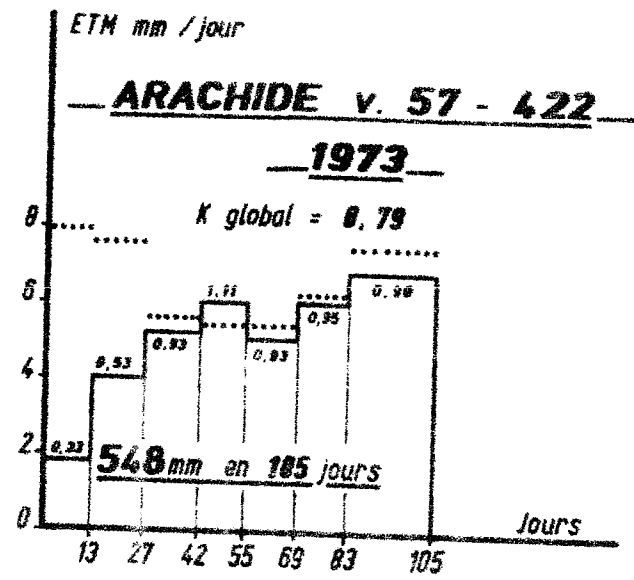
Les besoins en eau sont déterminés en faisant la somme des apports (irrigation + pluie).

La méthode est pratique en saison sèche ou en saison des pluies très déficitaire ; elle l'est beaucoup moins, lorsque des pluies abondantes viennent perturber la bonne maîtrise des irrigations ; il est difficile de savoir à quel niveau des réserves on se situe avant une grosse pluie, par rapport à la capacité au champ, et donc de chiffrer le risque de percolation. Les besoins de la culture peuvent ainsi être surestimés en cas de pluies excessives, et on est ramené aux problèmes exposés précédemment.

Il est important de préciser le nombre de répétitions qu'il faut adopter pour mesurer avec une précision suffisante les besoins en eau, compte tenu de l'hétérogénéité des sols, de la culture elle-même, et des apports (pluie, irrigation). Au cours d'une étude systématique du dispositif expérimental de Bambey, l'homogénéité des bilans de consommation hydrique et de la production de matière sèche, a été testée sur une culture de mil engrais vert, avec 16 parcelles ; 3 répétitions permettaient d'obtenir des coefficients de variation inférieurs aux 10 % que l'on s'était fixé comme objectif de précision. Dans la pratique 4 répétitions ont été adoptées, mais on a vu plus haut les conditions naturelles et les précautions impératives nécessaires. Moyennant quoi, les résultats de Bambey ont été satisfaisants pour les mils, arachides et niébés testés. Par contre, pour le sorgho, mal adapté au sol très sableux de dispositif, et malgré de gros apports de fumier, l'hétérogénéité des résultats a été telle, que la détermination des besoins hydriques serait à reprendre sur un autre type de sol plus argileux.

Principaux résultats obtenus (graphique n° 9)

Les résultats obtenus par l'IRAT dans les stations expérimentales d'hydraulique agricole du Niger (Tarna) et de Haute Volta (Mogtédo) sont très

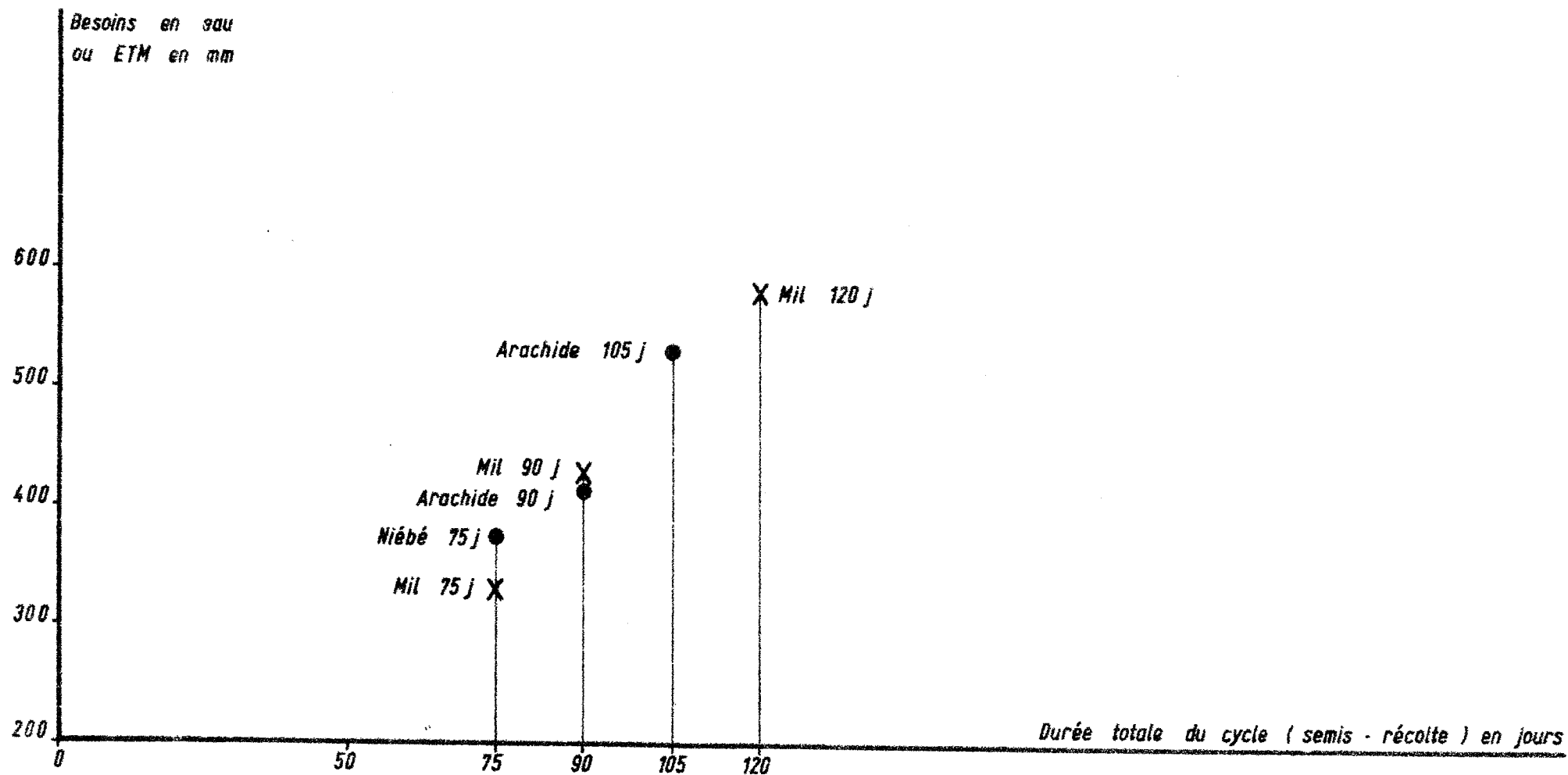


BESOINS EN EAU DES PRINCIPALES CULTURES SENEGALAISES MESURES AU C. N. R. A. DE BAMBEY
 (I. S. R. A.)

intéressants pour les cultures maraichères et irriguées. Pour les grandes cultures pluviales, les résultats sont plus récents (travaux de l'ISRA Sénégal et de l'INRAN Niger). De même les résultats obtenus par T.M. DUC sur la ferme irriguée de Bambey sont à mentionner (coton, mil, arachide arrosés en complément des pluies et cultures maraichères de saison sèche) ; les cultures fourragères commencent aussi à être systématiquement étudiées au Sénégal par le Centre National de Recherches Zootechniques. (I.S.R.A.). Les renseignements obtenus portant souvent sur ces points importants : type de culture, pluviométrie et doses d'irrigation, évaporation Bac (demande évaporative), ETM aux différents stades de végétation, coefficients de culture $K = \frac{ETM}{Ev \text{ bac}}$, rendements en grain et en paille, valorisation de l'eau effectivement consommée pour produire du grain ou de la paille. Sans entrer dans les détails, signalons seulement qu'au Niger (KALMS et VALET 1975) les besoins en eau des cultures pluviales ont été mesurés à de très hauts niveaux de demande évaporative (9.5mm/jour d'évaporation bac au lieu de 6.5 mm/jour à Bambey, ce qui est déjà assez élevé...). Ce fait a des répercussions sur les fortes valeurs d'ETM mesurées au Niger bien sûr, et aussi semble-t-il sur les durées de cycle (en général plus longues au Niger), sur les rendements et sur l'efficacité de l'eau (plus bas au Niger) et enfin sur les coefficients de culture $\frac{ETM}{Ev \text{ Bac}}$ plus bas au Niger). Cependant, il serait hasardeux d'attribuer toutes les différences observées, aux niveaux de demande évaporative respectifs (Tableau n°1). Des différences de températures extrêmes, de degré d'amélioration et d'adaptation des variétés, de formules de fumure choisies, rendent délicates les comparaisons faites entre ces situations géographiques très éloignées.

Les résultats et applications portant sur les besoins en eau des grandes cultures pluviales, ont fait au Sénégal l'objet de deux notes (DANCETTE 1973 et 1976). Il est important de noter que les besoins en eau des cultures varient essentiellement avec la longueur de leur cycle végétatif. Si on ramène les résultats présentés dans le graphique n° 9, à une même demande évaporative (moyenne des saisons des pluies 1972 à 1976), les valeurs de besoins en eau suivantes sont obtenues pour le secteur de Bambey (graphique n° 10)

<u>céréales</u>		<u>Légumineuses</u>	
mil sano de 120 jours = 583 mm	!	Arachide 57.422 de 105 j = 528 mm	
mil souna de 90 jours = 422 mm	!	Arachide 55.437 de 90 j = 411 mm	
mil GAM de 75 jours = 327 mm	!	Niébé 8 21 de 75 j = 373 mm	



LES BESOINS EN EAU DES CULTURES AU SENEGAL SONT PROPORTIONNELS A LA LONGUEUR
DU CYCLE DE VEGETATION

Graphique n° 10

	Mil		Arachide	
	Niger P3 Kolo (100 jours)	Sénégal Souna 3 (90 jours)	Niger V.55.437	Sénégal V. 55.437 (90)
Durée culture en jours	104	90	109	90
Ev Bac mm/j	9.7	6.2	9.5	6.3
ETM mm/j	6.1	4.6	5.3	4.5
$K = \frac{ETM}{Ev\ Bac}$	0,63	0.74	0.56	0.72
Rdt grain T/Ha	2.23	2.80 grain à 0 % d'H°	2.13	2.77 grain à 0 % d'H°
mm/T grain	280	150	290	146
Rdt paille T/Ha	9.00	7.0		3.3
mm/T paille	70	59		121

Comparaison de résultats obtenus au Niger par l'I.N.R.A.N (Tillabéri),
et au Sénégal par l'I.S.R.A. (Bamboey)

Tableau n° 1

Les coefficients de végétation $K = \frac{ETM}{Ev\ Bac}$, varient entre 0,66 et 0,79 (0,73 en gros) avec bien sûr des variations au cours du cycle, compte tenu du taux de recouvrement du sol nu par la culture, des stades de croissance et de développement, du vieillissement plus ou moins accusé en fin de campagne (les coefficients K sont indiqués dans le graphique n° 9, au sommet de chaque batonnet chiffrant l'ETM au cours du cycle. Ce coefficient global de 0,73, correspond en termes d'ETM à 0,94 environ. En effet, Ev Bac peut être traduit en ETP gazon à partir du rapport établi pendant la saison des pluies au Sénégal : ETP gazon : 0,78 Evaporation Bac normalisé classe A, installé sur un sol nu non arrosé.

Pour le mil, les ETM rapportés à une même demande évaporative, et en moyenne journalière pendant la durée de leur cycle, vont de 4,9 mm/jour pour le mil de 120 jours (très élevé et dépassant 3 m) à 4,7 mm/jour pour le mil de 90 jours (dépassant 2 m) et à 4,4 mm/jour pour le mil nain de 75 jours (taille voisine de 1,2 m) ; de même, les coefficients K vont respectivement de 0,75 à 0,74 et 0,66 ; cette diminution serait en rapport avec la taille de la plante et non avec sa productivité de paille qui est identique pour les mils de 90 et de 75 jours. Malgré les précautions prises pour réduire les advections d'énergie, en travaillant au sein de grandes parcelles, et malgré la bonne couverture et l'homogénéité des parcelles, ces questions de taille et de plus ou moins grande vigueur des plantes, demanderaient à être étudiées de plus près à l'avenir, en vue d'une meilleure économie et efficacité de l'eau.

Le tableau n° 2 résume quelques résultats concernant les rendements en grain et en matière sèche aérienne totale, et la valorisation de l'eau effectivement consommée.

Généralisation des mesures

La méthode adoptée au Sénégal, consiste à avoir une station centrale bien équipée pour la mesure des besoins en eau, et d'autres sur lesquelles on a seulement une estimation de la demande évaporative (Ev Bac). En faisant l'hypothèse en général valable pour une même zone climatique que les coefficients de culture $\frac{ETM}{Ev\ Bac}$ ne sont guère variables d'un lieu à l'autre et d'une année à l'autre, pour une même période du cycle, les résultats obtenus localement peuvent être généralisés et appliqués à l'ensemble de la zone. La première tentative de généralisation géographique à l'échelle de la moitié Nord du Pays, a été faite en utilisant dans un premier stade, une carte d'ETP encore très imparfaite, ce qui a permis d'affecter à chaque station un coefficient exprimant la demande évaporative par rapport à Bambey, sur une période de 45 ans (DANCETTE 1975). Dans un second stade, les travaux de DANCETTE, HALL et VASIC, 1977, permettant d'avoir une idée assez sûre de la demande évaporative (Ev Bac), pour tout le Pays et pour les années de sécheresse de 1971 à 1976

CULTURE	Pluie (P) et irriga- tion (i) en mm	Besoin en eau (ETM) en mm	Rendements en T/Ha		Valorisation de l'eau consommée en mm/Tonde		K = ETM Ev Bac
			Grain sec	M.S. aé- rienne (grain com- pris)	Grain	MS totale (aérienne)	
Mil Sanio de 120 jours en 1976	p = 399 i = 215	562	1.88	16.67	299	34	0.75
Mil Souna de 90 jours en 1974	p = 492 i = 73	416	2.79	9.76	149	43	0.74
Mil GAM de 75 jours en 1974	p = 447 i = 51	320	1.96	9.37	163	34	0.66
Arachide v.57422 105 jours en 1973	p = 400 i = 182	548	2.64	8.06	208	68	0.79
Arachide v.55.437 de 90 jours en 1974	p = 492 i = 72	405	2.05	5.39	199	75	0.68
Niébé B.21 de 75 jours en 1975	p = 535 i = 20	335	1,32	4.72	254	71	0.76

Tableau n° 2 : Principaux résultats obtenus au C.N.R.A de Bambo
sur les besoins en eau des principales cultures

(graphique n° 6). Ultérieurement, ce travail sera fait pour une période plus longue incluant des années à pluviométrie normale et excédentaire.

Pour une même station, la demande évaporative peut varier d'une année à l'autre. Pour des travaux de dégrossissage, on peut estimer que ces variations ne dépassent guère 10 % et que l'utilisation de la moyenne suffit. Par contre, pour des travaux plus fins, il faudrait tenir compte de ces variations. Ainsi à Bamby, les besoins en eau du mil ont été chiffrés à 3 niveaux de demande évaporative : faible, moyenne et forte : tableau n° 3 et graphique n° 11.

A l'échelle de la zone soudano sahélienne, les différences constatées plus haut à propos du mil et de l'arachide testés à Bamby sous une demande évaporative moyenne de 6.3 mm/jour (Ev Bac) et à Tillabéry (Niger) sous une demande de 9.6 mm/jour, nous incitent à être prudents quant à la généralisation des résultats d'ETM à partir de coefficients de végétation identiques. Les résultats concernant les coefficients de végétation des cultures maraichères de saison sèche du Niger (Tarna) de la Haute Volta (Mogtédou) et du Sénégal (Bamby) étaient plus homogènes et plus encourageants que ceux obtenus pour les grandes cultures de saison des pluies. Ce problème devra être approfondi, en comparant tous les résultats de mesure d'ETM et d'évaporation Bac, obtenus en diverses situations sahélo soudanaises.

Variations de demande évaporative

(exprimée par l'évaporation d'eau libre en bac normalisé classe A) à Bambey
d'une année à l'autre, pendant des périodes de culture de 75, 90, 105 et 120 j.
suivant la première pluie utile

Année	1972	1973	1974	1975	1976	Moyenne
Période						
75 jours	550 (1,13)	486 (1,00)	477 (0,98)	438 (0,90)	489 (1,00)	488
90 jours	631 (1,10)	583 (1,02)	564 (0,99)	523 (0,91)	560 (0,98)	572
105 jours	722 (1,07)	702 (1,04)	695 (1,03)	620 (0,92)	648 (0,96)	677
120 jours	811 (1,04)	817 (1,05)	809 (1,04)	714 (0,91)	753 (0,96)	781
Date première pluie utile	5 Juin	12 Juillet	12 Juillet	17 Juillet	13 Juillet	

Tableau n° 3

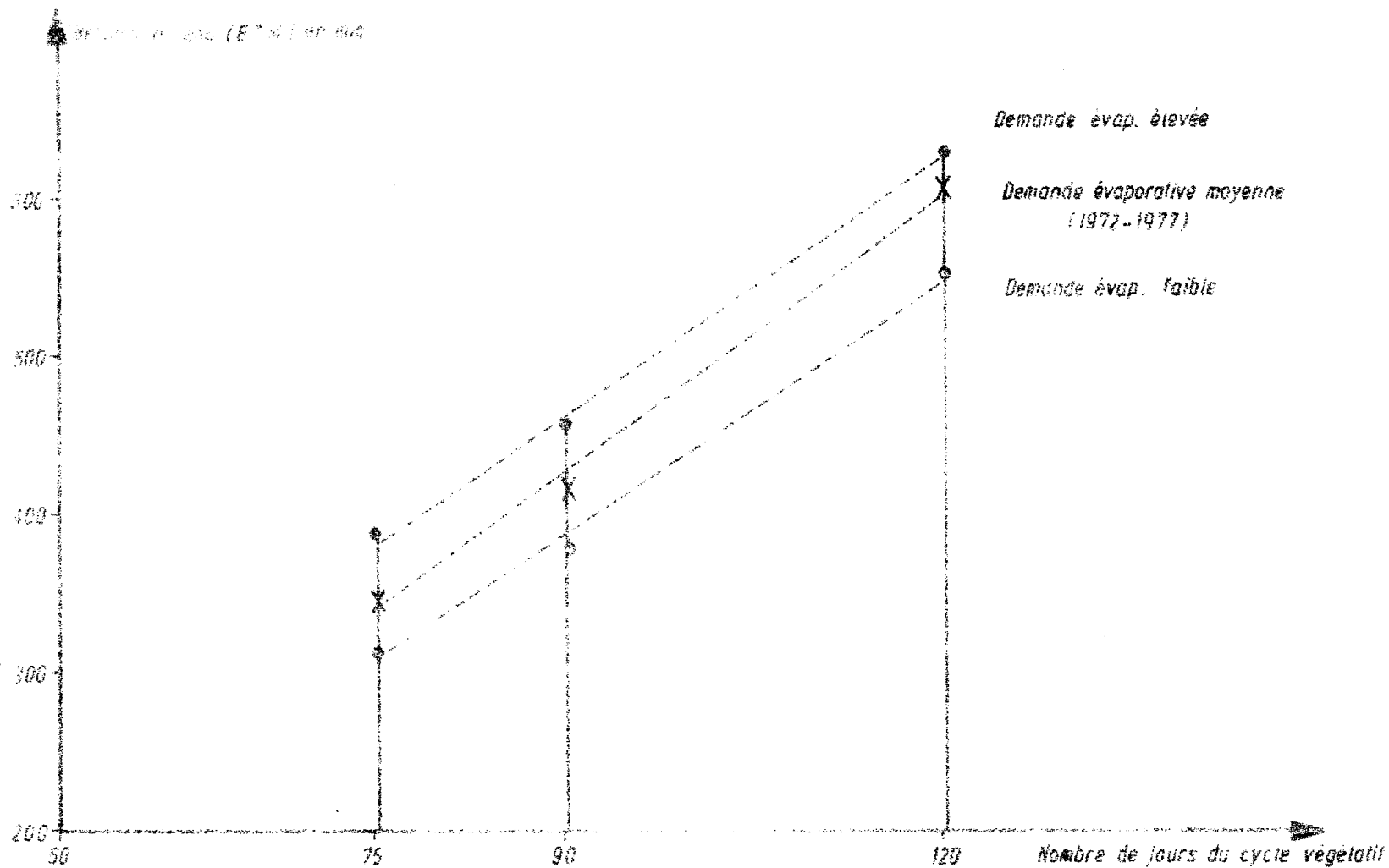
- Evaporation en mm/jour

- Le chiffre entre parenthèses est le rapport entre l'évaporation de la saison considérée et celle de la moyenne sur 5 années.

Utilisation pratique : Les besoins en eau du mil Souna de 90 jours, mesurés en 1974 s'élèvent à 416 mm ; pour une année de demande évaporative moyenne (1972 à 1976), ils s'élèveront à = $\frac{416 \times 572}{564} = 422$ mm

pour une année de demande évaporative faible (1975), ils s'élèveront à = $\frac{416 \times 523}{564} = 386$ mm

et pour une année de forte demande évaporative (1972) ; ils s'élèveront à = $\frac{416 \times 631}{564} = 465$ mm



VARIATIONS DES BESOINS EN EAU GLOBAUX DU MIL EN FONCTION DE LA DUREE DU CYCLE

VEGETATIF ET DE LA DEMANDE EVAPORATIVE

CNRA BAMBEY

GRAPHIQUE N° 1

III - SAISON DES PLUIES UTILE POUR L'AGRICULTURE

- Les précipitations ne sont pas considérées par l'agroclimatologiste comme des données météorologiques brutes, mais sont étudiées au sein d'un complexe sol-plante, ou plutôt homme-sol-plante. Il importe en effet de savoir lorsqu'il tombe une quantité de pluie donnée, quel volume d'eau sera retenu dans le sol, quelle profondeur de sol sera humectée, quelle quantité sera vraiment disponible pour satisfaire les besoins de la plante, si le cultivateur pourra ou non utiliser cette pluie pour semer, ou pour travailler son sol, ou si au contraire elle l'empêchera de pénétrer sur ses terres etc... A ce stade utilitariste, il convient de se méfier de la notion classique de moyenne, et peut-être même de s'en débarrasser. Ce qui intéresse le cultivateur, c'est de chiffrer les chances de réussite d'une intervention, d'une technique précise, d'une culture en général. Libre à chacun de choisir le seuil de réussite (ou de risque) qui lui convient. En ce qui nous concerne, nous avons souvent retenu en zone semi aride, un seuil de 80 % de chances de succès, compte tenu du caractère aléatoire des pluies et de l'impératif d'obtenir une plus grande sécurité de la production. Pratiquement, dans les analyses agropluviométriques, les conclusions et les choix conseillés, seront basés le plus fréquemment sur des seuils à 80 % de chances pour que par exemple :

- . on puisse risquer un semis d'arachide après une pluie de x mm survenant le jour j, sans affronter de sécheresse trop grave et sans être obligé de recommencer le semis.

- . les besoins en eau d'une variété précise soient satisfaits pendant une période donnée.

- . la durée de cycle de cette variété soit inférieure ou égale à la durée effective de la saison des pluies utile etc...

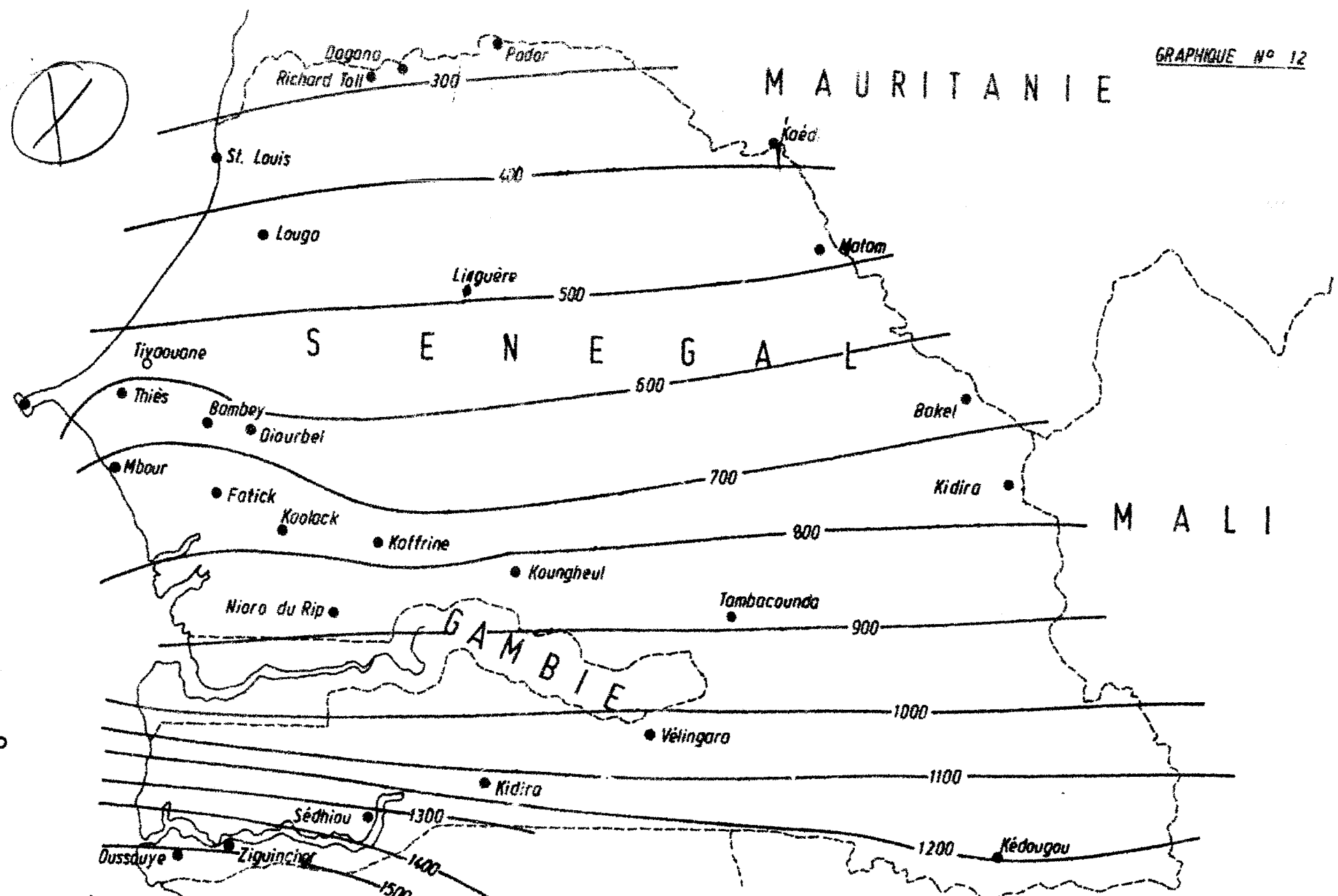
Sur les cartes (graphiques n° 12 et 13) qui montrent la répartition de la pluviométrie au Sénégal, on peut voir les modifications qu'apporte le fait de retenir un seuil de 80 % de probabilité, plutôt que la moyenne.

Notion de pluie utile

- . Certains critères doivent être parfaitement précisés par type de culture, avant de définir ce qu'est une pluie utile. Ainsi, pour une culture de mil semée en sol sec à partir d'une date choisie, la première pluie utile pour faire débuter la culture, devra être suffisante pour faire germer et lever les graines (6 mm par exemple). Mais elle devra être suivie d'autres pluies, sinon il faudra refaire les semis, d'où la nécessité d'estimer les conditions de survie de la jeune culture :

par exemple, elle aura besoin de 1,5 mm par jour, pendant les 20 premiers jours... de 3,0 mm/jour, pendant les 10 jours suivants etc...

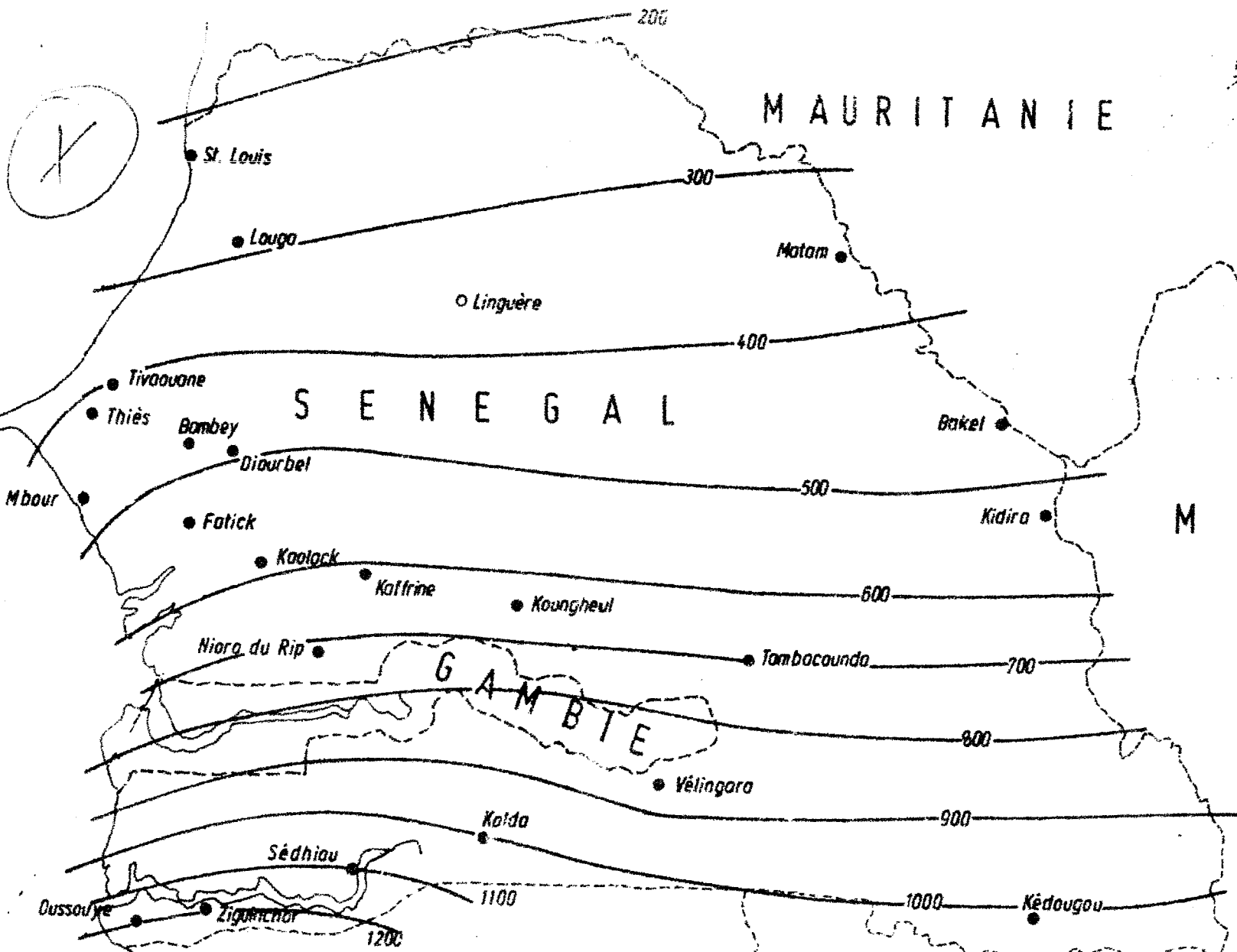
O C E A N
A T L A N T I Q U E



Pluviométrie moyenne en mm, de Juin à Octobre compris, au Sénégal (période 1931-1975) —

-Calculs effectués à partir des données brutes de la météorologie nationale=listing "Hydrologie ORSTOM"

ATLANTIQUE
OCEAN



Pluviométrie en mm, de Juin à Octobre compris, atteinte ou dépassée dans plus de 80% des cas au Sénégal période 1931-1975

- Calculs effectués à partir des données brutes de la météorologie nationale = listing "Hydrologie ORSTOM"

Ces conditions de survie ne correspondent pas bien sûr aux besoins optimaux de la plante pendant le 1er mois, mais elles lui permettent "d'attendre des jours meilleurs" sans que les rendements finaux soient affectés. La première pluie utile, jugée favorable par l'agriculteur, pour semer son arachide ou son sorgho dans un sol humide, répondra à des critères différents ; il faudra par exemple des pluies supérieures ou égales à 30 mm pour des pluies précoces (1 au 10 Juin à Nioro du Rip), 20 mm pour des pluies normales (entre le 10^{Juin} et le 15 Juillet), 15 mm pour les pluies tardives (après le 15 Juillet). Plus la saison des pluies est en retard, plus l'agriculteur est amené à prendre de risques, compte tenu de la probabilité accrue pour que la saison s'installe enfin. Une première pluie utile pour faire des labours de préparation, répondra à des critères particuliers : x mm mouillant le sol jusqu'à n cm et permettant de labourer un sol favorable pendant y jours, connaissant les pertes moyennes journalières d'évaporation du sol nu. Pour plus de détails sur les critères à retenir, on pourra se référer à des travaux portant sur l'adaptation du mil dans la moitié Nord du Sénégal et sur l'analyse agropluviométrique de la station de Nioro du Rip (DANCETTE 1975 et DANCETTE et SOW 1976).

La fin de la saison des pluies utile est une donnée nécessaire pour préciser la durée souhaitable des cycles végétatifs à adopter. Ce n'est pas forcément, et même rarement la date de la dernière pluie. Il faut en effet considérer la réserve d'eau utile du sol, à la date de cette dernière pluie :

. soit la réserve hydrique est épuisée depuis longtemps : la culture est déjà récoltée, ou déjà morte ; cette dernière pluie n'est donc pas "utile" pour la culture (mais peut être pour un travail du sol)

. soit la culture est encore bien vivante, et elle pourra bénéficier d'une réserve antérieure de sol (Q) à laquelle s'ajoute, cette dernière pluie elle-même (p), pendant un nombre de jours N qui sera égal à :

$$N = \frac{Q + p}{\text{ETM}} ; \text{ETM en mm/jour, correspond aux besoins en eau de la}$$

ETM
 plante à ce stade de végétation ; P et Q sont exprimés en mm. La véritable date de la fin de la saison des pluies utile, sera donc en définitive celle de la dernière pluie utile, augmentée de la durée d'utilisation des réserves en eau du sol. Pour diverses raisons tenant à la nature des sols sableux et à celle de l'enracinement des cultures pratiquées, on estime que la capacité de stockage de l'eau par le sol, plafonne à 100 mm : il s'agit d'une base de départ, qu'il conviendra d'affiner par la suite par une meilleure caractérisation hydrique des sols et des systèmes racinaires. Là encore, à des fins d'adaptation des durées de cycle ou des techniques de culture, c'est la probabilité de durée de la saison des pluies égale ou dépassée au seuil de 30 % qui nous intéresse.

La pluviométrie suffisante pour satisfaire les besoins hydriques de la culture est aussi très importante à considérer. Il faut savoir s'il existe ou non, antérieurement à une séquence pluvieuse, des réserves en eau du sol, utilisables elles aussi par la culture et qui se rajoutent à la pluviométrie. Pour savoir si une période de sécheresse ou de faible pluviométrie, est critique pour la culture ou pas, il faudra tenir compte de ces réserves, de la pluie pendant la période de sécheresse, et des besoins en eau de la culture ; on observe dans la pratique que si ces besoins en eau ne sont satisfaits qu'à 80 % environ, la production ne s'en ressent pratiquement pas.

Exemple : une culture de mil en épiaison, a une ETM de 6 mm/jour (tolérance à 80 % = 4,8 mm).

Survient une sécheresse de 20 jours, avec seulement 10 mm de pluie le 4ème jour. On estime que le stock d'eau de départ (qui correspond à un excédent antérieur $9 - ETM$) est de 35 mm.

La plante dispose donc de $35 + 10 = 45$ mm, qui seront consommés en $\frac{45}{4,8} = 9$ jours environ. Une telle sécheresse risque fort d'être fatale, et dans une étude a posteriori des saisons des pluies, on aurait retenu que cette saison là aurait été impropre à la culture, sur le plan hydrique.

L'idéal, pour savoir si la pluviométrie est favorable à une culture, est de faire le bilan hydrique complet au fur et à mesure de la saison, connaissant jour après jour, ou sur période de 5, 10 jours ou plus (mais des périodes trop longues risquent de donner une idée fautive de la situation exacte) : les pluies, les besoins en eau (avec un seuil de tolérance), la capacité d'emménagement de l'eau dans le sol pour une profondeur d'enracinement donnée (évolution au cours du cycle).

Dans le domaine de l'utilisation systématique du bilan hydrique en Afrique soudano-sahélienne occidentale, il convient de citer entre autres les travaux de l'ORSTOM (GRUNET-ROBERT, ROCHE, SIRCOULON et FRANQUIN) et du C.I.E.H. (FOREST 74). Quant à l'analyse agro-pluviométrique, elle a été assez poussée au Sénégal : Aménagement de l'assolement 1967, IRAT 1966, ISRA (1975 et 1976), FAO-OMVS (RIJKS 1972).

Au départ, ces travaux ont été réalisés sans l'aide de l'ordinateur et à partir d'hypothèses simplificatrices portant sur les besoins en eau des plantes, sur les réserves hydriques et sur les profondeurs d'enracinement. Ainsi FOREST propose à l'utilisateur des cahiers opérationnels de bilan hydrique, permettant de savoir au fur et à mesure qu'avance la saison des pluies,

comment se situe la campagne agricole sur le plan de l'alimentation hydrique et comment elle peut évoluer. La méthode utilisée à l'ISRA, consiste à étudier rétrospectivement pour toutes les stations disposant d'une longue période pluviométrique (données journalières), et pour une culture bien connue, chaque saison des pluies utile. D'après les critères définis plus haut, on détermine la première pluie utile, la dernière pluie utile, la date de fin d'utilisation des réserves, les sécheresses de milieu de cycle et leur gravité ; on en déduit des fréquences pour la période (en général plus de 40 ans). On calcule aussi les durées de saison des pluies utile moyennes, et celles égales ou dépassées dans 80 % des cas, de même que les pluviométries pendant la saison des pluies utile (moyenne et à 80 %).

Le même travail peut être fait pour les pluviométries pendant des périodes de 75, 90, 105, 120 jours etc... correspondant à des longueurs de cycle végétatif des principales variétés.

Ce travail, long et fastidieux, doit pouvoir être facilité par l'utilisation de l'ordinateur, à partir du moment où toutes les pluies quotidiennes sont fichées et où tous les critères d'analyse mentionnés plus haut sont explicités et chiffrés. Les chercheurs de l'Université de Californie-Riverside (HALL dans ce volume) et ceux de l'ISRA - Sénégal, collaborent actuellement dans ce sens. De même, la collaboration des chercheurs de l'Institut de Mécanique de Grenoble (ROYER et VACHAUD 1974), avec l'IRAT et avec l'ISRA, est-elle précieuse pour la modélisation du bilan hydrique dans les sols sableux de la zone sahélo-soudanienne. Un modèle de bilan hydrique a été testé au Sénégal à partir des résultats obtenus in situ au CNRA de Bambey (HALL 1977 et JURY, dans ce volume). L'étape ultérieure consisterait à l'adapter aux analyses appliquées de la saison des pluies utile (= durée de la saison, taux de satisfaction des besoins, chances de réussite des cultures etc...).

Par ailleurs, l'ISRA et la Division de la Météorologie Nationale du Sénégal, étudient les possibilités nouvelles que leur ouvrent d'une part le listing pluviométrique détaillé et complet (jour par jour) de l'ORSTOM et d'autre part l'analyse fréquentielle effectuée par le service Hydrologique de l'ORSTOM (BRUNET-MORET et ROCHE, 1974). Des découpages de 5, 10, 20, 30, 60, 75, 90, 105 et 120 jours (les derniers peuvent correspondre exactement à des durées de cycle) sont analysés à partir d'une origine fixée, et peuvent glisser de 5 jours en 5 jours à partir de cette origine (par exemple le 1er Mai dans la zone soudano-sahélienne occidentale). Les quantités de pluie espérées à 17 seuils de probabilité étalés entre 0 et 100 %, pendant une durée déterminée et à partir d'une date voulue, sont fournies par l'analyse.

C - EXEMPLES D'APPLICATION A L'AGRICULTURE SENEGALAISE

I - CHOIX CONCERNANT LES TECHNIQUES DE CULTURE

Une des interventions culturales les plus importantes est le semis, à propos duquel des questions comme celles-ci peuvent être posées à l'agroclimatologiste :

- si on sème en sol sec, à partir de telle date, quelles sont les chances de succès ; c'est-à-dire, combien de fois sur cent faudra-t-il recommencer le semis ?

- Quels sont les risques courus en semant en sol humide sur une pluie très précoce ?

- Faut-il semer sur la première pluie ? ou peut-on attendre la deuxième ? etc...

L'analyse quotidienne des pluies de début de saison, sur une longue série d'observations, et la connaissance des exigences hydriques des cultures en début de cycle, permettent de répondre rapidement et simplement à ces questions.

Pour la station de Nioro-du-Rip (DANCETTE 1976) nous avons pu montrer par exemple qu'il aurait fallu refaire un semis en sec réalisé à la date du 5 Juin, 12 années sur 44 (27 %) ; dans 18 % des cas il aurait fallu le refaire une fois et dans 9 % des cas, deux fois. Ceci pourrait être fait systématiquement pour toutes les stations du pays, en considérant éventuellement d'autres dates que le 5 Juin. Ceci est très important, car un semis réalisé en sec avant la pluie, permet d'économiser un temps précieux pour le jour de la première pluie utile. Le temps ainsi gagné sera mieux valorisé en semant rapidement une autre culture de rente comme l'arachide, pour laquelle le risque de semer en sec n'est pas pris (on pourrait calculer exactement ce risque!.)

Au cours d'une saison des pluies très tardive et déficitaire, un Préfet a posé la question suivante : Les paysans qui attendent leur première pluie de semis pour l'arachide ont-ils encore intérêt à semer s'il pleut à une date aussi tardive que le 20 Août, dans un secteur proche de Louga (Sénégal) ? L'analyse pluviométrique montrait rapidement que sur une période de 45 ans, la décision de semer aurait été bénéfique dans 2 % des cas seulement.

Un autre problème est celui de la décision de semer sur une pluie très précoce. C'était le cas d'une pluie de 48 mm, le 7 Juin 1972 à Sambey ; connaissant les exigences hydriques de la culture d'arachide et les résultats de l'analyse de fréquence et de probabilité des pluies de l'ORSTOM, on voyait que la plante pouvait survivre 24 jours ($\frac{48}{2 \text{ mm/j}}$) ; puis il n'y avait plus que 45 % de chances que ses besoins en eau soient satisfaits par la pluviométrie espérée. La recherche, à juste titre, n'a pas pris (ni conseillé de prendre) le risque de semer, alors que l'on se situait à un mois de la date moyenne de début de la saison des pluies.

En général, dans les zones marginales, l'agriculteur profite toujours de la première pluie pour semer ; il bénéficie ainsi d'un rayonnement global plus élevé, d'un pic de minéralisation de l'azote important, de plus grandes chances de voir sa culture boucler son cycle. Cependant, avec des variétés nouvelles de cycle plus court et des fertilisations minérales appropriées, et en descendant plus vers le Sud, on peut se demander si on ne pourrait pas labourer après la première pluie et ne semer qu'après la seconde. Dans le cas de Nioro-du-Rip, l'analyse montrait qu'en adoptant cette dernière solution, il fallait abandonner les variétés de 120 jours et choisir des variétés de 105 à 110 jours au maximum, pour s'assurer au moins les 80 % de chances de succès.

Les probabilités de pluies trop précoces, intéressantes pour le labour et non pour le semis, ou encore de pluies trop tardives survenant lorsque la culture est morte ou récoltée (utiles pour le labour, mais dangereuses pour les récoltes stockées en plein air) peuvent aussi être analysées : la question concernant les risques encourus par les stocks d'arachide ou de mil en plein air, a été posée récemment par les responsables sénégalais et peut mettre en jeu de grosses dépenses pour la protection des stocks. Toujours pour le labour dont les avantages ont été démontrés par CHARREAU et NICOU (1971; 1977) et CHOPART (1976), dans les sols sableux du Sénégal, la possibilité de le réaliser en fin de saison des pluies, après des mils de 75 ou 90 jours, a été chiffrée pour la moitié Nord du Sénégal (DANCETTE 1975).

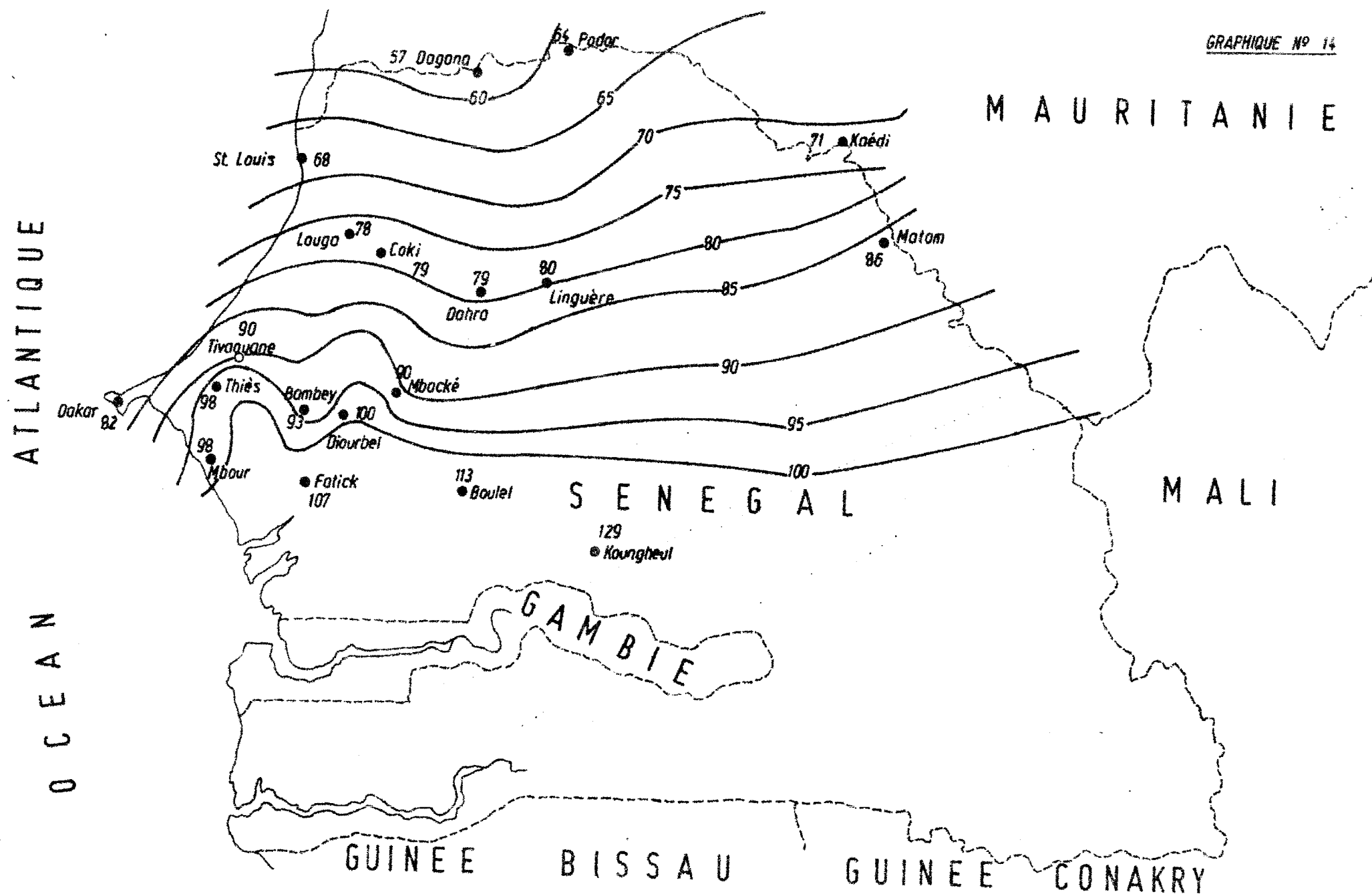
En précisant les critères de réalisation d'un labour en sol humide, il devient même possible de chiffrer le nombre de jours pendant lequel on peut l'effectuer (DANCETTE 1975 p. 14 et 1976 p. 8 et 16 à 18).

L'analyse agropluviométrique est très utile pour recourir à l'irrigation en complément des pluies. Elle permet de prévoir à divers seuils de probabilité, les volumes d'eau qu'il faudra apporter et donc d'en chiffrer le coût. Ceci est relativement aisé, connaissant le régime des pluies, les besoins en eau des cultures et le coût des investissements nécessaires (Travaux de T.M. DUC 1976 sur la ferme irriguée du CNRA de Bambey). Ainsi il s'avère à Bambey que les cultures de mil, arachide, coton, arrosées en complément des pluies, rentabilisent mal l'irrigation, en comparaison des cultures maraîchères de saison sèche ou même d'hivernage. Quant au gain de sécurité de production attendu, il concernerait davantage des zones de pluviométrie encore plus faible et irrégulière que celles de Bambey -Diourbel.

Enfin, il est évident que la confrontation des disponibilités pluviométriques et des besoins hydriques des cultures, permet de juger l'importance qu'il faut accorder par zone, aux diverses techniques de cultures, dite "sèche" : sarclo-binages, mulch, essais de densité et d'écartement entre les lignes, jachère nue totale ou partielle etc... (DANCETTE, MAUBOUSSIN, NICOU et TOURTE 1974, NICOU 1977, HALL 1977).

II - CHOIX CONCERNANT LA SELECTION DES PLANTES

Il s'agit peut-être du domaine où la collaboration entre l'agroclimatologiste et le sélectionneur est la plus profitable. La sélection est en effet, plus encore que la mise au point de techniques culturales, l'outil le plus puissant que possèdent les agronomes pour intervenir sur l'économie agricole de l'eau. Nous avons vu plus haut que les besoins en eau variaient considérablement pour une même situation géographique, avec la durée du cycle végétatif. A partir des études de saison des pluies utiles, les durées de cycle à envisager par grande zone pluviométrique peuvent être déterminées. Ce travail a été entrepris pour les mils à cycle court destinés à la moitié Nord du Sénégal (DANCETTE 1975). La carte du graphique n° 14 permet d'avoir une idée des durées de cycle vers lesquelles il faut tendre (adaptation des variétés existantes, création de nouvelles variétés répondant aux besoins formulés, délimitation de leurs aires de vulgarisation). Faire dans l'optique des mils à cycle court semés en sec, cette analyse peut être faite pour d'autres spéculations agricoles. La gamme complète des mils, de 60 jours à 120 jours, pourrait être testée pour tout le Sénégal : les besoins en eau des variétés de 120 jours sont à l'étude, et les travaux du groupe d'amélioration des mils de l'Institut sénégalais de Recherches agricoles (ISRA 1975) pourraient aussi déboucher sur des variétés de 60 jours intéressantes pour les zones d'agriculture marginale. L'étude des durées de cycle à adopter devrait



Durée en jours de l'hivernage utile au Sénégal, atteinte ou dépassée dans 80% des cas

être faite pour de nombreuses autres cultures (riz pluvial, sorgho, arachide, niébé, maïs...), mais elle est longue et nécessite l'analyse pluie par pluie de "2000 années-station" pour une seule culture à l'échelle du Sénégal ; elle sera donc très facilitée par la mise au point de programmes d'analyse sur ordinateur.

A partir de l'examen des durées de saison des pluies utile et du taux de satisfaction des besoins en eau de la culture (mois par mois dans un premier stade, puis pour des durées de plus en plus courtes) il devient possible de chiffrer les chances de réussite d'une variété cultivée, du point de vue hydrique. Ceci, nous l'avons vu, a été tenté pour les mils de 90 et de 75 jours et a permis d'esquisser deux cartes de probabilité de bonne alimentation hydrique. Celle du graphique n° 15 concerne les chances de réussite en pourcentages, du mil de 75 jours ; en comparant les lignes tracées au seuil de 80 % de chances de succès, pour ces 2 variétés, le gain de sécurité obtenu en adoptant la variété de 75 jours, plutôt que celle de 90 jours, est mis en évidence. La modélisation du bilan hydrique (même approximatif dans un premier stade) et des mesures de besoins en eau plus nombreuses, faciliteront grandement l'élaboration de ces cartes d'adaptation pour les principales cultures.

III - CHOIX CONCERNANT UNE GESTION NATIONALE DE L'EAU EN AGRICULTURE

Les travaux effectués en zone semi-aride montrent que, dans l'ordre décroissant des besoins en eau, les couverts du sol peuvent se classer ainsi :

- 1 - Jachères d'herbe (et parmi elles, les friches, zones de défens, pâturages naturels) : pour une jachère d'herbe, ou pour une culture fourragère de 120 jours, compter : 620 mm à Bambeï
- 2 - Cultures de cycle long, comme le mil sanio de 120 jours : 560 mm à Bambeï.
- 3 - Cultures de cycle court, comme les mils et arachides de 90 jours : 420 mm à Bambeï
- 4 - Cultures de cycle très court, comme les mils ou les niébés de 75 jours : 320 mm à Bambeï
- 5 - Evaporation réelle moyenne d'un sol nu, en saison des pluies : 200 mm à Bambeï

Il est évident qu'une mise en culture rationnelle d'une grande partie du territoire, peut constituer un moyen très efficace de gérer les ressources pluviométriques. A titre indicatif, et très schématiquement, pour une

pluviométrie moyenne de 600 mm tombant sur des terres relativement planes et sableuses, la jachère d'herbe consommerait toute l'eau, la culture de 120 jours ne laisserait pratiquement rien (si l'on y rajoute une évaporation du sol nu en saison sèche voisine de 50 mm), la culture de 90 jours laisserait un reliquat de $600 - (420 + 70)$ soit 110 mm (ou 1100 m³ d'eau par hectare); la culture de 75 jours épargnerait $600 - (320 + 100)$ soit 180 mm et enfin un sol nu cultivé permettrait de réinjecter dans le sol $600 - 260 = 340$ mm ! Il ne s'agit pas d'une simple vue de l'esprit ; les expériences faites en sol cultivé ou nu à Bambey et les simulations de bilan hydrique (FOREST, HALL, déjà cités) confirment les chiffres avancés.

Sans aller jusqu'à préconiser de cultiver un sol nu pour recharger les nappes peu profondes, et puisque l'agriculture vivrière est le souci majeur, dans la zone considérée, les objectifs suivants peuvent être poursuivis :

1 - Satisfaction des besoins en eau des principales cultures, afin d'assurer régulièrement des rendements appréciables, (auto-consommation + revenu monétaire). Pour cela, les cultures sont choisies en fonction de leur longueur de cycle et de leur faible consommation hydrique.

2 - Obtention d'un excédent hydrique suffisant, égal à =
Pluie - Evapotranspiration de la culture - Evaporation du sol nu en saison sèche. Cet excédent hydrique doit permettre d'assurer :

a/ - la constitution d'une réserve hydrique de "sécurité" dans les 2 premiers mètres intéressant l'enracinement des cultures annuelles sarclées, et reportable, sur la saison des pluies suivante, ce qui permet de supporter des sécheresses éventuelles (résultats spectaculaires à Bambey en 1972 et 76..) une autre solution étudiée est au contraire celle de l'utilisation immédiate de cette réserve pour une production supplémentaire (culture "relais" ou "dérobée", repousse d'herbe pour le bétail etc...)

b/ - la reconstitution des réserves profondes pour l'alimentation hydrique des arbres

c/ - la recharge des nappes peu profondes (Continental Terminal, Lutétien dans le centre du Sénégal) vitales pour l'alimentation humaine et animale, et utilisables, éventuellement, pour remédier aux sécheresses exceptionnelles grâce à l'irrigation en complément des pluies; on peut assurer de plus un petit maraîchage de saison sèche très rentable (Ferme irriguée du CNRA de Bambey, DUC 1976).

Dans les zones très marginales du Nord-Sénégal (200 à 250 mm) il n'est pas exclu de tester une jachère nue totale, c'est-à-dire une année de sol nu travaillé pour stocker de l'eau et une année de culture appropriée qui aurait ainsi de meilleures chances de réussite. Une centaine de mm reportés d'une année sur l'autre permettrait de pallier les irrégularités des précipitations et d'assurer une meilleure satisfaction quantitative des besoins hydriques des cultures.

Dans une zone "insécure" sur le plan hydrique, comme celle de Louga (Sénégal), l'arachide de 90 jours, la seule de court cycle dont on dispose actuellement en vulgarisation, est mal adaptée aux conditions pluviométriques (en durée et en quantité), avec à peu près 60 % de chances de bon rendement. Si la culture précédant cette arachide est un mil de 75 jours au lieu de 90 jours, un excédent hydrique reportable sur l'année suivante en faveur de cette arachide mal adaptée, peut-être envisagé (travaux en cours).

Dans un pays comme le Sénégal, le rôle de l'arbre est reconnu comme primordial, dans le cadre de la lutte contre la sécheresse (réduction de l'évapotranspiration potentielle - SCHOCH 1966), contre la désertification (réduction de l'érosion éolienne notamment) et pour la conservation ou même l'amélioration du paysage rural (PELISSIER 1966, GIFFARD 1974) ; de plus, les autres usages de l'arbre sont innombrables et irremplaçables (bois, feuillages, fruits etc...) en milieu soudano-sahélien. Cependant, compte tenu du bilan hydrique évoqué plus haut, il conviendrait de mieux connaître les besoins hydriques des principales espèces (dont Acacia albida pour commencer), pour estimer la densité optimale qu'il faudrait respecter dans les cultures, tout en obtenant une productivité correcte de bois, de feuilles ou de fruits. Si l'on décide de privilégier l'arbre en certains secteurs, il faut se résoudre à le traiter comme une culture sarclée, ce qui revient à dire que toute la pluie reçue doit être consacrée aux arbres, pour leur assurer une productivité optimale ; toute concurrence hydrique devra leur être supprimée (autres cultures et adventices). Le meilleur allié de l'arbre sera donc le sol nu travaillé qui favorise l'infiltration des pluies et la rupture des films capillaires responsables de l'évaporation ; son pire ennemi sera par contre l'herbe.

Il faut être conscient de l'intérêt de certains paysages arborés traditionnels, (Sérères notamment) et ne les modifier qu'avec d'extrêmes précautions ; passer d'un peuplement arboré dispersé à un peuplement en ligne, implique par exemple que l'on respecte les densités locales traditionnelles, qui reflètent probablement d'assez près le passé agro-climatique de la zone.

On ne peut logiquement augmenter les densités d'arbres en paysage agricole, qu'en les remplaçant par des essences, encore plus économes en eau, ou en les associant à des cultures annuelles sarclées, de cycle court, et moins exigeantes en eau que les variétés traditionnelles de cycle long. L'idéal serait donc dans le futur, d'avoir tous les éléments permettant d'établir ce genre de bilan encore fictif;

On suppose un secteur recevant 650 mm de pluie en moyenne et disposant d'une nappe à 15 m. Les cultures pratiquées consomment en moyenne 400 mm d'eau, auxquels on rajoutera 50 mm d'évaporation sol nu en saison sèche. On mise sur une recharge moyenne de la nappe de 50 mm/an. Il restera donc en principe pour ~~des~~ arbres comme Acacia Albida :

$$650 - (400 + 50 + 50) = 150 \text{ mm ou encore } \underline{1.5 \times 10^6} \text{ litres/ha}$$

On suppose que la transpiration d'un arbre moyen correspond en gros à l'évapotranspiration d'une surface végétale de 50 m², dont la consommation hydrique moyenne serait de 5 mm/jour, pendant 270 jours (hypothèse à vérifier); sa consommation annuelle globale serait donc de $5 \times 50 \times 270 = \underline{67.500} \text{ litres}$
Théoriquement, un couvert de $\frac{1.5 \times 10^6}{67.500}$, soit 22 arbres à l'hectare, pourrait être envisagé.

D - CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AVENIR

Dans la zone soudano-sahélienne, les problèmes relatifs à une utilisation rationnelle de l'eau et en particulier des ressources pluviales, ont été presque partout reconnus comme prioritaires. Les organismes nationaux de recherche et de développement et les organismes de coopération internationale ou bi-latérale mettent en oeuvre de nombreux programmes, en vue d'améliorer l'alimentation vivrière et le niveau de vie de la population. Une politique rationnelle de l'eau en agriculture est de plus en plus envisagée. Elle devra nécessairement s'appuyer sur les travaux des météorologistes, des agroclimatologistes et de la recherche agronomique en général. Des efforts importants devront encore être consentis en vue d'une meilleure connaissance du milieu : de la pluviométrie et de la demande évaporative notamment. Par ailleurs, les besoins en eau des cultures et les réponses de ces cultures aux stress hydriques sont encore insuffisamment connus. Quant au réservoir que constitue le sol et à ses caractéristiques hydro-dynamiques, les inconnues restent nombreuses et amènent les agronomes à faire des hypothèses hasardeuses. Ce n'est qu'en progressant dans ces divers domaines, qu'une simulation correcte du bilan hydrique sous culture permettra aux équipes pluridisciplinaires d'agronomes, de pratiquer plus rapidement et plus sûrement une véritable économie de l'eau en zone semi-aride.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

=====

- Aménagement du Territoire - Quelques données agro-pluviométriques de 16 stations du Sénégal - Période 1932-1965 - Ministère du Plan et du Développement -
DAKAR Avril 1967
- BALDY, C., OUEDRAOGO, J.P. Note préliminaire concernant l'évapotranspiration potentielle en Haute-Volta et son calcul par la méthode du bilan d'énergie de PENMAN - O.M.M., P.N.U.D., Direction de la météorologie nationale de Haute-Volta
Septembre 1976.
- BERNARD, E.A., Le déterminisme de l'évaporation dans la nature - Etude des aspects géophysiques et écologiques du problème, dans le cadre du bilan énergétique.
Publication INEAC - n° 68 - 1956
- 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
- BOUCHET, R.J. Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. Livre "l'eau et la production végétale" p. 151-232 - INRA PARIS 1964
- 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 - Sept. 1971
- CHARREAU, C., NICOU R. L'amélioration du profil cultural dans les sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche Ouest-africaine et ses incidences agronomiques
in Agro. Trop. 1971 n° 2, 5, 9, 11
- CHOPART, J.L. et NICOU, R. Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal - Conséquences sur leur alimentation hydrique
Agro. Trop. vol XXXI - Janvier à Mars 1976
- CHRISTIANSEN, J.E. Estimating pan evaporation and evapotranspiration from climatic data - ASCE, irrigation and drainage Div. symp. on methods for estimating evapotranspiration Nov. 1966

- 11 - COCHEME, J., FRANQUIN, P. Une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche ou Sud du Sahara en Afrique occidentale - Rapport technique FAO, UNESCO, OMM Rome (1967)
- 12 - Coopération (Ministère de la...) - Techniques rurales en Afrique - Volume n° I "évaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations" - Ministères de la Coopération et de l'Agriculture France Octobre 1964
- 13 - DAGG, M. Factors affecting the use of evaporation pan data in East-Africa. East-african agricultural and foresting journal - Vol XXXV n° 2 Oct. 1969.
- 14 - DANCETTE, C., DUC, T.M., RIDDERS, J.R. Utilisation par la canne à sucre des réserves hydriques d'un sol - CNRA BAMBEY
IRAT 110 rue de l'Université PARIS - France 1970 et 1971
hydrique
- 15 - DANCETTE, C. Contrôle avec l'humidimètre à neutrons de l'alimentation / d'une culture de mil "souma" pendant deux hivernages très différents
in Agro; Trop. vol XXVI n° 6-7, Juin-Juillet 1971
- 16 - DANCETTE C., Travaux réalisés par l'IRAT et principales orientations dans le domaine des relations eau, sol, plante
in Agro Trop vol XXVIII n° 9 Sept. 1973 p. 881-886
- 17 - DANCETTE C, Principales études de l'IRAT au Sénégal, portant sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et sur leurs aptitudes à l'irrigation.
in Agro. Trop. vol. XXVIII n° 9 sept. 1973 p. 887 à 893
- 18 - DANCETTE C, Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal in "Isotope and radiation techniques in soil physics an irrigation studies 1973"
IAEA - SM-176/36 - Vienna 1974
- 19 - DANCETTE C, MAUBOUSSIN, J.C., NICOU R. TOURTE R. Pour une meilleure rentabilisation agricole des ressources pluviales dans les sols sableux d'Afrique tropicale sèche - communication au Symposium Frontiers of the semi-aride world - ICASALS Lubbock Texas U.S.A. Octobre 1974
- 20 - DANCETTE C, Comment adapter les cultures à l'aridité du milieu et améliorer ce milieu ? Communication à la conférence - Atelier sur le Sahel - CILSS -
Sénégal février 1975.
- 21 - DANCETTE C, NICOU R, Economie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal IRAT/Sénégal - CNRA Bambey - Réunion d'Agronomie IRAT - PARIS - Juillet 1974.

- 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 - Mai 1973
in Agro. Trop. 1976 n° 4 Oct. Déc. P. 321-338
- DANCETTE C, Cartes d'adaptation à la saison des pluies des mils à cycle court dans la moitié Nord du Sénégal - "Efficiency of water and fertilizer use in semi-arid regions" Comité consultatif AIEA Bambeý - Sénégal - 10 au 14 Novembre 1975 - FAO/AIEA, techn. doc n° 192 - Vienna 1976
- DANCETTE C. Les besoins hydriques des cultures et l'économie agricole de l'eau dans les zones centre et nord du Sénégal
CNRA Bambeý - ISRA Juillet 1976
- DANCETTE C., SOW C.S. Analyse agroclimatique de la saison des pluies en vue de faciliter les choix de la recherche et du développement agricoles (le cas de Nioro-de-Rip)
CNRA Bambeý - ISRA Septembre 1976
- DOORENBOS J. et PRUITT, W.O. Crop water requirements, irrigation and drainage paper
FAO. Rome 1975
- DUC T.M. Irrigation de la zone Centre-Nord du Sénégal - Résultats de recherches et perspectives; comité consultatif FAO-AIEA; Efficiency of water and fertilizer use in semi-arid régions Bambeý-Sénégal 10-14 Novembre 1975 - doc techn. IAEA - 192, Vienna 1976
- FOREST F. Bilan hydrique efficace et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne - Cahiers pédagogiques et opérationnels - Ministère de la Coopération
Direction de l'aide au Développement - 1974
- GANRY, F. et SIBAND P. "Fertilisation, production et gestion du milieu en zone tropicale sèche" Communication au Séminaire FAO-DANIDA sur la planification et l'organisation du développement de l'emploi des engrais - Dakar 9-21 Septembre 1974
- GIFFARD P.L. "L'arbre dans le paysage sénégalais" synthèse 431 p.
Centre technique forestier tropical - 45 bis av. de la Bolle Gabrielle 94130 Nogent-sur-Marne 1974

- GLEIZES C. Les formules d'évapotranspiration - in techniques rurales en Afrique - Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations - Ministère de la Coopération
France 1964
- HALL, A.E. "Analyse quantitative de systèmes de culture sèche en régions semi-arides d'Afrique"
Université de Californie - Riverside - rapport MUSAT -
Janvier 1977
- IRAT, Sénégal - Rapport d'activité 1965 - Etude et amélioration du milieu
"comparaison de quelques formules d'évapotranspiration potentielle au Sénégal" - Bioclimatologie - CNRA Bambey - Sénégal
(par P.G. SCHOCH) - 1966
- IRAT, Haute-Volta - Rapports annuels de la S.E.H.A. de Mogtedo, par
JENNY et GILLET, de 1966 à 1969 - IRAT, 110 rue de l'Université
PARIS XVII - 1969
- IRAT, Niger - Rapports annuels de la S.E.H.A. de Tarna de 1963 à 1970,
par CHAROY et GILLET - IRAT, 110 rue de l'Université - PARIS
XVII - 1970
- ISRA - Amélioration des mils au Sénégal - Rapport général - volumes I,
II et annexes CNRA Bambey 1975
- 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
de l'Institut National de Recherches Agronomiques du Niger
(INRAN) - Juillet 1975
- MARCESSE, J. Détermination in situ de la capacité de rétention d'un sol
au moyen de l'humidimètre à neutrons - AIEA colloque d'
d'Istamboul - 1967
- MONNIER, J. Le démariage précoce du mil hâtif et les techniques qui s'y
rapportent
ISRA-CNRA Bambey - Sénégal - Juin 1976
- NICOU R. Le travail du sol dans les terres exondées du Sénégal :
Motivations, contraintes, ...
Synthèse ISRA-CNRA BAMBEY - Mars 1977
- PELISSIER. Les paysans du Sénégal
édit. Imprimerie Fabrègue - Saint Yrieix - Haute-Volta
France-1966

- PIERI C. "L'utilisation des engrais dans les sols de la zone semi-aride du Sénégal" Efficiency of water and fertilizer use in semi-arid regions - Proceedings Advisory group meeting
Bambey-Sénégal 10-14 Novembre 1975 - Techn. doc. IAEA - Vienna, 1976
- RIJKS D.
Données météorologiques recueillies à Richard-Toll, Guédé, Kaédi et Samé - Juin 1970 à Mai 1975 - Office de mise en valeur du Fleuve Sénégal (OMVS, FAO, PNUD)
- RIJKS D. - Etudes portant sur l'analyse de la régularité des pluies, dans le bassin du Fleuve Sénégal - OMVS - FAO- PNUD Mars 1972
- RIJKS D. - Les besoins en eau des cultures (compte-rendu des travaux réalisés à Guédé et à Kaédi) OMVS - FAO - PNUD DT 130 - Juillet 1974
- RIOU, C. - Etude de l'évaporation en Afrique centrale, contribution à la connaissance des climats - Thèse de Doctorat d'Etat-es sciences physiques - ORSTOM PARIS 1972
- RIQUIER, M. - Formules d'évapotranspiration - Cahiers ORSTOM de pédologie Volume I - Fascicule 4 - 1963
- ROCHE, M. et Cie - Etude méthodologique pour l'utilisation des données climatologiques de l'Afrique tropicale -
I - Livre des codes (ROCHE M.)
II - Livre de traitement systématique (SIRCOULON J.)
III- Livre de l'évapotranspiration et des déficits hydriques (GIRARD G. et ROCHE M.) CIEH Ministère de la Coopération ORSTOM 24 rue BAYARD 75008 PARIS 1974
- ROYER, J.M., VACHAUD, G. - Détermination directe de l'évapotranspiration et de l'infiltration par mesure des teneurs en eau et des succtions; hydrological sciences Bul.
vol XIX P. 319-336 - 1974
- SCHOCH, P.G. - Influence de l'évapotranspiration potentielle d'une strate arborée au Sénégal et conséquences agronomiques
in Agro. Trop. Nov. 1966
- SCHOCH, P.G. et DANCETTE C. - Utilisation de l'évaporomètre Piche pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle
in Agro. Trop. Sept. 1968 N° 9 p. 967 à 973