

Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne

C. DANCETTE (1)

RÉSUMÉ Le but poursuivi par l'auteur est de fournir au lecteur une méthode suffisamment précise et relativement simple, pour déterminer les besoins en eau des principales cultures, dans leurs diverses localisations géographiques. Les étapes essentielles de cette détermination reposent sur

- la caractérisation de la demande évaporative (d'ordre climatique) dans le temps et dans l'espace, par l'évaporation d'une nappe d'eau libre en bac normalisé classe A (Ev. bac) ;
- le choix des coefficients culturaux K' = besoins en eau (ou ETM)/Ev. bac, lesquels sont variables selon les espèces et les variétés et tout au long du cycle végétatif ;

le calcul des besoins en eau, par périodes de dix jours, de la pluie de levée jusqu'à la récolte.

Les principales cultures abordées sont le mil, le sorgho, le maïs, le riz pluvial, l'arachide, le niébé, le soja, le cotonnier et la jachère d'herbe. Quelques applications relatives à la connaissance des besoins en eau sont ensuite énumérées rapidement, le but ultime étant de parvenir à établir un bilan hydrique complet faisant intervenir le climat, le sol et la plante, en vue d'une meilleure gestion des ressources hydriques.

Mots clés : Demande évaporative, évapotranspiration, besoins en eau, pluviométrie, bilan hydrique, simulation, adaptation pédoclimatique.

Avertissement

Cet article fait suite à un document de travail écrit à l'intention des chercheurs et des responsables du développement agricole œuvrant au Sénégal, intitulé : « Méthode pratique d'estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales au Sénégal ». Certains agronomes souhaitaient que la portée de cette étude fût étendue à l'ensemble de la zone soudano-sahélienne, sur le plan méthodologique. Il reste entendu que la méthode proposée a surtout fait ses preuves au Sénégal et qu'il conviendrait de la tester dans les pays voisins. Il n'est pas évident qu'aux extrémités de la zone mentionnée la demande évaporative se caractérise de la même manière qu'au Sénégal, ni que les cultures s'y comportent de façon identique.

*L'auteur souhaite que, dans tous les pays concernés,

(1) Ingénieur agronome (INRA-IRAT) mis à la disposition de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Centre National de Recherches Agronomiques de Bambey, Sénégal.

des mesures précises de besoins en eau se multiplient et qu'elles soient mises chaque fois en relation avec des mesures caractéristiques de la demande évaporative = évapotranspiration potentielle d'un gazon de référence, évaporation de l'eau libre dans un bac normalisé, données climatiques permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle par la formule de Penman, etc. Des expérimentations plus nombreuses et plus solides s'imposent, en vue de généraliser avec une précision suffisante et dans un secteur suffisamment vaste, les résultats obtenus ponctuellement

Introduction

Ce document est destiné aux agronomes de la recherche et du développement intéressés par une estimation simple et rapide des besoins en eau des principales cultures pluviales. Cette connaissance pourra être utilisée à des fins telles que :

- le contrôle tout au long de la saison des pluies de l'alimentation hydrique des cultures soumises aux aléas pluviométriques, pour une meilleure compréhension et évaluation des rendements ;
- les choix concernant l'adaptation aux conditions pédo-climatiques des principales espèces et variétés créées ou introduites localement, en vue de l'élaboration de cartes de répartition variétale ;
- le choix de techniques culturales visant à une meilleure utilisation des disponibilités hydriques ;
- la satisfaction des besoins en eau de chaque culture, lorsqu'il est possible de pratiquer l'irrigation en complément des pluies (doses et fréquence des apports).

Pour bien appréhender les modalités d'alimentation hydrique des cultures, il ne suffit pas de se fonder sur la seule pluviométrie et sur la connaissance des besoins en eau ; il faut faire intervenir aussi les caractéristiques du réservoir-sol. Il sera donc nécessaire d'avoir une idée correcte de la capacité de rétention (pratiquement, la quantité d'eau, en mm, qui peut être stockée dans une tranche de sol d'épaisseur donnée et utilisée avec profit par la culture). Par ailleurs, la profondeur du « réservoir utile » pour les plantes est sous la dépendance de la dynamique de l'enracinement et tout simplement des contraintes d'ordre pédologique.

Ainsi, en sol non limitant, le mil peut utiliser l'eau du sol sur une profondeur allant jusqu'à 180 à 200 cm et l'arachide sur une profondeur pouvant atteindre 120 cm. La quantité d'eau utile pour les cultures, sur une épaisseur de sol d'un mètre, peut varier par exemple entre 45 mm pour des sols très sableux de type dunaire et 120 mm ou plus, pour des sols restant de nature sableuse mais contenant nettement plus d'éléments fins, comme les sols beiges ou rouges du plateau casamançais. Lorsque la pluviosité excède brutalement les capacités d'infiltration ou de rétention, il y a ruissellement ou percolation ; l'eau perdue pour la culture se retrouve heureusement dans les couches profondes (alimentation hydrique des arbres), dans les nappes ou dans les dépressions, ce qui n'est pas dénué d'intérêt pratique.

Ces quelques remarques faites, notre but n'est pas de détailler les problèmes d'alimentation hydrique et nous renverrons les lecteurs intéressés à la liste bibliographique, qui déborde nettement le sujet traité. Chacun devra adapter avec discernement les résultats de cette étude à ses préoccupations particulières ; la détermination des besoins en eau n'est qu'un premier stade d'une connaissance bien plus vaste conduisant à une véritable maîtrise agricole de l'eau.

Méthode d'estimation des besoins en eau

Pour déterminer les besoins en eau, on peut suivre les étapes suivantes :

Préciser la demande évaporative

Généralités

La demande évaporative traduit l'ensemble des facteurs climatiques qui influent sur les pertes d'eau par évaporation au niveau du sol ou d'une nappe d'eau libre, et par transpiration au niveau des plantes. On peut l'appréhender à partir des calculs ou des mesures d'ETP. L'ETP est l'évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal homogène et dense, de type herbacé, bien approvisionné en eau et soumis aux seules contraintes d'ordre climatique régional. Plusieurs procédés de mesure d'évaporation peuvent donner aussi une idée de cette demande évaporative, en s'affranchissant des contraintes de sol et de matériel végétal ; citons, entre autres, les mesures d'évaporation Piche et celles d'évaporation d'eau libre en bacs : bac normalisé classe A, bac enterré de type ORSTOM, bac flottant, etc.

Pour diverses raisons, nous préférons (compte tenu de notre expérience sénégalaise) mesurer l'évaporation d'eau libre en bac normalisé classe A, installé sur un sol nu non arrosé. Des corrélations simples ou multiples peuvent être établies pour calculer cette évaporation bac, dans les

postes où elle n'est pas directement mesurée, mais où l'on dispose des données climatiques essentielles : pluviométrie, insolation ou rayonnement, vitesse du vent, température, humidité relative, etc. Sur ce sujet précis, le lecteur peut se reporter aux documents de synthèse parus dans la revue *L'Agronomie tropicale* (18, 20, 29, 38).

La demande évaporative varie dans un même lieu en fonction du temps : variations en cours d'année et d'une année sur l'autre ; elle varie aussi avec les zones climatiques, d'une station à l'autre. La figure 1 traduit le gradient décroissant nord-sud de demande évaporative que l'on observe par exemple au Sénégal : l'évaporation en bac normalisé classe A est chiffrée à partir de corrélations avec la pluviométrie, pendant l'hivernage. COCHEMÉ et FRANQUIN (16) ont proposé ce genre de carte à l'échelle de toute la zone semi-aride située au sud du Sahara, en Afrique de l'Ouest ; la demande évaporative est traduite par l'ETP calculée par la formule de Penman. Le projet AGRHYMET (basé à Niamey) envisage d'actualiser cette carte, dans la même région.

En ce qui concerne notre carte du Sénégal, il faut noter, par rapport à une première ébauche, une modification concernant la frange côtière, soumise sur 20 à 25 km à une influence océanique très marquée. On s'aperçoit ainsi qu'à une même latitude les mesures d'évaporation « bac » sont égales sur la côte à environ 0,8 fois celles que l'on relève à l'intérieur des terres à quelque 80 km. Ceci ressort par exemple très bien de la comparaison de Bam, bey et de Sangalkam ou Cambéréne sur la côte.

Les besoins en eau des différentes cultures retenues, le plus souvent mesurés à Bambey, sont bien sûr sous la dépendance de ce gradient de demande évaporative. Pour extrapoler ces mesures, on procède comme indiqué ci-après, en situant la culture étudiée dans le temps (à partir de la date de semis) et dans l'espace.

Variations de la demande évaporative dans le temps

Dans une station centrale comme celle de Bambey, on connaît l'évaporation « bac » en moyenne décadaire sur onze ans (tabl. 1).

Tableau 1 Variations d'évaporation bac à Bambey pendant la saison des pluies en mm/jour (1971-1 98⁰).

Juin	1	9,4	Août	1	6,2	Octobre	1	6,4
	2	8,9		2	6,1		2	6,4
	3	8,9		3	5,7		3	6,9
Juillet	1	8,1	Septembre	1	5,7	Novembre	1	7,2
	2	7,3		2	5,4		2	7,8
	3	6,7		3	5,6		3	7,5

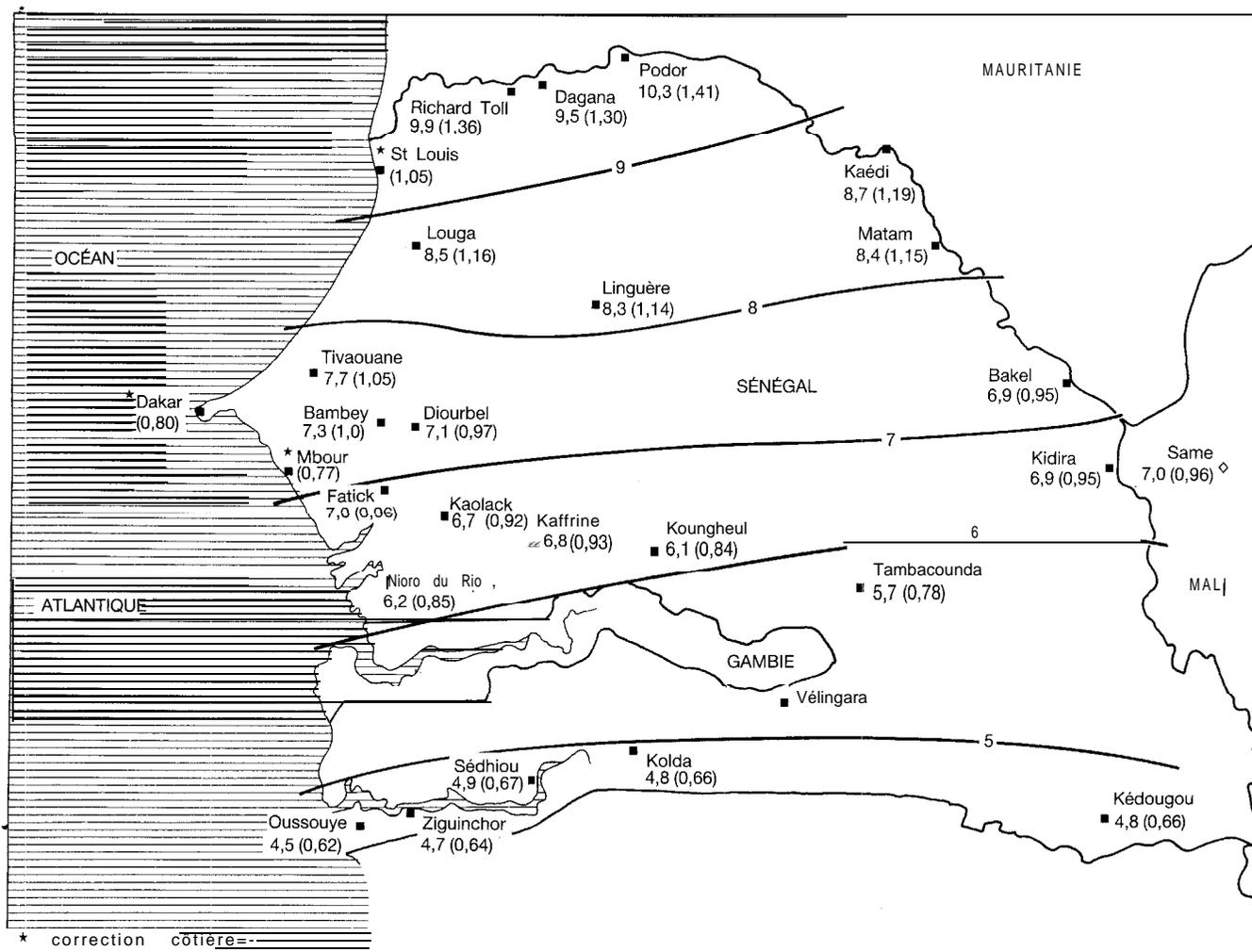


Fig. 1 : Carte des variations de demande évaporative (mm/jour) au Sénégal, pendant les mois d'hivernage (juin à octobre compris). Période 1972-1976.

Cette demande évaporative peut varier d'une année sur l'autre : en général de moins de 10 %, comme le montre le tableau II, établi à partir de trois stations échelonnées du nord au sud du Sénégal. Pour des travaux fins, il

convient d'utiliser la demande évaporative de l'année même, mais pour des travaux généraux on peut se baser sur une demande moyenne. On doit savoir que si la demande évaporative varie de plus ou moins 10 %, les besoins en eau varieront dans les mêmes proportions. Dans le tableau, le chiffre entre parenthèses est un indice caractérisant l'année par rapport à la moyenne de toutes les années de mesure.

Tableau II Évaporation en bac normalisé classe A, en mm/jour, au Sénégal pendant la saison des pluies (juin à octobre compris).

Station	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	Moyenne
Nord									
Guédé-casier	-	9,9	10,0	8,6	8,9	9,0	9,3	11,1	9,5
FAO-OMVS	-	(1,04)	(1,05)	(0,90)	(0,93)	(0,94)	(0,97)	(1,16)	(1,00)
Centre									
Bambey	7,2	6,8	7,2	7,3	6,9	7,3	7,5	6,7	7,1
CNRA-ISRA	(1,01)	(0,96)	(1,01)	(1,03)	(0,97)	(1,03)	(1,09)	(0,94)	(1,00)
Sud									
Séfa	4,9	5,2	4,7	4,7	4,9	5,2	5,4	5,1	5,0
ISRA	(0,98)	(1,04)	(0,94)	(0,94)	(0,98)	(1,04)	(1,08)	(1,02)	(1,00)

Variations géographiques de la demande évaporative

Au Sénégal, le gradient de demande évaporative, fortement lié à la pluviométrie moyenne de chaque site, s'exprime par un coefficient se rapportant à la station agronomique centrale de Bambey. Sur la figure 1, chaque station est caractérisée par son évaporation « bac » moyenne pendant la saison des pluies et par le coefficient mentionné ci-dessus. Ainsi, à Podor où cette évaporation moyenne est de 10,3 mm/jour, le coefficient 1,41 veut dire que cette évaporation est 1,41 fois celle de Bambey (7,3 mm/jour). Pratiquement, on utilisera le tableau III.

Tableau III Coefficients traduisant la demande évaporative par rapport à Bambey, au cours de la saison des pluies, au Sénégal.

Podor	1,41	Bakel	0,96	Koungheul	0,84
Guédé	1,40	Kidira	0,92	Sinthiou M.	0,82
Dagana	1,30	Dakar*	0,80	Tambacounda	0,78
Richard-Toll	1,30	Mbour*	0,77	Maka	0,80
Saint Louis*	1,05	Thiès	0,98	Missirah	0,78
Louga	1,16	Thiénaba	0,99	Vélingara	0,78
Linguère	1,14	Bandia	0,98	Kédougou	0,66
Dahra	1,15	Fatick	0,96	Séfa	0,67
Kaédi (Mauritanie)	1,19	Kaolack	0,92	Bignona	0,67
Matam	1,15	Gossas	0,95	Ziguinchor	0,64
Tivaouane	1,05	Kaffrine	0,93	Kolda	0,66
Bambey	1,00	Darou	0,88	Oussouye	0,62
Diourbel	0,97	Nioro du Rip	0,85	Cap Skiring	0,60

* Stations côtières corrigées.

Déterminer les coefficients culturaux tout au long du cycle de végétation

Le coefficient cultural K' est pour nous le rapport entre les besoins en eau mesurés au champ et l'évaporation en bac normalisé classe A (installé sur un sol nu, non irrigué) pendant la même période, la décade en l'occurrence. On pourrait se rapporter de la même façon à l'ETP mesurée ou calculée : $K = \text{besoins en eau} / \text{ETP}$.

Ainsi, au Sénégal tout au moins, l'ETP mesurée sur gazon est égale, en moyenne sur trois stations situées au nord, au centre et au sud du pays, à 0,78 fois l'évaporation « bac » pendant la saison des pluies et à 0,65 pendant la saison sèche (29). La FAO (25) préconise de son côté l'ETP calculée par la formule de Penman comme référence de demande évaporative ; c'est aussi la position adoptée par le projet AGRHYMET (Niamey). Le plus souvent, il est relativement facile de passer de K à K' et vice-versa. Pour l'analyse critique de ces référentiels, on peut consulter, entre autres documents, la thèse de Riou (21), IMBERNON et AUCKENTHALER (43), qui comparent l'ETP Penman et l'évaporation du bac A, en région tropicale.

Les besoins en eau ont été mesurés en diverses stations agronomiques d'Afrique de l'Ouest francophone ; il convient de mentionner les dispositifs de mesure installés par l'IRAT et pris en charge de plus en plus par des organismes de recherche nationaux, au Niger, en Haute-Volta, au Sénégal, au nord de la Côte d'Ivoire.

Au Sénégal, les besoins en eau ont été mesurés à partir

de bilans hydriques au champ effectués avec un humidimètre à neutrons et le plus souvent avec un minimum de quatre répétitions (cv de l'ordre de 6 à 10 % sur un cycle de culture entier). A la rigueur, trois répétitions pourraient suffire, compte tenu de la précision souhaitée et des précautions indispensables à prendre. Quand les pluies sont limitées, les sols relativement homogènes et profonds, les tubes d'accès profonds (4 m), l'irrigation soignée et bien contrôlée, les parcelles nivelées, etc., le bilan hydrique en place donne d'excellents résultats. A Bambey (Sénégal), bilan hydrique et évapotranspiromètres (cuves de végétation de 4 m²) ont donné des résultats très voisins et finalement la méthode du bilan hydrique a été retenue. Dans d'autres situations, quand il pleut trop par exemple (Djibelor en Casamance, Sénégal), seuls les évapotranspiromètres ont pu être utilisés. Les techniques retenues sont détaillées dans les nombreuses publications ponctuelles citées. Citons aussi d'autres méthodes, comme celle de l'irrigamètre au Niger (Tillabery), qui consistent à effectuer des irrigations très bien contrôlées (on réajuste chaque fois le niveau des réserves en eau du sol à un niveau légèrement inférieur à celui de la capacité de rétention du sol préalablement très bien déterminée, ceci pour éviter toute percolation intempestive). La méthodologie de la mesure même des besoins en eau ne fait pas l'objet de cette publication : elle est liée aux conditions de sol, de climat, de culture rencontrées et aux moyens disponibles ; rien ne peut être systématisé dans ce domaine.

Les résultats sont donnés dans les tableaux qui suivent et il appartient à chaque utilisateur de retenir les coefficients de la variété et de la zone les plus proches de celle qu'il étudie.

Des coefficients obtenus pour une culture donnée en zone soudanienne sud ne sont pas forcément les mêmes que ceux obtenus en zone sahélienne à une latitude très différente. De même, on peut hésiter à transposer dans un pays très continental comme le Niger, des coefficients mesurés dans un pays bordé par l'Océan comme le Sénégal.

La généralisation d'une méthode de détermination des besoins en eau, basée sur l'utilisation des coefficients culturaux, suppose que le domaine de validité géographique de ces coefficients soit précisé. Cette vérification n'est pas simple et nécessite que l'on fasse simultanément, dans des stations situées à une même latitude, mais à des longitudes différentes d'une part, et d'autre part à la même longitude, mais à des latitudes différentes, des mesures de besoins en eau d'une variété identique et d'évaporation en bac normalisé classe A ; culture et bac d'évaporation devront être gérés de façon strictement semblable en chacun des lieux retenus : ce travail est envisagé en collaboration entre le Sénégal, le Mali, la Haute-Volta et le Niger. En attendant que cette vérification expérimentale soit faite, nous nous contenterons de faire un inventaire aussi complet que possible des principaux résultats obtenus sur les cultures pluviales de la zone soudano-sahélienne (tabl. IV).

Tableau IV Coefficients K' = Besoins en eau/Ev. bac normalisé classe A
obtenus en Afrique de l'Ouest francophone
sur mil, sorgho, maïs, riz pluvial, arachide, niébé, soja, cotonnier et jachère d'herbe.

	Décadeset numéros d'ordre												Total cycle	Hendements kg/ha		Pluvio. mm	Irrig. mm	Consom. totale mm	Observations	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain ou gousse	Paille ou fane					
MIL																				
MILSANO 120 jours Bambey/Sénégal 1976 (1) et 1977 (2)	0,21	0,30	0,45	0,68	0,90	1,05	1,16	1,19	1,18	1,06	0,90	0,75	0,76	(1) 2 035 (2) 1 623	(1) 13 950 (2) 14 425	(1) 399 (2) 374	(1) 215 (2) 283	(1) 562 (2) 628		
MILSOUNA 90 jours Bambey/Sénégal 1973 (1) et 1974 (2)	0,31	0,42	0,68	1,02	1,10	1,08	0,92	0,84	0,78	-	-	-	0,73	(1) 2 690 (2) 2 948	(1) 6 680 (2) 5 760	(1) 400 (2) 492	(1) 68 (2) 73	(1) 417 (2) 416		
MILNAIGAM 75 jours Bambey/Sénégal 1974 (1) et 1975 (2)	0,45	0,55	0,75	0,95	0,95	0,80	0,70	0,68 (5j)	-	-	-	-	0,65	(1) 2 151 (2) 1 721	(1) 5 940 (2) 5 650	(1) 447 (2) 510	(1) 51 (2) 0	(1) 320 (2) 327		
P3 KOLO 104 jours Tillabery/Niger 1972	0,40	0,48	0,52	0,68	0,75	0,82	0,82	0,74	0,65	0,54	0,46	-	0,62	2 230	9 000	210	400	630		
SORGHO																				
137-62 133 jours Tillabery/Niger 1972	0,52	0,54	0,60	0,62	0,70	0,75	0,80	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,80 à 0,40	0,70	2 890	18000 l	273	630	845	Fréquence d'irrigation insuffisante
137-62 110 jours Maradi/Niger (5 ans)	0,40	0,60	0,80	1,10	1,20	1,20	1,20	1,20	1,10	0,90	0,70	-	0,95	potentiel de 4 000	?	582	60 à 250	500	Référence bac enterré type ORSTOM	
126 150 jours Mogtédo/Hte-Volta 1968	0,60	0,70	0,76	0,88	1,04	1,12	1,24	1,24	1,00	0,92	0,92	0,92 à 0,70	0,91	1 525	?	701 juin à octobre	?	682		
CE 67 90 jours Bambey/Sénégal 1975	0,37	0,44	0,50	0,88	0,96	0,90	0,82	0,78	0,68	-	-	-	0,70	2 000 à 2 500 sol sableux + fumier	7 000	542	0	390	Grande hétérogénéité sol peu favorable	
1- ? EAO - OMVS Richard-Toll/Sén. 1972	0,30	0,55	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	-	-	-	-	-	détruit	-	-	-	-	Culture détruite par les oiseaux	
MAÏS																				
MASSA Yamba KOLO P3 100 jours Mogtédo/Hte-Volta 1968	0,76	0,84	0,92	1,10	1,20	1,26	1,20	1,06	0,68				0,92	4 330	?	701 (juin à octobre) 128 en mai	?	?	Billons	
BDS 110 jours Bambey/Sénégal 1975	0,39	0,45	0,50	0,58	0,74	0,79	0,93	0,93	0,91	0,86	0,66		0,70	1 250 et 1 546	2 200 et 2 300	544	81	624	Sol dior peu favorable	
MAKA Guédé/Sénégal 1972	0,30	0,40	0,64	0,85	0,90	0,85	0,80	0,62	0,45				0,67	1 280	?	124 très aride	?	635	Billons	

Tableau IV (suite)

	Décades et numéros d'ordre												Total cycle	Rendements kg/ha		Pluvio. mm	Irrig. mm	Consom. totale mm	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain ou gousse	Paille ou fane				
RIZ PLUVIAL																			
Diverses variétés Djibello/Casamance 1973-1976	0,60	0,80	1,02	1,10	1,20	1,20	1,18	1,12	0,90	0,80	0,76	-	0,97	2 660 4795	3 470 à 4 500	1 170 à 4 500	<100	340 440	V. 6383 V. IKP V. 3026 V. 144 B9
Riz de casier TN n°1 Guédié/Sénégal 1972 (1) et 1973 (2),	0,50	0,80	1,10	1,16	1,20	1,20	1,20	1,20	1,18	1,06	0,72	0,30	0,97	2 750 à 4 320	-	(1) 94 (2) 124	? ?	1306 913	Semisdirect
SE 349 D 122 jours Bouaké/Côte d'Ivoire* 1975	0,90	0,92	0,96	0,98	1,00	1,02	1,07	1,37	1,43	1,43	1,37	1,03	1,12	potentiel 6000	?	?	9 mm/j sauf pluie	440	
MOROBEREKAN 145 jours Bouaké/Côte d'Ivoire* 1975	0,80	0,86	0,93	0,97	1,02	1,08	1,17	1,15	1,34	1,40	1,34	1,28 à 1,22	1,14	potentiel 4500	?	?	9 mm/j sauf pluie	542	
A R A C H I D E																			
55437 100 jours Tilabery/Niger 1972	0,36	0,38	0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,73	0,73	0,70	0,56	-	0,56	2 970 (gousse)	-	472	365	580	cycle allongé (normalement 90 jours)
55437 100 jours Bambey/Sénégal 1974	0,41	0,57	0,67	0,90	0,83	0,78	0,77	0,65	0,65	-	-	-	0,69	2 945 (gousse)	3300	492	72	405	
57422 105 jours Bambey/Sénégal 1973	0,23	0,41	0,65	0,93	1,06	1,04	0,93	0,93	0,92	0,90	0,90 (5j)	-	0,79	3 660 (gousse)	4988	400	182	548	
58206 120 jours Bambey/Sénégal 1976-1977	0,26	0,38	0,48	0,64	0,83	0,97	1,07	1,00 (5j)	0,93	0,78	0,74	0,65	0,73	3 699 (gousse)	31302	74 3	259	557	
N I É B É																			
58-57 106 jours Guédié-OMVS/Sén. 1972-1973	0,30	0,55	0,75	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,54	1,52	0,50	0,62	320 à 1 392 (grain)	-	67 à 124	-	746	
B 21 75 jours Bambey/Sénégal 1975	0,38	0,60	0,95	1,08	1,00	0,80	0,75	0,72	-	-	-	-	0,76	1 320 (grain)	3 400	535	20	335	
MOUGNE 75 jours Bambey/Sénégal 1982	0,42	0,60	0,74	0,97	1,06	1,08	0,80	0,57	-	-	-	-	0,76	1 715 (grain)	3451	452	0	322	Irrigation inutile

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

Commentaires sur les tableaux IV

1 - Il ne faut pas s'étonner si les coefficients K' sont souvent assez différents, même pour une même variété, en début de cycle. Au début de la culture, le sol est pratiquement nu et l'évapotranspiration est essentiellement de l'évaporation à la surface du sol. Cette évaporation

dépend alors de la nature du sol et du rythme des apports hydriques ; un sol fréquemment humecté est bien plus affecté par l'évaporation qu'un sol recevant un gros apport puis « s'automulchant » jusqu'à l'apport suivant bien plus tard (10 à 15 jours par exemple).

Pourtant, les deux rythmes d'apport peuvent avoir le

Tableau IV (suite)

	Décades et numéros d'ordre												Total cycle	Rendements kg/ha		Pluvio. mm	Irrig. mm	Consom. totale mm	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain ou gousse	Paille ou fane				
SOJA																			
ISRA-IRAT 44 A 73 Djibouti/Sénégal 1978	0,66	1,00	1,28	1,40	1,44	1,20	0,75	0,52	0,45	0,42	0,40	-	0,80	3 750 (graines)	2100	1490	<50	314	Drainage difficile
COTONNIER																			
ALLEN 131 jours Tillabery/Niger Site 1-1972	0,24	0,38	0,62	0,78	0,88	0,94	1,00	1,00	1,00	0,96	0,88	0,62 à 0,44	0,71	2 130		222	835	925	Vigueur médiocre sol peu profond
ALLEN 131 jours Tillabery/Niger Site 2-1972	0,54	0,58	0,66	0,76	0,88	0,98	1,07	1,07	arrête des irrigations				-	1 530	-	222	470	785 (réserves sol)	Sol plus profond bonne vigueur ETM/80 j
ALLEN 333 125 jours Guédié/Sénégal OMVS 1972 (1) et 1973 (2)	0,24	0,30	0,36	0,60	0,76	0,81	0,82	0,84	0,82	0,81	0,74	0,40	0,63	(1) 1 040 (2) 1 430		(1) 80 (2) 124	-	(1) 725 (2) 706	
HL1 et A. 333 130 jours Maradi/Niger 1966-1970	0,44	0,52	0,62	0,74	0,84	0,96	1,01	1,03	1,03	1,01	0,96	0,93 à 0,87	0,84	entre 2 000 et 4 000		582	-	645	Référence : bac enterré ORSTOM
BJA SM 67 135 jours Bambey/Sénégal 1976	0,42	0,48	0,58	0,70	0,82	0,92	1,02	1,10	1,15	1,20	1,20	1,13 à 0,46	0,85	2 781		399	-	738	
BJA 119 jours Mogtédo/Hte Volta 1968	0,78	0,82	0,88	0,96*	1,20	1,20*	1,16	1,14	1,04	0,90	0,84	0,78	0,97	2 450		919	-	566	* Interpolation dernière récolte à 146 jours
JACHÈRE D'HERBE																			
100 jours Bambey/Sénégal 1980	0,58	0,72	0,80	0,87	0,93	0,95	0,95	0,93	0,84	0,75	-	-	0,83	-	4 ms 500	407	161	534	

même effet favorable sur la jeune culture encore très peu exigeante en eau. Il y a là une faiblesse de la méthode basée sur les coefficients culturaux, qui ne peut pas prendre parfaitement en compte, en attendant la couverture totale du sol par la végétation, la nature du sol et le rythme des apports d'eau. Cependant, à ce stade de faible consommation, les erreurs d'estimation de K' ont une importance assez limitée. Une solution consisterait à moduler pendant les vingt ou trente premiers jours les coefficients, en fonction de la fréquence des apports (22), ou encore à décomposer le « complexe culture » en ses deux composantes : sol nu, d'une part, et couvert végétal, d'autre part (36). **DOORENBOS** et **PRUITT (25)** ont proposé une abaque donnant les coefficients végétaux de début de cycle en fonction du rythme des irrigations ou des pluies.

2 - Dans le cas de Maradi, au Niger, il s'agissait d'un bac enterré de type ORSTOM. Les différences par rapport au bac normalisé classe A sont toutefois peu importantes : de 2 à 5 % à Bambey, selon la période de l'année (29).

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

4 - Des renseignements portant sur les techniques culturales et sur les conditions de culture des différentes espèces et variétés testées peuvent être trouvés dans les documents suivants :

- Bambey/Sénégal : mil, sorgho, maïs, arachide, niébé, cotonnier, jachère d'herbe (22, 27, 28, 33, 34, 37, 38, 41 et 57) ;
- Tillabery/Niger : mil, sorgho, arachide, cotonnier (26) ;

- Maradi/Niger : sorgho, cotonnier (20) ;
- Richard-Toll, Guédé/FAO-OMVS/Sénégal : sorgho, maïs, riz, niébé, cotonnier (30 et 31) ;
- Mogtédó/Haute-Volta : sorgho, maïs, cotonnier (19) ;
- Djibelor/Sénégal : riz pluvial, soja (37) ;
- Bouaké/Côte d'Ivoire : riz pluvial (40).

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

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

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

6 - L'exemple du cotonnier montre bien qu'il est hasardeux de généraliser à une zone trop vaste des coefficients culturaux identiques, alors que la pluviosité et la demande évaporative peuvent être très différentes (tabl. V et fig. 2).

Tableau V Variabilité géographique des coefficients culturaux K' du cotonnier, en fonction de la pluviosité et de la demande évaporative.

Station	Coefficient cultural global K'	Pluviosité en mm	Évaporation bac en mm/jour
Guédé	0,63	102	9,1
Tillabery	0,71	222	9,9
Maradi	0,84	582	5,9
Bambey	0,85	399	6,4
Mogtédó	0,97	919	4,9

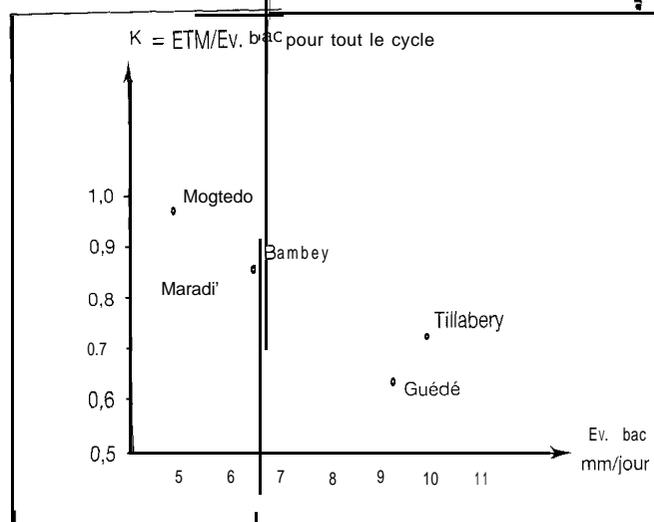


Fig. 2 : Variabilité du coefficient cultural pour le cotonnier en Afrique tropicale de l'Ouest.

Exemple de calcul des besoins en eau

Nous sommes maintenant en mesure de déterminer, pour toutes les cultures retenues, les besoins en eau approchés, à partir d'une date de semis en humide, ou d'une date de début de végétation, dans le cas d'un semis « en sec ».

Prenons par exemple le cas d'une arachide de 105 jours, type 57-422, semée à Thiéna le 8 août 1980 :

- on chiffre la demande évaporative à Thiéna, et plus précisément l'évaporation en bac normalisé classe A, à partir du 8 août ; pour cela, il faut appliquer aux valeurs de Bambey le coefficient 0,99 que l'on trouve dans le tableau III ;
- on connaît le coefficient K' = besoins en eau/Ev. bac normalisé pour l'arachide de 105 jours (tabl. IV) ;
- il est alors facile de chiffrer les besoins en eau en mm/jour et en mm pour chaque décade ou période considérée.

Les différentes étapes du calcul sont présentées dans le tableau récapitulatif VI.

Applications possibles

Suivi agro-pluviométrique de la campagne agricole

Si on veut comprendre mieux les mécanismes de production, ou estimer les chances de réussite d'une spéculation agricole, il est intéressant d'assurer un suivi, avec d'autres facteurs, des conditions d'alimentation hydrique des cultures. Pour cela, dans un premier stade, il suffira de confronter les besoins en eau de la culture retenue à la distribution des pluies de la saison. Le plus simple est d'exprimer les précipitations sous forme graphique, en

Tableau VI Besoins en eau de l'arachide 57-422 à Thiénaba en 1980. Total 514,8 mm en 105 jours.

Période	8-20/8 13 j	21-31/8 11 j	1-10/9 10 j	11-20/9 10 j	21-30/9 10 j	1-10/10 10 j	11-20/10 10 j	21-31/10 11 j	1-10/11 10 j	11-20/11 10 j
Ev. Bambey	6,1	5,7	5,7	5,4	5,6	6,4	6,4	6,9	7,2	7,8
Ev. Thiénaba	6,0	5,6	5,6	5,3	5,5	6,3	6,3	6,8	7,1	7,7
K' arachide 105 jours	0,23	0,41	0,65	0,93	1,06	1,04	0,93	0,93	0,92	0,90
Besoins en eau mm/jour	1,4	2,3	3,6	4,9	5,8	6,6	5,9	6,3	6,5	6,9
Besoins en eau del adécade oupéri oderet enue	18,2	25,3	36,0	49,0	58,0	66,0	59,0	69,3	65,0	69,0

cumul quotidien au cours du temps : ceci donne une bonne idée des jours de pluie (dates de semis et de dernière pluie entre autres), de l'importance quantitative de chaque pluie et de leur répartition (les périodes de sécheresse ressortent très bien sous forme de palier. . .), de la durée de la saison, du total pluviométrique atteint, etc. Les besoins en eau sont, de même, cumulés à partir de la date de semis en humide ou de départ de la culture (quand cette dernière avait été semée en sec) à un niveau optimal (100 % des besoins) ou à un niveau de repêchage (80 %

des besoins) ; on constate, en effet, que les rendements d'une culture ne chutent pratiquement pas tant que les besoins en eau sont satisfaits à un taux compris entre 80 et 100 %.

Enfin, il est toujours recommandé de faire figurer sur le graphique la pluviométrie moyenne de la station (fig. 3). Un progrès sensible consisterait d'ailleurs à donner non plus la pluviométrie moyenne, mais celle que l'on pourrait espérer atteindre ou dépasser un nombre d'années

Dispositif d'alimentation hydrique avec tensiomètre et humidimètre à neutrons dans un champ d'arachide (Photo Dancette).



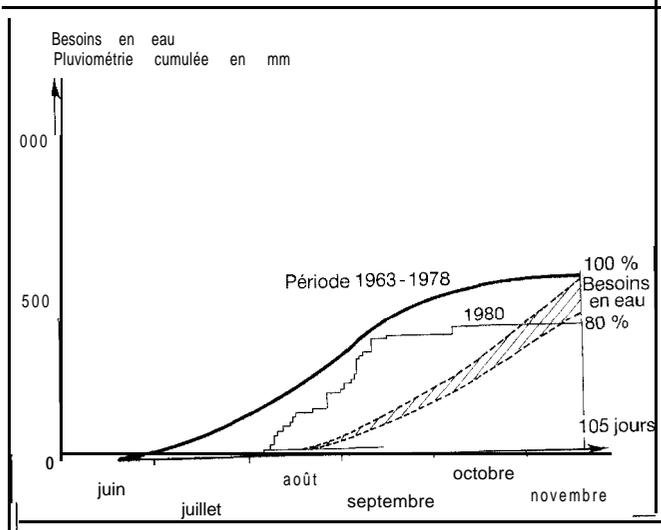


Fig. 3 : Satisfaction des besoins en eau de l'arachide de 105 jours (variété 57-422) à Thiéna en 1980.

suffisant pour garantir une certaine sécurité agricole, à moins d'un point de vue hydrique : on retient souvent les seuils de 75 % ou 80 % des années (13, 28, 39).

Chances de réussite des cultures

La connaissance des besoins en eau d'une culture permet donc, au moins globalement et quantitativement, d'estimer les chances de satisfaction de ces besoins, au vu de la pluviométrie (27, 33, 34). C'est pourquoi, à titre indicatif, nous donnons dans les figures 4 et 5 les pluviométries moyennes et celles que l'on peut espérer atteindre ou dépasser dans 80 % des cas au Sénégal. On s'aperçoit alors que raisonner sur des quantités de pluie moyennes est trompeur et que retenir un seuil de 80 % de chances incite à être beaucoup plus prudent. Sachant qu'une arachide de 105 jours a en général besoin de plus de 500 mm d'eau dans les régions de Thiès et de Diourbel (Sénégal), on voit sur la carte que le seuil que l'on peut atteindre ou

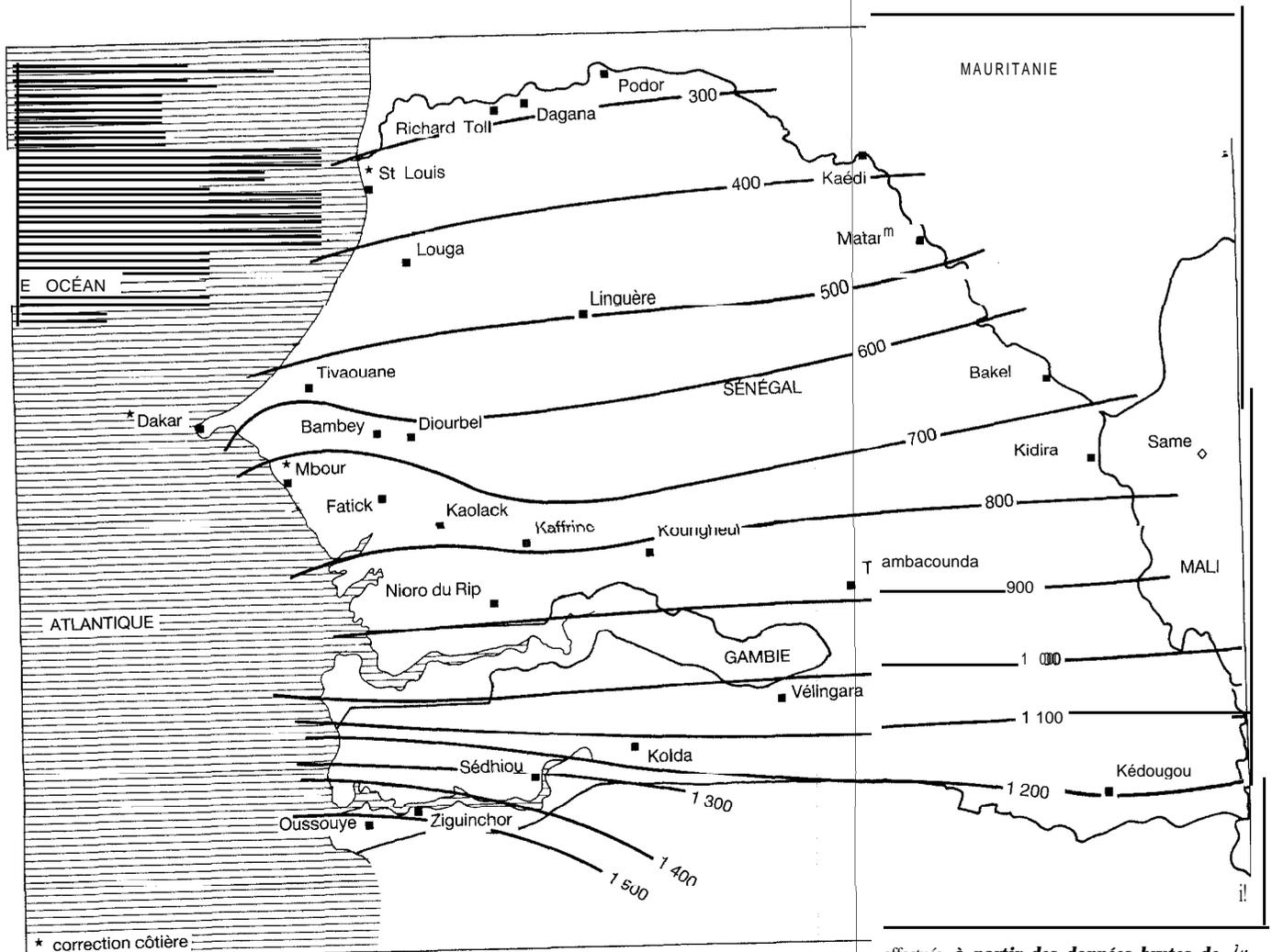


Fig. 4 : Pluviométrie en mm, de juin à octobre compris, au Sénégal, période 1931-1975. Calculs effectués à partir des données brutes de la météorologie nationale (listing « hydrologie ORSTOM »).

effectués à partir des données brutes de la

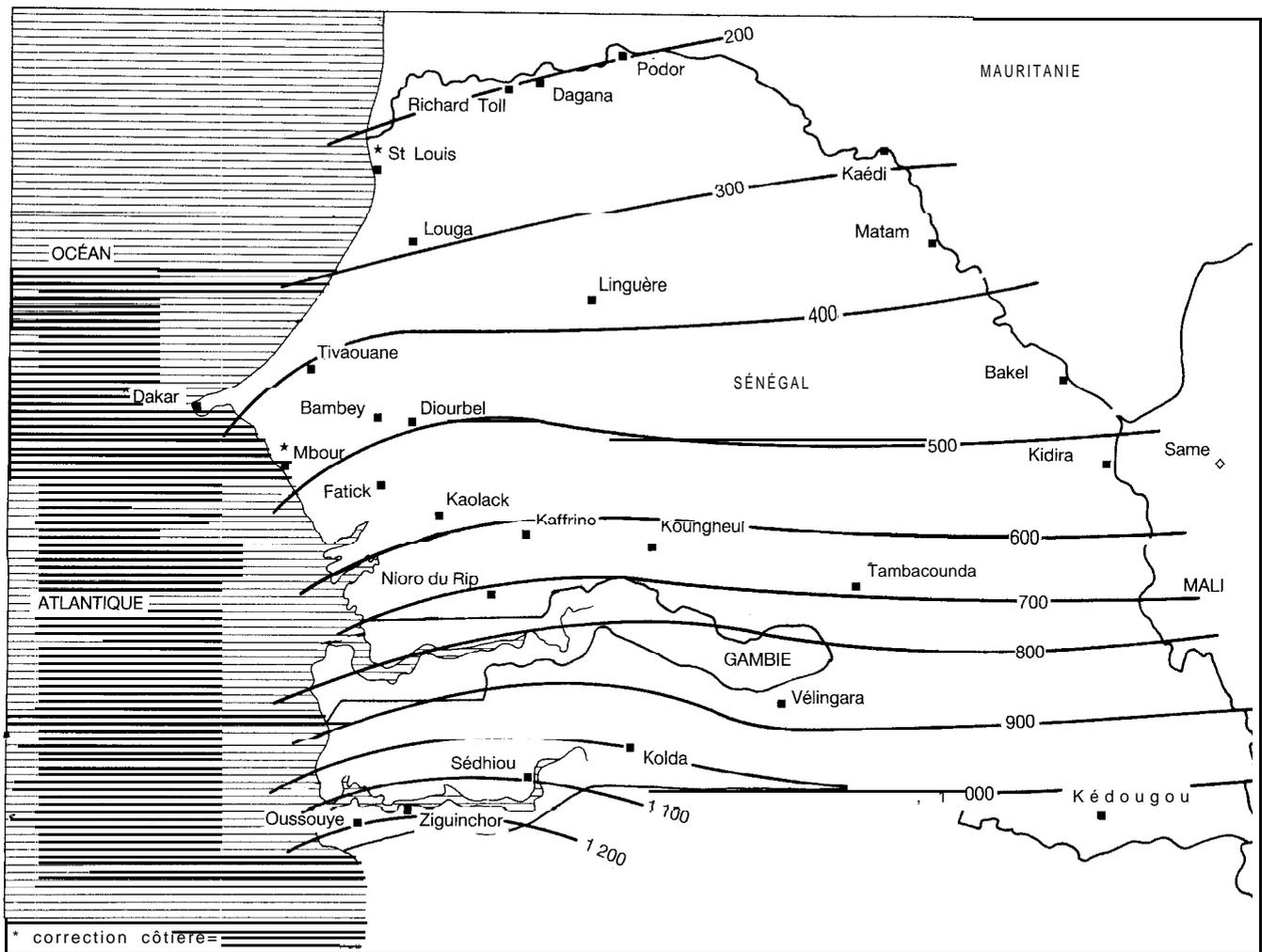


Fig. 5 : Pluviométrie en mm, de juin à octobre compris, atteinte ou dépassée dans 80 % des cas au Sénégal, période 1931-1975. Calculs effectués à partir des données brutes de Ca météorologie nationale (listing « hydrologie ORSTOM »).

dépasser dans 80 % des années, se situe plutôt autour de 450 mm. Ceci veut dire que l'on aura des difficultés d'alimentation hydrique dans plus de 20 % des cas, et d'autant plus que, sur la quantité de pluie indiquée, une part non négligeable peut soit ruisseler, soit percoler plus bas que la limite d'extraction racinaire de la culture. Très souvent, en effet, toute la pluviométrie reçue n'est pas entièrement stockée dans le sol, ni utilisable avec profit par la culture. Inversement, pour une variété d'arachide de 90 jours, dont les besoins sont limités à 400 mm, si le seuil de 450 mm dans 80 % des années assure une bonne sécurité hydrique, il ne faut pas oublier que, dans 80 % des années, on bénéficiera de plus de 450 mm : il y aura donc des risques non négligeables de lessivage, de récolte sous pluie, de moisissure des fanes d'arachide, de germination des semences non dormantes, etc.

Simulation du bilan hydrique des cultures

Nous avons vu par les exemples précédents que, s'il existe des procédés plus rationnels que par le passé pour

mieux appréhender les problèmes d'alimentation hydrique des cultures, ce n'est pas encore la panacée, loin de là. C'est pourquoi nous nous acheminons vers la simulation complète du bilan hydrique des cultures à partir des connaissances de milieu suivantes : pluviométrie, demande évaporative et besoins en eau des plantes, caractéristiques hydrodynamiques d'infiltration, de ressuyage et percolation, de rétention de l'eau, d'évaporation et d'utilisation de l'eau (modalités d'enracinement et extraction hydrique) pour les principaux types de sol du Sénégal (44 à 61). Sans vouloir détailler trop la méthode de simulation utilisée (24, 32, 35, 42), qui fera l'objet prochainement d'un autre article, nous pouvons préciser que les facteurs suivants interviennent dans le bilan :

- données pluviométriques quotidiennes accumulées pendant une période d'au moins une trentaine d'années ;
- stock en eau utile du sol, qui dépend du type de sol et des modalités d'enracinement de la culture ;
- besoins en eau de la culture (ETM ou ETRM), en suivant le processus décrit ci-dessus ;

– évapotranspiration réelle (ETR), réduite par rapport à ETM, en cas de stress.

On peut déduire de ces données :

- le taux de satisfaction des besoins (par exemple de cinq en cinq jours, tout au long du cycle de végétation) et donc les périodes de déficit hydrique ;
- le drainage en dessous d'une profondeur d'enracinement maximum, et par là les périodes d'alimentation hydrique excédentaire ; ces périodes correspondant à une forte pluviosité et souvent à une insolation réduite. la photosynthèse peut de son côté être médiocre ;
- les durées totales d'alimentation hydrique correcte.

Cette analyse est de la plus grande importance pour déterminer, sur un grand nombre d'années, les probabilités de réussite des diverses variétés, en tenant compte non seulement de l'aspect quantitatif des besoins, mais encore des durées de cycle compatibles avec les durées d'alimentation hydrique satisfaisante. La Division recherche-développement de l'IRAT a les méthodes et moyens informatiques voulus pour faire ce travail, dont les applications déjà nombreuses concernent l'alimentation hydrique du riz pluvial, du sorgho, du maïs, du mil et de l'arachide, entre autres cultures.

Les applications de la simulation du bilan hydrique sont nombreuses tant dans le domaine de l'agriculture pluviale stricte : explication du rendement, chances de réussite des cultures, cartes d'adaptation pédo-pluviométrique (zonage), que dans celui de l'agriculture irriguée en totalité ou en complément des pluies : modalités d'irrigation, doses et fréquences, valorisation de l'eau, etc.

Cependant, la simulation du bilan hydrique est un travail long et minutieux qui demande des moyens importants pour la compilation des données, leur traitement informatique et surtout l'interprétation et l'exploitation des résultats sous une forme utilisable au niveau du développement rural.

Conclusion et bibliographie

Une documentation relativement exhaustive pour le Sénégal, moins complète pour les autres Etats d'Afrique de l'Ouest francophone, a été rassemblée. Les documents signalés ont trait surtout aux différents paramètres qui entrent en jeu dans la démarche de détermination des besoins en eau. Cependant, nous avons cité aussi des publications qui concourent à une meilleure connaissance agroclimatique du milieu et à une utilisation plus rationnelle des résultats portant sur les besoins en eau. On remarquera ainsi de nombreux articles traitant de l'eau dans le sol et de l'alimentation hydrique des cultures.

Connaître les besoins en eau d'une culture ne constitue pas une fin en soi. Il faut savoir ensuite si les apports (pluie, irrigation), le stockage de l'eau dans le sol, son

extraction par les racines et son transit dans la plante elle-même, permettent une bonne satisfaction de ces besoins. La satisfaction des besoins hydriques n'est pas seulement d'ordre quantitatif ; elle recouvre aussi des exigences d'ordre physiologique dont il ne faudrait pas sous-estimer le rôle.

Le facteur « eau » n'est qu'une des composantes de l'élaboration du rendement potentiel (tant de la matière sèche que du grain) et son importance ne doit pas nous faire négliger les autres facteurs.

Agroclimatologie et pluviométrie

- 1 – INSTITUT SÉNÉGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES, 1964-1981. Rapports annuels d'activité « météorologie des stations ISRA ». Bambey, CNRA.
- 2 – AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE. 1967. Quelques données agro-pluviométriques de seize stations du Sénégal. Période 1932-1965. Dakar, Ministère du Plan et du Développement, 144 p.
- 3 – SECK M., 1969. Les orages dans la région occidentale de l'Afrique. Thèse, faculté des sciences, université de Paris, 63 p.
- 4 – SECK M., 1970. Étude des principaux facteurs agrométéorologiques au Sénégal. L'Agron. trop., 25 (3) : 241-276.
- 5 – RIJKS D., 1970-1975. Données météorologiques recueillies à Richard-Toll, Guédié, Samé, Kaédi. Rapports annuels. Dakar, FAO-OMVS.
- 6 – WILLIOT P., 1971. Quelques résultats sur la pluviométrie des stations de Vélingara, Kolda et Sédhieu-Séfa. Application à l'agriculture. Bambey, CNRA-IRAT, 9 p.
- 7 – RIJKS D., 1972. Études portant sur l'analyse de la régularité des pluies, dans le bassin du fleuve Sénégal. Dakar, FAO-OMVS, 11 p. et 24 p. ann.
- 8 – BIRIE-HABAS J., DANCETTE C., 1973. Projet d'études pluviométriques appliquées à l'agriculture sénégalaise. A - Analyse fréquentielle des pluies. B - Application possible : station d'avertissements agrométéorologiques. Bambey, CNRA, IRAT.
- 9 – LANNOY G. (de), 1973-1980. Données météorologiques recueillies au Centre pour le développement de l'horticulture à Cambérène. Rapports annuels. Cambérène, CDH-DGPA-MDR, ISRA.
- 10 – CORNET A., 1975-1978. Données météorologiques dans les différents points d'étude. Rapports annuels. Dakar, ORSTOM.
- 11 – DANCETTE C., SOW C.S., 1976. Analyse agroclimatique de la saison des pluies en vue de faciliter les choix de la recherche et du développement agricoles. Le cas de Niour du Rip. Bambey, CNRA-ISRA, 27 p.
- 12 – SAGNA A., 1976. Le bilan des pluies au Sénégal de 1944 à 1973. Dakar, faculté des lettres et sciences humaines, département de géographie, 267 p.
- 13 – INSTITUT SÉNÉGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES - MÉTÉOROLOGIE NATIONALE, 1977-1982. Point sur la pluviométrie et la campagne agricole au Sénégal. Bambey, ISRA. Dakar Yoff, Météorologie nationale.
- 13 – MÉTÉOROLOGIE NATIONALE (Direction de la), 1978. Rapport sur la campagne des pluies provoquées au Sénégal. Dakar, Ministère de l'Équipement, 16 p.

Demande évaporative, besoins en eau et adaptation des cultures en Afrique de l'Ouest tropicale

- 15 - SCHOCH G., 1966. Comparaison de quelques formules d'évapotranspiration potentielle au Sénégal. *In* : IRAT-CRA de Bambey. Rapport de campagne 1965 de la section de bioclimatologie. Bambey, CNRA, 13 p.
- 16 - COCHEMEJ., FRANQUIN P., 1967. Une étude d'agroclimatologie de l'Afrique sèche au sud du Sahara en Afrique occidentale. Projet conjoint d'agroclimatologie FAO-UNESCO-WMO. Rome, FAO, 326 p.
- 17 - BERNARD E.A., 1967. La détermination des pertes d'eau par évapotranspiration dans les projets d'aménagement intégré du fleuve Sénégal. Rapport de mission avril 1967.
- 18 - SCHOCH P.G., DANCETTE C., 1968. Utilisation de l'évaporomètre Piche pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle. *L'Agron. trop.*, 23 (9) : 967-973.
- 19 - GILLET N., JENNY F., 1968-1969. Station expérimentale d'hydraulique agricole (SEHA) de Mogtedo, Haute-Volta. Rapport de fin de campagne 1967-1968. Paris, IRAT, 1968, t. 1, 164 p; t.2, 102 p; t.3, 59 p. Rapport de fin de campagne 1968-1969, Paris, IRAT, 1969, t.1, 153 p; t.2, 104 p; t.3, 52 p.
- 20 - CHAROY J., 1971. Les cultures irriguées au Niger. Résultats de sept années de mesures et d'expérimentations (1963-1970). *L'Agron. trop.*, 36 (9) : 979-1002.
- il - RIOU C., 1972. Étude de l'évaporation en Afrique centrale. Contribution à la connaissance des climats. Thèse de doctorat, Paris, ORSTOM, 227 p.
- 22 - DANCETTE C., 1974. Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal. *In* : Isotopes and radiation techniques in soil physics and irrigation studies. Vienne, AIEA, 1974, p. 351-371.
- 23 - ROCHE M., *et al.*, 1974. Évapotranspiration et déficits hydriques. *In* : Étude méthodologique pour l'utilisation des données climatologiques de l'Afrique tropicale. Paris, CIEH-Ministère de la Coopération-ORSTOM, 76 p.
- 24 - FOREST F., 1974. Bilan hydrique et prospective décadaire des besoins en eau des cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. Paris, Ministère de la Coopération-ORSTOM, Cahiers pédagogiques et opérationnels (1 cahier pédagogique de 3.5 p. et 60 cahiers opérationnels de 75 p.).
- 25 - DOORENBOS J., PRUITT W.O. 1975. Crop water requirements. Irrigation and drainage paper n° 24, Rome, FAO, 179 p.
- 26 - KALMS J.-M., VALET S., 1975. Détermination des besoins en eau de différentes cultures vivrières et industrielles, dans les conditions pédoclimatiques des terrasses du Niger à Tillabery. Niamey, INRAN, 45 p.
- 27 - DANCETTE C., 1976. Cartes d'adaptation à la saison des pluies des mils à cycle court dans la moitié nord du Sénégal. *In* : Comité consultatif AIEA, Bambey, Sénégal, 10-14 novembre 1975. Vienna, FAO-AIEA, p. 19-47 (Techn. doc. n° 192).
- 28 - DANCETTE C., 1979. Besoins hydriques des cultures pluviales et politiques générales de l'eau en agriculture, dans les zones centre et nord du Sénégal, Niamey, CILSS, Programme AGRHYMET, 37 p.
- 29 - DANCETTE C., 1976. Mesures d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. Orientation des travaux portant sur les besoins en eau des *cultures. *L'Agron. trop.*, 31 (4) : 321-338.
- 30 - RIJKS D., 1976. Agrométéorologie. Rome, PNUD, FAO, OMVS-AGP/REG 114, Rapport technique n° 2, 171 p.
- 31 - RIJKS D., 1974. Besoins en eau des cultures. Compte rendu des travaux réalisés à Guédé et à Kaédi, 1971-1974. Dakar, OMVS, 23 p. et 25 tabl. (DT n° 130).
- 32 - FRANQUIN C., FOREST F., 1977. Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *L'Agron. trop.*, 32 (1) : 7-11.
- 33 - DANCETTE C., 1978. Besoins en eau et adaptation du mil à la saison des pluies au Sénégal. Bambey, ISRA-CNRA, 17 p.
- 34 - DANCETTE C., 1978. Estimation des chances de réussite de trois types d'arachide (90,105 et 120 jours) à partir de l'analyse pluviométrique. Programme Brunet Moret (ORSTOM) : le cas de Bambey. Bambey, ISRA-CNRA, 16 p.
- 35 - CHAROY J., FOREST F., LEGOUPIL J.-C., 1978. Évaluation fréquentielle des besoins d'irrigation pour l'optimisation d'un prolet d'aménagement hydro-agricole. Périmètre de Sona, Niger, DGRST-GERDAT-IRAT-INRAN, 70 p.
- 36 - HALL A.E., DANCETTE C., 1978. Analysis of fallow farming systems in semi-arid tropics using a model to simulate the hydrologic budget. *Agron. J.*, 70 : 816-823.
- 37 - DANCETTE C., 1979. Principales contraintes hydriques et pédoclimatiques concernant l'adaptation des cultures pluviales dans la moitié sud du Sénégal. *In* : Première conférence annuelle sur la recherche, IITA, Ibadan, Nigeria, 15-19 octobre, 24 p. Bambey, ISRA-CNRA.
- 38 - DANCETTE C., 1979. Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. *L'Agron. trop.*, 34 (4) : 331-355.
- 39 - VIRMANI S.M., REDDY S.L., BOSE M.N.S., 1980. A handbook on the rainfall climatology of West Africa : data for selected locations. Patancheru, ICRISAT, 53 p. (Information bulletin n° 6).
- 40 - KALMS J.-M., 1980. L'évapotranspiration réelle maximale (ETM) du riz pluvial en région centre de Côte d'Ivoire. Bouaké, IDESSA, 16 p.
- 41 - DANCETTE C., 1981. Niébé et valorisation des ressources pluviales dans certains systèmes agricoles sénégalais. *In* : Atelier OUA-CSTR sur les systèmes de production agricole, PC 31 - SAFGRAD, Dakar, Sénégal, 12-15 janvier, 11 p.
- 42 - FOREST F., DANCETTE C., 1982. Simulation du bilan hydrique de l'arachide en vue d'une meilleure adaptation de cette culture aux conditions tropicales. *In* : Symposium, Conseil africain de l'arachide (CAA), Banjul, Gambie, 7-11 juin, 43 p.
- 43 - IMBERNON J., AUCKENTHALER J. Analyse critique de deux référentiels traduisant la demande évaporative en région tropicale : ETP selon Penman et évaporation du bac A. Montpellier, IRAT, Division recherche-développement. *A paraître*.

Eau du sol, extraction racinaire

- 44 - CHARREAU C., 1961. Dynamique de l'eau dans deux sols du Sénégal. *L'Agron. trop.*, 16 (5) : 504-561.
- 45 - INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES TROPICALES, 1969. Étude *in situ* des caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des principaux types de sol du casier sucrier de 120 hectares de Richard-Toll. Paris, IRAT, 121 p.

- 46 - DANCETTE C., 1970. Détermination au champ de la capacité de rétention après irrigation, dans un sol sableux du Sénégal. Intérêt agronomique de cette mesure et application à une culture d'arachide. L'Agron. trop., 25 (3) : 225-240.
- 47 - NICOUR., SEGUY L., HADDAD G., 1970. Comparaison de quatre variétés de riz pluvial en présence ou absence de travail du sol L'Agron. trop., 25 (8) : 639-659.
- 48 - DANCETTE C., 1973. Principales études de l'IRAT au Sénégal, portant sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et sur leur aptitude à l'irrigation. L'Agron. trop., 26 (9) : 887-893.
- 49 - DANCETTE C., MAERTENS C., 1974. Méthode d'estimation de la capacité au champ pour l'eau, à partir du PF3. Sciences du Sol, bull. AFES (3) : 165-171.
- 50 - DANCETTE C., NICOUR R., 1974. Économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal. Bambey, IRAT-CNRA, 20 p.
- 51 - PIERI C., 1977. Minéralogie et propriétés de surface de deux sols sableux du Sénégal. ISRA-CNRA de Bambey. L'Agron. trop., 32 (2) : 339-351.
- 52 - VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S., THONY J.L., 1978. Méthode de caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique (sols dior et diéri). Ann. Agron., 29 (1) : 1-36.
- 53 - HAMON G., 1978. Caractérisation hydrodynamique *in situ* de deux sols de culture de la région centre-nord du Sénégal (sols dior et dek). Bambey, ISRA-CNRA, 27 p.
- 54 - HAMON G., 1978. Caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol de culture en moyenne Casamance (sol beige de plateau). Bambey, ISRA-CNRA, 14 p.
- 55 - IMBERNON J., 1979. Caractérisation hydrodynamique *in situ* d'un sol de la région de Louga (sol dunaire très sableux). Bambey, ISRA-CNRA, 18 p.
- 56 - IMBERNON J., 1979. Dynamique de l'eau et variabilité spatiale du sol (sol dior). Bambey, ISRA-CNRA, 27 p.
- 57 - DANCETTE C., HAMON G., VACHAUD G., 1979. Étude comparée de la dynamique de l'eau en sol sableux nu et cultivé. Modalités d'alimentation hydrique du mil et de l'arachide en conditions pluviales déficitaires: au Sénégal. In : International Symposium on the use of isotopes and radiation in research on soil-plant relationships, Colombo, Sri Lanka, 11-15 décembre 1978. Vienna, IAEA, SM-235/17, 24 p.
- 58 - HAMON G., 1980. Mise en œuvre et critique de méthodes de caractérisation hydrodynamique de la zone non saturée du sol. Application aux sols de culture du Sénégal. Thèse, université scientifique et Institut National Polytechnique de Grenoble. 136 p.
- 59 - BARET F., BEYE M., 1980. Caractérisation hydrodynamique d'un sol de la région de Bambey. Bambey, ISRA-CNRA, 26 p.
- 60 - CHOPART J.-L., 1980. Étude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse de doctorat, spécialité : production végétale et qualité des produits (n° 10), Institut National Polytechnique de Toulouse, 159 et 45 p.
- 61 - BARET F., 1980. Caractérisation hydrodynamique d'un sol de la région de Nioro du Rip. Bambey, ISRA-CNRA, 19 p.