

Critique des recherches sur le bilan hydrique en zone soudano-sahélienne

C. DANCETTE

AGRHYMET, BP 11011, Niamey, Niger

Résumé A partir de 1960, de gros efforts ont été consacrés par la recherche à l'amélioration des termes du bilan hydrique des cultures dans les pays francophones de la zone soudano-sahélienne. Dans une première étape, les travaux ont porté essentiellement sur la détermination de la demande évaporative d'ordre climatique (1960-1967). Dans une seconde étape, on s'est intéressé surtout aux besoins en eau et aux conditions d'alimentation hydrique des principales espèces et variétés cultivées (1968-1977). Pendant la troisième étape, de nombreuses synthèses des résultats acquis sur le terrain ont permis d'élaborer des modèles de simulation très utiles pour une meilleure adaptation des opérations culturales et des variétés cultivées, aux conditions pédoclimatiques (1978-1985). Depuis 1985, l'utilisation des bilans hydriques simulés, de façon opérationnelle à des fins de diagnostic hydrique (suivi des cultures et alerte rapide) s'est généralisée. En retour, de nombreuses lacunes et points d'interrogation ont été mis en évidence, que ce soit au niveau des données de base et de leur traitement en vue du calcul de l'ETP, au niveau d'une meilleure connaissance des plantes (physiologie), ou au niveau des conditions de culture en milieu paysan. Il s'agit maintenant de bien identifier les faiblesses des méthodes utilisées, et d'y remédier de façon concertée, en respectant les priorités qui s'imposent.

INTRODUCTION

Le bilan hydrique des cultures fait appel à un ensemble de connaissances difficiles à mobiliser au moment voulu et avec un degré de précision suffisant. Le bilan hydrique que l'on souhaite établir en vue de résoudre de nombreux problèmes relatifs à la zone soudano-sahélienne, n'est pas un assemblage de notions abstraites, mais au contraire d'éléments précis, bien identifiés et qu'il convient de déterminer avec rigueur. Comme pour n'importe quel type de bilan impliquant des entrées, des sorties et un stockage, chaque utilisateur accorde la priorité à tel terme du bilan plutôt qu'à tel autre; toutefois l'équation générale rassemblant les différents termes entre eux et en régissant les rapports, reste fondamentalement la même. Certains s'intéresseront surtout aux transferts hydriques entre la plante et l'atmosphère, d'autres à ce qui transite dans les organes végétaux (aériens ou souterrains), d'autres aux transferts hydriques entre la plante et le sol, d'autres ce qui est stocké dans le

sol, d'autres à ce qui échappe au sol: en surface à cause du ruissellement, en profondeur à cause de la percolation. Certains hydrologues s'intéresseront surtout à l'eau qui aura échappé à l'infiltration dans le sol et aux plantes, mais qui ira en revanche alimenter les cours d'eau et les retenues de surface. D'autres hydrologues s'intéresseront au contraire à l'eau qui se sera infiltrée et qui aura échappé aux racines des plantes, pour percoler jusqu'aux nappes.

On ne s'étonnera pas si les agronomes s'intéressent surtout à l'eau qui aura été utilisée par la plante et qui aura contribué à en assurer une production utile pour les multiples usages que nous savons. Il est normal aussi que certains conflits d'intérêt concernant la valorisation de l'eau, se fassent jour compte tenu du type de spéculation agricole visé : le cultivateur pourra très bien accorder la priorité à l'eau utilisée par une culture annuelle d'enracinement relativement superficiel, alors que le forestier souhaitera que le maximum d'eau soit épargné par les mêmes cultures annuelles ou par les mauvaises herbes et puisse être utilisé par ses arbres en vue d'une production de fruits, de fourrage ou de tout autre matériel.

Il sera certainement question au cours de ce colloque des grands équilibres agro-socio-économiques dans lesquels le bilan hydrique est impliqué mais ce ne sera pas l'objet de cette communication. Ce que je voudrais, c'est surtout montrer comment, compte tenu des besoins ressentis au niveau agronomique et plus particulièrement au niveau des cultures annuelles, les idées et les activités de la recherche ouest africaine ont évolué au cours du dernier quart de siècle (en gros 1965-1990). Cette revue critique mettra certainement en relief des lacunes. Notre but n'est pas de vouloir à tout prix expliquer ou minimiser les points faibles, mais au contraire de réfléchir entre nous et si possible de prendre des résolutions précises et fermes, en vue de remédier aux carences. Encore faut-il que l'ensemble des participants considère si le moment est venu d'apporter les améliorations et les mesures correctives voulues, compte tenu de la demande des utilisateurs, de l'intérêt scientifique des travaux envisagés, des moyens disponibles sur les plans humain et matériel. Il est probable que certaines priorités devront être fixées, car il est évident que dans le domaine qui nous concerne, beaucoup reste à faire et que les moyens dont nous disposons restent par trop limités.

Demande évaporative d'ordre climatique

Il faut bien reconnaître qu'au début des années 60, les agronomes se contentaient le plus souvent d'une estimation très sommaire des besoins en eau des cultures. Ces derniers étaient considérés comme étant peu différents d'une espèce ou d'une variété à l'autre et la notion d'ETP (évapotranspiration potentielle) qui représentait en quelque sorte une enveloppe des besoins spécifiques de chaque plante paraissait suffisante pour satisfaire dans une première étape aux besoins de la recherche et du développement agricoles (dimensionnement d'ouvrages hydro-agricoles par exemple).

La plupart des bioclimatologistes ont commencé leur carrière en faisant de multiples calculs d'ETP à partir de formules nombreuses et variées et en passant beaucoup de temps à comparer les résultats entre eux; ils étaient fort

contents lorsque les différences entre les ETP mensuelles ne dépassaient pas plus ou moins 20%. La référence la plus souvent retenue était déjà la formule de Penman, mais beaucoup lui reprochaient sa relative complexité, les nombreuses approximations et les calculs intermédiaires rendus nécessaires lorsque toutes les données voulues n'étaient pas disponibles. Maintenant, il faut reconnaître qu'avec les moyens informatiques dont nous disposons, le calcul de l'ETP Penman est devenu un petit exercice très simple et rapide qui nous a fait oublier le temps passé à déchiffrer les notices d'utilisateur et d'interprète, à jongler avec les innombrables tableaux ou abaques plus ou moins bien adaptés à nos besoins locaux.

Les calculs et comparaisons de formules ayant conduit de nombreux agronomes à un certain scepticisme, il y a eu une tendance des agronomes de la recherche appliquée à adopter plutôt les mesures se rapprochant des conditions réelles du milieu: mesures d'évaporation d'eau libre en bac normalisé classe A, ou en bac enterré etc., mais cela n'était pas encore suffisamment proche de la réalité des plantes cultivées. On a donc voulu mesurer l'ETP sur des plantes herbacées entretenues et tondues d'une certaine manière, avec le souhait pas toujours formulé, de trouver l'espèce pouvant constituer la meilleure référence possible et dont la culture aurait pu se faire partout facilement. Qui n'a pas alors entretenu sa (ou ses) batterie(s) d'évapotranspiromètres, au milieu d'un anneau de garde (de dimension variable et discuté etc.) engazonné, en utilisant, qui le *Digitaria decumbens*, qui le *Cynodon dactylon*, qui le ray-grass, qui le *Paspalum notatum* etc.? Les comparaisons ont proliféré cette fois entre les mesures effectuées avec certains gazons plutôt que d'autres, entre ces mesures et les multiples formules dont nous avons parlé plus haut, entre ces mesures et les évaporations d'eau libre (bacs normalisés classe A ou enterrés, évaporomètres Piche, etc.).

Il semble bien que cette étape soit terminée et qu'une certaine unanimité se dégage en faveur de l'ETP calculée avec la formule de Penman. Arrivés à ce stade, et sachant que la détermination de l'ETP reste indispensable pour avancer davantage dans notre démarche de l'établissement d'un bon bilan hydrique, nous ferons une première halte et poserons les questions suivantes:

- La mise au point d'une bonne référence relative à la demande évaporative d'ordre climatique représente-t-elle encore un problème important et le calcul de l'ETP par la formule de Penman ne convient-il pas à la plupart de nos besoins?
- Si un consensus se dégage pour l'utilisation de la formule de Penman, ne conviendrait-il pas de mieux standardiser la méthode de calcul retenue, au moins à l'échelle de la zone soudano-sahélienne?

Nous retiendrons les efforts méritoires déjà consacrés à ce problème par AGRHYMET et le Centre Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) (André *et al.*, 1989); encore conviendrait-il d'associer à ces efforts l'ICRISAT, l'ORSTOM, l'IRAT-CIRAD, les instituts de recherche nationaux concernés, etc. La liste des organismes scientifiques concernés étant loin d'être exhaustive.

- N'est-t-il pas urgent de faire un très gros effort quant à la

détermination des données de base, au niveau des stations et réseaux météorologiques nationaux? La mesure de la vitesse du vent est-elle bien effectuée comme il le faudrait? *A* quoi ont servi les mesures de rayonnement global qui auraient dû permettre de déterminer presque partout avec une précision suffisante, les coefficients *A* et *B* de la formule d'Angstrom reliant ce rayonnement global au rayonnement extra-terrestre de courte longueur d'onde reçu à la limite de l'atmosphère et aux durées d'insolation journalière mesurée et d'insolation maximale théorique? Ne reste-t-il pas des points mal définis, concernant la façon de déterminer les moyennes de température, d'humidité relative et de tension de vapeur, selon que l'on utilise des données horaires, tri-horaires, trois données par jour ou un maxi + mini/2 ?

Ce problème de moyenne ne devra-t-il pas être reconsidéré lorsqu'on disposera de stations automatiques effectuant par exemple des mesures toutes les cinq ou 10 minutes ?

Besoins en eau des principales cultures tropicales – contrôles au champ de l'alimentation hydrique

Très rapidement, les agronomes oeuvrant en Afrique tropicale ont pensé que la détermination de l'ETP, que ce soit par calcul ou par mesure, ne suffisait pas, et qu'il fallait se rapprocher davantage de la plante cultivée, de ses caractéristiques propres et de ses conditions de culture. L'ETP mesurée sur un gazon dit "de référence" n'était jamais qu'une mesure des besoins en eau d'une espèce herbacée bien particulière et traitée de façon très particulière aussi. Une plante cultivée annuelle n'a qu'une durée de vie limitée (60 jours pour les variétés les plus hautes de niébé par exemple, à 150 jours pour une variété tardive de sorgho) et la culture n'est en fait qu'un complexe sol-plante passant par une phase de sol nu, semis-levée, phase d'installation; ensuite, une phase de couverture de plus en plus grande du sol par une plante dont les besoins hydriques deviennent de plus en plus élevés; puis par une phase de vieillissement, de jaunissement et même chute des feuilles se traduisant bien sûr par des besoins en eau limités. Peu de chose à voir dans tout cela avec un gazon pérenne bien installé et couvrant totalement le sol. Les idées ont donc évolué rapidement, on s'est intéressé à chaque plante et même variété; l'ETP mesurée ou calculée gardait toutefois une très grande importance puisqu'elle servait de référence climatique, permettant de raccorder les besoins en eau d'une plante donnée à un moment précis de l'année, au cours d'une année précise, dans un lieu particulier, aux conditions climatiques du moment et du lieu, et de procéder par la suite aux nécessaires généralisations, extrapolations etc.

Nous insisterons sur l'importance des travaux conduits après les années 50, par Bernard et Dupriez, en zone plus humide certes puisqu'il s'agissait des travaux de l'INEAC au Bas-Congo (Dupriez, 1964); ces travaux ont servi de modèle méthodologique à des nombreuses expérimentations démarrées par la suite en zone soudano-sahélienne entre 1965 et 1980.

L'évapotranspiration maximale d'une culture donnée était alors mesurée en cuve de végétation (évapotranspiromètre) et rapportée aux mesures d'évaporation en bac, ou d'ETP gazon. On déterminait ainsi les coefficients de culture que vous connaissez tous et qui permettent donc de généraliser les résultats obtenus ponctuellement à une zone climatique donnée, en tenant compte des variations de demande évaporative dans le temps et dans l'espace.

Nous citerons les nombreux résultats obtenus alors par l'IRAT, dans les stations expérimentales d'hydraulique agricole (SEHA) de Tarna au Niger et Mogtédo au Burkina Faso, au CNRA de Bambey au Sénégal, par l'OMVS/FAO dans les stations de Guédé et Richard Toll au Sénégal, Kaedi en Mauritanie et Samplu Mali (Charoy, 1971; Dancette, 1974, 1976, 1979, 1983; Rijks, 1972, 1974) etc.

A Tarna par exemple, une quinzaine de batteries de deux cuves de végétation chacune, installées dans des anneaux de garde suffisamment grands étaient utilisées et les résultats de mesure étaient appliqués à des essais d'irrigation conduits sur de grandes parcelles voisines. A Bambey, on ne disposait que de huit cuves, mais très rapidement, les mesures en cuve avaient pu être remplacées par des bilans hydriques effectués au milieu de grandes parcelles soigneusement irriguées, à partir de mesures d'humidité du sol effectuées avec des humidimètres à neutrons jusqu'à une profondeur de 4 m; en misant sur les faibles pluies enregistrées, sur une irrigation sans excès, sur des profils se situant au point de flétrissement permanent en début de campagne et enfin sur des contrôles de flux (tensiomètres), d'excellents bilans hydriques pouvaient être effectués et remplaçaient très utilement les évapotranspiromètres toujours quelque peu perturbateurs du milieu.

Nous pouvons dire que nous possédons en Afrique soudano-sahélienne et plus précisément en Afrique de l'Ouest, une connaissance relativement importante des besoins en eau des principales cultures vivrières ou industrielles et aussi des cultures maraîchères. Citons entre autres, les connaissances concernant le mil (120, 90, 75 jours), l'arachide (120, 105, 90 jours), le niébé (60 à 125 jours), le sorgho (90 à 150 jours), le riz pluvial (110 à 145 jours), le maïs (100 à 110 jours), le cotonnier (120 à 130 jours), le soja (110 jours) et même la jachère d'herbe sur 100 jours. L'inventaire complet resterait peut-être à faire pour les cultures maraîchères, mais on sait toutefois si les chercheurs disposent d'un assez bon référentiel (tomates, oignons, piments, choux, pomme de terre, patates douces etc.). La canne à sucre aussi a été bien étudiée. Les Figs 1 à 6 et le Tableau 1 donnent une idée du genre de résultats qui sont disponibles.

Au terme de cette seconde étape, nous pouvons nous poser les questions suivantes:

- Les besoins en eau des cultures tropicales sont-ils suffisamment bien connus, sachant qu'il apparait toujours de nouvelles variétés?
- La différenciation des espèces et variétés est-elle toujours bien justifiée en ce qui concerne leurs besoins quantitatifs en eau, sachant que des différences parfois minimes peuvent être imputées souvent à des conditions de milieu, de techniques culturales, d'expérimentation même, plus qu' à des différences spécifiques ou variétales d'ordre physiologique?

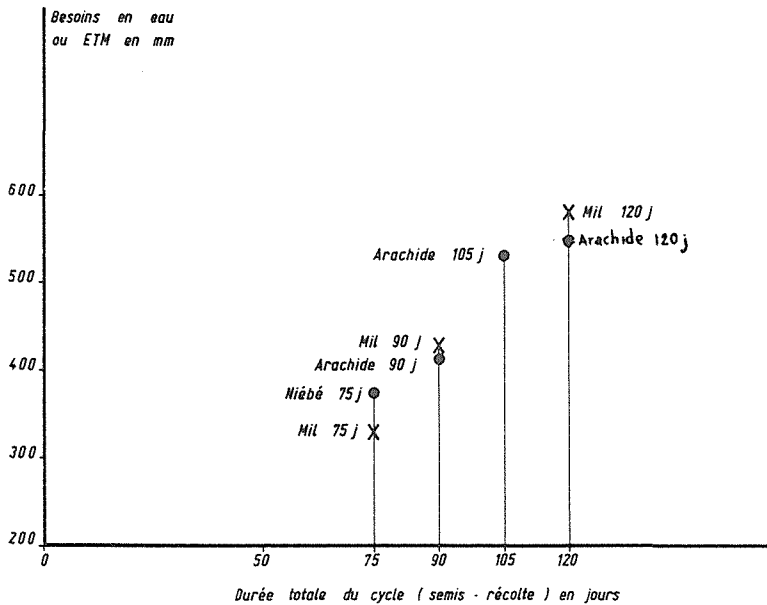


Fig. 1 Les besoins en eau des cultures au Sénégal sont proportionnels à la longueur du cycle de végétation.

En bref, ne peut-on pas simplifier beaucoup ces résultats en les regroupant par type de plantes plus ou moins bien adaptées à la sécheresse, type de port et architecture, taux de couverture en fonction du stade d'avancement de la culture etc? voir Doorenbos & Pruitt (1984).

- Une quantification simplifiée des besoins en eau étant admise, ne faudrait-il pas plutôt développer davantage les études relatives à la résistance physiologique à la sécheresse? Par exemple à un stade donné: phase végétative, phase de reproduction sexuée (y compris l'initiation florale), phase de maturation etc., quelle est la limite de stress hydrique supportable pour que ce stress provoque la mort de la plante ou un traumatisme tel que le rendement final chute de $x\%$, voire ne devienne nul? ou surtout pour qu'il ne provoque aucune chute de rendement final significative?

On aurait pu trouver, par exemple qu'un mil arrivé à la nième décade de végétation, aurait un besoin hydrique maximal de 3.5 mm jour^{-1} en cours de phase végétative, mais qu'il pourrait très bien supporter 1.5 mm jour^{-1} de consommation, sans que le rendement final en grain soit affecté, provoquant peut-être en contre partie, un allongement de la durée du cycle de n jours etc. ou le même mil qui aurait un besoin maximum de 6.5 mm jour^{-1} en cours d'épiaison pourrait à la limite se contenter de 5 mm jour^{-1} sans que le rendement en grain final soit affecté significativement, alors qu'à 4.0 mm jour^{-1} , il perdrait déjà 25% de son rendement potentiel, 50% avec 3 mm jour^{-1} de moyenne, 100% de rendement avec une moyenne de consommation de 2.5 mm jour^{-1} pendant une décade etc.

Valeurs moyennes et extrêmes des besoins en eau du mil à Bambey, totaux en mm

	ETRM minimale	ETRM moyenne	ETRM maximale
Mil Sanio de 120 j	544	598	628
Mil Souna de 90 j	380	418	460
Mil nain de 75 j	304	345	390

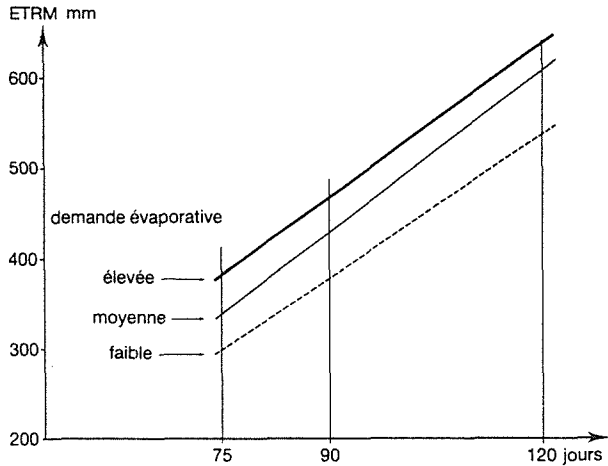


Fig. 2 Variation des besoins en eau globaux du mil, en fonction de la durée du cycle végétatif et de la demande évaporative.

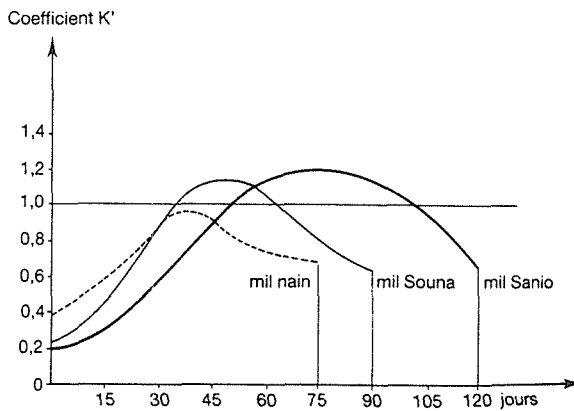


Fig. 3 Evolution des coefficients cultureux $K = ETRM/Ev.bac$ au cours du cycle de trois variétés de mil de 75, 90 et 120 jours:

- mil Sanio de 120 jours - K' global = 0.76;
- mil Souna de 90 jours - K' global = 0.73;
- mil nain de 75 jours - K' global = 0.65.

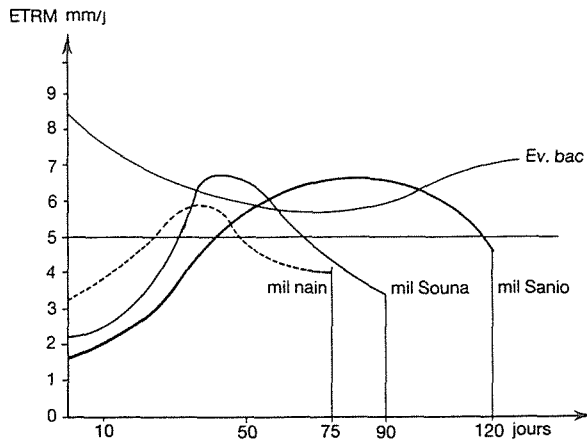


Fig. 4 Exemple de détermination des besoins en eau (ETRM) de trois variétés de mil, compte tenu de l'évaporation bac moyenne (Ev.bac) sur 10 ans. A partir du 1 juillet, à Bambey, Sénégal.

ETRM globale Sanio (120 jours) = 596 mm;

ETRM globale Souna (90 jours) = 420 mm;

ETRM globale nain (75 jours) = 343 mm.

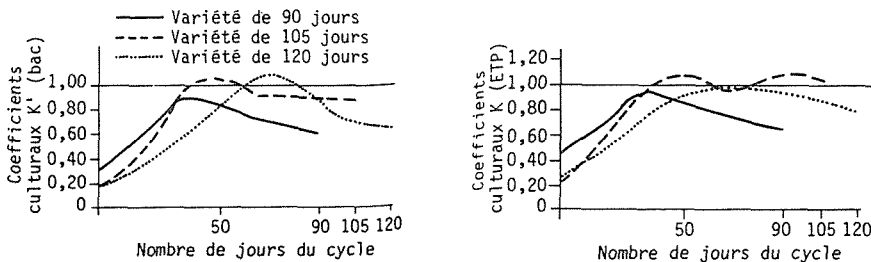


Fig. 5 Variation des coefficients de culture d'arachide par rapport (a) au bac normalisé classe A, et (b) à l'ETP calculée (Penman) (Dancette & Forest, 1985).

MISE AU POINT DES METHODES PERMETTANT DE GENERALISER DES CONNAISSANCES PONCTUELLES DE BESOINS EN EAU

Pour toutes les études de zonage de l'adaptation des plantes cultivées ou de certaines techniques culturales, on ne peut pas se contenter de connaissances ponctuelles de besoins en eau. Compte tenu du fait que ces mesures sont relativement délicates et coûteuses, elles sont en effet plutôt rares et très localisées dans le temps et dans l'espace. La référence climatique qui permet la généralisation des résultats à des sites et des périodes différentes, ne peut être qu'une mesure ou un calcul régulier effectués de façon continue dans

des sites beaucoup plus nombreux: les chercheurs des zones intertropicales ont utilisé, comme nous l'avons rappelé plus haut, des mesures d'évaporation Piche, des mesures d'évaporation en bac, des mesures d'ETP gazon et enfin de nombreux calculs de formules diverses d'ETP.

Nous rappellerons que beaucoup de travaux ont porté sur ce sujet et qu'il existe de nombreuses relations de transfert entre l'évaporation mesurée de différentes manières, entre l'évaporation et les mesures d'ETP, entre ces mêmes mesures et les calculs d'ETP, et même ce qui peut avoir un grand intérêt pratique de simplification, entre l'ETP et la pluviométrie d'une saison donnée: Bernard (1956), Bouchet (1964), Brochet & Gerbier (1968), Christiansen & Asce (1968), Cocheme & Franquin (1967), Dagg (1969), Dancette (1976), Gleizes (1964), Gommes (1985), Penman (1948) bien sûr, Rijks (1972), Riou (1972), Ritjema (1966), Roche & Girard (1974) etc. pour ne citer que quelques auteurs. La tendance actuelle serait plutôt de tout ramener l'ETP calculée par la formule de Penman.

Ainsi les besoins en eau ont pu être calculés, pour la période que l'on voulait, à l'échelle souhaitée: que ce soit celle d'une région administrative, d'un pays entier ou d'un ensemble de pays africains de la zone soudano-sahélienne. AGRHYMET par exemple détermine les besoins en eau des principales cultures (surtout le mil) tout au long de la saison des pluies, à partir de diverses dates de semis, en utilisant des coefficients de culture mesurés dans des conditions purement africaines, à partir de l'ETP Penman calculée en temps réel dans les stations synoptiques et pour l'ensemble des neuf pays du CILSS. Lorsqu'on ne dispose pas de l'ETP même de la décade concernée, on utilise à défaut une ETP moyenne pour une période donnée (référentiel FAO et maintenant ATLAS AGRHYMET 1951-1980).

On s'est aperçu, malheureusement (Dancette, 1983), que les coefficients de végétation (en l'occurrence $ETM/Ev.bac$ pour une culture de cotonnier) n'étaient pas constants d'une station à l'autre, ce qui posait un grave problème quant à la zone de validité de cette méthode "des coefficients culturaux". Ainsi, le coefficient global pour tout le cycle du cotonnier était de 0.63 à Guédé (Sénégal) en zone sub-saharienne, de 0.85 à Bambey en zone soudanienne-nord et de 0.97 à Mogtedo (Burkina Faso) en zone soudanienne-sud: ce sont donc de très grosses différences. Les variations sont liées à la latitude; elles restent du même ordre lorsqu'on se ramène à l'ETP calculée Penman. Il ne s'agit donc pas seulement d'un simple problème de réponse exacerbée du bac normalisé classe A lorsqu'on l'utilise en zone très aride soumise à des vents très secs et forts. Une méthode de correction des coefficients de culture en fonction de la latitude a par la suite été proposée par Freteaud *et al.* (1984); cette correction est appliquée de façon opérationnelle dans le suivi hydrique effectué au niveau du programme AGRHYMET.

A première vue, on pourrait donc penser qu'il n'y a pas de problème majeur pour généraliser à l'ensemble de la zone soudano-sahélienne, des déterminations de besoins en eau qui restent très ponctuelles. J'aimerais toutefois m'assurer que les experts et chercheurs concernés par ce problème approuvent la démarche suivie ou qu'ils n'auraient pas d'autre démarche à proposer. En 1983 déjà, nous avons souhaité qu'une validation de la méthode

Tableau 1 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

	Decades et numéros d'ordre												Total Cyclis	Rendements kg/ha		Pluvio. mm	Irrig. mm	Consom. totale mm	Observations
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		Grain	Paille ou gousse				
MIL																			
MIL SANIO 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	(1) 13 950	(1) 399	(1) 215	(1) 562	
														(2) 1 623	(2) 14 425	(2) 374	(2) 282	(2) 628	
MIL SOUMA 90 jours Bambey/Sénégal 1973(1) et 1974(2)	0,31	0,42	0,68	1,01	1,10	1,08	0,92	0,84	0,78	--	--	--	0,73	(1) 2 690	(1) 6 690	(1) 400	(1) 68	(1) 417	
														(2) 2 948	(2) 5 760	(2) 492	(2) 73	(2) 416	
MIL NAIN GAM 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	--	--	--	--	0,65	(1) 2 151	(1) 5 940	(1) 447	(1) 51	(1) 320	
														(2) 1 721	(2) 5 650	(2) 510	(2) 0	(2) 327	
P3 KOLD 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	
S O R G H O																			
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	0,70	0,40	2 890	18 000	273	620	845	Fréquence d'irrigation
														potentiel de 4000	?	582	60 à 250	500	Référence bac enterré type ORSTOM
126 150 jours Mogtédou/Mte-Volta 1968	0,60	0,70	0,76	0,88	0,04	1,12	1,24	1,24	1,00	0,92	0,92	0,91	0,70	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 sois sa- bleux + fumier	7 000	542	0	390	Grande hétérogénéité sol peu favorable
V- ? FAO-OHVS 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
M A I S																			
MASSA Yamba KOLD P3 100 jours Mogtédou/Mte-Volta 1968	0,76	0,84	0,92	1,10	1,20	1,26	1,26	1,20	1,06	0,68	--	--	0,92	4 330	?	701 {juin à octobre} 128 en mai	?	?	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	1 256 et 1 546	2 200 et 2 300	544	91	624	Sol dior peu favorable
MAKA Guédé/Sénégal FAO-OHVS 1972	0,30	0,40	0,64	0,85	0,90	0,90	0,85	0,80	0,62	0,45	--	--	0,67	1 280	?	124 {très aride}	?	635	Billons

Table 1 (suite)

	Décades et numéros d'ordre												Total cycle	Rendements kg/ha		Pluvio. mm	Irrig. mm	Conson. 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 Djibélor/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 a 4 795	3 470 a 4 500	1 170 à 4 500	<100	340 a 440	V,6383 V,1KP V,3026 V,14489
Riz de casier TM n°1 Guédé/Sénégal FAO-OMVS 1972(1) et 1973(2)	0,50	0,80	1,10	1,16	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	?	?	1 306 912	Seuis direct
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 6 000	?	?	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	1,14	Potentiel	?	?	9 mm/j	542	
ARACHIDE																			
55437 109 jours Tillabery/Niger 1972	0,36	0,38	0,40	0,50	0,60	0,65	0,70	0,73	0,73	0,70	0,56	--	0,56	2 970 (gousse)	--	272	365	580	Cycle allongé (normalement 90 jours)
55437 90 jours Bambey/Sénégal 1974	0,41	0,57	0,67	0,90	0,83	0,78	0,77	0,65	0,65	--	--	--	0,69	2 945 (gousse)	3 300	492	72	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	--	0,79	3 660 (gousse)	4 988	400	182	548	
28206 120 jours Bambey/Sénégal 1976-1977	0,26	0,38	0,48	0,64	0,83	0,97	1,07	1,00	0,93	0,78	0,74	0,65	0,73	3 699 (gousse)	3 902	374	259	557	
MIEU																			
58-57 126 jours Guédé-OMVS/Sén. 1972-1973	0,30	0,55	0,75	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,75	0,54	0,52	0,50	0,62	320 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	715 (grain)	3 452	452	0	322	Irrigation inutile

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

des coefficients de culture soit effectuée pendant la saison des pluies, en faisant des mesures simultanées de besoins en eau sur une même variété, cultivée d'une part à des latitudes très différentes (par exemple 10° et 17°N)

le long d'un même méridien et d'autre part à une même latitude, mais avec des degrés de continentalité très différents (par exemple 14°N mais en allant du Sénégal jusqu'au Tchad). Ceci permettrait, ne serait-ce qu'une fois, de vérifier si la méthode de correction des coefficients est bien valable, et sinon, de rechercher ensemble comment l'améliorer.

Par ailleurs des résultats obtenus récemment au Niger, montreraient, s'ils se confirment, que les coefficients de culture pourraient être nettement plus élevés lorsque l'année est exceptionnellement humide et nettement plus faibles qu'en année moyenne, lorsque l'année est exceptionnellement sèche. Ceci reviendrait à dire que si au cours d'une année normale on se trouvait par exemple en conditions sahéliennes, tout se passe comme si on se trouvait dans une zone sub-saharienne en année très sèche et soudanienne en année très humide. On serait donc amené à apporter aussi des corrections relatives au degré d'aridité de l'année étudiée.

MISE AU POINT DES MODELES DE SIMULATION DU BILAN HYDRIQUE

Ayant en main les principaux éléments du bilan hydrique, concernant la demande évaporative et les besoins en eau des cultures, il devenait possible d'aller plus loin et de s'acheminer vers un bilan complet, en tenant compte d'autres facteurs du milieu, comme le sol par exemple et de l'exploitation de ses réserves en eau par le système racinaire des plantes.

Nous rappellerons très rapidement qu'autrefois, le bilan hydrique n'était approché que de façon très sommaire par une simple confrontation de la pluviométrie P et de l'ETP ($P - ETP$); certains avaient été plus loin en juxtaposant des courbes de P et d'ETP, $ETP/2$, $ETP/3$ etc.: graphiques Cocheme & Franquin (1967) qui permettaient d'avoir une idée de la saison des pluies utile pour l'agriculture. Par la suite, une confrontation directe a été faite entre la pluviométrie et les besoins en eau spécifiques d'une culture: cela était certes plus satisfaisant, mais le rôle important du sol était escamoté, puisqu'on ne tenait pas compte de ses caractéristiques d'infiltration, de percolation et bien sûr de rétention pour l'eau. Les cahiers pédagogiques et opérationnels de bilan hydrique efficace et de prospective décadaire représentaient déjà un gros progrès pour valoriser les connaissances et l'expérience acquise dans ce domaine, voir Forest (1974) pour l'Afrique tropicale francophone. Vers la même période de nombreux bilans hydriques d'évapotranspiration réelle des cultures "au champ" ont été effectués à partir de profils hydriques relevés avec des humidimètres à neutrons: Charoy (1971), Dancette (1971, 1974); Kalms & Valet (1975) etc. On pouvait parler d'ETRM ou ETM, c'est à dire de besoins en eau des cultures, tant que l'eau n'était pas un facteur limitant et d'ETR tout simplement (consommation en eau réelle d'une culture pouvant être soumise à certains stress hydriques) lorsque cette eau n'était pas toujours disponible facilement. En même temps aussi, le rôle essentiel du sol en tant que réceptacle et réservoir a été reconsidéré et les caractérisations hydriques et hydrodynamiques de nombreux types de sol ont été nombreuses sous l'impulsion des phyciens de l'IMG de

Grenoble (Vachaud *et al.*, 1978; Vauclin *et al.*, 1976). Enfin, les études sur les enracinements en liaison avec le travail ou non du sol, se sont développés (Nicou, 1977); Chopart & Nicou, 1976; Chopart, 1980). Il serait trop long de citer tous les travaux qui furent alors publiés.

Il était temps de synthétiser et de valoriser toutes les connaissances acquises pour aboutir à un bilan hydrique simulé qui se rapprochât le plus près possible des réalités de terrain. Les modèles mis au point par Franquin & Forest (1977) et rendus opérationnels par ce dernier (Forest & Dancette, 1982; Forest, 1984) ont bénéficié d'un apport méthodologique important avec l'utilisation de l'algorithme d'Eagleman (1971). Cet algorithme permet de faire une estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR), réduite en cas de stress par rapport à l'évapotranspiration maximale (ETM), en fonction du niveau de remplissage du réservoir hydrique que constitue le sol (stock d'eau réel/stock d'eau potentiel utilisable par le système racinaire d'une culture donnée. Il faut bien voir que par rapport à d'autres modèles dont celui de la FAO, Frère (1985) et Popov (1985), cela représente un progrès certain mais aussi une complication. En effet dans les modèles antérieurs, la plante consommait à l'ETM (c'est édire au niveau maximum) tant que la pluviométrie plus la réserve en eau du sol étaient supérieures à 0, puis d'un seul coup, la consommation pouvait devenir nulle et par la suite, si les pluies restaient insuffisantes par rapport aux besoins, ETR pouvait être assimilée au total de cette pluviométrie insuffisante. Avec l'abaque d'Eagleman, l'ETR diminue progressivement, lorsque l'eau du sol devient de plus en plus difficile à extraire par les racines. De nombreux bilans hydriques effectués en particulier par les chercheurs de l'ISRA (Sénégal): Bambey, Nioro, Thilmakha, Louga etc.) sous diverses cultures et avec un nombre de répétitions voulu, ont pu montrer la pertinence de l'algorithme d'Eagleman. Je laisserai à mes collègues de l'IRAT/CIRAD et d'AGRHYMET (cf. Ganzin, 1989), le soin de donner les explications voulues sur les modèles de bilan hydrique disponibles (BIP, PROBE, DHC etc.).

Par rapport aux premières versions disponibles, les améliorations ont porté sur de nombreux points que l'on se doit de passer en revue:

- Tout d'abord la méthode des coefficients de culture est mal adaptée en début de cycle, car les besoins en eau d'une culture, ne sont en fait, pour une grande part, que des pertes par évaporation à la surface du sol nu; et ces pertes dépendent non seulement de la demande évaporative mais aussi de la nature physique du sol et du rythme des précipitations et des arrosages. C'est pour cela qu'au début de cycle, une loi d'évaporation réelle du sol nu a dû être introduite, en accord avec la progression du taux de couverture du sol par les plantes cultivées.
- Dans les premiers modèles, on ne tenait compte que de la capacité maximale de stockage de l'eau par le sol, pour un enracinement complètement installé; la réserve réelle en eau du sol était rapportée à cette capacité de stockage maximale. Il était normal d'introduire dans le bilan une loi de dynamique de l'enracinement, propre à chaque plante cultivée, pour ne pas dire propre à chaque type de système et de technique de culture (influence du travail du sol par exemple); c'est bien sûr en fonction de la progression du système racinaire que l'on

peut chiffrer la réserve en eau utile du sol (qu'elle soit réelle ou potentielle), d'où la grande utilité des travaux de Nicou et Chopart débouchant par exemple sur le programme de bilan en eau PROBE: Chopart & Siband (1988).

- L'évolution des travaux privilégie de plus en plus un pas de temps quotidien, même si la sortie des résultats du bilan peut être synthétisée sur 5 jours ; ce qui est certain, c'est que le fait de retenir des facteurs de bilan hydrique moyennés sur 10 jours peut introduire de graves imprécisions et erreurs d'interprétation. N'importe quel modèle de bilan hydrique peut être adapté à un pas de temps quotidien, et c'est souvent souhaitable.
- Il est nécessaire de bien fixer la réserve en eau utile des sols où la culture est pratiquée. Dans certains pays (Sénégal, Niger etc.), les connaissances dans ce domaine sont relativement nombreuses. Le problème majeur, c'est l'hétérogénéité texturale des sols tropicaux, que ce soit en surface ou sur une même verticale. Les cartes pédologiques classiques fournissaient rarement ce type d'information: profondeur moyenne du sol (ou de la cuirasse etc.), réserve en eau utile moyenne en millimètres par mètre. Par exemple, pour un type de sol bien connu (sol ferrugineux tropical faiblement lessivé d'appellation vernaculaire "dior" au Sénégal), la réserve en eau utile par mètre, au niveau d'un champ à première vue très homogène a été chiffrée à 76 mm, plus ou moins 12 mm. Pédologiquement, les sols peuvent être relativement bien caractérisés, mais dans un même site ou un même champ, on passe fréquemment d'un type de sol à un autre et il est très délicat d'en tenir compte pour un bilan hydrique qui se veut "général" comme dans le cas du diagnostic hydrique AGRHYMET.

Une solution possible sur laquelle nous avons beaucoup travaillé avec Forest est de faire le bilan hydrique avec des niveaux de réserves hydriques extrêmes (par exemple 50 et 150 mm) et de voir ce que ça induit comme différences finales dans le bilan au point de vue ETR, taux de satisfaction des besoins (ETR/ETM), quantité d'eau percolée, etc. Les différences ne sont pas forcément très grandes lorsqu'on se situe dans des zones où la pluviométrie est soit nettement excédentaire, soit nettement déficitaire. C'est dans le cas des situations intermédiaires ou lorsqu'on a des sécheresses exceptionnellement graves en plein milieu du cycle de la culture, que le rôle de la réserve en eau utile peut devenir très grand; le problème se pose aussi lorsque la culture doit terminer son cycle bien après les dernières pluies utiles, en utilisant les seules réserves en eau du sol.

PRINCIPAUX PROBLEMES D'APPLICATION OPERATIONNELLE DES BILANS HYDRIQUES SIMULES

Il faudrait nous pencher au cours de ce colloque sur les questions suivantes qui sont entre autres:

- Peut-on se satisfaire d'ETP moyennes inter-annuelles (sur une période de référence etc., mais laquelle? période humide, période sèche,

période la plus longue possible etc.) – A des fins de diagnostic hydrique en vue de l'alerte rapide ne faut-il pas plutôt travailler avec l'ETP de l'année en cours? Et ce même pour des analyses historiques? En rappelant que l'ETP de la période peut dans ce cas être corrigée pour chaque année particulière à partir de la pluviométrie (totale de la saison ou mieux mensuelle etc.).

- Notre connaissance des besoins en eau est-elle suffisante? Surtout lorsqu'on veut appliquer le bilan hydrique, non plus aux conditions de milieu d'une station expérimentale, mais à celles du milieu paysan réel, où les conditions de fertilité sont toutes autres (Pieri, 1989)?

Les besoins en eau d'une culture en très bonne condition agronomique (rotations bien observées, travail du sol, fertilisation chimique, protection phytosanitaire, semences fongicidées et bien sélectionnées, sarclages parfaits etc.) ne sont pas les mêmes que ceux mesurés dans un milieu réel confronté à toutes les limitations physico-chimiques que nous connaissons.

Un mil paysan produisant, par exemple 0.8 t de grain et 3.5 t de paille par hectare, n'a pas les mêmes besoins en eau qu'un mil de station de recherches pouvant produire 3 t de grain et 8 t de paille à l'hectare. Or, le plus souvent, c'est l'ETM des plantes les plus vigoureuses et productives que nous avons mesuré par le passé. Certains résultats de mesure d'évapotranspiration réelle sur des sols moins riches (milieu paysan autour de Bambey et parcelles de l'essai de régénération de Thilmakha, au Sénégal) montrent que les niveaux de consommation hydrique, même lorsque l'eau n'est pas un facteur limitant, peuvent être beaucoup plus bas lorsque la fertilité est médiocre, ce qui est le plus souvent le cas en milieu réel avec faibles intrants. Ce point ne devrait-il pas être approfondi par la recherche, sachant qu'elle s'intéresse de plus en plus à une agriculture à faibles intrants, compte tenu du coût souvent prohibitif du matériel agricole, de l'énergie, de la motorisation (travail du sol) et des engrais chimiques?

- Ne faudrait-il pas davantage de vérifications de terrain, en comparant des bilans hydriques au champ, à des bilans hydriques simulés, mais ceci en milieu paysan et non plus en stations de recherche?
- Ne faudrait-il pas entreprendre un test de validité géographique de la méthode des coefficients, de culture sur plusieurs pays simultanément, comme nous l'avons suggéré plus haut?
- Dispose-t-on d'un référentiel suffisant sur la dynamique et l'efficacité des systèmes racinaires des diverses plantes cultivées; compte tenu des niveaux de fertilité (engrais organiques et minéraux, travail du sol)?
- Devant la grande variabilité spatiale de la pluviométrie, qui constitue un obstacle pour établir des diagnostics hydriques, non pas ponctuels mais régionalisés (comme l'a entrepris le Programme AGRHYMET), ne doit-on pas affiner davantage la spatialisation des cartes relatives à certains termes du bilan hydrique, à partir de l'imagerie satellitaire: indices de végétation normalisés par exemple ou encore pluviométrie cumulée estimée d'après la température des nuages froids ou celle de la surface du sol? Mais le cumul pluviométrique est-il suffisant et ne masque-t-il

pas certains problèmes de répartition dans le temps, qui influent beaucoup sur le bilan hydrique?

CONCLUSION

Ce bref survol de certains problèmes relatifs au bilan hydrique a été effectué dans le seul but d'amorcer des discussions approfondies au cours de ce colloque, compte tenu des problèmes auxquels nous avons été confrontés au cours de notre carrière et des nombreuses lacunes décelées (surtout lorsque nous avons voulu appliquer au développement certains acquis de la recherche obtenus en milieu relativement bien contrôlé etc.): Dancette *et al.* (1989). Pour des chercheurs venant de continents ou de pays plus favorisés, le bilan des recherches peut paraître maigre et le travail qui reste à faire immense, mais on peut aussi se demander si la pression de recherche dans ce domaine a été suffisante au cours des 30 dernières années. Il serait aussi très souhaitable que les chercheurs des pays africains anglophones précisent au cours de ce colloque s'ils partagent ou non notre façon (peut être trop simpliste ou tronquée) de voir l'évolution des travaux, des idées et des besoins ressentis dans les pays francophones ou lusophones. Encore faut-il reconnaître le rôle d'organismes régionaux ou internationaux comme AGRHYMET, le CIEH, l'OMM, la FAO, l'ICRISAT etc. pour établir les liaisons et les collaborations voulues entre des pays autrefois séparés par leurs frontières, leurs méthodes et même leur formation.

D'une façon plus générale, une préoccupation valable pour l'ensemble des pays semble se dégager:

- Le recours de plus en plus intense à des moyens informatiques performants en vue de simuler les bilans hydriques n'écarte-t-il pas trop souvent les chercheurs des réalités, mesures et vérifications de terrain? Certes, les modèles ont le plus fréquemment été établis à partir d'une ou plusieurs expériences de terrain mais qui représentent autant de cas particuliers: n'a-t-on pas généralisé trop vite? Le chercheur ne doit pas se contenter de jouer en virtuose avec son microordinateur et de publier de beaux documents en faisant des simulations si nombreuses et si bien conçues que le lecteur ne saurait qu'être convaincu par la masse et la clarté des résultats fournis: n'aurait-il pas fallu passer sa vie entière à transpirer sur le terrain pour aboutir plus ou moins bien (et plutôt moins bien) aux mêmes résultats?

On ne peut que souhaiter le développement de tels outils informatiques, mais il faut garder notre esprit critique et vérifier le plus souvent possible que la réalité reste bien conforme au modèle. Le modèle doit être amélioré constamment grâce à des aller-retours incessants entre le bureau et le terrain. C'est pourquoi, les observations et mesures précises de terrain (surtout en milieu paysan) restent aussi importantes, sinon plus, que par le passé. Nous nous réjouissons de voir qu'il existe dans ce but d'importants projets de terrain comme le projet ESPACE de l'IRAT/CIRAD qui concerne au plus haut point le Programme AGRHYMET et les neuf pays du CILSS. C'est grâce à ce genre de projet que le diagnostic hydrique des cultures (DHC) tel

qu'il est pratiqué par AGRHYMET, avec l'aide de la recherche, peut aller beaucoup plus loin que le simple suivi des conditions agrométéorologiques supportées par les plantes et déboucher sur une prévision, puis une évaluation rapide des rendements des cultures en milieu paysan. La collaboration en cours d'intensification avec les services de statistiques agricoles nationales permettra de vérifier la validité de nos méthodes. Il en sera de même, nous l'espérons, avec le projet pilote P4 A S, localisé au Niger, pour la prévision des productions à partir des méthodes conjuguées du diagnostic hydrique, des produits de l'imagerie satellitaire, des enquêtes et des observations de terrain. Enfin la coordination assurée par le réseau international R3S de recherche sur la résistance à la sécheresse est essentielle en vue d'une organisation plus rationnelle des travaux et d'une meilleure valorisation des résultats relatifs au bilan hydrique et à ses applications, à l'échelle africaine (Reyniers, 1989a, b).

REFERENCES

- André, N., Clauss, F., Minot, D., Piaton, H. & Cagneaux, E. (1989) *Etude Régionale de l'Evapotranspiration Potentielle*. CIEH/AGRHYMET, Ouagadougou, Burkina Faso.
- Bernard, E. A. (1956) *Le Déterminisme de l'Evaporation dans la Nature. Etude des Aspects Géophysiques et Ecologiques du Problème, dans le Cadre du Bilan Énergétique*. Publ. INEAC no. 68.
- Bouchet, R. J. (1964) Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. Dans: *L'Eau et la Production Végétale*, 151-232. INRA, Paris.
- Brochet, P. & Gerbier, N. (1968) *L'Evapotranspiration, Aspect Agrométéorologique - Evaluation de l'Evapotranspiration Potentielle*. Monographie de la Météorologie Nationale, Ministère des Transports, Paris, France.
- Charoy, J. (1971) Les cultures irriguées au Niger - Résultats de 7 années de mesure et d'expérimentation (1963-1970) Seha de Tarna. *Agron. Trop.* **XXVI**, 9.
- Chopart, J. L. & Nicou, R. (1976) Influence du labour sur le développement racinaire de différentes plantes cultivées au Sénégal - Conséquences sur leur alimentation hydrique. *Agron. Trop.* **20**, 7-28.
- Chopart, J. L. (1980) Etude au champ des systèmes racinaires des principales cultures pluviales au Sénégal (arachide, mil, sorgho, riz pluvial). Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Chopart, J. L. & Siband, P. (1988) PROBE. Programme de bilan de l'eau. *Mémoires et Travaux de l'IRAT no. 17*.
- Christiansen, J. E. & Asce, F. (1968) Pan evaporation and evaporation from climatic data. *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs*, traduction IRAT.
- Cocheme, J. & Franquin, P. (1967) A study of agroclimatology of the semi arid area south of the Sahara in West Africa. Rapport Technique FAO/UNESCO/WMO, Rome, Italie.
- Dagg, M. (1969) Factors affecting the use of evaporation pan data in East Africa. *E. Afr. Agric. For. J.* **XXXV** (2).
- Dancette, C. (1971) Contrôle avec l'humidimètre à neutrons de l'alimentation hydrique d'une culture de mil "souana" pendant 2 hivernages très différents. *Agron. Trop.* **26** (6).
- Dancette, C. (1974) Les besoins en eau des plantes de grande culture au Sénégal, *IAEA, SM 1976/36, Vienne, Autriche*.
- 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. *Agron. Trop.* no. 4 (oct. déc.), 321-338.
- Dancette, C. (1979) Agroclimatologie appliquée à l'économie de l'eau en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.* **XXXVI**, 331-355.
- Dancette, C. (1983) Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. *Agron. Trop.* **XXXVIII**, 281-294.
- Dancette, C., Cortier, B. & Da Rold, O. (1989) Le suivi de la campagne agricole pluviale dans les pays du CILSS - AGRHYMET. *Journées DRN/IRAT, Montpellier, France*.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W. O. (1984) *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 24, Rome, Italie.

- Dupriez, C. (1964) *L'Evaporation et les Besoins en Eau des Différentes Cultures dans la Région du Mvuazi (Bas Congo)*. Publ. INEAC série scientifique no. 106.
- Eagleman, J. R. (1971) An experimental derived model for actual evapotranspiration. *Agric. Met.* 8 (4-5), 385-394.
- Forest, F. (1974) *Bilan Hydrique Efficace et Prospective Décadaire des Besoins en Eau des Cultures Pluviales en Zone Soudano-Sahélienne* Cahiers Pédagogiques Opérationnels, Ministère de la Coopération, Paris.
- Forest, F. (1984) Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales - Modèle BIP 4. IRAT, Deve St Clément, Montpellier, France.
- Franquin, P. & Forest, F. (1977) Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. *Agron. Trop.* XXXII, 7-11.
- Forest, F. & Dancette, C. (1982) Simulation du bilan hydrique de l'arachide en vue d'une meilleure adaptation de cette culture aux conditions tropicales. Symposium International sur la Production Arachidière (Banjul, Gambie, juin 1982).
- Frère, M. (1985) Le suivi agrométéorologique opérationnel des cultures pour la prévision des récoltes. Symposium sur l'Agrométéorologie de l'Arachide (Niamey, Niger, août 1985). OMM, ICRISAT, FAO.
- Freteau, J. P., Lidon, B. & Marlet, S. (1984) La détermination des coefficients culturaux en zone soudano-sahélienne. Proposition d'une méthode générale et pratique. IRAT, Montpellier, Deve St Clément, France.
- Ganzin, N. (1989) Diagnostic hydrique des cultures: présentation du logiciel DHC-DAA, Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger.
- Gleizes, C. (1964) Les formules d'évapotranspiration. Techniques rurales en Afrique. Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations.
- Gommes, R. (1985) Rainfed food crop production on east-Mwanze region. A Semi Quantitative Risk Analysis Workshop on Security and Nutrition Education (Tanzania, mai 1985).
- 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. INRAN, Niamey, Niger.
- Nicou, R. (1977) Le travail du sol dans les terres exondées du Sénégal - motivations et contraintes. Synthèse ISRA, CNRA Bambey, Sénégal.
- Penman, H. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. A*193, 120-145.
- Pieri, C. (1989) *Fertilité des Terres de Savane* Livre IRAT CIRAD, Ministère de la Coopération et du Développement.
- Popov, G. (1985) *Surveillance des Cultures, Basée sur des Informations Agrométéorologiques*. FAO, Rome.
- Reyniers, F. N. (1989a) Diagnostic de l'alimentation hydrique des cultures pluviales. *Journées DRN*, 12-15 septembre 1989, IRAT, Montpellier, France.
- Reyniers, F. N. (1989b) Lettre R 3S du réseau international de recherches sur la résistance à la sécheresse. CORAF-CILSS, (no. 2, novembre).
- Rijks, D. (1972) Données météorologiques recueillies à Richard Toll, Guédé, Kaedi et Sam Projet OMVS/FAO.
- Rijks, D. (1974) Besoins en eau des cultures. C. R. des travaux réalisés à Guédé et à Kaedi - 1971 à 1974. *OMVS, Dakar Document Technique no. 130*.
- Riou, Ch. (1972) Le bac d'eau libre et l'évaluation des consommations d'eau des couverts végététaux. Communication au Séminaire sur les perspectives de l'Irrigation en Afrique de l'Ouest - Ibadan (Ibadan, Nigéria, octobre 1972).
- Ritjema, P. E. (1966) Derived meteorological data - transpiration. Communication au Symposium de Reading sur les Méthodes Agroclimatologiques. UNESCO.
- Roche, M. & Girard, G. (1974) Etude méthodologique pour l'utilisation des données climatologiques de l'Afrique Tropicale. III - *Livre de l'Evapotranspiration et des Déficit Hydriques* - ORSTOM.
- 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 sénégalais en vue de la détermination des termes du bilan hydrique (sols dior et diéri). *Ann. Agron.* 29, 1-36.
- Vauclin, M., Haverkamp, R. & Vachaud, G. (1976) Transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère. Comité Consultatif FAO/AIEA, Bambey, 10-14 novembre 1975. ISRA (Sénégal). Document Technique IAEA 192, Vienne 1976, Autriche.