

# Un modèle de simulation de l'irrigation complémentaire : le système probabiliste ORACLE

## Application au Sahel : l'irrigation de sécurité

Pierre FRANQUIN et Marcel SICOT

*Agrométéorologue et agronome de l'ORSTOM, 70, route d'Aulnay, 93140 Bondy-France*

### RÉSUMÉ

*Est présenté un logiciel de simulation de l'irrigation complémentaire aux pluies. Ce logiciel procède à une analyse fréquentielle des pluies et évalue périodiquement le déficit hydrique de la culture. Puis il propose une irrigation dont l'importance est fonction de ce déficit et de la probabilité que ce déficit soit naturellement comblé par les pluies. Ce système permet d'expérimenter sur données, à l'ordinateur, en faisant varier à volonté les paramètres (options et contraintes) de l'irrigation. Les conclusions tirées de l'analyse statistique des résultats doivent finalement être soumises à expérimentation au champ, afin d'établir une fonction de production indiquant, pour des conditions d'intensification données, les rendements potentiel et relatifs.*

MOTS-CLÉS : Irrigation complémentaire — Simulation — Fonction de production — Rendement potentiel — Rendement relatif — Intensification.

### ABSTRACT

A MODEL OF SUPPLEMENTAL IRRIGATION SIMULATION : THE ORACLE PROBABILIST SYSTEM. APPLICATION TO THE SAHEL : THE SAFETY IRRIGATION

*A presentation of a supplemental irrigation simulation software is given. This software makes a frequency analysis of rainfall and a periodic evaluation of the water deficit of the crop. Then it suggests an irrigation amount which depends on this deficit and on the probability that this deficit will be filled by rainfall. This system allows to experiment with data through the computer, by varying the irrigation parameters (options and constraints). The conclusions drawn from the statistical analysis of the results must be tested in the field in order to determine a production function which will give, under specific conditions, the potential and relative yields.*

KEY WORDS : Supplemental irrigation — Simulation — Production function — Potential yield — Relative yield — Intensification.

### INTRODUCTION

En régions tropicales semiarides, de la limite de culture du mil à celle du cotonnier (environ 300 à 700/800 mm), la pluviosité autorise une production agricole relativement variée (mil, sorgho, maïs, arachide, niébé...) mais les rendements sont très aléatoires, avec des échecs graves inévitables. Et ces rendements, dans

les meilleurs des cas, restent faibles en raison de la difficulté, voire même de l'impossibilité, d'intensifier le système de culture ; celui-ci est en effet dominé par la permanence d'un risque climatique majeur, d'autant plus menaçant que la lame pluviale est plus faible. La loi agronomique du facteur limitant (l'eau, en l'occurrence) exclut l'intérêt de rechercher des cultivars plus productifs

STATION NUMERO320148

NIGER

NIAMEY

TABLEAU I

Exemple d'analyse fréquentielle des pluies, selon système ORSTOM, dans des périodes de 10 jours glissant de 5 en 5 jours (176<sup>e</sup> au 185<sup>e</sup> jour, 181<sup>e</sup> au 190<sup>e</sup>, etc.). Les probabilités se lisent au non-dépassement des hauteurs pluviométriques.

DUREE DU GLISSEMENT 5 NOMBRE DE JOURS CONSECUTIFS 10

DATE DU PREMIER JOUR 176 181 186 191 196

HAUTEUR MOYENNE 30.08 31.47 42.93 49.23 48.23

DATE DU PREMIER JOUR	176	181	186	191	196
HAUTEUR MOYENNE	30.08	31.47	42.93	49.23	48.23
OBSERVATIONS RANGEES	98.2 84.8 74.5 67.7 65.1 64.0 62.6 60.9 59.0 58.7 52.4 50.7 50.5 49.8 47.6 46.1 44.4 42.6 40.4 38.3 38.0 36.0 34.2 32.9 32.3 31.0 31.0 30.1 29.4 28.8 27.9 26.2 26.1 25.6 25.4 25.2 24.7 24.5 24.4 24.3 22.0 21.7	77.3 75.0 67.9 63.2 58.8 58.7 57.7 57.5 56.8 53.5 53.0 52.7 52.2 52.1 51.3 51.1 49.6 48.9 48.4 46.7 46.6 45.3 44.2 43.4 42.6 42.5 41.5 39.2 39.2 39.0 38.6 37.9 37.2 34.7 31.2 30.4 29.9 27.9 26.7 26.6 24.7 22.8	116.9 109.0 99.1 98.1 93.8 89.4 84.2 79.6 74.1 73.6 71.8 69.0 65.2 63.3 62.6 61.7 61.6 61.4 60.1 59.5 58.1 57.3 56.3 54.2 54.0 53.0 51.5 50.2 46.0 45.9 45.2 44.5 43.3 42.9 39.3 38.6 37.9 37.2 35.8 35.8 34.9 34.8	135.5 123.3 119.0 115.1 104.9 102.0 92.8 90.3 86.1 84.2 80.3 78.0 75.0 74.5 72.0 70.8 70.5 69.3 64.5 63.2 61.2 60.4 59.5 55.9 54.8 53.5 53.2 53.1 50.5 50.0 50.0 49.0 48.1 47.3 46.2 45.7 44.5 44.2 42.6 42.5 40.8 40.7	176.6 136.1 117.7 117.3 104.4 101.1 89.9 86.0 83.7 82.1 80.2 79.9 79.6 77.1 76.2 71.3 66.4 65.7 65.1 64.1 62.3 57.9 57.4 57.4 57.3 55.6 54.3 53.9 52.8 50.2 50.1 46.8 42.9 42.8 42.7 42.4 40.7 40.2 38.8 34.8 34.5 33.7

DATE DU PREMIER JOUR 176 181 186 191 196

PARAMETRE GAMMA 2.012 1.725 2.197 2.157 2.034

PARAMETRE GAMMA	2.012	1.725	2.197	2.157	2.034
S	15.159	18.504	19.814	22.821	24.043
FO	0.014	0.014	0.014	0.000	0.014
XO	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PROBABILITE 0.01	0.00	0.00	0.00	4.23	0.00
PROBABILITE 0.02	1.79	1.30	3.07	5.97	2.94
PROBABILITE 0.05	4.59	3.82	7.37	9.59	7.47
PROBABILITE 0.10	7.53	6.67	11.69	14.03	12.20
PROBABILITE 0.20	12.15	11.40	18.32	21.25	19.61
PROBABILITE 0.25	14.27	13.64	21.33	24.59	23.01
PROBABILITE 0.30	16.37	15.89	24.28	27.90	26.38
PROBABILITE 0.40	20.67	20.54	30.27	34.63	33.24
PROBABILITE 0.50	25.29	25.62	36.67	41.87	40.62
PROBABILITE 0.60	30.54	31.48	43.89	50.06	49.01
PROBABILITE 0.70	36.90	38.65	52.58	59.95	59.15
PROBABILITE 0.75	40.76	43.04	57.84	65.93	65.30
PROBABILITE 0.80	45.36	48.29	64.07	73.05	72.62
PROBABILITE 0.90	58.98	63.98	82.47	94.07	94.31
PROBABILITE 0.95	71.96	79.09	99.92	114.03	114.98
PROBABILITE 0.98	88.52	98.49	122.09	139.42	141.32
PROBABILITE 0.99	100.74	112.88	138.40	158.11	160.74

que ne le sont les variétés traditionnelles ; elle exclut de même l'intérêt d'expérimenter des formules de fumure minérale ; elle exclut en somme toute introduction d'intrants dans le système de culture. A défaut d'eau pour irriguer, la seule solution consiste dans l'application de techniques d'aridoculture qui visent à favoriser l'infiltration et la conservation de l'eau pluviale. Même alors il reste aléatoire d'investir dans la culture.

Lorsque l'on dispose d'eau, quoique en quantité généralement insuffisante pour assurer une irrigation permanente, une amélioration très significative consiste à faire des apports d'eau complémentaire aux pluies.

En irrigation classique permanente, totale ou complémentaire, l'objectif est soit de maximiser le rendement de la culture, quand la ressource en eau est abondante et peu chère ; soit d'optimiser le revenu économique, lorsque la ressource, sans être forcément limitée, est onéreuse.

Lorsqu'elle est limitée, il convient de minimiser l'apport d'eau, faisant en sorte de tirer la meilleure efficacité de cet apport. Il ne peut s'agir alors que d'irrigation complémentaire *occasionnelle* : pluie aléatoire et eau d'irrigation limitée se valorisent mutuellement pour maximiser la production de la surface cultivée, et ce d'autant plus qu'il aura été possible d'*intensifier* le système de culture.

La question est d'autant plus complexe que l'irrigation complémentaire est rendue problématique par l'interférence des pluies et des apports. A défaut de poser et traiter cette question au plan théorique, une réponse peut être recherchée dans l'empirisme de l'expérimentation.

L'irrigation permanente à contre-saison, en saison sèche, peut être soumise à expérimentation au champ parce que toutes les années sont climatiquement quasi identiques ; on peut alors se contenter, sur 2 ou 3 ans, d'évaluer doses et fréquences en rapport avec les caractéristiques du sol et avec le niveau de rendement espéré. Mais il n'en va pas de même pour l'irrigation de complément, en raison de la variabilité interannuelle des pluies en quantité comme en distribution. Cette variabilité exige que soit constitué un échantillon aussi important que possible d'années toutes dissemblables. Mais il ne peut être question d'expérimenter au champ durant 30 ans, ni même 10. D'ailleurs, temps mis à part, l'expérimentation est onéreuse.

Aussi est-on conduit à expérimenter à l'ordinateur, *sur données*, étant bien entendu que la simulation de l'irrigation s'adresse à la planification, les conclusions devant finalement être soumises à vérification au champ. Cette expérimentation sur données implique que l'on dispose d'un logiciel permettant de *simuler* à l'ordinateur cette irrigation complémentaire. C'est le cas pour le logiciel ORACLE (ORSTOM Apport Complémentaire

Limité d'Eau) qui propose doses et dates d'irrigation optimales, en même temps qu'une estimation du rendement *relatif* au rendement *potentiel* si l'on a pu établir une fonction de production.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES \*

La question que pose l'irrigation complémentaire aux pluies est évidemment la suivante :

Quel est, par rapport à son déficit hydrique périodique (à 5, 7, 10 jours), l'apport d'eau qui permettrait la culture de tel cultivar, sur tel sol, avec tel niveau de rendement ? Et cela, compte tenu de la probabilité qu'a ce déficit d'être comblé naturellement par les pluies, entièrement ou partiellement.

Le logiciel susceptible de donner des éléments de réponse devra simuler le bilan hydrique de la culture en cause, dont le déficit, périodiquement, sera comparé aux résultats d'une analyse fréquentielle des pluies. Trois programmes informatiques constituent le logiciel ORACLE : les programmes ORH109, ORBVNI, ORBVCR, qui vont être présentés ci-après.

### Programme ORH 109

Ce programme procède à l'analyse fréquentielle préalable des pluies. Le système de l'ORSTOM en la matière ajuste, par la méthode du maximum de vraisemblance, une fonction gamma incomplète tronquée, à un échantillon interannuel des pluies. Ces pluies peuvent être totalisées dans tout intervalle de  $n$  jours ( $1 \leq n \leq 365$ ) glissant de  $m$  en  $m$  jours ( $1 \leq m \leq n$ ), ce qui revient à découper le temps de l'année suivant un pas de temps (de  $n$  jours) approprié aux nécessités du problème posé. Ici le pas de temps, de  $n = 10$  jours glissant de  $m = 10$  jours, est approprié au fait que l'on se propose d'irriguer de 10 en 10 jours (quoique de façon plus ou moins périodique). Un exemple de sortie de ce programme est présenté en tableau I.

Les résultats de ce traitement fréquentiel préalable des pluies sont alors rentrés comme données dans un programme de simulation de l'irrigation complémentaire, le programme ORBVNI, qui peut s'appliquer à n'importe quel climat.

### Programme ORBVNI

Ce programme, élaboré pour être apte à proposer dates et doses d'irrigation compte tenu des conditions pluviales, de conditions édaphiques et de contraintes et options relatives à l'irrigation, comporte trois sous-programmes.

## SOUS-PROGRAMME « BILAN HYDRIQUE »

Ce sous-programme calcule périodiquement (ici tous les 10 jours) les termes du bilan hydrique de la culture. Il a déjà été présenté en d'autres occasions (FRANQUIN, 1976) comme susceptible de calculer l'évapotranspiration réelle ETR de la culture ainsi que le déficit du sol et celui de la culture. En raison de l'importance du déficit dans les processus de développement/croissance des plantes, il convient de l'estimer avec une approximation raisonnable et donc de justifier du degré de fiabilité du modèle de bilan hydrique qui le calcule. On peut juger de cette fiabilité à l'examen des figures 1 et 2.

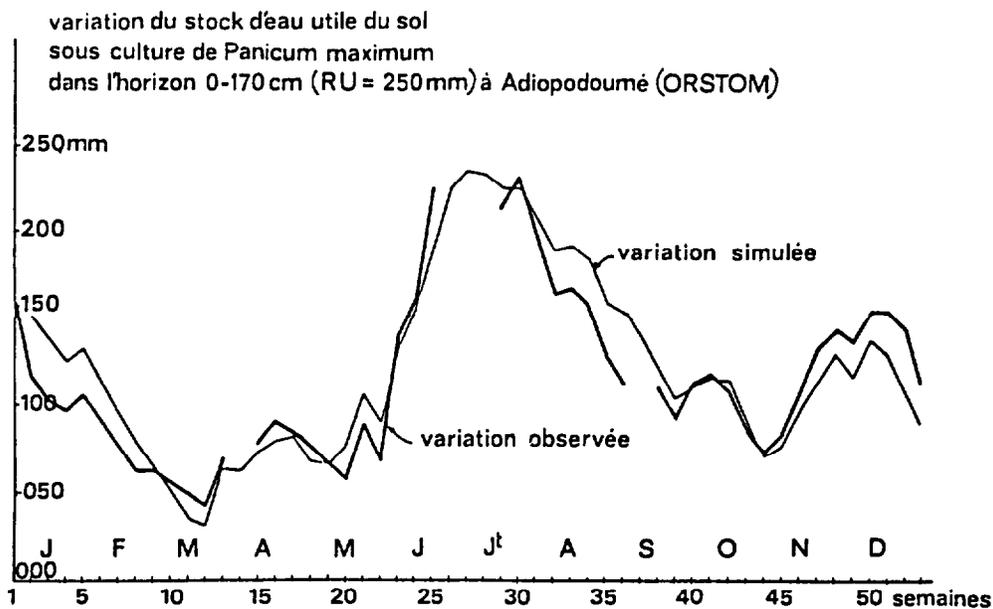


FIG. 1. — Comparaison entre le bilan hydrique simulé et le bilan hydrique observé

La première présente les variations (ici hebdomadaires) calculées du stock d'eau du sol sous prairie permanente, par rapport aux variations observées par neutronométrie. La deuxième montre les valeurs calculées cumulées de l'évapotranspiration réelle ETR d'une végétation naturelle, par rapport aux valeurs mesurées. Le degré de précision du modèle paraît bien compatible avec l'objectif de simuler approximativement les phénomènes, qu'ils soient physiques ou biologiques.

Une sortie du programme ORBVNI est présentée en tableau II, montrant les entrées et sorties du bilan hydrique d'un cultivar de mil dont le cycle de développement/croissance est figuré, suivant un pas de temps de 10 jours, par les coefficients de la colonne K.

## SOUS-PROGRAMME « IRRIGATION »

Le régime d'irrigation est simulé par un sous-programme interfacé avec le précédent. Ce régime est caractérisé par une RU (réserve en eau maximale du sol pour la culture) dont on restaure au plus la fraction M.RU à chaque irrigation. On a :  $0 \leq M \leq 1$ . Dans le tableau II,  $M = 0,75$ .

Le déficit en eau du sol en décade  $i$ , par rapport à M.RU, s'inscrit en décade  $i + 1$  dans la colonne I (M). Le système recherche alors dans les résultats de l'analyse fréquentielle des pluies — et il inscrit (tabl. II) en colonne F (IM) — la probabilité qu'a ce déficit d'être naturellement comblé par les pluies de la décade  $i + 1$ .

Puis le système, faisant l'opération inverse, recherche dans les mêmes données — sans l'inscrire — la hauteur d'eau I (Q) correspondant à une certaine probabilité Q. L'apport d'eau d'irrigation est finalement :  $I = I(M) - I(Q)$ , qui s'inscrit en colonne I et s'additionne aux pluies P de la même décade  $i + 1$ .

Le système propose donc dates et doses d'irrigation pour une RU et une M.RU déterminées. Cette RU n'est pas constante mais croît de zéro au départ (ou d'une valeur supérieure s'il convient) jusqu'à une valeur imposée par les caractéristiques du sol et par celles de la culture qu'il porte.

Le coefficient de réduction M, qui fixe le taux de restauration de la RU à chaque irrigation, est objet

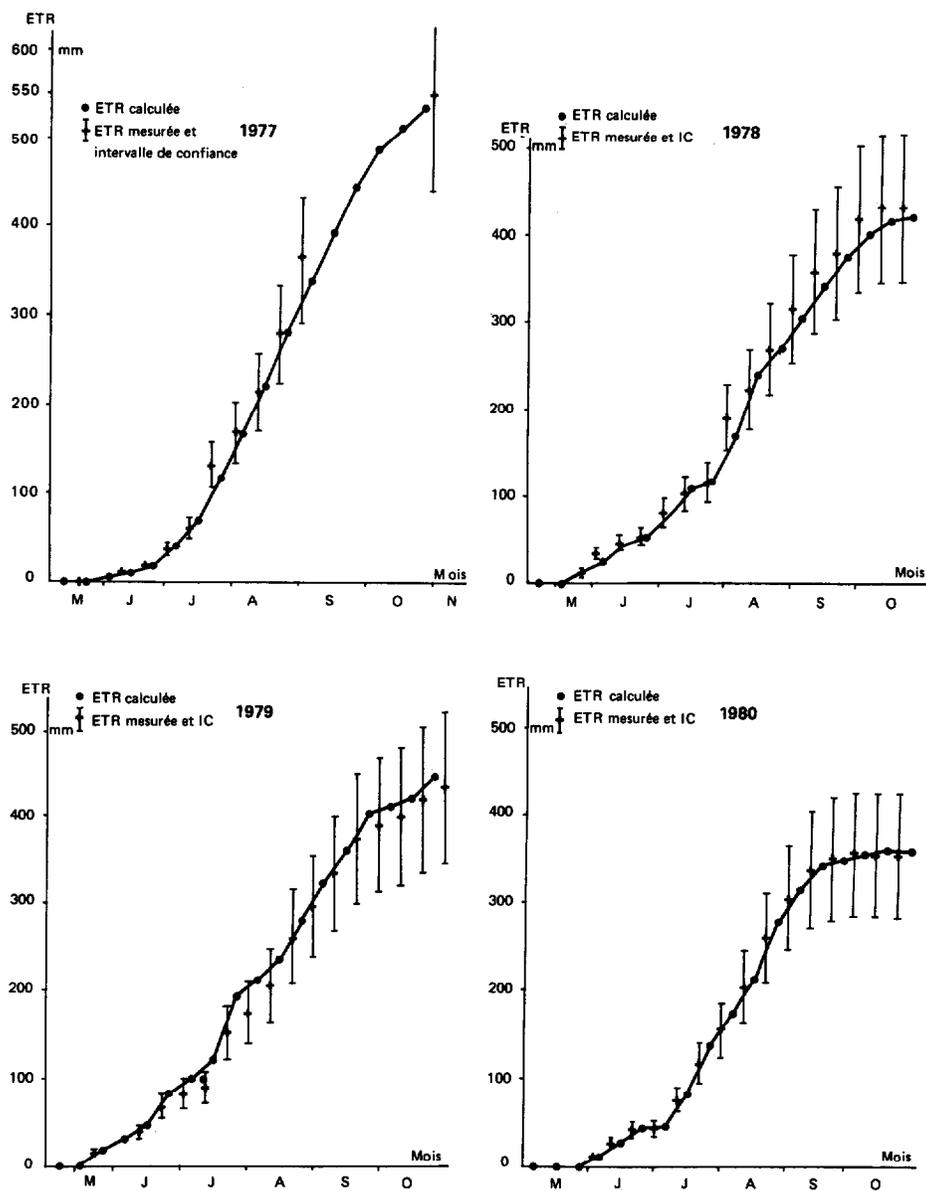


FIG 2. — Parcelle Oursi-Dune. Bilan hydrique décadaire cumulé

ANNEE : 1917  
RU MAXIMALE : 80 MM

NOM DE LA STATION : NIAMEY

PERIODES	P	I(M)	F(IM)	I	MD	RU	HR	ETP	K	ETM	ETR	RS	D(RS)	RDR	RDRC	ETR/ETM	ETR/EIP	ETM-ETH	IPR	
*	171	19.5	0	0.00	49.5	49.5	1.00	67.0	0.40	26.8	26.8	22.7	26.8	0.0	0.0	1.00	0.40	0.0	1.00*	
*	181	7.5	37	0.28	54.4	54.4	1.00	63.0	0.45	28.3	28.3	26.1	28.3	0.0	0.0	1.00	0.45	0.0	1.00*	
*	191	33.0	34	0.60	59.1	59.1	1.00	59.0	0.55	32.4	32.4	26.6	32.4	0.0	0.0	1.00	0.55	0.0	1.00*	
*	201	16.5	33	0.71	43.1	59.1	0.73	56.0	0.70	39.2	39.2	3.9	55.1	0.0	0.0	1.00	0.70	0.0	1.00*	
*	211	2.5	56	0.44	18.6	59.1	0.31	52.0	0.90	46.8	18.6	0.0	59.1	0.0	0.0	0.40	0.36	28.2	0.88*	
*	221	43.1	60	0.51	43.1	59.1	0.73	53.9	1.10	53.9	43.1	0.0	59.1	0.0	0.0	0.80	0.80	10.6	0.87*	
*	231	65.3	60	0.47	70.7	70.7	1.00	55.0	1.10	55.0	54.6	16.1	54.6	0.0	0.0	0.99	0.99	0.4	0.88*	
*	241	27.5	44	0.48	47.2	70.7	0.67	51.0	1.00	51.0	44.1	3.1	67.6	0.0	0.0	0.86	0.86	6.9	0.89*	
*	251	52.5	57	0.19	80.0	80.0	1.00	52.0	0.90	46.8	46.8	33.2	46.8	22.0	22.0	1.00	0.90	0.0	0.89*	
*	261	0.0	0	0.00	33.2	80.0	0.42	55.0	0.70	38.5	33.2	0.0	80.0	0.0	0.0	0.86	0.60	5.3	0.89*	
*	271	7.6	0	0.00	7.6	80.0	0.09	59.0	0.50	29.5	7.6	0.0	80.0	0.0	0.0	0.26	0.13	21.9	0.83*	
TOTAUX	275.0	361.			622.9	468.3	374.7												0.61	73.6

TABLEAU II

Simulation, par programme ORBVNI, de l'irrigation, pour l'année 1917, sans application d'un seuil-plancher d'apport d'eau. Il a fallu apporter 6 irrigations pour atteindre un indice prévisionnel de rendement (IPR) de 0,89 (lu en décade du 261<sup>e</sup> au 270<sup>e</sup> jour)

### Programme ORBVCR

Si l'on expérimente à l'ordinateur sur un aussi grand nombre d'années que possible, c'est afin d'en exploiter statistiquement les résultats. On établira donc les distributions de fréquences des dates et doses d'irrigation, ainsi que des valeurs de IPR. Il en résultera un choix basé sur l'efficacité des paramètres considérés, donc un choix de « politiques » d'irrigation caractérisées par des régimes de dates et de doses d'application de l'eau. Ces politiques d'irrigation doivent être comparées par simulation, à l'ordinateur, de chacune d'elles, au moyen d'un programme classique d'évaluation des termes du bilan hydrique, permettant d'appliquer des doses d'irrigation : c'est le programme ORBVNI est interfacé avec

d'expérimentation à l'ordinateur, dans la perspective d'atteindre un niveau donné de rendement relatif (au rendement potentiel ou au rendement maximal d'une année déterminée), compte tenu du souci d'économiser l'eau. En fait, l'application du coefficient M revient à distinguer dans le sol deux réservoirs superposés : l'un, de capacité M.RU, est alimenté par les pluies et les irrigations ; l'autre, de capacité RU-M.RU, essentiellement alimenté par les pluies qui font déborder le premier, est un réservoir de secours quand le premier est vide ; il joue aussi un rôle-tampon quand il y a forte interférence entre pluie et irrigation.

Car on s'efforcera généralement de limiter la fréquence des irrigations, quitte à appliquer des doses plus fortes. On se donne donc un seuil S (= 10, 20, 30... mm) au-dessous duquel on est convenu de ne pas irriguer, le déficit étant reporté à la décade suivante dans la mesure où il n'aura pas plu. On expérimente donc à l'ordinateur sur M et sur S.

Le sous-programme « bilan hydrique » estime aussi les pertes d'eau RDR par ruissellement/drainage, qu'il convient de minimiser ; le ruissellement en excès de la RU, que l'on confond ici avec le drainage, se distingue de celui qui se produit en début de saison sur des sols croûteux auxquels on n'a pas appliqué les techniques d'aridoculture, d'infiltration et de conservation de l'eau, susceptible de le limiter.

Ce sous-programme évalue le déficit hydrique ETM-ETR de la culture, qui doit être minimal ; enfin le rapport ETR/ETM, ou évapotranspiration relative, qui est à la fois un indice de satisfaction des besoins en eau de la culture et un indice de production de la matière sèche. Cette production est fonction linéaire de cet indice ETR/ETM compris entre zéro et 1 ; ce qui permet, au moyen d'un troisième sous-programme, de calculer un *indice relatif prévisionnel de productivité*, IPR, tel que :  $IPR = \sum (ETR/ETM)/d$ , où d est le nombre de décades du cycle de végétation de la culture.







ANNEE : 1917 NIAMEY

RU MAXIMALE : 100. MM

PERIODES	P	I	HU	RU	HR	ETP	K	EIM	ETR	RS	RDR	KDRC	U(RS)	EIM-EIK	ETM/ETM	ETK/EIP	IPMI	IPM2
JUL 3	2.2	30.0	32.2	32.	1.00	67.0	0.40	26.8	26.8	5.4	0.0	0.0	26.8	0.00	1.00	0.4	1.00	
JUL 1	7.5	0.0	12.9	32.	0.40	63.0	0.45	28.3	12.9	0.0	0.0	0.0	32.2	15.45	0.46	0.2	0.73	
JUL 2	33.0	0.0	33.0	33.	1.00	59.0	0.55	32.4	32.4	0.6	0.0	0.0	32.4	0.00	1.00	0.5	0.82	
JUL 3	16.5	0.0	17.1	33.	0.52	61.6	0.70	43.1	17.1	0.0	0.0	0.0	33.0	26.07	0.40	0.5	0.71	
AOU 1	7.7	0.0	7.7	33.	0.23	52.0	0.90	46.8	7.7	0.0	0.0	0.0	33.0	39.10	0.16	0.1	0.60	
AOU 2	57.9	0.0	57.9	58.	1.00	49.0	1.10	53.9	49.0	8.9	0.0	0.0	49.0	4.90	0.91	1.0	0.65	
AOU 3	45.3	0.0	54.2	58.	0.94	55.0	1.10	60.5	54.2	0.0	0.0	0.0	57.9	6.33	0.90	1.0	0.69	
SEP 1	52.0	0.0	52.0	58.	0.90	51.0	1.00	51.0	51.0	1.0	0.0	0.0	56.9	0.00	1.00	1.0	0.73	
SEP 2	28.0	30.0	59.0	59.	1.00	52.0	0.90	46.8	46.8	12.2	0.0	0.0	46.8	0.00	1.00	0.9	0.76	
SEP 3	0.0	0.0	12.2	59.	0.21	55.0	0.70	38.5	12.2	0.0	0.0	0.0	59.0	26.27	0.32	0.2	0.71	
OCT 1	9.2	0.0	9.2	59.	0.16	59.0	0.50	29.5	9.2	0.0	0.0	0.0	59.0	30.30	0.31	0.2	0.68	
TOTAL	259.3	60.0				623.6		457.7	519.3					138.4			0.5	

BILAN CLIMATIQUE : TOTAL PLUIE = TOTAL ETP : -304,3 MM

TABLEAU V

Simulation, par programme ORBVCR, pour l'année 1917, d'une « politique » d'irrigation consistant à appliquer 30 mm au semis et 30 mm dans la décade de 30 à 20 jours avant maturité. Comparer les valeurs d'IPR avec celles des tableaux II et IV

P. FRANQUIN, M. SICOT

La fonction la plus simple est celle qui estime le rendement en fonction de l'indice :

$$IPR = \frac{\sum (ETR/ETM)}{d}$$

où d est le nombre de décades du cycle de végétation.

Le rendement de la culture étant linéairement fonction de ETR/ETM, on peut s'attendre à trouver une relation telle que : Rendement = b (IPR) + a. C'est bien ce que l'on constate dans deux années d'épreuve au champ (pour une certaine intensification).

1<sup>re</sup> année

Supposons (ce n'est qu'extrapolation de résultats acquis ailleurs sur blé), pour un mil au Sahel, la fonction de production représentée en figure 3 d'équation :

$$R_1 = 48,2 (IPR) - 14,2 \quad r^2 = 0,93 \quad (1)$$

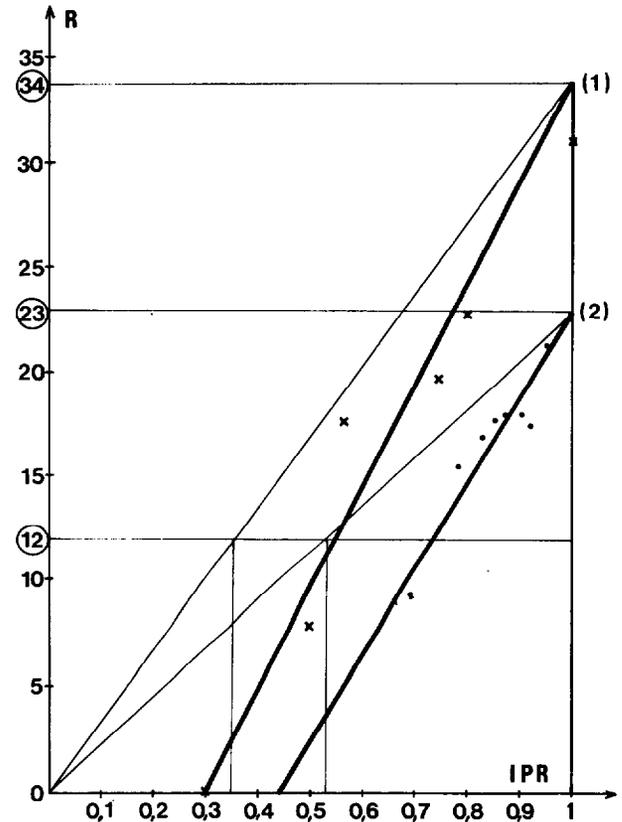


FIG 3. — Fonctions de production linéaires pour la 1<sup>re</sup> (1) et la 2<sup>e</sup> (2) années d'épreuve au champ. Les abscisses à l'origine traduisent une certaine inefficience de l'eau

Ajustée à 6 points, cette fonction rend compte de la comparaison de 5 politiques d'irrigation à un témoin sans apport d'eau. Le rendement maximal possible, dans

les conditions de cette première année, est de 34 q/ha (pour IPR = 1).

Or on vise un rendement de sécurité de 12 q/ha *au moins*, ce rendement étant susceptible de rentabiliser les investissements sur la base de 5 q/ha, le rendement sans intensification ne dépassant pas 7 q/ha.

Le rendement relatif  $R_r$  est de  $12/34 = 0,35$ , ce qui correspond, d'après (1), à un IPR de 0,54, bien supérieur à 0,35. Mais *quel rapport y a-t-il* entre ce 0,35 et ce 0,54 ?

Si la droite-fonction (1) passait par l'origine des coordonnées, on aurait  $R_r = 0,35 = IPR$ . Traçons en effet, du point de rendement maximal (IPR = 1,  $R_1 = 34$ ), la droite joignant l'origine des coordonnées. De l'intersection de cette droite avec l'horizontale  $R = 12$ , on abaisse la verticale qui coupe l'axe des IPR (abscisses) au point  $IPR = 0,35 = R_r$ .

Par rapport à cette droite-origine *idéale*, la droite-fonction (1) traduit une certaine inefficience de l'eau que mesure l'abscisse à l'origine :  $14,2/48,2 = 0,295$  (0,30 approximativement). De cette inefficience, il importera évidemment d'identifier les causes afin d'améliorer encore le rendement avec le même apport d'eau.

## 2<sup>e</sup> année

Dans une deuxième année d'épreuve au champ, on a obtenu une autre fonction de production d'équation :

$$R_2 = 40,3 (IPR) - 17,4 \quad r^2 = 0,89 \quad (2)$$

Cette droite-fonction ajustée à 8 points donne un rendement maximal (IPR = 1) de 23 q/ha contre 34 pour (1) ; avec une abscisse à l'origine de  $17,4/40,3 = 0,43$  contre 0,30 pour (1).

Si on vise toujours un rendement de sécurité d'au moins 12 q/ha, le rendement relatif correspondant est  $R_r = 12/23 = 0,52$  contre 0,35 avec la fonction (1). Cette valeur 0,52 peut être retrouvée sur le graphique de la figure 3 comme il a été fait concernant (1) : on trace la droite-origine qui joint le point de rendement maximal (IPR = 1,  $R_2 = 23$ ), etc. D'après (2), enfin, l'IPR correspondant à 0,52 est 0,73.

Pour réaliser ce rendement-limite de 12 q/ha, il faut, selon (2), irriguer de façon à dépasser 0,73, ce qui demande bien plus d'eau qu'avec la fonction (1) pour dépasser IPR = 0,54.

Cette question pose le problème de la comparaison des droites (1) et (2), dont la différence moyenne représente 9 q/ha de perte, laquelle résulte essentiellement, parmi d'autres causes de variation de la productivité, d'un fort enherbement que l'on n'a pas pu maîtriser. Cette herbe a disposé, par voie de transpiration propre, d'une partie de l'eau attribuée à la culture,

phénomène de compétition que représente pour l'essentiel la différence des abscisses à l'origine :  $0,43 - 0,30 = 0,13$ .

Or la différence des coefficients de régression est à la limite de la signification statistique au seuil de probabilité 0,05. D'où deux interprétations possibles :

— Les coefficients de régression ne diffèrent pas : un même accroissement d'apport d'eau détermine un même accroissement de productivité, mais à partir de niveaux différents que représentent les abscisses à l'origine : 0,30 et 0,43. Le principal de la différence, 0,13, mesure l'effet de compétition pour l'eau de la culture et de l'herbe.

— Les coefficients de régression sont différents : concurrentement à la compétition pour l'eau, d'autres facteurs ont pu jouer négativement sur la productivité, ramenant le rendement maximal de 34 q/ha en première année à 23 en deuxième.

## CONCLUSIONS

— Dans le premier cas (pas de différence), une surintensification du système de culture par des intrants économiques, afin de relever le rendement maximal, conduirait vraisemblablement à l'échec ; à moins que l'intervention ne vise précisément à agir contre l'enherbement au moyen d'un herbicide ; d'où la nécessité alors de relever le rendement de sécurité des investissements d'une quantité en rapport avec les frais d'application de l'herbicide. Une autre sorte d'intervention, elle aussi coûteuse, consisterait à lutter contre l'herbe lors de la préparation du sol et/ou de son entretien, ce dans le cadre des principes d'aridoculture. Ce n'est qu'à ces prix que l'on pourrait espérer maintenir un rendement potentiel de 34 q/ha.

— Dans le second cas (différence significative), une surintensification du système, concurrentement à la lutte contre l'herbe, ne serait pas plus efficace que ci-dessus : il ne reste qu'à identifier les facteurs de minoration de la productivité afin de les neutraliser, si l'on veut pouvoir fixer le rendement potentiel à 34 q/ha.

Pour les pratiques d'aridoculture évoquées ci-avant, ce sont certes aussi des procédés d'intensification du système. Mais si on convient que ce sont les intrants économiques en général qui agissent sur le coefficient  $b$  de la fonction de production, ce sont les pratiques d'aridoculture, d'infiltration et de conservation de l'eau, qui sont le mieux aptes à diminuer la valeur du coefficient  $a$ .

On peut rattacher à cette dernière catégorie les procédés de « calage » optimal des cycles de cultivars par rapport aux disponibilités hydriques. Il conviendrait alors de rendre compte de l'adéquation de ce calage au moyen d'une fonction de production multiple se

rapportant aux phases phénologiques de la culture, d'équation :

$$R = \sum_{i=1}^{i=p} a_i (IPR_i)^{b_i}$$

Ainsi le système ORACLE a été élaboré afin non seulement d'expérimenter sur données à l'ordinateur mais aussi de procéder à l'interprétation des épreuves au champ. Ce, notamment, pour une meilleure application

au Sahel de l'irrigation complémentaire aux pluies et pour une contribution à l'intensification de ses systèmes de culture.

On peut ajouter enfin, en faveur de cette irrigation complémentaire, qu'elle favorise le lessivage des sels, à la différence de l'irrigation permanente en saison sèche qui conduit tôt ou tard à une salinisation des terres.

*Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23 mars 1986.*

### BIBLIOGRAPHIE

FRANQUIN (P.) et FOREST (F.), 1977. — Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. — *Agron. Trop.* ; XXXII, 1 : 7-11.

FRANQUIN (P.), 1981. — Modèles fréquentiels de la période climatique de végétation. Potentialités culturelles. — *In Actes du 9<sup>e</sup> Colloque d'Informatique et Biosphère, Paris* : 127-175.