

# IRRIGATION DE COMPLEMENT DES CEREALES: UNE METHODE D'ANALYSE. CAS DE LA REGION DE MEKNES, MAROC

FILALI BOUBRAHMI ABDELWAHAB (\*)

L'activité économique du Maroc reste dominée par l'agriculture. On estime que, selon les années, le PIB agricole représente 25 à 30% du PIB national. En 1980 l'agriculture a contribué pour 47% de l'emploi total. Cependant le Maroc compte a peu près 7.443.600 ha de terres cultivables dont 4.583.000 ha sont couvertes par les céréales produisant 45.503.000 quintaux en moyenne avec un PIB de l'ordre de 60% du PIB agricole. D'où la place de choix qu'occupe cette culture dans l'économie aussi bien régionale que nationale. Durant les trentes dernières années, les rendements des céréales ont connu une extrême variabilité. Ces fluctuations constituent une caractéristique fondamentale du climat méditerranéen. Au Maroc du fait que le cycle végétatif de la plupart des céréales (Blé et Orge) coïncide avec la période pluvieuse ces cultures ne sont pas irriguées traditionnellement. Cette situation de fait engendre des difficultés énormes tant au niveau de la disponibilité de cette denrée qu'au niveau de l'économie du pays. En effet, le Maroc autrefois exportateur devient depuis 1960 importateur du blé. Le déséquilibre qui existe entre la croissance démographique (forte de l'ordre de 2,8%) et la progression de la production (faible de l'ordre de 2%) ne peut qu'entraîner une dépendance de plus en plus accentuée vis à vis de l'extérieur. D'où la nécessité d'utilisation de techniques modernes pour augmenter la production en céréales.

Nombreuses sont les techniques culturales qui ont été développées dans le seul but d'augmenter la production. Mais toujours est-il que cet objectif ne peut être atteint que lorsque la culture est bien alimentée en eau durant son cycle végétatif. Si durant certaines compagnes les pluies peuvent être suffisantes pour répondre aux exigences minimales en eau de la plante, ces quantités restent insuffisantes pour garantir une production maximale. Encore plus, durant d'autres années la sécheresse peut compromettre toute la production. Il y a donc un besoin urgent pour non seulement augmenter la production en grain des céréales, mais aussi maîtriser les rendements à un niveau stable répondant aux besoins du pays.

## Définition du problème

Une augmentation des superficies emblées

(\*) Département Equipement Rural, Ecole Nationale d'Agriculture, Meknes, Maroc.

### Abstract

In Morocco, cereal production is inadequate to satisfy the country needs of this provision. Improving agricultural techniques in order to increase soil productivity is not only necessary but also it is the best solution to consider. Many endeavors have been done in order to get high agricultural yields. However, the techniques used were inefficient because of the soil moisture deficiency that distresses plant growth. Cereal irrigation is the best way that may lead to production increase. Water balance equation of soil-plant-climate system is analysed. This study leads one to establish the recursive equation of predicting plant water use. Applied to Meknes region data, cereal water needs showed that plant water demands are low but, situated at the critical periods. The analysis of water balance equation was refined to establish differential relationship of soil moisture status with time. The integration of such equation allows to build up a regressive equation to compute the actual evapotranspiration from one stage to another. The computational procedure is well performed by a series of FORTRAN programs constructed to this end. As a result, cereal yield-functions are established. All of these relations are of power type verifying Hanks model. The correlation is significant and the correlative coefficients are high. These functions make appear that plant growth is very sensitive to water, and soil moisture depletion may induce a decrease in cereal yield more than proportional. Economic analysis of irrigation systems is done. It was shown that irrigation of cereal allows not only to increase the grain yield of about 120%, but also a benefit which counterbalances both investment and operation charges, and gives an increase of the farm net benefit.

### Résumé

Au Maroc la production des céréales reste insuffisante pour répondre aux besoins intérieurs du pays de cette denrée. L'augmentation de la productivité du terrain par l'amélioration des techniques culturales est non seulement nécessaire mais c'est la seule solution à envisager. Des efforts énormes ont été déployés pour augmenter les rendements. Mais les techniques utilisées sont limitées à cause du stress hydrique qui affecte cette culture durant tout son cycle végétatif. L'irrigation des céréales est la seule voie pour l'amélioration de la production. L'analyse de l'équation du bilan hydrique du système sol-plante-climat a été faite. Cette étude a permis d'établir une équation récursive de calcul des besoins en eau des cultures. Appliquée aux données de la région de Meknes, le calcul des besoins en eau de ces cultures a montré que les quantités d'eau demandées sont faibles mais se situent à des périodes critiques. L'analyse de l'équation du bilan hydrique a été raffinée et a permis d'établir l'équation différentielle de variation instantanée des réserves en eau du sol. L'intégration de cette équation a conduit à une équation type régressive de calcul de l'évapotranspiration réelle d'une période à une autre. Le calcul de l'eau réellement consommée des céréales de la région de Meknes a été exécuté par une série de programmes en langage Fortran construits à cette fin. Les résultats de cette étude ont conduit à l'établissement des fonctions de production. Ces fonctions sont toutes du type puissance vérifiant ainsi le modèle proposé par Hanks. Les coefficients de corrélation sont élevés et significatifs. Ces relations ont permis de mettre l'accent sur l'importance de l'eau dans la production des céréales où le déficit hydrique engendre une chute de production plus que proportionnelle. Une analyse économique a été entreprise. Il a été démontré que l'irrigation des céréales permet non seulement une augmentation de la productivité du sol de plus de 120% mais aussi procure une marge nette économique suffisante qui contrebalance les charges aussi bien fixes que proportionnelles et augmente le bénéfice net des exploitations agricoles.

vées en céréales ne peut constituer une solution. Cette extension de surface cultivée, même si elle est faite aux dépens d'autres cultures jugées moins importantes, ne peut que déplacer le problème qui reste ainsi posé. La seule solution est l'augmentation des rendements. Dans cette dernière perspective, des efforts énormes ont été déployés dans ce secteur pour améliorer les rendements. Ainsi, les techniques de travail du sol, l'utilisation des engrais et des produits phytosanitaires et l'emploi des semences sélectionnées ont été largement vulgarisés. Mais si ces techniques ont apporté une certaine amélioration il n'en demeure pas moins que leur efficacité dépend des conditions climatiques particulièrement de la pluviométrie et sa répartition. Ceci suggère l'utilisation des techniques appropriées pour

améliorer l'alimentation hydrique des cultures. Donc l'irrigation est la seule voie à considérer pour augmenter la productivité du terrain. Ainsi, un apport d'eau même faible durant le cycle végétatif de la culture ne peut qu'engendrer une amélioration quelconque de la croissance de la plante et son développement.

Ce besoin d'augmenter la production des céréales, aussi pressant qu'il soit, reste très insuffisant pour justifier l'irrigation de ces cultures. L'irrigation de complément des céréales peut être contestée car il y a aussi l'agriculteur. Continuellement présent dans son exploitation, le paysan tout en s'occupant de la valorisation de ses terres, de la rentabilité de son travail et de son matériel doit s'occuper aussi du devenir de son revenu. Entre la nécessité d'irriguer et la

décision de faire cet apport d'eau l'agriculteur se trouve devant un choix difficile. La question qui se pose alors est Comment peut-on concevoir l'irrigation des céréales? Pour répondre à cette question, une approche synthétique doit être entreprise pour aider l'agriculteur à faire son choix et justifier l'irrigation de ces cultures. Si cette analyse doit avoir comme objectif l'augmentation de la production des céréales en augmentant la productivité du terrain elle doit aussi viser l'augmentation de la rentabilité de l'exploitation placée dans son milieu socio-économique. Pour cela il est nécessaire de mener un diagnostic de la situation actuelle en évaluant la production réelle, la productivité du terrain et les ressources en eau et établir les possibilités d'irrigation. La phase finale doit passer obligatoirement par la détermination des charges imputables à tout apport d'eau et les marges économiques à en tirer.

C'est cette approche qui sera entreprise dans cet article en prenant comme exemple la région de Meknes dont nous disposons de toutes les données nécessaires pour bien mener une telle étude.

## Données de la région de Meknes

Cette étude s'est portée sur les données disponibles de la région de Méknès et concerne généralement les principales cultures céréalières (blé et orge). La superficie totale couverte par les céréales est de l'ordre de 154.500 ha en moyenne avec une production de 2,3 10<sup>6</sup> quintaux par an. Les rendements restent faibles de l'ordre de 12,53 q\*/ha, 18,26 q\*/ha et 13,45 q\*/ha respectivement pour le blé dur, blé tendre et orge. Le climat est du type méditerranéen avec un hiver pluvieux et un été chaud et sec. La pluie moyenne est de 531,2 mm (moyenne de 39 années) avec un maxima de 765,6 mm et un minima de 257,5 mm. La pluviométrie manifeste une variation interannuelle et intrannuelle (voir **tableau 1**). Le coefficient de variation est de l'ordre 86,02%. Les températures sont généralement plus stables que les pluies avec une amplitude thermique située en Août. Les vents ne présentent aucune particularité par rapport à l'ensemble Marocain et sont liés aux anticyclones des Açores. En hiver ce sont les vents du sud-ouest qui prédominent alors qu'en été des vents du nord-est et d'est soufflent fréquemment. L'évaporation a été calculée par la formule de Penmann ajustée. Pour Méknès cette formule a été établie par Kutsch (1978) sous forme:

$$E_o = 0,36.T - m$$

avec E<sub>o</sub> l'évaporation moyenne journalière d'une surface d'eau libre en mm, T la température moyenne journalière en °C et m un coefficient variable selon les décades et caractéristiques de la région.

Les évaporations moyennes journalières d'une nappe d'eau libre telles qu'elles sont

**Tableau 1 Pluviométrie, Température et Evaporation Moyennes mensuelles (1951-1989), Région de Méknès.**

	J	F	M	A	M	J	Jt	AT	S	O	N	D
<b>Pluie, mm</b>												
m	79,4	73,1	70,7	63,6	35,4	14,0	1,3	2,3	12,2	39,2	68,2	71,8
σ	55,2	53,8	45,4	46,6	29,0	15,1	3,7	4,8	15,6	34,5	43,7	52,6
<b>Temp., °C</b>												
m	9,3	10,7	12,0	13,7	16,9	20,8	24,6	24,6	22,2	18,1	13,8	10,5
σ	1,4	1,9	1,8	1,6	2,2	1,9	2,0	1,8	2,1	2,1	1,8	1,7
<b>Evap., mm</b>												
m	1,25	2,05	2,65	3,41	4,31	5,62	6,83	6,36	4,96	3,42	1,94	1,31
σ	0,49	0,67	0,64	0,59	0,79	0,69	0,73	0,65	0,74	0,76	0,66	0,61

m: moyenne  
σ: écart type.

calculées pour Méknès sont résumées par le tableau 1.

La région présente une grande hétérogénéité pédologique aussi bien en surface qu'en profondeur. Les essais menés par Filali (1979) ont permis d'établir une carte des différents types de sols distingués sur la base des caractéristiques hydrodynamiques. 23,72% des sols présentent une charge en cailloux assez importante et nécessitant ainsi des aménagements préalables et sont souvent utilisés comme parcours. 31,6% des sols présentent une croûte calcaire à une profondeur de 1 m en moyenne. Les moyennes de la région de ces caractéristiques sont résumées comme suit:

Humidité équivalente 23,705%  
Humidité à la capacité au champs 25,561%  
Humidité au point de flétrissement 12,883%  
Humidité hygroscopique 5,268%  
Densité apparente 1,313

Les réserves utiles par mètre de profondeur peuvent atteindre 166,5 mm. Il a été observé que la plupart des sols présentent une semelle de labour assez compacte à une profondeur variant de 25 à 30 cm.

## Besoins en eau des céréales

Dès le moment où on décide d'aménager pour irriguer, le problème qui se pose est la quantité d'eau nécessaire pour répondre aux exigences hydriques des cultures. Il s'agit des besoins en eau des plantes qui englobent les quantités d'eau mobilisées plus les pertes. De toutes les approches utilisées pour déterminer les besoins en eau des plantes, celle se basant sur l'étude de l'équation du bilan hydrique est la plus courante.

### Equation du bilan hydrique

L'équation du bilan d'eau du système sol-plante reflète l'importance des apports et des pertes pendant une période donnée. Elle se base sur le principe que le sol, la plante et l'atmosphère constituent un système intégré et où le processus d'écoulement d'eau d'un niveau à un autre s'opère de façon continue. Ce mouvement d'eau implique un flux d'eau du réservoir sol vers la plante pour répondre aux exigences de l'évapotranspiration. Dans les conditions d'un cli-

mat méditerranéen où les condensations de rosée et du sol et la remontée capillaire sont négligeables, l'équation du bilan hydrique d'un système sol-plante pour une période donnée *i* peut être formulée comme suit:

$$RS_{fin} = RS_{début} + P_i - D_i - R_i - ET_i$$

avec P<sub>*i*</sub>, D<sub>*i*</sub>, R<sub>*i*</sub>, ET<sub>*i*</sub>, respectivement la pluviométrie, le drainage, le ruissellement et l'évapotranspiration pendant la période *i*. RS<sub>*fin*</sub> et RS<sub>*début*</sub> sont les réserves utiles en eau du sol respectives de la fin et du début de la période *i*.

Dans les conditions d'une culture abandonnée à elle-même (sans apport d'eau supplémentaire) les réserves en eau du sol doivent varier dans les limites des réserves en eau utiles. Mais le but à atteindre est de pouvoir alimenter la plante durant son cycle végétatif pour assurer l'humidité nécessaire à sa croissance et son développement dans les meilleures conditions. Pour atteindre cet objectif et compte tenu des réserves en eau du sol, de son état énergétique et du développement racinaire de la plante on doit pouvoir déterminer la quantité d'eau à apporter. Lorsqu'on envisage l'irrigation des céréales c'est dans le but d'augmenter les rendements. Or on sait qu'une production maximale implique une intense activité photosynthétique et par conséquent tous les facteurs de production sont à leur optimum notamment le facteur eau. Donc la plante doit s'alimenter à partir des réserves en eau du sol facilement utilisables. On en déduit que le calcul des besoins en eau des cultures implique que les réserves en eau du sol doivent varier dans les limites des réserves facilement utilisables si bien que l'équation du bilan d'eau peut être formulée comme suit:

$$RFU_{i+1} = RFU_i + P_i - D_i - R_i - ETM_i$$

Il s'agit d'une équation régressive reliant le bilan hydrique d'une période *i* à la période qui suit. Le calcul est alors progressif dans le temps et permet ainsi de connaître le niveau d'eau dans le sol à partir de la connaissance des autres paramètres de l'équation. Trois cas peuvent se présenter:

1<sup>er</sup> cas:  $RFU_{i+1} > RFU_{max}$

On peut concevoir que le bilan d'eau dépasse de loin les capacités hydrodynamiques du

sol en question. On a alors un excédent d'eau qui sera perdu par ruissellement et drainage profond de valeur:

$$R_i + D_i = RFU_{i+1} - RFU_{\max}$$

par conséquent

$$RFU_{i+1} = RFU_{\max}$$

et les besoins en eau pendant cette période  $i$  sont nuls:

$$I_i = 0$$

2<sup>ème</sup> cas:  $0 < RFU_{i+1} < RFU_{\max}$

Le bilan d'eau est suffisant pour assurer un niveau d'eau convenable dans le sol ne nécessitant aucun apport d'eau, auquel cas on a:

$$R_i + D_i = 0.0$$

et

$$I_i = 0$$

3<sup>ème</sup> cas:  $RFU_{i+1} < 0$

Cette situation implique que le bilan d'eau est loin d'être satisfaisant. Le niveau d'eau dans le sol a atteint sa côte d'alerte si bien que la plante s'alimente à partir des réserves difficilement utilisables, RDU. Les conditions optimales d'eau ne sont plus préservées pour cela il faut apporter de l'eau. La quantité nécessaire est:

$$I_i = -RFU_{i+1}$$

Il est important de signaler qu'une  $RFU_{i+1}$  négative ne signifie pas obligatoirement que les réserves en eau du sol sont épuisées. La plante ne s'alimente plus à partir des réserves en eau facilement utilisables et il faut un complément  $I_i$  pour ramener ces réserves à un niveau optimal.

Paramètres de calcul des besoins en eau

Aussi simple qu'elle soit l'équation du bilan hydrique regroupe plusieurs paramètres très délicats voire même difficiles à déterminer. Elle reflète les différentes interactions qui existent entre les systèmes sol-plante et sol-atmosphère d'une part et plante-atmosphère d'autre part.

L'enquête menée par l'auteur dans la région a révélé que la plupart des céréales sont semées après les premières pluies d'octobre. Plus de 80% de la surface réservée aux céréales est souvent semée avant le 15 décembre. le lit de semence est en moyenne à une profondeur variant entre 5 et 10 cm. Ces observations ont permis d'établir la succession dans le temps des différents stades végétatifs des céréales (voir **tableau 2**). Le développement racinaire dépend du type de plante, de la texture du sol de son aération et sa compaction, de l'humidité et de la pluie et de sa répartition. Les valeurs de la profondeur racinaire, l'indice foliaire et le coefficient cultural, telles qu'elles ont été établies pour les céréales dans la région de Méknés, sont résumées par le tableau 2.

La pluviométrie efficace est la quantité d'eau effectivement stockée dans la zone racinaire

**Tableau 2 Développement racinaire, Indice foliaire et Coefficient cultural des Céréales dans la Région de Méknés.**

	D	J	F	M	A	M	J
Stade de Develop	Semis	Sde A	Sde B	Floraison		Maturation	
D° jour	0,0	390	550	1480		2200	
Prof. Rac. en cm	11,25	26,88	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Indice Foliaire	0,26	1,53	2,30	3,00	3,00	3,00	2,56
Coef. Cultural	0,27	0,62	0,97	1,10	1,03	0,89	0,45

**Tableau 3 Pluviométrie efficace, ETM, Déficit pluviométrique et Besoins en eau Moyennes mensuelles (1951-1989), Région de Méknés.**

	J	F	M	A	M	J	Jt	AT	S	O	N	D
<b>Pluie, Efficace mm</b>												
m	36,1	34,2	33,3	30,6	19,6	10,1	5,8	6,1	9,5	18,8	27,3	32,5
$\sigma$	21,0	20,8	17,6	18,0	11,2	5,2	1,3	1,6	5,4	11,9	14,3	19,6
<b>ETM mm</b>												
m	24,0	56,6	91,0	90,9	60,3	42,1	52,9	48,7	37,1	26,4	14,6	10,9
$\sigma$	9,4	18,1	21,6	15,8	11,0	5,2	5,6	5,0	5,6	5,9	4,9	5,1
<b>Déficit Pluvio mm</b>												
m	3,5	14,9	36,3	41,8	31,2	28,8	51,6	46,4	26,4	8,9	0,9	0,7
$\sigma$	8,0	23,8	36,6	35,7	25,7	15,4	7,1	6,7	14,6	11,0	4,3	2,5
<b>Besoins en Eau mm</b>												
m	2,1	13,7	2,6	51,2	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$\sigma$	5,5	17,6	38,9	35,2	25,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

m: moyenne  
 $\sigma$ : écart type.

re qui servira à l'évaporation et la transpiration. Sa valeur dépend de plusieurs paramètres notamment la pluie, sa répartition et son intensité, du sol de sa perméabilité et de son humidité et de la topographie. Les pluies efficaces ont été calculées en utilisant la grille du USBR et sont résumées par le tableau 3. Les pluies efficaces ne sont pas une fraction fixe de la pluviométrie. Pour chaque année en moyenne cette pluie est de 48% pendant la période pluvieuse et peut atteindre 100% en été.

Les apports d'eau nécessaires aux céréales

La méthode décrite ci-dessus suppose une alimentation hydrique abondante. Le sol est toujours à une humidité supérieure à la côte d'alerte et par conséquent la régulation stomatique est réduite à son minimum. Une série de programmes sur ordinateur intitulés PE.for, KT.for, DP.for et DA.for ont été construits. Ces programmes sont interactifs et permettent le calcul successif d'une période à une autre pendant toute la durée d'observation qui dans le cas de la région de Méknés est de 39 ans. Le déficit pluviométrique calculé est de 157,2 mm alors que l'ETM est de 375,8 mm. L'ETM d'un sol nu a été calculé en utilisant le coefficient de 0,25 (voir **tableau 3**). Les besoins en eau tels qu'ils sont calculés progressivement mois par mois depuis 1951 à 1989 ont permis de

constater que des apports d'eau sont nécessaires surtout pendant les mois de mars, avril et mai avec une probabilité qui dépasse 80%. Les quantités d'eau à apporter restent cependant très faibles mais à des dates critiques. C'est durant ces mois où les stades de développement sont les plus sensibles.

Un déficit même très faible peut engendrer une chute de production très importante. Les besoins en eau tels qu'ils sont calculés sont de 143,4 mm avec une répartition mensuelle très inégale (voir **tableau 3**). Le débit fictif moyen caractéristique est de 0,197 l/s/ha au mois d'Avril.

## Consommations en eau réelles des céréales

Le calcul des besoins en eau, fait précédemment, ne justifie pas l'implantation d'un système d'arrosage. Si ce calcul est très utile pour mettre en évidence l'importance des quantités d'eau à apporter et augmenter la production, il reste cependant très insuffisant pour convaincre le paysan de l'effet bénéfique d'une telle opération. La question qui se pose est que l'irrigation des céréales est-elle suffisante pour procurer la production nécessaire susceptible de compenser non seulement les investissements de l'installation mais aussi de laisser une marge nette bénéficiaire.



## Calcul de l'évapotranspiration réelle

Le calcul de l'ETR peut toujours être abordé par l'équation du bilan hydrique avec cependant des réserves en eau du sol qui varient dans les limites des réserves utiles. L'équation du bilan hydrique devient:

$$RU_{i+1} = RU_i + P_i - D_i - R_i - ET_i$$

Trois cas sont à distinguer:

1<sup>er</sup> cas:  $RU_{i+1} > RU_{\max}$   
 $R_i + D_i = RU_{i+1} - RU_{\max}$   
 $ET_i = ETM_i$   
 $RU_{i+1} = RU_{\max}$

2<sup>ème</sup> cas:  $RDU_{\max} < RU_{i+1} < RU_{\max}$   
 $R_i + D_i = 0,0$   
 $ET_i = ETM_i$

où

$$RDU_{\max} = RU_{\max} - RFU_{\max}$$

3<sup>ème</sup> cas:  $RU_{i+1} < RDU_{\max}$   
 $R_i + D_i = 0,0$   
 $ET_i < ETM_i$

Pour raisonner ce cas on peut reprendre l'équation du bilan hydrique sous la forme suivante:

$$RU_{i+1} - RU_i = P_i - ET_i$$

si on admet que la pluviométrie est uniformément répartie on peut alors dire que la quantité  $RU_{i+1} - RU_i$  représente bien le différentiel des réserves en eau. Prenant comme unité de temps  $t$  on peut écrire:

$$\frac{\delta RU_{it}}{\delta t} = \frac{P_i}{T_i} - ET_{it}$$

Il est actuellement reconnu que l'ET est une fonction des réserves hydriques du sol. Une fonction qui a le mérite d'être utilisée est celle qui exprime une relation linéaire entre ETR et les RU sous forme:

$$ET_{it} = \alpha_i RU_{it}$$

Il est très facile de déterminer la constante  $\alpha_i$  par la relation suivante:

$$\alpha_i = \frac{ETM_i}{T_i RDU_{\max}}$$

on obtient alors une équation différentielle dont l'intégration donne:

$$\frac{RU_{it}}{RDU_{\max}} = \frac{P_i}{ETM_i} + \left( \frac{RU_o}{RDU_{\max}} - \frac{P_i}{ETM_i} \right) e^{\alpha_i t}$$

avec  $RU_o$  les réserves utiles en eau du sol initiales.

Il arrive que le bilan hydrique durant la période  $i$  est suffisant pour permettre l'ETM d'être réalisée pendant un certain temps et que le reste de la période l'ET devient inférieure. Ainsi on peut calculer cette sous-période comme suit:

$$n_i = \frac{RU_i - RDU_{\max} T_i}{ETM_i - P_i}$$

**Tableau 4** *Evapotranspiration réelle Moyenne mensuelle en mm, (1951-1989), Région de Méknés.*

	D	J	F	M	A	Ma	J
ETR mm	10,2	21,3	43,1	50,8	40,5	26,9	14,1
Ecart type	5,2	8,5	15,4	22,9	22,1	14,7	10,5
ETR/ETM en %	93,6	88,8	76,1	55,8	44,5	44,6	33,5

avec

$$n_i \geq 0,0$$

$n_i$  représente la durée de la sous-période où l'ETM a été réalisée.

De cette façon on obtient:

$$\frac{RU_{i+1}}{RDU_{\max}} = \frac{P_i}{ETM_i} - \left( \frac{RU_x}{RDU_{\max}} - \frac{P_i}{ETM_i} \right) e^{-\alpha(T-n)}$$

si  $n_i > 0,0$  on a:  $RU_x = RU_{\max}$

si  $n_i < 0,0$  on a:  $RU_x = RDU_i$  et  $n_i = 0$ .

Le calcul des  $RU_{i+1}$  permet un retour à l'équation générale du bilan hydrique pour déterminer  $ET_i$ .

## Résultats

La méthode de calcul présentée ci-dessus permet non seulement de déterminer les évapotranspirations de la culture mais aussi de suivre l'évolution des réserves en eau du sol. Pour performer les calculs un programme sur ordinateur a été construit. Ce programme rentre en interaction avec les autres programmes de calcul des données relatives à l'ETM, pluies efficaces et réserves utiles du sol, permet le calcul des réserves instantanées du sol et de l'ETR. Appliquée aux données de la région de Méknés cette méthode a permis de relever plusieurs observations.

Il a été constaté que les céréales souffrent d'un stress hydrique durant tout le cycle végétatif. C'est durant les mois de mars, avril et mai que ces stress sont fréquents avec une probabilité supérieure à 79,5%. Ils expliquent en grande partie les rendements faibles enregistrés. On peut observer que déjà au mois de juin le sol est sec et que durant l'été il atteint son humidité hygroscopique. Durant les mois de Septembre et Octobre le sol est souvent à son humidité hygroscopique respectivement avec une fréquence de 53,8 et 79,1%. Cette situation explique pourquoi les pluies parfois précoces de septembre et d'octobre sont insuffisantes pour permettre un semis précoce. Il a été observé cependant que le sol est saturé dans 35,9% des cas au mois de novembre alors qu'au mois de décembre cette fréquence est de 82,1%.

Le calcul de l'ETR a permis de dresser le **tableau 4**. Il est très expressif où le rapport ETR/ETM est décroissant durant toute la durée de végétation de la culture. Ce rapport peut atteindre 44,5% surtout le mois où la culture est très sensible à tout déficit hydrique et par conséquent son effet ne peut qu'engendrer une chute de production importante. L'ETR totale est de 206,9 mm

et qu'en moyenne ne représente que 55,1 % de l'ETM totale.

## La fonction de production des céréales

L'influence de l'évapotranspiration sur la croissance des plantes est actuellement démontrée. En effet, l'agriculture irriguée est basée sur la relation forte qui lie les rendements aux consommations en eau. Cette relation, par la marge nette que procurera l'utilisation de l'humidité du sol, affecte dans une large mesure la gestion des ressources en eau, la faisabilité et l'économie des projets et par conséquent leur conception. Nombreux sont les hydrologistes, ingénieurs et économistes qui utilisent des modèles souvent grossiers n'incluant pas les facteurs directs. Ces modèles, établis sur des bases statistiques, ne font appel qu'à la pluviométrie ou le déficit pluviométrique et par conséquent leur utilisation reste locale. Certes la pluie, le drainage, le ruissellement et l'ETM ont une influence sur le niveau d'eau dans le sol, donc sur l'eau disponible à la plante et par conséquent sur la consommation en eau des cultures. Mais cette influence aussi importante qu'elle soit reste indirecte si bien qu'une relation directe entre la production et l'eau consommée par la plante est nécessaire. Dans ce but de Wit en 1958 a proposé une relation du type linéaire comme suit:

$$Y = m T/Eo$$

où  $T$  et  $Eo$  sont respectivement la transpiration et l'évaporation d'une surface d'eau libre en cm/jour pendant la durée de végétation de la culture en question.  $Y$  est le rendement de matière sèche en kg/ha et  $m$  un coefficient cultural en kg/ha relatif à chaque culture. Pour les céréales  $m$  est de l'ordre de 115 kg/ha pour le maïs il est de 300 kg/ha. La relation de de Wit intègre le rendement en matière sèche et ne prête aucune attention au rendement en grain. Il est bien évident que pour une culture bien alimentée en eau réalisant ainsi une transpiration  $T_p$  son rendement  $Y_{\max}$  est aussi maximum. A l'échelle expérimentale le coefficient  $m$  peut être calculé comme suit:

$$m = Y_{\max} Eo/T_p$$

on en déduit la relation suivante:

$$Y/Y_{\max} = T/T_{\max}$$

Cette relation a conduit Hanks en 1974 à suggérer que la relation de de Wit reste valable instantanément mais que son effet est différent d'un stade à un autre. Pour estimer

le rendement en grain Hanks proposa la relation suivante:

$$Y/Y_p = \prod_{i=1}^n (T_i/T_{p_i})^{\alpha_i}$$

où  $i$  est le stade végétatif de la culture en question et  $\alpha_i$  un coefficient relatif au stade  $i$ .

Cette relation met en relief l'importance de chaque stade végétatif sur l'élaboration du rendement. Il est actuellement admis que les cultures durant leur développement végétatif passent par des stades de croissance dont la sensibilité à l'eau est différente. Le stade floraison-fécondation est souvent le stade critique. Mais cette relation suscite une difficulté de taille relative à l'estimation de la transpiration  $T_i$  et  $T_{p_i}$  et par conséquent  $\alpha_i$  de chaque stade. Seule l'expérimentation peut apporter une réponse précise. Dans cette étude les deux modèles ont été testés. Il a été ainsi établi que la relation la plus valable est du type puissance. Ainsi on a pu établir les relations suivantes:

pour le blé dur

$$Y_t = 29,28 (ETR/ETM)^{1,597} \text{ avec } r = 90,42\%$$

pour le blé tendre

$$Y_t = 42,56 (ETR/ETM)^{1,566} \text{ avec } r = 94,03\%$$

pour l'orge

$$Y_t = 26,44 (ETR/ETM)^{1,283} \text{ avec } r = 82,46\%$$

Le coefficient de corrélation élevé du blé tendre s'explique par la prédominance de cette culture dans la région. Toutes ces fonctions sont du type puissance et que les corrélations sont significatives. Les exposants supérieurs à l'unité expliquent dans une large mesure que les déficits en eau engendrent des chutes de production plus que proportionnelles. En effet un déficit en eau de 30% entraînera respectivement des chutes de production de 43,4% pour le blé dur, de 42,8% pour le blé tendre et de 36,7% pour l'orge. Ainsi se révèle que le blé dur est la culture la plus sensible à un manque d'eau alors que l'orge est la culture la plus résistante.

La connaissance de l'ETR mensuelle durant toute la durée de végétation a permis de calculer le rapport ETR/ETM relatif à chaque stade. Ainsi trois stades ont été distingués comme suit:

Stade 1: du semis à la fin du stade B.

Stade 2: de la fin Stade B à la fin du stade floraison.

Stade 3: de la fin du stade floraison à la fin de la maturation.

Ainsi les fonctions de production qui ont été établies sont comme suit:

pour le blé dur

$$Y_t = 26,96 K_B^{1,627} \cdot K_F^{0,335} \cdot K_M^{0,388}$$

avec

$$r = 96,49\%$$

pour le blé tendre

$$Y_t = 43,40 K_B^{1,036} \cdot K_F^{0,560} \cdot K_M^{0,394}$$

avec

$$r = 97,93\%$$

pour l'orge

$$Y_t = 31,88 K_B^{0,306} \cdot K_F^{0,685} \cdot K_M^{0,394}$$

avec

$$r = 89,69\%$$

où  $K_B$ ,  $K_F$  et  $K_M$  sont les rapports ETR/ETM, respectifs des stades 1, 2 et 3; et  $r$  est le coefficient de corrélation.

Ces fonctions dont la corrélation est significative justifient le type de relation qui existe entre la production et l'eau. Elles confirment cependant la sensibilité très grande vis à vis de l'eau du blé dur. Toutefois et à notre grande surprise, ces fonctions mettent en évidence l'importance des 1<sup>ers</sup> stades. Ce résultat peut s'expliquer par le chevauchement des stades végétatifs d'une année à une autre dû à la grande variabilité de la date de semis.

## La rentabilité de l'irrigation des céréales

L'étude menée jusqu'à maintenant et les relations établies ont été formulées pour toute la région sur la base des données moyennes représentatives du cas en question. Une étude plus détaillée tenant compte de l'hétérogénéité pédologique, de la spécificité de chaque exploitation et même du microclimat peut apporter plus de précision. Mais cela n'empêche pas de poursuivre le raisonnement en vue de justifier l'irrigation des cultures céréalières dans la région.

Dans la région l'eau d'irrigation provient soit d'un puits ou d'un réseau traditionnel. Dans le cas où l'agriculteur dispose d'un droit d'eau le problème de la justification de l'irrigation des céréales est plus complexe et doit être entrepris dans le cadre socio-économique de l'exploitation avec un système cultural donné. Dans ce cas les céréales rentrent en compétition avec les autres cultures et l'irrigation ne se justifie que lorsque ces cultures sont capables de procurer une marge nette supérieure à celle des autres. Ce problème relève de la caractéristique fondamentale qui distingue l'irrigation de complément et l'irrigation fondamentale et qui ne fera pas l'objet de cette étude.

Nous allons nous intéresser aux exploitations où l'eau d'irrigation ne peut provenir que d'un puits. La question à laquelle nous chercherons à répondre est l'irrigation des céréales dans ces exploitations procurera-t-elle la marge nette suffisante pour contrebalancer les frais d'installation et d'opération du système d'arrosage?

Avant d'aborder cette question d'intérêt majeur il est nécessaire d'examiner la superficie ou la taille de l'exploitation susceptible de rationaliser l'utilisation de l'eau d'un puit. Dans ce cas particulier il y a lieu de distinguer entre la méthode d'irrigation à pratiquer. En effet si l'irrigation par gravité est moins onéreuse que l'irrigation par aspersion, cette méthode reste aussi la moins effi-

**Tableau 5** *Efficacités, Débit fictif et Surface à irriguer par Aspersion et Gravité.*

	Gravité	Aspersion
Efficacité du réseau %	90,00	95,00
Efficacité à la parcelle	70,00	80,00
Débit fictif car. l/s/ha	0,314	0,26
Surface optimale en ha	20,00	24,00

ciente. Le calcul des besoins en eau avec une probabilité de 90% a conduit à un besoin maximum de 162,1 mm et un débit fictif caractéristique de 0,319 l/s/ha au mois d'avril. Si on considère un puits de 10 l/s la surface optimale à irriguer est de 20 ha pour le gravitaire alors qu'elle est de 24 ha pour l'aspersion.

Certes les exploitations capables de réserver plus de 20 ha à la seule culture des céréales sont des exploitations de grande taille et les charges imputables aux investissements du 1<sup>er</sup> et 2<sup>ed</sup> ordre peuvent être supportées pour autant qu'ils soient justifiés. Mais pour les exploitations de petites tailles on peut imaginer la création de coopérative de service où les charges sont partagées entre les membres proportionnellement aux surfaces emblavées par les céréales. Dans l'un ou l'autre des cas la question est que l'irrigation de ces cultures est-elle suffisante pour procurer la marge nette économique nécessaire? Si on admet que les fonctions de production sont extrapolables la marge de production que peut procurer l'irrigation de chaque culture sont de 16,75 q<sup>s</sup>/ha, 24,30 q<sup>s</sup>/ha et 13,00 q<sup>s</sup>/ha respectivement pour le blé dur, le blé tendre et l'orge (voir **tableau 5**).

Les tableaux 7 et 8 ont été établis suite à une enquête menée dans le terrain. Ils donnent une estimation précise des coûts des installations aussi bien pour l'irrigation par gravité que par aspersion.

Pour l'irrigation par gravité les investissements sont estimés à 2090 Dh/ha alors que les frais d'opération sont de l'ordre de 1347,2 Dh/ha ce qui donne un total de 3437,2 Dh/ha. Le prix courant du quintal de blé est de 220 Dh la marge de production procurera alors 5346 Dh/ha pour le blé tendre, ce qui laissera une marge nette économique de 1908,8 Dh/ha. Pour l'irrigation par aspersion les investissements sont de 3160,6 Dh/ha alors que les frais d'opération sont de l'ordre de 1292,8 Dh/ha donc un total de 4453,4 Dh/ha. La marge économique nette pour cette méthode est de l'ordre 892,6 Dh/ha. Cette marge nette économique représente 46,75% de celle procurée par l'irrigation par gravité.

On voit ainsi que l'irrigation des céréales est non seulement capable d'augmenter la production de plus de 120% mais aussi de procurer une marge nette qui compense non seulement les investissements et les frais mais laisse une marge économique nette bénéfique.

## Conclusion

L'analyse qui a été entreprise dans cette étude a montré que cette culture souffre d'un stress hydrique durant tout son cycle végétatif. Les observations faites durant toute la période 1951-1989 ont permis de noter qu'il n'y a pas une seule année où le déficit hydrique n'apparaît pas. Il ressort alors que l'irrigation est la seule voie possible pour échapper aux caprices de la pluviométrie.

Il a été mis en évidence que l'irrigation des céréales permet non seulement d'augmenter la productivité du terrain mais aussi de régulariser la production à un niveau stable. Cette stabilité de la production est seule susceptible d'apporter des améliorations notables tant au niveau de la planification nationale qu'au niveau des conditions de vie du paysan. En effet, au Maroc la demande projetée de cette denrée est de l'ordre de 130 10<sup>6</sup> de quintaux en l'an 2000. Il nous paraît difficile dans les conditions actuelles de production d'atteindre cet objectif si des mesures d'intensification de cette culture par l'irrigation ne sont pas entreprises.

Cette étude a permis de démontrer que l'irrigation des céréales est une opération rentable. La certitude avec laquelle cette conclusion a été formulée trouve sa raison d'être dans les précautions qui ont été prises lors de l'obtention et l'analyse des résultats. Ces précautions se situent aux niveaux des rendements maximums à atteindre qui sont plus faibles que ce qui peut être obtenu, au niveau de la surface optimale à irriguer qui a été sous-estimée et par conséquent le coût de l'opération par unité de surface est grand et au niveau de l'estimation des investissements qui ont été établis dans les conditions sévères de réalisation. Pour tirer profit de l'irrigation des céréales dans le but de rendre efficaces les actions de mise en oeuvre de telle opération trois voies d'améliorations possibles sont à entreprendre:

1. L'analyse des données a été entreprise sur la base de techniques culturales actuelles, pour ne pas dire traditionnelles, plus adaptées aux conditions de non-irrigation. L'itinéraire technique traditionnel suivi par l'agriculteur n'insère pas la pratique de l'irrigation. Il y a lieu de réviser les techniques culturales pour établir un itinéraire technique amélioré plus adapté aux conditions des arrosages de cette culture. La recherche scientifique appuyée par l'expérimentation est la seule susceptible d'apporter des solutions adéquates.

2. L'irrigation des céréales nécessite des moyens de financement. Même si on considère l'exploitation moyenne du Maroc, de l'ordre de 5,4 ha, le financement de telle opération, même proportionnel, ne peut pas être supporté. Il incombe aux organismes publics ou non, de mettre à la disposition du paysan les moyens financiers nécessaires et de créer les conditions sociales et économiques pour aboutir à cette fin.

3. Si la démarche entreprise a pu mettre en relief l'importance de l'irrigation des céréa-

**Tableau 6 Rendements Moyens des Céréales, (1979-89) Région de Méknés.**

	Blé dur	Blé tendre	Orge
Rendement qx/ha	12,53	18,26	13,45
Ecart type	3,86	5,41	4,22
Coeff. Var. %	30,81	29,63	31,38
Rendement max	29,30	42,60	26,40

**Tableau 7 Coût de l'Installation de l'Irrigation par Asperion et par Gravité.**

	Gravité			Asperion		
	Coût 1000 Dh	T ans	Annuité 1000 Dh	Coût 1000 Dh	T ans	Annuité 1000 Dh
Investissements Fixes						
Puit+Génie civil	120,0	15	8,0	120,0	15,0	8,0
Station+Mat. Fixe	160,0	10	16,0	240,0	8,0	30,0
Investissements Proportionnels						
Réseau interne/ha	8,6	15	0,6	—	—	—
Matériel Mobile/ha	—	—	—	9,0	7	1,29
Nivellement/ha	3	30	0,1			
Frais d'Entretien sont estimés à 10 % des Investissements Totaux						

T: Durée d'amortissement.  
Dh: Dirham, devise courante au Maroc.

**Tableau 8 Frais d'Opération des deux méthodes d'Irrigation par Asperion et par Gravité, Région de Méknés.**

	Gravité	Asperion
Besoins en eau en m	2280,00	1920,00
Energie en KWH/m	0,32	0,62
Prix du KWH en Dh	0,75	0,75
Main d'Oeuvre en UTHj	20,00	10,00
Prix de l'UTHj en Dh	40,00	40,00

UTHj: Unité de travail humain par jour.

les et le profit qu'on peut en tirer, il n'est pas évident que l'agriculteur sera convaincu de l'intérêt de telle opération. Des actions de vulgarisation appuyées par des démonstrations sur le terrain sont à entreprendre. Il faut alors créer l'infrastructure nécessaire avec tous les moyens qu'il faut pour généraliser de telle technique.

La rentabilité de l'irrigation des céréales est incontestable. Mais pour l'agriculteur l'instauration de telle technique à la seule culture des céréales n'est pas évidente. En effet si cette rentabilité est positive dans l'absolu, sa mise en oeuvre à l'échelle de l'exploitation peut être bousculée par la présence d'autres cultures plus rémunératrices telles que l'arboriculture fruitière et le maraîchage. La recherche doit être poussée non seulement pour déterminer les quantités d'eau optimales à apporter et les stades où ces apports sont les plus efficaces mais aussi trouver les moyens pour rendre l'irrigation des céréales concurrentielle.

Enfin, la démarche qui a été entreprise dans cet article s'est inspirée des conditions réelles de terrain et a été guidée par la logique scientifique. Si elle a été démontrée sur

**Tableau 9 Charges dues aux Investissements, Opération, Entretien et Marges nettes en DH/ha.**

	Gravité	Asperion
Installation	1169	980
Opération	1148	1087
Production	3963	3962
Marge nette	1646	1895

DH: Dirham qui est la devise courante du Maroc.

l'exemple de la culture des céréales dans la région de Méknés elle reste cependant non spécifique à cette région ni à cette culture. Elle peut donc être généralisée.

## Remerciements

Nous tenons à remercier Madame Zaid Amina, ingénieur à l'Ecole Nationale d'Agriculture de Méknés pour son aide combien précieuse pour avoir voulu réviser cet article, procéder à la correction des résultats et vérifier les calculs et les équations.

## Références Bibliographiques

- de Wit C.T. (1958): «*Transpiration and Crop yields, Institute of biological and Chemical research on Field Crops and Herbage*», Wageningen, The Netherlands, Verse-landbouwk, order Z. N. 64, 6-8, Gravenhage.  
Filali B.A. (1981): «*Analyse de l'Equation du bilan hydrique en vue de la Programmation des Irrigations*», Ecole Nationale d'Agriculture, Méknés, 35 p.  
Hanks R.J. (1974): «*Model for Predicting Plant Yield as Influenced by Water Use*», Agron. J., 66, 660-668.  
Kutsh H.G. (1978): «*Le Pouvoir d'Evaporation du Climat Marocain*», Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Direction de la Recherche Agronomique, Rabat.