

SUIVI AGROMETEOROLOGIQUE DES CONDITIONS HYDRIQUES DES CULTURES.

J.P.LHOMME

INTRODUCTION

Puisque la plante puise l'eau dont elle a besoin dans le sol, c'est à travers l'évolution du stock d'eau contenu dans le sol qu'on pourra appréhender les conditions hydriques des cultures. Cette évolution du stock d'eau du sol est régie par l'équation du bilan hydrique appliquée à une tranche de sol d'épaisseur  $Z_e$  égale à la profondeur maximale d'enracinement de la culture considérée. Cette équation s'écrit de la façon suivante :

$$\Delta H = P + I - ETR - D \pm R \quad (1)$$

et traduit le fait que la variation du stock d'eau du sol  $\Delta H$  pendant un laps de temps donné est égale à la quantité d'eau qui y rentre diminuée de celle qui en sort. Les apports sont représentés par la pluie P et éventuellement l'irrigation I. Les pertes sont dues à l'évapotranspiration ETR et au drainage souterrain ou percolation D. Le terme de ruissellement R qui englobe tous les transferts latéraux peut représenter un apport comme une perte.

Au niveau du réseau météorologique les données de pluie et d'évapotranspiration sont généralement disponibles sur une base journalière. Il est donc intéressant de prendre le jour comme pas de temps dans l'équation (1). Nous allons voir comment il est possible de simuler l'évolution du bilan hydrique sur une base journalière à partir des simples données météorologiques et de quelques paramètres d'ajustement aux conditions spécifiques considérées, paramètres concernant le sol et la culture considérés.

## I. LE STOCK D'EAU DU SOL

Toute l'eau présente dans le sol n'est pas disponible pour les plantes. Seule l'eau stockable entre le point de flétrissement permanent ( $pF=4,2$ ) et la capacité au champ ( $pF=2,8$ ) l'est effectivement. On introduit pour rendre compte de cela la notion de réserve utile RU définie comme la différence exprimée en millimètres entre les quantités d'eau stockées à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent dans une tranche de sol d'épaisseur égale à la profondeur maximale d'enracinement  $z_e$ . En effectuant une sommation sur les différents horizons pédologiques traversés par les racines, on écrira :

$$RU = \sum_i (H_{ci} - H_{fi}) \cdot \Delta z_i \quad (2)$$

$$\text{avec } \sum_i \Delta z_i = z_e$$

$H_{ci}$  et  $H_{fi}$  représentant respectivement l'humidité volumique de l'horizon  $i$  à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent exprimées comme fraction de 1,  $\Delta z_i$  l'épaisseur de l'horizon en mm. RU est alors exprimée en mm d'eau. La réserve utile évolue donc en fonction de la profondeur d'enracinement, c'est-à-dire en fonction du stade de développement de la culture.

Nous introduirons également une réserve disponible, notée RD, définie comme la quantité d'eau stockée dans le sol et disponible pour les plantes à un moment donné :

$$RD = \sum_i (H_i - H_{fi}) \cdot \Delta z_i \quad (3)$$

$$\text{avec } \sum_i \Delta z_i = z_e$$

$H_i$  représentant l'humidité volumique de l'horizon  $i$ . RD est un

nombre positif, exprimé en millimètres qui varie entre 0 et la réserve utile :

$$0 \leq RD \leq RU$$

Dans le cas d'une culture annuelle la réserve utile  $RU$  évolue entre une valeur minimale  $RU_n$  au moment du semis jusqu'à une valeur maximale  $RU_x$  juste avant la récolte, c'est-à-dire en principe au maximum d'enracinement.  $RU_n$  représente, dans le cas d'un sol nu, la quantité d'eau stockable dans les horizons supérieurs et contribuant à l'évaporation du sol. Nous poserons pour un jour  $J$  :

$$A_j = (RU_j - RU_n) / (RU_x - RU_n) \quad (4)$$

$RU_j$  représentant la valeur de la réserve utile le jour  $J$ . Si on ne connaît pas la loi d'évolution de l'enracinement et donc de la réserve utile, on peut toujours choisir une loi de variation linéaire entre la date  $S$  de semis et la date  $R$  de récolte en fonction du numéro du jour. Si  $DSJ$  représente la durée, exprimée en nombre de jours, qui sépare la date  $S$  du jour  $J$  et  $DSR$  celle qui sépare les deux dates  $S$  et  $R$  (c'est-à-dire la longueur du cycle), nous aurons alors :

$$A_j = DSJ/DSR \quad (5)$$

Sur l'année entière la réserve utile va évoluer selon le schéma suivant :

$$A_j = \begin{cases} 0 & \text{si } j \in ]R, S[ \\ DSJ/DSR & \text{si } j \in [S, R] \end{cases} \quad (6)$$

Dans le cas d'une culture pérenne, nous admettrons que la réserve utile ne varie pas et reste à son niveau maximal  $RU_x$ , ce qui revient à faire  $A_j = 1$ .

## II. LA PLUIE EFFICACE ET LE DRAINAGE.

### 1. La pluie efficace.

Nous appellerons pluie efficace, la pluie qui pénètre effectivement dans le sol. Une petite quantité de pluie, que nous noterons  $P_n$ , se trouve interceptée par le couvert et ne participe donc pas directement à la reconstitution de la réserve hydrique du sol. Si  $P$  désigne la pluie enregistrée et  $PE$  la pluie efficace nous écrivons pour un jour  $J$  :

$$PE_j = \begin{cases} P_j - P_n & \text{si } P_j > P_n \\ 0 & \text{si } P_j \leq P_n \end{cases} \quad (7)$$

Le sol sera considéré comme horizontal de façon à pouvoir annuler le ruissellement de surface. Le ruissellement de surface est en effet un terme difficile à appréhender car trop variable en fonction des conditions pédo-climatiques : il dépend à la fois de la pente, de l'intensité de la pluie et du type de couvert végétal et de sol. De ce fait nous admettrons que si l'intensité de la pluie est supérieure à la capacité d'infiltration, l'eau qui ne s'infiltrer pas immédiatement restera sur place à l'état libre jusqu'au moment où elle s'évaporerait ou finirait par s'infiltrer.

### 2. Le drainage

Si la quantité de pluie tombée le jour  $J$  est supérieure à la capacité de rétention du sol, il y aura drainage, c'est-à-dire une perte d'eau par percolation souterraine. La capacité de rétention du sol le jour  $J$ , notée  $CR_j$ , correspond à la différence entre la réserve utile du jour  $J$  et la réserve disponible du jour précédent :

$$CR_j = RU_j - RD_{j-1} \quad (8)$$

La quantité d'eau perdue par drainage s'écrira donc :

$$DR_j = \begin{cases} PE_j - CR_j & \text{si } PE_j > CR_j \\ 0 & \text{si } PE_j \leq CR_j \end{cases} \quad (9)$$

(Si  $CR_j$  se trouve être négatif, ce qui peut arriver le jour qui suit la récolte, on fera alors  $CR_j=0$ ).

Quant au terme inverse du drainage, c'est-à-dire les remontées capillaires à partir des éventuels horizons saturés sous-jacents, il est difficile actuellement de proposer une équation simple qui puisse en rendre compte (KATERJI et al., 1984).

### III. L'EVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration réelle ETR évolue, par rapport à l'évapotranspiration maximale ETM, en fonction de l'état de la réserve hydrique du sol. L'ETM, quant à elle, évolue par rapport à l'évapotranspiration potentielle ETP, principalement en fonction de l'état de recouvrement du sol par la végétation et de son "degré" d'activité biologique.

#### 1. L'évapotranspiration maximale.

Pour décrire l'évolution de l'ETM d'une culture annuelle en fonction de son stade de développement, on utilise généralement la notion de coefficient cultural. Le coefficient cultural, noté  $k$ , relie l'ETM d'une culture donnée, prise à un stade phénologique donné, à une ETP climatique choisie comme référence :

$$ETM = k \cdot ETP_c \quad (10)$$

la valeur de  $k$  dépendant du stade de développement de la culture.

Si on ne connaît pas les coefficients cultureux se rapportant à une culture donnée, on peut toujours utiliser le modèle simplifié suivant qui décrit schématiquement l'évolution du rapport  $ETM/ETP_c$  dans le cas d'une culture annuelle (Figure 1). Du semis  $S$  jusqu'à la fin de la levée que l'on symbolisera par la lettre  $L$  et que l'on fera correspondre approximativement avec la date à laquelle la culture recouvre à peu près complètement le sol avec son feuillage, le rapport  $ETM/ETP_c$  va croître du niveau  $c_1$  ( $0 < c_1 < 1$ ), fonction du type de sol, jusqu'à la valeur 1. Pendant la phase de recouvrement et de développement actif (de la date  $L$  à la date  $M$ ) le rapport  $k$  se maintiendra à peu près à la valeur 1. Pendant la phase de maturité (de la date  $M$  à la date  $R$ ), le rapport  $k$  va décroître de la valeur 1 jusqu'à une valeur  $c_2$ , fonction du type de culture ( $0 < c_2 < 1$ ). Si on prend une loi de variation linéaire en fonction du numéro du jour comme dans le cas de la réserve utile, nous écrirons :

$$\begin{aligned} k_j &= c_1 + (1 - c_1) \cdot DSJ/DSL & \text{si } j \in [S, L] \\ k_j &= 1 & \text{si } j \in [L, M] \\ k_j &= 1 + (c_2 - 1) \cdot DMJ/DMR & \text{si } j \in [M, R] \end{aligned} \quad (11)$$

$DSJ$  représentant la durée en nombre de jours qui sépare le jour  $J$  de la date  $S$ ,  $DSL$  celle qui sépare la date  $L$  de la date  $S$ , etc...

Dans le cas d'une culture pérenne bien couvrante, on peut admettre en première approximation que l' $ETM$  équivaut à l' $ETP_c$  tout au long de l'année.

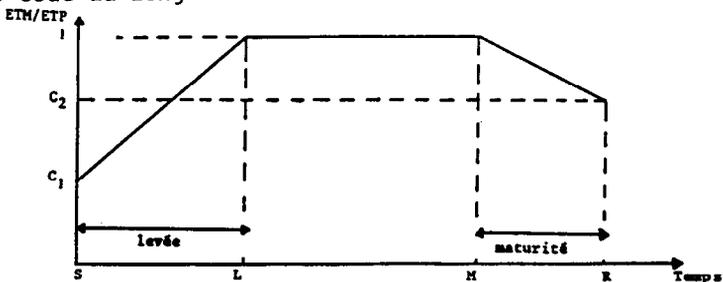


Figure 1 : Evolution du rapport ETM/ETP au cours d'un cycle cultural

2. L'évapotranspiration réelle.

a) Les concepts classiques : les concepts classiques concernant l'utilisation de l'eau du sol par les plantes font état d'une réserve facilement utilisable, notée RFU, qui représente la fraction de la réserve utile RU utilisable par les plantes sans difficulté, c'est-à-dire sans que cela occasionne une fermeture stomatique et donc une réduction de l'ETR par rapport à l'ETM. En-dessous de ce seuil l'ETR décroît au fur et à mesure que l'eau disponible diminue et ce jusqu'au point de flétrissement permanent où elle est censée s'annuler (Figure 2). Le point critique, qui constitue le seuil de régulation, varie en fonction de la nature du sol, du développement et de l'efficacité du système racinaire. La réserve difficilement utilisable RDU représente le complémentaire de la RFU par rapport à la RU :

$$RU = RDU + RFU \quad (12)$$

On posera :

$$RDU/RU = \alpha \quad (13)$$

$\alpha$  représentant un coefficient d'ajustement généralement pris voisin de 1/3.

En première approximation on peut admettre que le rapport  $m = ETR/ETM$  croît linéairement de 0 à 1 en fonction de la réserve disponible RD, lorsque celle-ci passe de la valeur 0 à la valeur RDU, et qu'il se maintient à la valeur 1 lorsque la réserve disponible fluctue entre RDU et RU.  $RD_{j-1}$  représentant la valeur de la réserve disponible à la fin du jour J-1 et donc

au début du jour J, nous écrivons :

$$\begin{aligned} \bar{m}_j &= 1 && \text{si } RD_{j-1}/RDU_j > 1 \\ \bar{m}_j &= RD_{j-1}/RDU_j && \text{si } RD_{j-1}/RDU_j < 1 \end{aligned} \quad (14)$$

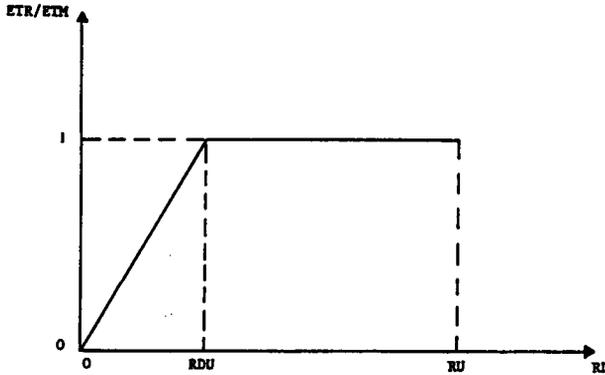


Figure 2 : Evolution du rapport ETR/ETM en fonction de la réserve disponible RD.

b) le modèle de EAGLEMAN : EAGLEMAN (1971) a développé, à partir de données expérimentales obtenues dans différentes régions climatiques, un modèle statistique d'estimation de l'ETR en fonction du rapport  $MR = RD/DU$  appelé "moisture ratio" et de l'ETP. La relation statistique qu'il obtien s'écrit :

$$ETR = A + B(MR) + C(MR)^2 + D(MR)^3 \quad (15)$$

avec :

$$\begin{aligned} A &= 0,732 - 0,050 (ETP) \\ B &= 4,97 (ETP) - 0,661 (ETP)^2 \\ C &= -8,57 (ETP) - 1,56 (ETP)^2 \\ D &= 4,35 (ETP) - 0,880 (ETP)^2 \end{aligned} \quad (16)$$

Le modèle de EAGLEMAN, comme tout modèle statistique, est à utiliser avec précaution. On doit bien s'assurer que les conditions d'utilisation correspondent bien aux conditions d'élaboration du modèle.

#### IV. LE BILAN HYDRIQUE

L'équation traduisant le bilan hydrique s'écrit sur une base journalière compte tenu de nos notations :

$$RD_j = RD_{j-1} + PE_j - ETR_j - D_j \quad (17)$$

Cette équation va servir de relation de récurrence pour calculer les réserves hydriques journalières successives. A moins qu'on ait un moyen particulier de connaître la réserve disponible au début du processus récurrent,  $RD_0$ , on peut se baser éventuellement sur les considérations suivantes pour initialiser le processus : si le jour n°1 se trouve en pleine saison sèche, on choisira  $RD_0 = 0$ , s'il se trouve en pleine saison des pluies,  $RD_0 = RU$ , sinon on prendra une valeur moyenne  $RD_0 = RU/2$ .

Le déficit hydrique journalier de la culture se trouve défini par la relation :

$$DH_j = ETM_j - ETR_j \quad (18)$$

A partir de là, on définira un déficit hydrique cumulé sur la durée du cycle cultural ou sur une phase particulière du cycle (stade critique par exemple) :

$$DHC = \sum_{j=j_1}^{j_2} DH_j \quad (19)$$

Il peut être intéressant alors de considérer l'indice suivant, appelé indice de satisfaction hydrique et défini par la relation :

$$I = (1 - \text{DHC}/\text{BHC}) \cdot 100 \quad (20)$$

où BHC représente les besoins hydriques de la culture cumulés sur la même période que DHC :

$$\text{BHC} = \sum_{j=J_1}^{J_2} \text{ETM}_j \quad (21)$$

I exprime sous forme de pourcentage le degré de satisfaction des besoins hydriques de la culture considérée.

#### V. L'UTILISATION DU MODELE.

Le modèle récurrent de bilan hydrique journalier présenté ici ne cherche pas systématiquement une formulation trop précise dans la description des phénomènes. Ceci pour deux raisons. D'une part nous avons voulu réduire au minimum le nombre des paramètres d'entrée afin que le domaine d'application du modèle soit le plus large possible. D'autre part le pas de temps utilisé (le jour) et les données météorologiques correspondantes imposent de fait un certain degré d'imprécision qu'il serait inutile de masquer par des considérations trop précises sur certains aspects de la dynamique de l'eau au champ qui ne peuvent être appréhendés qu'en utilisant une échelle de temps plus fine.

Ce type de modèle peut être utilisé en temps réel pour suivre l'évolution des conditions hydriques d'un cycle cultural et prévoir ainsi, par exemple, les moments où l'irrigation d'appoint est nécessaire. L'utilisation de ce modèle, bien câlé aux conditions expérimentales, peut alors se substituer à des mesures par sonde à neutrons. En temps différé ce type de modèle peut servir à l'analyse agroclimatologique basée sur l'exploitation statistique des séries de données climatiques en vue de la planification.

Exemple de calage des cycles culturaux

Le choix de la meilleure date de semis pour une culture annuelle est l'un des problèmes importants qui se posent à l'agronome en zone intertropicale, car la pluviosité y a une répartition généralement inégale (alternance saison sèche-saison des pluies) et constitue de ce fait un facteur déterminant et souvent limitant pour la réussite des cycles culturaux.

Le modèle de bilan hydrique présenté peut être utilisé pour résoudre ce problème. En effet, on peut se servir du déficit hydrique cumulé sur la durée totale du cycle ou seulement sur une phase sensible (stade critique) vis-à-vis de l'eau, comme indice de succès pour la culture : plus celui-ci est faible, plus les conditions d'alimentation en eau sont bonnes et donc plus les chances de succès sont grandes. Pour chaque date de semis considérée on calculera un déficit hydrique cumulé moyen DHC (la moyenne portant sur le nombre d'années que comporte l'échantillon disponible) et l'on retiendra la date qui minimise la valeur de DHC.

Nous avons pris l'exemple de la pomme de terre sur l'altiplano bolivien. Sur l'altiplano bolivien, la saison des pluies s'étend approximativement d'octobre à mai. Les sols sont pauvres avec une faible réserve utile. La pomme de terre, qui représente l'une des cultures essentielles, a une durée de cycle d'environ 180 jours et se plante au début de la saison des pluies. La station choisie pour illustrer la méthode est celle de El Alto (aéroport de La Paz) avec vingt années d'enregistrement des précipitations. La pomme de terre est une culture qui demande de l'eau à peu près à toutes les époques de sa végétation. Il lui faut des pluies régulières, bien réparties, sans période de sécheresse. Nous avons donc utilisé un déficit hydrique cumulé sur toute la période de végétation (du semis S à la récolte R). La figure 3 montre l'évolution de la valeur du DHC en fonction de la date de semis, le pas de temps étant de cinq jours. On voit clairement que la date optimale se situe aux alentours du 300<sup>ème</sup> jour de l'année,

c'est-à-dire de la dernière semaine d'octobre.

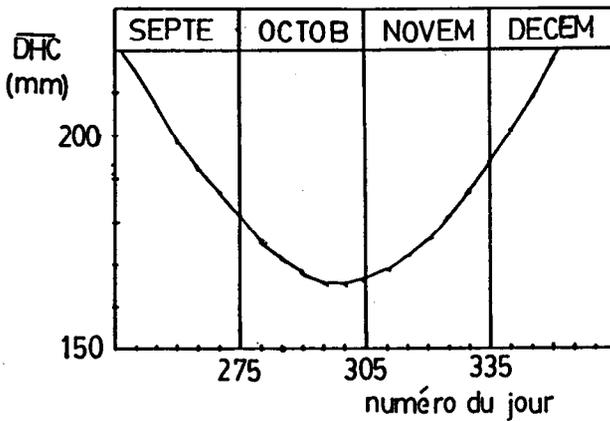


Figure 3 : Station de El Alto, Bolivie. Cas de la pomme de terre. Evolution du déficit hydrique moyen cumulé sur la durée du cycle DHC, en fonction de la date de semis repérée par le numéro du jour de l'année.

#### BIBLIOGRAPHIE

- EAGLEMAN J.R., 1971 - An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agr. Meteorol.*, 8, 385-394.
- KATERJI N., F.DAUDET et C.VALANCOGNE, 1984 - Contribution des réserves profondes du sol au bilan hydrique des cultures. *Agronomie*, 4 (8), 779-787.