

Modèle pour la conduite en temps réel des besoins hydriques et minéraux du rosier en hors-sol

Bougoul S., Brun R., Jaffrin A.

in

Choukr-Allah R. (ed.).
Protected cultivation in the Mediterranean region

Paris : CIHEAM / IAV Hassan II
Cahiers Options Méditerranéennes; n. 31

1999
pages 293-305

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI020853>

To cite this article / Pour citer cet article

Bougoul S., Brun R., Jaffrin A. **Modèle pour la conduite en temps réel des besoins hydriques et minéraux du rosier en hors-sol.** In : Choukr-Allah R. (ed.). *Protected cultivation in the Mediterranean region* . Paris : CIHEAM / IAV Hassan II, 1999. p. 293-305 (Cahiers Options Méditerranéennes; n. 31)



<http://www.ciheam.org/>
<http://om.ciheam.org/>

MODELE POUR LA CONDUITE EN TEMPS REEL DES BESOINS HYDRIQUES ET MINERAUX DU ROSIER EN HORS-SOL

S. BOUGOUL, R. BRUN AND A. JAFFRIN

INRA-URIH, Route des Colles; F-06410 Biot, France

Abstract : Actual transpiration demand and mineral requirements of young plants *Rosa hybrida* cv. Sonia grown in NFT were measured at a time step of 10 mn under summer conditions in a glasshouse in Antibes F. These data were then used to construct a model describing the instant composition of the nutrient solution absorbed by the root system. First, a model for the water uptake is based on the thermal balance between radiative gains and convective-evaporative losses by the leaves (Penman- Monteith approach). Then, the "pump-leak-buffer" model from Scaife is used to express the uptake of the main nutrient (say NO_3^-) as a function of incoming radiation. The resulting differential equation can be easily studied by means of a Fourier analysis of the periodic conditions (basically the incoming radiation). The solution is then characterised by the damping constant and the phase shift of the main Fourier component with respect to radiation. It is found that, contrary to raygrass, the large day-night fluctuation of NO_3 uptakes makes the damping term very strong (complete damping within 4 hours) and the phase shift very weak (about 1/4h). The resulting uptake is thus nearly proportional to the incoming radiation during daytime, a feature which is consistent with data collected in the first half of the day. However, the proportionality ceases to be true later in the day, and a new phenomenon must be invoked. The experimental data suggest that the temperature of the solution, basically equal to that of the greenhouse, strongly affects the uptakes, and in addition, that radiation above 500 W/M^2 can be saturating on a canopy of small LAI. These features were introduced in the model, and a satisfactory agreement was obtained for successive days with different climatic conditions. Combining the transpiration model and the mineral uptake model in a single model for the absorption concentration shows that the plant almost never extracts the same solution from the root medium during a nycthemere. The experimental curve for the nitrate absorption concentration shows a fluctuation from 0,3 me/l around noon time, up to 3 me/l or more at night-time, a pattern which is very well reproduced by the combined model. This model for instant needs could be of special interest for the management of fertigation of plants sensitive to saline stress, since it predicts periods when an inadequate root medium could accumulate irrelevant ions and oppose a rising osmotic pressure to water intake by the plant.

INTRODUCTION

La culture hors sol a été initialement une technique de laboratoire visant à étudier en détail le fonctionnement des plantes. Elle a été utilisée ensuite chez les producteurs à partir des années 70 pour s'affranchir des parasites telluriques qui devenaient une menace croissante dans les monocultures intensives (exemple de la fusariose sur l'oignon de Nice). Mais l'essor actuel de cette technique sur une grande quantité d'espèces cultivées en serres (rose, tomate, concombre, poivron,...) est principalement motivé par les progrès de productivité et par l'amélioration de la qualité des récoltes (Lesaint.,1987). Ces progrès résultent d'une meilleure disponibilité de l'eau et des éléments minéraux, apportés sous forme d'une solution nutritive qui assure les besoins complets de la plante dans des substrats souvent inertes. Mais cette disponibilité ne s'obtient qu'au prix d'une gestion précise des apports car les substrats utilisés sont de faible capacité. La première tâche a été d'apprécier par l'expérience les besoins moyens en minéraux des espèces concernées, suivant leur stade de développement, à l'échelle de la journée ou de la semaine. Cela s'est traduit par des pourcentages respectifs bien définis d'azote, de phosphore, de potassium, et autres éléments majeurs (Brun., 1987). De même, les besoins quotidiens en eau, comptabilisés par m^2 de feuillage, ont été estimés empiriquement et corrélés aux conditions climatiques (De Vielle., 1974).

Les apports ont été répartis au cours de la journée pour tenir compte de la faible capacité de rétention des substrats. La pression économique actuelle, qui demande d'accroître la productivité et d'obtenir une meilleure qualité des produits de récolte, conduit maintenant à s'interroger sur la façon de suivre de façon plus précise les besoins instantanés de la plante. C'est ce qui a justifié le développement de modèles s'appuyant sur les mécanismes thermiques et physiologiques mis en jeu dans le fonctionnement de la plante.

LA NOTION DE CONCENTRATION D'ABSORPTION

Lorsqu'on rapporte le flux massique des éléments minéraux appelés par une plante (en mg/h) au flux hydrique qui sert essentiellement à satisfaire sa transpiration (en ml/h), on obtient la concentration d'absorption de la plante. Cette concentration d'absorption, qui se caractérise par une conductivité électrique et un certain équilibre entre composés minéraux, est relativement indépendante de la concentration de la solution d'apport. Elle est régie par des mécanismes passifs (transpiration) et actifs (fabrication d'assimilats). Un exemple frappant de l'indépendance entre ces deux concentrations est donné par la culture hydroponique qui consiste à placer les racines dans un milieu liquide rapidement brassé (technique du NFT) : il est en effet possible de faire pousser des plantes dans des milieux liquides de très faible concentration (d'une électroconductivité de moins de 100 mS/cm), ou au contraire de très forte concentration (plus de 5.000 mS/cm), sans affecter sensiblement les flux hydriques et minéraux prélevés par la plante. La surface de la racine et les membranes successives rencontrées le long du trajet régule ces flux en fonction des besoins, de façon relativement indépendante de l'offre. Mais dans ce cas précis, la forte convection du liquide autour des racines évite tout effet de privation (absence d'ion à proximité de la surface racinaire), ou d'accumulation ionique locale. La plage de concentration acceptable pour le milieu liquide maintenu en mouvement est donc très étendue.

Cette constatation ne s'applique pas aux sols naturels et aux substrats poreux utilisés comme milieux de culture. Dans ce cas, la solution nutritive est emmagasinée dans les porosités du milieu, et durant les périodes sans apport de solution nouvelle, le seul mouvement est un transport lent du liquide vers la surface des racines sous l'effet de l'absorption racinaire. Il n'y a donc pas de mécanisme de brassage convectif, et seule la diffusion ionique peut contribuer à homogénéiser la concentration des solutés dans le substrat. Cette diffusion peut être insuffisante quand la plante prélève une composition en décalage avec celle présente dans le milieu. C'est la raison pour laquelle on injecte dans les substrats une nutrition hydrominérale proche de celle appelée par la plante. Il est ainsi connu qu'une culture de rosiers hors sol aime recevoir une solution nutritive de conductivité comprise entre 1000 et 2000 mS/cm, suivant son état de développement foliaire, de même qu'une culture de tomates admet une fourchette allant de 2000 à 3000 mS/cm. Mais le choix de la valeur précise à appliquer à une période donnée admet moins de latitude. Le test permettant de vérifier la pertinence du choix de la solution d'apport est la mesure de la conductivité du liquide drainé, ou encore mieux, son titrage complet. Il n'est pas rare de constater une dérive importante (allant jusqu'au doublement de certains teneurs en éléments, mais pouvant inversement donner lieu à une carence) dans la composition du fluide de drainage, lorsque la concentration d'apport est mal adaptée aux besoins de la plante. Le suivi des valeurs de conductivité observées au drainage est la base de la conduite des cultures hors sol, bien qu'elle ne donne qu'une image globale de la concentration ionique, sans détecter les déséquilibres ioniques éventuels.

Dans les latitudes du sud de l'Europe, les cultures sous serre en plein sol sont traditionnellement arrêtées en période d'été, car l'état physiologique de la plantation tend à se dégrader. Mais même les cultures hors sol menées sous forte insolation ont montré une forte sensibilité au stress climatique : c'est le cas des cultures de tomates pour lesquelles la qualité du fruit (fermeté, goût, aspect) tend à se dégrader par forte chaleur, et c'est également le cas des cultures de rosiers en été, pour lesquelles les critères de qualité (longueur de tige, taille du bouton floral, tenue en vase) ne

sont plus facilement respectés. On se trouve donc devant un problème que la technique hors sol n'a pas encore bien résolu. Une hypothèse courante est que la demande transpiratoire de la plante devient excessive et que l'irrigation n'arrive plus à suivre la consommation en eau de la plante (Baille et al., 1994). Mais on a pu montrer (Urbain et al., 1995) que le stress climatique qui induit une fermeture stomatique partielle peut subsister même lorsque le substrat de culture est maintenu proche de la saturation. L'idée de départ a donc évolué, et c'est vers un stress salin que les auteurs cherchent maintenant l'explication des cas les plus fréquents de fermeture stomatique (Tardieu et Davies, 1992; Davies et Zhangs, 1991). On peut en effet maintenir un substrat saturé en solution sans pour cela éviter qu'une dérive de concentration se produise à l'intérieur. Un travail récent (Bougoul., 1996) a permis de montrer qu'une dérive de concentration modique au niveau du contenu global du substrat produit en fait des gradients de concentration qui amènent au contact des racines des valeurs de salinité insoupçonnées (atteignant facilement le quadruplement de la valeur d'apport). Le mécanisme de ces gradients de salinités dans les substrats est provoqué par des écarts momentanément considérables entre la concentration d'apport et la concentration d'absorption de la plante sous forte demande transpiratoire. Il est donc utile d'étudier plus en détail les fluctuations de la concentration d'absorption sur un cycle journalier.

C'est en décomposant les deux facteurs qui contribuent à cette composition d'absorption, le flux transpiratoire et le flux minéral, que nous pouvons étudier l'origine des fluctuations de la concentration d'absorption.

MECANISME DE LA TRANSPIRATION

On s'appuie sur l'approche de Penman-Monteith (Boulard et al., 1991) qui n'est qu'autre qu'un bilan d'échanges de chaleur et de masse à la surface d'un végétal supposé sans inertie. L'hypothèse de Lewis ($Le=1$) permet de relier le coefficient d'échange massique (évaporation à la surface de la feuille) au coefficient d'échange thermique (convection à la surface de la feuille) par la relation suivante :

$$(h_m^{ex} = \frac{h_{cv}}{C_p}). \quad (1)$$

où C_p est la chaleur spécifique de l'air.

Soit ETR l'énergie dissipée par transpiration :

$$ETR = h_m \cdot Lv \cdot (w_{sat}(T_f) - w_a) \quad (2)$$

où h_m est le coefficient de transfert convectif de masse en $kg \cdot m^{-2} s^{-1}$,

Lv est l'enthalpie d'évaporation de l'eau en $J \cdot kg^{-1}$,

w_a (et w_{sat}) est l'humidité absolue de l'air (respectivement à saturation) en kg/kg d'air sec.

h_m^{-1} est une résistance globale à l'évaporation qui met en jeu deux résistances, l'une interne r_s , et l'autre dite aéraulique $r_{ex} = (hm^{ex})^{-1}$.

A partir de la relation de Lewis et après linéarisation de la dépendance de ETR en T_f et élimination de la température de feuille par écriture du bilan thermique à l'échelle de la feuille, on obtient :

$$ETR = R_n - \frac{h_{cv}^{ex}}{A_{sat} \cdot Lv} \left(R_n - \frac{Lv \cdot Da}{rs + \frac{Cp}{h_{cv}^{ex}}} \right) \quad (3)$$

où A_{sat} est la valeur de la pente de la courbe de pression

Cette équation s'écrit sous forme schématique :

$$ETR = a \cdot R_n + b \cdot Da \quad (4)$$

où a et b recouvrent les coefficients complexes de l'équation (3).

Dans la pratique, on trouve des modèles simplifiés (Boulard et Jemaa., 1993) où les coefficients a et b sont supposés constants et sont déduits d'une régression linéaire de la transpiration sur une journée ou une séquence de plusieurs jours. En fait, ces coefficients dépendent fortement de la température, à travers la pente de la courbe de saturation, et du rayonnement par le biais de la résistance stomatique. La pente A_{sat} varie fortement avec la température ambiante (passant du simple au double entre 20°C et 30°C), ce qui entraîne une variation de ces coefficients de plus de 30% à l'échelle de la journée et peut conduire à des erreurs d'appréciation notables de la demande transpiratoire instantanée. Une stratégie prudente consiste à supposer la résistance stomatique proche de son optimum diurne et introduire l'évolution réelle de la température de l'air et de son déficit de saturation. Par cette approche, on obtiendra une estimation détaillée de la transpiration instantanée qui ne devrait pas être en défaut à l'échelle de l'heure.

Dans la Fig.1 qui suit, on montre une évolution typique de la température d'air au cours d'une journée ensoleillée, et sa conséquence sur le déficit de saturation, quand on suppose que l'air est resté à humidité absolue constante, ce qui est souvent le cas dans la pratique.

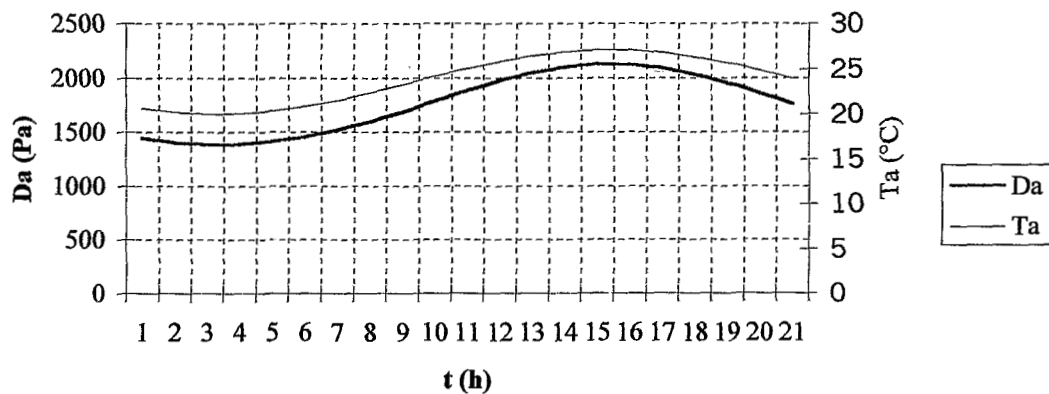


Figure 1. Variation du déficit de saturation et de la température de long d'une journée type

Avec ces hypothèses, on obtient la courbe de transpiration potentielle de la Figure 2.

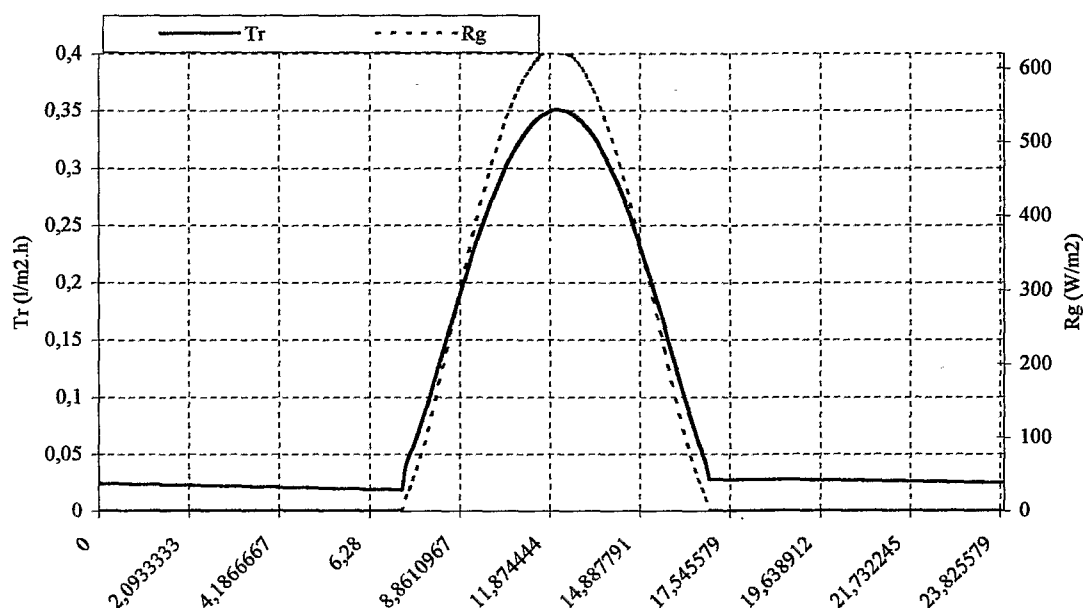


Figure 2. Variation de la transpiration et du rayonnement le long d'une journée type

Cette courbe traduit plusieurs effets intéressants : il existe une transpiration nocturne non négligeable (due au maintien d'un déficit de saturation de nuit), et une distorsion du flux de transpiration par rapport au signal du rayonnement solaire qui reflète le déphasage de la température d'air.

ABSORPTION MINÉRALE PAR LA PLANTE

L'étape suivante consiste à s'intéresser à la demande minérale instantanée de la plante. Cette demande est plus difficile à chiffrer car elle porte sur des flux faibles et ne peut être étudiée que par des dispositifs expérimentaux de précision permettant de voir évoluer le contenu du milieu racinaire à l'échelle de l'heure.

C'est ce qui a été réalisé par (Brun et Chazelle., 1995) sur le rosier grâce à un montage de type NFT (solution coulante sur gouttière en circuit fermé) associé à un appareil d'analyse de la composition en ions nitriques et en ions potassium (AMA 200 de Tacussel). La mesure fait appel à des électrodes sélectives qui sont soumises à un débit perdu de solution nutritive préalablement additionnée d'une solution tampon.

Afin d'éviter que la consommation par la plante ne fasse dériver de façon inconsidérée le volume et la composition de la solution recyclée, un dispositif de siphon assure une fourniture de solution neuve connue au gré des besoins, tandis qu'une balance fournit en continu la cinétique de transpiration.

La cinétique de l'absorption minérale est issue d'une mesure périodique (la période est ici de 10 minutes) de la composition ionique de la solution recyclée, en un point de son périple, une fois effectuée la correction des compléments de solution neuve et du débit de fuite passant sur l'analyseur. Cette estimation est obtenue par soustraction de deux valeurs de composition ionique très voisines, décalées de 10 mn dans le temps, et la précision de sa détermination est donc

critique. De même, la connaissance du volume de solution en circulation est déterminante, et des corrections ont dû être apportées pour tenir compte d'effets thermiques perturbateurs. Une fois cette méthodologie d'analyse du signal mise au point, une courbe de cinétique d'absorption de l'azote nitrique et du potassium ont pu être établies. La Figure 3 montre comment évolue la prise des ions nitrate au cours de 4 journées successives caractérisées par des conditions météorologiques variables.

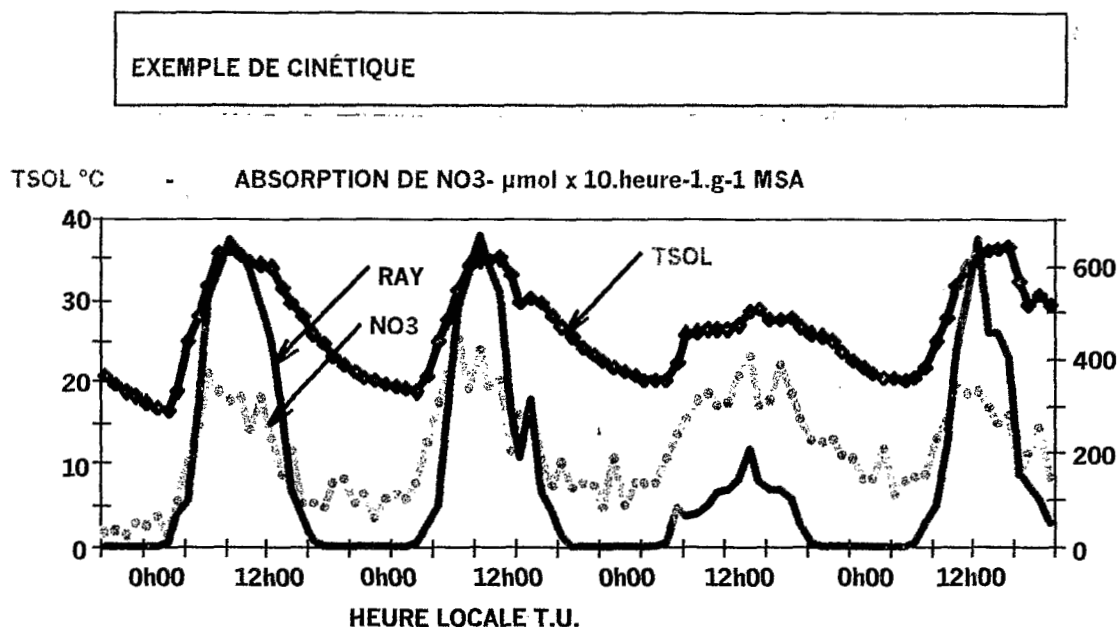


Figure 3. Cinétique d'absorption de l'azote nitrique au cours de journées consécutives d'ensoleillement variable. (Ref. 11)

Ces courbes offrent une vue relativement détaillée de l'évolution du flux minéral instantané rapporté au poids de sève brute. Les valeurs vont de 0,2 à 2 mmoles d'azote par heure et par gramme de sève, suivant qu'on est en régime nocturne ou en régime diurne. Les flux sont scandés par le rythme solaire qui commande l'essentiel des flux hydriques, mais leurs valeurs ne sont visiblement pas proportionnelles à l'intensité du rayonnement solaire proprement dit. La comparaison avec les prédictions de modèles va permettre de progresser dans l'interprétation.

MODELE "POMPE-FUITE-RESERVOIR" POUR L'ABSORPTION MINERALE PAR LA PLANTE.

Ce modèle proposé par Scaife., (1995), suppose l'existence d'une pompe motrice P_0 pour l'absorption des ions nitrate par les racines, un réservoir de volume constant, situé au niveau racinaire, un débit Q_{as} de réduction des nitrates dans le compartiment racinaire (comme conséquence de la production d'assimilats par la photosynthèse) et une fuite diffusive Q_f du réservoir de nitrate vers le milieu externe, proportionnelle à l'écart de concentration. On se réfère à lui sous le nom de modèle PFR.

En faisant le bilan des flux et des efflux, on écrit que l'accumulation se fait par accroissement de la concentration C dans le réservoir racinaire :

$$\frac{dC}{dt} = P_0 - Q_f - Q_{as} \quad (6)$$

Estimation des différents termes du bilan :

a- Pompe ionique P_o :

Selon Scaife, on estime que la pompe ionique est capable d'assurer un accroissement de matière sèche de 50% par jour. Avec une teneur en azote dans la matière sèche de 3%, une teneur en eau totale de la plante de 80% et une correction sur le volume total de 50% pour le flux d'exsudat, on obtient une intensité de pompe de l'ordre de:

$$P_o = 0,1 \text{ gN/dm}^3/\text{h.} \quad (7)$$

b- Fuites diffusives Q_f :

Ces fuites sont proportionnelles à l'écart de concentration entre le compartiment racinaire et le milieu extérieur.

$$Q_f = k (C - C_m). \quad (8)$$

Pour avoir accès à ce terme, on se place dans un régime nocturne stationnaire où l'on a alors égalité de débit entre la pompe ionique et les fuites diffusives. Pour obtenir le coefficient k , il faut avoir une idée de l'écart de concentration.

Des mesures faites sur des tiges de rosier conduisant le flux d'exsudat vers les parties aériennes donnent une valeur voisine de 10 me/l. Cette valeur est crédible car le flux d'exsudat est obtenu après abscission des tiges et ne résulte donc que d'une simple poussée des racines. On admet donc, entre ce compartiment racinaire et le milieu extérieur, un écart de 10 me/l au maximum, et éventuellement moins encore dans la mesure où la concentration dans les substrats hors sol a souvent tendance à s'accroître:

$$C_m \leq 140 \text{ mg/dm}^3, \text{ d'où l'on déduit : } k \approx 0.7 \text{ h}^{-1}$$

c- Flux d'assimilations Q_{as} :

D'après des mesures faites par Morisot [13], le rosier produit environ 2 g de matière sèche par MJ-P.A.R de rayonnement photosynthétiquement actif reçu, ce qui correspond à une énergie solaire globale de 0,555 kWh/m². Le flux d'assimilation, en unités mg N dm⁻³.h⁻¹, s'écrit donc comme étant proportionnel au rayonnement global horizontal R_g (compté en kW/m²):

$$Q_{as} = F.R_g \quad (9)$$

avec une constante de proportionnalité F de l'ordre de 100 dans ces unités.

Au total, l'équation de bilan régissant la teneur C en ion nitrate de la sève brute s'écrit :

$$\frac{dC}{dt} + K.C = P_o + K.C_m - F.R_g \quad (10)$$

Résolution analytique de l'équation du bilan :

Les informations les plus parlantes s'obtiennent en raisonnant sur une solution analytique simple de l'équation (10). Une telle solution existe si l'on assimile le rayonnement à une simple fonction

sinusoïdale, avec un maximum au midi solaire et une valeur nulle à minuit (cette approximation correspond au premier ordre d'une décomposition du rayonnement en série de Fourier).

$$R_G = \frac{1}{2} R_{G_{\max}} [1 - \cos(\omega t)] \quad (11)$$

L'équation (10) se résout alors facilement sous la forme:

$$C(t) = \frac{A}{K} + C_0 e^{-Kt} + \lambda \cos(\omega t - \varphi) \quad (12)$$

On fait apparaître une constante A/K qui représente la valeur moyenne asymptotique, un terme transitoire amorti et un terme oscillant déphasé par rapport au signal lumineux.

Le délai d'amortissement d'une perturbation initiale est donné par $t = (\text{Log } 2)/K$, le déphasage φ de la réponse périodique de la plante au signal solaire prend la valeur:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega}{K}\right) \quad (13)$$

la constante λ est donnée par :

$$\lambda = \frac{1}{2} \frac{F \cdot R_{G_{\max}}}{\sqrt{K^2 + \omega^2}} \quad (14)$$

Comparaison entre le modèle P.F.R et les mesures faites en NFT :

Pour passer du compartiment racinaire au contenu de la solution du système NFT, on comptabilise la différence entre la pompe ionique et les fuites diffusives. On écrit ainsi:

$$\frac{dN}{dt} = P_0 - K(C - C_m) = \frac{dC}{dt} + Q_{as} \quad (15)$$

ce qui donne :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{2} F \cdot R_{G_{\max}} - K \cdot C_0 \cdot e^{-Kt} + K \cdot \lambda \cdot \cos(\omega \cdot t - \varphi) \quad (16)$$

La solution pour le flux dN/dt est donc très voisine de la solution précédente : on met en évidence un régime oscillant transitoire qui tend vers un comportement sinusoïdal pur après un délai $\tau = \frac{3}{K}$.

Le déphasage temporel du pic de flux d'azote par rapport au pic de rayonnement est donné par :

$$\Delta t = \frac{12}{\pi} \cdot \arctan\left(\frac{\pi}{12K}\right) \quad (17)$$

La relation entre ce déphasage temporel et le délai d'amortissement s'écrit :

$$\tau = \frac{36}{\pi} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{12} \cdot \Delta t\right) \quad (18)$$

Cette expression est utile pour l'identification d'un effet retard : seul un décalage supérieur à 3 heures du pic d'absorption peut s'accompagner d'un effet de mémoire dû au terme exponentiel, perceptible d'une journée sur la suivante (soit supérieure à 12h).

D'autre part, le rapport de l'absorption nocturne à l'absorption diurne, bien plus faible pour le rosier que pour le raygrass, donne une information qui permet de situer la constante K et par suite le déphasage et le délai d'amortissement. En effet ce rapport s'écrit :

$$\frac{\Phi_{noc}}{\Phi_{diu} - \Phi_{noc}} = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{\omega^2}{K^2}} \quad (19)$$

ce qui, dans le cas du rosier, n'est compatible qu'avec un paramètre K très supérieur à la pulsation ω . Il faut donc admettre une valeur de K voisine de l'unité, ce qui implique alors un déphasage faible (inférieur à l'heure) et un délai d'amortissement de l'ordre de 4 heures, au plus.

De fait, en examinant les courbes expérimentales de (Scaife, 1989), il n'est pas clair qu'il existe le moindre décalage entre la montée de l'ensoleillement et le démarrage de l'absorption, ce qui confirme que la constante d'amortissement est bien trop forte pour être responsable d'un effet de mémoire d'un jour sur l'autre. Dans ces conditions, il existe une quasi-proportionalité entre absorption minérale et rayonnement. Le comportement de la courbe expérimentale d'absorption du rosier au troisième jour, qui n'est que faiblement atténuée alors que le rayonnement a profondément chuté, pose donc un problème d'interprétation, et nécessite un approfondissement du modèle PFR.

MODIFICATION DU MODELE PFR

Il est possible de mettre en évidence un certain nombre de phénomènes perturbateurs qui se superposent au fonctionnement simple décrit par le modèle PFR.

Si on regarde les courbes expérimentales d'absorption du rosier (Brun et Jemaa., 1995), on constate en effet les phénomènes suivants :

a - La proportionnalité entre absorption d'azote et rayonnement se détériore à mi-journée. Or, le seul paramètre climatique qui brise la symétrie par rapport au midi solaire est la température de la solution recyclée (qui suit avec retard la température d'air).

b - Pour des températures de solution modérées, comme celles observées de nuit (inférieures à 20°C), l'absorption d'azote nitrique par la plante augmente avec la température, en conformité avec les notions de cinétique chimique.

c - En revanche, les températures excessives de solution ($T > 30^\circ\text{C}$) apparaissent clairement comme inhibitrices de l'absorption minérale, à éclairage donné.

d - A température donnée, l'absorption ne suit plus linéairement le rayonnement au delà d'un certain seuil (ici voisin de 500 W/m²); c'est donc un signe d'une saturation possible du rayonnement sur un couvert végétal faiblement développé (un indice foliaire voisin ici de l'unité).

Ces effets doivent être introduit dans le modèle de Scaife.

Modèle P.F.R modifié.

a) Effet promoteur de la température nocturne sur la force de la pompe ionique : on introduit

$$P = P_0 + I_1 \cdot f(T) \quad (20)$$

où I_1 est une constante et $f(T)$ est une fonction linéairement croissante de T en dessous de 20°C .

b) Effet inhibiteur des rayonnements intenses et des températures diurnes excessives : on introduit

$$Q_{\text{ass}} = I_0 \cdot \ln\left(1 + \frac{R_G}{100}\right) \cdot e^{-\frac{T-20}{40}} \quad (18)$$

où I_0 est une constante.

Cette fois, l'équation du bilan (6) nécessite une résolution avec les conditions météorologiques réelles, ce qui interdit toute solution analytique. Pour simuler la température diurne des 4 journées considérées, on a utilisé une loi simplement sinusoïdale avec 2 comportements bien différenciés (pour les jours ensoleillés et les jours gris), selon l'allure représentée ci dessous en Figure 4.

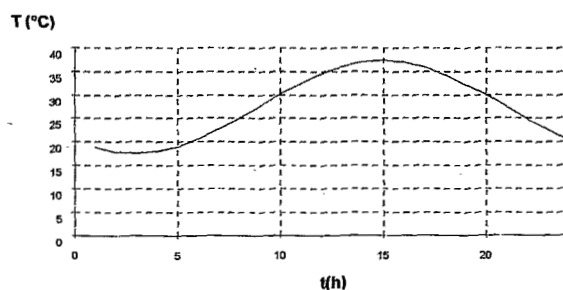


Figure 4 a : variation de la température de solution par jour clair.

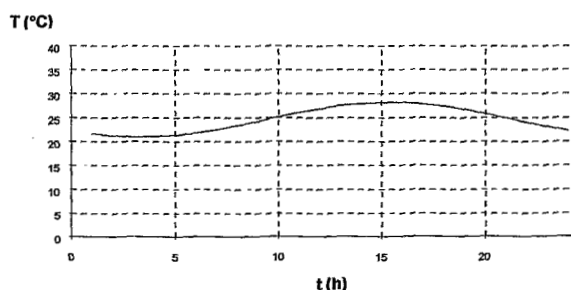


Figure 4 b : variation de la température de solution par jour gris.

La température nocturne de la solution qui croît régulièrement été simulée par la droite de la figure 4c

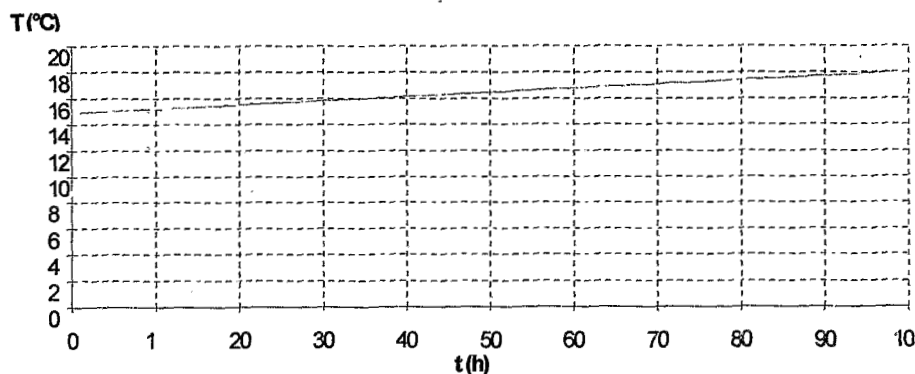


Figure 4c. Variation de la température moyenne de nuit

Le rayonnement solaire, qui est la force motrice principale de la transpiration et qui est soumis à des accidents marqués, a été directement repris à partir des enregistrements réalisés point par point.

La résolution de l'équation différentielle est ensuite faite numériquement avec la méthode de Runge-Kutta.

Avec une telle simulation du climat réel, on obtient les courbes d'absorption modélisées sous la forme de la Figure 5.

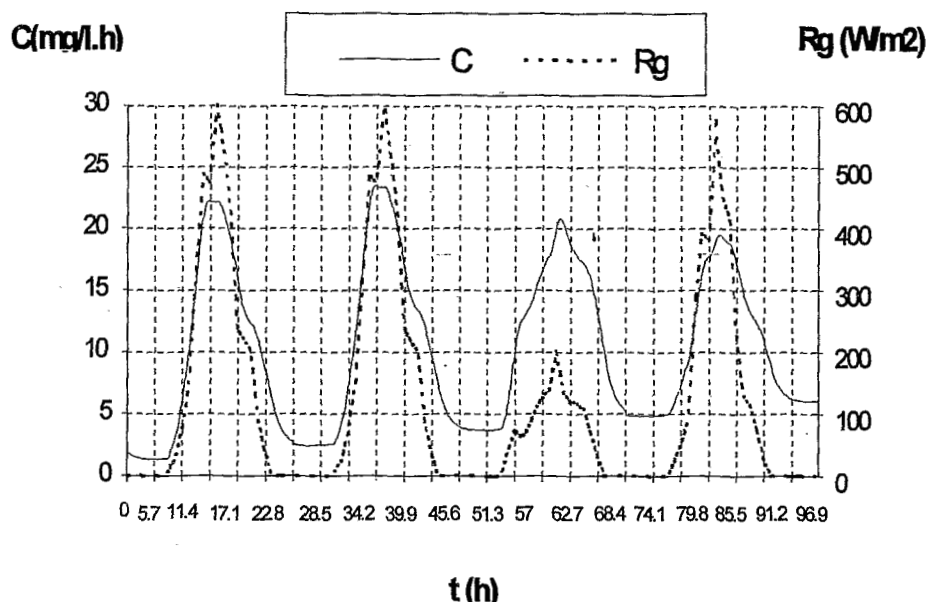


Figure 5. Flux d'absorption d'azote nitrique au cours du cycle

On constate que, grâce aux facteurs correctifs introduits, l'effet de la baisse du rayonnement est partiellement masqué par la chute de la température diurne qui était excessive par fort ensoleillement.

Le flux d'absorption, ici indiqué en mg/h par litre de sève brute, peut être traduit mmol/h par gramme de matière sèche aérienne grâce à un coefficient de conversion d'environ 1/10, ce qui permet de rapprocher directement les échelles utilisées dans la Fig. 3 et dans la Fig. 5. La bonne coïncidence entre courbe d'absorption expérimentale et courbe simulée montre que le modèle PFR modifié est apte à reproduire la demande minérale du rosier cultivé en hydroponique.

Au vu de ces résultats, il semble possible d'expliquer l'absorption nitrique instantanée d'un rosier sans faire appel à un effet de mémoire, comme cela avait été proposé de façon alternative (Brun et Chazelle., 1995) en l'imputant à des réserves constituées d'un jour sur l'autre. Néanmoins, le débat entre ces deux interprétations possibles du comportement du rosier ne sera réellement tranché qu'après examen d'une séquence climatique discriminante : par exemple deux jours gris après deux jours ensoleillés. Le modèle présent, sans effet de mémoire, prédit un flux d'absorption identique au cours des deux journées grises consécutives. Un effet de mémoire dans la plante impliquerait au contraire que l'absorption continue à diminuer au cours du deuxième jour sans soleil.

Maintenant que les modèles présents nous donnent de façon satisfaisante le flux de transpiration et le flux minéral dans la plante, nous pouvons en déduire une simulation opérationnelle de la variation de la concentration d'absorption dans la plante au cours du rythme nyctéméral. Celle-ci est obtenue comme le rapport des flux minéraux et hydriques.

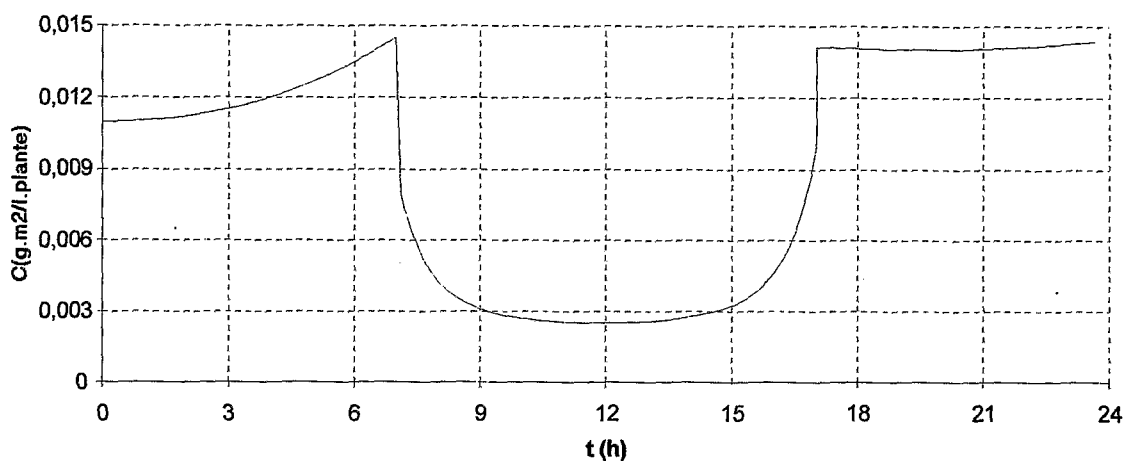


Figure 6. Variation de la concentration d'absorption de NO₃ le long d'une journée ensoleillée

Cette courbe, issue des modèles de transpiration et d'absorption minérale validés sur l'expérience en NFT, et qui a une utilité opérationnelle pour la gestion d'une nutrition, décrit une fluctuation d'un facteur de plus de 5 entre la période nocturne et la période diurne. Le modèle de simulation de la concentration d'absorption en temps réel constitue donc un outil puissant pour prévoir la demande de la plante au fil du temps et pour anticiper les corrections à apporter au milieu racinaire avant que ne se manifeste un stress salin.

REFERENCES

Baille M. , Baille A , Delmon D, (1994).Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology* 71, pp 83-97.

Bougoul S.; (1996). Etude d'écoulements salins dans des milieux fibreux saturés utilisés en substrats de culture. Thèse de Doctorat en Sciences; Université de Nice.

Boulard T , Baille A., Lagier J. , Mermier M. & Vilette .F (1991). Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. *Agronomie*, 11: pp 259-274.

Boulard T., Jemaa R.; (1993).Greenhouse tomato crop transpiration, application to irrigation control. *Acta Horticulturae.*; N° 335; pp. 381-387.

Brun R. (1987) Fertilisation de l'oeillet et du gerbera cultivés en bac sur substrat. Dans "Les cultures hors sol"; édité par D. Blanc; INRA ; 145 rue de l'Université - 75007 Paris.409p.

Brun.R. , Chazelle. L; (1995).Water and nitrate (NO₃) absorption kinetics in the nycthemeral cycle of *Rosa hybrida* grown in greenhouse in recirculation solution. Plant Nutrition Vol 19; p 1.

Davies W.J., Zhangs J.; (1991). Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 42: pp 55-76.

De Villele O.; (1974) Besoins en eau des cultures sous serre; essai de conduite des arrosage en fonction de l'ensoleillement. Acta Horticulturae N° 35: pp 123-129.

Lesaint C.(1987). Analyse critique des systèmes de culture hors sol avec et sans recyclage des solutions. Dans "Les cultures hors sol"; édité par D. Blanc; INRA ; 145 rue de l'Université- 75007 Paris.409p.

Morisot M.; (1995).Un modèle de prédiction du rendement potentiel pour le rosier à fleurs coupées : "PP.Rose". ISHS Rose Symposium; Antibes: 20-24 fev. 95. To be published in Acta Horticulturae.

Scaife. A ; (1989). A pump/leak/ buffer model for plant nitrate uptake. Plant and soil N°114. pp 139-141.

Tardieu F., Davies W.J.; (1992). Stomatal response to abscissic acid is a function of current plant water status. Plant Physiol. 98; pp 540-545.

Urban L., Jaffrin A., Brun R.; (1995). Control of salinity in the rhizosphere of plants grown in soilless medium. Acta Horticulturae N° 408.; pp.73-79.