DETERMINISME CLIMATIQUE DE LA CONSOMMATION EN EAU DES PLANTES *

par M. ELDIN, Maître de Recherches en Bioclimatologie à l'ORSTOM

Il est intuitif que des facteurs climatiques tels que le vent, la température et le déficit de saturation de l'air, la grandeur du rayonnement absorbé par un couvert interviennent sur l'évapotranspiration de ce dernier. Cette connaissance intuitive n'apporte pas grand chose pour la prévision, la mesure, ou la modification des pertes en eau d'un couvert végétal si l'on ne connaît pas le mécanisme physique d'action de ces facteurs du milieu sur l'évapotranspiration.

D'autre part, les agronomes s'occupant de l'économie de l'eau dans la vie végétale utilisent souvent les termes d'évapotranspiration réelle (ETR), d'évapotranspiration maximale (ETM) ou d'évapotranspiration potentielle (ETP) sans les définir. Nous allons essayer de donner ici des définitions rigoureuses de ces grandeurs.

Les trois facteurs primordiaux de l'évapotranspiration

L'évaporation de l'eau à la surface du sol ou des végétaux et la transpiration végétale, qu'elle soit stomatique ou cuticulaire, consiste pour le physicien en un changement d'état de l'eau l'évaporation :

Pour qu'il y ait évaporation il faut essentiellement produire de la vapeur d'eau et que cette dernière puisse s'éloigner de la surface d'eau liquide dont elle provient. Pour produire de la vapeur d'eau il faut de l'eau liquide et de l'énergie pour la vaporiser.

On arrive ainsi au schéma suivant :

- Evaporation
  - Production de vapeur d'eau (Vaporisation)
    - Eau liquide
    - Energie
  - Evacuation de la vapeur d'eau

16 JUIL. 1974

* Ce texte reprend les grandes lignes d'un article en cours de publication. Il est protégé par le Copyright-ORSTOM 1972.

Collection de Référence
n° B 6958 Agr.

qui met bien en évidence les trois fracteurs primordiaux de l'évaporation.

Expression mathématique de ces trois facteurs :

A - Energie disponible pour la vaporisation de l'eau au niveau du couvert.

L'énergie disponible pour la vaporisation E_V est l'énergie résiduelle dont dispose le couvert végétal étudié lorsqu'une partie de l'énergie radiative qu'il a "captée" a été "dissipée" par rayonnement propre, "pertes" de chaleur sensible par convection dans l'air ou par conduction dans le sol, photosynthèse, ... Les termes "captée", "dissipée", "pertes" sont pris dans un sens algébrique : une "perte" négative, par exemple, est un "gain". Nous compterons comme positive l'énergie reçue par le couvert.

Considérons le cas d'un couvert horizontal, homogène, de grande surface, ne recevant pas d'énergie advective de petite échelle et pour lequel les flux verticaux (chaleur sensible et vapeur d'eau, en particulier) sont donc conservatifs à l'intérieur de la couche limite qui se développe à son contact. La couche limite du couvert est la zone d'air qui le surmonte dans laquelle l'écoulement de l'air libre (vent) est perturbé par sa présence. C'est dans cette couche limite qu'apparaissent les gradients verticaux de température, pression de vapeur d'eau, concentration en CO_2, ... qui permettent de passer des valeurs de ces facteurs au niveau du couvert aux valeurs qu'ils ont dans l'air libre. La couche limite, qui dans le cas d'un couvert de un ou plusieurs hectares a une épaisseur de quelques mètres, variable avec l'étendue du couvert, sa rugosité et la vitesse du vent, est donc le siège des échanges entre le couvert et l'atmosphère.

1) Echanges radiatifs :

On peut écrire :

$$R^{abs} = (1 - a_c)\, R^G + \mathcal{E}_c\, R^A \qquad (1)$$

où : R^G est le rayonnement global : Rayonnement de courtes longueurs d'onde d'origine solaire ($< 3\ \mu$)

R^A est le rayonnement atmosphérique. Rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'ondes ($> 3\ \mu$)

a_c est le coefficient moyen de réflexion du couvert pour les courtes longueurs d'onde.

ε_c est le facteur d'absorption (ou émissivité) du couvert pour les grandes longueurs d'onde.

R^{abs} est le rayonnement de toute longueur d'onde absorbé par le couvert.

R^{G}, R^{A} et R^{abs} sont exprimés sous forme de densités de flux d'énergie, en cal . cm^{-2}.mn^{-1} par exemple.

Le rayonnement propre du couvert R^{C} peut s'écrire, d'après la loi de Stéfan :

$$R^{C} = \varepsilon_c \, \sigma \, T_s^{\,4} \qquad (2)$$

où σ est la constante de Stéfan

T_s est la température de surface du couvert.

Le bilan radiatif du couvert B^{C} est donc :

$$B^{C} = R^{abs} - R^{C} = (1 - a_c)\, R^{G} + \varepsilon_c \, R^{A} - \varepsilon_c \, \sigma \, T_s^{\,4} \qquad (3)$$

2) Echanges de chaleur sensible :

Le couvert échange de la chaleur sensible avec l'atmosphère par convection et avec le sol par conduction. La conduction de la chaleur dans le sol est en général négligeable par rapport aux échanges convectifs et l'on peut écrire :

$$Q^{C} = \rho . C_p \cdot \frac{T_s - T_a}{R_T} \qquad (4)$$

où : Q^{C} est la densité de flux vertical de chaleur sensible échangé entre le couvert et son environnement

ρ est la masse volumique de l'air (humide)

C_p est la chaleur spécifique de l'air à pression constante

T_a est la température de l'air libre (à l'extérieur de la couche limite)

R_T est la résistance à la convection de la chaleur à travers la couche limite du couvert

R_T est ~~[illegible]~~ proportionnel à l'épaisseur de la couche limite. C'est une fonction de la longueur L du couvert dans le sens du vent, de sa rugosité r, de la vitesse du vent U à l'extérieur de la couche limite et de la viscosité ν de l'air.

$$R_T = f\,(L^{1/2}, U^{-1/2}, r, \nu). \qquad (5)$$

3) Bilan énergétique du couvert :

La loi de la conservation de l'énergie nous permet d'écrire, à un instant donné :

$$R^{abs} - R^{c} - Q^{c} - P - E_{W} = Q \qquad (6)$$

où P est l'énergie consommée par la photosynthèse

Q est la densité de flux d'accumulation de chaleur par le couvert.

Ces deux derniers termes sont négligeables par rapport aux autres. La photosynthèse représente environ 1% de R^{c} et Q est très petit à cause de la très mauvaise conduction de la chaleur à l'intérieur d'un couvert végétal.

Ainsi, (6) devient :

$$E_{W} = R^{abs} - R^{c} - Q^{c}$$

$$E_{W} = R^{abs} - \mathcal{E}_{c}.\sigma.T_{s}^{4} - \rho.Cp \cdot \frac{T_{s} - T_{a}}{R_{T}} \qquad (7)$$

On a donc l'expression de l'énergie disponible E_{W} pour la vaporisation de l'eau au niveau du couvert, comme terme résiduel du bilan d'énergie de ce dernier.

E_{W} est exprimé en fonction de T_{s}, en fonction d'un certain nombre de paramètres morphologiques ou anatomiques du couvert (a_{c}, $\mathcal{E}_{c}$, rugosité, longueur) et en fonction des facteurs climatiques qui définissent l'environnement du couvert à l'instant considéré (R^{G}, R^{A}, T_{a} et U).

Sur la figure I, on a représenté la variation de E_{W} en fonction de T_{s} pour un environnement climatique caractérisé par :

R^{abs} = 1,0 cal. cm^{-2}. mn^{-1}

T_{a} = 30° C

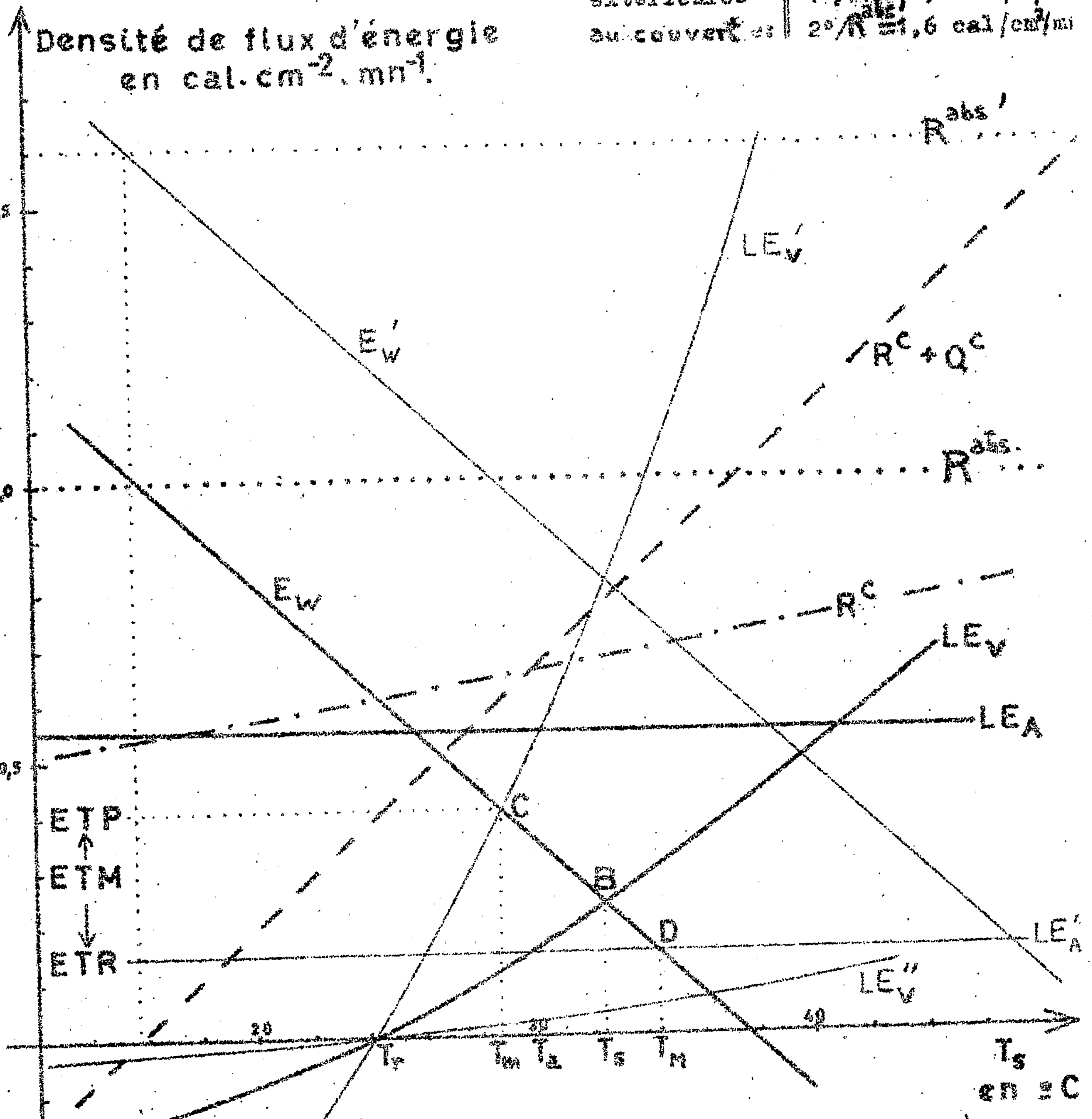
U = 2 m. s^{-1}

En première approximation, E_{W} varie de façon inversement proportionnel à T_{s}. Pour un environnement climatique donné l'énergie disponible pour la vaporisation sera d'autant plus faible que la température de surface du couvert sera plus grande.

- Figure I -

Conditions extérieures au couvert :

T_a = 30 °C
e_a = 30 mb. (T_r = 24,1
1°/ R^{abs} = 1,0 cal/cm²/mn
2°/ $R^{abs'}$ = 1,6 cal/cm²/mn



R^{abs} = énergie radiative absorbée par le couvert.
R^c = rayonnement propre du couvert.
Q^c = chaleur dissipée par convection (pour R_T = 0,60 s/cm)
$E_W = R^{abs} - (R^c + Q^c)$ = énergie disponible pour la vaporisation.

LE_V	quantité d'eau évacuable	2 s.cm⁻¹
LE'_V =	pour $r_v = R_V + R'_V$ =	0,6 s.cm⁻¹
LE''_V		13 s.cm⁻¹

LE_A = alimentation en eau non limitante pour E_W et LE_M.
LE'_A = " " " limitante pour E_W et LE_M.

B - Alimentation en eau liquide.

Soit E_A le débit d'eau, en provenance du sol, alimentant les surfaces évaporantes du couvert végétal; on peut exprimer ce débit sous forme de l'énergie qui serait nécessaire pour sa vaporisation complète, soit $L.\ E_A$

où L est la chaleur de vaporisation de l'eau à la température

Si E_A est exprimé en g. d'eau par cm^2 de surface horizontale du couvert et par minute, LE_A sera exprimé en cal. $cm^{-2}.\ mn^{-1}$ ce qui permet de le représenter sur la figure I.

C - Evacuation de la vapeur d'eau.

Elle s'opère par diffusion depuis les surfaces évaporantes du couvert (Parois humides des cellules du mésophylle) jusqu'à l'extérieur de la couche limite du couvert. Ce trajet de la vapeur d'eau peut se décomposer en deux tronçons :

- Un tronçon qui va des surfaces évaporantes jusqu'au sommet du couvert, pour lequel la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau dépend essentiellement de paramètres morphologiques et anatomiques du couvert (forme et grandeur des feuilles, architecture du couvert, forme, taille et densité des stomates, épaisseur de la cuticule, ...) et de paramètres physiologiques (régulation stomatique, perméabilité de la cuticule, ...).

- Un deuxième tronçon qui va de la surface du couvert jusqu'à l'air libre et pour lequel la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau est R_v.

Pour ce deuxième tronçon, l'application des lois de la diffusion conduit à :

$$E_v = \frac{\rho_a \cdot \varepsilon}{P} \times \frac{e_s - e_a}{R_v} \qquad (8)$$

où : E_v = densité de flux vertical de vapeur d'eau

ε = densité de la vapeur d'eau par rapport à l'air sec

P = pression atmosphérique

e_s = pression réelle de la vapeur d'eau au sommet du couvert

e_a = pression réelle de la vapeur d'eau de l'air libre.

ρ_a = masse volumique de l'air sec.

La théorie de la mécanique des fluides montre que R_v est peu différent de R_T

$$R_v \approx R_T = f\ (L^{1/2}, U^{-1/2}, r, \nu). \qquad (9)$$

Pour une nappe d'eau libre ou pour un couvert très bien alimenté en eau (ETP) la pression e_s est saturante à la température de surface T_s du couvert : $e_s = E_{T_S}$

Mais, dans le cas le plus général :

$$e_s < E_{T_S}$$

On peut définir une résistance à la diffusion R'_v telle que :

$$\frac{e_s - e_a}{R_v} = \frac{E_{T_S} - e_a}{R_v + R'_v}$$

R'_v ~~représente dans~~ est homologue à la résistance à la diffusion de la vapeur d'eau à l'intérieur du couvert, responsable de la chute d la pression de vapeur à la surface du couvert en dessous de la pression saturante E_{T_S}.

(8) peut alors s'écrire :

$$E_v = \frac{\rho_a \cdot \varepsilon}{P} \times \frac{E_{T_S} - e_a}{R_v + R'_v} \qquad (10)$$

On peut écrire : $E_{T_S} - e_a = E_{T_S} - E_{T_a} + E_{T_a} - e_a$

Soit Δ_T la pente de la courbe de saturation de la vapeu d'eau à la température T, on a :

$$\Delta_T = \frac{d\,E_T}{dT}$$

Si $T_m = \dfrac{T_a + T_s}{2}$ $\qquad \Delta_{T_m} = \left(\dfrac{dE}{dT}\right)_{T_m} \approx \dfrac{E_{T_S} - E_{T_a}}{T_s - T_a}$

On en tire : $E_{T_S} - E_{T_a} = \Delta_{T_m} \times (T_s - T_a)$

et (10) s'écrit :

$$E_v = \frac{\rho_a \cdot \varepsilon}{P} \times \frac{1}{R_v + R'_v} \times \left[(T_s - T_a) \cdot \Delta_{T_m} + D\right] \qquad (11)$$

où D est le déficit de saturation de l'air : $D = E_{T_a} - e_a$

On peut exprimer E_v par l'énergie $L \cdot E_v$ nécessaire à sa vaporisation :

$$L\,E_V = \frac{L \cdot \rho_a \cdot \varepsilon}{P} \times \frac{1}{R_v + R'_v} \times \left[(T_s - T_a)\,\Delta_{T_m} + D\right] \qquad (12)$$

L'équation (12) permet de construire sur la figure I la courbe LE_v qui représente les variations de $L\,E_v$ en fonction de T_s

En plus des grandeurs précédentes, l'environnement climatique est caractérisé par :

$e_a = 30$ mb, ce qui donne :

$D = E_{30} - 30 = 42{,}4 - 30 = 12{,}4$ mb.

et une température de point de rosée de l'air $T_r = 24{,}1°$ C

Par définition : $e_a = E_{T_r}$

Il apparait clairement sur l'équation (10) que si $T_s = T_r$ on a $E_v = 0$. Autrement dit, toutes les courbes $L\,E_v$ construites pour différentes valeurs de $r_v = R_v + R'_v$ (c'est à dire pour différentes valeurs de R'_v correspondant à des couverts végétaux différents) passent par le point $T_s = T_r$, $E_v = 0$.

Interprétation de la figure I :

1er cas : l'alimentation du couvert en eau n'est pas facteur limitant : LE_A

a) Si $R'_v = 0$ (cas de l'évapotranspiration potentielle). Le couvert se comporte comme une nappe d'eau libre qui aurait le coefficient de réflexion a_c, l'émissivité $\mathcal{E}_c$, et la rugosité r du couvert.

On a alors $r_v = R_v = R_T$

et l'on obtient la courbe $L\,E'_v$ qui correspond à la plus grande évacuation de vapeur d'eau possible du couvert.

La température de surface du couvert se fixe à sa valeur minimale $T_s = T_m$ qui correspond au point C :

L'énergie disponible E_w équilibre exactement l'énergie LE'_M nécessaire à la vaporisation de E'_M.

b) Si $R'_v > 0$: On a alors $r_v = R_v + R'_v > R_v$

On obtient alors la courbe LE_v.
La température de surface T_s et l'évapotranspiration du couvert, dite alors maximale, correspond au point B. On a : $T_m < T_s < T_M$
et ETP > ETM > ETR.

2e cas : L'alimentation en eau est facteur limitant.
Elle est représentée par la droite LE'_A sur la figure I.

La température de surface va prendre sa valeur maximale T_M correspondant au point D. L'évapotranspiration du couvert est dite alors "réelle".

Dans ce cas là, l'nergie disponible pour la vaporisation est utilisée pour la vaporisation de la totalité de l'eau disponible, indépendemment de la valeur de r_v ($L\mathcal{E}_v$ n'étant plus alors facteur limitant de l'évapotranspiration).

Les valeurs de r_v (de R'_v) élevées, correspondant au cas d'ETM, sont dûes en général à des surfaces d'échanges des végétaux insuffisantes. (Couvert en cours de levaison, par exemple).

Conclusions à caractère agronomique.

. L'ETP n'est pas, en toute rigueur, une grandeur climatique puisqu'elle dépend de a_c, de $\mathcal{E}_c$ et de r. Si on considère que l'ETP climatique est définie en toute rigueur par les valeurs de a_c, $\mathcal{E}_c$ et r correspondant à une nappe d'eau libre, on peut dire que l'ETP d'un couvert s'éloigne peu (0 à 15 %) de l'ETP climatique. Pour la définition des doses optimales d'irrigation cette précision est, en général, suffisante.

. Les pratiques agronomiques doivent maintenir un couvert végétal au voisinnage de son ETP, c'est à dire rendre R'_v aussi petit que possible. Cette condition est remplie lorsque les stomates sont largement ouverts et lorsque les surfaces d'échange (surface des feuilles) sont importantes. On comprend aisément que l'ensemble des fonction métaboliques atteignent alors une activité maximale. En particulier, la photosynthèse est intense et la prodcution optimale. Pour maintenir les stomates grand ouverts le plus longtemps possible au cours de la journée il faut éviter l'apparition d'un déséquilibre hydrique entre l'offre en eau représentée sur la figure I par l'ordonnée de la droite L E_A' et la demande climatique maximale en eau représentée par l'ordonéée du point $\mathcal{E}$ (ETP). Pour arriver à rompre cet éventuel déséquilibre hydrique il n'y a que deux méthodes :

1°/ Une première, connue de tous, consiste à offrir à la plante, par irrigation, la quantité d'eau qui lui est nécessaire pour faire face à la demande climatique. On augmente LE_A' de façon à ce que $LE_A' =$ ETP. Il n'y a aucun intérêt à dépasser cette dose d'alimentation en eau.

2°/ La deuxième, généralement ignorée, consiste à diminuer l'ETP (ordonnée de point A) de façon à la rendre égale à LE_A (LE'_A sur la figure I). Pour celà, deux voies s'offrent à nouveau à l'agronome :

a) diminuer E_W

b) diminuer LE'_V

- Pratiquement, pour diminuer E_W on peut, d'après l'équation (7), diminuer R^{abs} ou diminuer R_T, car il est difficile de jouer sur T_a. Diminuer R^{abs} consiste d'après (1), à diminuer R^c (technique de l'ombrage ou des cultures associées, ou à augmenter a_c par sélection de variétés à facteur de réflexion élevé.

Diminuer R_T consiste d'après (5) à diminuer la rugosité du couvert et sa longueur dans le sens du vent. Mais cette dernière solution n'est pas sans inconvénient car on risque alors d'engendrer des apports d'energie advective sur la culture qui viendront augmenter E_W.

- Pour diminuer LE'_V il faut, d'après (12), augmenter $R_V = R_T$ (On ne peut agir sur R'_V puisqu'on cherche à avoir constamment $R'_V \neq 0$). Pour celà, on cherche à diminuer U en utilisant, par exemple, la technique des brise-vent. Il faut toutefois remarquer qu'en augmentant R_V on augmente aussi R_T, ce qui augmente E_W et limite un peu l'effet de cette pratique. Cependant, une expérience réalisée sur blé, en France, par des bioclimatologistes de l'INRA, à montré qu'on pouvait par la mise en place de brise-vent augmenter les rendement tout en réduisant la consommation en eau, ce qui conduit, bien sûr, à une meilleure efficience de l'eau.

De plus, il ne faut pas oublier que le raisonnement précédent a été conduit en supposant l'absence d'avection. En fait, lorsqu'il s'agit de cultures irriguées imbriquées avec des cultures non irriguées (cas de la ferme de Tombokro, par exemple), les échanges advectifs entre parcelles doivent être la règle. Dans ce cas, les brise-vent jouent également un rôle favorable en ralentissant les départs de vapeur d'eau des parcelles irriguées vers les parcelles non irriguées et les transferts de chaleur sensible dans l'autre sens. (Effet oasis). Ces brise-vent peuvent être artificiels ou naturels et l'on retrouve, dans ce dernier cas, la pratique des cultures sur défriches forestières de petites tailles, qui conduit à une bonne économie de l'eau.