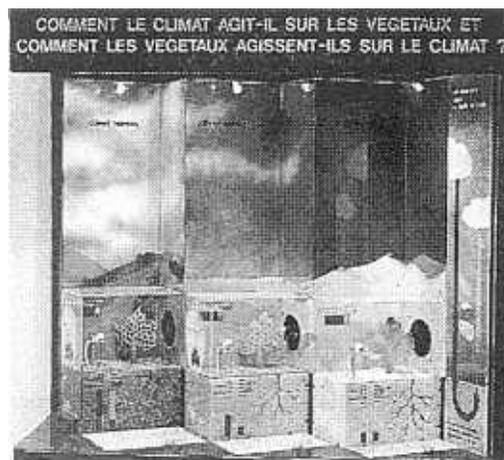


DOSSIER 8

Interaction climat-végétaux

153



Collection de l'Atelier d'exploration

Conception

A. Billet

Conseillers scientifiques

J. F. Castell, A. Perrier,

Laboratoire INRA associé à la Chaire de bioclimatologie INA-PG

Station de bioclimatologie, INRA, 78850 Thiverval Grignon

Développement

J. Pasqualini

1. Contenu scientifique

Cycle de l'eau

Évaporation et évapotranspiration

Comment l'eau circule-t-elle dans les plantes ?

2. Description de la manipulation

Projet initial

Manipulation définitive

3. Exploitation pédagogique

Relations de cette manipulation avec les autres phénomènes

D'où vient la pluie ?

Introduction

L'eau est un élément indispensable à la vie et aux activités humaines. Nous devons l'intégrer aujourd'hui à nos réflexions sur l'environnement, concernant non seulement la protection des milieux, mais aussi le renouvellement de la ressource en eau et l'optimisation de son utilisation. La compréhension du fonctionnement du continuum sol-plante-atmosphère permet d'analyser le rôle que joue cette interface entre les surfaces continentales et l'atmosphère et d'en comprendre les conséquences pour les climats de la terre. Ces connaissances récentes offrent de nouvelles perspectives pour la gestion de l'eau et des couverts végétaux : du champ cultivé à la région et même à l'ensemble de la planète.

L'eau est un facteur essentiel régissant l'évolution du milieu pédoclimatique (ensemble climat-sol). Selon les cas, les possibilités de ce milieu deviendront plus favorables ou s'altéreront au contraire sous l'effet des modifications de régime hydrique. En agissant sur les échanges entre l'ensemble sol-végétation et l'atmosphère, l'eau est un facteur de modification du microclimat et du climat régional, voire même du climat continental ou de la circulation générale à l'échelle du globe. Aujourd'hui, les problèmes de déforestation, de désertification et de modification à long terme du climat par des actions d'origine humaine directes ou indirectes se posent de façon de plus en plus cruciale.

En effet, le cycle de l'eau et ses modifications deviennent le point central de la réflexion et des études suivantes. En quoi la nature des surfaces peut-

elle modifier le climat et le cycle de l'eau ? Comment des modifications climatiques ou des actions anthropiques peuvent-elles faire évoluer la nature de ces surfaces et conduire en retour à des modifications du climat et du cycle de l'eau ?

La manipulation présentée ici aborde l'interdépendance entre le climat et la végétation. Cette illustration du rôle de la végétation dans le cycle de l'eau et le climat est centrée sur la transpiration des plantes. Celle-ci dépend des facteurs climatiques (le vent, le rayonnement solaire, l'humidité). En retour, la végétation modifie les caractéristiques de la masse d'air qui passe au-dessus d'elle (température et humidité). L'objectif principal est d'amener le public à prendre conscience de l'importance du rôle joué par les systèmes biologiques (la végétation) dans le fonctionnement global de la planète (les climats). C'est également une introduction à la réflexion sur les phénomènes liés à la désertification.

Notre projet initial était de créer une manipulation qui mette en scène le processus de transpiration par l'évaporation de l'eau montant par capillarité dans un tissu (feutrine verte) enfermé dans une enveloppe en matière plastique et qui comporte des trous par lesquels se fait l'évaporation (stomates). Par manque de temps, nous nous sommes rabattus sur un simulacre de l'effet de la transpiration, solution bien accueillie par le public, car il existe un premier niveau de lecture qui montre la relation entre un paysage symbolisant un type de climat et la végétation. Notons que cette lecture peut être un obstacle à une lecture plus fine des détails.

1. Contenu scientifique

Cycle de l'eau

Au niveau géosphère-biosphère, l'analyse globale du cycle de l'eau révèle une dissymétrie entre océan et continent.

- On note que 80 % des pluies tombent sur les océans qui ne représentent que 71 % des surfaces du globe, ce qui conduit à la relation :

Pluie (continents) = 0,6 Pluie (océans).

- On note un écart encore plus grand pour l'évaporation, puisque 86 % de l'eau évaporée provient des océans :

Évapotranspiration (continents) = 0,4 Évaporation (océans).

On appelle évapotranspiration le phénomène combiné de perte en eau par transpiration des plantes et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. Ces données correspondent à environ 3,75 mm j⁻¹ en moyenne sur le globe pour l'évaporation des océans : cas de forte disponibilité en eau de la surface. Elles se réduisent à moins de la moitié sur les continents, soit 1,5 mm j⁻¹ à cause d'une disponibilité en eau toujours moindre au niveau des

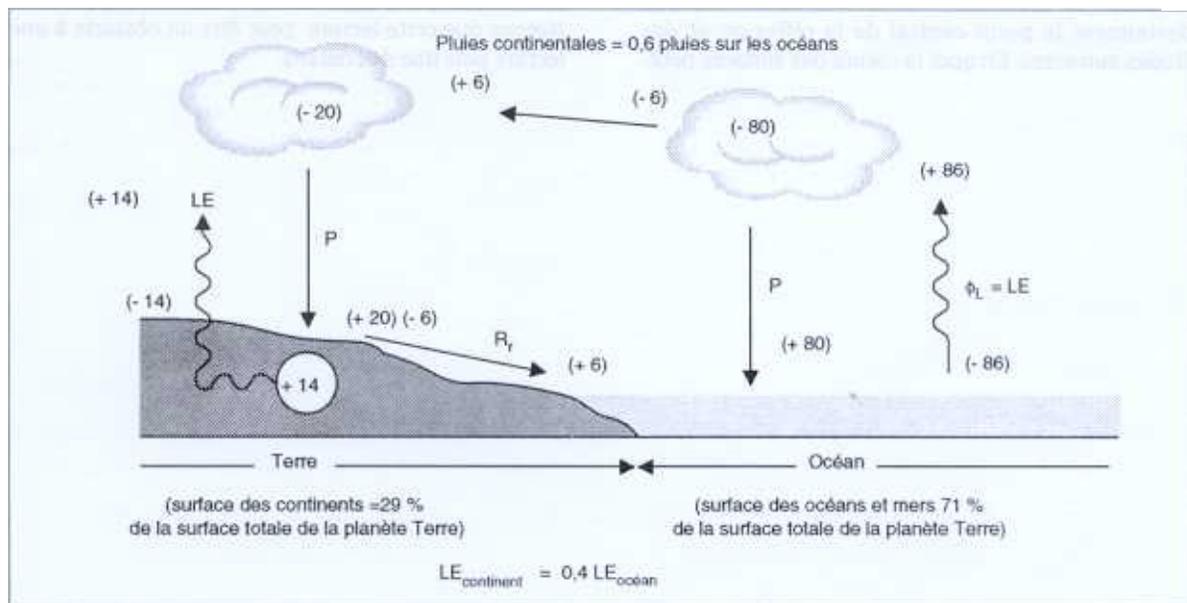
surfaces de végétation et a fortiori des sols nus. En première approximation, on déduit que sur les continents, les deux tiers des pluies proviennent de l'évapotranspiration des surfaces continentales et le tiers de l'advection de vapeur d'eau des océans (quand une masse d'air chaud et humide passe au-dessus d'une surface relativement froide, son refroidissement peut entraîner la condensation de la vapeur d'eau).

Au niveau des continents, toute modification réduisant la disponibilité en eau des surfaces conduit en retour à une baisse de la pluviométrie.

En effet, on constate une baisse de disponibilité en eau lorsque la surface de sol nu augmente lors d'une désertification croissante ou lors du remplacement d'une végétation tropicale pérenne par une culture ne couvrant le sol qu'une partie de l'année (canne à sucre). Ce déficit de vapeur sur les continents ne peut être compensé que par un apport supplémentaire de vapeur des océans.

Cependant, l'influence océanique se limite en moyenne à une frange des continents soumis à forte advection (climats océaniques des façades ouest des continents).

Figure 1



D'où vient la pluie ?

Les valeurs entre parenthèses se rapportent à une base 100, total des pluies qui tombent sur le globe (P : pluies, LE : évaporation).

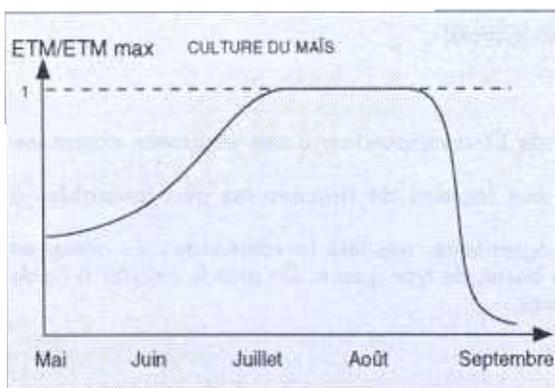
Évaporation et évapotranspiration

En fait, ce ne sont que deux aspects d'un seul et même phénomène physique : le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux. Celui-ci nécessite une consommation d'énergie et dépend de la disponibilité en eau des surfaces considérées. Dans le cas de l'évaporation, la vapeur d'eau passe directement dans l'atmosphère. Dans celui de la transpiration, elle doit franchir la résistance opposée par les stomates (orifices par lesquels les plantes transpirent) à sa diffusion dans l'atmosphère.

La notion d'évapotranspiration a été introduite par Thornthwaite en 1942. C'est à lui que l'on doit le terme d'évapotranspiration potentielle (ETP) encore en usage de nos jours. Cette notion d'ETP avait été définie dans le but de quantifier l'évapotranspiration maximale d'un couvert végétal donné, placé dans le cas d'un sol bien alimenté en eau et en situation de plein développement foliaire (couverture totale). On la définit de nos jours comme la moyenne des évapotranspirations maximales de différents couverts pleinement développés (valeur maximale de l'ETM d'une culture, **fig. 2, pl. 1**).

Les progrès des connaissances théoriques ont permis de montrer que seul le terme d'évaporation potentielle (EP) peut être estimé de façon rigoureuse (à partir des données climatiques et de la description de la structure de la végétation). L'EP correspond à l'évaporation de toute surface (sol ou végétation) saturée en eau. Le terme d'évapotranspiration potentielle ETP sera uniquement utilisé pour estimer la valeur moyenne de l'évapotranspiration maximale (ETM) des cultures (diverses formules existent). Cette notion d'ETP se fonde essentiellement sur les facteurs climatiques de la région donnée. On peut la considérer comme une donnée climatique exprimant la demande du climat en évapotranspiration pour la végétation.

2



Exemple de la culture du maïs.

La demande climatique

Elle est le terme moteur des consommations en eau. Elle dépend essentiellement des disponibilités énergétiques du climat. Cette demande climatique correspond à l'évaporation potentielle (EP), en présence d'eau libre sur toutes les surfaces évaporantes (il n'y a plus de transpiration). Ce cas peut se rencontrer dans la nature (après une pluie, une forte rosée, une irrigation par aspersion). La demande climatique dépend de quatre facteurs.

L'énergie radiative ou rayonnement net

50 % à 80 % de cette énergie participe à la demande climatique, pourcentage croissant en fonction de la température de l'air.

Le déficit hydrique de l'air

Il est proportionnel à l'écart entre la température de l'air et la température de rosée (grandeur indicatrice du contenu en vapeur d'eau de l'air). C'est l'effet desséchant de l'air qui participe pour quelques fractions (cas d'un air humide) à au moins 50 % de la demande climatique (cas d'un air très sec en zone semi-désertique). Cet effet est renforcé par les fortes vitesses du vent.

La température de l'air

Elle accroît les deux effets précédents et augmente à la fois la proportion de l'énergie radiative intervenant sur la demande climatique et le déficit hydrique qui joue sur la demande climatique.

La vitesse du vent

Elle accroît les échanges et donc l'agressivité du climat vis-à-vis de la surface et augmente la demande climatique.

Ces principaux facteurs climatiques sont corrélés. Par exemple, un fort rayonnement est souvent associé à des températures plus hautes et à un déficit hydrique élevé (beau temps sec).

La végétation et les facteurs climatiques sont de plus en interaction permanente. Par exemple, un accroissement de l'énergie radiative s'accompagne toujours en un lieu donné d'une augmentation de la température de l'air. Cela conduit à terme à un déséquilibre entre cette forte demande climatique et l'offre possible (eau disponible pour la végétation). Il en résulte une régulation de surface (fermeture stomatique) qui réduit l'évapotranspiration (ET) et, par voie de conséquence, l'alimentation en vapeur d'eau de l'air. Ce déficit d'alimentation en vapeur d'eau renforce le déficit hydrique et la demande climatique elle-même.

Les connaissances sur le milieu physique et les lois de la micrométéorologie ont permis de montrer que cette demande climatique peut être modifiée par les aménagements du milieu (bosquets, brise-vent, arbres, succession de cultures), par la nature même de la structure de la végétation (hauteur, densité,

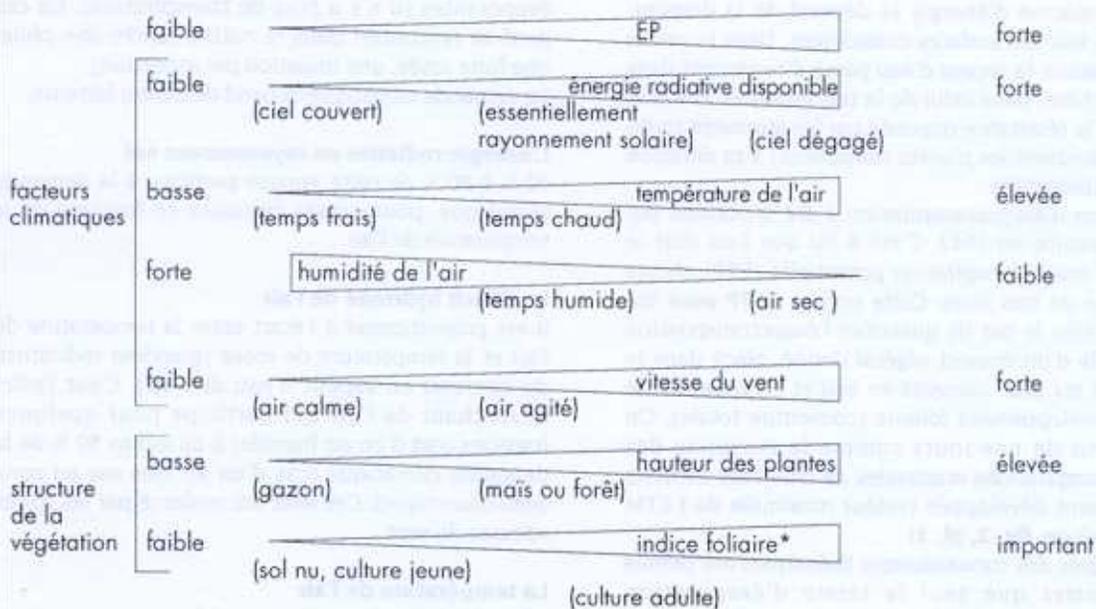
Planche 1

158

1. Évaporation potentielle (EP) d'une végétation

C'est la quantité d'eau qu'une végétation peut céder à l'atmosphère quand toutes ses surfaces sont mouillées (tiges, feuilles, sol) : l'eau s'y évapore librement.

Facteurs de variation de l'EP :

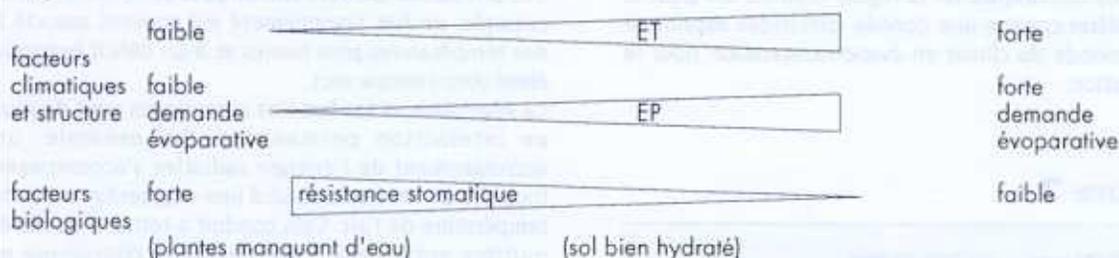


2. Évaporation (ET) d'une végétation

C'est la quantité d'eau que peut céder la végétation à l'atmosphère pendant un intervalle de temps donné, les surfaces (tiges, feuilles, sol) n'étant pas obligatoirement mouillées. Quand la surface des feuilles est sèche, l'eau s'évapore à l'intérieur des feuilles et doit traverser de minuscules orifices (stomates) pour passer dans l'atmosphère.

Facteurs de variation de l'ET :

Ce sont les mêmes que pour l'EP, mais un facteur biologique intervient : la résistance stomatique (fonction du degré d'ouverture des stomates) :



3. Notions associées : ETM, ETM max, ETP

On appelle ETM (évapotranspiration maximale) la valeur de ET correspondant à une résistance stomatique minimale (végétation bien alimentée en eau).

On appelle ETM max la valeur d'ETM correspondant aux facteurs de structure les plus favorables à l'évaporation (hauteur et indice foliaire maximum).

L'ETP (évapotranspiration potentielle), notion utilisée en agronomie, exprime la «demande» du climat en évaporation. Elle correspond à l'ETM max d'une végétation basse, de type gazon. On peut la calculer à l'aide de formules empiriques à partir des seules données climatiques.

* Surface de feuillage par unité de surface de sol.

Définition et facteurs de variation de l'évaporation potentielle et évapotranspiration.

indice foliaire, indice racinaire) et les caractéristiques des stomates de chaque espèce végétale en présence. Ce double effet de la végétation montre que, dans un environnement donné, chaque culture ne pourra - même en cas d'une offre possible maximum - répondre totalement à la demande climatique. Son offre réelle sera toujours plus ou moins limitée (car la résistance stomatique n'est jamais nulle) et prendra une valeur maximum dite évapotranspiration maximale (ETM) qui dépend du stade du couvert. Pour un couvert bien développé et parfaitement couvrant (plein développement de ses surfaces foliaires), cette valeur d'ETM passe par un maximum qui atteint une fraction de la demande climatique de 0,6 EP à 0,9 EP.

C'est cette valeur moyenne maximale des ETM des cultures qu'on nomme approximativement l'évapotranspiration potentielle (calculée par diverses formules : Penman, Brochet-Gerbier, Turc).

L'offre (fig. 3)

Elle comporte à la fois une offre possible (disponibilité de l'eau dans le sol pour la plante) et une offre réelle ou évapotranspiration (ET) qui répond à la demande climatique, mais qui dépend largement de la nature de l'interface sol-atmosphère (nature de la végétation, état hydrique et physiologique conditionnant le degré d'ouverture des stomates). À cette offre sont associées plusieurs notions d'évapotranspiration.

L'évapotranspiration réelle (ET ou ETR)

C'est le cas général dans les conditions naturelles. Les plantes n'ont à leur disposition que les ressources en eau offertes par le milieu du sol sur lequel elles se trouvent. Cette offre du sol pour la végétation peut varier du tout au tout depuis une valeur maximum (sol saturé) jusqu'à une valeur nulle (sol sec).

L'évapotranspiration réelle maximale (ETM ou ETRM)

C'est la valeur maximum des pertes en eau (évaporation et transpiration) d'un couvert végétal quand l'eau au niveau du sol n'est pas un facteur limitant (l'offre possible est maximale). Elle ne peut cependant jamais atteindre l'EP puisque les plantes, même avec leurs stomates largement ouverts, offrent au passage de l'eau une résistance qui n'est jamais nulle.

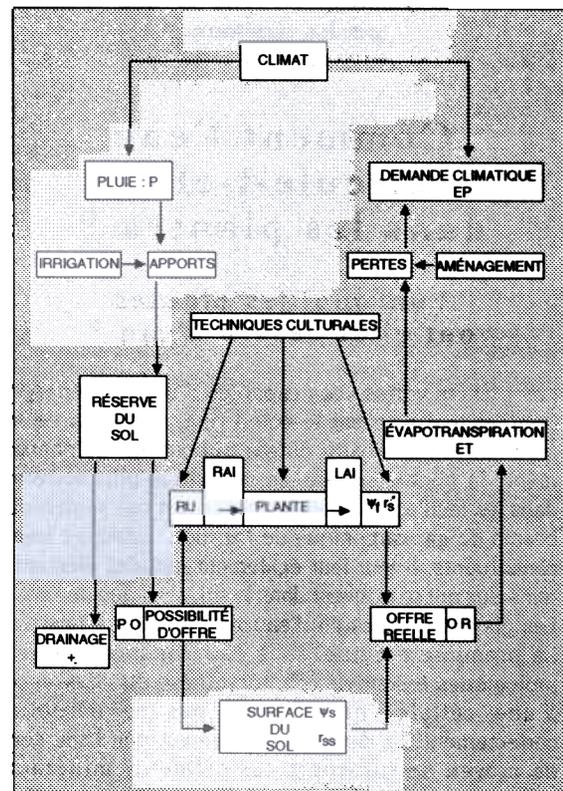
On peut donc écrire :

$$ET < ETM < EP.$$

Remarques. L'offre possible dépend seulement du bilan des apports et des pertes au niveau du réservoir sol. Celui-ci forme le seul système tampon permettant de réguler les disponibilités dont le renouvellement est toujours très aléatoire (pluie et irrigation) face à la constance des pertes ou des offres réelles liées à la demande climatique. Le volume de

ce réservoir est déterminé par le système racinaire (profondeur, densité, répartition, activité), responsable de l'exploitation volumique et du transfert de l'eau vers la surface. L'offre réelle ou évapotranspiration dépend des mécanismes d'ajustement qui se traduisent physiquement par une résistance aux transferts de la vapeur d'eau. Cette résistance est soit de type passif (l'évaporation de l'eau à la surface génère une couche de sol sec appelée mulch, qui oppose une forte résistance à la diffusion de la vapeur d'eau. La résistance du mulch grandit au fur et à mesure que le sol s'assèche en surface), soit de type actif (régulation biologique des stomates au niveau des surfaces évaporantes). Cette analyse a permis de comprendre que l'offre ou l'évapotranspiration (ET) est inférieure à la demande climatique.

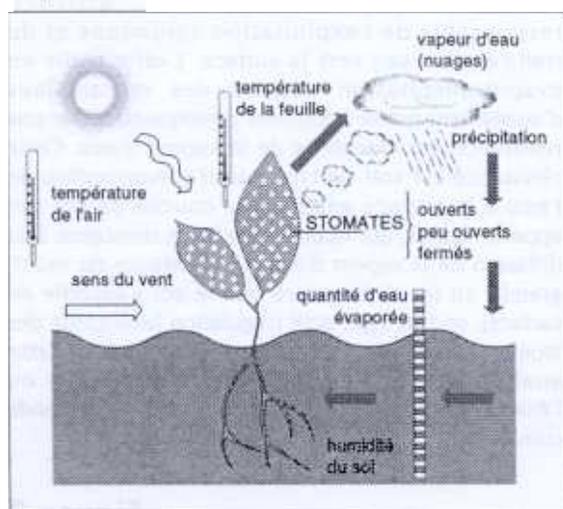
Figure 3



L'offre possible et l'offre réelle.

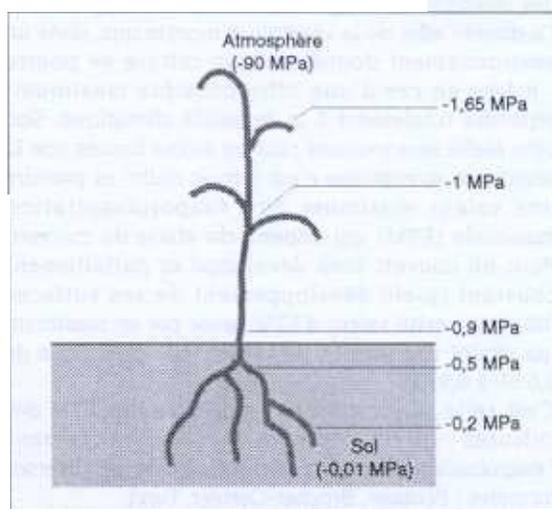
- r_s : résistance stomatique (sous contrôle biologique).
- $r_{s,}$: résistance de la surface du sol à l'évaporation (augmente quand le sol se dessèche en surface : effet de mulch).
- RAI : root aera index (surface des racines par unité de surface de sol).
- LAI : leaf aera index (indice foliaire) : surface de feuilles par unité de surface de sol.
- RU : réserve utile (eau présente dans le volume de sol exploré par les racines).
- ψ_f et ψ_s : disponibilité de l'eau dans les feuilles et le sol (voir « Comment l'eau circule-t-elle dans les plantes ? »).

Figure 4



Alimentation du cycle de l'eau par les végétaux.

Figure 5



Valeurs de potentiel hydrique (en Mégapascal) mesurées sur un plant de blé bien alimenté en eau et transpirant fortement.

Comment l'eau circule-t-elle dans les plantes ?

Pourquoi les plantes ont-elles besoin d'eau ?

Les plantes vertes sont capables d'utiliser l'énergie lumineuse émise par le soleil pour fabriquer de la matière vivante à partir du gaz carbonique. Ce phénomène, la photosynthèse, se déroule le plus souvent dans les feuilles. Mais les plantes n'ont pas seulement besoin du gaz carbonique de l'air pour fabriquer leurs constituants. Il leur faut également certains éléments minéraux qui se trouvent dans le sol, ainsi que de l'eau. Les plantes ont besoin d'eau pour plusieurs raisons. La première est que, sans eau, les mécanismes biologiques essentiels (photosynthèse ou croissance d'une cellule) ne peuvent pas se dérouler correctement. La deuxième raison est que l'eau sert de moyen de transport aux éléments minéraux prélevés dans le sol par les racines, ou aux nouvelles substances fabriquées dans les feuilles vers les autres parties de la plante. Pour que ces transports puissent avoir lieu, il faut que l'eau circule depuis les racines jusqu'aux feuilles. L'eau joue enfin un rôle d'agent de contrôle de la température au niveau des feuilles. En effet, la photosynthèse ne peut utiliser qu'une très faible partie de l'énergie lumineuse captée par la feuille (moins de 2 %). Sans eau, une grande partie de l'énergie captée restante serait transformée en chaleur et les feuilles s'échaufferaient alors de façon dramatique. La transpiration est le mécanisme que les plantes utilisent pour éviter cette « surchauffe ».

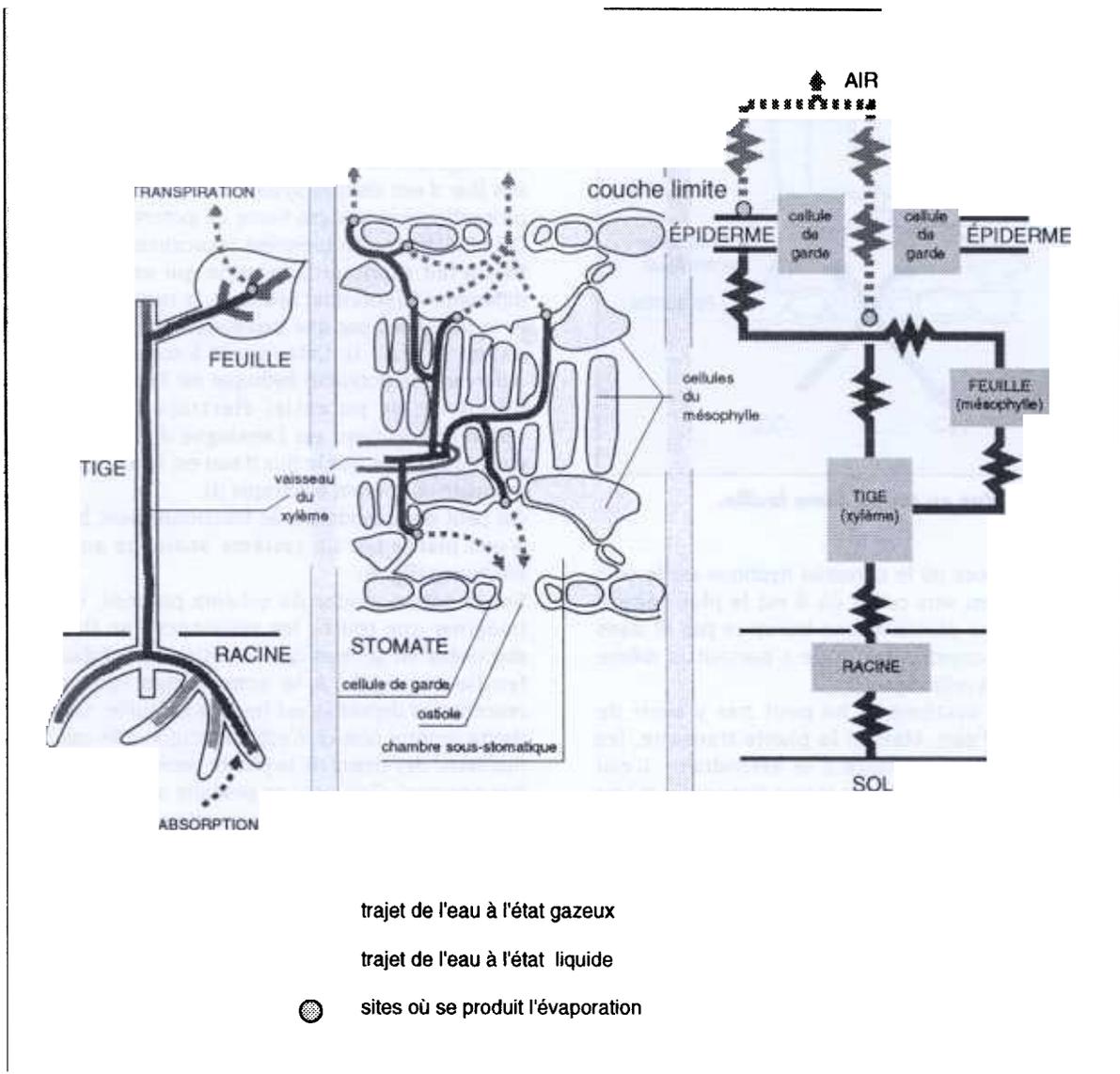
Quand une feuille est bien hydratée, la majeure partie de l'énergie qu'elle capte est utilisée par l'évaporation de l'eau. Ce moyen de lutte contre l'échauffement nécessite des quantités d'eau très importantes. Par exemple, par temps chaud et ensoleillé, un hectare de maïs bien développé et bien irrigué peut consommer près de 70 tonnes d'eau en une seule journée. Puisque cette valeur représente à peu près la totalité de l'eau que les tissus des plantes peuvent contenir, cela signifie qu'en fin de journée, les plantes seraient complètement desséchées si elles n'étaient pas capables de se réalimenter régulièrement à partir des réserves du sol. Ainsi les réserves d'eau que contiennent les plantes sont insuffisantes pour leur permettre d'alimenter leur transpiration pendant plus de quelques heures. Il est indispensable qu'un flux d'eau circule depuis le sol jusqu'aux feuilles, puis, après évaporation, vers l'atmosphère:

Comment l'eau circule-t-elle dans la plante ?

Notion de potentiel hydrique

Quel que soit le milieu dans lequel l'eau se trouve (sol, plantes, atmosphère), elle a tendance à circuler spontanément depuis les endroits où elle est la plus « disponible » vers ceux où elle l'est le moins. Pour exprimer la disponibilité de l'eau en un point donné d'un système, on utilise une grandeur thermodynamique : le potentiel hydrique. Celui-ci indique la disponibilité de l'eau par rapport à sa disponibilité maximale, laquelle sert d'état de référence. Cette référence est représentée par une surface d'eau liquide à la pression atmosphérique. Le potentiel hydrique est le travail (énergie) qu'il faut fournir à un kilogramme d'eau pour que celui-ci passe de l'état lié

Figure 6



Circulation de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère.

À gauche, le continuum sol-plante-atmosphère. Au centre, la coupe schématique d'une feuille (l'eau passe à la fois de cellule en cellule et dans les espaces intercellulaires). À droite, le modèle de circulation de l'eau dans le continuum, fondé sur l'analogie électrique.

dans lequel il se trouve (peu disponible) à l'état libre (surface d'eau libre). Le potentiel de l'eau à l'état de référence est nul. Plus l'eau est retenue dans le milieu (plus sa disponibilité est faible), plus les valeurs de son potentiel sont négatives.

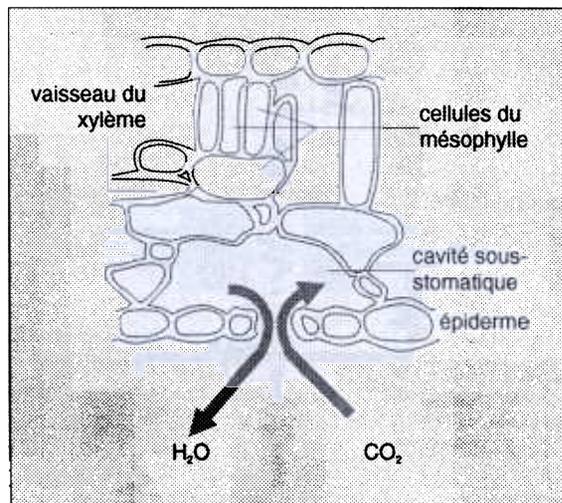
On peut illustrer la notion de potentiel hydrique par un exemple simple. Une éponge possède des propriétés absorbantes qui font que l'eau y est retenue. Le potentiel hydrique de l'eau dans une éponge est le travail qu'il faut fournir (en pressant l'éponge) pour que l'eau passe de son état lié (retenue par l'éponge) à l'état libre (flaque d'eau au fond d'un évier). Si on dispose d'un moyen

permettant de mesurer la pression exercée sur l'éponge et que l'on calcule l'énergie équivalente nécessaire pour extraire un kilo d'eau de l'éponge, on peut en déduire la valeur du potentiel hydrique de l'éponge. Ce potentiel s'exprime donc en joules par kilogramme, ou en unités de pression (en Pascal ou autrefois en Bar).

Circulation de l'eau dans le système sol-plante-atmosphère

L'eau tend à circuler spontanément depuis les endroits où elle est la plus « disponible » vers ceux où elle l'est le moins. Autrement dit, elle circule

Figure 7



Vue en coupe d'une feuille.

depuis les zones où le potentiel hydrique est le plus proche de zéro vers celles où il est le plus négatif. Imaginons une plante qui ne transpire pas et dans laquelle le potentiel hydrique a partout la même valeur, égale à celle du sol.

Dans un tel système, il ne peut pas y avoir de circulation d'eau. Mais si la plante transpire, les feuilles ont alors tendance à se déshydrater. L'eau qu'elles contiennent devient moins disponible et leur potentiel hydrique tend à diminuer (il devient plus négatif). La feuille est en relation avec le reste de la plante par un système de minuscules canalisations appelé xylème. Puisque le potentiel hydrique des feuilles tend à diminuer, un flux d'eau se produira depuis les vaisseaux conducteurs du xylème vers les endroits où se produit l'évaporation. Le xylème perdant de l'eau à son tour, son potentiel hydrique diminuera aussi, ce qui provoquera un flux d'eau depuis les tissus racinaires en direction du xylème.

De même, la diminution du potentiel hydrique racinaire qui en découlera provoquera un flux d'eau depuis le sol en direction de la racine. Sous l'effet de la transpiration, une circulation de l'eau depuis le sol jusqu'aux feuilles se met en place. Si l'eau était totalement disponible dans le sol (potentiel hydrique nul) et si les tissus végétaux n'offraient aucune résistance à la circulation de l'eau, les gradients de potentiel ainsi engendrés seraient très faibles et voisins de zéro. En fait, les tissus végétaux et les constituants du sol offrent tous une résistance plus ou moins importante à cette circulation de l'eau. Ces résistances sont telles et l'évaporation consomme en permanence tellement d'eau que les gradients de potentiel hydrique ne s'annulent jamais. La figure 5 donne un ordre de grandeur des gradients de potentiel hydrique que l'on peut observer sur une plante bien alimentée en eau et transpirant abondamment. Quand il n'y a pas de transpiration, ce

qui est souvent le cas pendant la nuit, quand il n'y a pas de rayonnement solaire et que les orifices par lesquels les plantes transpirent sont fermés (voir paragraphe suivant), les différents tissus se réhydratent progressivement, les gradients s'annulent et les tissus foliaires atteignent des valeurs de potentiel hydrique proches de celle du sol au voisinage des racines.

Les flux d'eau dans le système sont en général quasi proportionnels aux gradients de potentiel hydrique. Cela indique qu'en première approximation, on peut tout à fait exprimer la relation qui existe entre la différence de potentiel hydrique, la résistance au flux et le flux d'eau par une expression analogue à la loi d'Ohm ($U = R \cdot I$). Cela revient à considérer que la différence de potentiel hydrique est l'analogie d'une différence de potentiel électrique (U), que la résistance du tissu est l'analogie d'une résistance électrique (R) et que le flux d'eau est l'analogie d'une intensité de courant électrique (I).

On peut donc modéliser le fonctionnement hydrique d'une plante par un système analogue au circuit électrique (fig. 6).

Sur la partie gauche du schéma proposé, on peut imaginer que toutes les résistances au flux sont disposées en série et que la résistance globale sol-feuille est égale à la somme des résistances rencontrées depuis le sol jusqu'à la feuille. La partie droite montre que ce n'est pas toujours le cas : des flux issus des tissus de la plante peuvent s'ajouter au flux principal. Cela peut se produire aux moments de la journée où la demande évaporative est importante. La transpiration n'est alors plus proportionnelle à l'absorption, puisqu'elle est alimentée en partie par des réserves d'eau stockées dans la plante. On a représenté un réservoir dans la feuille, mais il en existe aussi dans les tiges et les racines. Leur importance est variable selon le type de plante. Pour les plantes cultivées, on estime qu'ils représentent 5 % à 25 % du contenu total en eau de la plante. Il ne faut pas oublier que cette description est extrêmement schématique. Par exemple, le sol n'est représenté que par un réservoir unique dans lequel le potentiel hydrique et la teneur en eau ont partout la même valeur. Cela n'est évidemment pas vrai. Au fur et à mesure que le sol se dessèche en surface, la disponibilité de l'eau dans les zones superficielles diminue. De même, autour des racines, il peut se produire un dessèchement préférentiel du sol, créant ainsi un manchon sec dont la résistance au transfert d'eau sera importante. Cela aura pour effet de réduire le flux d'eau vers la plante, bien que la disponibilité moyenne de l'eau dans le sol soit élevée.

Comment les plantes peuvent-elles réguler leurs pertes d'eau ?

Tant que la disponibilité de l'eau dans le sol est bonne et que l'évaporation n'est pas trop importante, le flux d'eau qui résulte des gradients de potentiel

permet à la fois d'alimenter la transpiration et de réhydrater convenablement les tissus. Si la transpiration devient trop importante par rapport à la réalimentation en eau permise par les résistances et l'état hydrique du sol, par rapport aux réserves de la plante, les feuilles peuvent souffrir d'un manque d'eau pendant la journée.

En fait, les plantes sont capables de contrôler leurs pertes d'eau en modulant le degré d'ouverture des pores par lesquels la vapeur d'eau sort des feuilles.

La régulation stomatique (fig. 8)

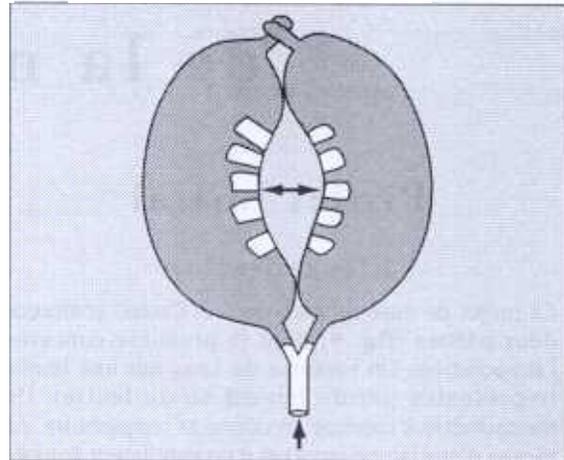
L'évaporation a lieu à l'intérieur des feuilles, au niveau des parois de cellules qui tapissent des cavités appelées chambres sous-stomatiques. Ces cavités s'ouvrent vers l'extérieur par de petits orifices, les stomates. Le degré d'ouverture d'un stomate est contrôlé par l'état hydrique et physiologique des deux cellules qui l'entourent, les cellules de garde. Plus les cellules de garde sont hydratées, plus l'ouverture du stomate est grande. En revanche, plus les cellules de garde se déshydratent, plus l'ouverture du stomate est réduite.

En fonction de ce degré d'ouverture du stomate, la résistance à l'évaporation sera tantôt importante (stomate fermé), tantôt faible (stomate ouvert).

Les plantes sont ainsi capables de réguler l'intensité de leur transpiration en contrôlant l'état hydrique des cellules de garde et donc, le degré d'ouverture de leurs stomates.

De nombreux facteurs du milieu contrôlent le degré d'ouverture des stomates. La lumière joue un rôle important puisque les stomates de la plupart des plantes se ferment à l'obscurité. Cela a pour effet d'empêcher la transpiration (qui ne serait pas très importante puisque les feuilles ne reçoivent pas de rayonnement solaire pendant la nuit). Les feuilles perdant alors très peu de vapeur d'eau, l'ensemble des potentiels hydriques de la plante se rééquilibre avec celui du sol. Quand l'humidité de l'air est faible, les stomates tendent également à se fermer. Cette réaction est utile car une faible humidité de l'air correspond souvent à une forte demande évaporative de l'atmosphère, pouvant conduire à une trop forte déshydratation des feuilles. Des mécanismes biologiques sont capables de réguler l'ouverture stomatique. L'état hydrique de la feuille joue un rôle important. On sait depuis peu de temps que les racines sont capables, par un mécanisme qui reste à découvrir, de « mesurer » une déshydratation du volume du sol dans lequel elles se trouvent. Elles émettent alors une substance, l'acide abscissique, qui est véhiculé dans le xylème par le flux d'eau circulant

Figure 8



Stomate.

Son fonctionnement peut être modélisé de façon simpliste à l'aide de deux ballons gonflables symbolisant les cellules de garde encadrant l'ostiole. Au niveau de l'ostiole, les parois des cellules de garde sont plus rigides que sur les autres faces. On peut créer une plus grande rigidité de la paroi des ballons en y collant des bandes de sparadrap. On représente alors la réhydratation des cellules de garde en faisant entrer de l'eau (ou de l'air) dans les ballons. Leur turgescence s'accroît et l'ostiole s'élargit. Inversement, quand l'état hydrique de la feuille devient moins favorable, les cellules de garde perdent de l'eau et le stomate se referme, limitant la déshydratation du végétal.

en direction des feuilles. Cet acide abscissique provoque alors une fermeture stomatique, même si l'état hydrique des feuilles n'est pas encore critique. Par ce mécanisme, les plantes sont capables de gérer les stocks d'eau des différentes zones du sol qu'elles peuvent utiliser. Une fermeture stomatique pendant la journée a deux conséquences principales. La première est un échauffement des feuilles dont nous avons déjà parlé. La seconde concerne la photosynthèse. En effet, la photosynthèse ne peut se faire que si le gaz carbonique de l'air (CO_2) peut diffuser depuis l'extérieur vers l'intérieur de la feuille. Or, le CO_2 entre dans les feuilles en passant par les stomates. Quand les stomates sont fermés, il entre moins de CO_2 dans la feuille et la photosynthèse est réduite. C'est pourquoi une plante qui manque d'eau et qui réduit son ouverture stomatique pendant la journée fabriquera moins de matière vivante qu'une plante bien arrosée.

2. Description de la manipulation

Projet initial

L'évaporation

Ce projet de manipulation de J. F. Castell comprend deux parties (fig. 9) dont la première concerne l'évaporation. On vaporise de l'eau sur une feuille (représentée par du buvard ou du feutre). Un thermomètre à mercure en donne la température. Au moyen d'une lampe (spot) et d'un ventilateur équipés de variateurs, on peut faire varier indépendamment le rayonnement reçu par la surface de la « feuille » et la vitesse du vent à laquelle elle est exposée. Cela doit permettre d'acquies des éléments de réponse aux questions suivantes.

- Quelles sont les conditions (rayonnement et vent) qui font sécher la « feuille » plus vite ?
- Comment évolue la température de la « feuille » au cours de la manipulation ?

La régulation biologique de la transpiration

C'est la deuxième partie de la manipulation. On dispose de trois autres « feuilles » identiques à la première mais constamment mouillées (alimentées par de petits réservoirs). Sur chacune d'elles, on a collé un film plastique. L'un est intact (pas d'évaporation possible), l'autre est percé de petits trous (simulant une forte résistance stomatique), le dernier de gros trous. On soumet ces différentes

« feuilles » à diverses conditions d'éclairage et de vent. Les questions posées sont les suivantes.

- Ces trois « feuilles », placées dans des conditions identiques, ont-elles la même température ?
- Comment les plantes contrôlent-elles leur température ?
- Pourquoi les plantes ont-elles besoin d'eau ?
- Une masse d'air passant au-dessus d'une végétation bien alimentée en eau (stomates ouverts) devient-elle plus chaude ou plus froide ? Plus humide ou plus sèche ?

L'ensemble peut être entouré d'une enceinte transparente, percée de trous pour éviter les problèmes de condensation et la surchauffe des appareils. Les cloisons opaques séparant les feuilles permettent de passer d'une feuille à l'autre sans perturber les autres. L'ensemble spot-ventilateur se déplace sur un rail et les variateurs sont disposés sur la table, devant l'enceinte. La distance spot-feuille peut être de 60 cm.

Remarque. La réalisation d'une feuille peut être faite simplement en assemblant deux feuilles de papier buvard entre lesquelles on a glissé un thermomètre. Le papier buvard vert est intéressant, car la différence de couleur entre une feuille sèche et une feuille mouillée est très visible. Il est également possible de réaliser des feuilles en feutre épais (de 5 mm à 1 cm). Le thermomètre est alors glissé à l'intérieur d'un trou pratiqué dans la tranche de la feuille de feutre. Le réservoir est un simple bac d'eau qui alimente la feuille par capillarité.

Figure 9

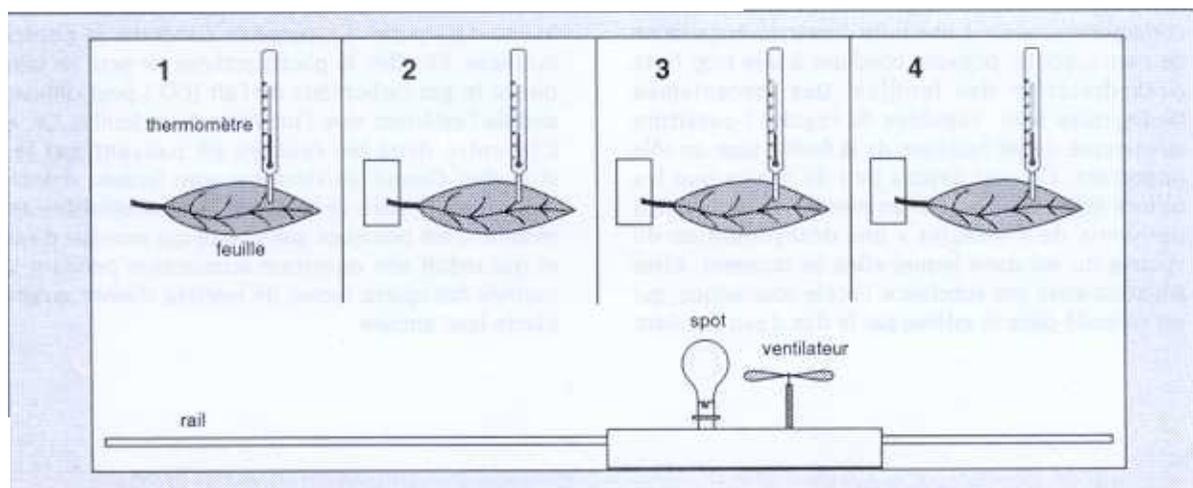


Schéma général

Manipulation définitive

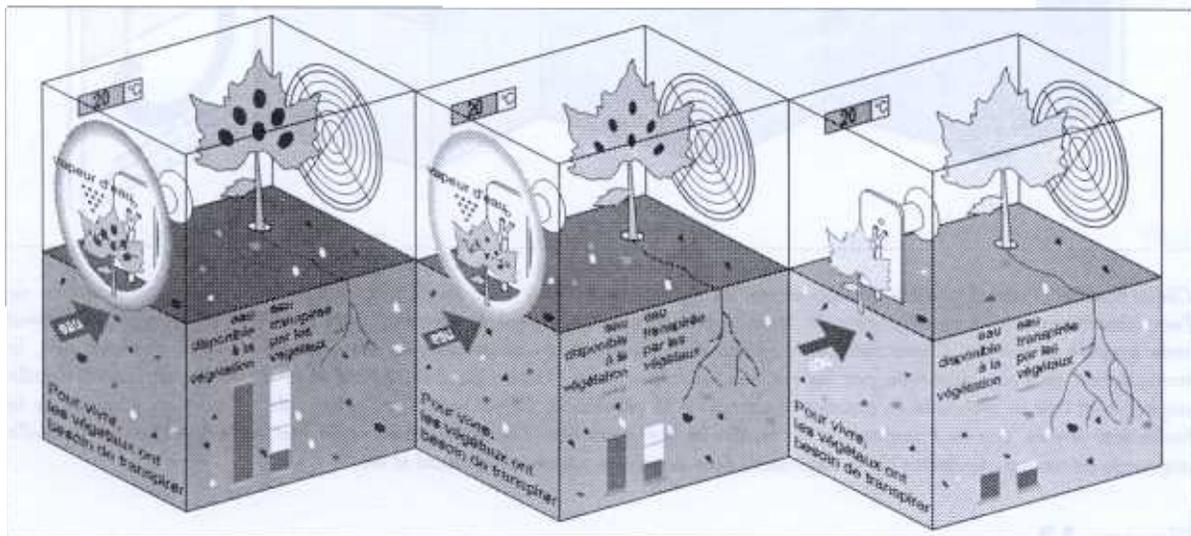
Cette version propose une approche globale de l'interaction sol-végétaux-atmosphère. Le parti pris de la simulation présente l'avantage d'une réalisation simple, économique et fiable. Conformément au nouvel objectif d'élargissement du message, la simulation offre au visiteur une prise en main et une lecture simple, rapide, synthétique. La manipulation simule le comportement d'un même végétal, symbolisé par une feuille placée dans trois environnements climatiques : humide, semi-aride et sec. Trois boîtes transparentes évoquent la mise en situation expérimentale de la feuille sur un terrain en coupe.

- Les trois types de climat sont différenciés par un ciel plus ou moins nuageux, la nature du sol, la densité de la végétation et la couleur de la terre (humidité).
- Les paramètres permettant de comparer le comportement du végétal sont l'aspect et la couleur de la feuille, sa température, le degré d'ouverture des stomates, le développement du

réseau racinaire et la consommation d'eau transpirée.
 - L'interaction sol-végétal-atmosphère dépend de trois facteurs : le vent généré par un ventilateur, l'ensoleillement matérialisé par une lampe orientée vers la feuille, l'humidité du sol indiquée par un niveau d'eau. Au repos, la température des trois feuilles est identique (20 °C).

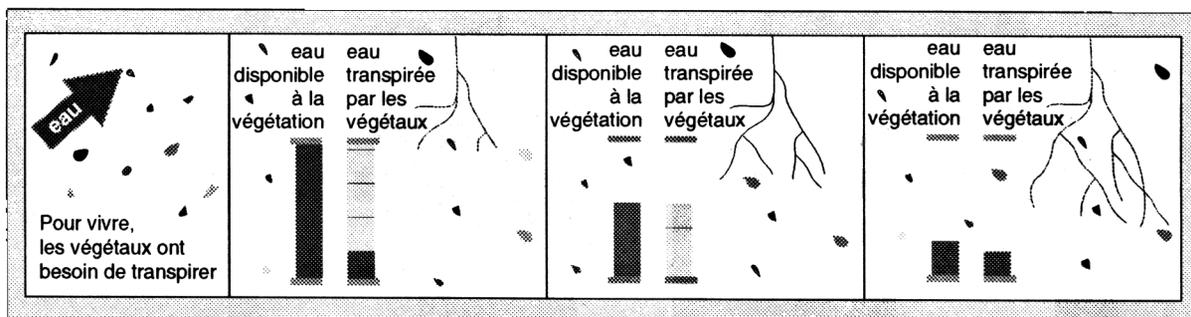
Lorsque le visiteur appuie sur chacun des boutons faisant face aux trois contextes, la feuille correspondante est illuminée. La température augmentée s'affiche, les deux niveaux « eau disponible » et « eau consommée » sont éclairés, de même que le réseau racinaire du végétal. Toutes ces informations sont concentrées dans le « milieu expérimental » de chaque boîte. Les trois ventilateurs tournent en permanence et génèrent un léger frémissement des feuilles susceptible d'attirer l'attention du visiteur. Les températures des feuilles (au repos et en cours de manipulation) sont fictives : il n'y a pas de capteurs reliant les feuilles aux thermomètres. Ces derniers sont pré-réglés électroniquement, grâce à des résistances.

Figure 10



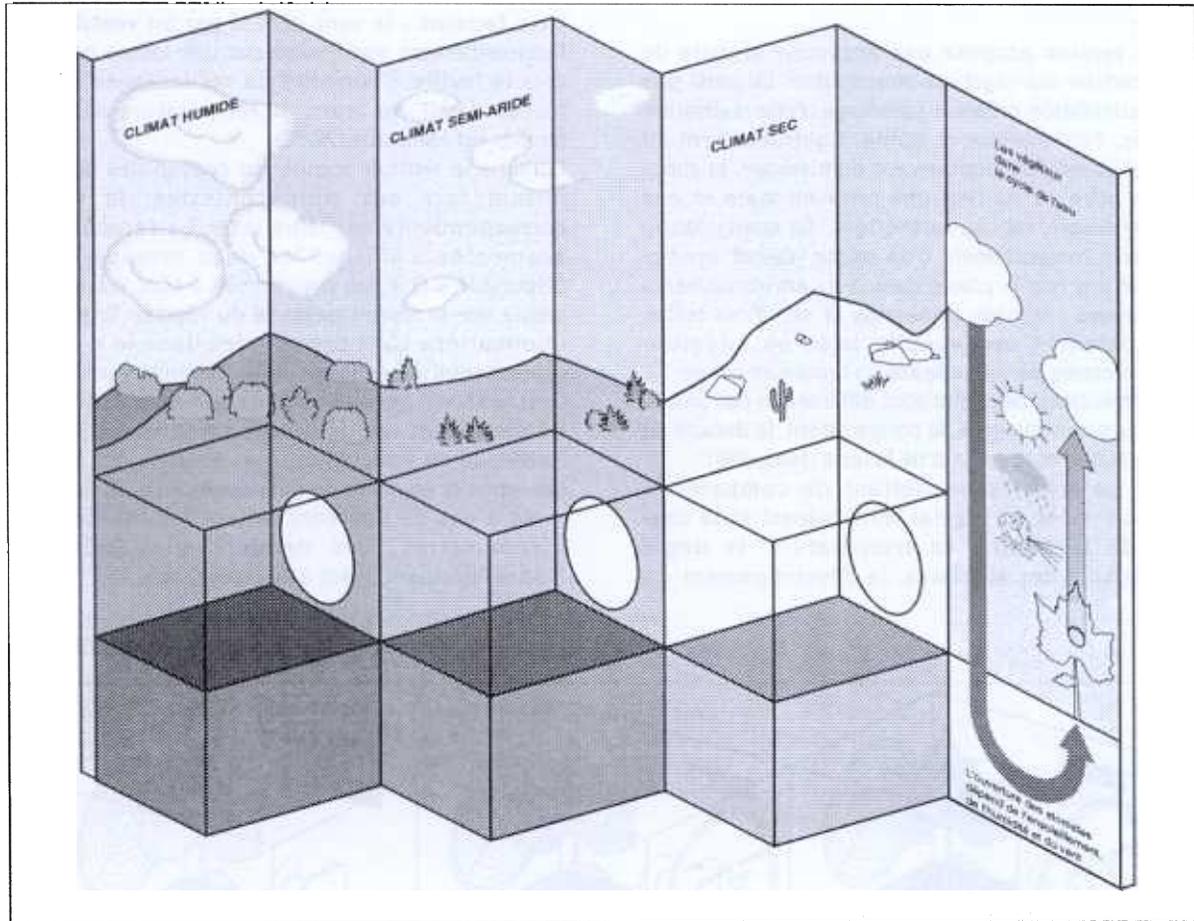
Finition des boîtiers correspondant à chaque climat : humide, semi-aride et sec.

Figure 11



Détail des racines.

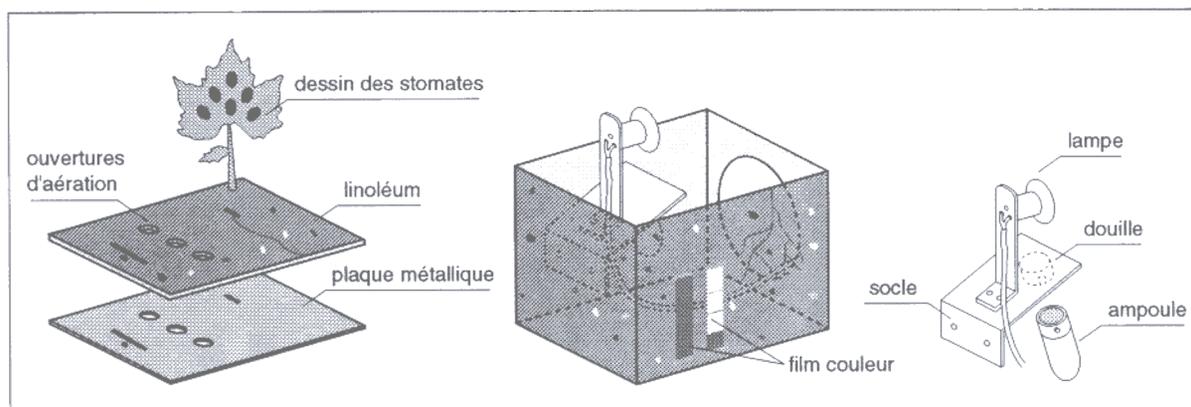
Figure 12



Le décor.

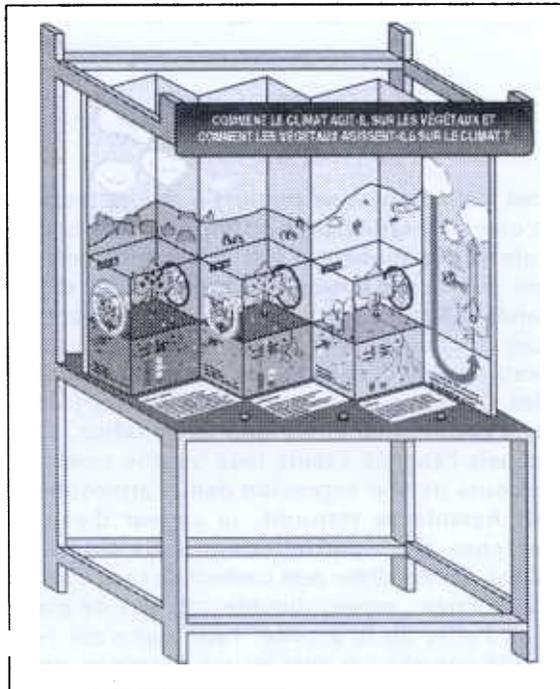
Climat humide : l'eau disponible est abondante, les stomates (ou pores) de la feuille s'ouvrent au maximum, la transpiration de l'eau absorbée par les racines est grande. Sous l'action du soleil et du vent, la température de la feuille augmente peu. Le climat reste tempéré et humide. Climat semi-aride : l'eau disponible est peu abondante, les stomates de la feuille s'ouvrent peu, la transpiration de l'eau absorbée par les racines est faible. Sous l'action du soleil et du vent, la température de la feuille augmente et l'air se réchauffe en passant au-dessus de la végétation. Climat sec : l'eau disponible est rare, les stomates de la feuille sont fermés, pas de transpiration, les feuilles se flétrissent. Sous l'action du soleil et du vent, la température de la feuille augmente beaucoup. Au-dessus de la végétation, l'air devient de plus en plus chaud et sec.

Figure 13



Éléments du boîtier.

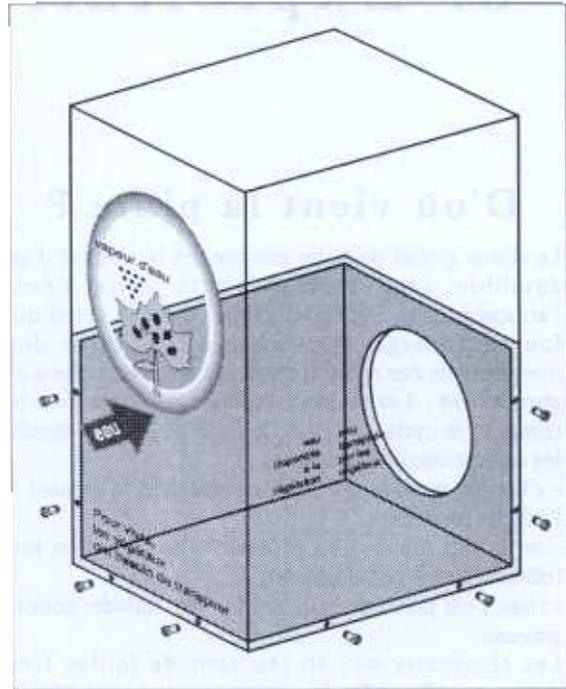
Figure 14



Maquette définitive.

Un climat humide entraîne une disponibilité d'eau dans le sol et favorise la transpiration des plantes (ouverture des stomates), assurant ainsi l'alimentation du cycle de l'eau et provoquant une diminution de la température de la feuille.

Figure 15



Montage du boîtier.

Figure 16

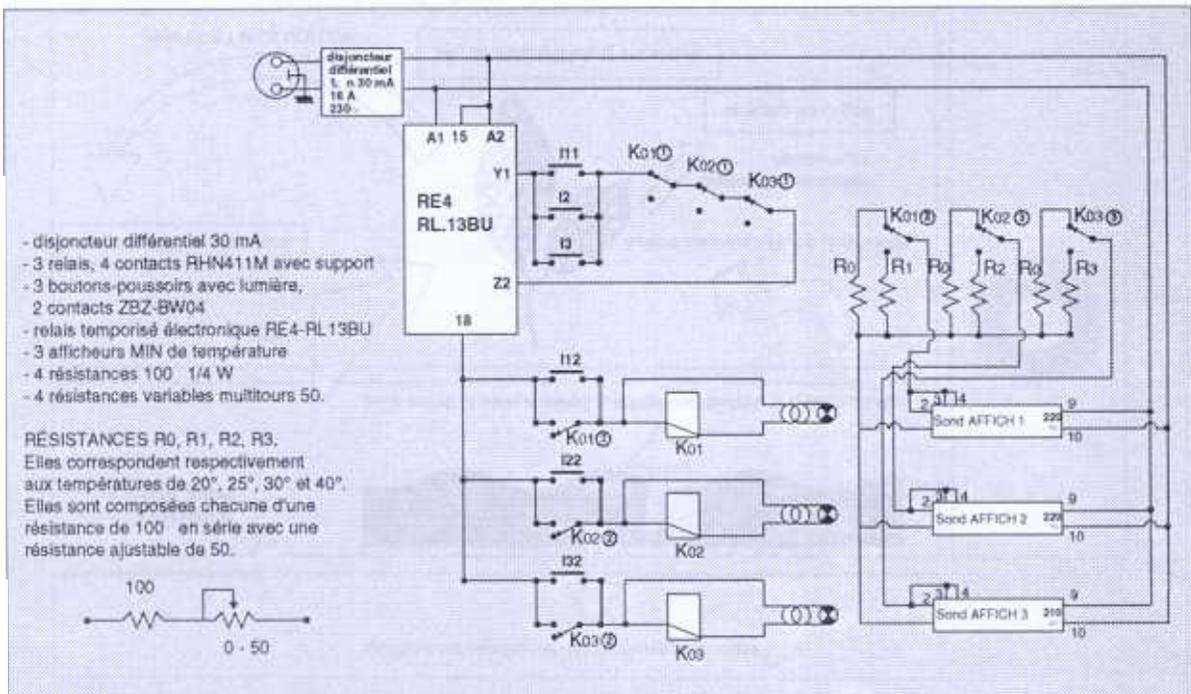


Schéma électrique.

3. Exploitation pédagogique

D'où vient la pluie ?

Le climat global de notre planète est le résultat d'un équilibre sans cesse réajusté entre l'eau, l'atmosphère et l'énergie solaire. C'est le soleil qui fournit l'énergie nécessaire à l'entretien des mouvements des masses d'eau entre terres, océans et atmosphère : il existe donc un lien très étroit entre le climat et le cycle de l'eau. Le cycle de l'eau présente les caractéristiques suivantes :

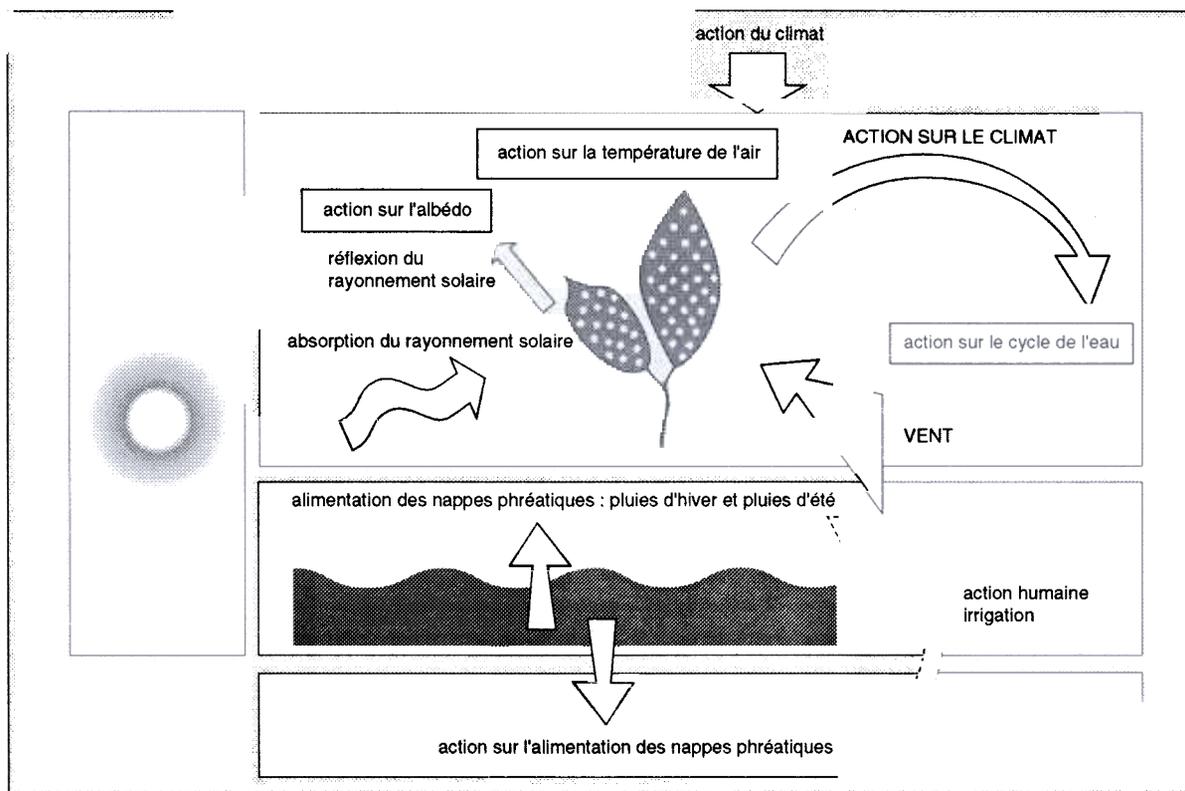
- c'est un cycle fermé (conservation de la masse) à l'échelle planétaire ;
- un grand nombre de réservoirs sont mis en jeu (océans, atmosphère, glacier) ;
- l'eau y est présente sous ses formes liquide, solide, gazeuse.

Les réservoirs mis en jeu sont de tailles très différentes (**fig. 18**) : les océans contiennent 97,6 % de l'eau, les continents (glaciers, lacs, rivières, sols...) 2,4 % et l'atmosphère 0,001 %.

Ainsi, l'atmosphère ne contient à chaque moment qu'une très faible proportion de l'eau disponible sur la planète. C'est pourtant à ce tout petit volume que l'on doit les précipitations et leur grande influence sur le climat. L'atmosphère est donc continuellement approvisionnée en vapeur d'eau par les océans et les surfaces continentales. Cet approvisionnement se fait par les processus d'évaporation et d'évapotranspiration, dans lesquels l'énergie solaire joue un rôle essentiel. Au cours de son ascension dans l'atmosphère, l'air humide se refroidit, la vapeur d'eau se condense alors partiellement sous forme de nuages. L'atmosphère peut contenir de l'eau sous les trois formes : vapeur, liquide, cristaux de glace. Sous l'effet de la gravité, l'eau qui s'est condensée retombe : ce sont les précipitations. Après avoir atteint la surface du sol, cette eau peut :

- soit s'évaporer directement et repartir dans le cycle évaporation-précipitation,

Figure 17



Relations de la manip avec les autres thèmes.

Figure 18

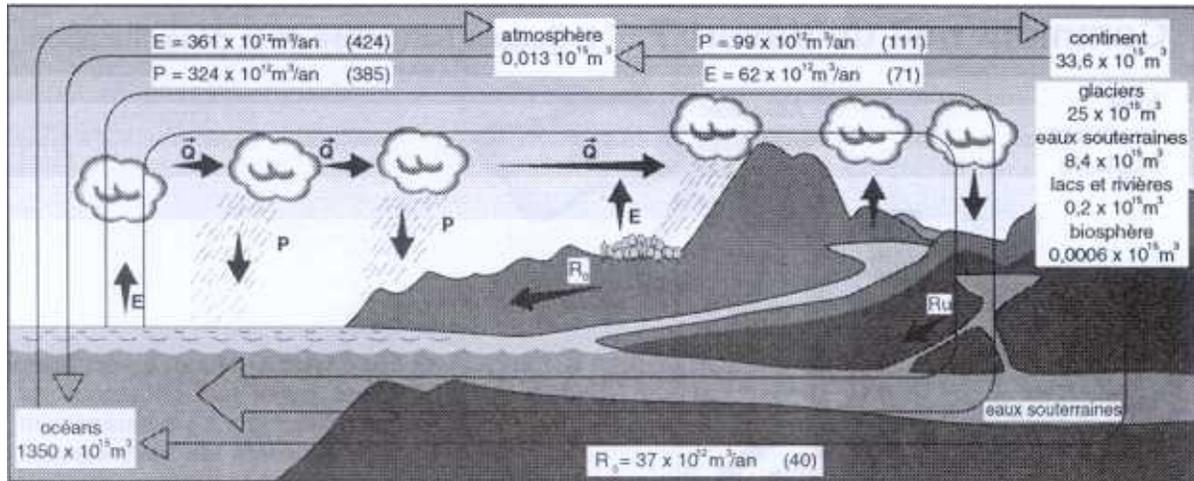


Schéma du cycle de l'eau.

Source : d'après *La Recherche*, n° spécial «Eau».

- soit s'infiltrer dans les sols et regagner l'atmosphère par les processus d'évapotranspiration,
- soit ruisseler ou s'infiltrer dans les nappes phréatiques pour former les cours d'eau. Ceux-ci ramènent l'eau vers les océans, point de départ d'un nouveau cycle.

Ces différents flux ne concernent finalement qu'une très faible fraction du stock d'eau de la planète. En fonction de la taille du réservoir, on peut estimer des temps de séjour moyen de l'eau à partir des valeurs de la figure 18.

- Temps de séjour dans l'atmosphère = taille du réservoir/flux d'entrée ou de sortie = $0,013 \times 10^{15} \text{ m}^3 / (324 \times 10^{12} + 99 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ an}) = 0,03 \text{ ans} = 10 \text{ jours}$.

- Temps de séjour dans les océans = $1350 \times 10^{15} \text{ m}^3 / 361 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ an} = 3800 \text{ ans}$.

- Temps de séjour dans les continents = $33,6 \times 10^{15} \text{ m}^3 / 99 \times 10^{12} \text{ m}^3 \text{ an} = 340 \text{ ans}$.

Quel que soit le temps de séjour, le cycle de l'eau est dominé par le réservoir principal : l'océan. C'est de ce réservoir que toute l'eau vient et, d'une façon ou d'une autre, c'est à ce réservoir qu'elle retourne.

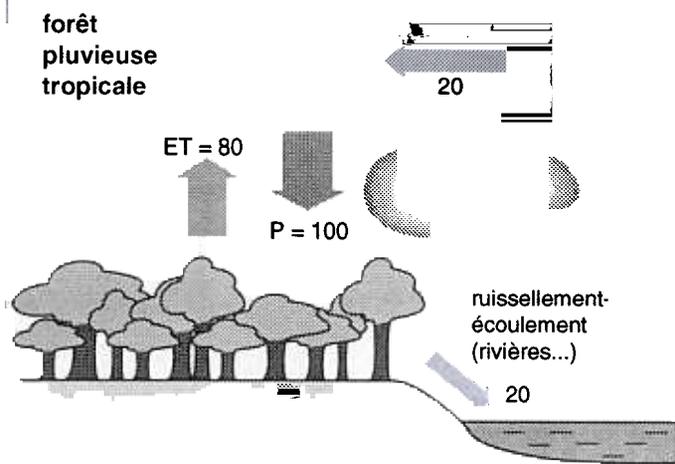
Remarque. Les trois planches qui suivent concernent les processus de désertification. Elles illustrent l'origine naturelle d'un désert, le rôle de l'homme dans la déforestation par jachère et surpâturage.

Planche 2

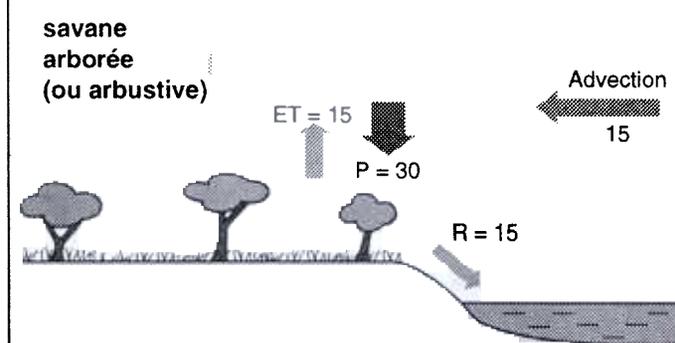
170

Comment naît un désert ?

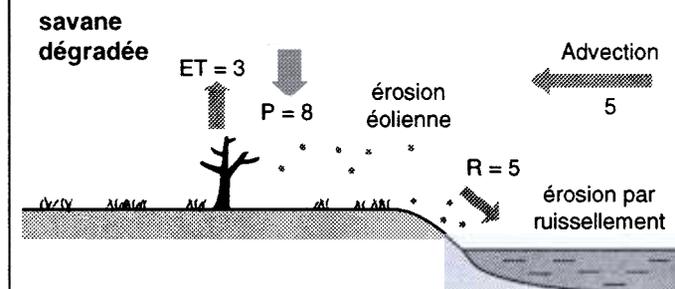
1. Causes naturelles de la désertification



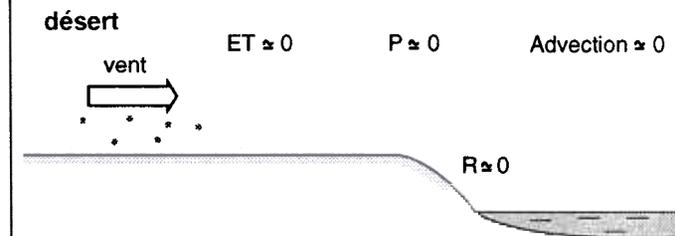
Sol protégé du rayonnement et du vent par la végétation.



Sol protégé du rayonnement et du vent par la végétation.



Végétation sèche ou absente pendant une période de l'année : importante érosion du sol sous l'action du vent et des premières pluies.



a) Forêt dense : forte évaporation. 80 % des pluies sont alimentées par l'évapotranspiration. L'ennuagement limite la quantité de rayonnement solaire arrivant à la surface.

b) Modification du climat global (causes astronomiques ou autres - effet de serre) : réduction de l'advection, augmentation du rayonnement solaire reçu par la végétation (moins de pluies, demande évaporative accrue). La forêt est remplacée par une végétation plus résistante à la sécheresse, mais transpirant moins et supportant des températures élevées. 50 % des pluies sont alimentées par l'évapotranspiration.

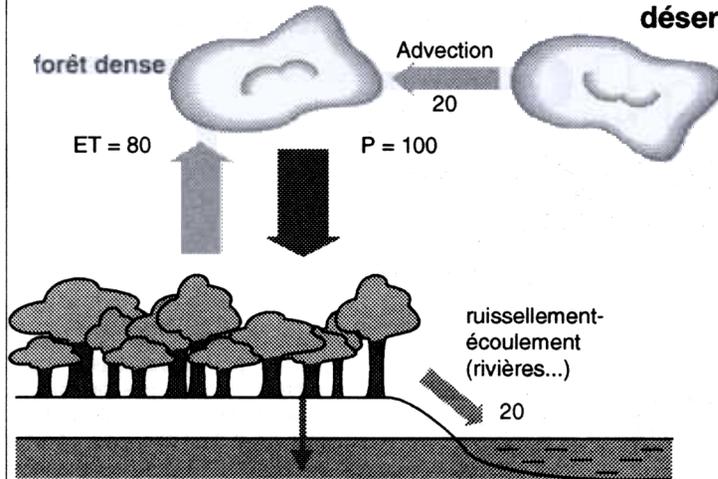
c) La réduction de l'advection et l'augmentation du rayonnement solaire s'amplifient. La végétation devient quasi uniquement herbacée. Pendant les mois les plus chauds et secs, le sol reçoit directement le rayonnement solaire et s'échauffe fortement. L'ET n'alimente plus que 35 % des pluies.

d) Même les espèces les plus résistantes à la sécheresse et aux fortes températures ne peuvent plus se développer. Une forte érosion décape le sol qui est remplacé par une couche de sable (dunes) apportée par le vent.

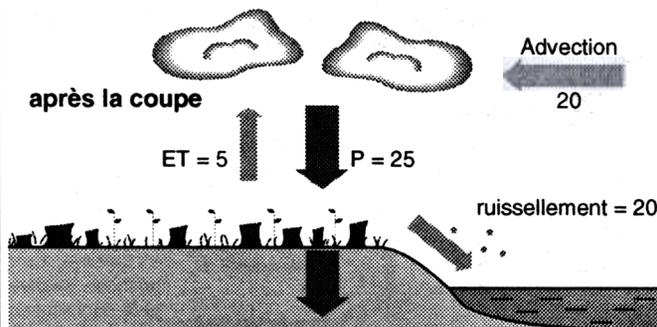
Les processus de désertification (1).

Comment naît un désert ?

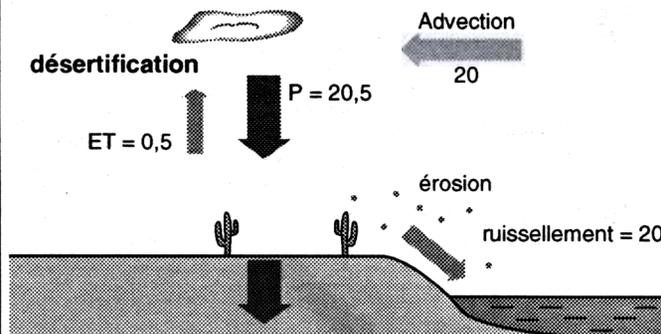
2. Rôle de l'homme dans le processus de désertification : la déforestation



Sol protégé. Peu ou pas d'érosion, peu d'infiltration dans les nappes.



Sol exposé au rayonnement : fortes températures ; sol directement exposé aux pluies : érosion importante (surtout sur sols en pente), appauvrissement par lessivage des éléments minéraux (infiltration dans les nappes).



Infiltration de l'eau dans les nappes, lessivage. S'il n'y a pas de coupe rase, si le sol est suffisamment profond et fertile et si la lutte contre l'érosion est efficace, une régénération (après plantation) nécessitera 400 ans pour une forêt identique ou 100 ans pour une forêt secondaire.

a) Forêt dense : l'évapotranspiration de la forêt dense provient :
 - de la transpiration des arbres ;
 - de l'eau interceptée par le feuillage.
 Peu de pertes d'eau en direction des nappes phréatiques, peu de ruissellement.

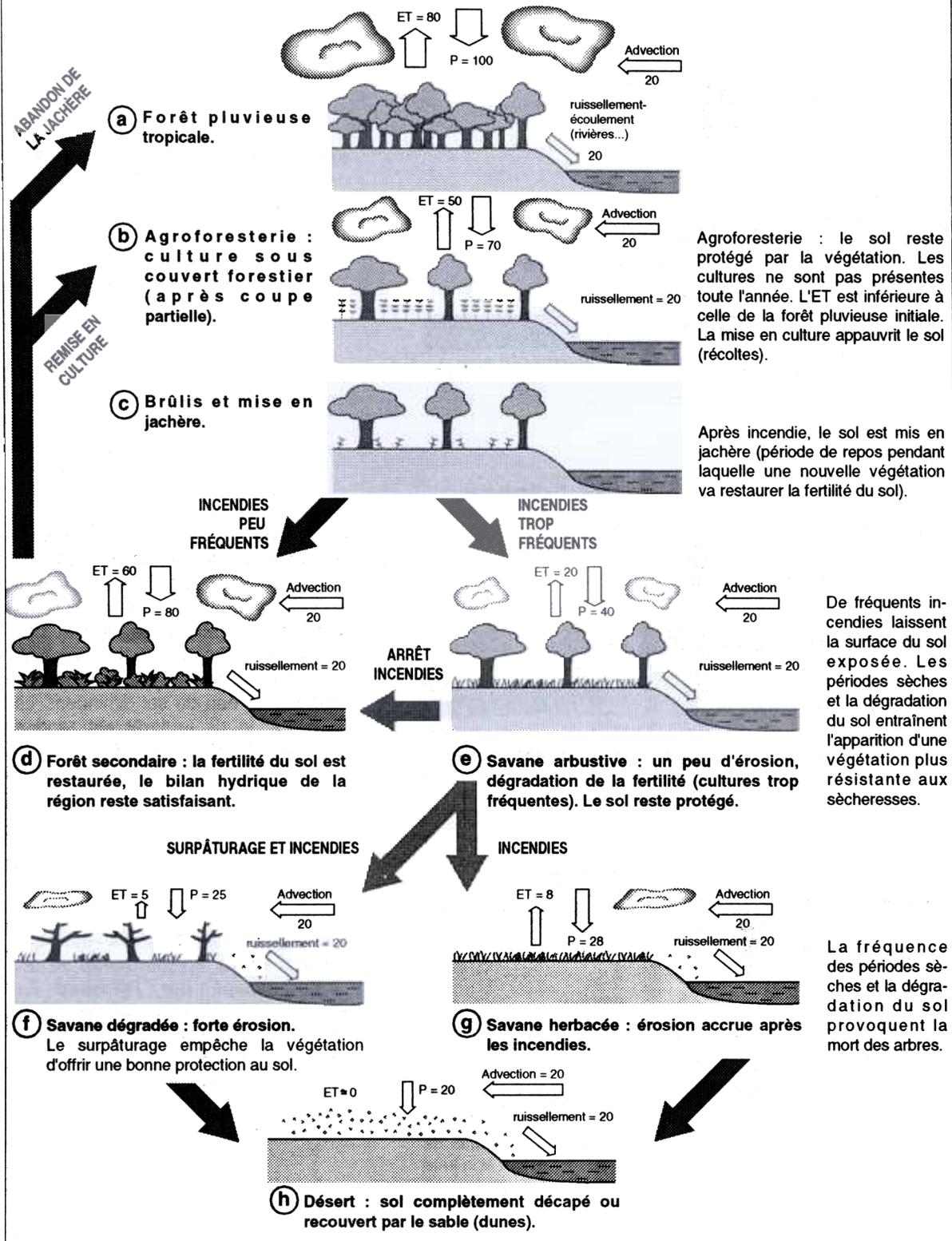
b) Après une coupe, l'évapotranspiration provient uniquement du sol. La réduction de l'ET conduit à une diminution de l'ennuage et la demande climatique augmente. Les fortes températures et l'érosion réduisent la fertilité du sol et les réserves en eau du sol diminuent. La régénération de la forêt est rendue impossible par la sécheresse.

c) Le sol est complètement «stérilisé» par les fortes températures et en partie décapé par l'érosion. La sécheresse rend toute reprise de la végétation impossible. L'absence de végétation accroît le ruissellement et l'érosion. Les risques d'inondations sont accrus.

Les processus de désertification (2).

Planche 4

Comment naît un désert ? 3. Rôle de l'homme dans le processus de désertification : jachère et surpâturage



Les processus de désertification (3).