



L'ARROSAGE D'UN TERRAIN EN ZONE MEDITERRANEENNE

Dominique Ilharramounho

Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillard.

Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol :

- ▶ une part est évaporée directement pendant et après la pluie; les gouttes peuvent être interceptées en partie par le feuillage.
- ▶ L'autre part, arrive sur le sol et ruisselle, s'infiltré et ré-humecte le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration. Une fraction réduite finalement gagne la profondeur et atteint la nappe. Un profil habituel de la quantité d'eau contenu dans une coupe du sol et du sous-sol montre une augmentation de la teneur en eau avec la profondeur.

Dans les conditions actuelles de mise en place et de gestion des surfaces engazonnées, pour pouvoir maintenir ces installations, nous sommes pratiquement obligés de faire des apports d'eau pour compenser les besoins des plantes. Ceux-ci sont induits par les caractéristiques physiologiques des espèces et variétés, mais aussi par l'utilisation des terrains.

D'après le « petit Larousse » **l'irrigation** est un apport d'eau sur un terrain cultivé ou une prairie en vue de compenser l'insuffisance de précipitations et de permettre le plein développement des plantes.

Cette opération va donc dépendre :

- ▶ du sol
- ▶ de la plante
- ▶ des conditions climatologiques.

C'est la connaissance de ces trois facteurs, qui va permettre une bonne gestion des apports d'eau pour maintenir la surface engazonnée dans un schéma de développement durable.

1. LES CONDITIONS CLIMATOLOGIQUES :

Une zone climatique est caractérisée par :

- ▶ les températures moyennes,
- ▶ la durée moyenne de l'ensoleillement,
- ▶ le nombre moyen de jours de pluie,
- ▶ la pluviométrie,



- ▶ la force et la direction moyenne des vents au sol
- ▶ le nombre total de jours de grands froids.

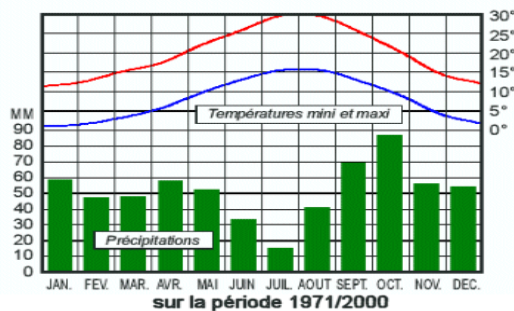
La zone méditerranéenne est caractérisée par :

- ▶ Des températures moyennes au dessus de 14°C.
- ▶ Plus de 2 500 heures d'ensoleillement.
- ▶ Moins de 80 jours de pluie.
- ▶ Moins de 25 jours de brouillard.
- ▶ Beaucoup de jours de vent et de vents forts.
- ▶ Peu de jours de grands froids.

LE CLIMAT DES BOUCHES-DU-RHÔNE



Normales de températures et de précipitations à Aix-en-Provence



Quelques records depuis 1961 à Aix-en-Provence

Température la plus basse	-17,4 °C
Jour le plus froid	01/02/1963
Année la plus froide	1969
Température la plus élevée	40,2 °C
Jour le plus chaud	26/07/1983
Année la plus chaude	1997
Hauteur maximale de pluie en 24h	222 mm
Jour le plus pluvieux	22/09/1993
Année la plus sèche	1967
Année la plus pluvieuse	1972

fermer

Ces conditions, si elles sont favorables au niveau des températures, sont difficiles et contraignantes à cause des autres paramètres et sont caractérisées naturellement par des arrêts végétatifs forts en hiver et en été.

2. LA PLANTE

Les exigences en eau varient selon les plantes. Dans la nature, les espèces hydrophiles demandent de l'eau facile à absorber ; il faut donc que la réserve utile soit réapprovisionnée par ascension capillaire à partir d'une nappe (cas du peuplier, de l'aulne...). Les espèces xérophiles sont adaptées à la sécheresse, elles peuvent extraire l'eau pour des tensions de succion voisines du point de flétrissement (pin sylvestre, plantes herbacées des pelouses sèches). Les plantes mésophiles ont un comportement intermédiaire.

3. LE SOL

3.1 - Définitions :

On trouve dans la littérature, selon les disciplines et les intérêts, plusieurs définitions du sol :



Pour A. Demolon :

"Le sol est une formation naturelle de surface, à structure meuble, d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la Roche Mère sous-jacente, sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques."

Pour P. Pesson (1971) :

"Le sol, où toute vie terrestre puise une large part de ses besoins et auquel finalement elle restitue le produit de ses biosynthèses, constitue la plus extraordinaire usine de transformation où se recyclent sans cesse les éléments entre le monde organique et le monde minéral."

En résumé : le sol est un milieu très compliqué, très complexe, qui ne peut être étudié ni de façon locale, ni par une branche scientifique (chimie minérale ou chimie organique, abiotique, Physico-chimique ou biologique, statique ou dynamique,...). C'est un milieu propice à une analyse pluridisciplinaire.

3.2 - Les constituants

Généralement, avant de voir le fonctionnement d'un système, on essaie de déterminer ses composants. C'est une première approche qui va nous permettre de décortiquer physiquement le sol.

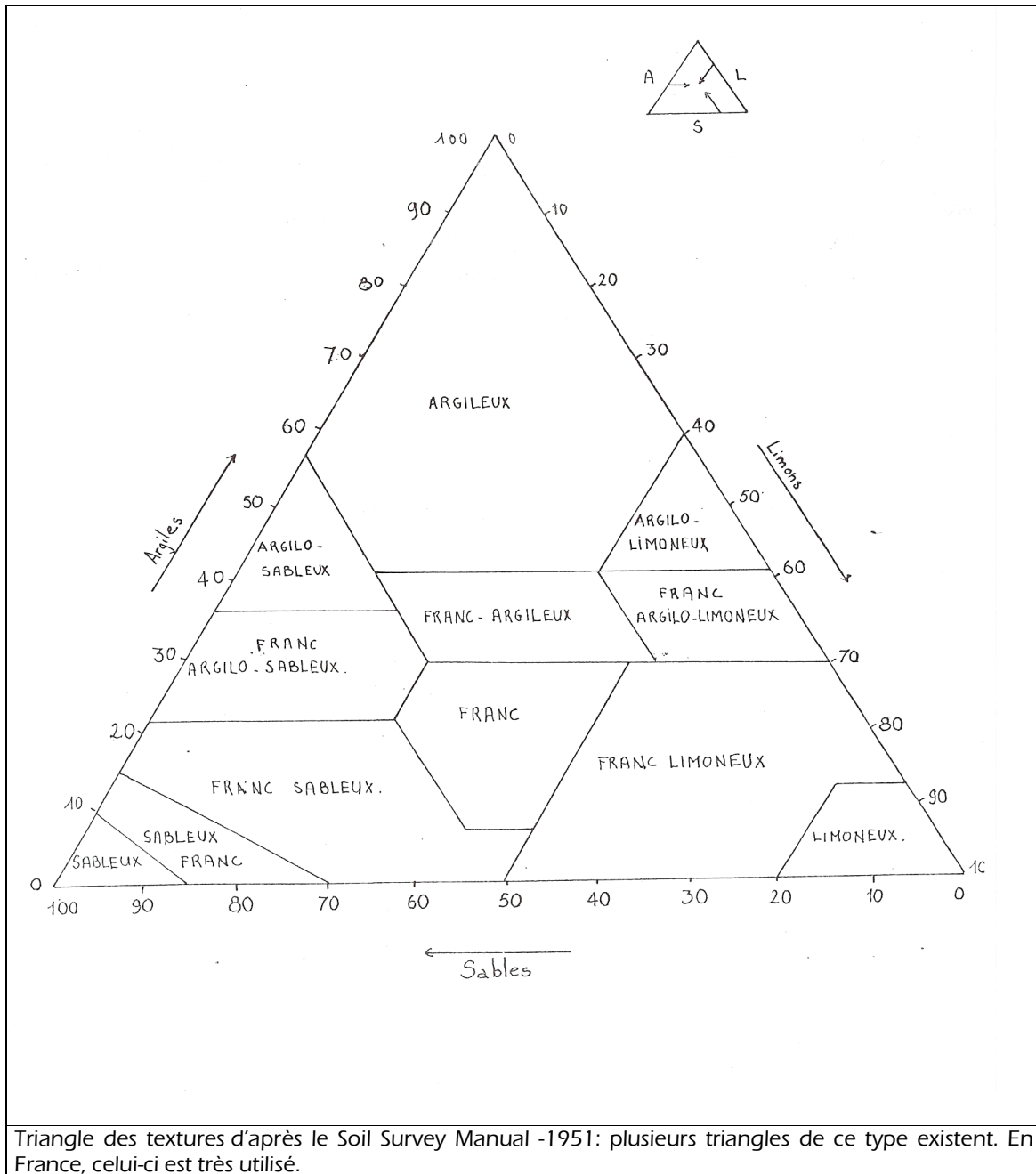
J'ai retenu ici une approche qui est utilisée pour les analyses de sol.

Les constituants du sol (d'après D. MERIAUX dans technique Agricole)

Constituants solides (insoluble dans l'eau)		Constituants liquides (soluble dans l'eau)	Constituants gazeux (contenus dans les cavités du sol)
Constituants minéraux	Constituants organiques		
Encore appelés Constituants mécaniques	Encore appelés Matière organique	Encore appelés Solution du sol	Encore appelés Atmosphère du sol
<i>Ils proviennent de la désagrégation de la roche mère ou des apports par l'homme.</i>	<i>Ils proviennent des « organismes » végétaux ou animaux du sol ou, apportés au sol.</i>	<i>Ils proviennent à la fois de la pluie, des apports par l'homme et de la décomposition de la roche et des matières organiques.</i>	<i>Ils proviennent de l'air extérieur, de la vie des organismes et de la décomposition des matières organiques.</i>
<p>Classification d'après la GROSSEUR DES PARTICULES</p> <ul style="list-style-type: none"> - cailloux + de 2 cm - Graviers 2 cm à 2 mm - Sables grossiers 2 mm à 0,2 mm - Sables fins 0,2 mm à 0,05 mm - Sables très fins 0,05 mm à 0,02 mm - Limons fins 0,02 mm à 0,002 mm - Argiles - de 0,002mm <p>Classification d'après le DEGRE D'ALTERATION DES MINÉRAUX</p> <p>LES ÉLÉMENTS SABLEUX (> 0,002 mm) : cailloux, graviers, sables grossiers et fins, limons. Ils peuvent être SILICEUX (grain de quartz), SILICATES (mica, feldspath...) ou CALCAIRES (carbonate de calcium).</p> <p>LES COLLOÏDES MINÉRAUX (< 0,002 mm) Ils proviennent de l'altération des minéraux silicatés.</p>	<p>Sont répartis en 4 groupes :</p> <p>les végétaux et animaux VIVANTS : (bactéries, champignons, végétaux supérieurs), (protozoaires, vers, insectes)</p> <p>les DEJECTIONS animales et les végétaux et animaux MORTS (mais non encore décomposés)</p> <p>les matières organiques EN COURS DE DÉCOMPOSITION, (attaquées activement par les microbes du sol). On les nomme parfois « PRODUITS TRANSITOIRES »</p> <p>L'humus, fraction colloïdale et stable des matières organiques. (sa décomposition est très lente).</p>	<p>l'eau du sol. les éléments solubles dissous dans cette eau :</p> <ul style="list-style-type: none"> . des corps organiques : sucres, alcools, acides organiques. . des corps minéraux : acides et bases en partie dissouts en ions : Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺, ... PO₄⁻⁻⁻, SO₄⁻⁻, CO₃⁻⁻ NO₃⁻⁻⁻, ... 	<p>Les constituants de l'air :</p> <ul style="list-style-type: none"> . Azote . Oxygène . Gaz carbonique <p>Des gaz issus des décompositions organiques et de la respiration des êtres vivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> . Gaz carbonique . Hydrogène . Méthane ...
REPARTITION EN POIDS : 81 %	2%	17%	0%
REPARTITION EN VOLUME : 49%	3%	26%	22%

3.3 - La texture

La texture, qui se mesure par l'analyse et s'apprécie au toucher, est la teneur centésimale en sables grossiers et fins, en limons, en argile, en humus et en calcaire.



La texture peut être modifiée par :

1. Un important apport de matériaux différents à ceux contenus du sol.
2. La dégradation naturelle des constituants physiques et organiques mais à plus long terme.



3.4 - La structure

3.4.1 - Définition :

La structure d'un sol est le mode d'assemblage, à un moment donné, de ses constituants solides.

La structure d'un sol peut être fortement modifiée par de nombreuses actions anthropiques (labours, terrassements, passage d'engins chargés comme les remorques ou les tracteurs, piétinement,...). La texture peut donc être dégradée par l'action humaine.

3.4.2 - Différentes structures :

► Structure massive cohérente

Il s'agit d'un assemblage de grains soudés en une masse continue, par exemple lors de phénomènes de concrétionnement (formation de croûte). Cette structure est peu favorable aux transferts d'eau et d'air.

► Structure particulaire

C'est une coexistence de grains sans relation entre eux, par exemple lorsque la texture est très sableuse, avec peu de matière organique, des grains non soudés. Cette « non structure » est habituellement assez fragile mais perméable aux fluides du sol.

► Structure grumeleuse

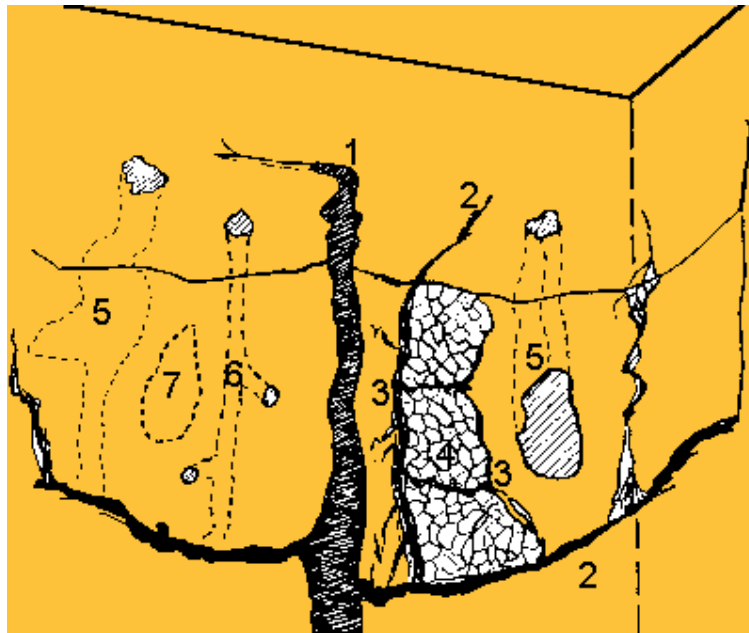
C'est une structure constituée d'agrégats arrondis, poreux. Elle est assez caractéristique des horizons superficiels et organiques, sous végétation de graminées. Cette structure facilite les échanges d'eau et d'air, elle est très favorable au développement du système racinaire des plantes et à l'activité des micro-organismes aérobies.

L'agglomération plus ou moins forte des différents constituants entre eux va provoquer des « vides » que l'on va appeler **la porosité du sol**.

3.4.3 - La porosité

Comme nous le voyons sur le tableau des constituants du sol, le sol est pratiquement, en volume, constitué de 50% de vide : la porosité du sol.

Constituants solides (insoluble dans l'eau)		Constituants liquides (soluble dans l'eau)	Constituants gazeux (contenus dans les cavités du sol)
Constituants minéraux	Constituants organiques		
Encore appelés Constituants mécaniques	Encore appelés Matière organique	Encore appelés Solution du sol	Encore appelés Atmosphère du sol
Répartition en poids : 81 % Répartition en volume : 49%	2% 3%	17% 26%	0% 22%



porosité du sol (d'après GAUCHER).

Légende:

- (1) grosse crevasse déterminant la structure.*
- (2) crevasse de 2ème ordre délimitant les agrégats*
- (3) fissures fines déterminant la sous-structure*
- (4) canalicules de faible diamètre*
- (5) grosse lacune traversant les agrégats*
- (6) lacune tubulaire creusée par un lombric*
- (7) lacune aveugle.*

La porosité est occupée par les fluides, en général la phase aqueuse et la phase gazeuse. Dans certains cas plus rares, cette porosité est aussi occupée par d'autres fluides (hydrocarbures lors de la pollution des sols par ces produits).

Dans de nombreuses situations, le volume de la porosité est constant. Ainsi, les deux fluides sont en compétition. Tout volume occupé par l'eau n'est pas accessible aux échanges gazeux. Les sols dont la porosité est saturée d'eau se caractérisent par une faiblesse des échanges gazeux avec l'atmosphère, ce qui se traduit souvent par des états d'asphyxies plus ou moins marquées.

3.5 - L'eau dans le sol

3.5.1 - Définition

L'eau est localisée dans la porosité. L'eau se trouve dans plusieurs types de sites et d'états.

Elle tapisse la surface des solides, qui sont en général hydrophiles, en une surface très fine. Ceci représente très peu d'eau pour les sols sableux, mais pour les sols argileux



qui développent une grande surface spécifique, de l'ordre de 100m^2 par gramme, l'eau adsorbée est loin d'être négligeable.

Elle remplit les plus petits pores qui lui sont offerts. C'est l'eau capillaire. Pour des raisons de physique capillaire, l'eau est retenue avec une énergie d'autant plus importante que le diamètre du pore est petit. La relation est inversement proportionnelle. Ainsi, pour extraire l'eau des petits pores, il faut apporter une énergie très importante. En revanche, pour les pores les plus grossiers, les forces capillaires sont insuffisantes pour empêcher l'eau de s'échapper sous l'effet de la seule gravité.

3.5.2 - Etat de l'eau dans le sol

Lorsque toute la porosité est remplie d'eau, le sol est dit saturé en eau. En fait, il reste toujours un peu d'air piégé et cette égalité n'est pas strictement respectée.

Lorsqu'un sol saturé se ressuie, l'eau contenue dans la porosité grossière s'échappe ; il s'agit de l'eau dite gravitaire. Les pores plus fins retiennent l'eau par capillarité. L'humidité se stabilise vers une valeur appelée **capacité au champ**.

Si le sol se dessèche, par :

- ▶ évaporation, c'est-à-dire par passage de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse
- ▶ transpiration, c'est-à-dire prélèvement par les végétaux qui conduisent cette eau en surface où ils la vaporisent

l'humidité diminue. L'eau abandonne les pores les plus grossiers pour se cantonner aux plus fins.

A partir d'une certaine valeur d'humidité, l'eau présente est retenue avec des forces capillaires importantes qui empêchent les plantes de l'extraire. Les végétaux flétrissent, si la situation se prolonge, le flétrissement est permanent. L'humidité est alors appelée : **Point de flétrissement permanent**.

La réserve en eau est définie comme :

réserve en eau = $z * (\text{capacité au champs} - \text{point de flétrissement permanent})$

avec z = profondeur d'enracinement.

Cette réserve est notée R.U. = réserve utile

Comme le but des cultivateurs n'est pas de conduire les plantes au point de flétrissement permanent, c'est-à-dire à la mort, on définit la Réserve Facilement Utilisable, R.F.U. avec $\text{RFU} = (2/3) * \text{RU}$.

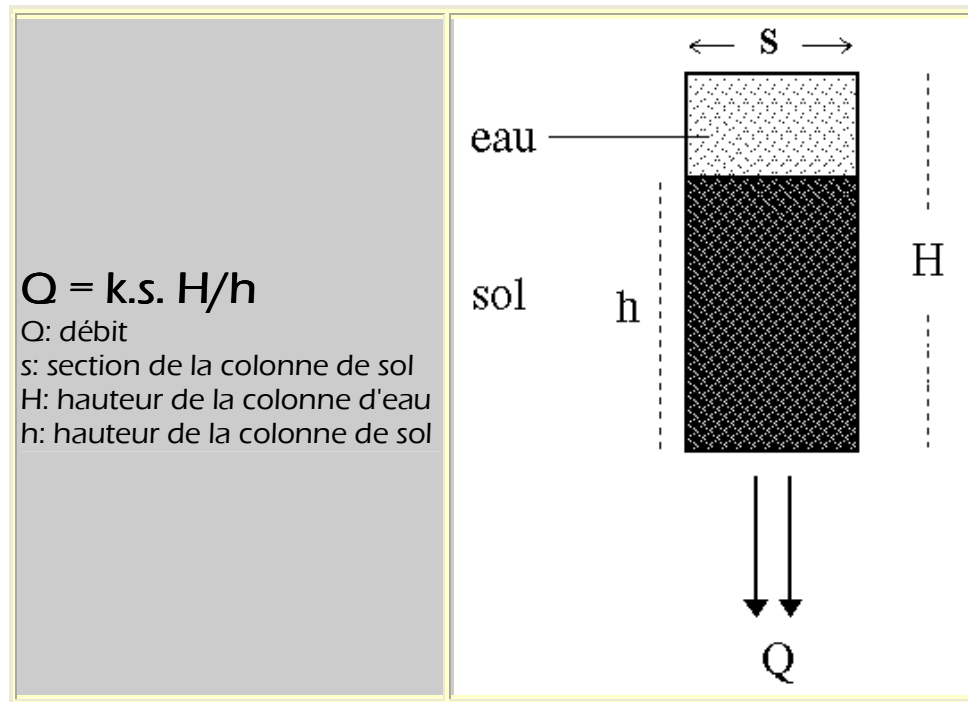
La loi de Jurin, qui établit la relation entre le diamètre du pore et l'énergie de l'eau (ou hauteur d'ascension capillaire, ce qui revient au même), permet d'établir un diagramme de la porosité selon un diamètre équivalent. Ce type de diagramme est très utile, mais dans le détail, il est critiquable car la tension (définie ultérieurement), qui préside à la désorption d'eau n'est pas liée au diamètre du pore, mais au diamètre le plus petit par lequel l'eau doit sortir, ce qui est très différent pour certains types de porosité.

Le potentiel matriciel est l'énergie nécessaire pour extraire la première goutte d'eau d'un sol. Il représente l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par les forces capillaires du sol.

Ce potentiel s'exprime en hauteur d'eau d'ascension capillaire, en centimètres.
Le pF est égal au logarithme décimal du potentiel matriciel. Ainsi, la capacité au champ équivaut approximativement à pF=2.9 et le point de flétrissement permanent à pF= 4.2.

3.5.3 - Perméabilité du sol

La perméabilité k d'un sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau; k est mesuré par la loi de Darcy:



K_s perméabilité ou conductivité hydraulique en saturé. K_s a la dimension d'une vitesse, c'est la vitesse d'infiltration (très important pour le choix des buses).

Pour des sols saturés en eau (fortes pluies):

- ▶ sols sableux: k est compris entre 5 et 10 cm/heure
- ▶ sols limoneux: k varie de 2 à 50 cm/heure dans un horizon A selon le type d'humus. Il est de l'ordre de 1 mm/heure dans les horizons B enrichis en argiles.

Pour les sols non saturés (pluies faibles, air présent dans les pores du sol), k est beaucoup plus faible (0,1 mm/heure pour un limon).

Une couche est réputée imperméable pour des valeurs de k de l'ordre de 10^{-9} m/s. L'eau qui tombe à la surface du sol commence à humidifier la partie supérieure du sol (quelques centimètres). Le profil hydrique change. Cette augmentation de la teneur en eau en surface ne détermine pas automatiquement un transfert en profondeur: l'eau peut rester retenue dans le sol par les forces de capillarité.



Lorsque la capacité de rétention du sol en eau est dépassée, l'eau descend sous l'effet de la gravité et humidifie les couches inférieures. Si finalement, l'humidification du sol continue, l'eau atteint la nappe par infiltration: ce phénomène est très lent et peut demander plusieurs mois. En zone tempérée, la quantité d'eau infiltrée jusqu'à la nappe est estimée à 300 mm/an, soit 10 l/s par km².

Si la pluie est forte, le sol ne peut pas absorber toute l'eau tombée, la partie supérieure du sol devient saturée mais le transfert vers la profondeur n'est pas assez rapide. Une pellicule d'eau s'accumule en surface et s'écoule selon la pente: c'est le ruissellement. L'eau qui s'écoule, arrache des particules qui se rassemblent en chenaux de plus en plus importants (cours d'eau). Lorsque la surface du sol est imperméable (roche imperméable, route ou zone urbaine bitumée), le ruissellement apparaît sitôt que les dépressions du sol ont été remplies.

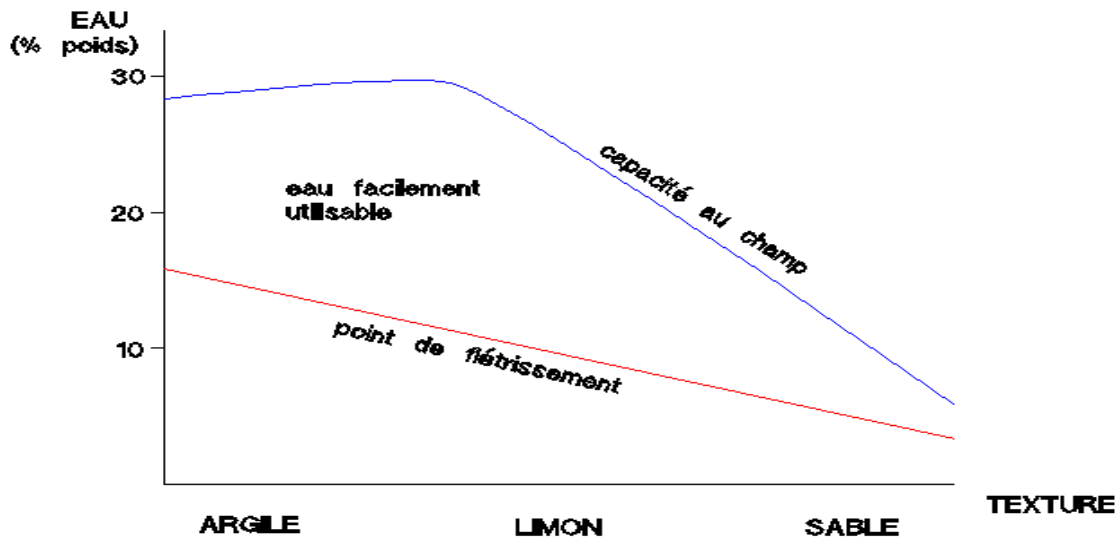
La végétation favorise l'infiltration et s'oppose ainsi au ruissellement.

3.6 - Evapo Transpiration et succion

Une partie de l'eau, qui pénètre dans le sol est évaporée de nouveau dans l'atmosphère soit, directement soit, par l'intermédiaire des plantes ; l'ensemble de ces pertes en eau constitue l'évapo-transpiration. L'évaporation se fait surtout à la surface du sol. Même pendant la pluie, une partie de l'eau est immédiatement ré-évaporée car l'atmosphère n'est pas saturée en eau. Le départ de l'eau superficielle fait remonter l'eau des zones plus profondes. La quantité évaporée diminue avec la quantité retenue dans le sol, car les forces de capillarité s'opposent à son départ, et l'énergie nécessaire pour extraire l'eau est d'autant plus grande que le sol s'appauvrit en eau. Les forces de capillarité, entre les grains et la tension superficielle du film d'eau autour des grains, déterminent un potentiel de matrice qui tend à retenir l'eau et qui peut être mesurée à l'aide d'un tensiomètre. La succion du sol dépend de sa texture et de la taille des pores, de la quantité d'eau contenue par rapport à sa capacité de champ (quantité maximale absorbée). Les conditions climatiques sont également déterminantes.

Taille des pores (µm)	pF	Tension de succion (hPa)	Commentaire
20 000		0,15	grosse crevasse
4 000		0,75	galerie de vers
300		10	diamètre d'une racine de blé
60-30	2,7	50-100	Tension de succion à la capacité au champ
2		1 500	limite de pore contenant de l'eau facilement utilisable
0,2	4,2	15 000	Point de flétrissement
0,003		1 000 000	Tension de succion d'un sol sec à l'air

Relation entre la taille des pores et la tension de succion nécessaire pour les vider de leur eau (d'après ROWELL, 1994)



Eau contenue dans le sol selon sa texture (d'après Duchaufour).

La tension de succion du sol peut être exprimée en unité de pression ou en hauteur d'eau. Les pédologues emploient volontiers une unité particulière, le pF, qui est le logarithme de la pression négative P exprimée en cm d'eau :

$$pF = \log P$$

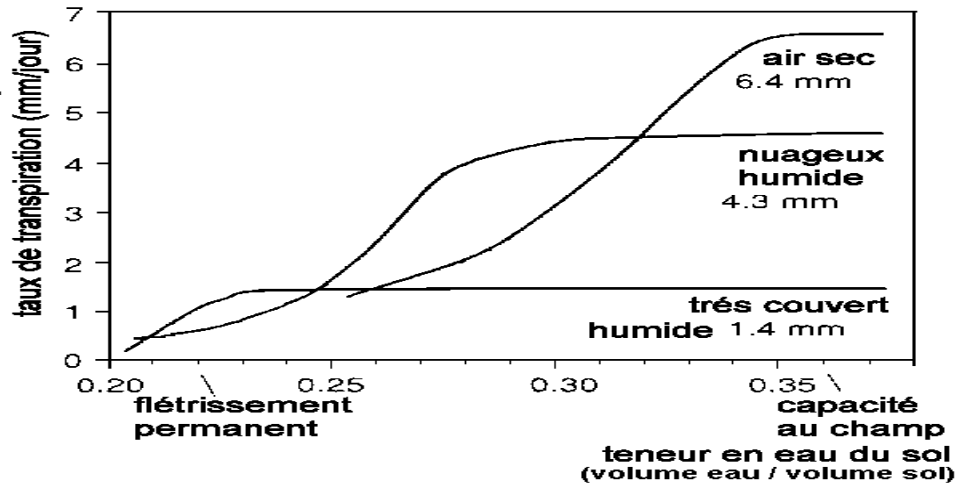
Une pression de 1 atmosphère (1013 hPa) correspond à un pF de 3.

La tension de succion du sol correspond à un potentiel matriciel provoqué par les phénomènes de capillarité et d'absorption-adsorption de l'eau sur les particules du sol.

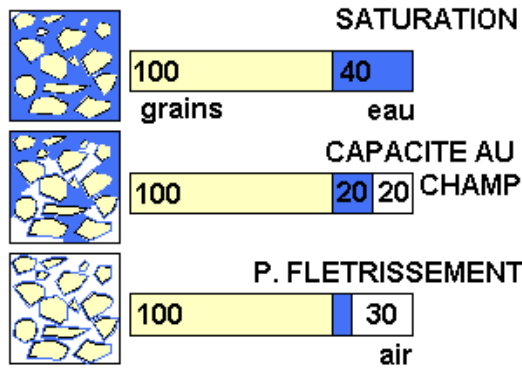
La transpiration des plantes extrait l'eau de la zone non saturée du sol, parfois même de la zone saturée. Cette extraction est possible jusqu'à une certaine valeur limite de la teneur en eau du sol; les racines doivent vaincre le potentiel de matrice qui retient l'eau et qui augmente avec le départ de l'eau. Au delà d'une certaine valeur, la plante ne peut plus vaincre la tension et satisfaire son besoin, elle flétrit. Le point de flétrissement d'une plante varie d'une espèce à l'autre. Le volume d'eau disponible pour les plantes, appelé "réserve utile" comprend la "réserve facilement utilisable" et la «réserve de survie»; elle dépend de deux paramètres :

- ▶ la profondeur du sol colonisée par le système racinaire (1 m environ pour une culture annuelle de blé ou de maïs)
- ▶ la texture du sol.

Pour une profondeur d'un mètre, on obtient des valeurs de réserves utiles allant de 70 mm d'eau pour un sol sableux grossier à 200 mm d'eau pour un sol limono-argileux. L'eau est extraite par les racines des plantes ; elle circule dans la tige et les feuilles puis elle est vaporisée à travers les stomates dans l'atmosphère. Le soleil fournit l'énergie nécessaire à la vaporisation de l'eau. La transpiration d'un végétal est réglée par l'ouverture des stomates, elle-même dépendant de la nature, de l'état hydrique du végétal et des conditions climatiques (rayonnement solaire, température de l'air, déficit de saturation de l'air).

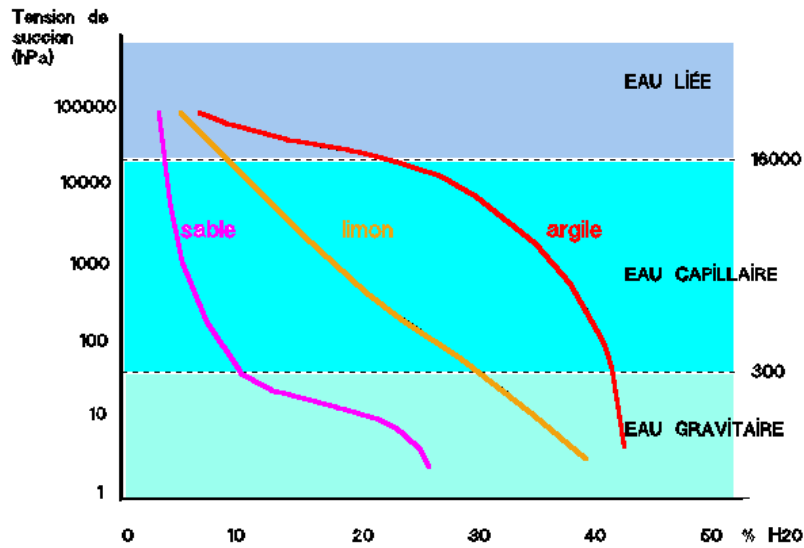


Transpiration du maïs en fonction de la teneur en eau du sol et de l'humidité de l'air (d'après ROWELL, 1994).



L'état de l'eau dans le sol:

Saturation: l'eau s'écoule capacité de champ : le maximum d'eau est retenu sur le terrain
 Point de flétrissement: les racines ne peuvent plus vaincre les forces de rétention de l'eau.



Tension de succion selon la texture du sol, d'après Duchaufour.



L'évapo-transpiration réduit la quantité d'eau s'infiltrant vers la nappe. En été, elle reprend la totalité de l'eau qui a pénétré dans le sol; la nappe ne peut être alimentée que pendant les mois d'hiver. La teneur en eau du sol peut descendre au dessous de la capacité au champ et même atteindre le point de flétrissement près de la surface: un courant d'eau capillaire s'établit depuis la profondeur :

- ▶ La perte en eau d'un sol est plus faible depuis la profondeur.
- ▶ La perte en eau d'un sol est plus faible lorsque celui-ci est nu, car il se forme une croûte superficielle qui limite l'évaporation, on comprend l'utilité de désherber les cultures.

Les remontées capillaires sont importantes lorsqu'il existe une nappe : l'eau peut remonter jusqu'à 1 m au dessus du niveau de la nappe dans un sol limoneux et être utilisée par les racines. On a décrit des remontées de 40 m depuis la nappe de la craie jusqu'aux rendzines (sols calcaires) sus-jacents. En année sèche, les remontées capillaires peuvent être importantes et atteindre 100 mm, soit l'équivalent de la réserve hydrique du sol.

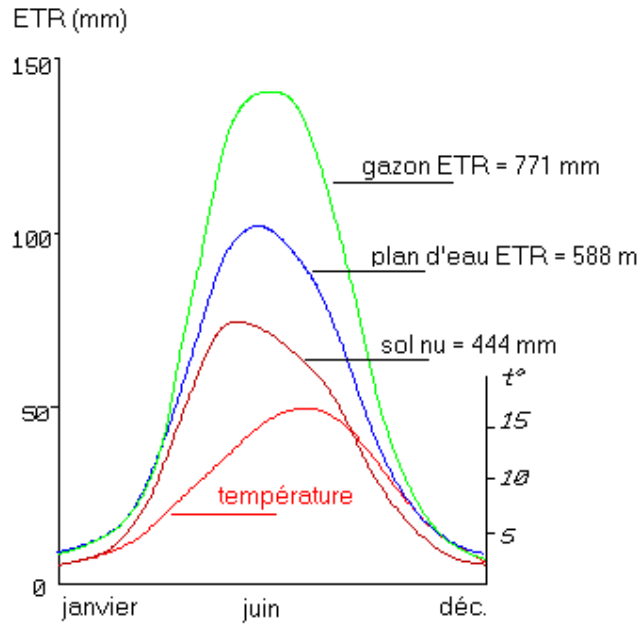
3.7 - Le bilan hydrique

Le suivi du bilan hydrique des sols est une opération complexe, car il n'existe pas actuellement d'appareil simple pour mesurer en routine le volume d'eau du sol. Il y a la sonde à neutrons, appareil précis mais d'une manipulation délicate. Son principe repose sur l'émission de neutrons par une source radio-émission de neutrons par une source radio-active et la réception des particules par les molécules d'eau. La quantité d'eau contenue est fonction du rapport neutrons reçus sur neutrons émis. En étude de routine, on préfère calculer la réserve d'eau du sol à partir des données élémentaires fournies par les stations météorologiques: pluviométrie, température et humidité de l'atmosphère, vitesse du vent, insolation. Le régime des précipitations au cours de l'année est exprimé conjointement avec la température moyenne mensuelle sous forme de diagrammes ombrothermiques. Par convention, l'échelle des températures en ° C est doublée par rapport à celle des précipitations exprimées en mm.

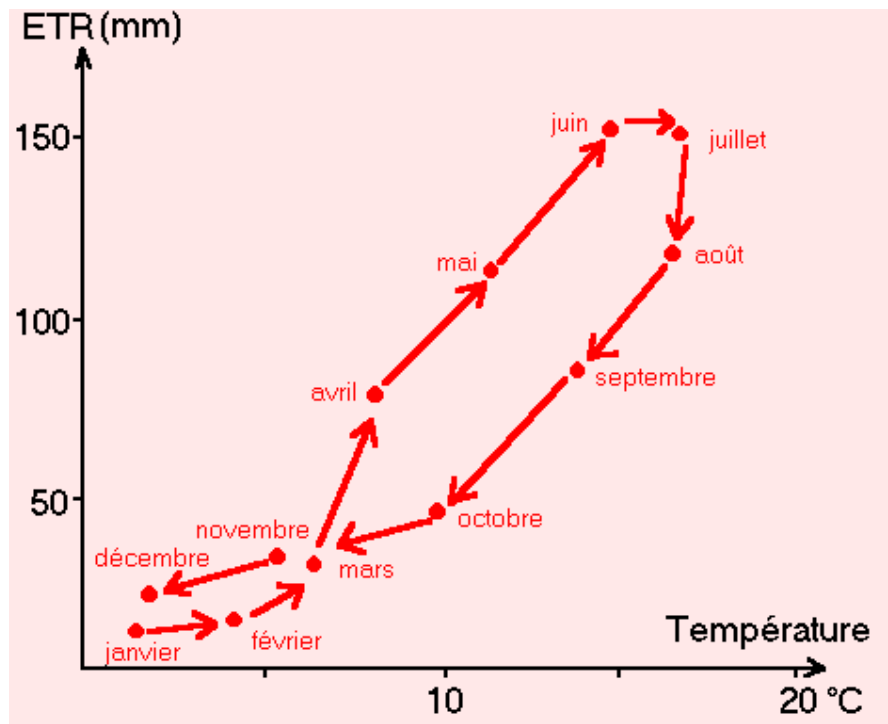
BILAN HYDRIQUE DU SOL EN FRANCE (*)

Précipitation	500-1200 mm
Evapotranspiration réelle	450-650 mm
Ecoulement (ruissellement + drainage)	>50-650 mm

(*) hors zones montagneuses (d'après Choisnel et Noilhan 1995)



Evapo-Transpiration Réelle mesurée sur des parcelles aux Pays-Bas (d'après Lambert, 1996).

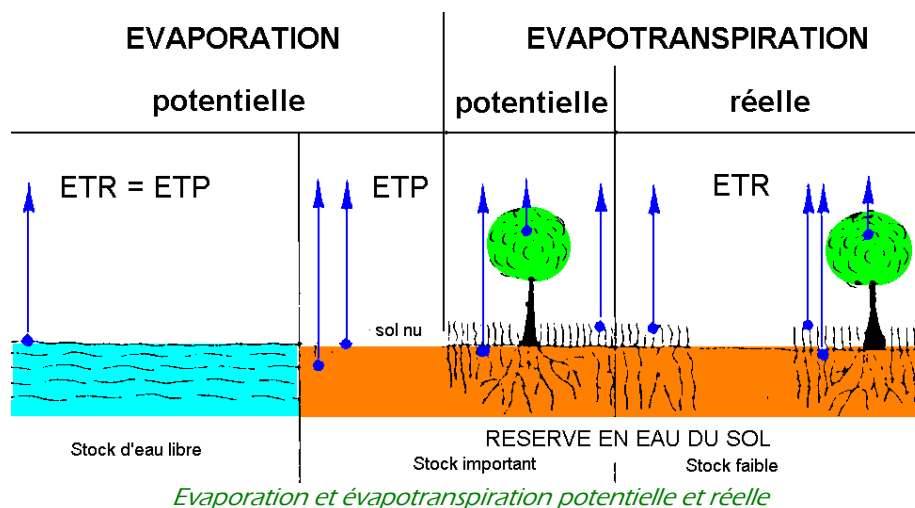


Valeurs moyennes mensuelles de l'ETR mesurée sur une parcelle engazonnée du Sud-Ouest de la France (d'après Lambert, 1996).

L'évapotranspiration réelle (ETR) peut être mesurée expérimentalement à l'aide de cases lysimétriques.

Une case lysimétrique est un bac exposé en plein air, qui contient un sol couvert d'un certain type de végétation, ou laissé à nu, dont on évalue la quantité d'eau infiltrée et drainée par rapport à celle apportée par les précipitations. Certains lysimètres peuvent être pesés régulièrement pour connaître le volume d'eau contenu dans le sol.

On calcule plutôt l'évapo-transpiration à l'aide de formules empiriques, comme celle de Thornthwaite, de Penman ou de Turc. On distingue l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est le pouvoir évaporant de l'atmosphère sur un sol avec couvert végétal disposant de l'eau en abondance. L'évapotranspiration réelle (ETR) correspond à la perte en eau d'un sol quand l'eau vient à manquer: l'ETR est fonction de l'ETP et de la quantité d'eau présente dans le sol.



Evaporation et évapotranspiration potentielle et réelle

$$ETR = \frac{P}{(0,9 + P^2 / L^2)^{1/2}}$$

$$L = 0,05T^3 + 25T + 300$$

P précipitations en mm

T température en °C

ETR en mm par an

Calcul de l'ETR par la formule de Turc (cette formule peut être utilisée lorsque les valeurs décadaires ou mensuelles de la température et des précipitations ne sont pas disponibles).

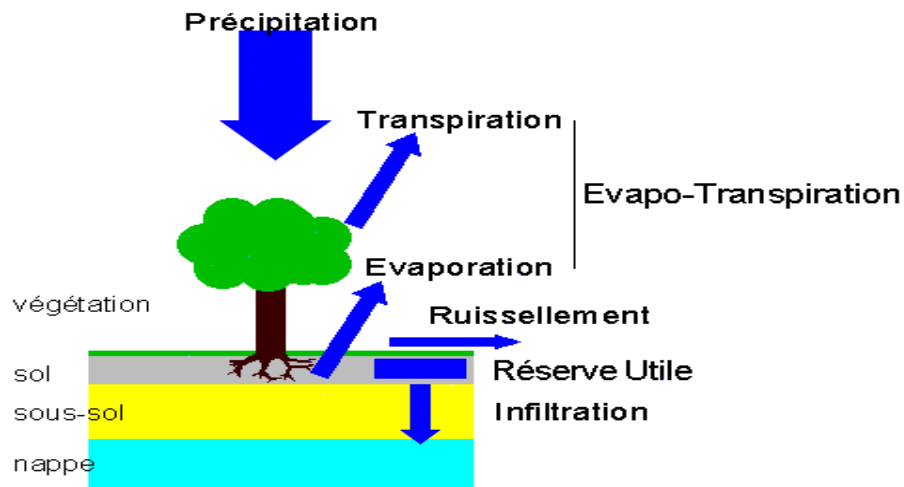
Bilan annuel calculé dans un site de Turquie	
température moyenne:	18,9 °C
ETP (formule de Thornthwaite)	1031,8 mm
Pluie	428,9
ETR	392,4
infiltration vers la nappe	36,5
RFU varie selon les mois	de 100 mm à 0 mm

(d'après De Marsily, 1981)

Bilan annuel calculé dans un site de Turquie.

L'ETP varie largement selon les régions et les périodes de l'année: dans le Bassin Parisien, elle n'est que de quelques mm dans un mois d'hiver mais peut atteindre 200 mm en juillet. La valeur moyenne de l'ETR en France correspond aux 3/5 des précipitations.

Les précipitations efficaces sont égales à la quantité d'eau apportée par les précipitations moins l'évapotranspiration réelle: c'est la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et qui constitue la réserve utile; une partie descend vers la nappe quand la capacité maximale de la réserve utile est dépassée. Le cas de la neige est particulier. Initialement, l'humidification du sol, l'infiltration et le ruissellement sont nuls. L'évaporation a lieu sous forme de sublimation (passage direct de l'état solide à l'état gazeux). A la fonte, l'infiltration est importante car l'apport d'eau est lent. Le ruissellement est généralement faible; il est en revanche grand quand le sol est gelé en profondeur et s'oppose à l'infiltration.



place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau

L'étude du bilan hydrique a une grande importance pour les cultures industrielles. L'évaluation de la réserve utile du sol permet de décider de la nécessité de l'irrigation bien avant les signes de fanaison de la plante.



Néanmoins, l'ETP est une valeur moyenne, calculée pour une couverture végétale et un sol naturel qui ne correspond pas aux conditions particulières des terres de culture. Il faut tenir compte de l'espèce végétale cultivée et de son état de végétation. On module la valeur de l'ETP par un coefficient culturel **Kc** qui peut être supérieur à 1 en période de pleine activité de la plante. Cette valeur de l'ETP sur terre cultivée est l'Evapo-Transpiration Maximale ou **ETM**.

$$ETM = ETP \cdot Kc$$

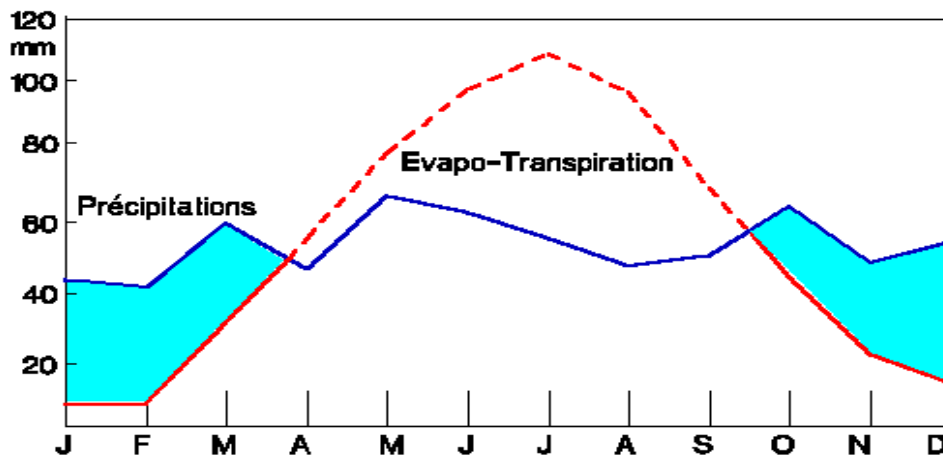
Pour obtenir un rendement maximum, il faut que les plantes disposent toujours de suffisamment d'eau pour évaporer une quantité égale à l'ETM. Il faut donc compléter le volume d'eau apporté par les précipitations, par des prélèvements au réseau de surface ou à la nappe. Cette pratique peut entraîner une surexploitation de la ressource si le volume supplémentaire prélevé est supérieur selon les cas au ruissellement et/ou à l'infiltration à la nappe.

Importance de l'évapotranspiration dans le cycle de l'eau mondial

lame d'eau tombée sur la terre ferme	720 mm
évapotranspiration	410
écoulements superficiels et souterrains vers océans	310
évaporation directe sur océans	1250
lame d'eau tombée sur les océans	1120

(d'après les travaux soviétiques cités par De Marsily, 1981)

Importance de l'évapo-transpiration dans le cycle de l'eau mondial.



Reims, 1975-90, d'après Chiesi (1993).



MOIS	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	TOTAL
P	28.6	53.4	70.3	41.4	86.5	14.1	64.3	9,1	56,2	39,4	11,8	30	505,1
ETP	40.0	9.2	17.1	16.2	35.1	50.9	80.9	120.6	104.7	143.2	118,7	67,4	804
P-ETP	-11.4	44.2	53.2	25.2	51.4	-36.8	-16.6	-111.5	-48.5	-103.8	-106.9	-37.4	-298.9
RFU	0.0	44.2	97.4	100.0	100.0	63.2	46.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	451.4
transfert	0.0	0.0	0.0	22.6	51.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	74.0
ETR	28.6	9.2	17.1	16.2	35.1	50.9	80.9	55.7	56.2	39.4	11.8	30.0	431.1

*Rambouillet, 1989-90 (modifié d'après Coulomb, 1992)
Bilan hydrique à Reims (d'après Chiesi) et à Rambouillet (d'après Coulomb).*

4. UTILISATION DE L'EAU PAR LES VEGETAUX

Les racines des plantes puisent l'eau dans la réserve utile du sol et la disperse dans l'atmosphère par évapo-transpiration. Si l'eau disponible diminue, tandis que la tension de succion du sol augmente, les racines ont de plus en plus de difficulté à extraire l'eau ; l'évapo-transpiration diminue; elle devient inférieure à l'ETP : c'est l'ET Réelle.

Au dessous d'une tension de succion de une atmosphère (1000 hPa), l'absorption de l'eau par les racines est fortement diminuée; elle devient nulle lorsque le point de flétrissement est atteint (en général 16 atmosphères, soit pF = 4,2). Ce point de flétrissement permanent varie beaucoup avec la texture du sol.

Sol	Point de flétrissement	Capacité au champ	Eau disponible pour la plante
Argile	0,28	0,44	0,16
Terre argileuse	0,23	0,44	0,21
Terre grasse	0,14	0,36	0,22
Terre sableuse	0,08	0,22	0,14
Sable	0,05	0,15	0,10

Point de flétrissement, capacité au champ et eau disponible pour la plante en fonction de différents types de sols. Les valeurs sont exprimées selon le rapport (volume de l'eau contenue/volume du sol) - inspiré de ROWELL, 1994 -.



Le volume occupé par les racines d'une plante dans le sol a une grande importance pour l'absorption de l'eau. L'espace racinaire varie selon les plantes et la nature du sol. Les racines du blé s'enfoncent à 50 cm dans un sable, mais peuvent atteindre 1,50 m dans un limon; l'enracinement du maïs atteint 1,70 m de profondeur; les racines de pommes de terre ne dépassent pas 0,60 m. En zone semi-aride, les racines d'une graminée comme l'Alfa s'enfoncent à 2 m. Dans une forêt tempérée, l'espace racinaire effectif des arbres ne dépasse pas 1 m pour l'approvisionnement en eau. En générale, les racines superficielles peuvent vaincre des tensions de succion supérieures et se procurer de l'eau même dans un sol apparemment sec.

En conclusion, il faudra arroser pour maintenir la quantité d'eau entre le point de flétrissement et la capacité au champ et de manière à permettre aussi la présence et le renouvellement des éléments gazeux présents dans le sol. **On évitera donc d'arroser tous les jours mais on remplira le « réservoir sol » suivant un bilan hydrique suivi, qui s'appuiera sur vos observations et sur les données météorologiques locales.**



REFERENCES

- BROOKS K.N., FFOLIOTT P.F., GREGERSEN H.M. et THAMES J.L. (1991) - Hydrogeology and the management of watershed. Iowa state univ. press, Ames, Iowa.
- BUSSIERE M. (1996) - L'érosion des sols cultivés en France. Mém. D.E.S.S., Univ. Picardie, 136 p.
- CASTANY G. (1979) - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod.
- CHIESI F. (1993) - Transfert et épuration dans la zone non saturée de la craie en Champagne. Thèse, univ. Reims.
- CHOISEL E. et NOILHAN J. (1995) - La prévision des sécheresses. La Recherche, p. 34-40.
- COULOMB C. (1992) - Etude de la circulation de l'eau dans un sol argileux drainé. Thèse, Paris-Sud, n° 2154, 245 p.
- DE MARSILY G. (1981) - Hydrogéologie quantitative. Masson
- DUCHAUFOR P. (1991) - Pédologie. Masson.
- GAUCHER G. (1968) - Traité de pédologie agricole. Le sol. Dunod.
- LAMBERT R. (1996) - Géographie du cycle de l'eau. P.U.M. Toulouse.
- LUDWIG B. (1999) - Les bassins versants expérimentaux de Tavaux et Pontséricourt & de Nampon St Martin. Rapp. INRA Laon Péronne, 8 p.
- METEO France meteofrance.fr
- MOREL R. (1996) - Les sols cultivés. Lavoisier, Paris.
- NEWSON M. (1994) - Hydrogeology and the river environment. Clarendon Press, Oxford.
- ROWELL D.L. (1994) - Soil Sciences. Methods and Applications. Longman.
- SOLTNER D. (2005) - Base de la production végétale. Coll. Sciences et techniques agricoles.