



Polycopié de cours : Introduction à l'irrigation

Pour les étudiants du socle commun,
Troisième année (S5), Licence hydraulique.

Etablit par : **Dr KABOUR Abdesselem**

Année universitaire : 2017/2018

AVANT-PROPOS:

Depuis que j'ai commencé à enseigner ce « module » pour les étudiants ingénieurs, devenue ensuite « matière » pour les étudiants en licence, en hydraulique, toutes spécialités confondues, j'ai eu l'intention de rassembler un cours qui soit pédagogiquement adapté à leur niveau, et au programme officiel du ministère, et le plus important est la quantité de connaissance technique de la matière que les étudiants doivent acquérir, et surtout mémorisée.

Ce polycopié de cours est réalisé dans cet objectif, pour aider les étudiants, et tous ce qui sont intéressés par le domaine de l'irrigation. Il est désigné pour un premier contact des étudiants avec la matière, où ils trouveront que l'élucidation de la théorie et les concepts ont été simplifiés pour correspondre à leur niveau.

Le manuscrit souligne les aspects primordiaux et pratiques de l'irrigation, de plus le lecteur intéressé par plus de savoir, peut se référer à la littérature approfondie traitant du sujet, répertoriée dans la bibliographie.

J'ai choisi de distribuer ce polycopié de cours par le réseau universitaire avec l'espoir qu'il trouve l'attention appropriée au près des étudiants concernés, et qu'il soit le plus bénéfique possible.

Dr KABOUR Abdesselem.

KABOUR A., 2017/2018, Introduction à l'irrigation, polycopié de cours, Centre universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila, Algérie. 57p.

Remerciement :

Ce polycopié a été revu et expertisé par deux professeurs, Pr HOUICHI Larbi (université de Batna) et Pr CHEBBAH Mohamed (Centre universitaire de Mila), à qui je porte un grand respect, qu'ils trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Je tiens aussi à remercier Mr METTATLA Noureddine pour sa collaboration et son soutien.

Dr KABOUR Abdesselem.

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction générale a l'irrigation

Définition de l'irrigation.....	01
1. Historique	01
2. But et Intérêt de l'irrigation.....	02
2.1. Pourquoi irriguer ?.....	02
2.2. Autres utilisations possibles de l'irrigation.....	02
3. Limites de l'irrigation.....	03
4. Intérêts de l'irrigation.....	03
5. Qualité de l'eau d'irrigation.....	03
5.1. Qualité physique	04
5.2. Qualité chimique	04
5.3. Qualité bactériologique	04
5.4. Classification en fonction de la minéralisation	04
6. Aptitude des eaux a l'irrigation.....	04
6.1. Caractérisation des l'eaux destinées pour l'irrigation	05
6.1.1. Classification des eaux par la méthode de Richards	05
6.1.2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox	05
7. Introduction a la conception d'un réseau d'irrigation	07
7.1. Exemple de calcule de la ressource et de la surface irrigable.....	07
7.2. Méthodologie et de conception d'un réseau d'irrigation par des logiciels.....	09
8. Eléments du régime d'irrigation.....	09
8.1. Les besoin du mois de pointe.....	09
8.2. Besoins journaliers (B_j)	09
8.3. En irrigation localisée les besoins en eau vont être réduits (B_i).....	10
8.4. La dose Pratique (D_p).....	10
8.5. La dose réelle nette (D_{nette}).....	10
8.6. Fréquence d'arrosage (T).....	10
8.7. La durée d'arrosage (D_a)	10
8.8. Nombre de rampes dans 1 ha	11
8.9. Nombre de goutteurs.....	11
8.10. Caractéristiques des goutteurs.....	11
8.11. Porte rampe (collecteur) au milieu de la parcelle : Q_{tr} (l/h).....	11
8.12. Débit total de la rampe Q_{tr} (l/h).....	11
8.13. Calcul des diamètres des rampes D (m).....	12
8.14. Débit caractéristique.....	12

Chapitre 2 : Paramètres et facteurs intervenants en irrigation

1. Régime de la pluviométrie.....	13
1.1. Définition des précipitations.....	13
1.2. Régime des précipitations.....	13
1.2.1. Les étages bioclimatiques en Algérie.....	13
1.3. Mesures des précipitations (Mesures de la hauteur d'eau précipitée).....	15
1.4. Le réseau d'observation.....	16
1.5. Pluviométrie efficace	17
2. L'évaporation	17

2.1. L'évaporation et la transpiration.....	18
2.1.1. Quantité de chaleur disponible.....	19
2.1.2. Température de l'air et de l'eau.....	19
2.2. Evapotranspiration d'un sol couvert par de la végétation.....	19
2.2.1. Rappel sur les processus physiques de la transpiration des végétaux.....	19
2.2.2. Notions d'évapotranspiration de référence, maximale et réelle.....	20
2.2.3. Evaluation de l'évapotranspiration.....	20
- Formules empiriques ou semi-empiriques.....	21
- Formules à base physique.....	22
3. Les climogrammes de BAGNOULS – GAUSSEN (1953).....	23
4. Humidité relative.....	23
4.1. Mesure de l'humidité relative	23
5. Vitesse et fluctuation des vents	25
6. Reliefs et topographie.....	25
7. L'eau dans le sol.....	25
7.1. Notions sur la réserve utile.....	25
7.2. L'humidité à la capacité au champ (θ_{cc}).....	26
7.3. L'humidité au point de flétrissement permanent (θ_{pfp}).....	26
8. La réserve facilement utilisable (RFU)	28
9. Notions sur la texture du sol.....	28
10. Notions sur la température	30

Chapitre 3 : Les besoins en eau des cultures

Introduction.....	31
1. Pourquoi les plantes ont-elles besoin d'irrigation?.....	31
2. Besoins en eau des cultures.....	32
3. Notions sur les débits	32
4. La dose d'irrigation de réserve.....	33
5. La dose d'irrigation sommaire	33
6. Conductivité hydraulique ou perméabilité.....	33
6.1. Application a l'irrigation.....	35
7. Notions sur l'infiltration	35
7.1 Mécanisme de l'infiltration.....	35
8. Les débits spécifiques (hydromodules).....	36
9. Calcul du bilan hydrique (méthode graphique).....	36

Chapitre 4 : Techniques d'irrigations

1. Introduction	38
2. Classification des réseaux d'irrigation	38
3. Irrigation de Surface (gravitaire).....	39
3.1. Les différentes techniques d'irrigation de surface.....	40
3.1.1. L'irrigation par planche (ou par déversement).....	40
3.1.2. L'irrigation par submersion.....	41
3.1.3. L'irrigation à la raie.....	41
A. La méthode du siphon	42
B. Le système de la gaine souple	42
C. Les tubes à vannettes	43
D. Le système californien.	43

E. Système de transirrigation.....	44
3.2. L'irrigation souterraine.....	44
4. Irrigation sous pression.....	45
4.1. Trame du réseau.....	46
4.1.1. Ouvrage de tête.....	47
4.1.2. Conduite principale.....	47
4.1.3. Conduites secondaires.....	47
4.1.4. Bornes de prise.....	47
4.1.5. Adducteurs (conduites d'alimentation.....	47
4.1.6. Conduites latérales (conduites d'irrigation).....	47
4.1.7. Distributeurs.....	47
5. Classification des systèmes.....	48
5.1 Pression de fonctionnement.....	48
5.2. Méthode de distribution de l'eau.....	48
5.3. Type d'installation.....	49
5.4. Equipement d'irrigation et techniques de raccordement.....	49
6. L'irrigation par aspersion.....	50
7. L'irrigation localisée (goutte à goutte, ou micro irrigation).....	51
7.1. Nouvelles techniques.....	51
7.2. Les avantages de l'irrigation localisée.....	51
8. Le choix du système d'arrosage.....	52
Références bibliographiques.....	54
Annexe 1 : Equipement du réseau d'irrigation goutte à goutte.....	55
Annexe 2 : Quelques Unités physiques usuelles en hydraulique agricole.....	57

Chapitre 1 :

Introduction générale a l'irrigation

Chapitre 1 :

Introduction générale à l'irrigation

Définition de l'irrigation

L'irrigation est l'apport artificiel d'eau aux cultures, dont l'objectif est de satisfaire leurs besoins en eau et créer des conditions favorables de production, tant au point de vue quantitatif que qualitatif.

Il existe deux types, **l'irrigation fondamentale**, qui se pratique dans un milieu dépourvue de ressources en eau (région aride) pour l'alimentation de la plante, et **l'irrigation de complément**, qui est pratiquée, quand il y a une source d'alimentation (pluie) qui ne suffit pas au besoin de la plante, alors on complète ce besoin par un apport artificiel.

L'objectif majeur de l'irrigation est de maximiser les rendements agricoles, par rapport au volume d'eau consommé. En pratique, on utilise deux grands types de système d'irrigation : de surface (principalement l'aspersion et le goutte-à-goutte), et souterraine. Quand l'eau est rare et coûteuse, le système goutte-à-goutte devient l'un des systèmes les plus intéressants et les plus pratiques. Il existe aussi une autre classification basée sur l'apport en énergie, c'est les systèmes sous pression, qui nécessitent une énergie pour fonctionner (Electricité, Gasoil...etc), et gravitaire, qui utilise la pente pour transporter l'eau de la source à la plante.

1. Historique

Les premières traces d'irrigation remontent à plus 5000 ans av. J.-C. en Haute Mésopotamie dans les piémonts du sud *Zagros (Iran)*.

Ces terres semi arides situées en le *Tigre* et l'*Euphrate* ont été irriguées par les *flots* de l'*Euphrate* pendant que le *Tigre* servait de déversoir final. Les communautés agricoles se développent grâce à la mise en place d'un système d'irrigation. De nombreuses difficultés techniques leurs sont apparus: stockage de l'eau, contrôle des flux, maintenance des canaux.

L'*Egypte* doit son développement au *Nil* et à sa vallée irriguée : les inondations annuelles du *Nil* rythmaient la vie agricole. Vers 3000 avant notre ère, un système d'irrigation fut créé à partir du *Nil* pour en détourner une partie des *flots* vers un lac, le lac *Moeris*, qui était composé d'un réservoir (le lac), d'un canal d'écoulement, d'un groupe de régulateurs, de prises d'eau, de barrage, etc...

En *Chine*, des textes permettraient de dater les plus anciens travaux d'irrigation aux 7-8^{ème} avant notre ère. En l'an 2000, l'UNESCO a inscrit à l'inventaire du patrimoine mondial, un système d'irrigation mis au point au 3 siècle avant JC à *Dujiangyan* dans la province du *Sichuan*. Le système continue de réguler les eaux de la rivière *Minjiang* et de les distribuer sur les terres fertiles des plaines de *Chengdu* pour la culture du riz, notamment si des améliorations techniques ont été apportées depuis, le système mis au point il y a plus de 2200 ans est toujours en état de fonctionnement. Le système principal se compose de trois parties: une digue séparatrice d'eau en forme de bouche de poisson, deux déversoirs qui servent à décharger les eaux et la vase, et un canal qui traverse la montagne *Yulei* utilisé comme une arrivée d'eau. Ces trois parties interagissent et dépendent les unes des autres. Ce système de détournement des eaux a été soigneusement conçu et pensé pour l'irrigation, le contrôle des inondations, et la navigation.

A *Oman (sultanat d'Oman, sud de la péninsule d'Arabie)*, les systèmes d'irrigation *aflaj* ont été inscrits au patrimoine mondial par l'UNESCO. Les plus anciennes réalisations remontent à 500 après JC mais des traces permettent de supposer que l'irrigation y était pratiquée dès 2500 avant notre ère.

De beaux canaux d'irrigation (*aqueducs*) sont encore utilisés sur l'île de *Madère*. Sur plus de 2000 km, ces canaux furent conçus d'abord en bois, maintenant en béton, dès le 15 siècle

quand les premiers colons arrivèrent, apportent de l'eau potable aux villages et aux plantations agricoles. Ces *levadas* sont avec la végétation exubérante de l'île une des grandes richesses des paysages locaux.

2. But et Intérêt de l'irrigation

Dans le monde, 277 millions d'hectares sont irrigués (FAO, 2000) sur 1,4 milliard d'hectares de terres arables au total. Ils fournissent environ 1/3 de la production alimentaire mondiale. La nécessité de préserver les ressources en eau conduit à une réglementation et à la taxation des prélèvements.

2.1. Pourquoi irriguer ?

L'irrigation doit permettre de combler ce déficit hydrique (On appelle déficit hydrique, pour une période donnée, la différence entre les pluies tombées et le besoin en eau défini d'après les caractéristiques climatiques et physiologiques de la plante).

Lorsque la pluie satisfait la plus grande partie de ces besoins, on parle alors d'irrigation d'appoint. Dans ce cas, l'irrigation permet une sécurisation de la production, en régularisant et en améliorant les rendements.

Lorsque la pluie est trop faible pour assurer tout au long de l'année germination et croissance régulière, l'irrigation est permanente. Il s'agit dans ce cas d'une technique nécessaire à l'existence même de la culture, sa mise en œuvre exige la prise en compte de paramètres liés au sol, au climat et à la plante.

Leur connaissance est nécessaire non seulement pour le dimensionnement du réseau mais aussi pour pouvoir piloter une irrigation économiquement rentable.

Réussir son irrigation consiste à apporter aux plantes l'eau dont elles ont strictement besoin pour assurer les meilleurs rendements sans dépenses inutiles (arrosages excessifs), en valorisant tous les intrants et en évitant ruissellement et drainage.

Même subventionné, l'investissement nécessaire à l'équipement d'une parcelle va demander, de la part de l'agriculteur, un important effort financier. Au moment du choix, cet investissement impose donc de bien prendre en compte tous les facteurs qui entrent en jeu ainsi que leurs effets.

2.2. Autres utilisations possibles de l'irrigation

L'irrigation peut être utilisée à d'autres fins, comme par exemple, éviter les gelées radiatives qui se produisent au printemps par aspersion d'eau.

Le principe est simple : Si la température est inférieure à 0° C, on applique un film d'eau grâce aux rampes d'irrigation sur le matériel végétal à protéger. La chaleur dégagée par la transformation de l'eau état liquide en état solide et la chaleur de l'eau permet de conserver le tissu végétal au-dessus du point de congélation.

Il faut toutefois faire attention à ce que les plantes à protéger doivent être en mesure de supporter la formation de glace sur leur surface, cette protection peut permettre d'offrir à la plante une protection jusqu'à -7 °C

3. Limites de l'irrigation

Une irrigation inadaptée ou mal conçue peut être source de propagation de pathogènes, de polluants (résidus de médicaments, de biocides, etc.) dans les cultures ; c'est le cas avec l'utilisation d'eaux grises ou résiduaires, en particulier dans certains pays arides. En zone aride, le risque de salinisation est élevé.

L'irrigation peut aussi affecter les écosystèmes, le paysage ou l'agriculture en amont ou en aval, à cause des volumes d'eau détournés des cours d'eau. On cite souvent l'exemple de la mer d'Aral polluée et en partie vidée à cause de l'irrigation du coton en amont.

L'irrigation entraîne la salinisation des sols et la remontée des nappes phréatiques par capillarité. Environ 30 % (FAO, 1994) des terres irriguées sont maintenant touchées par ces problèmes, certaines modérément, d'autres gravement.

La salinisation des zones irriguées est la cause d'une réduction de 1 à 2 % (FAO, 2000) par an de la superficie des terres cultivées sous irrigation. Pour contrer ce phénomène, une des méthodes les plus courantes est le drainage intensif, ce dernier entraîne des conséquences irréversibles comme la dégradation de la structure du sol.

Une autre limite de l'irrigation est l'utilisation non maîtrisée de l'eau, dans la plupart des cas. Sur certaines cultures il y a des pertes d'eau de l'ordre de 30 à 60% (FAO, 1990).

4. Intérêts de l'irrigation

Approximativement, il y a 1.5 milliard d'hectares de terre agricole dans le monde, à savoir environ 17 % = 270 millions d'hectares seulement sont irrigués. La terre irriguée constitue plus de 40% de la moisson globale produite. Les cultures irriguées sont environ 3.5 fois plus productives que les cultures non irriguées (FAO, 2008).

Certaines considérations sont à prendre en compte tels que :

- L'agriculture (irrigation pour l'essentiel) consomme environ 70% de l'eau douce mobilisée dans le monde.
- Population mondiale : 80 à 85 millions d'individus de plus chaque année, essentiellement en zones arides et semi-arides
- L'indispensable accroissement de production alimentaire passera principalement par l'irrigation.
- Nécessité d'améliorer le rendement de l'irrigation, d'utiliser des eaux de moindre qualité et de mettre en œuvre des techniques efficaces de conservation de l'eau.

Les Causes de la mauvaise prise en main de l'irrigation sont principalement :

- Gestion mauvaise et irrationnelle de l'eau d'irrigation.
- Infrastructures inadéquates.
- Opération et entretien insatisfaisants, mauvaise organisation institutionnel, manque de formation des fermiers.
- Efficacité globale d'utilisation de l'eau d'irrigation dans le monde entier est moins de 40%.
- Les grandes pertes se produisent dans les systèmes de transport et de distribution, l'équipement défectueux ou vieux et les systèmes d'irrigation mal conçus, mal maintenus ou mal contrôlés.

5. Qualité de l'eau d'irrigation

Les eaux d'irrigation doivent être en quantité suffisante, mais aussi satisfaire certains critères de qualité. Les plantes sont particulièrement sensibles au niveau de sels dissous dans l'eau d'irrigation. Une grande quantité de sel dans l'eau et dans le sol, ainsi qu'une irrigation irrégulière peuvent induire des problèmes de salinisation des terres irriguées, ce qui est courant dans certaines régions du globe.

Les effets les plus graves d'une irrigation de mauvaise qualité d'eau est une accumulation excessive de sels solubles et / ou Le sodium dans le sol. Des sels hautement solubles dans le sol font que l'humidité du sol est plus difficile à extraire par les plantes, et les cultures subissent un stress en eau même lorsque le sol est humide.

Lorsqu'il est excessif le sodium s'accumule dans le sol, il provoque des particules de l'argile et de l'humus pour réduire l'espace des pores du sol. Cette action réduit le mouvement de l'eau dans et à travers le sol, donc Les racines de culture ne reçoivent pas assez d'eau, même si l'eau peut être stockée sur la surface du sol.

D'autre part la qualité de l'eau d'irrigation peut être évaluée par plusieurs paramètres physiques, chimiques et bactériologiques.

5.1. Qualité physique :

- Teneur en sédiments (matière en suspension, turbidité) et débris végétaux.
- Température.
- pH, etc.

5.2. Qualité chimique :

- Concentration en substances dissoutes (CE, SAR)
- Ions toxiques à forte concentration (B, Cl, Na, HCO₃, etc.)
- Substances susceptibles de précipiter (carbonates, oxydes de Fe et Mn, sulfures, etc.)

5.3. Qualité bactériologique :

- Algues, bactéries, champignons, spores, etc.

5.4. Classification en fonction de la minéralisation :

Les eaux peuvent être classées sur la base de leur seule minéralisation totale (FAO, 2008) :

- Eaux douces < 0.5 g/l
- Eaux salines de 0.5 à 1 g/l
- Eaux très salines de 1 à 3 g/l
- Eaux saumâtres > 3 g/l

6. Aptitude des eaux à l'irrigation :

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones semi-arides, où cette ressource est rare ou inexistante, on fait appel aux eaux souterraines.

Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation des sols qui peut être apprécié par la conductivité électrique et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes, on a recensé deux séries d'effets de la salinité (FAO, 2000) : les uns portent sur les végétaux, les autres sur le sol. En effet, ces sels causent des changements de la perméabilité et de l'aération du sol d'une part, et d'autre part ils provoquent des perturbations du métabolisme des plantes et du processus osmotiques de ces dernières.

6.1. Caractérisation des eaux destinées pour l'irrigation :

La salinisation peut entraîner des effets nocifs sur la qualité des eaux pour l'irrigation, et ce en raison de la fixation du sodium et des chlorures par les colloïdes du sol. La présence du sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation et le sol :

- Un accroissement de la pression osmotique qui rend l'eau plus difficilement mobilisable par les plantes;
- Une toxicité de certains ions pour les végétaux (Cl⁻, Na⁺, etc.);
- Une dégradation du sol (modifications de l'état structural, diminution de la perméabilité, etc).

Lorsque la concentration des ions Na⁺ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca²⁺ (échange de base) dans le complexe absorbant.

Une eau chargée en sels peut provoquer cette action. Ce risque est déterminé à l'aide de la valeur du sodium absorbable (**Sodium Absorption Ratio, SAR**). Pour une même

conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est défini par la relation suivante (Tous les ions sont exprimés en méq/l.)

$$SAR = \frac{(Na + K)}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}}$$

6.1.1. Classification des eaux par la méthode de Richards :

Cette classification a été proposée par Richards, chercheur à l'USDA (United States Department of Agriculture) de Riverside en Californie, en 1954, elle a été très utilisée et l'est encore de nos jours. Elle est très utile et fiable pour caractériser une eau d'irrigation. Cependant, elle ne peut pas servir pour estimer un risque de salinisation ou de sodisation.

En effet, cette classification ne peut prendre en compte l'évolution des caractéristiques de l'eau lorsque sa minéralité augmente dans les sols des zones arides ou semi-arides auxquels elle est destinée. Elle donne une vision sur l'état actuel de ces caractéristiques mais ne permet pas d'anticiper sur le devenir de cette eau.

L'eau avec un SAR (sodium adsorption ratio) (fig. I.1) se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problèmes liés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol (Coulon, 2000).

6.1.2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation (figure I.2) et leur interprétation dans le tableau I.1. Le % Na⁺ est défini par la relation :

$$\% Na = \frac{(Na + K)}{(Ca + Mg + Na + K)} * 100$$

Tableau I.1. Interprétation du diagramme de Richards.

Degré	Qualité	Classes	L'état d'utilisation
1	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité.
3	Admissible	C3-S1 C3-S2 C2-S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions: sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

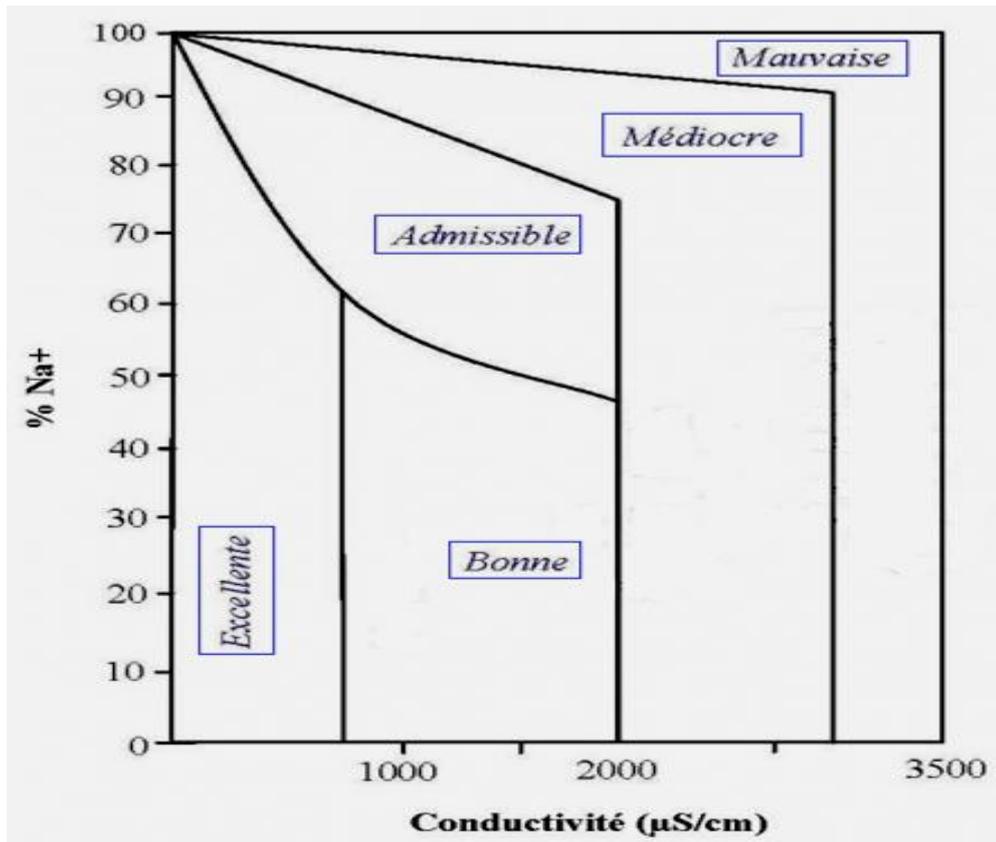


Figure I.1. Diagrammes de Wilcox

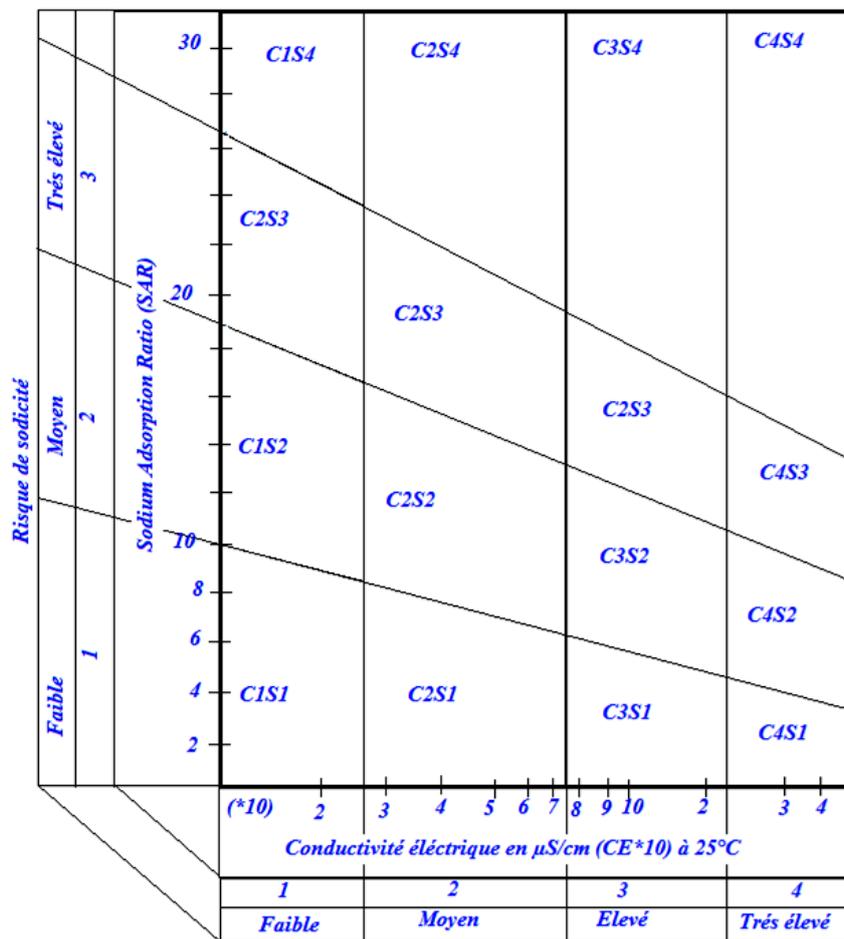


Figure I.2. Diagrammes de Richards

7. Introduction a la conception d'un réseau d'irrigation :

Tenant compte de la diversité des paramètres : sol, climat et plante, permettra une mise en place et un bonne maitrise de l'irrigation, il est utile de procéder comme suit (Kessira, . ???) (Figure I.3)

1. Connaître la source, la qualité de l'eau, le débit a extraire, le type de sol et le choix de la culture.
2. Connaître la topographie de la parcelle et les vents dominants.
3. Calcul des besoins en eau de la culture.
4. Faire le choix de la technique et le système d'irrigation à utiliser, entre le goutte a goutte, l'aspersion ou le gravitaire.
5. Dimensionnement du réseau d'irrigation adopté.
6. Connaître les possibilités de drainage de la parcelle.

7.1. Exemple de calcule de la ressource en eau (RE) et de la surface irrigable (Kessira,???) :

Dans une région donnée, il est prévu de créer un verger d'agrume (arbres de citron ou orange), qui sera irrigué a partir d'un débit de 15 l/s disponible 25 jours par mois et a raison de 16 heurs par jour. Quelle surface peut-on raisonnablement planter ?

$$RE = (25 \times 16 \times 3600 \times 15) / 1000 = 21600 \text{ m}^3 / \text{mois}$$

Les besoins en eau d'irrigation correspondant a l'ETP culture de juillet (maximum) sachant que la pluviométrie est négligeable : l'ETP et le coefficient cultural des agrumes pour arbre adultes permettent d'évaluer les besoins à :

$B = ETP \times Kc = 183 \times 0.6 = 110 \text{ mm ou } 1100 \text{ m}^3$ d'eau par hectare pendant le mois ou les besoins sont les plus élevés.

La surface maximale (S) de verger à prévoir est donc de :

$$S = 21600 / 1100 = 19.5 \text{ hectare environ.}$$

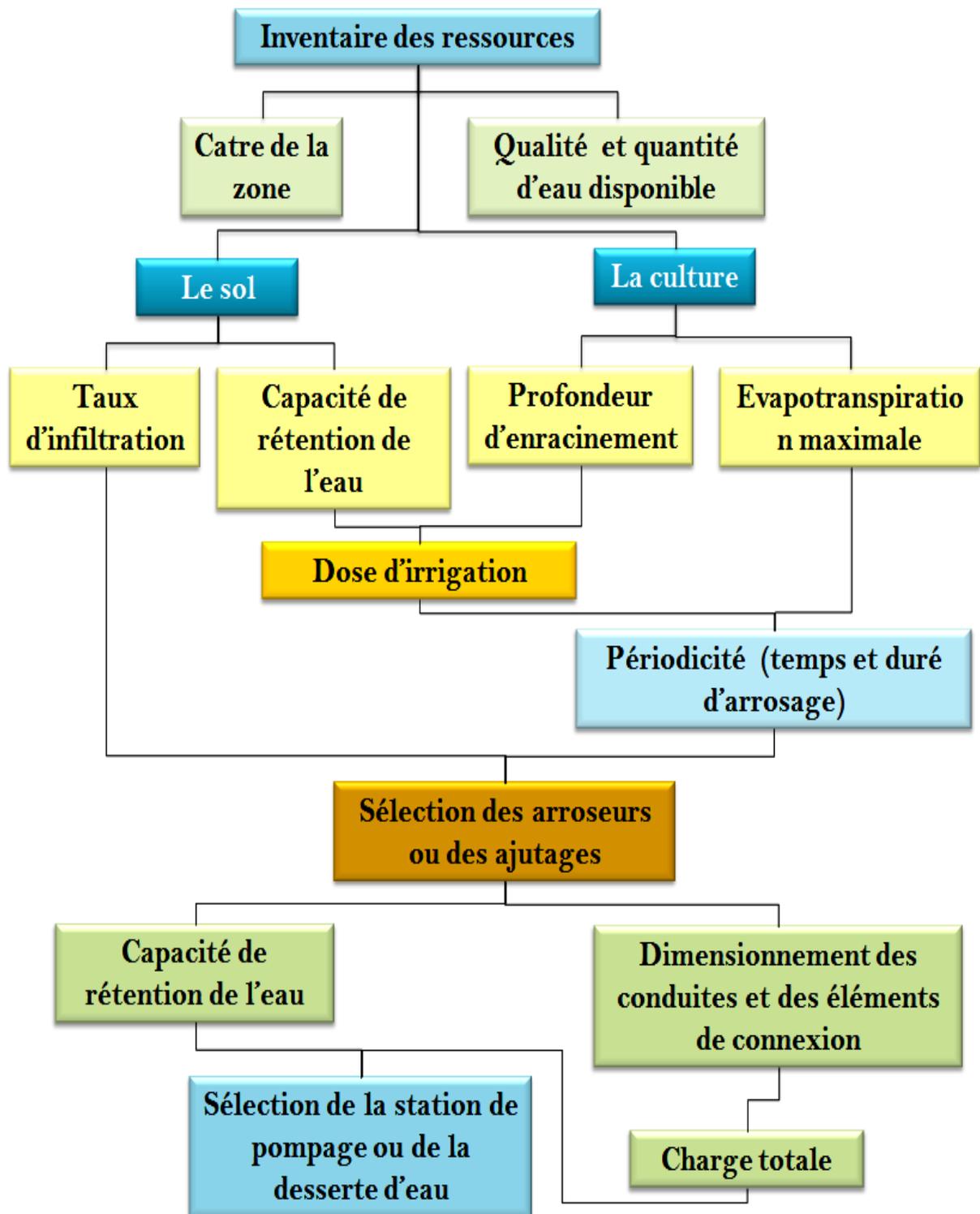


Figure I.3. Etapes fondamentales dans la conception d'un système d'irrigation sous pression (Kessira,.... ?).

7.2. Méthodologie de conception d'un réseau d'irrigation par des logiciels

Actuellement, Il existe des méthodes plus simple et plus rapide pour le dimensionnement des réseaux d'irrigation, le tableau I.2 Montre une manipulation successive de logiciel disponible gratuitement sur le net, et qui permettent de finaliser un projet d'irrigation sous pression, néanmoins, un pré-requis des connaissances de base en la matière est fortement recommandé.

Tableau I.2. Les logiciels utilisés dans la conception d'un réseau d'irrigation (Jasim, 2013).

Les logiciels	Usage	Logo
1 - Google Earth	Pour prendre les coordonnées du terrain et les dimensions de la parcelle choisie.	
2 - SPAW	Pour définir le type et les caractéristiques du sol dans la zone sélectionnée.	
3 - CLIMWAT 2.0	Pour obtenir les données climatiques dans la région sélectionnée.	
4 - CROPWAT ver 8.0	Pour déterminer les besoins d'irrigation brute maximale pour la culture sélectionnée.	
5 - Ve.Pro.L.G.s	Pour obtenir le meilleur modèle de goutte à goutte; L'efficacité du système d'irrigation; La pression d'entrée et le débit total.	
6 - EPANET	Pour dessiner le réseau; sélectionner la meilleure pompe et le meilleur diamètre des conduites.	

8. Eléments du régime d'irrigation

Il faut d'abord connaître quelques paramètres tel que : la surface à irrigation, le type de culture, les caractéristiques climatiques de la région et en fin le type et la texture du sol. On peut, dans un souci d'une meilleure gestion du système, partager la parcelle en plusieurs postes de dimensions (surfaces) plus petites.

8.1. Les besoin du mois de pointe :

Le mois de pointe est le mois, dont la valeur de l'ETP est la plus grande.

$$B_{\text{mois}} (mm) = ETC - Peff - RFU$$

$$ETC(\text{culture}) = K * ETP$$

ETP : Evapotranspiration dans le mois de pointe (le plus sec).

Peff : Pluie efficace dans mois de pointe (page 14).

RFU : Reserve facilement utilisable dépend des caractéristiques du sol (page 25).

Kc : Coefficient cultural, dépend de la nature de la plante.

8.2. Besoins journaliers (B_j) :

B_j (mm/jour) = Besoin du mois de pointe (B_{mois}) / nombre de jour par mois (31)

8.3. En irrigation localisée les besoins en eau vont être réduits (B_i):

B_i (mm/ jour)= $B(0,10+0,9 CS)$

CS : (Couverture du sol) surface couverte par les arbres par rapport à la surface totale en %.

8.4. La dose Pratique (D_p):

D_p (mm) = $(H_{cc} - H_{pf}) Y. Z. P \%$

Tel que :

D'après la texture du sol en % Limons, % Argile, % Sable.

On aura les caractéristiques hydriques pour une telle texture, ou H_{cc} ?

H_{cc} : L'humidité à la capacité au champ (page 22).

H_{pf} : L'humidité (point de flétrissement) (page 22).

Y : Degré de tarissement admissible, $Y = 2/3$

Z : Profondeur d'enracinement (mm).

$$P = \frac{n \cdot S_{pd} \cdot S_h}{E_a \cdot E_r}$$

n : Nombre de points de distribution par arbre;

d_{pd} : Distance entre deux points de distribution voisins du même arbre;

S_h : Largeur de la bande humidifiée.

E_r : Écartement entre rangs d'arbres.

E_a : Espacement des arbres sur les rangs.

$P\%$: Pourcentage du sol humidifié.

8.5. La dose réelle nette (D_{nette}) :

D_{nette} (mm) = 85 % D_p

8.6 Fréquence d'arrosage (T) :

$$T(\text{jours}) = \frac{D_{nette}}{B_j}$$

8.7. La durée d'arrosage (D_a) :

$$\text{La durée d'arrosage (heures)} = \frac{\text{Dose brute} \times El}{E_a}$$

$$\text{La dose brute (mm)} = \frac{\text{Dose nette}}{\eta \cdot Cu}$$

η : Rendement (85 % = 0,85).

Cu : Coefficient d'uniformité (0,9).

El : Ecartement entre les lignes d'arbres.

E_a : Ecartement entre les d'arbres.

Irrigation journalière = La durée d'arrosage /24

8.8. Nombre de rampes dans 1 ha :

$$\text{Nombre de rampe} = \frac{\text{Longueur de la parcelle}}{El}$$

8.9. Nombre de goutteurs:

$$N_g = \text{Surface de parcelle irrigue} / E_R \cdot E_a$$

N_g : Nombre de goutteurs / hectare.

8.10. Caractéristiques des goutteurs :

La pression de l'eau dans la rampe est dissipée par le passage de l'eau à travers le goutteur. Ils sont caractérisés par un faible débit : q (quelques litres par heure), Ce débit est exprimé par la formule suivant:

$$q = K \cdot H^x$$

K : Constante dimensionnelle.

H : Pression en mCe (Mètre colonne d'eau, équivalent à 0.1bar)

x : Coefficient caractérisant le goutteur (**Tab. I.3**).

Les goutteurs disponible dans le commerce sont de type (K,x).

-Exemple d'application :

- Pour les goutteurs en dérivation :

(AZUdrip UNE 69-076)

$$K = 4,1$$

$$x = 0,47$$

- Pour les goutteurs intégrés

$$K = 4,11$$

$$x = 0,46$$

Tableau I.3. Coefficients de variation des goutteurs (Vabre, 2012).

Valeurs	Classification
Coefficient de variation $\leq 0,04$	<i>Excellent</i>
$0,04 \leq$ Coefficient de variation $\leq 0,07$	<i>Moyen</i>
$0,07 \leq$ Coefficient de variation $\leq 0,1$	<i>Marginal</i>
$0,1 \leq$ Coefficient de variation $\leq 0,15$	<i>Déficient</i>
$0,15 \leq$ Coefficient de variation	<i>Généralement Inacceptable</i>

8.11. Porte rampe (collecteur) au milieu de la parcelle Q_{tpr} (l/h):

L'alimentation des rampes se fait au milieu de la parcelle par une porte rampe, dont la longueur de celle de la parcelle.

Nombre goutteur dans la rampe dépend de l'écartement entre les arbres.

Débit en tête de rampe :

$$Q_{tpr} \text{ (l/h)} = (\text{nombre de goutteur}) \times (\text{débit de chaque goutteur})$$

8.12. Débit total de la rampe Q_{tr} (l/h) :

$$Q_{tr} \text{ (l/h)} = (Q_{tpr}) \times (\text{nombre de rampes}) \times (\text{Ecartement entre les rampes})$$

8.13. Calcul des diamètres des rampes D (m):

On utilisera le débit total de la rampe en m³/s

$$Q_{tr} (l/h) = VS, \text{ tel que : } S = \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow D(m) = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}, \text{ (supposons } V=1,5\text{m/s)}$$

8.14. Débit caractéristique :

En irrigation goutte à goutte avec un débit fictif,

$$qc(l/s/ha) = \frac{Bj(m/j) \cdot 10^3 \cdot 10^4}{3600 \cdot 24} \cdot \frac{1}{0,85 \cdot 0,9}$$

Tel que : 0,85 : est l'efficiace du système goutte a goutte, et 0,9 : coefficient de l'uniformité de distribution.

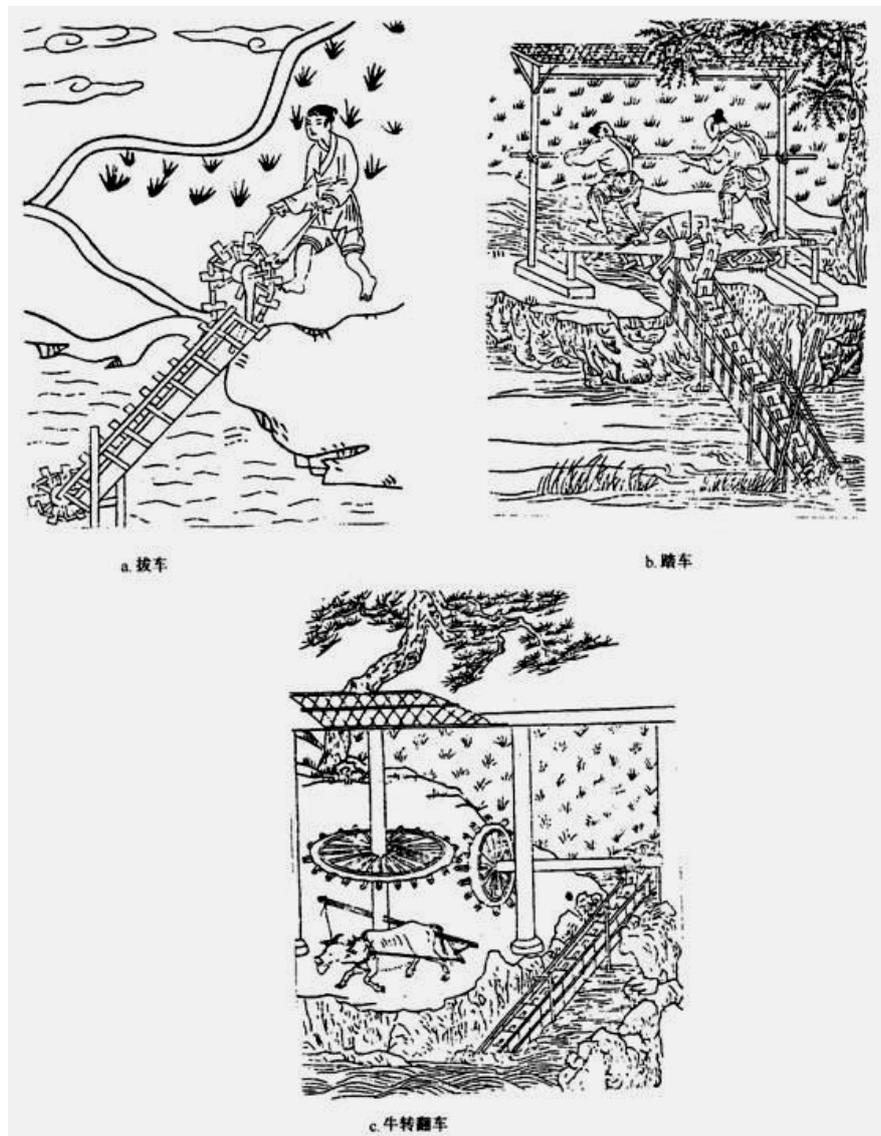


Figure hors texte : différentes pompes à chaîne Tiangong Kaiwu (Chine), encyclopédiste Song Yingxing (1587-1666)

Chapitre 2 :

Paramètres et facteurs intervenant en irrigation.

Chapitre 2 :

Paramètres et facteurs intervenants en irrigation.

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant, aussi bien la plante elle-même que les données climatiques et pédologiques de la région du projet.

Selon Doorenbos et Pruitt (1975) le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration. Les pratiques agronomiques, les techniques d'irrigation, les engrais, les infestations dues aux insectes et aux maladies peuvent aussi influencer le besoin en eau de la plante.

1. Régime de la pluviométrie

1.1 Définition des précipitations

Les précipitations sont toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. Les précipitations constituent l'unique « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants.

1.2 Régime des précipitations

Pour identifier et classer les diverses régions pluviométriques du globe, on a habituellement recouru aux précipitations moyennes mensuelles ou annuelles (évaluées sur une longue période).

La précipitation moyenne annuelle établie sur un grand nombre d'année (hauteur moyenne des précipitations annuelles tombant à un endroit donné) est aussi appelée sa valeur normale, son module annuel ou sa valeur interannuelle. Une classification pluviométrique générale basée sur les données annuelles est fournie par le tableau suivant.

1.2.1. Les étages bioclimatiques en Algérie (Nedjraoui et Bédrani, 2008) :

Les quatre étages bioclimatiques qui constituent le climat méditerranéen de l'Algérie sont représentés dans la figure II.1. Elles se distinguent par :

- **L'étage bioclimatique humide (L'atlas Tellien en Altitude) :**
- **L'étage bioclimatique subhumide (sur la cote et dans L'atlas Tellien) :**

Il est caractérisé par des hivers pluvieux et doux, et des étés chauds et secs, tempéré par des brises de mer ; les précipitations diminuent d'Est en Ouest (1000 – 400 mm) et du nord au sud (1000 à moins de 130 mm). Dans cette zone, les températures moyennes minimales et maximales respectivement oscillent entre 5 et 15°C en hiver et de 25 à 35°C en été. Les vents humides venant de la mer. Cependant, l'influence du désert se fait sentir jusque sur la cote par l'action du (sirocco).vent sec et chaud. Soufflant du Sud au Nord.

○ **L'étage bioclimatique semi aride sur les hautes plaines et dans l'atlas Saharien :**
 Les précipitations sont faibles et irrégulières, de 200 à 400 mm par an ; les pluies sont rares, la température descend souvent au-dessous de 0°C en hiver. En été elle dépasse 30°C et voir même 40°C.

○ **Un étage bioclimatique désertique (hyperaride) dans la région saharienne :**

Les précipitations sont exceptionnelles et très irrégulières provoquant souvent des inondations, elles sont inférieures à 100 mm par an ; le Sahara est une des régions les plus chaudes du monde, les températures de jour atteignent en été 45°C et même 50°C, la température moyenne saisonnière est de 15 à 28°C en hiver et atteint 40 à 45°C en été. Le sirocco est un vent du sud chaud et sec.

Tableau II.1. Régimes pluviométriques du monde (tiré de Champoux, Toutant, 1988)
 (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre3/chapitre3.html>)

Nom	Caractéristiques
<i>Régime équatorial humide</i>	- plus de 200 cm de précipitations annuelles moyennes - à l'intérieur des continents et sur les côtes - région typique de ce régime : bassin de l'Amazone
<i>Régime subtropical humide en Amérique</i>	- entre 100 et 150 cm de précipitation annuelle moyenne - à l'intérieur des continents et sur les côtes - région typique de ce régime : pointe sud-est de l'Amérique du Nord
<i>Régime subtropical sec</i>	- moins de 25 cm de précipitation annuelle moyenne - à l'intérieur des continents et sur les côtes ouest - région typique de ce régime : le sud du Maghreb
<i>Régime intertropical sous l'influence des alizés</i>	- plus de 150 cm de précipitation annuelle moyenne - sur des zones côtières étroites ; humidité - région typique de ce régime : côtes est de l'Amérique centrale
<i>Régime continental tempéré</i>	- entre 10 et 50 cm de précipitation annuelle moyenne - à l'intérieur des continents ; il en résulte des déserts ou des steppes - région typique de ce régime : plaines de l'ouest du continent nord-américain
<i>Régime océanique tempéré</i>	- plus de 100 cm de précipitation annuelle moyenne - sur les côtes ouest des continents - région typique de ce régime : la Colombie britannique, l'Europe
<i>Régime polaire et arctique</i>	- moins de 30 cm de précipitation annuelle moyenne - se situe au nord du 60e parallèle ; formation de grands déserts froids région typique de ce régime : le Grand Nord canadien

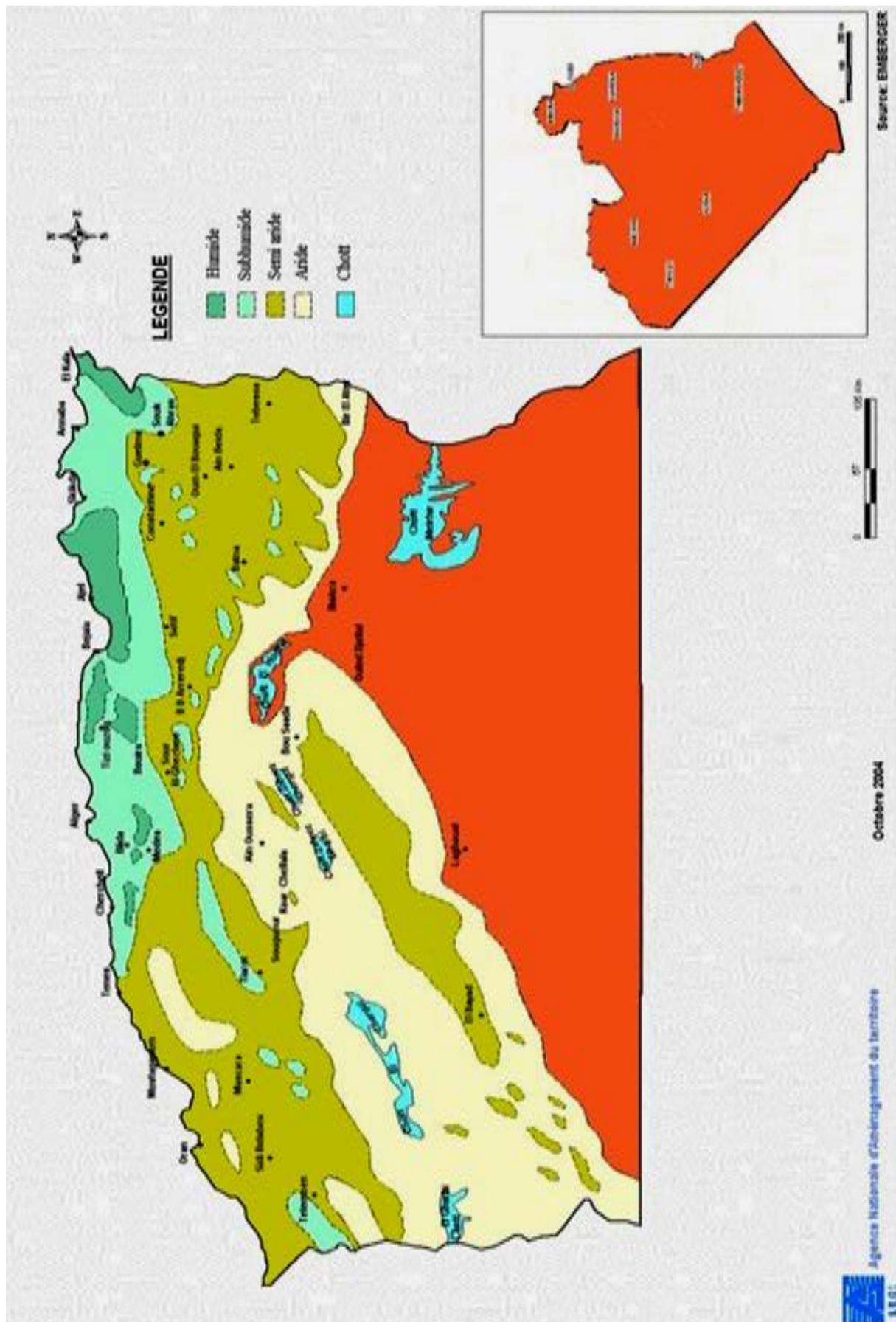


Figure II.1. Carte des étages bioclimatiques en Algérie (Agence Nationale d'Aménagement Du Territoire, 2004). <http://vertigo.revues.org/5375> ; DOI : 10.4000/vertigo.5375

Finalement, les précipitations font partie des processus hydrologiques les plus variables. D'une part, elles sont caractérisées par une grande **variabilité dans l'espace** et ceci quelle que soit l'échelle spatiale prise en compte (régionale, locale, etc.). D'autre part, elles sont caractérisées par une grande **variabilité dans le temps**, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

1.3. Mesures des précipitations

Comme les précipitations varient selon différents facteurs (déplacement de la perturbation, lieu de l'averse, influence de la topographie, etc.), leur mesure est relativement compliquée.

Quelle que soit la forme de la précipitation, liquide ou solide, on mesure la quantité d'eau tombée durant un certain laps de temps. On l'exprime généralement en hauteur de précipitation ou *lame d'eau* précipitée par unité de surface horizontale (mm). On définit aussi son intensité (mm/h) comme la hauteur d'eau précipitée par unité de temps. La précision de la mesure est au mieux de l'ordre de 0,1 mm.

Les différents instruments permettant la mesure des précipitations sont :

- Le **pluviomètre** : instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la quantité d'eau totale précipitée et recueillie à l'intérieur d'une surface calibrée dans un intervalle de temps séparant deux relevés.
- Le **pluviographe** : instrument captant la précipitation de la même manière que le pluviomètre mais avec un dispositif permettant de connaître, outre la hauteur d'eau totale, leur répartition dans le temps, autrement dit les intensités.



Figure II.1. Le pluviomètre



Figure II.2. Le pluviographe

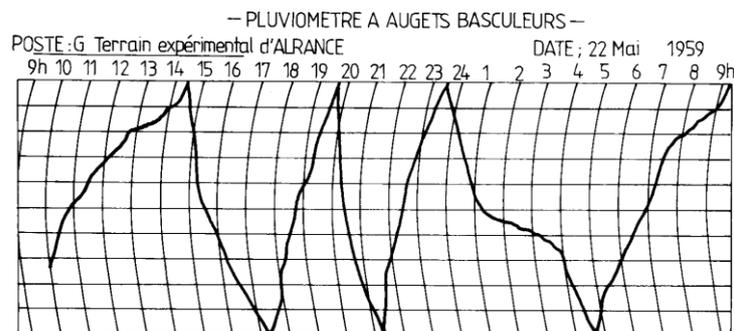


Figure II.3. Papier graphique du pluviographe

1.4. Le réseau d'observation

Pour un bassin versant donné ou une région donnée, les stations pluviométriques forment un réseau d'observations. Elles fournissent des mesures ponctuelles.

Les données relatives aux stations sont d'une haute importance pour les statistiques climatiques, la planification et la gestion des ressources et les projets de construction ; la nature et la densité des réseaux doivent donc tenir compte du phénomène observé, du but des observations, de la précision désirée, de la topographie, de facteurs économiques ou d'autres encore.

La représentativité des précipitations par les mesures est fonction du réseau d'observation. Plus celui-ci est dense, meilleure est l'information et plus l'ensemble des mesures est représentatif de la lame d'eau tombée sur une surface donnée.

Les annuaires pluviométriques regroupent, pour chaque station de mesure, les résultats suivants :

- La hauteur pluviométrique journalière,
- La hauteur pluviométrique mensuelle,
- La hauteur pluviométrique annuelle,
- Le module pluviométrique annuel moyen (moyenne arithmétique des hauteurs de précipitations annuelles),
- La fraction pluviométrique mensuelle (rapport entre le module annuel et le module mensuel considéré),
- Les moyennes, le nombre moyen de jours de pluie, la variabilité des précipitations et des jours de pluie,
- Les cartes de la pluviométrie mensuelle et annuelle.

Certaines de ces valeurs peuvent être régionalisées et présentées sous forme de *cartes d'isohyètes* (cartes d'équi-valeurs de précipitations).

1.5. Pluviométrie efficace

En réalité une fraction seulement de la pluie tombée (et mesurée au pluviomètre), est réellement utilisable par la plante. Il est donc indispensable de connaître cette fraction, d'où la notion de *pluviométrie efficace*.

La part de pluie non utilisée peut être :

— soit de la pluie qui tombe sur un sol déjà à la capacité de rétention ; cette eau en excès est de l'eau gravitaire, qui est évacuée rapidement par percolation (ou par ruissellement si le sol est proche de la saturation);

— soit de la pluie qui ne peut pénétrer que partiellement dans le sol pour des raisons indépendantes de l'état d'humidité de ce dernier et se trouve évacuée par ruissellement.

Lorsque l'on parle de pluviométrie efficace, c'est uniquement du 2^e point qu'il s'agit (l'eau perdue par excès est en effet calculée directement par le bilan hydrique pas à pas).

L'importance de l'eau perdue par ruissellement est variable selon :

- L'intensité des pluies;
- La pente du terrain ;
- La perméabilité du terrain.

Il est très difficile d'apprécier de façon correcte l'efficacité des pluies qui est liée aux conditions locales. Le plus souvent, les formules d'estimation proposées sont des relations linéaires dont les coefficients varient avec les hauteurs d'eau.

En pratique, on pourra utiliser par exemple le modèle suivant proposé par le service agricole de TIRAT (Institut de recherches agronomiques tropicales, Il a intégré le corps de l'ORSTOM).

Si $P < 20$ mm, Ruiss = 0 $\Rightarrow P_{\text{eff}} = P$

Si $P > 20$ mm, Ruiss = 0,15 (P - 20) $\Rightarrow P_{\text{eff}} = P - \text{Ruiss}$

Avec :

P = Pluie journalière en mm ;

Ruiss = Ruissellement en mm;

P_{eff} = Pluie efficace en mm.

Sur des sols bien aménagés, on peut prendre une formule plus simple :

Ruiss = 0,1 P ;

P_{eff} = 0,9 P .

En fait, il est toujours bon de pouvoir procéder à des mesures sur le terrain. (Pour plus de détails, consulter le document de la *FAO*, 1995).

2. L'évaporation

L'évaporation est le processus par lequel de l'eau passe de l'état liquide ou solide, à l'état gazeux par un transfert d'énergie thermique, cependant, l'évaporation dépend de la température, du vent, de la pression atmosphérique, de l'humidité, de la qualité et de la profondeur de l'eau, du type et de la nature du sol et enfin de la forme de la surface exposée.

La figure II.4 représente schématiquement les différents éléments intervenant dans les processus d'interception et d'évapotranspiration.

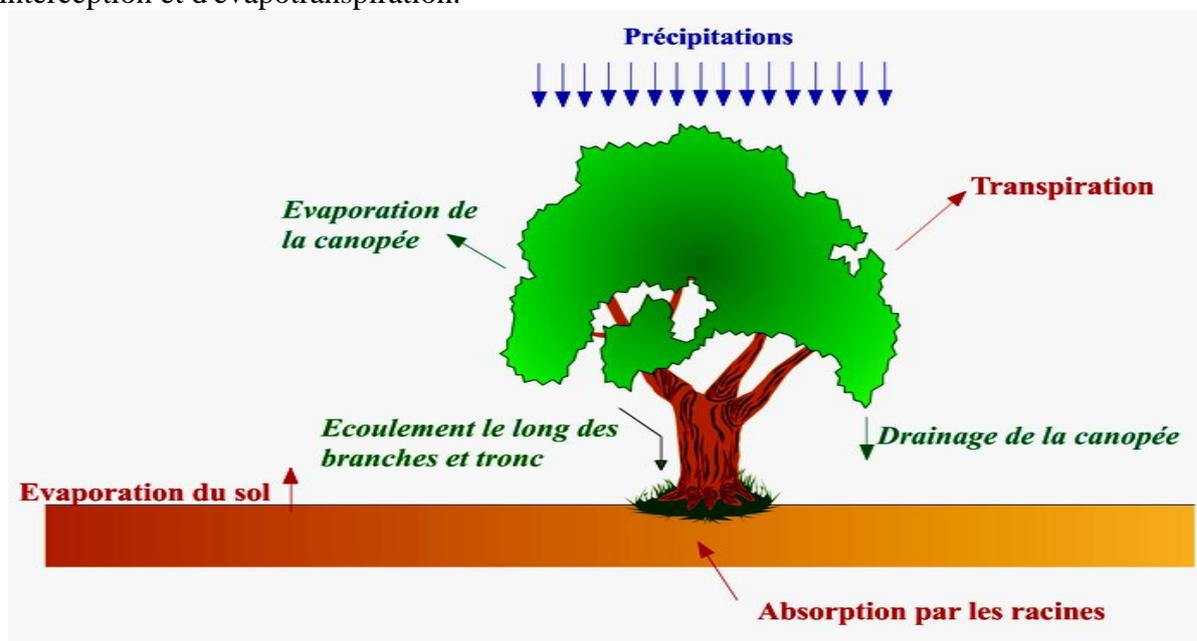


Figure II.4. Principaux éléments intervenant dans les concepts d'interception et d'évapotranspiration.

Les notions liées à l'interception verticale des précipitations, définie comme la fraction de l'eau qui n'atteint jamais le sol. On comprend déjà ici que l'interception telle qu'elle est définie par les hydrologues est l'interception évaporée. C'est pourquoi les auteurs parlent le plus souvent de pertes par interception. De façon analytique, les pertes par interception s'expriment par la relation suivante : $I = P_i - (P_s + P_t)$

Où :

I : Interception (pluie n'atteignant jamais le sol) [mm],

P_i : Pluie incidente [mm],

P_s : Pluie atteignant le sol drainée au travers du couvert végétal (canopée) [mm],

P_t : Pluie atteignant le sol par écoulement le long des branches et des troncs [mm].

L'interception et l'évapotranspiration sont donc intimement liées. Toutefois, l'interception fait toujours appel à l'évaporation.

2.1. L'évaporation et la transpiration

Dans la troposphère, soit la couche de l'atmosphère au voisinage du sol (son épaisseur est de 2 à 3 kilomètres environ), l'air ambiant n'est jamais sec mais contient une part plus ou moins importante d'eau sous forme gazeuse (vapeur d'eau) qui est fournie par :

L'évaporation physique au-dessus des surfaces d'eau libre (océans, mers, lacs et cours d'eau), des sols dépourvus de végétation et des surfaces couvertes par de la neige ou de la glace. La transpiration des végétaux qui permet à la vapeur d'eau de s'échapper des plantes vers l'atmosphère.

En hydrologie, on utilise le terme d'évapotranspiration qui prend en compte la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces d'eau libre et des sols nus et de la transpiration végétale. L'évaporation et plus particulièrement l'évapotranspiration jouent un rôle essentiel dans l'étude du cycle de l'eau. Comme le montre la figure suivante (Figure II.5), ces mécanismes sont importants en regard des quantités de précipitations incidentes aussi bien à l'échelle des continents qu'à celle du bassin versant.

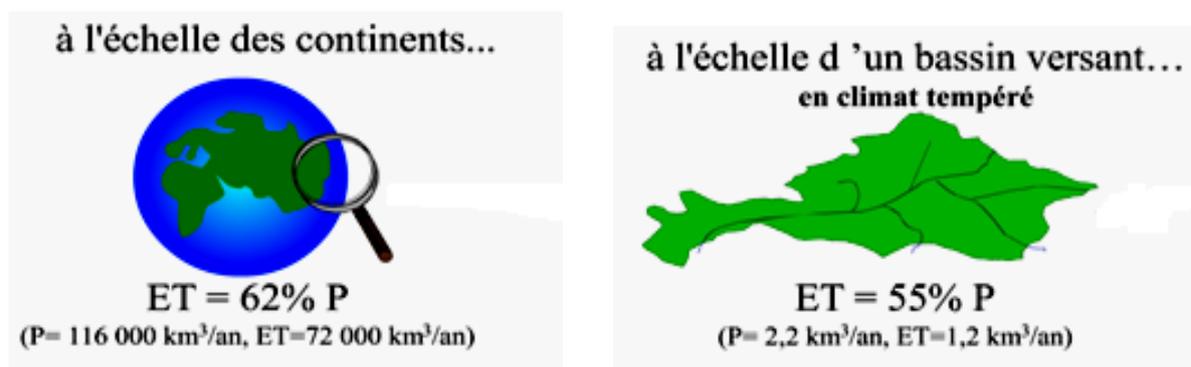


Figure II.5. Importance relative (en %) de l'évapotranspiration (ET) par rapport à la précipitation incidente (P) à différentes échelles spatiales (FAO, 1985).

L'évaporation dépend essentiellement de deux facteurs :

2.1.1. Quantité de chaleur disponible

La quantité d'eau pouvant être évaporée à partir d'une surface dépend de la quantité de chaleur provenant du soleil. Cette quantité de chaleur varie, d'une part, selon les conditions géographiques (gradient de latitude), et d'autre part, selon l'élévation de la surface liquide par rapport au niveau de la mer (gradient altimétrique).

2.1.2. Température de l'air et de l'eau

Une certaine relation existe entre l'évaporation et la température de la surface évaporante. Le taux d'évaporation est, en particulier, une fonction croissante de la température de l'eau.

Le vent joue un rôle essentiel sur les processus d'évaporation car c'est lui qui permet, par le mélange de l'air ambiant, de remplacer au voisinage de la surface évaporante, l'air saturé par de l'air plus sec. En effet, l'air au voisinage de la surface évaporante va se saturer plus ou moins rapidement et par conséquent stopper le processus d'évaporation. Le vent, par le biais de sa vitesse mais aussi de sa structure verticale et de ses turbulences, joue un rôle prépondérant dans le processus d'évaporation. Les turbulences permettent entre autre l'ascension de l'air humide, tandis que l'air sec descend et se charge d'humidité.

2.2 Evapotranspiration d'un sol couvert par de la végétation

La notion d'évapotranspiration regroupe les deux processus, à savoir l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration par les plantes. Sur un sol présentant une couverture végétale, même partielle, les échanges par transpiration sont quantitativement plus importants que les échanges par évaporation directe.

2.2.1. Rappel sur les processus physiques de la transpiration des végétaux

La transpiration peut se définir comme l'émission ou l'exhalation de vapeur d'eau par les plantes vivantes. La plante prélève l'eau du sol par l'intermédiaire de ses racines munies de cellules épidermiques. Le développement du système racinaire est lié à la quantité d'eau disponible dans le sol ; les racines peuvent atteindre des profondeurs très variables, d'une dizaine de centimètres à plusieurs mètres. L'absorption de l'eau est réalisée par osmose ou par imbibition. L'eau circule à l'intérieur des canaux du système vasculaire de la plante pour atteindre les feuilles. Le siège de l'évaporation se situe alors essentiellement au niveau des parois internes des stomates. Une certaine évaporation peut se produire directement au travers de la cuticule des feuilles (Figure II.6).

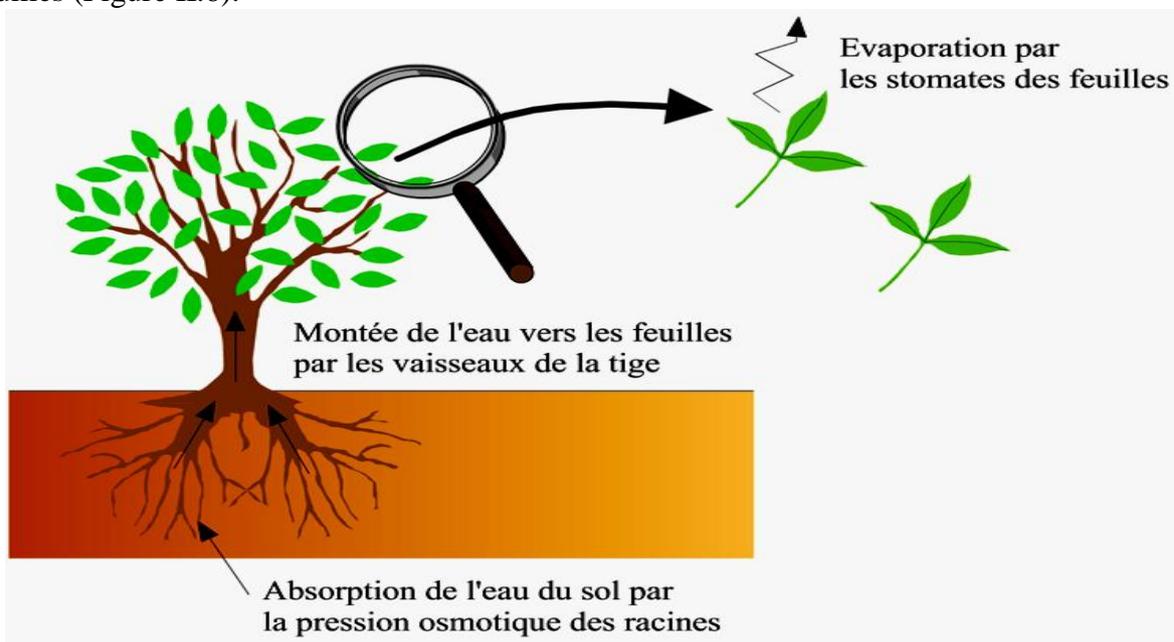


Figure. II.6. Représentation schématique du chemin de l'eau à travers la plante.

Outre sa participation au cycle hydrologique comme source de vapeur d'eau dans l'atmosphère, la transpiration a bien sûr de multiples autres fonctions, comme véhicule des éléments nutritifs dans la plante ou comme système de refroidissement des feuilles.

La quantité d'eau transpirée par la végétation va dépendre de facteurs météorologiques (les mêmes que pour le processus physique d'évaporation), de l'humidité du sol dans la zone racinaire, de l'âge et de l'espèce de la plante, ainsi que du développement de son feuillage et de la profondeur des racines.

2.2.2. Notions d'évapotranspiration de référence, maximale et réelle

On peut distinguer trois notions dans l'évapotranspiration :

- l'évapotranspiration de référence (ET_0) ou évapotranspiration potentielle, est défini comme l'ensemble des pertes en eau par évaporation et transpiration d'une surface de **gazon** de hauteur uniforme, couvrant totalement le terrain, en pleine période de croissance, recouvrant complètement le sol est alimenté abondamment en eau.

- L'Évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée est définie à différents stades de **développement végétatif**, lorsque l'eau est en quantité suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales (sol fertile, bon état sanitaire, ...).
- L'Évapotranspiration réelle (ETR) est **la somme** des quantités d'eau évaporées par **le sol** et par **les plantes** quand le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

Pour la culture de référence, en l'occurrence le gazon, on a donc : $ETR \leq ETM \leq ET_0$.

Pour tous les autres végétaux, seule la relation $ETR \leq ETM$ est toujours valable tout au long de l'année.

D'une manière générale, l'évapotranspiration est conditionnée par : les conditions climatiques, les conditions liées au sol et à la végétation.

2.2.3. Evaluation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration d'un sol couvert par de la végétation est difficile à estimer. Pour faciliter la tâche et dans un souci d'homogénéisation des modèles, les chercheurs sont arrivés à déterminer les besoins en eau des cultures, équivalents à l'ETM, par la correction de l'évapotranspiration potentielle (ET₀) d'une culture de référence, qui est normalement le gazon, par un coefficient appelé "coefficient cultural" (k_c) en utilisant la formule suivante (Fig. II.7) : $ETM (culture) = k_c ET_0$.

L'échelle de temps sur laquelle les besoins sont calculés peut être l'heure, la journée, la décade, le mois ou la phase de croissance, selon l'objectif poursuivi et la disponibilité de données. La valeur du coefficient k_c est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance, mais aussi par la fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle de la culture. k_c est toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire. Les valeurs du coefficient k_c sont théoriquement comprises entre 0 et 1, selon le stade de la culture.

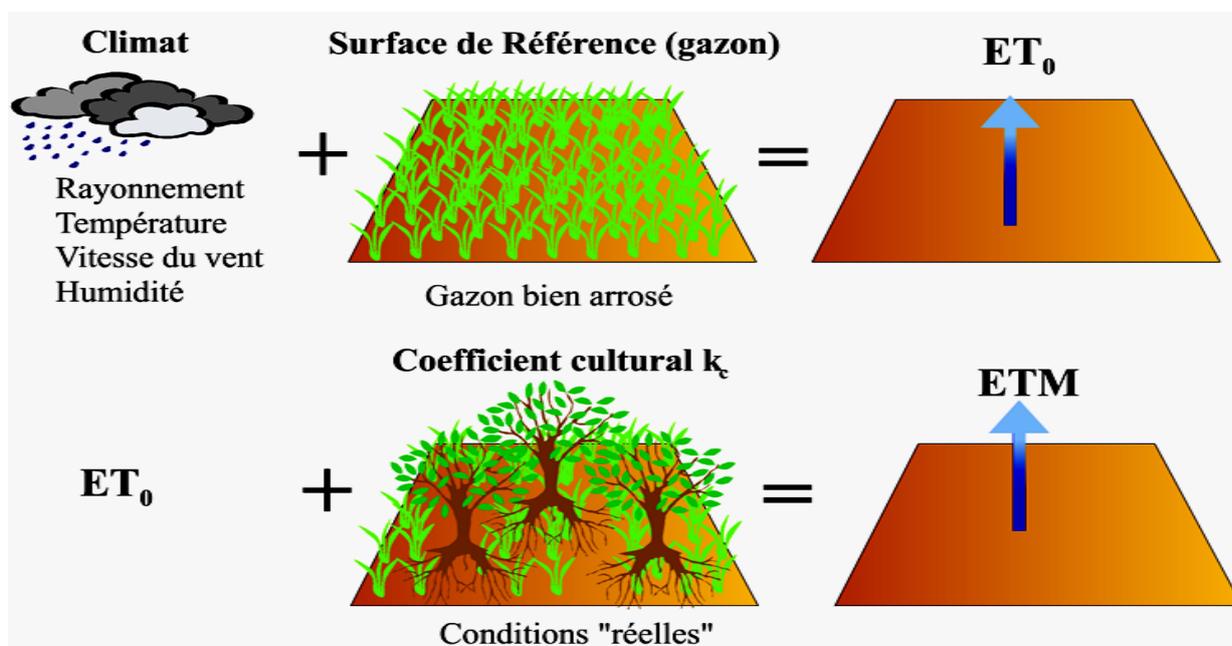


Figure II.7. Besoin en eau des cultures (ETM) et évapotranspiration de référence (ET₀). (FAO, 2008)

La détermination de l' ET_0 peut être faite : soit directement à l'aide des lysimètres; soit indirectement à l'aide de formules empiriques et théoriques (ou à bases physiques) qui combinent des variables climatiques.

- Formules empiriques ou semi-empiriques

La formule de Turc (1961) est en revanche une relation qui peut être appliquée dans les régions tempérées pour estimer l'évapotranspiration de référence. Elle s'écrit dans son expression mensuelle ou décadaire :

$$ET_0 = 0,4 \cdot (R_G + 50) \cdot \frac{t}{t + 15} \quad (\text{Pas de temps mensuel})$$

$$ET_0 = 0,13 \cdot (R_G + 50) \cdot \frac{t}{t + 15} \quad (\text{Pas de temps décadaire})$$

Avec :

t : Température moyenne de la période considérée t en ($^{\circ}\text{C}$),

ET_0 : Evapotranspiration de référence mensuelle ou décadaire (mm),

R_G : Rayonnement global mensuel ou décadaire ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$).

Cette formulation est très simple d'emploi mais ne permet pas de prendre en compte les effets du vent. De plus, elle n'est pas applicable à des échelles de temps réduites (pas de temps horaire ou journalier) qui sont justement celle qui intéresse l'ingénieur lors de projets d'irrigation.

- Formules à base physique

Parmi les formules théoriques proposées pour le calcul de l'évapotranspiration de référence, on trouve celle proposée par Penman (1948) qui a une signification physique bien définie puisqu'elle résulte de la combinaison du bilan d'énergie avec le transfert aérodynamique. Nous retiendrons surtout la formule de Penman-Monteith (1981) qui dérive de l'équation de Penman (1948) originale mais avec quelques modifications (introduction de la notion de résistance de surface).

La forme générale de l'équation de Penman (1948) est :

$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda(\Delta + \gamma)}$$

Où :

ET_0 : Evapotranspiration de référence calculée par la relation de Penman (mm/s),

R_n : rayonnement net (W/m^2),

Δ : Pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [$\text{kPa}/\text{C}^{\circ}$],

ρ : Densité de l'air à pression constante (kg/m^3),

c_p : Capacité thermique de l'air humide ($\text{J}/\text{kg}/\text{C}^{\circ}$),

δe : Différence entre la pression de vapeur saturante e_s (kPa) et la pression de vapeur effective dans l'air e_a (kPa) ($\delta e = e_s - e_a$),

r_a : Résistance aérodynamique [s/m] (descripteur météorologique traduisant le rôle des turbulences atmosphériques dans le processus d'évaporation),

λ : Chaleur latente de vaporisation de l'eau (J/kg),

γ : Constante psychrométrique ($\text{kPa}/\text{C}^{\circ}$).

La pression de vapeur saturante (e_s), la pression de vapeur effective dans l'air (e_a) (en kPa et avec la température en degrés Celsius) etc. On a :

$$e_s = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T}{T + 237.3}\right)$$

Avec : T, température de l'air (°C).

On obtient encore la relation suivante : $e_a = e_s \cdot (R_h / 100)$

Où R_h est l'humidité relative de l'air (%).

Et finalement :

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T + 237.3)^2}, \text{ Avec } \Delta \text{ en (kPa/}^\circ\text{C}^2)$$

L'introduction de la notion de résistance de surface (r_s) dans l'équation de Penman conduit à la formulation de l'équation de **Penman-Monteith (1981)** :

$$ET_0 = \frac{R_n \cdot \Delta + \frac{\rho \cdot c_p \cdot \delta e}{r_a}}{\lambda \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]}$$

C'est la disponibilité en données météorologiques qui conditionnera le choix d'une formulation au détriment d'une autre ainsi que ses possibilités d'application pour la région d'étude concernée.

3. Les climogrammes de BAGNOULS – GAUSSEN (1953)

Bagnouls et **Gausсен** (1953) , ont introduit la notion de diagramme pluviothermique, en n'utilisant que la température et les précipitations , combinées de façon à faire apparaître les saisons humides, et les saisons sèches, ces saisons sont définies graphiquement, en reportant sur l'axe des ordonnées les précipitations moyennes mensuelles, et sur le deuxième axe des ordonnées, opposé le double de la température moyenne mensuelle et sur l'axe des abscisses les mois. (**fig. II. 8**). Pour la même période ; chaque fois que la courbe des températures passe au dessus de celle des précipitations on a une période sèches, et une période humide dans le cas inverse.

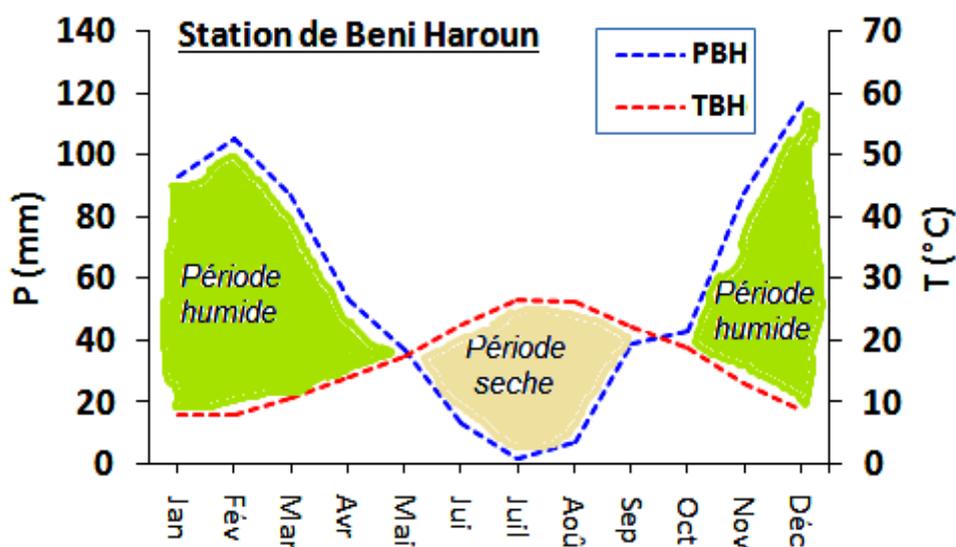


Figure II.8. Exemple de diagramme pluviothermique (station de Béni Haroun, série 1998/2015)

4. Humidité relative

L'humidité relative compare la quantité d'eau présente dans l'air à la quantité qu'il faudrait pour saturer cet air à une température donnée.

Par exemple, si l'humidité relative est de 50 %, cela signifie que l'air contient la moitié de la quantité maximale de vapeur d'eau qu'il peut contenir. L'air est saturé lorsque l'humidité relative atteint 100 %. Plus l'humidité relative est grande, plus l'air est humide.

4.1. Mesure de l'humidité relative

On mesure l'humidité relative de l'air à l'aide de deux thermomètres, un thermomètre ordinaire (sec) et un thermomètre dont le bulbe est entouré d'un coton imbibé d'eau (mouillé). L'eau du réservoir dans laquelle trempe le coton est à la température de l'air ambiant. Ce système de 2 thermomètres se nomme « psychromètre » (Fig II.9).

- Le thermomètre sec indique la température de l'air.
- Le thermomètre mouillé indique normalement une température plus basse que celle du thermomètre sec. C'est que de l'eau s'évapore du coton imbibé et on sait que l'évaporation produit un refroidissement. À cause de l'évaporation, l'eau qui reste dans le coton se refroidit et le thermomètre indique une température plus basse que le thermomètre sec. Plus l'air est sec, plus il y a d'eau qui s'évapore du coton et plus la température du thermomètre mouillé est basse. La différence de température entre les deux thermomètres est donc d'autant plus grande que l'air est sec.

Au contraire, si l'air est très humide, peu d'eau s'évaporera du coton et la température du thermomètre mouillé diminuera. Lorsque l'air est saturé (100 % d'humidité relative), il n'y a pas d'évaporation et le thermomètre mouillé indique la même température que le thermomètre sec.

Utilisez le tableau II.2 pour calculer le pourcentage d'humidité relative de l'air. Il suffit de trouver le point de rencontre de la température du thermomètre mouillé avec celle du thermomètre sec.

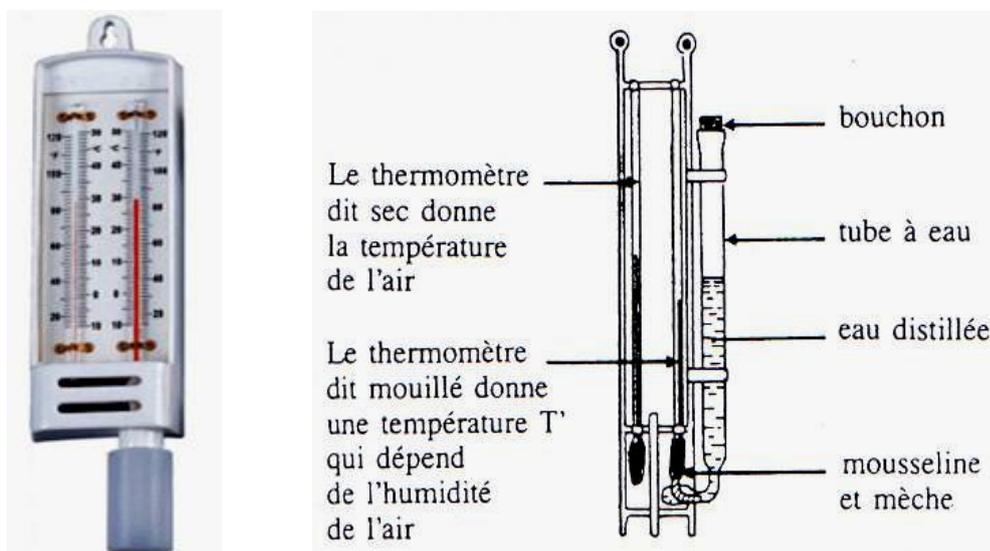


Figure II.9. Psychromètre.

Tableau II.2. Estimation de l'humidité relative.

		Température du thermomètre sec (Celsius)													
		10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30			
Température du thermomètre mouillé (Celsius)	2	15													
	4	34	21	10											
	6	55	39	26	15	7									
	8	77	58	42	30	20	12	6							
	10	100	78	60	46	34	24	17	10						
	12		100	79	63	49	37	28	20	14	5				
	14			100	81	65	51	40	31	24	18	9			
	16				100	82	66	54	43	34	27	21			
	18					100	83	68	56	46	37	30			
	20						100	83	69	58	48	39			
	22							100	84	71	59	50			
	24								100	85	72	61			
	26									100	85	73			
	28										100	86			
	30											100			

5. Vitesse et fluctuation des vents

Le vent se caractérise par deux grandes variables par rapport au temps : sa vitesse (m/s) et sa direction, ce paramètre est mesuré dans toutes les stations climatiques, par des équipements assez simple, tel que les anémomètres, a girouette ou a hélice (fig. II.10).



Anémomètre à girouette



Anémomètre à hélice

Figure II.10. .Mesure du vent.

6. Reliefs et topographie

La notion de relief renvoie à celle desq ses deux composantes principales, **l'altitude et la pente**.

Les caractères généraux du climat de montagne liés à l'altitude (diminution des températures ; accroissement des précipitations et de la couverture nivale (neige); augmentation de l'insolation ; brièveté de la période de végétation ; gel tardif) ou au modelé topographique (influence de l'exposition), **entraîne un tri écologique des êtres vivants et notamment des végétaux, suivant leur physiologie.**

La pente, qui détermine une géomorphologie particulière liée à la gravité (érosion et entraînement des matériaux; ruissellement des eaux ; avalanches ; mouvements de terrain ; dépôts de terrains remaniés) représente également une contrainte forte pour l'installation et la pérennité des plantes.

7. L'eau dans le sol (rappel)

Dans le sol, l'eau se déplace des zones humides vers les zones plus sèches. Son déplacement est multidirectionnel. Il est influence par les caractéristiques du sol (profondeur, texture, porosité), celles du sous-sol et celles de la plante (systèmes raculaire et aérien). Dans les sols tassés, compacts et a forte teneur en argile, l'écoulement de l'eau est lent, contrairement aux sols de texture légère qui sont dotes d'un pouvoir de filtration plus élevé.

7.1. Notions sur la réserve utile

L'eau perdue par la plante lors de sa transpiration sous l'effet de la demande climatique doit être restituée pour que la culture puisse continuer a végéter et a produire. Cette eau est puisée par les racines dans les réserves du sol. La quantité d'eau disponible a la plante s'appelle **la réserve utile (RU)**. Elle est exprimée en millimètre d'eau (mm) et est définie par la différence entre l'humidité du **point de ressuyage (saturation)** et celle du **point de flétrissement (θ_{pfp})**, c.-a-d. L'humidité mesurée a la capacité au champ (θ_{cc}) et celle qui est mesurée au point de flétrissement permanent (**Fig. II.11**).

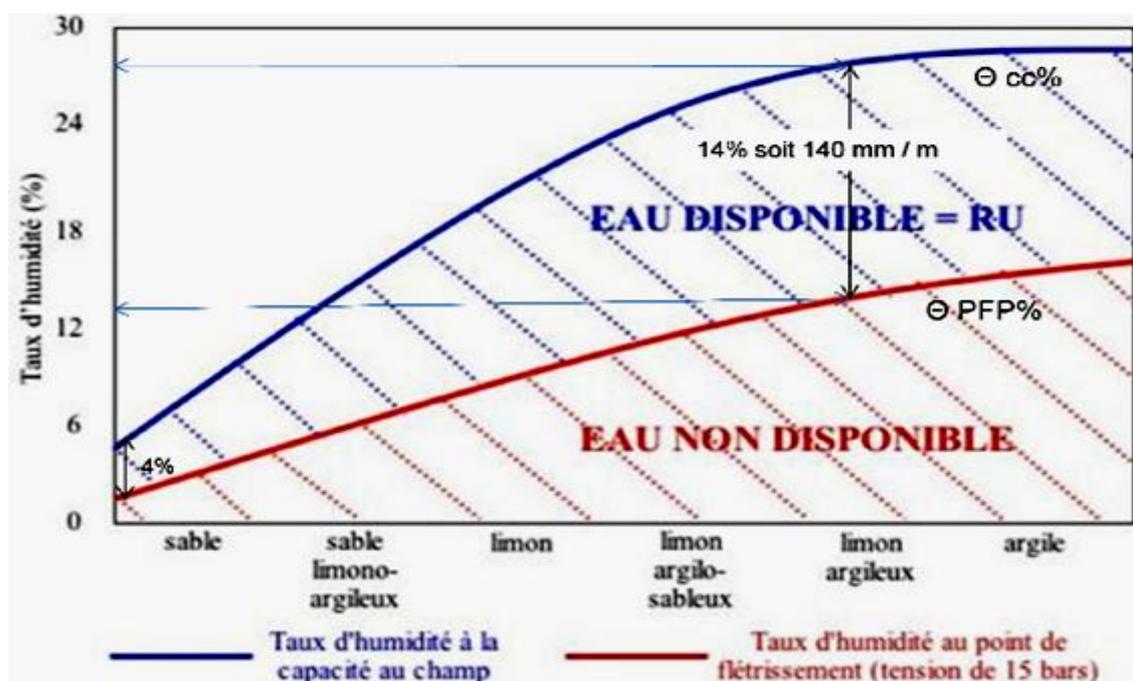


Figure II.11. Ordre de grandeur de la réserve utile du sol RU en mm, pour différentes textures. (www.afidol.org, Adapte par Buckman et Brady, 1965).

7.2. L'humidité à la capacité au champ (θ_{cc}) est l'humidité d'un sol ressuyé dans des conditions ou le drainage est assuré librement. Le sol est théoriquement plein. Elle est mesurée à 1/3 bar.

7.3. L'humidité au point de flétrissement permanent (θ_{pfp}) est mesurée au laboratoire a 15 bars. C'est l'humidité du sol pour laquelle l'eau est retenue avec une intensité supérieure aux forces de succion des racines et dans ce cas, l'eau n'est pas accessible à la plante.

Au delà du point de ressuyage, le sol est saturé en eau ; la plante peut se trouver en situation d'asphyxie. Au delà du point de flétrissement, la plante ne peut plus absorber l'eau.

La figure II.13 et le Tableau II.4 donnent un ordre de grandeur de la réserve utile du sol RU en mm, pour différentes textures (*www.afidol.org*, Adapter par Buckman et Brady, 1965).

La réserve utile est exprimée par : $RU = (\theta_{cc} - \theta_{pfp}) \cdot d_a \cdot D$

Avec : d_a : la densité apparente du sol (g/cm^3), et D : est la profondeur des racines (m).

Les sols sableux ont une forte proportion en éléments grossiers et une faible capacité de rétention de l'eau. Les sols argileux et riches en matière organique et en humus emmagasinent d'importantes quantités d'eau de par leur proportion en particule fines, mais ceci n'implique pas nécessairement une plus grande disponibilité de cette eau à la plante (fig. II.13).

8. La réserve facilement utilisable (RFU)

Est la quantité d'eau accessible à la plante sans difficultés (Figure II.12). C'est une fraction de RU. La valeur de RFU représente 30% à 60% de la RU, en fonction du type de sol, de la plante, de la profondeur des racines (Tableau II.5), des conditions climatiques et du mode d'irrigation (FAO, 1995), ce pourcentage est noté (p) et exprime est exprimé en degré de tarissement de l'eau dans le sol.

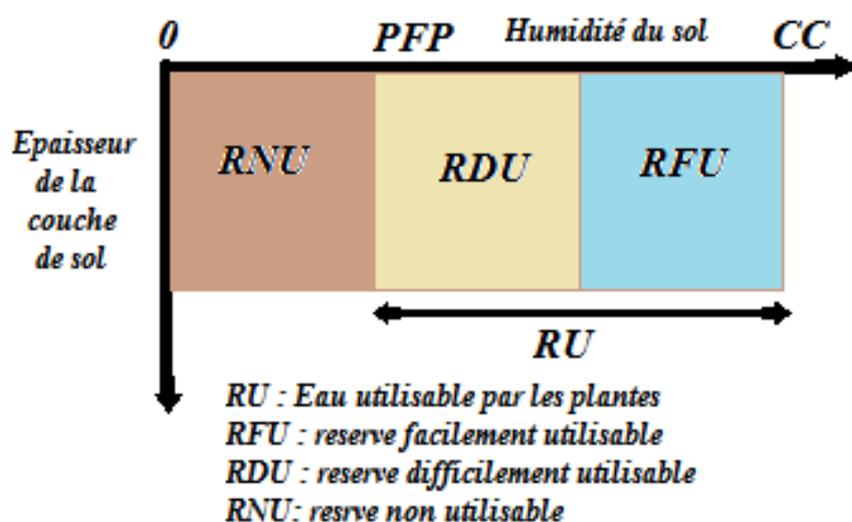


Figure II.12. Représentation schématique des composantes de la réserve en eau du sol (Masmoudi Charfi, 2012).

- Les observations de terrain ont montré que moins le tarissement en eau était important, plus l'eau était disponible aux cultures et plus élevés sont leurs développements et rendements.
- Lorsque RFU est consommée, la plante puise dans la **réserve difficilement utilisable** (RDU) si elle le peut ; elle ferme alors en partie ses stomates.
- Lorsque le sol atteint son point de flétrissement permanent, les racines ne peuvent plus absorber l'eau et les plantes finissent par flétrir.

Le tableau II.3 présente un ordre de grandeur de quelques paramètres du sol en fonction de sa texture.

Exemple de détermination de la quantité d'eau retenue dans une couche de sol à partir de sa capacité au champ.

Données:

La capacité au champ (θ_{cc}) d'une couche de sol de 45 cm est de 18%.

Le rapport $\theta_{cc} / \theta_{pfp} = 1,85$.

La densité apparente du sol est $d_a = 1,2 \text{ g/cm}^3$

Question:

Quelles est la quantité d'eau, « S_a » retenue dans cette couche de sol en m^3/ha ?

Réponse:

$\theta_{cc} = 18\%$,

$\theta_{pfp} = \theta_{cc} / 1,85 = 9,7\%$

$\theta_{cc} - \theta_{pfp} = 18\% - 9,7\% = 8,3\%$

$RU = (\theta_{cc} - \theta_{pfp}) \cdot d_a \cdot D = 8,3 \times 1,2 \times 10 = 99,6 \text{ mm/m}$

Pour une profondeur de 45 cm, la réserve du sol est de:

$S_a \text{ (mm)} = 8,3 \times 1,2 \times 10 \times 0,45 = 44,8 \text{ mm}$, avec $1 \text{ mm} = 1 \text{ m}^3/\text{ha}$, soit alors : $44,8 \text{ m}^3/\text{ha}$

Tableau II.3. Valeurs de quelques propriétés physiques du sol en fonction de sa texture.
(Phocaides, 2008, in Masmoudi Charfi, 2012).

	<i>Texture lourde (fine)</i>	<i>Texture moyenne</i>	<i>Texture légère (grossière)</i>
<i>Humidité de saturation</i>	55-65 %	35-45 %	25-35 %
<i>Humidité à la capacité au champ</i>	32-42 %	18-26 %	8-10 %
<i>Humidité au point de flétrissement</i>	20-24 %	10-14 %	4-5 %
<i>Rapport : $\theta_{cc} / \theta_{pfp}$</i>	1,75/1	1,85/1	2/1
<i>Densité apparente du sol (d_a en g/cm^3)</i>	1,0-1,2	1,2-1,4	1,4-1,6
<i>Tension du sol a la capacité au champ (bar)</i>	0,3	0,2	0,1
<i>Tension du sol au point de flétrissement permanant (bar)</i>	15,0	15,0	15,0
<i>Temps requit pour passer de la saturation à la capacité au champ (h)</i>	36-89	24-36	18-24
<i>Taux d'infiltration (mm/h)</i>	2-6	83-16	25-75

9. Notions sur la texture du sol

La texture (ou granulométrie) d'un sol est définie par le pourcentage d'éléments minéraux présents dans le sol. Cela concerne, par ordre de taille croissant, *les argiles* (moins de 2 microns de diamètre), *les limons* (de 2 à 20 microns), *les sables* (de 20 microns à 2 mm), au-delà on parle d'éléments grossiers (cailloux, galets, roches, etc.). Dans un substrat, elle peut être déterminée du point de vue quantitatif, par une analyse mécanique, elle détermine le type de sol selon l'importance en % de tel ou tel composant, on utilisant l'outil triangle de la texture de sol figure II.13), on peut déterminer les différentes textures des sols.

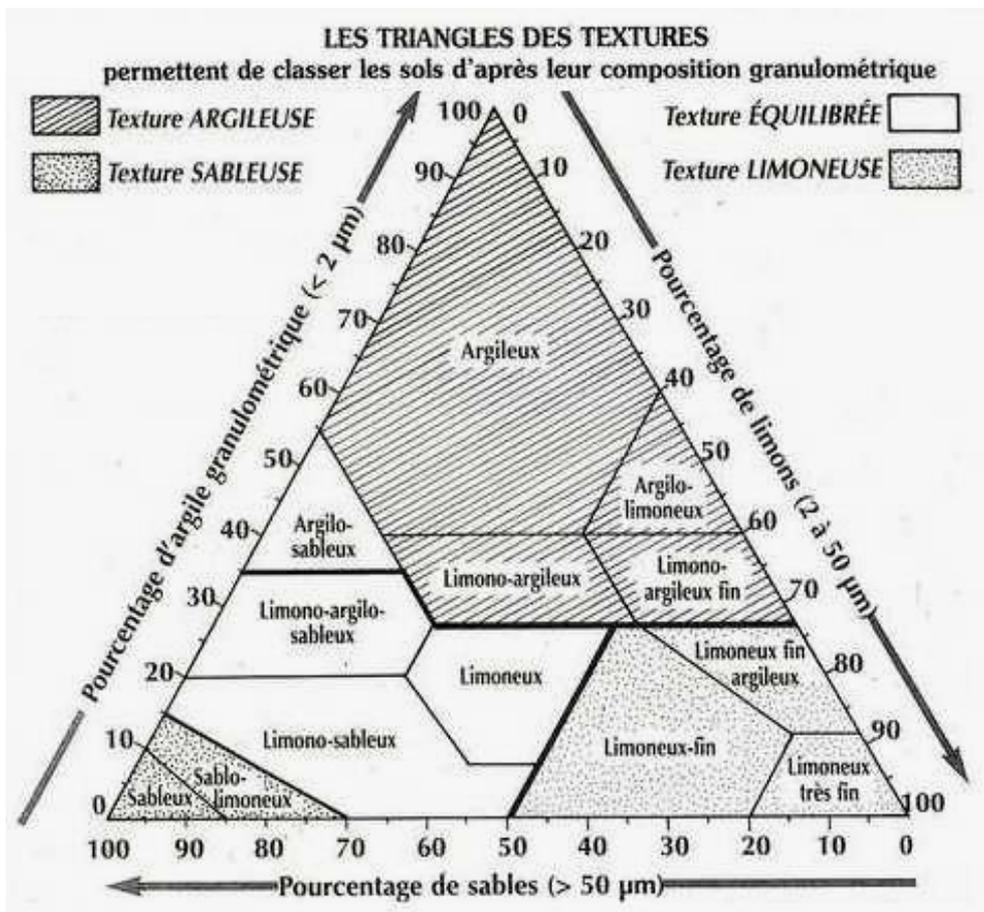


Figure II.13. Triangle des textures, Jamagne et al., 1967. (www.afidol.org).

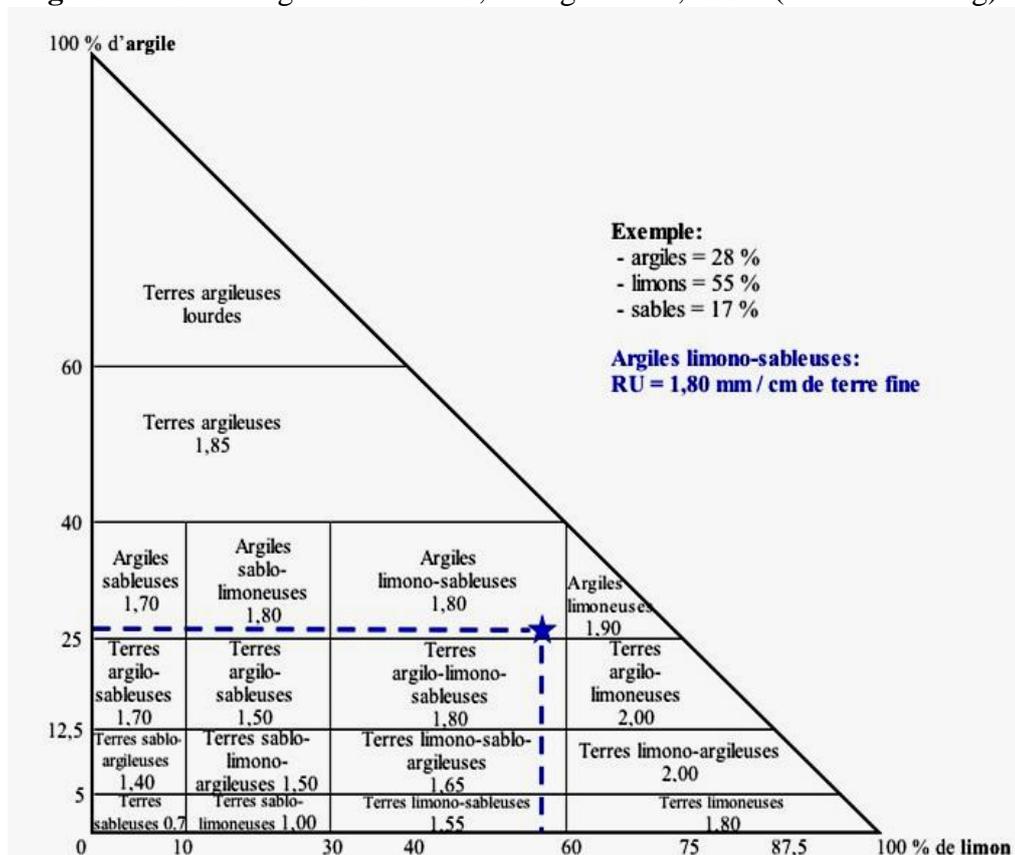


Figure II.14. Exemple de calcul de la RU à partir du triangle des textures, GEPA, 1963 (groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée) (www.afidol.org).

Tableau II.4. Caractéristiques physiques de sols (selon Israesen-Hansen, 1962)

<i>Texture du sol</i>	<i>Perméabilité</i>	<i>Porosité</i>	<i>Masse volumique</i>	<i>Capacité de rétention</i>	<i>Point de flétrissement</i>	<i>Réserve utile</i>
	<i>cm/h</i>	<i>%</i>	<i>Kg.dm-3</i>	<i>% vol</i>	<i>% vol</i>	<i>mm.m3 profondeur</i>
<i>Sablonneux</i>	5	38	1.65	15	7	80
<i>Sablo-limoneux</i>	2.5	43	1.50	21	9	120
<i>Limoneux</i>	1.3	47	1.40	31	14	170
<i>Argilo-limoneux</i>	0.8	49	1.35	36	17	190
<i>Limono- argileux</i>	0.25	51	1.30	40	19	210
<i>Argileux</i>	0.05	53	1.25	44	21	230

Tableau II.5. Quelques valeurs des profondeurs d'enracinement (selon Israesen-Hansen, 1962)

<i>Cultures</i>	<i>Profondeurs (m)</i>	<i>Cultures</i>	<i>Profondeurs (m)</i>	<i>Cultures</i>	<i>Profondeurs (m)</i>
<i>Agrumes</i>	100-120	<i>Fraises</i>	30.40	<i>Pomme de terre</i>	60
<i>Arachides</i>	45	<i>Haricots</i>	60	<i>Légumes</i>	30-60
<i>Bais (canne)</i>	90	<i>Luzernes</i>	90-180	<i>Salades</i>	30
<i>Betteraves</i>	60-90	<i>Mais</i>	75	<i>Sorgho</i>	75
<i>Céréales</i>	60-75	<i>Melons</i>	75-90	<i>Soja</i>	60
<i>Carottes</i>	45-60	<i>Noix</i>	90-180	<i>Tabac</i>	75
<i>Choux</i>	45-60	<i>Oignons</i>	45	<i>Tomates</i>	30-60
<i>Concombres</i>	45-60	<i>Patates douces</i>	90	<i>Vignes</i>	90-180
<i>Coton</i>	120	<i>Pois</i>	75		
<i>Arbres fruitiers à feuilles caduques</i>	100-120	<i>Pâturages graminées</i>	45	<i>Pâturage (avec trèfle)</i>	60

10. Notions sur la Température

Lorsqu'on mesure la température de l'air, il faut s'assurer que les thermomètres sont placés à l'abri du soleil, avec une ventilation naturelle s'en trouve diminuée. Des écrans spéciaux contre le rayonnement ont été conçus pour les thermomètres à thermocouples. Les mesures de la température de l'air doivent être faites avec une exactitude de $\pm 0,3^{\circ} \text{C}$.

La plupart des cultures cessent de se développer quand la température descend au-dessous d'un seuil critique. De même, des températures très élevées (au-dessus de $30-35^{\circ}\text{C}$) ont un effet néfaste sur la croissance. Entre la température minimale nécessaire à la croissance végétale et la température optimale de photosynthèse, le taux de croissance augmente plus ou moins linéairement avec la température; au-delà, il reste stable à l'intérieur de la fourchette des températures optimales, pour retomber à des températures plus élevées. Il y a interaction entre la température et le rayonnement solaire. Le potentiel de croissance est à son maximum quand le rayonnement et la température sont tous les deux compris dans les limites optimales.

La représentativité des températures par les mesures est fonction du réseau d'observation. Plus celui-ci est dense, meilleure est l'information et plus l'ensemble des mesures est représentatif du régime thermique de la région.

Les annuaires thermiques pour chaque station de mesure, regroupent, les résultats suivants : La température journalière, mensuelle, annuelle, Le module annuel moyen (moyenne arithmétique des valeurs annuelles), les valeurs maximales et minimales (soit mensuelles ou annuelles), Les cartes de la température mensuelle et annuelle.

Certaines de ces valeurs peuvent être régionalisées et présentées sous forme de cartes isothermes de la température considérée.

Chapitre 3 :

Les besoins en eau des cultures.

Chapitre 3 :

Les besoins en eau des cultures.

Introduction

Les besoins en eau des cultures sont, en général, estimés à partir de la connaissance de la demande en évaporation et des caractéristiques de la culture ou, plus récemment, à partir de mesures directes de l'état de l'eau dans le sol ou du stress physiologique des plantes.

1. Pourquoi les plantes ont-elles besoin d'irrigation?

L'eau est indispensable aux plantes à bien des égards:

- a) Une plante est composée d'eau à près de 70 %;
- b) L'eau est d'abord nécessaire pour assouplir la graine et son enveloppe et faciliter ainsi l'apparition de la racine, puis la levée de la plantule au-dessus du sol;
- c) L'eau agit comme solvant et dissout et transmet à travers les racines des plantes des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphate et le potassium, indispensables à une bonne croissance;
- d) L'eau agit comme solvant dans les réactions biochimiques qui se produisent dans les plantes, notamment la fixation du carbone et la photosynthèse;
- e) Le carbone, l'azote, l'hydrogène et l'oxygène nécessaires à la croissance des plantes proviennent de l'eau et de l'air atmosphérique et constituent la majeure partie du corps de la plante;
- f) Environ 95 % de l'eau absorbée par les plantes est transpirée par les feuilles et les tiges, un processus qui contribue également à refroidir les plantes par temps chaud;
- g) Sans eau, les plantes flétrissent et finissent par mourir.

Les forces d'adsorption et de tension superficielle retiennent l'humidité du sol. Au-delà de la capacité de rétention de ces deux forces, tout apport supplémentaire d'eau s'infiltre à travers les pores du sol sous l'influence de la force gravitationnelle. Ce processus est connu sous le nom de percolation.

Une mesure de la force avec laquelle l'eau est retenue dans le sol (qui est aussi la force nécessaire pour extraire l'eau du sol) est appelée tension de l'eau du sol. La quantité d'humidité présente dans le sol est dénommée teneur en eau du sol. La teneur en eau du sol pour laquelle les plantes ne peuvent plus extraire d'eau du sol pour répondre à leurs besoins d'évapotranspiration est appelée point de flétrissement. Lorsque l'humidité du sol atteint ce niveau, les plantes flétrissent et meurent, à moins d'un apport d'eau dans la zone racinaire. La quantité d'eau disponible dans le sol entre la teneur en eau à la capacité au champ et le point de flétrissement est appelée capacité de rétention utile du sol.

Le but de l'irrigation des cultures est de garantir, en tout temps, un approvisionnement suffisant en eau dans la zone racinaire, dans l'intervalle compris entre la capacité au champ et le point de flétrissement.

L'humidité du sol varie en fonction des pluies, de l'irrigation, de l'évapotranspiration, du ruissellement, de l'infiltration et de la percolation profonde. Lorsque tous les interstices du sol sont complètement remplis d'eau, on dit que le sol a atteint sa capacité de saturation. Dans cet état, l'eau sera évacuée de la zone racinaire du sol sous l'influence de la gravité jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Le sol est alors à la capacité au champ. Cette étape est généralement atteinte entre un à trois jours après l'irrigation ou la pluie. Une irrigation efficace ramène la zone

racinaire à la capacité au champ. L'eau appliquée au-delà de ce niveau est considérée comme un gaspillage, à moins que cela ne soit fait délibérément dans un objectif de lessivage.

2. Besoins en eau des cultures

Le besoin en eau des cultures est défini comme la hauteur d'eau nécessaire pour compenser la perte d'eau par évapotranspiration pour une plante saine poussant dans de grands champs sans aucune restriction liée au sol, à la teneur en eau du sol ou à la fertilité du sol, de sorte qu'elle puisse atteindre son plein potentiel de production dans les conditions données de croissance (FAO, 1995).

Ce besoin en eau varie selon les cultures et l'emplacement; il dépend des espèces cultivées, du climat local et du sol. Il est estimé pour une période de temps déterminée, par exemple une semaine, un mois ou une période de végétation. La demande correspondant à l'évapotranspiration comprend l'évaporation de la surface du sol adjacent, l'évaporation de l'eau interceptée et la transpiration par les stomates de l'épiderme à la surface de la plante (écorce et feuilles). En outre, l'eau est également nécessaire pour les activités métaboliques associées à la croissance des plantes. L'eau totale nécessaire à une bonne croissance des cultures est appelée consommation totale. Cependant, la quantité d'eau nécessaire à l'activité métabolique est très faible (< 1 %) par rapport à la demande pour l'évapotranspiration, de sorte que les expressions de consommation totale et d'évapotranspiration des cultures sont utilisées indifféremment.

Les besoins en eau d'une culture sont souvent en partie satisfaits par les précipitations locales et l'humidité du sol ainsi que par la remontée capillaire des eaux souterraines là où la nappe phréatique est proche de la zone racinaire. Seule une fraction des pluies locales, appelée pluie efficace, est utilisée par la culture pour sa croissance. Il faut faire attention à l'utilisation de l'expression «pluie efficace», dont le sens varie suivant le domaine abordé. Pour un ingénieur spécialiste des ressources en eau, la pluie efficace est la pluie qui atteint le réservoir de stockage sous forme de ruissellement, tandis que pour les hydrogéologues, c'est la partie de la pluie qui contribue à la recharge des eaux souterraines. Pour un agronome ou un agriculteur, cependant, c'est la fraction de la pluie qui contribue à répondre au besoin d'évapotranspiration de la culture.

En matière de besoins en eau des cultures, la pluie efficace est définie comme la partie de la pluie qui contribue directement ou indirectement à la production végétale à l'endroit où elle tombe, mais sans utilisation de moyens mécaniques. La pluie restante s'évapore dans l'atmosphère, ruisselle à la surface du sol ou est absorbée par le sol ou s'infiltre à travers la zone racinaire. La quantité de pluie efficace dépend de divers facteurs comme les espèces végétales, les conditions d'humidité du sol dans la zone racinaire, le climat et la répartition temporelle des pluies.

3. Notions sur les débits

Le **débit** est une grandeur qui mesure la quantité de matière (liquide ou solide), exprimée en volume ou en masse, traversant une section définie pendant l'unité de temps.

Le **débit** est une grandeur fondamentale de la mécanique des fluides et de l'hydrologie. Il convient de bien distinguer l'échelle de temps selon laquelle le débit est mesuré et estimé (débit **instantané**, débit **moyen journalier**, **mensuel**, **annuel**, **pluriannuel**) de l'unité de temps utilisée pour l'exprimer (le plus souvent la seconde comme dans *l/s* ou *m³/s*).

Un débit d'eau s'exprime généralement en volume rapporté à une unité de temps. Des **débits massiques** s'appliquent plutôt à des matériaux en suspension, voire en solution, ou charriés. On parlera dans ces cas de débit solide.

En hydrologie et hydrogéologie, le mot débit entre dans un grand nombre d'expressions qui désignent soit des concepts descripteurs (débit d'une rivière, d'une source, d'une nappe souterraine ; débit de pointe, débit d'étiage ; débit réel, débit solide, débit de charriage) ou analytiques (débit de base, débit caractéristique, débit unitaire, débit spécifique), soit des

artefacts ou des techniques (essai de débit, palier de débit, débit critique - de pompage dans un puits - ; débit de jaillissement, de production).

Appliqué à un ouvrage de captage (prise d'eau, puits, forage) le mot débit a le sens de capacité, d'aptitude à fournir, à produire. En particulier, dans le cas de captage d'eau souterraine, " débit d'un puits " est le débit potentiel maximal qui peut être obtenu.

Le débit peut faire l'objet d'une mesure directe par différentes méthodes, soit être calculé à partir de mesures de vitesse.

Le débit (moyen) journalier, mensuel, annuel... est la moyenne arithmétique de tous les débits par seconde de la période considérée. Le débit annuel devra être obligatoirement suivi de l'année considérée.

Le débit (moyen) interannuel est la moyenne arithmétique des débits (moyens) annuels calculée sur une période de temps au moins égale à 30 années consécutives.

Le débit (moyen) pluriannuel est la moyenne arithmétique des débits (moyens) annuels calculée sur une période de temps quelconque (en général la série complète des débits annuels).

4. La dose d'irrigation de réserve

Les doses d'irrigation sont appliquées pour reconstituer l'humidité du sol lorsque la teneur en eau de la zone racinaire tombe à un niveau tel qu'elle commence à avoir une incidence négative sur le rendement des cultures. Les agronomes ou les spécialistes des cultures cherchent à maximiser la production des divers champs cultivés pour un approvisionnement en eau donnée, en utilisant les connaissances scientifiques (fondées sur un raisonnement empirique) relatives à la réponse des cultures à l'eau disponible dans le sol. Les principaux facteurs qui déterminent le programme d'irrigation sont, dans ce cas, le climat, le sol ainsi que le type de culture et son stade de développement. De nombreuses études agronomiques rapportées dans la littérature décrivent les programmes d'irrigation pour une grande variété de systèmes de culture et de plantes cultivées (WMO, 1994).

Ces études se concentrent généralement sur la détermination de la dose et de la fréquence de l'irrigation en fonction des besoins en eau des cultures durant les différentes phases de leur développement, des modes d'extraction de l'humidité du sol au niveau de la zone racinaire et des régimes hydriques optimaux du sol à maintenir dans la zone racinaire aux différents stades de développement, entre autres facteurs (WMO, 1994).

5. La dose d'irrigation sommaire

La dose d'irrigation sommaire correspond à la quantité d'eau nécessaire à la satisfaction des besoins en eau de la culture. Ces besoins sont variables en fonction du système d'irrigation en place sur la parcelle. La dose d'irrigation sommaire peut être exprimée en millimètre d'eau, en m³/hectare ou bien encore en litres/arbre :

Les besoins en eau des cultures sont évalués à partir de la différence entre la consommation en eau de la culture et les disponibilités en eau sur une période établie (exemple : méthode du bilan hydrique)

Besoins en eau = consommation en eau - disponibilités en eau

La consommation en eau de la culture correspond globalement à son évapotranspiration. Celle-ci est directement liée aux conditions climatiques: rayonnement solaire, température, humidité de l'air, vent...etc.

6. Conductivité hydraulique ou perméabilité

La conductivité hydraulique d'un système poreux représente la facilité de circulation de l'eau dans ce système. C'est le physicien Darcy qui a proposé le premier la définition de ce paramètre que l'on désigne habituellement par la lettre *K*. Selon Darcy, *K* a la dimension d'une

vitesse : c'est bien la vitesse de circulation de l'eau dans un système poreux sous un gradient de charge hydraulique égal à 1 (Figure III.1).

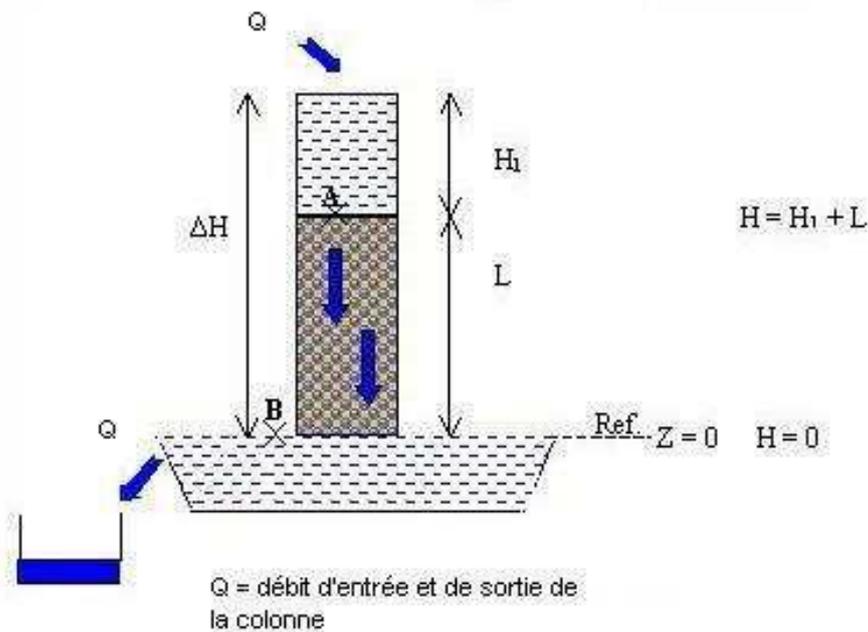


Figure III.1. Illustration de la loi de Darcy

Dans l'expérience de Darcy (Fig. III.1), une colonne de sol est saturée. Lorsqu'on atteint un régime permanent les niveaux à l'entrée et à la sortie ne bougent plus et le débit sortant est égal au débit entrant : c'est Q : le débit qui traverse la colonne de sol. Ce débit est bien sûr fonction de la section de la colonne (S), de la variation de charge hydraulique (ΔH) sur la longueur de la colonne (L) et bien sûr de la perméabilité du matériau traversé par le débit Q .

$$Q/S = K \cdot (\Delta H / L)$$

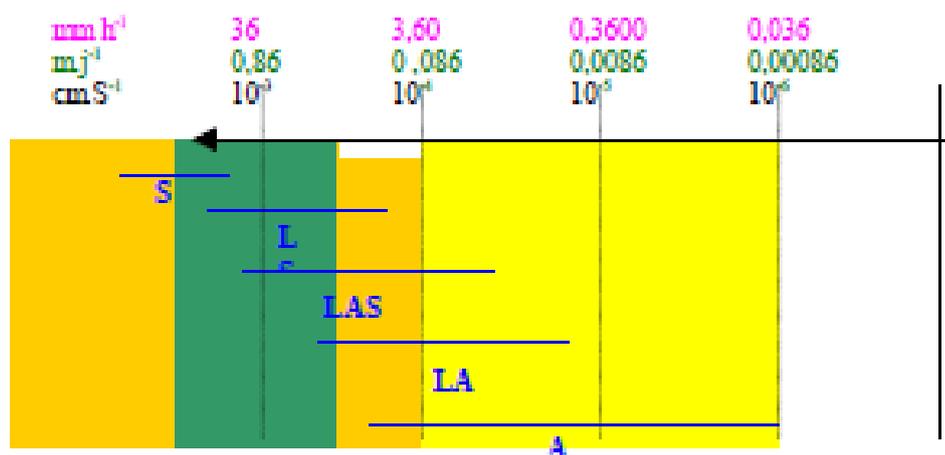
$$K \text{ (m/s)} = (Q/S) (L / \Delta H)$$

Lorsque $\Delta H / L$ tend vers un, c'est-à-dire que H_1 tend vers zéro, K devient équivalent au débit divisé par la section de la colonne. Plus généralement, selon la loi de Darcy, la vitesse de circulation de l'eau dans un système poreux le long d'un axe X (q_x) est fonction du gradient de charge le long de cet axe $\partial H / \partial x$, et de la perméabilité du matériau traversé (K). Dans cette équation, le signe moins indique que l'eau circule dans le sens des potentiels décroissants.

$$q_x = K \cdot (\partial H / \partial x)$$

Dans le système international, l'unité utilisée pour décrire les vitesses est le m/s, or comme nous l'avons déjà signalé, les circulations de l'eau dans les sols sont très lentes et les perméabilités des sols sont plutôt de l'ordre du mm/h ou mm/j. Leurs valeurs dépendent essentiellement de la texture des sols : plus on descend dans les textures fines, plus la perméabilité diminue. C'est ce qui est récapitulé sur la figure III.2.

La perméabilité des sols intervient dans la gestion des sols irrigués puisque l'eau est apportée au sol à partir d'un point d'apport (l'arroseur) et diffuse dans la porosité du sol jusqu'aux racines du végétal cultivé. Il est donc fortement recommandé de tenir compte de cette valeur de K pour les arrosages et prendre des précautions tout particulièrement lorsque ces perméabilités sont très fortes (textures sableuses) ou très faibles (textures très argileuses) (Figure III.2).



K (m/s)	Aptitude a l'arrosage
$K < 10^{-6}$	Terres imperméables à ne pas arroser
$10^{-6} < K < 5.10^{-5}$	Terres assez imperméables à arroser avec précaution
$5.10^{-6} < K < 5.10^{-5}$	Terres perméables apte à l'arrosage
$K > 5.10^{-5}$	Terres trop perméables, risques de pertes, utiliser l'aspersion

Figure III.2. Perméabilité et texture : des éléments clés dans la gestion de l'irrigation.
(S : sable, L : limon, A : argile)

6.1. Application a l'irrigation

Tous les paramètres définis jusqu'ici permettent de mieux comprendre la circulation de l'eau dans les sols, qu'ils soient cultivés ou non. L'agriculture doit souvent s'adapter à des cas de manques d'eau ou d'excès d'eau. Pour y faire face, elle fait appel à des techniques qui sont l'irrigation et/ou le drainage agricole en cas d'excès d'eau.

7. Notions sur l'infiltration

Horton (1953) introduisit la notion d'infiltration dans le cycle hydrologique. Il a défini la capacité d'infiltration : f_m , comme étant le taux maximum d'adsorption d'eau que possède un sol dans des circonstances particulières. Évidemment, le taux actuel d'infiltration, f , d'un sol égal f_m lorsque l'intensité de la pluie : i , ou le taux de fonte des neiges égale ou dépasse la grandeur de f_m . De plus, $f = i$ lorsque $i < f_m$. On utilise aussi le terme taux d'infiltration pour référer au taux d'entrée de l'eau dans la couche superficielle du sol.

7.1. Mécanisme de l'infiltration

L'eau pénètre la surface du sol par l'action combinée des forces gravitationnelles et capillaires. Les deux forces agissent dans la direction verticale et provoquent la percolation vers le bas, tandis que les forces capillaires agissent aussi pour attirer l'eau latéralement des gros pores (canaux d'alimentations) vers les pores capillaires qui sont de dimension beaucoup plus petite, mais probablement en plus grand nombre. Tout au long du processus, les espaces capillaires se remplissent.

En général, le taux d'infiltration dépend de plusieurs facteurs, soit l'intensité et la nature de la précipitation, la condition de la surface du sol, la densité, le type et l'état de la végétation, la température et la composition chimique de l'eau, les propriétés physiques du sol (porosité, dimension des grains et des pores, teneur en eau, etc...). (<http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/chapitre5.html>)

8. Les débits spécifiques (hydromodules)

Est un flux d'irrigation équivalent par seconde par Hectare ou hydromodule d'irrigation de l/s/ha. Comme débit par unité de surface, appelé hydromodule si la zone = hectare, donc l/sec/ha.

Le zonage de l'hydromodule implique la division d'un territoire en unités taxonomiques en vue d'une utilisation élevée des terres et des ressources en eau et en établissant des régimes d'irrigation différenciés et scientifiquement fondés qui garantissent un rendement stable des cultures (http://www.cawater-info.net/bk/4-2-1-1-3-1_e.htm).

9. Calcul du bilan hydrique (méthode graphique)

On établit à l'avance un graphique représentant le niveau d'évapotranspiration que l'on veut imposer à la culture (figure III.4).

On porte les jours en abscisses et, en ordonnées, les valeurs cumulées de l'ETM ou de l'ETR optimal en fonction du temps. On obtient ainsi une droite ou une courbe (A).

On choisit la dose d'irrigation « d » en fonction des caractéristiques du sol et de l'enracinement de la plante ; on trace alors la droite ou la courbe (B) obtenue en déplaçant (A) vers le bas, de la distance « d ».

L'état de la réserve du sol sera représenté par un point situé entre (A) et (B) : lorsque ce point se trouve sur la courbe (A), le sol est à la capacité de rétention; lorsqu'il se trouve sur la courbe (B), la réserve facilement utilisable est épuisée, et l'on doit déclencher l'irrigation.

Le bilan est effectué en déplaçant le point représentatif de la réserve du sol vers le haut à chaque pluie ou irrigation, et en le déplaçant chaque jour d'une unité vers la droite.

Exemple : Culture de tomates en pleine végétation au mois d'avril :

Besoins journaliers 7 mm/jour

Dose pratique maximale d'irrigation 25 mm.

15 avril	16 avril	17 avril	18 avril	19 avril	20 avril
le sol est à saturation	pluie : 0	pluie : 8 mm	pluie : 0	pluie : 0	pluie : 0

Le déficit dépasse alors 25 mm. On donne alors un arrosage de 25 mm.

Cette méthode est suffisante pour la conduite des arrosages au jour le jour par l'irrigant.

On peut également, pour la conduite des irrigations à la parcelle, effectuer le bilan hydrique sur des fiches préparées spécialement pour chaque culture. Le pas de temps décadaire (ou hebdomadaire) est alors préférable.

Les valeurs décadaires (ou hebdomadaires) des termes du bilan hydrique sont mesurées ou estimées, et portées sur chaque fiche ; on peut donc suivre, période par période, les variations de la réserve en eau du sol :

$$AR = P + I \pm S \pm D - ETR$$

On décide en général d'irriguer lorsque la réserve du sol atteint l'humidité critique H_c (RFU=0). Une méthode analogue pour les cultures en sec existe également.

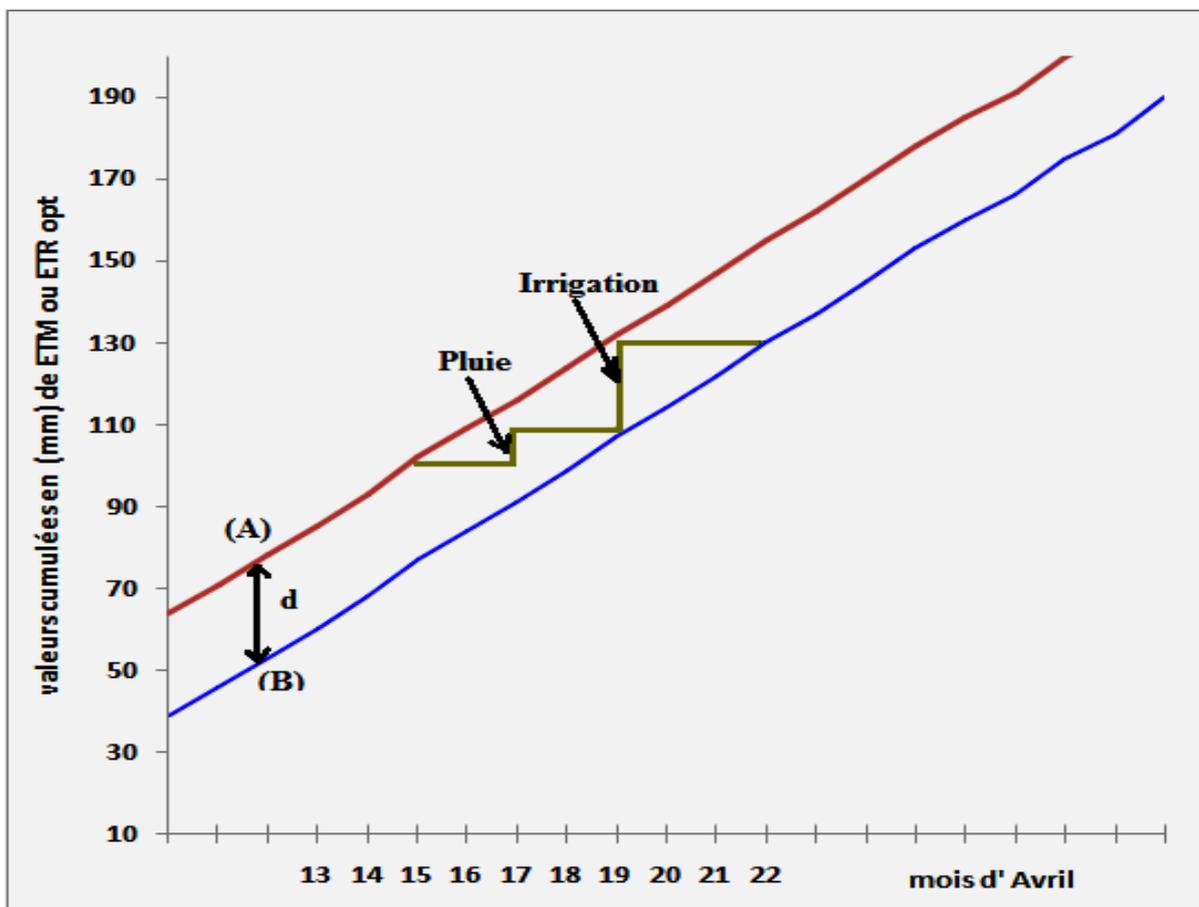


Figure III.4. Graphique du bilan hydrique.
Exemple : Culture de tomate en pleine végétation au mois d'avril.

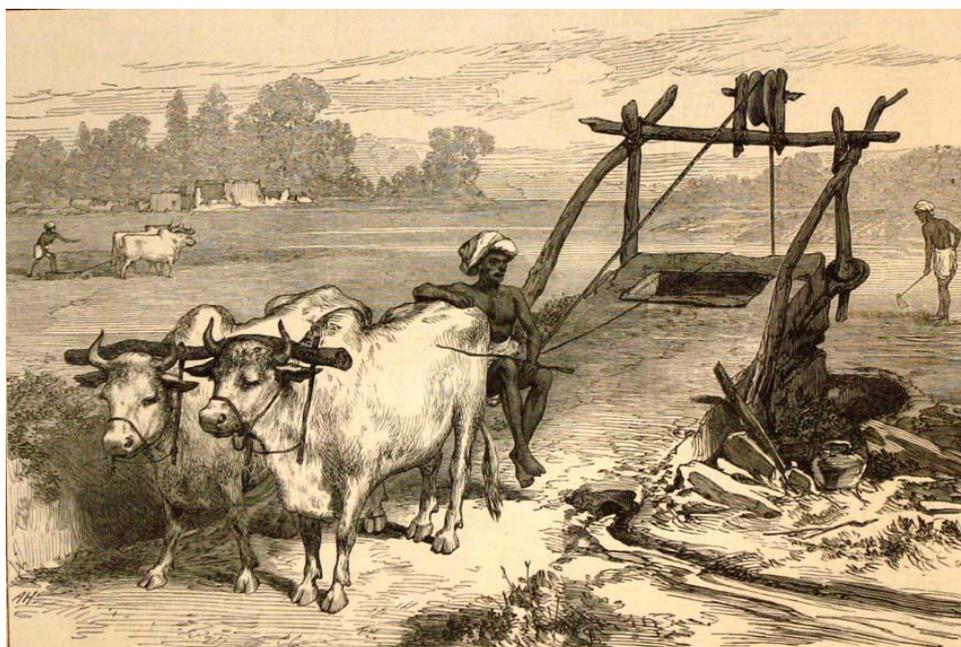


Figure hors texte : Irrigation et agriculture du 19e siècle en Inde.

Chapitre 4 :

Techniques d'irrigations.

Chapitre 4 : Techniques d'irrigations.

1. Introduction

Un réseau de distribution d'eau d'irrigation bien conçu doit pouvoir répondre à certaines exigences. Il faut en effet non seulement livrer l'eau à un bon débit, à la bonne pression et au bon moment, mais, en outre, avec une grande sécurité de fonctionnement et une facilité de gestion aussi bien pour le consommateur que pour le gestionnaire. Le système de distribution doit aussi intégrer tous les aspects aussi bien opérationnels qu'hydraulique (FAO, 1995).

Les systèmes de distribution peuvent varier en grandeur et en complexité, ils peuvent aller de la simple répartition de l'eau de crue sur les terres avoisinantes jusqu'à la distribution d'eau souterraines ou de surface à des zones de cultures intensives (FAO, 1995).

2. Classification des réseaux d'irrigation

Le concept des réseaux de distribution d'eau varie en fonction de l'origine de l'eau, du choix entre un système gravitaire ou sous pression et des critères retenus en ce qui concerne le mode de distribution, ceci offre plusieurs possibilités de classification.

Classification selon la nature de la source : L'eau à distribuer aux exploitants peut avoir pour origine une eau de surface, une nappe souterraine ou un système de recyclage des eaux usées, voir une combinaison de ces différentes origines.

Classification selon le type de réseau de distribution : soit par des canaux à surface libre (réseau gravitaire), soit dans des conduites en charge (réseau sous pression).

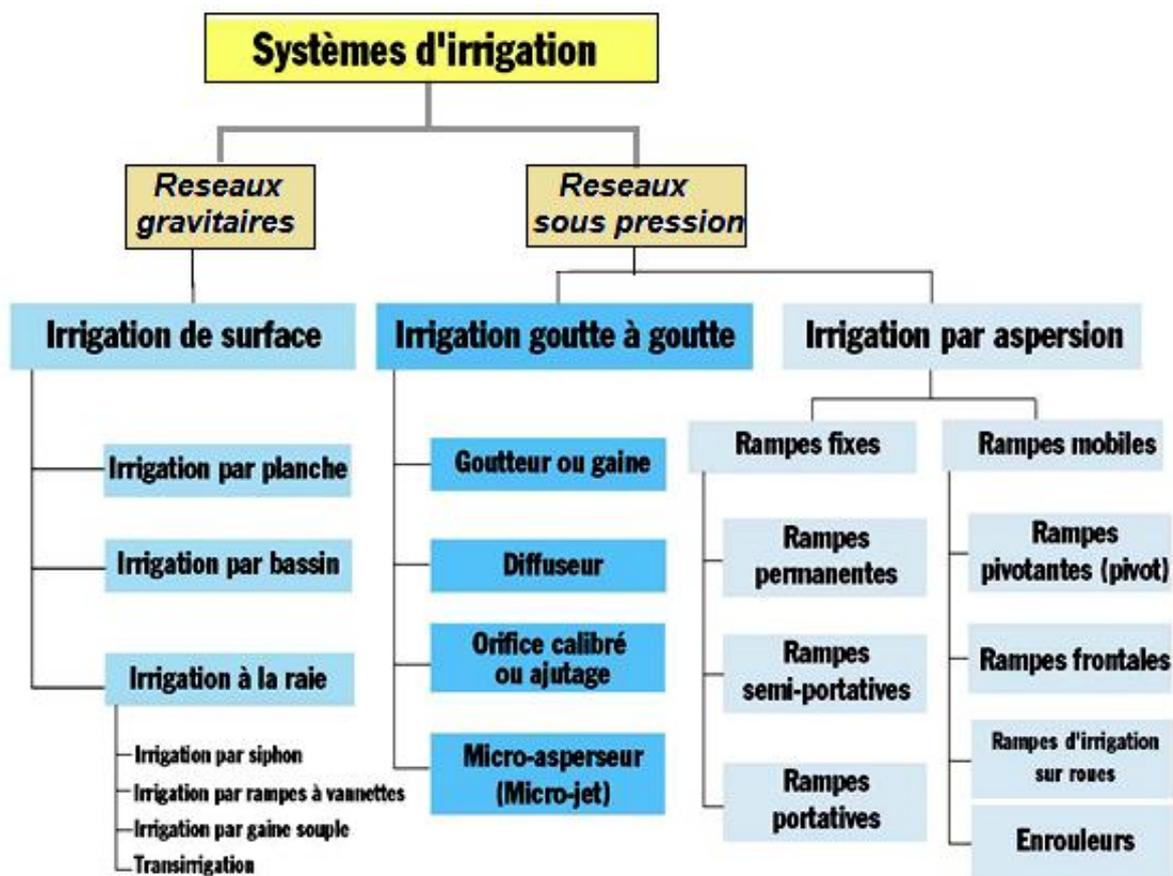


Figure IV.1. Classification des systèmes d'irrigation (Van leave, 2003).

3. Irrigation de Surface (gravitaire)

L'irrigation gravitaire regroupe l'ensemble des techniques d'arrosage dans lesquelles la répartition de l'eau à la parcelle se fait entièrement à l'air libre, par simple écoulement à la surface du sol. La répartition de l'eau est assurée grâce à la topographie du terrain et aux propriétés hydriques du sol (ruissellement, infiltration et capillarité).

Les techniques d'irrigation gravitaire sont dites aussi techniques d'irrigation traditionnelle du fait qu'elles sont utilisées par l'homme depuis l'antiquité. De nos jours, beaucoup de techniques dites traditionnelles ont été modernisées grâce aux progrès scientifique et technologique (introduction de matériels industriels).

En irrigation gravitaire, la distinction entre les différentes techniques est essentiellement fondée sur la méthode d'application de l'eau : ruissellement, submersion ou technique mixtes. (Ourahou, ???).



Figure IV.2. Canal à surface libre



Figure IV.3. Alimentation des planches par siphons.



Figure IV.4. Irrigation à la raie.



Figure IV.5. Submersion.

Avantage :

- Techniques anciennes, bien connues ;
- Coût d'investissement faible à la parcelle pour l'agriculteur ;
- Pas d'apport énergétique extérieur ;
- Alimentation des nappes phréatiques ;

Inconvénients :

- Temps de main d'œuvre pour la répartition et la surveillance important ;
- Coûts importants en cas d'ouvrages d'art (aqueduc, galerie...)
- « Pertes » d'eau importantes dans les canaux selon la nature du sol : nécessité d'étanché des lits des branches principales ;
- Lieu de points de distribution fixe, surface parcellaire relativement figé ;
- Nécessite un terrain plat ou un nivellement ;

- Faible efficacité ;
- Estimation du volume réellement consommé difficile ;
- Pollution possible par déversement.

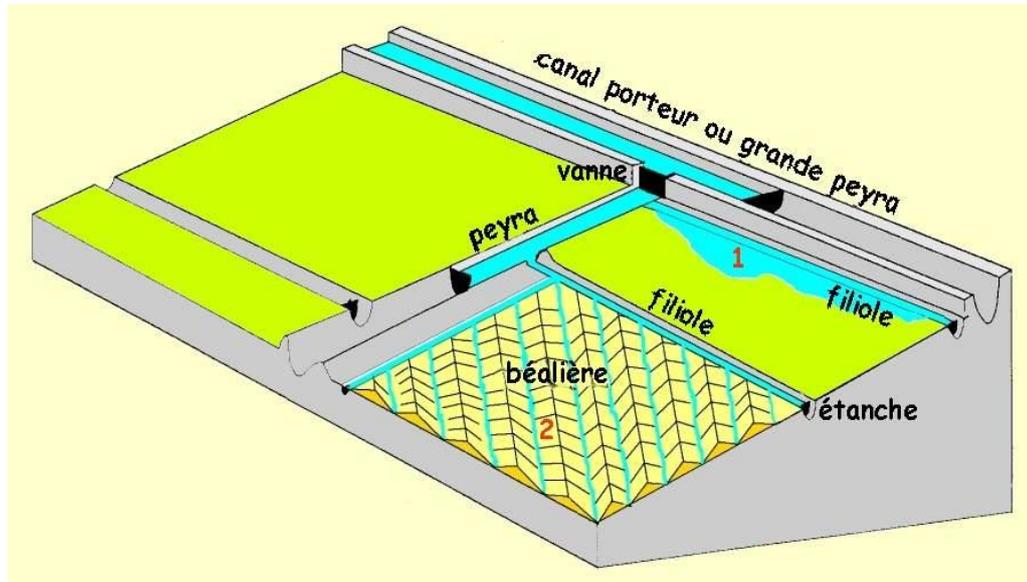


Figure IV.6. Disposition générale d'un réseau gravitaire d'eau

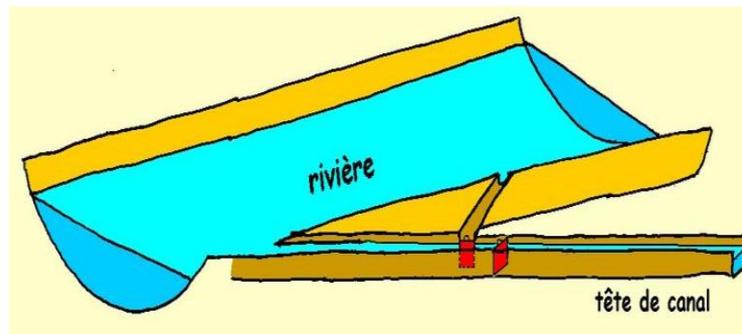


Figure IV.7. Schéma d'une prise de rivière.

3.1. Les différentes techniques d'irrigation de surface

3.1.1. L'irrigation par planche (ou par déversement)

Les planches sont des bandes de terrain, aménagées en pente douce et séparées par des diguettes. Elles sont aussi appelées calants ou planches d'arrosage. L'alimentation en eau des planches est faite de plusieurs façons: soit à l'aide de prises d'eau aménagées sur le canal (figure IV.7) d'aménée et équipées d'une vannette, soit par des siphons, ou bien par des tuyaux d'alimentation passant à travers les berges du canal d'aménée. La lame d'eau introduite ruisselle en descendant la pente de la planche, guidée par les diguettes des deux côtés de celle-ci (figure IV.6).

Le principe de cette technique consiste à créer une nappe mince sur des planches longue et étroite dans une faible pente. Débordant de l'un des bords d'une rigole, en générale horizontale, l'eau se répand sur toute la surface de la planche en une mince couche qui s'infiltré dans le sol.

Pour éviter l'érosion des bords d'une rigole, on limite le débit : la distance entre les rigoles sera faible, et les planches seront courtes et larges, en forme de rectangles recevant l'eau par l'un des grands côtés.

L'eau qui ruisselle et s'infiltré au cours de son parcours de la planche, arrive cette fois par l'un de ses petits côtés. Les planches sont donc longues et étroites. La pente est de l'ordre de 0,15 à 0,60% .

On divise la surface à irriguer en bandes rectangulaires de longueur L, prise dans le sens de la plus grande pente, et de largeur l. En général, la largeur des planches varie de 5 à 30 m, et leur longueur de 50 à 800 m. Néanmoins, par souci de bonne conduite des irrigations, la longueur maximale des planches est limitée généralement à environ 400 m.

L'irrigation par planches convient le mieux aux pentes inférieures à 0,5 % (Asawa, 2005). Cependant, les pentes longitudinales maximales des planches peuvent atteindre 4 % à 5 %, voire davantage dans le cas des prairies qui assurent la protection du sol contre l'érosion. Dans tous les cas, la pente transversale des planches doit être nulle pour atteindre une meilleure uniformité de l'arrosage.

Les mêmes opérations que celles réalisées pour les raies sont effectuées pour l'irrigation des calants (forme proche de la raie, plus large et en pente).

Le nombre de siphons par calant ou par planche est de 15 unités ce qui permet l'irrigation de deux calants à la fois avec une main d'eau de 30l/s.

Dans le cas d'une main d'eau de 20 l/s peut alimentée deux calants (parcelles) à la fois. (www ORMVAD.ma)

3.1.2. L'irrigation par submersion

Ce type d'irrigation fait partie des procédés traditionnels encore employés de nos jours notamment dans les rizières et dans les oasis Le principe de cette technique consiste à créer une nappe épaisse en inondant temporairement toute la surface à pente nulle. Lorsque la pente naturelle est nulle ou presque, le ruissellement devient lent. Un débit supérieur à la perméabilité du sol devient nécessaire pour conduire l'eau à l'extrémité des parcelles. L'eau s'accumule alors en une nappe de quelques cm qui s'infiltré peu à peu.

Plusieurs variantes sont possibles :

- Les bassins : fermés par des levées sont particulièrement adaptés.
- Les cuvettes : reliées à des canaux conviennent aux arbres fruitiers.
- Les rigoles d'infiltration : que l'on remplit d'eau en vue d'une lente infiltration sont un système d'arrosage à rattacher à l'irrigation par infiltration ou à la raie.

Les principaux **inconvénients** de la submersion sont le tassement du sol en profondeur, la réduction de la perméabilité et l'asphyxie temporaire, pas toujours nuisibles, notamment en riziculture. Des procédés traditionnels, toujours employés dans les oasis, mais nécessitant beaucoup d'eau.

3.1.3. L'irrigation à la raie

Cette technique consiste à couvrir partiellement le sol par l'eau qui, ensuite, s'infiltré latéralement et remonte par capillarité. La culture est implantée sur des buttes de terre. L'eau s'infiltrant latéralement et remonte par capillarité, pour atteindre les racines. Cette dernière, amenée à fort débit, remplit assez vite les sillons, de pente presque nulle. Elle s'y maintient le temps nécessaire à son infiltration.

Les avantages de l'irrigation à la raie expliquent son grand développement traditionnel en région méridionales, surtout pour les productions maraichères et arboricoles.

- Une partie seulement de la surface est affectée par le tassement et dégradation de structure dus à l'eau.
- Le feuillage des plantes basses, les melons par exemple, n'est pas mouillé, ce qui limite les maladies.

- Ce mode d'arrosage convient bien aux cultures nécessitant un buttage : pomme de terre, choux, poireau, haricot
- Les frais d'aménagement sont réduits, du moins à partir du moment où tout un périmètre a été occupé.

Les inconvénients de ce système sont :

- Une partie de l'eau est perdue par lessivage sous les rigoles, surtout en sol léger.
- Dans les sols en pente, l'érosion est à craindre si le débit est mal réglé.
- Dans les sols à forte salinité, la remontée capillaire peut concentrer le sel dans les billons (diguettes).

Toutefois, cette technique a fait l'objet de perfectionnements récents très importants (utilisation Californiens, de gaines souples, de rampes à vannettes, et de la transirrigation) qui allègent les besoins en main-d'œuvre lorsque celle-ci est rare et coûteuse.

L'efficacité des arrosages telle qu'elle est constatée peut se situer entre 40 % et 70 % dans les situations traditionnelles, et entre 65 % et 85 % sur les parcelles bien nivelées. (Jean-Robert Tiercelin, 1998)

L'irrigation à la raie permet la mécanisation des travaux des cultures et l'économie de la main d'œuvre une fois que l'aménagement du terrain est exécuté comme il faut et que l'apport d'eau aux raies, à partir de la source d'eau, se réalise automatiquement.

L'irrigation à la raie se subdivise en 5 techniques permettant d'apporter de l'eau aux raies d'irrigation, ces techniques sont :

- A. Le siphon.
- B. La gaine souple.
- C. Les canaux à vannette.
- D. Le système Californien.
- E. La transirrigation.

A. La méthode du siphon est la plus simple et la moins chère. Le siphon présente néanmoins l'inconvénient de devoir être réamorcé en cas de baisse du niveau dans le canal d'approvisionnement principal. Selon l'équipement et la pression, le débit varie de 0,4 à 2 l/s. Notons que le débit n'est pas modifiable.

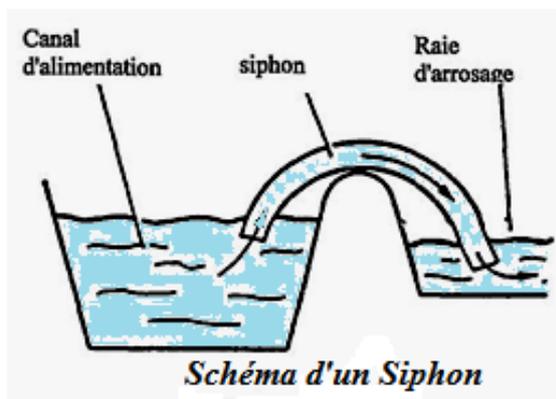


Figure IV.8. Amorçage du siphon et alimentation des raies par siphons.

B. Le système de la gaine souple est un système un peu amélioré. Il consiste en une manche en plastique souple reliée à plusieurs manchettes venant alimenter les raies d'irrigation. Le débit de 2l/s environ est modifiable grâce un dispositif permettant de resserrer la gaine souple. Ils sont facilement montables, et démontables et ne font pas obstacles au passage des engins agricoles.

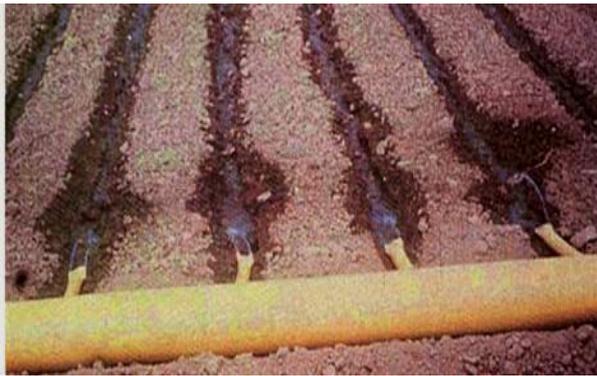


Figure IV.9.1. Gaine remplie.



Figure IV.9.2. Gaine vide.

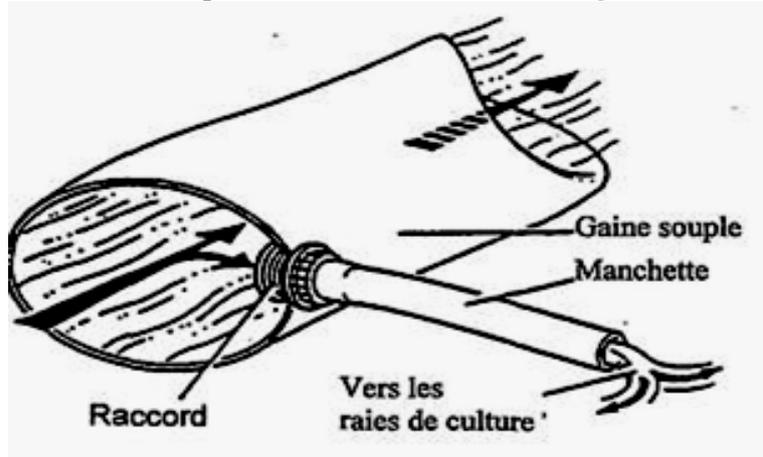


Figure IV.9.3. Mécanisme de la gaine.

Figure IV.9. Irrigation gravitaire par gaine souple.

C. Les tubes à vannettes sont des tubes en PVC rigides équipés de vannettes que l'on peut plus ou moins ouvrir afin de modifier le débit d'arrivée. Le débit peut varier de 0,4 à 4l/s. C'est un système facilement installable et raccordable au réseau. Il permet de plus, de contrôler très précisément le débit et la dose. Il fait toutefois obstacle au passage des engins agricoles.

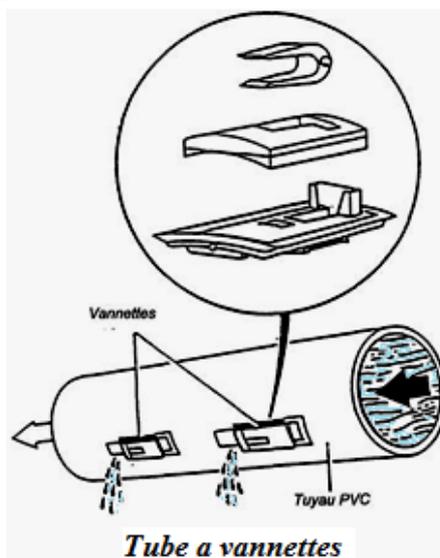


Figure IV.10. Vannette coulissantes réglant le débit dans la raie.

D. Le système californien est une méthode dans laquelle les sont enterrées en tête de parcelle. Des cheminées verticales sortent en surface et emmènent l'eau dans les raies d'irrigation. Ces

cheminées peuvent être régulées par des gaines souples ou vannette. C'est un système fixe, il n'y a donc aucune manipulation. Il ne gêne pas le passage des engins agricoles. Néanmoins sa pose demande des travaux d'installation ainsi qu'une étude hydraulique correcte.

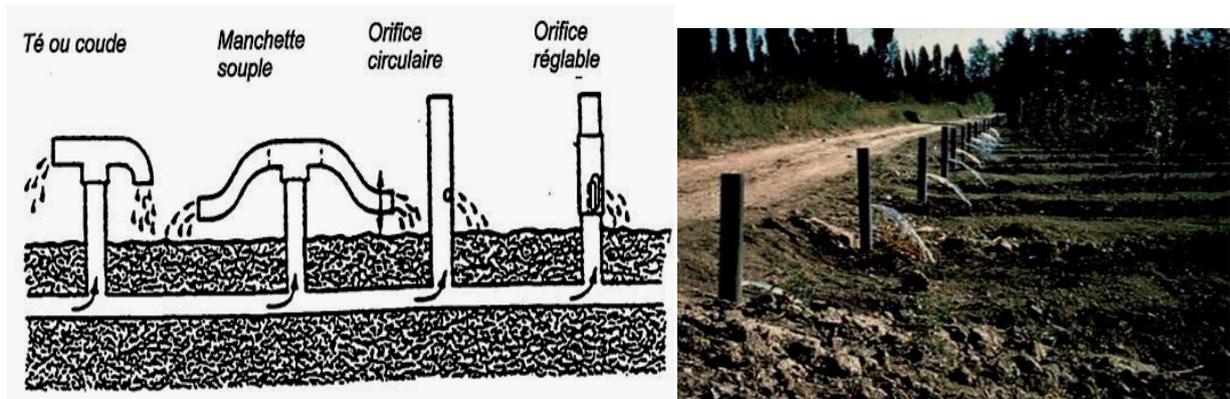


Figure IV.11. Système californien.

E. Le système de transirrigation est le système le plus récent avec un tube en PVC est disposé en tête de parcelle. Ce tuyau est percé de trous équidistants. C'est le déplacement d'un piston à l'intérieur de ce cylindre qui met en mouvement la masse d'eau contenue dans le tuyau et permettant l'alimentation des raies. Du fait du système, le débit s'annule de lui-même au dernier trou, ce qui permet un contrôle très précis des doses. Le système peut être enterré ou à ciel ouvert. Il peut être complètement automatisé. Cependant, sa pose nécessite une étude hydraulique sérieuse et beaucoup de soin.

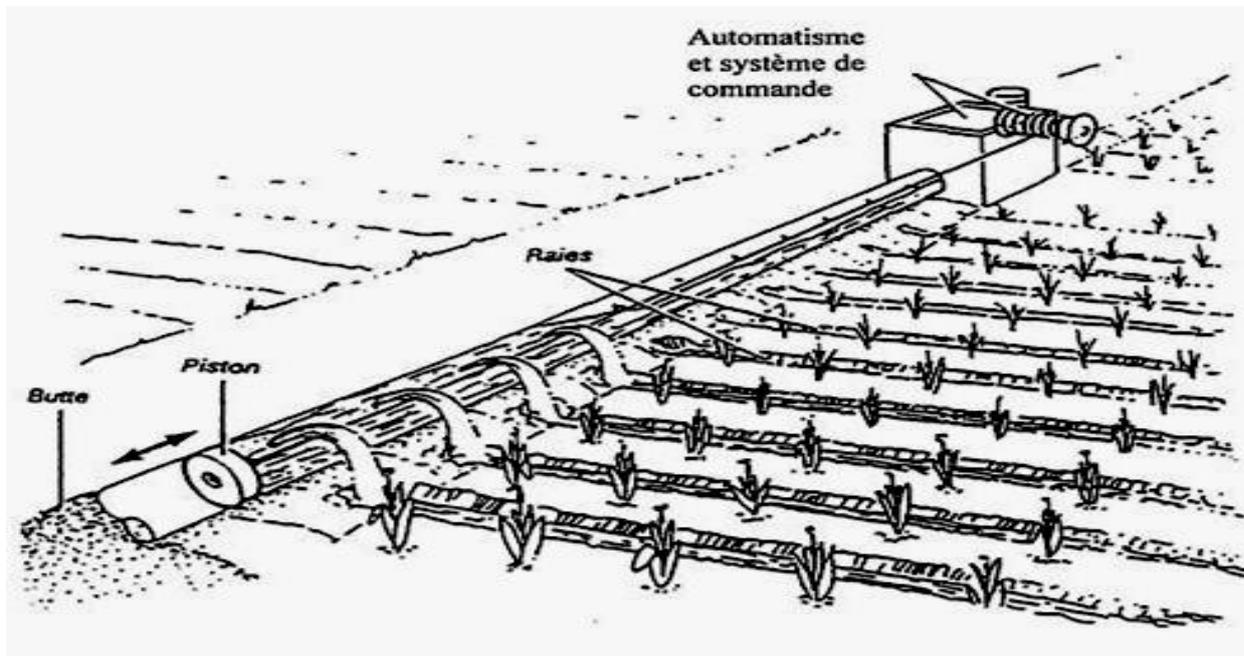


Figure IV.12. La transirrigation.

3.2. L'irrigation souterraine

C'est une forme d'irrigation par infiltration, dans laquelle l'eau, amenée au contact des couches profondes du sol, remonte par capillarité.

Trois variantes peuvent se distinguer :

- L'irrigation par *fossés profonds* : concerne certains marais à vocation herbagère ou horticole. Le réseau de fossés et canaux, qui, l'hiver abaisse le plan d'eau, permet, par la fermeture de

vannes, de maintenir celui-ci, à partir du printemps, suffisamment haut pour entretenir la fraîcheur, sans laquelle les sols tourbeux des marais seraient très secs.

- L'irrigation par **rigoles à eaux pluviales** : est à la fois un moyen de lutte contre l'érosion et un moyen d'irrigation. Ces rigoles, établies selon des courbes de niveau, retenant les eaux de pluie qui s'infiltrent au lieu de ruisseler.
- L'irrigation par **drains poreux** : fonctionne à l'inverse du drainage : l'eau mise sous une légère pression dans les drains, remonte par capillarité. Ce système se rapproche de l'irrigation localisée, donc c'est plutôt une technique d'irrigation sous pression.

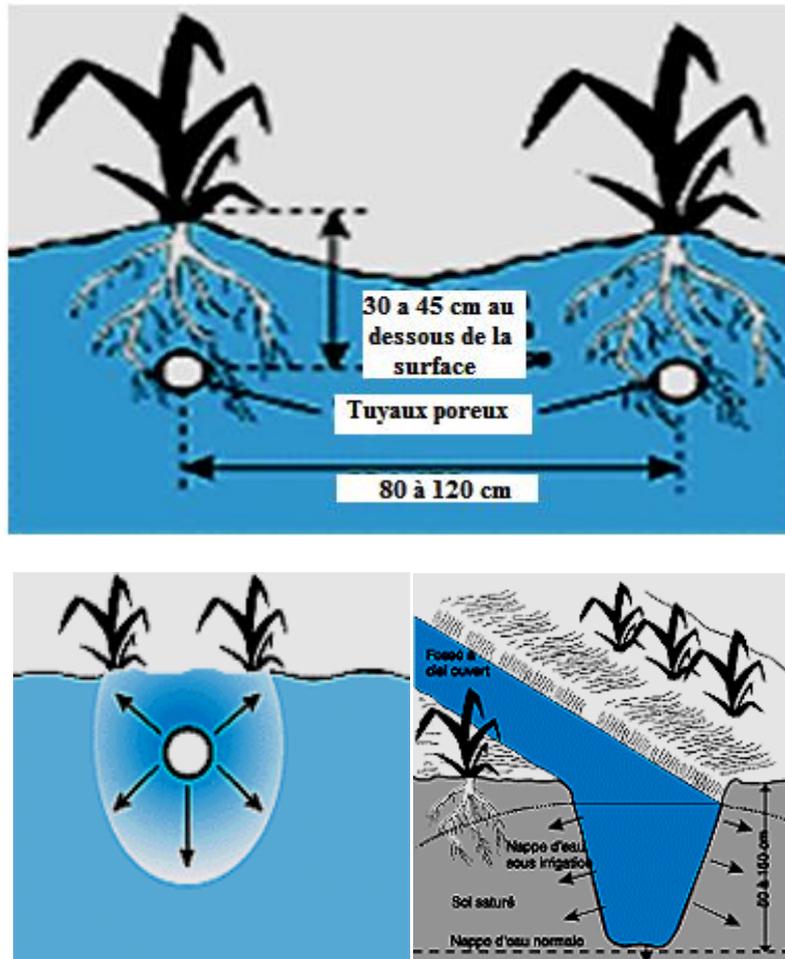


Figure. IV.13. L'irrigation souterraine.

(<http://www.fao.org/docrep/w3094f/w3094f05.htm>)

4. Irrigation sous pression

Un système d'irrigation en conduites sous pression est un réseau constitué de conduites, raccords et autres dispositifs conçus et installés pour acheminer l'eau sous pression de la source jusqu'à la superficie à irriguer.

Les différences fondamentales entre l'irrigation traditionnelle de surface et les techniques d'irrigation sous pression sont:

- Le régime d'écoulement de l'eau: avec les méthodes traditionnelles d'irrigation de surface, **l'écoulement** doit être **important**, alors qu'avec les systèmes d'irrigation en conduites sous pression, de **très faibles débits**, même de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{h}$, peuvent être utilisés.
- Le parcours de l'écoulement: avec les méthodes traditionnelles d'irrigation de surface, l'eau d'irrigation est transportée à partir de la source et **distribuée par gravité** sur les champs par des canaux à ciel ouvert qui suivent les courbes de niveau. Avec les systèmes d'irrigation par conduites sous pression, l'eau est transportée et distribuée dans des conduites fermées **sous**

pression en suivant le tracé le plus favorable (souvent le plus court), **sans tenir compte de la pente** ni de la topographie de la zone traversée.

→ Les superficies irriguées simultanément: avec les méthodes traditionnelles d'irrigation de surface, **des volumes d'eau importants** sont appliqués par unité de surface, alors qu'avec les systèmes d'irrigation par conduites sous pression, l'eau est distribuée avec de **faibles débits sur de grandes surfaces**.

→ L'énergie extérieure (pression) requise: le fonctionnement des méthodes traditionnelles d'irrigation de surface **par gravité** ne nécessite pas d'énergie extérieure, alors que les systèmes d'irrigation par conduites sous pression **nécessitent** une certaine **pression (2–3 bars)**, fournie par une unité de pompage ou un réservoir d'alimentation situé à une altitude supérieure.

4.1. Trame du réseau

Les conduites qui transportent et distribuent l'eau d'irrigation sur les différentes parcelles sont normalement enterrées, ce qui les protège des activités culturales et de la circulation routière. Les bornes de prise, qui émergent à la surface, sont localisées en divers endroits selon la trame du réseau.

En micro-irrigation et dans les autres systèmes globaux, par exemple l'aspersion, les bornes sont connectées à de plus petits adducteurs (conduites d'alimentation) placés le long des limites de parcelles. Celles-ci alimentent à leur tour des conduites latérales posées perpendiculairement aux adducteurs, le long des rangs de cultures. Les conduites latérales sont munies de distributeurs à intervalles réguliers et répartissent l'eau d'irrigation uniformément entre les plantes sous une pression donnée.

Dans tous les systèmes par conduites sous pression, les principales composantes (figure IV.14) sont:

- L'ouvrage de tête (unité de contrôle de la charge);
- Les conduites principales et secondaires;
- Les bornes;
- Les adducteurs (conduites d'alimentation);
- Les conduites latérales (tuyaux d'irrigation) avec les distributeurs.

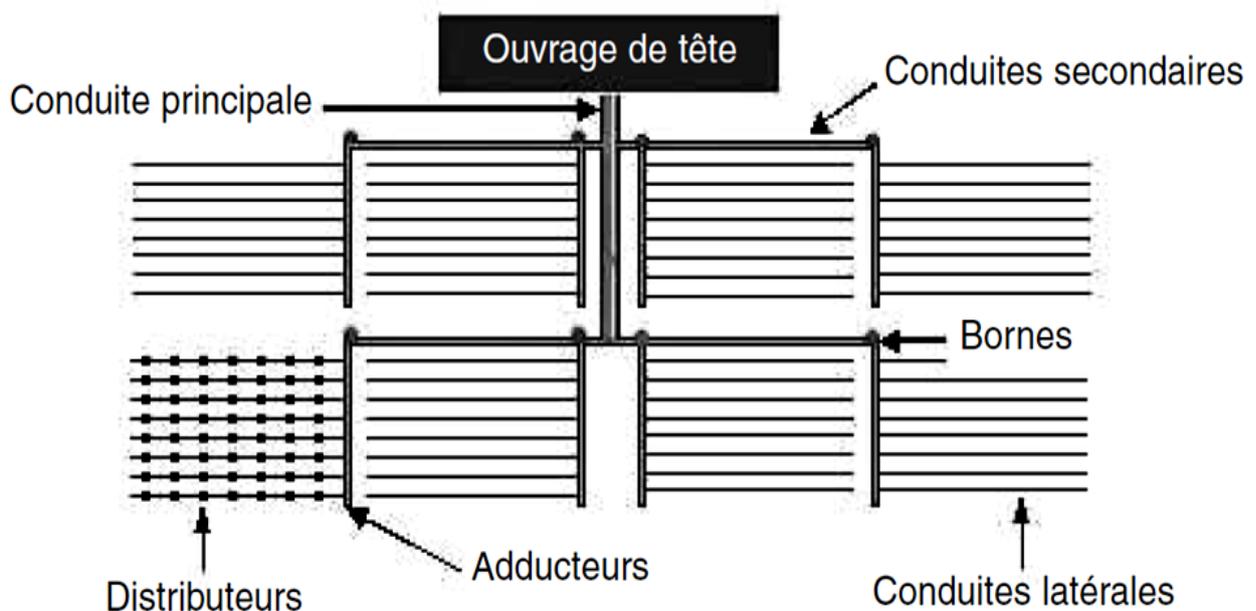


Figure IV.14. Schéma type d'un réseau d'irrigation sous pression (FAO, 1997).

4.1.1. Ouvrage de tête (Fig. IV.15). Il comprend une ligne d'alimentation (PVC rigide ou acier galvanisé fileté) installée horizontalement à une hauteur minimale de 60 cm au-dessus du sol. Il est équipé d'un purgeur d'air, d'une valve de contrôle, de deux prises (tuyaux de 3/4 pouce) pour la connexion avec l'injecteur d'engrais liquide, d'une vanne de sectionnement entre les deux prises, d'un injecteur d'engrais et d'un filtre. Si un filtre à gravier ou un séparateur à sable (hydrocyclone) est nécessaire, il est installé en tête de l'ouvrage.

4.1.2. Conduite principale. C'est la conduite de plus grand diamètre du réseau, qui peut transporter le débit du système dans des conditions hydrauliques favorables de vitesse du courant et de pertes de charge. Les conduites utilisées sont généralement enterrées, assemblées de manière permanente pour le PVC rigide, le polyéthylène noir à haute densité (PEHD), les tuyaux plats (type pompier), et les tubes en acier léger galvanisé avec raccord rapide, dans une gamme de diamètres de 63 à 160 mm (2–6 pouces) selon la dimension de l'exploitation.

4.1.3. Conduites secondaires. Ce sont des conduites de plus petits diamètres qui se branchent sur la conduite principale et qui permettent de distribuer l'écoulement vers les diverses parcelles. Elles sont du même type que les conduites principales.

4.1.4. Bornes de prise. Elles sont branchées sur les conduites principales ou secondaires et équipées d'une vanne de sectionnement (2–3 pouces). Elles fournissent une partie ou la totalité de l'écoulement aux adducteurs (conduites d'alimentation).

4.1.5. Adducteurs (conduites d'alimentation). Ce sont des conduites d'un plus petit diamètre que les conduites secondaires qui sont connectées aux bornes et posées, généralement en surface, le long des limites de parcelle pour alimenter les conduites latérales. Tous les types de matériaux à conduites disponibles peuvent convenir pour ces adducteurs (PEHD habituellement), de diamètre de 2 à 3 pouces.

4.1.6. Conduites latérales (conduites d'irrigation). Ce sont les conduites avec le plus petit diamètre du système; elles sont couplées aux adducteurs, perpendiculaires à ceux-ci, à des emplacements fixes, posées le long des lignes de culture et équipées de distributeurs fixés à des intervalles courts et réguliers.

4.1.7. Distributeurs. Un distributeur pour l'irrigation est un dispositif de toute nature, de tout type et de toute dimension qui, branché sur une conduite, débite l'eau sous pression de diverses manières: en projetant des jets d'eau en l'air (asperseurs), en pulvérisant l'eau (mini-diffuseurs), en distribuant des gouttes d'eau en continu (goutteurs) et en fournissant de petits écoulements (barboteurs, vannettes et ouvertures sur une conduite, tuyaux de petits diamètres, etc.).

5. Classification des systèmes

Les systèmes d'irrigation par conduites sous pression sont classés selon la pression requise pour leur fonctionnement, la méthode de distribution de l'eau à la plante et le type d'installation.

5.1. Pression de fonctionnement

La pression de fonctionnement du système est la pression hydraulique maximale requise pour le fonctionnement normal du système, qui comprend: **les pertes de charge** dans le réseau de conduites depuis l'ouvrage de tête jusqu'à l'extrémité la plus lointaine du système; **la pression** requise par les distributeurs; et **la différence d'altitude** (en plus ou en moins). On distingue trois classes de systèmes:

- les systèmes à basse pression, dans lesquels la pression requise est de 2 à 3,5 bars;
- les systèmes à moyenne pression, dans lesquels la pression requise est de 3,5 à 5 bars;
- les systèmes à haute pression, dans lesquels la pression requise est supérieure à 5 bars.

5.2. Méthode de distribution de l'eau

La méthode de distribution de l'eau est la manière dont l'eau est distribuée aux plantes. On distingue:

- **l'irrigation par aspersion** (au-dessus des cultures): l'eau est répartie sur toute la superficie sous la forme de gouttes de pluie. Il existe de nombreuses variantes de l'aspersion en termes de débit et de diamètre d'aspersion, de hauteur du jet au-dessus du sol (au-dessus des cultures, en dessous du feuillage), de type de mécanisme pour l'asperseur, etc.;

- **la micro-irrigation** (irrigation localisée) par goutteurs, mini-diffuseurs, barboteurs, micro-jets, etc.: l'eau est livrée aux plantes sans être répartie sur la totalité de la surface, mais appliquée à faible dose sur une surface limitée autour des plantes.

La méthode de distribution de l'eau et le type de distributeur sont les principales caractéristiques d'un système d'irrigation sous pression. Dans bien des cas ces deux facteurs influencent les autres caractéristiques (pression et type d'installation) et performances, tels les débits et la durée d'application.

La capacité de débit d'un système est le débit hydraulique (en mètres cubes par heure ou litres par seconde) donné ou fixé pour couvrir les besoins en eau d'irrigation de la surface irrigable en période de pointe. Elle est inversement proportionnelle à la durée d'application. Elle correspond habituellement au débit le plus petit possible en vue d'optimiser les dimensions des conduites et des autres équipements. La durée d'application est le temps requis pour l'achèvement d'un cycle d'irrigation.

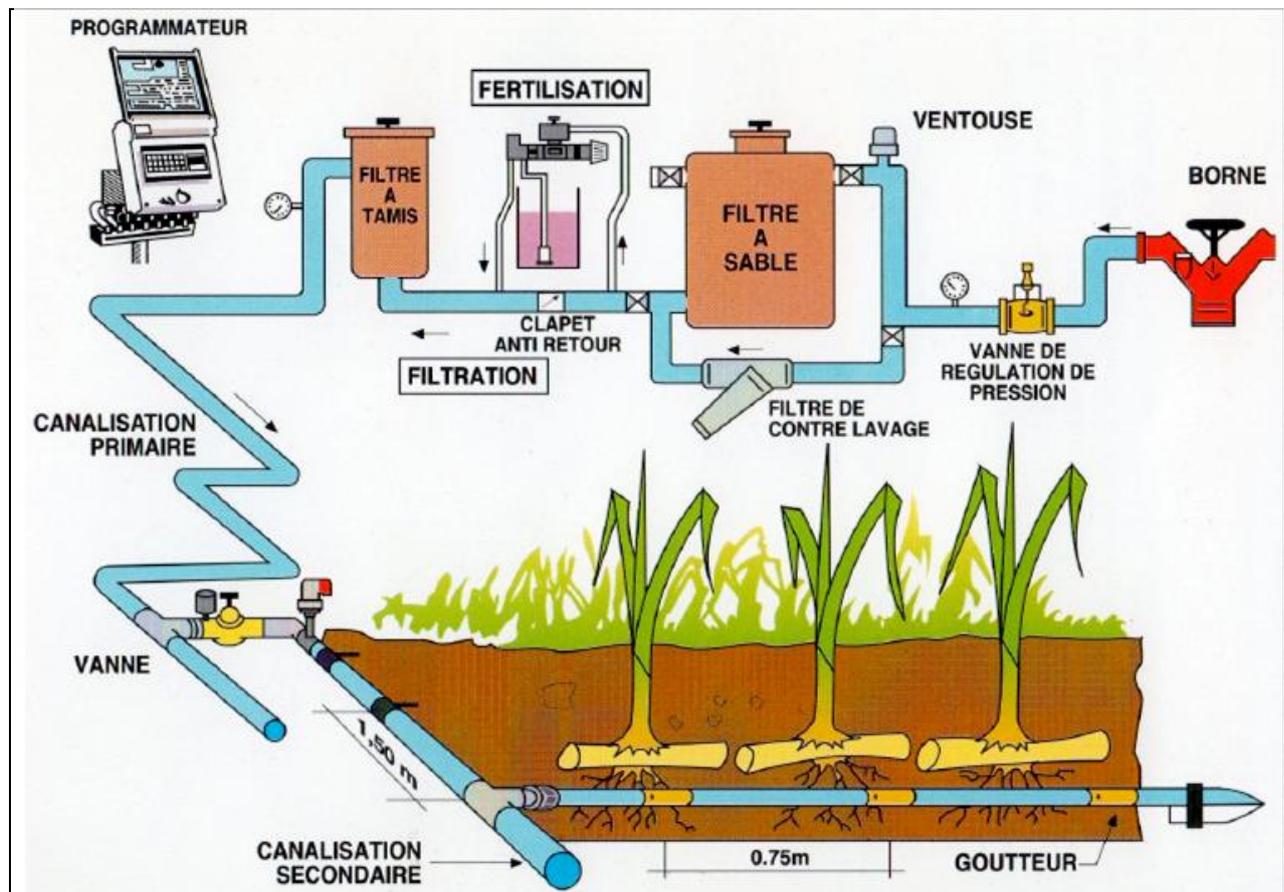


Figure IV.15. Schéma d'une installation de goutte à goutte (ouvrage de tête).

5.3. Type d'installation

On distingue trois classes de systèmes:

- **les installations fixes**, où toutes les composantes sont posées ou installées à des emplacements fixes, permanents ou saisonniers;
- **les installations semi-permanentes**, où les conduites principales et secondaires sont permanentes alors que les conduites latérales sont portables, manuellement ou mécaniquement;
- **les installations portables**, où toutes les composantes sont portables.

5.4. Equipement d'irrigation et techniques de raccordement

Les systèmes d'irrigation comprennent diverses sortes de conduites, raccords de conduites, valves et autres équipements selon le type de système et d'installation. La plupart des installations ont des structures identiques, ce qui permet de couvrir les besoins de toute une région avec une gamme relativement réduite d'équipements.

Les différents équipements d'irrigation sont:

- Les conduites;
- Les raccords de conduites;
- Les dispositifs de contrôle de l'écoulement;
- Les filtres;
- Le matériel d'injection pour l'irrigation fertilisante;
- Les distributeurs d'eau;
- Les dispositifs d'automatisation;
- Les instruments de mesure;
- Les systèmes d'exhaure (évacuation des eaux excédentaires).

Les principales caractéristiques des équipements d'irrigation sont:

- Les matériaux, par exemple l'acier galvanisé, le PVC rigide, etc.;
- Les dimensions: par exemple le diamètre nominal (DN) de la norme métrique ISO en millimètres (16–160 mm) et/ou de la norme de filetage BSP (British Standard Pipe) en pouces (2–4 pouces);
- Les types de raccords et joints, par exemple à filetage, raccords rapides, soudage par solvant, etc.;
- La pression de fonctionnement PN (pression nominale) ou PR (classe de pression) en bars, par exemple 6 bars;
- Les normes nationales ou/et internationales conformes, par exemple DIN, ISO, BS, ASTM. La pression de fonctionnement d'une conduite ou d'un raccord est la pression hydraulique interne maximale à laquelle la conduite ou le raccord sera soumis de manière continue en utilisation ordinaire, avec la certitude que la conduite ne connaîtra aucune défaillance. On distingue la pression nominale (PN) et la classe de pression (PR).

6. L'irrigation par aspersion

Réservée, au début, à l'arrosage maraîcher, l'aspersion a pris, en grande culture, un essor considérable parallèlement au développement des matériaux métalliques et plastiques. Cette technique consiste à imiter la pluie sans ruissellement, le débit de l'arrosage doit être toujours

inférieur à celui de l'infiltration. Elle exige de très grands moyens, et est surtout utilisée pour l'irrigation des grandes surfaces.



Figure IV.16. Quelques photos du système d'irrigation par aspersion.

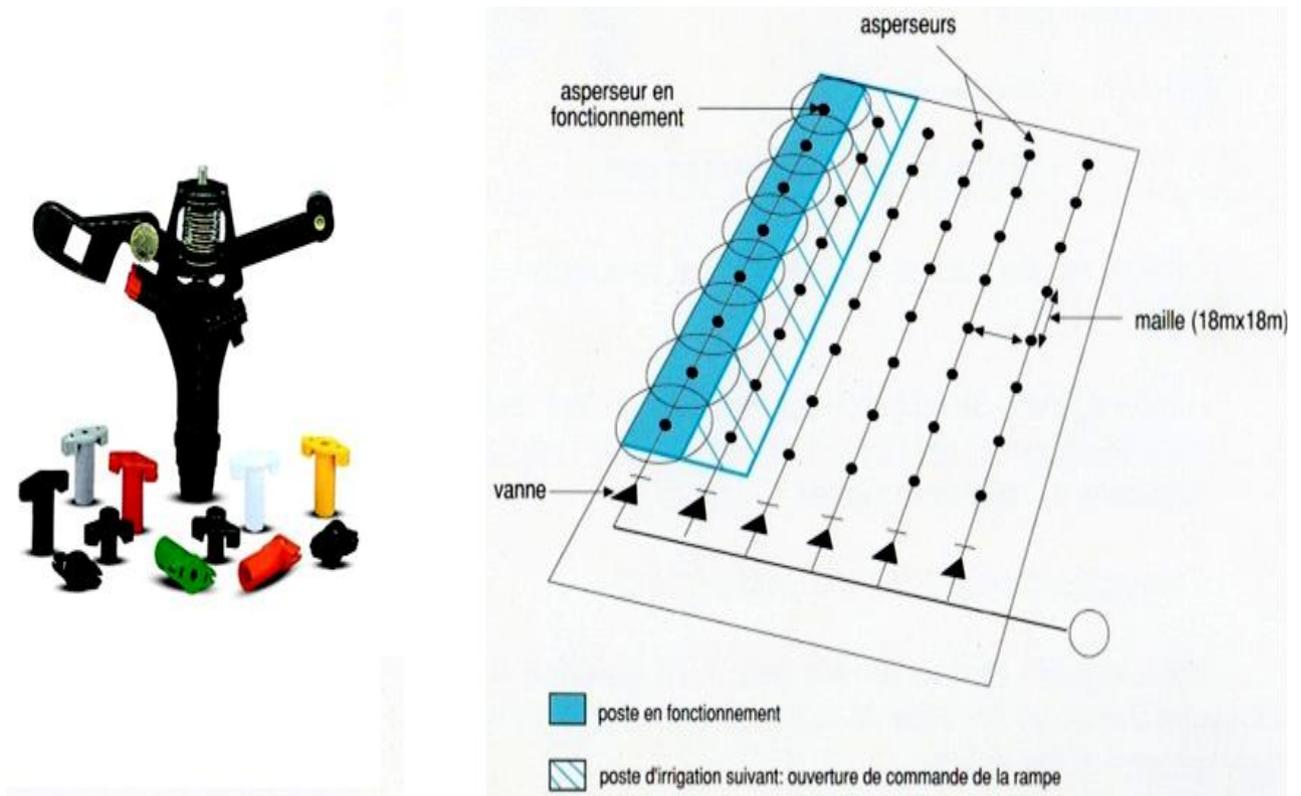


Figure IV.17. Asperseur et schéma simplifié du système d'irrigation par aspersion.

Ses avantages peuvent se résumer ainsi :

- Tout nivellement de sol est supprimé.
- C'est la seule méthode permettant d'arroser convenablement, les sols trop perméables pour être irrigués par ruissellement.
- Elle permet un dosage précis, et l'économie d'eau.
- L'eau pulvérisée est plus oxygénée.

- L'arrosage antigel est possible.
- Elle permet une économie de main d'œuvre.
-

Par contre elle a **trois principaux inconvénients** :

- Le coût élevé des installations.
- La mauvaise répartition de l'eau par temps agité (vent).
- Le mouillage des feuilles (risque de maladies).

7. L'irrigation localisée (goutte à goutte, ou micro irrigation)

Elle consiste à apporter l'eau sur une partie du sol seulement par petites doses fréquentes. L'eau est apportée par des distributeurs, ce qui crée dans le sol des zones humides appelées «bulbes d'arrosage» (Fig. IV.18). Ces installations sont entièrement fixes, munies de vannes semi-automatiques, elles sont généralement en plastique PVC et l'eau est amenée sous faible pression et faible débit.

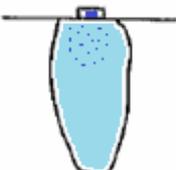
7.1. Nouvelles techniques : plusieurs techniques se sont développées (Fig. IV.19):

- l'irrigation localisée **par goutteurs** ;
- l'irrigation localisée **par rampes perforées fixes** ;
- l'irrigation localisée par **diffusion (micro-jet, microdiffuseur)**.

7.2. Les avantages de l'irrigation localisée sont :

- Possibilité, voire nécessité, de l'automatisation du système.
- Economie de l'eau, de main d'œuvre, d'énergie et facilité de travail.
- Feuillage sec, donc réduction des maladies cryptogamiques.
- Humidité du sol constante à cause de la continuité d'arrosage.
- Réduction du développement des mauvaises herbes.
- Grande efficacité de la fertilisation à cause de l'absence de lessivage.
- Les activités culturales ne sont pas gênées par les arrosages (surface de sol toujours sèche).
- Possibilité de l'irrigation fertilisante (fertigation).
- Contrôle précis des quantités d'eau et de fertilisants apportés.

Tableau IV.1. Bulbe humide (d'arrosage) selon la texture du sol (Vabre, 2012).

Texture	Estimation du diamètre de la zone humide D_m (m) à partir du débit du goutteur q (l/h)	Forme de la zone humide
Texture fine (argile)	$D_m = 1,2 + 0,1 q$	
Texture moyenne (limon)	$D_m = 0,7 + 0,11 q$	
Texture grossière (sable)	$D_m = 0,3 + 0,12 q$	

8. Le choix du système d'arrosage repose sur un ensemble de critères et de contraintes naturelles, techniques et agronomiques.

- La topographie (pente, relief, géométrie de la parcelle).
- Climat (précipitation, température, évapotranspiration, vent)
- Ressource en eau (quantité, qualité, débit, disponibilité)
- Nature du sol (perméabilité).
- Facteurs économiques (finances).
- Les besoins en main d'œuvre qualifié.
- Les types des cultures envisagés.
-

Le choix du système d'irrigation reste toujours un critère de la réussite de l'investissement, un système d'irrigation mal choisi peut entraîner des pertes économiques très graves.

Le choix de l'irrigation localisée est très coûteux, mais son utilisation fait économiser l'eau pour les régions où elle manque.

Une analyse multicritères du choix des techniques d'arrosage basée sur les différentes contraintes, résume le choix adéquat pour la zone considérée (Tableau III-1).

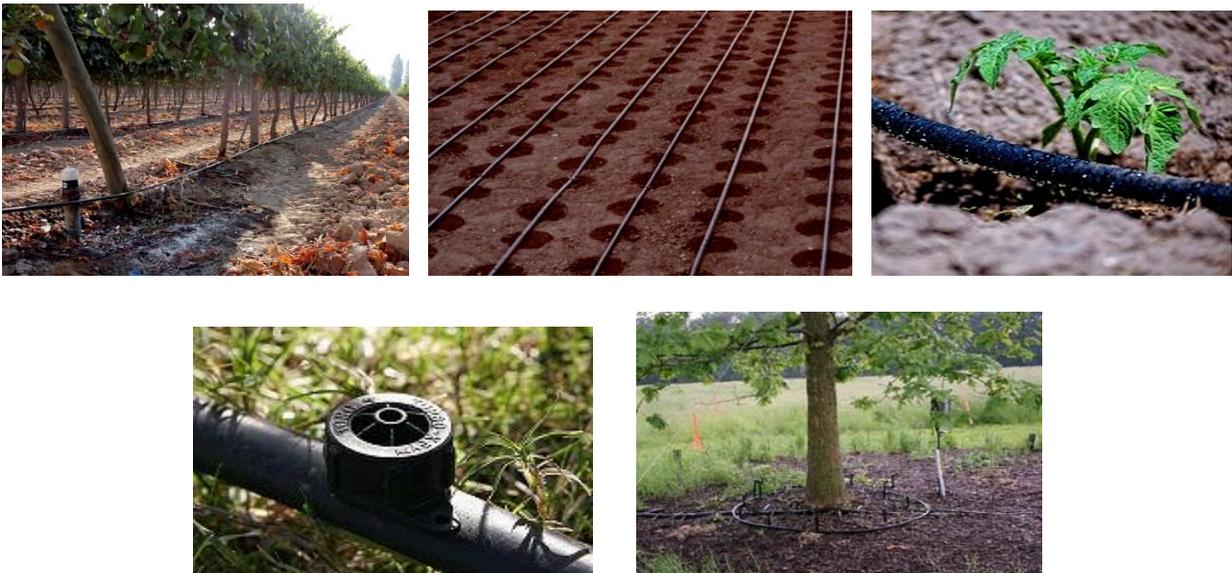


Figure IV.19. Quelques photos du système goutte à goutte.

Tableau III.2. Analyse multicritères du choix de la technique d'arrosage.

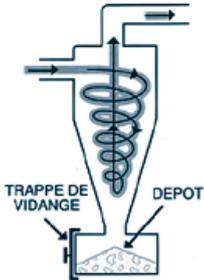
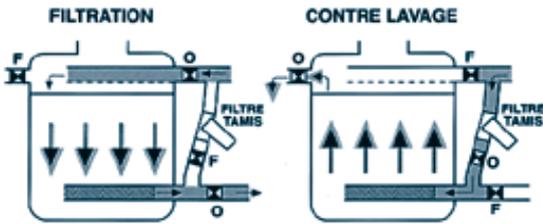
Contraintes	Irrigation de surface		Irrigation sous pression	
	Par Rigole	Par Planche	Aspersion	Localisé
Contraintes naturelles				
-Évaporation	++	++	++	++
-Vent (2.9 m/s)	+++	+++	++	+++
-Texture (limoneuse)	++	++	++	+++
-Perméabilité (moy)	++	++	+++	++
-Pente (2.5%)	+++	+++	+++	+++
-Qualité d'eau d'irrigation (bonne)	+++	+++	+++	+++
Contraintes agronomiques				
-Maraîchages	+++	++	++	+++
- Fourrages	-	+	+++	-
-Agrumes	+++	-	-	+++
Contraintes techniques				
-Personnels qualifiés	+++	+++	+++	+++
Contraintes économiques et financières	+++	+++	--	--
Economie d'eau	+	+	++	+++
- : Déconseillé; + : Adapté avec réserve; ++ : Adapté; +++ : Très Adapté				

Références bibliographiques :

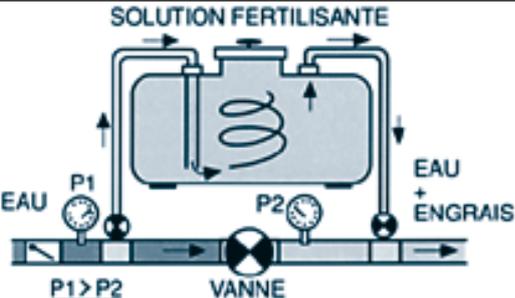
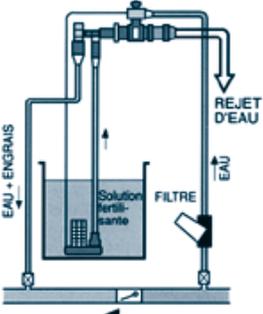
1. **ALIGC** (Arizona Landscape Irrigation Guidelines Committee): Guidelines for Landscape Drip Irrigation Systems, 2011, 58p. (www.amwua.org)
2. **Asawa G.L.**: Irrigation and water resources engineering, NAIL publisher, India, 2005, 608p.
3. **BRGM**, Table de conversion, 1969, 35p.
4. **C.T.G.R.E.F.** (Ministère de l'Agriculture France): Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations, 1979, 200p.
5. **Compaore M. L.**: Cours de micro-irrigation, E.I.E.R., 2003, 150p.
6. **Coulon M.** : Initiation à l'agronomie, 2000, 139p.
7. **FAO** : Manuel des techniques d'irrigation sous pression, 2008, Rome, 308p.
8. **FAO** : Bulletin d'irrigation et de drainage, No.43, Les machines élévatoires, 1994, 380p.
9. **FAO** : Gestion des eaux en irrigation, Manuel de formation No.5, Méthodes d'irrigation, 1990, 65p.
10. **FAO**: Irrigation Water Management: Training Manual No.1 - Introduction to Irrigation, 1985, 192p.
11. **FAO**: Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Crop Evapotranspiration, 2000, 300p.
12. **FAO**: Conception et optimisation des réseaux d'irrigation, No. 44, 1995, 295p.
13. **Guiesse M.** : Module Pédologie Physique du sol, INPT-ENSAT, PAD, 2005, 47p.
14. **Jasim O. I.** : Drip Irrigation System in arid area of Iraq for Olive –Cultivation, These Master. Università Degli Studi Di Firenze, Florence, Italy. 2012/2013, 53p
15. **Kessira M.** : Conception d'un projet d'irrigation, **INSID**, 15p.
16. **Masmoudi Charfi C.** : Manuel d'irrigation de l'olivier, Techniques, Applications, Résultats de Recherches, Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur agricoles (IRESA) Tunis, 2012, 206p.
17. **Moshe S.**: Drip irrigation, second edition, 2005, 134p.
18. **Moshe S.**: Micro irrigation technology and application, second version, 2009, 146p.
19. **Moshe S.**: Sprinkler irrigation technology and application, 2011, 294p.
20. **Nedjraoui D. et Bédrani S.**, « La désertification dans les steppes algériennes : causes, impacts et actions de lutte », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 8 Numéro 1 | avril 2008, mis en ligne le 01 avril 2008, consulté le 02 octobre 2017. URL : <http://vertigo.revues.org/5375> ; DOI : 10.4000/vertigo.5375
21. **Ourahou M.**: Dimensionnement des ouvrages du réseau d'irrigation, CRMVA, Maroc, 51p.
22. **Ourahou M.**: Dimensionnement et conception des canaux d'irrigation, CRMVA, Maroc, 51p.
23. **Toure A.** : Etude d'aménagement hydro-agricole de 7000 hectares sous irrigation par aspersion à travers un réseau de pivot d'irrigation à Seribabougougou dans le casier de Mbewani – Segou zone office du Niger, 2IE, Niger, 2011. 78 p.
24. **Vabre C., Chiva Vicent S., Hernández López L., Juliá Bolívar J. E.**, : Manuel d'utilisation du programme de calcul CECIIL (Calcul Et Conception d'Infrastructures d'Irrigation Localisée), Universitat Jaume I de Castellón, (Espagne), l'organisation humanitaire internationale Action Contre la Faim, Espagne, 2012, 68p.
25. **Van Laere P. E.**: Mémento de l'irrigation, collection annuels Techniques, ISF, IAI, Belgique, 2003, 11p.
26. **WMO (WMO-N 168)** : Guide des pratiques hydrologiques, acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications, Cinquième édition 1994, 829p. (www.whycos.org/hwrp/guide/.../WMOFRA_v5_fr.pdf)
27. <http://www.hydro.eaufrance.fr/glossaire.php>
28. <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre5/chapitre5.html>

**Annexe 1 :
Équipement du réseau d'irrigation goutte à goutte**

Les différents types de filtre :

<p>Les hydrocyclones</p>		
<p>Les filtres à sable</p>		
<p>Les filtres à tamis</p>		

Le matériel de ferti-irrigation

<p>Dilueur</p>		
<p>Pompe Doseuse</p>		

Le matériel de transport et de distribution

<p>Les vannes</p>	
<p>Les portes rampes</p>	
<p>Les rampes</p>	
<p>Les diffuseurs (goutteurs)</p>	

Annexe 2 :

Quelques Unités physiques usuelles en hydraulique agricole (B.r.g.m.).

Surface:

$$1 \text{ km}^2 = 1.10^6 \text{ m}^2 = 100 \text{ ha} = 1.10^4 \text{ Are}$$

$$1 \text{ ha} = 100 \text{ a} = 1.10^4 \text{ m}^2 = 0,01 \text{ km}^2$$

$$1 \text{ m}^2 = 1.10^{-6} \text{ km}^2 = 1.10^{-4} \text{ ha}$$

Volume

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l} = 1 \text{ mm}^3 \times 1000 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ hm}^3 = 1.10^6 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3 \times 1 \text{ km}^2$$

Pression

$$1 \text{ barye} = 1 \text{ dyne/cm}^2 = 1.10^{-6} \text{ bar}$$

$$1 \text{ bar} = 1.10^6 \text{ baryes} = 1 \text{ hectopièze} = 750,1 \text{ mm de mercure} = 10,2 \text{ m d'eau}$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 0,98 \text{ bar} = 980 \text{ millibar} = 735 \text{ mm de mercure} = 10 \text{ m d'eau}$$

$$1 \text{ atmosphère} = 1,013 \text{ bar} = 760 \text{ mm de mercure (à } 0^\circ \text{C)} = 1,033 \text{ kg/cm}^2 = 10,33 \text{ m d'eau}$$

$$1 \text{ mm de mercure} = 1,33 \text{ millibar} = 1,316.10^{-3} \text{ atmosphère} = 1,36 \text{ g/cm}^2 = 1,36.10^2 \text{ m d'eau}$$

Vitesse

$$1 \text{ cm/s} = 36 \text{ m/h} = 864 \text{ m/j} = 310 \text{ km/an}$$

$$1 \text{ m/h} = 0,277 \text{ mm/s} = 24 \text{ m/j} = 8,76 \text{ km/an}$$

$$1 \text{ m/j} = 1,15.10^{-2} \text{ mm/s} = 0,0416 \text{ m/h} = 365 \text{ m/an}$$

Débit

$$1 \text{ m}^3/\text{s} = 3600 \text{ m}^3/\text{h} = 86.400 \text{ m}^3/\text{j} = 31.536.000 \text{ m}^3/\text{an}$$

$$1 \text{ m}^3/\text{h} = 2,77.10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 24 \text{ m}^3/\text{j} = 720 \text{ m}^3/\text{mois} = 8.640 \text{ m}^3/\text{an} = 0,277 \text{ l/s}$$

$$1 \text{ m}^3/\text{j} = 41,7 \text{ l/h} = 365 \text{ m}^3/\text{an} = 0,011 \text{ l/s}$$

$$1.10^6 \text{ m}^3/\text{an} = 1 \text{ hm}^3/\text{an} = 2.739 \text{ m}^3/\text{j} = 114 \text{ m}^3/\text{h} = 32 \text{ l/s}$$

$$1 \text{ l/s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h} = 86,4 \text{ m}^3/\text{j} = 2.592 \text{ m}^3/\text{mois} = 31.536 \text{ m}^3/\text{an}$$

Indices et modules débit/surface

$$1 \text{ mm/an} = 0,03 \text{ l/s/km}^2 = 82,2 \text{ m}^3/\text{mois/km}^2 = 1000 \text{ m}^3/\text{an/km}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{an/ha}$$

$$1 \text{ l/s/km}^2 = 315,36 \text{ m}^3/\text{an/ha} = 32 \text{ mm/an}$$

$$1 \text{ l/s/ha} = 2.592 \text{ m}^3/\text{mois/ha} = 3,2.10^{-6} \text{ m}^3/\text{an/km}^2$$

$$1 \text{ m}^3/\text{an/km}^2 = 0,082 \text{ m}^3/\text{mois/km}^2 = 3.10^{-5} \text{ l/s/km}^2 = 1.10^{-3} \text{ mm/an}$$

$$1 \text{ m}^3/\text{an/ha} = 3.10^{-3} \text{ l/s/km}^2 = 0,1 \text{ mm/an}$$

PERMEABILITE (coefficient K de Darcy)

$$1 \text{ m/s} = 86,4.10^6 \text{ l/m}^2/\text{j} = 10,4 \text{ darcy} = 3.600 \text{ m/h}$$

$$1 \text{ cm/s} = 0,862 \text{ l/m}^2/\text{j} = 0,104 \text{ darcy}$$

$$1 \text{ l/m}^2/\text{j} = 1,1574.10^{-8} \text{ m/s} = 1,1574.10^{-6} \text{ cm/s} = 1 \text{ mm/j}$$

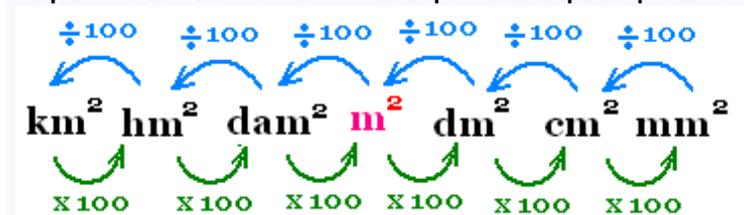
$$1 \text{ m/h} = 2,77.10^{-4} \text{ m/s}$$

$$1 \text{ darcy (pour l'eau, à } 20^\circ) = 9,6127.10^{-2} \text{ m/s} = 9,6127 \text{ cm/s} =$$

$$9,8697.10^{-7} \text{ perm} = 8,305.10^6 \text{ l/m}^2/\text{j} = 346,0572 \text{ m/h}$$

$$1 \text{ perm} = 1,0132.10^6 \text{ darcy (BODSET, MUSCAT et ROAD, 1933)}$$

On passe d'une unité à son sous-multiple en multipliant par 100.



Exemple:

$$1 \text{ m}^2 = 1 \times 100 \text{ dm}^2$$

$$1 \text{ dm}^2 = 1/100 \text{ m}^2 = 0.01 \text{ m}^2$$