

Notes de cours d'IRRIGATION – DRAINAGE pour les étudiants 3^{ème} année licence Eau et Sol.

Chargé du module : M. Benzerga N/A

Introduction :

La maîtrise de l'eau en agriculture consiste à déployer toutes les connaissances et les moyens humains et matériels visant à donner aux cultures les quantités d'eau dont elles ont besoin et quand elles le veulent et garantir ainsi des rendements optimums.

Concrètement, cette maîtrise vise non seulement une économie d'eau dans l'activité agricole, mais prêter à ce qu'on produit plus avec moins d'eau.

Dans cette idée, il est essentiel d'agir d'abord au niveau du régime hydrique du système sol – plante – atmosphère pour éviter un stress hydrique et/ou excès d'eau.

A défaut de pluviométrie, dans les pays à agriculture irriguée, cette action ne peut aboutir que si on intervient par l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation.

L'intervention sur le régime hydrique par le biais d'une irrigation efficace, revêt plusieurs aspects ; sur la culture en sol, la pratique et la façon d'irriguer, sur les pertes par évapotranspiration, ...

Parmi les objectifs visés par l'efficacité de l'irrigation, sont ceux relatifs au maintien d'un taux d'humidité du sol constant en permanence dans la zone racinaire et accessible à la culture. Il faut intervenir à plusieurs niveaux ;

1- L'objectif donc, est d'offrir une disponibilité en à la culture dans la réserve hydrique du sol. Il s'agit de maintenir une humidité du sol pour les racines, entre pas trop humide (saturation du sol et asphyxie de la plante) et pas trop sec (flétrissement de la plante).

Ceci peut être atteint par un certain nombre d'interventions.

2 - Intervention par l'irrigation - drainage ; en effet l'eau amenée à la culture par l'irrigation permet en principe de remplir et d'assurer le bon fonctionnement de la réserve hydrique, tout en maintenant une humidité du sol favorable à l'absorption racinaire et au bon développement de la culture. A cet effet des mesures sont à prendre :

- la méthode d'irrigation est fondamentale dans le maintien d'un bulbe humide autour des racines de la culture. C'est le cas de l'irrigation localisée où l'on peut maintenir en permanence l'humidité du sol autour du système racinaire, entre les deux extrêmes de teneur en sels. Ceci étant, il faut tenir compte du type de culture, type de sol, topographie et coûts.

- l'assainissement ou drainage agricole, est une technique associée souvent à l'irrigation des cultures dans les zones semi-arides et arides. Dans de telles conditions, l'eau d'irrigation est souvent chargée en sels, elle engendre donc, des problèmes de salinité pour les cultures et les sols, surtout dans les des pressions des plaines agricoles, où l'on assiste à d'accumulation de sels en surface et au niveau de la zone racinaire.

Pour diminuer de ce problème, on recommande souvent d'ajouter aux volumes d'eau d'irrigation un surplus d'eau pour lessiver ces sels au moins en dehors de la zone des racines.

C'est ainsi, qu'il faut réaliser un bon travail du sol, pour améliorer ses propriétés physiques afin d'assurer un bon lessivage des sels et un drainage en profondeur. Si cela ne suffit pas, il faut recourir aux techniques de drainage artificiel.

- Egalement pour rendre l'irrigation plus efficace, du point de vue économie d'eau, il a lieu de limiter les pertes en eau dans le système sol – plante- atmosphère, donc les pertes par évapotranspiration, en lui associant toutes les techniques culturales possibles (paillage, brise vent, brumisation, mulching, ...).

En dépit des techniques traditionnelles sus citées, en général, le progrès technologique dans le domaine agricole, comme partout ailleurs, a joué pleinement son rôle dans l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation et la prospérité d'une agriculture rentable en irrigué, plus particulièrement. Ainsi plusieurs techniques, méthodes d'irrigation, moyens de mesure de l'humidité du sol, qui contribuent tous à éviter à la culture un stress hydrique ou un excès d'eau.

1 – Intervention commandée; effectivement, cette action consiste au pilotage des irrigation destiner non seulement à assurer les besoins eau des cultures en terme d'irrigation, mais plutôt, agir en temps réel en irrigant la culture, si celle-ci manifeste un quelconque comportement physiologique vis-à-vis d'in manque d'eau (repli des feuilles, rétrécissement de la tige,..). En fait, ce pilotage de l'irrigation vient à la suite d'avertisseurs de l'irrigation placés au niveau du sol (tensiomètres) et biocapteurs ou bioprogrammateur placés au niveau des tiges ou tronc d'arbre. Le tout étant relié au réseau d'irrigation, via une assistance par ordinateur.

2- Action par le drainage; quelque soit le mode de drainage, cette technique permet à la culture, une croissance dans de bonnes conditions hydriques (sans excès d'eau) et limite les problèmes d'eau chargée et compensant parfois la non maîtrise des doses d'irrigation.

3 – Action sur l'ETP; afin d'économiser de l'eau et d'optimiser la consommation hydrique de la culture, il a lieu de limiter les pertes par évapotranspiration au niveau du continuum sol – plante – atmosphère. Sur ce sujet tous les travaux d'irrigation – drainage doivent être accompagnés par les techniques culturales; binage, désherbage, aération du sol par les travaux superficiels, paillage,....

Dans les périmètres irrigués, la maîtrise de l'eau dans la parcelle cultivée nécessite des interventions pour équilibrer le régime hydrique au niveau des composantes ; sol, plante et atmosphère. Ces actions sont situées au niveau:

- des irrigations de la culture; connaissance des doses pour satisfaire les besoins en eau, gestion des volumes d'eau moyennant des calendriers d'irrigation adéquats et choix judicieux du mode d'irrigation, compte tenu des types de culture, de sol, de la topographie et du climat.
- Limitation des pertes en eau d'irrigation par évaporation du sol (paillage) et transpiration de la culture favorisée par les fortes températures, une atmosphère sèche et la vitesse de vents généralement chauds en été, moyennant de brise vent, brumisation, irrigation d'entretien,.... Ces opérations maintiennent au niveau racinaire, un bulbe humide favorisant une bonne consommation d'eau de la culture, à condition de lessiver les sels accumulés tout autour, grâce au surplus d'eau consacré en ce sens et un drainage convenable du sol cultivé.

Au vu de ce qu'à été noté, Nous constatons que la maîtrise de l'eau en agriculture, n'est pas chose aisée, dans la mesure où les besoins en d'une culture productive, ne sont en général pas toujours, satisfaits par la pluviométrie même dans les régions tempérées (Europe, par exemple, problème de pollution, effet de serre, réchauffement de la planète, changement climatique au niveau de la planète), il faut faire donc recours à l'irrigation.

Si cette technique agricole a connu un développement important durant cette décennie, il n'en demeure qu'au niveau des pays en voie de développement ce n'est pas toujours le cas (fondamentalement, manque de mobilisation d'eau d'irrigation de bonne qualité, non maîtrise par les irrigants des quantités d'eau destinées à satisfaire la production des cultures irriguées.

Dans cet esprit, le rôle qu'incombe à un agronome, est de vulgariser, d'informer par ses connaissances en la matière, les agriculteurs, sur les pratiques rationnelles de l'irrigation pour éviter les conséquences néfastes sur les rendements, d'un stress hydrique des cultures ou d'excès d'eau. Egalement souligner, que l'eau d'irrigation est souvent chargée en sels pour les raisons évoquées antérieurement et qu'il faut toujours dans ces conditions associées l'irrigation et le drainage des sols cultivées et limiter les pertes en eau par percolation (sols légers, à renforcer par amendement organique,...)...

I – IRRIGATION :

I – 1 Les données de base l'irrigation :

Il est évident que ces données collectées relèvent des conditions du milieu où évoluent les productions végétales et caractérisées par :

a) Les données climatiques

Les données climatiques donneront les indications nécessaires concernant les besoins en eau de la culture. Celles consistent surtout en la détermination de l'évapotranspiration (ET en mm) dans le système sol – plante. Ce qui intègre un nombre important de paramètres climatiques. (Température, insolation, humidité relative de l'air, vitesse du vent,...).

Les pertes par évaporation dépendent des conditions météorologiques, qui varient au fil du temps. Pour les déterminer, on peut observer les variables météorologiques pertinentes (température, vent, humidité atmosphérique et ensoleillement), puis appliquer l'une des nombreuses équations fonctionnelles ou formules permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle (fig.1 et 2).

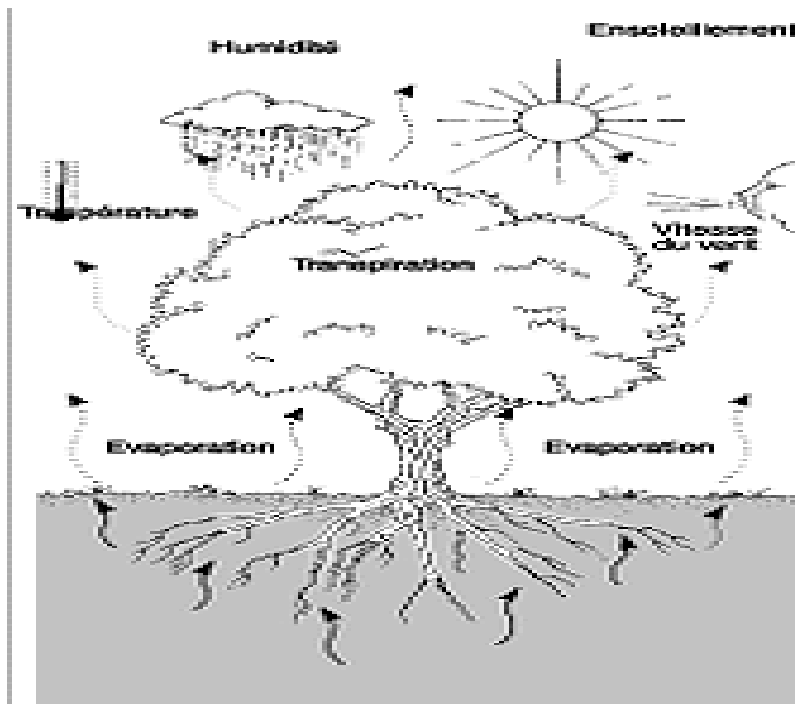


Figure n° 1: Variables météorologiques ayant une incidence sur l'évaporation, la transpiration et l'absorption de l'humidité du sol par les racines

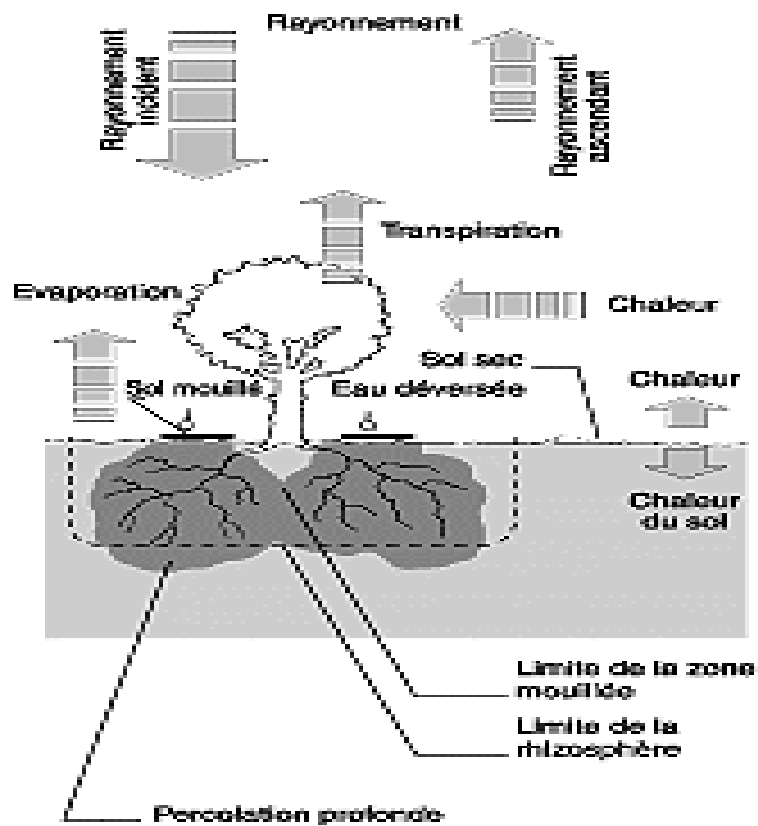


Figure n° 2 : Bilans radiatif et hydrologique d'une plante sous irrigation localisée

Une autre méthode, plus simple, consiste à estimer les pertes par évaporation en mesurant directement le taux d'évaporation à l'aide d'un évaporimètre standard. L'un des dispositifs les plus simples et les plus utiles est le bac évaporatoire. Il s'agit d'un récipient peu profond rempli d'eau, que l'on pose sur le sol à l'intérieur de la zone irriguée. On peut calculer facilement la quantité d'eau qui s'évapore chaque jour en mesurant le volume d'eau qui, dans chaque bac, doit être ajouté pour ramener la surface d'eau à un niveau déterminé. L'évaporimètre donne une indication de l'effet conjugué des rayonnements solaires, du vent, de la température et de l'humidité sur l'évapotranspiration dans un champ (fig. 3).



Figure n° 3 :L'évaporimètre, ou bac évaporatoire, standard de classe A, mis au point par le US Weather Bureau.

Il existe divers bacs normalisés, dont le plus couramment utilisé est le bac de classe A, introduit par le United States Weather Bureau. Il s'agit d'un récipient circulaire, d'un diamètre de 121 cm et d'une profondeur de 25,5 cm, placé sur un cadre de bois à claire-voie posé à même le sol. Le bac est rempli d'eau jusqu'à environ 5 cm du bord. Ce modèle standard est relativement facile à fabriquer, mais il n'est pas nécessaire de le suivre à la lettre. L'auteur estime que l'on peut obtenir pratiquement les mêmes résultats avec n'importe quel dispositif ayant une configuration plus ou moins similaire à celle du bac de classe A. (L.G. James, 1988).

Malgré la diversité de ces dispositifs, et bien qu'ils soient peu coûteux et faciles à installer, à entretenir et à contrôler, dans ce cas les bacs évaporatoires ont plusieurs inconvénients.

Même si un champ cultivé est soumis aux mêmes variables climatiques que l'eau qui se trouve dans un bac, il ne réagit pas nécessairement de la même manière. Une surface recouverte de végétation diffère d'une surface d'eau libre, à bien des points de vue: pouvoir réfléchissant, propriétés thermiques (accumulation thermique), fluctuation des températures entre la nuit et le jour, coefficient de transmission de l'eau et rugosité aérodynamique du couvert végétal. Des facteurs comme la couleur du bac, la profondeur et la turbidité de l'eau, et l'ombrage fourni par les plantes voisines, peut tous altérer jusqu'à un certain point la mesure.

L'évaporation de l'eau du bac dépend de son emplacement exact par rapport à l'exposition au vent. Les bacs entourés de hautes herbes ont un pouvoir d'évaporation inférieur de 20 à 30 pour cent à ceux qui sont placés sur une terre inculte. Des pluies peuvent tomber pendant la saison d'irrigation et s'ajouter à l'eau du bac, ou des animaux assoiffés errant en liberté peuvent venir s'y abreuver, si bien que le bac est détourné de son utilité.

Malgré tous ces inconvénients, placés et entretenus comme il convient, les bacs évaporatoires peuvent être utiles, dans la mesure où ils sont mis en corrélation avec d'autres mesures de l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Le problème est de parvenir à traduire l'évaporation du bac en une estimation de l'ETP de la plante cultivée, dont on déduira les besoins d'irrigation effectifs. Dans un premier temps, on applique un coefficient de correction pour tenir compte du fait que l'eau libre a généralement un pouvoir d'évaporation plus grand qu'une culture sur pied, même si celle-ci est plantée «serré» sur un sol bien humidifié et transpire à son taux potentiel maximal. D'après de nombreuses expériences, le coefficient de correction approprié varie entre 0,5 et 0,85. L'auteur a personnellement constaté, sur la base de mesures directes et d'une étude des documents existants, que le coefficient type est d'environ les deux tiers (disons 0,66):

$$ETP_{\text{couvert total}} = 0,66 E_{\text{bac}} \quad (1)$$

Dans un deuxième temps, il faut prendre en compte le stade de croissance de la plante, attesté par la fraction de sol qu'elle recouvre. Il peut être estimé à partir d'observations de la surface ombragée par la culture. Étant donné que l'évapotranspiration potentielle est fonction de la surface couverte par la culture, mais ne lui est pas simplement proportionnelle, il est proposé d'utiliser la relation empirique suivante:

$$ETP_{\text{couvert partiel}} = 0,33 (1 + C) E_{\text{bac}} \quad (2)$$

où C est la fraction de sol couverte par la plante, qui varie de 0 (quand la culture vient d'être semée ou plantée) à 1 (quand la parcelle cultivée est complètement couverte). Dans le dernier cas, l'équation (2) devient l'équation (1).

La troisième étape consiste à estimer les besoins d'irrigation (I), comprenant les besoins en eau effectifs de la plante (W), plus une fraction correspondant au lessivage (L), moins les pluies tombées depuis la dernière irrigation (R). Si le besoin en eau effectif de la plante est d'environ

80 pour cent de l'ETP et si la fraction correspondant au lessivage souhaitée est de 10 pour cent de l'ETP (soit $W = 0,8$ ETP, $L = 0,1$ ETP), on obtient:

$$\begin{aligned} I &= (0,33 \times (W + L) E_{\text{bac}}(1 + C) - R \\ &= (0,33 \times 0,9) E_{\text{bac}} (1 + C) - R \quad (3) \\ &= 0,3 E_{\text{bac}} (1 + C) - R \quad (\text{S. Barghouti \& G. Le Moigne, 1990}). \end{aligned}$$

Ces relations doivent uniquement être considérées comme des estimations préliminaires. Des mesures en champ des réponses d'une culture spécifique à des quantités variables d'eau d'irrigation, dans les conditions locales, devraient fournir des orientations plus fiables sur les quantités optimales à déverser. En outre, les estimations ci-dessus se réfèrent seulement aux stades de croissance active de la plante. Lorsqu'un végétal arrive à maturité et que ses tissus deviennent sénescents, ses besoins en eau diminuent naturellement. L'irrigation est interrompue quand sa contribution future au rendement ne justifie plus son coût additionnel. (J. L. Monteith, 1980).

b) Les données pédologiques

Lorsque les besoins en eau des cultures tout au long de leur phase de croissance sont connus, il reste à estimer les quantités d'eau d'irrigation à fournir au niveau de la parcelle. Pour ce faire, il est nécessaire d'en connaître les données pédologiques.

Celles-ci permettront de déterminer la capacité de stockage de l'eau dans le sol et par-là même de déterminer la dose d'irrigation à appliquer selon une fréquence définie par l'agriculteur de façon à couvrir les besoins en eau des cultures.

Les paramètres nécessaires sont les suivants:

- le type de sol ; il s'agit de prendre connaissance à ce niveau des principaux paramètres physiques et hydrodynamiques, texture, densité apparente (d_a), humidités caractéristiques (teneur en eau utile EU) et conductivité hydraulique K (m/s).

- la teneur en eau utile (EU).

Les paramètres pédologiques et culturaux permettront donc, d'estimer la réserve en eau utile du sol.

$$EU = (\theta_{FC} - \theta_{WP})$$

$$RU = EU * Z_r = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) * Z_r$$

$$RFU = RU * f$$

- EU est la teneur en eau utile du sol (mm/m). EU est la différence entre le contenu en eau à la capacité au champ (θ_{FC}) et la teneur en eau au point de flétrissement (θ_{WP}).
- Z_r (m), la profondeur d'enracinement maximale, déterminée pour des cultures arrivées à maturité et cultivées sur sol profond.
- RU (mm) est l'eau accessible aux végétaux dans le volume de sol exploité par leurs racines.
- La réserve facilement utilisable (RFU) est la quantité d'eau qu'une plante peut extraire d'un sol sans que sa production ne soit affectée de façon notable. Elle est définie par l'introduction d'un coefficient empirique, f. Ce coefficient représente le risque potentiel de soumettre la plante à un stress hydrique et est fonction de la culture. Il est généralement admis de lui donner une valeur de 1/3 à 2/3 (Grosjean E, 2002).

c) Les données culturales

Indépendamment du fait que les besoins en eau varient suivant les exigences ou non des cultures de part leur physiologie, les données culturales préciseront aussi la réserve en eau facilement utilisable par ces dernières. On détermine en premier lieu de la profondeur de prospection racinaire (Z_r).

En effet cet élément est variable en fonction du type de culture et de son stade végétatif de développement. Egalement et compte tenu du type de sol aussi, on définit pour chaque et en fonction du cycle végétatif de la plante, un coefficient cultural k_c .

Egalement, Les données culturales préciseront la réserve en eau facilement utilisable par plante.

Les racines des plantes puisent l'eau dans la réserve utile du sol et la disperse dans l'atmosphère par évapo-transpiration. Si l'eau disponible diminue tandis que la tension de succion du sol augmente, les racines ont de plus en plus de difficulté d'extraire l'eau, l'évapo-transpiration diminue; elle devient inférieure à l'ETP: c'est l'ET Réelle. Au dessous de d'une tension de succion de 1 atmosphère (1000 hPa), l'absorption de l'eau par les racines est fortement diminuée; elle devient nulle lorsque le point de flétrissement est atteint (16 atmosphères).

Le volume occupé par les racines d'une plante dans le sol a une grande importance pour l'absorption de l'eau. L'espace racinaire varie selon les plantes et la nature du sol. Les racines du blé s'enfoncent à 50 cm dans un sable, mais atteignent 1 m dans un limon. Dans une forêt tempérée, l'espace racinaire, l'effectif des arbres ne dépassent pas 1 m pour l'approvisionnement en eau. En générale, les racines superficielles peuvent vaincre des tensions de succion supérieures et se procurer de l'eau même dans un sol apparemment sec.

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

Concernant les coefficients culturaux, quelques chiffres sont présentés pour un certain nombre de cultures maraîchères dans le tableau n° 1.

Tableau n° 1 : Coefficients culturaux Kc pour quelques cultures maraîchères.

Cultures	Kc =	
	Phase de pleine végétation	ETM / ETP Phase de maturation
Aubergines	1	0.9
Tomates	1.1	0.7
Poivrons	1	0.9
Haricots verts	1	0.9
Pois	1.1	1
Carottes	1	0.8
Oignons	0.9	0.7
Concombres	0.9	0.8
Courges	0.9	0.7
Melon	0.9	0.5

Pour de plus amples informations à ce sujet, des références bibliographiques peuvent être consultées. (R.G. Allen, S. Luis, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith, 1998; J. Doorenbos & W.O. Pruitt, 1980 ; J. P. Poiret & Ollier , 1983,...).

Par ailleurs, il faut savoir que pour les premières phases (semi et plantation; développement et enracinement), une bonne alimentation en eau est impérative à l'installation des cultures. (R.G. Allen, S. Luis, L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith, 1998).

Généralement, les plantes à productions fruitières ou à graines, possèdent des périodes critiques (ébauches florales, pré fructification,...) pour leur alimentation en eau et des périodes plus ou moins sensibles (nouaison, grossissement des fruits ou graines).

Cela ne signifie pas que les besoins en eau soient plus élevés pendant la période critique mais aussi toute restriction dans ce sens a des conséquences très graves et irréversibles sur les rendements.

I – 2 Les superficies mises en jeu agriculture irriguée (cas de l'Algérie) :

L'eau devient de plus en plus une matière première précieuse, avec l'accroissement démographique, l'effet d'industrialisation et la mise en valeur de nouvelles terres à des fins agricoles.

Parmi les secteurs consommateurs d'eau, l'agriculture vient en tête en absorbant cette eau sous forme d'irrigations.

L'irrigation en Algérie a toujours été un impératif et un instrument privilégié pour assurer l'accroissement de la production agricole, garantir une stabilité de la production.

Son développement reste cependant tributaire des potentialités en eau du pays.

En Algérie, dans nos conditions de climat marqué selon les régions par la faiblesse et la mauvaise répartition des apports pluviométriques, l'irrigation nous est indispensable pour assurer une production agricole régulière en quantité suffisante en vue de disposer d'une sécurité alimentaire raisonnable.

Sur les 238 Millions d'hectares du territoire National, la superficie agricole utile n'est que de l'ordre de Huit (8) Millions d'hectares environ.

A peine 5% de cette superficie a été en moyenne irriguée ces vingt dernières années cependant la valeur des productions agricoles en irriguée représente tout de même chaque année près de 50% de la valeur totale des produits de la terre.

Les potentialités en sol irrigable de bonne qualité dépassent 1,5 Millions d'hectares selon les études menées par notre Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Les objectifs futurs d'irrigation retenus par nos différents plans nationaux de développement sont de 1 Million d'hectares dont 40% en Grands Périmètres.

En ce qui concerne les ressources en eau, sur une potentialité de 12,5 Milliards de mètres cubes mobilisables moins de 50% sont actuellement mobilisés.

Ce chiffre intègre les ressources superficielles et souterraines en particulier celles des nappes fossiles du Sahara Septentrional (Continental Intercalaire dit Albien et Complexe Terminal) et atteint pour exploitation annuelle de plus de Cinq (5) Milliards de mètres cubes.

a) *Superficies irrigables, équipées, irriguées et agricoles utiles*

La superficie irrigable ou dominée est la surface située à l'intérieur du périmètre d'étude et qui pour un type donné d'équipement hydraulique peut être techniquement desservie en eau par le système envisagé (R. Clément et A. Galand, 1979).

La surface agricole utile notée S.A.U, c'est la surface agricole utilisée (terres labourables, en maraîchage ou sous verre, florales, cultures permanentes, prairies et pâturages - y compris landes et parcours productifs, non compris les jardins familiaux).

La superficie équipée est la partie de la S.A.U que le système hydraulique projeté ou réalisé permet de desservir (sans aucun équipement collectif complémentaire). Il s'agit donc là d'une surface spatialement définie, à l'intérieur de laquelle seront localisées les irrigations.

Elle peut être inférieure à la S.A.U et n'en feront pas partie les zones pédologiquement peu aptes à valoriser un réseau d'irrigation, les zones où l'accueil à l'irrigation serait insuffisant.

C'est une notion dynamique, pouvant évoluer dans le temps au fur et à mesure des travaux réalisés.

La superficie irriguée est celle qui a fait l'objet d'une irrigation effective. Au niveau d'un aménagement, elle n'a pas de définition spatiale, il s'agit de la valeur maximale qui, par hypothèse, est susceptible d'être effectivement mise à l'irrigation. En toute rigueur, elle est définie chaque année comme étant un cumul de superficies prévues pour chaque culture irriguée de l'assolement annuel, ou aux superficies relatives aux seules cultures irriguées pendant la période de pointe.

Au niveau de l'exploitation d'un réseau d'irrigation, la superficie irriguée peut être définie annuellement par enquêtes afin de suivre l'évolution du réseau. Cette notion fait référence à des parcelles spatialement définies chaque année.

Par ailleurs, en Algérie les études pédologiques ont montré que le potentiel des terres irrigables atteint environ 850 000 ha, soit 11 % des terres arables (7,5 millions d'ha).

En Algérie, les zones irriguées sont classées en :

1/ Grands périmètres d'irrigations (GPI), infrastructure moderne d'irrigation, desservis essentiellement par de grands barrages, de taille supérieure à 3 000 ha environ ;

2/ Petits et moyens périmètres (PMH) d'irrigation, s'étendant entre la centaine et quelques milliers d'ha, avec réseaux modernes ou traditionnels d'irrigation, desservis à partir de petits barrages, dérivations d'oueds ou de forages ;

3/ Les secteurs d'irrigations individuelle, desservis à partir de puits, de sources ou par épandage de crue.

Les superficies irriguées s'élevaient en 1989 à 378 000 ha; en 1995, elles ont atteint 454 000 ha (y compris les épandages de crues), soit 50 % du potentiel irrigables et se répartissent comme suit :

- 38 000 ha (8,4 %) périmètres gérés par les offices de périmètres irrigués

(OPI) et irrigués à partir des barrages,

- 142 000 ha (31,3 %) dans les wilayas du sud,

- 274 000 ha (60,3 %) à travers la petite et moyenne hydraulique (PMH) dans le Nord.

La superficie irriguée n'a pratiquement pas évolué de 1960 à 1970. Au cours de 1980-84, environ 40 000 ha nouveaux ont été mis en irrigation, soit 8 000 ha/an ;

10 00 ha existants ont en outre été réhabilités. (MAP, 1988).

LES PERIMETRES IRRIGUES EN ALGERIE :

Mina

Le périmètre de la Mina est situé dans la Wilaya de Relizane à l'ouest de l'Algérie. Il a été créé en 1943, il occupe une superficie de 13 647 ha dont 8 200 ha sont équipés. L'irrigation de ce périmètre est pratiquée à partir du Barrage de Sidi Mohamed Ben Aouda.

Bas Cheliff

Le périmètre du bas Cheliff a été créé à l'Ouest de la vallée du Cheliff en 1937. Il occupe une superficie de 28 000 ha dont 13 000 ha sont équipés. Il est irrigué à partir du Barrage de Oued Fodda.

Beaucoup de problèmes se sont posés (salinité, Hydromorphie, texture fine et mauvais drainage) suite à l'irrigation de ces sols.

Moyen Cheliff

Le périmètre du moyen Cheliff se localise dans la Wilaya de Chlef en Amont du périmètre du Bas Cheliff. Il a été créé en 1941 et sa superficie est d'environ 25 400 ha dont 18 000 ha sont équipés. Il est irrigué à partir du Barrage Sly et des nappes souterraines.

Haut Cheliff

Le périmètre du Haut Cheliff est localisé dans la Wilaya de Chlef en Amont du Moyen Cheliff. Il a été créé en 1941 et sa superficie est d'environ 37 000 ha dont 20 300 ha sont équipés. Il est irrigué à partir des Barrages Ghrib et Deurdeur.

Hamiz

Le périmètre du Hamiz est localisé à l'Est de la plaine de Mitidja dans la Wilaya d'Alger. Il a été créé en 1937 et couvre une superficie de 12 000 ha équipés. Ce périmètre est irrigué à partir du Barrage de Hamiz, des nappes souterraines et du lac de Réghaia.

Mitidja Ouest

Le périmètre se localise dans la Wilaya de Blida. Il a été créé en 1988. La superficie équipée est de 8 600 ha. Il est irrigué à partir du Barrage de Bouroumi et des nappes souterraines. Certaines zones nécessitent un drainage des sols lourds à nappes phréatiques proches de la surface du sol.

Bounamoussa

Ce périmètre chevauche entre El – Tarf et Annaba au Nord Est de l'Algérie. Il a été créé en 1977 avec une superficie équipée de 16 500 ha. La pluviométrie dans cette région varie entre 1000 et 1800 mm.

Sig

Ce périmètre est localisé à Mascara à l'Ouest de l'Algérie. Il a été créé en 1946. La superficie équipée est de 8 200 ha. Il est irrigué à partir des Barrages de Sarno et Cheurfa II. Les problèmes de mise en valeur sont surtout liés à la salure des sols, des nappes proches de la surface des sols et de la texture fine. Ce périmètre nécessite un drainage dans l'immédiat.

Maghnia

Le périmètre de Maghnia est localisé à Tlemcen au Nord Ouest de l'Algérie. Il a été créé en 1974, et occupe une superficie équipée de 5 100 ha. Il est irrigué à partir du Barrage de Béni Bahdel et des nappes souterraines. La superficie moyenne irriguée pendant les dix dernières années est de 400 ha.

Habra

Ce périmètre est localisé à Mohammadia à l'Ouest de l'Algérie. Il a été créé en 1942 et couvre une superficie d'environ 20 000 ha dont 19 610 ha sont équipés. Il est irrigué à partir des Barrages de Bouhanifia, Ouizert et Fergoug. Les problèmes particuliers à ce périmètre est la salure et les remontées de la nappe gênante pour les cultures. Ce périmètre nécessite un drainage dans l'immédiat.

b) Contraintes liées au développement de l'irrigation

Le développement de l'irrigation a été freiné par de nombreuses contraintes, si l'on considère que seul 45 % du potentiel irrigable est actuellement irrigué. La principale raison de la stagnation constatée reste cependant l'orientation donnée par l'Etat jusqu'au début des années 80 à des secteurs considérés plus prioritaires que l'agriculture, tels l'industrie, l'énergie, etc.

En 1980, les infrastructures d'irrigation existantes n'étaient plus en mesure de fournir de l'eau d'irrigation avec une garantie acceptable pour les raisons suivantes :

- la construction des barrages se faisait à un rythme très lent ;
- les ressources en eau disponibles étaient attribuées, en priorité, aux eaux potables et industrielles ;
- le manque d'entretien et des déficiences de l'exploitation des infrastructures diminuaient l'efficacité des réseaux, qui ont parfois dû être abandonnés ;
- l'absence de systèmes d'assainissement et de drainage, jointe au manque de lessivage des sols, a conduit à des graves problèmes de salinisation (CNES, 2000).

c) Le potentiel agricole et la maîtrise des ressources

Sur une superficie totale de 238 174 1000 ha, la superficie agricole utile (SAU) représente environ 7,6 millions d'ha, soit 3 % du territoire national, dont 330 000 ha conduits en irrigué (environ 4 % de la SAU).

Les conditions climatiques sont dominées par une très grande irrégularité de la pluviométrie. En effet sur plus de 74 % de la SAU, l'eau constitue un facteur limitant au développement des cultures. La présentation ci-après des potentialités des terres agricoles en Algérie montre que :

- 1,8 millions d'ha soit 24 % de la SAU, reçoivent plus de 600 mm de pluie/an permettant une agriculture intensive sans irrigation mais qui reste toutefois conditionnés par leur répartition.
- 3,2 millions d'ha soit 42 % de la SAU, des terres situées dans des zones agroclimatiques de 400 à 600 mm, permettant des cultures de céréales, fourrages en sec et arboriculture.
- 2,6 millions d'ha, soit 34 % de la SAU, situés dans des zones à pluviométrie inférieure à 400 mm où l'agriculture constitue une activité aléatoire présentant des risques élevés.

Ainsi, on relève que 76 % de la SAU sont localisés dans des zones agroclimatiques défavorables où l'eau constitue une contrainte majeure et un facteur limitant la production agricole.

Tableau n° 2 : Répartition des cultures irriguées

Cultures	Superficies irriguées	%
Céréales	67 440	13,5
Cultures fruitières	181 630	36,4
Cultures maraîchères	186 780	37,5
Cultures industrielles	21 830	4,4
Vignes	2 480	0,5
Divers	38 270	7,7
Total	498 430	100

Source : Statistiques Agricoles, Série B.

Les superficies irriguées sont de l'ordre de 498 430 ha dont 37 % concernent les cultures maraîchères, 36 % les cultures fruitières, 14 % les céréales et le reste, soit 12 % les vignes, les cultures industrielles et divers (tab.2).

En ce qui concerne l'irrigation des cultures fruitières, sur une superficie totale de 456 460 ha de plantations fruitières, 181 630 ha seulement ont été irrigués, soit près de 40 % de la superficie complantée (CNES, 2000).

La superficie en cours d'équipement à la parcelle en irrigation localisée est de 74.000 hectares.

En matière d'exploitation des grands périmètres irrigués, seulement 40.000 ha ont été irrigués en moyenne au cours des vingt dernières années, soit 40 % de la superficie équipée irrigable qui est actuellement de l'ordre de 100.000 ha. On observe en fait, depuis 1989, une stagnation des superficies irriguées autour de 30.000 ha.

Cela est dû :

- À la réduction des ressources en eau affectées à l'irrigation, conséquence de la priorité accordée à l'alimentation en eau potable, industrielle et de la sécheresse.
- D'autre part à l'état de vétusté des infrastructures des anciens périmètres équipés en réseaux gravitaire.

En matière de réhabilitation et d'extension des périmètres, le programme de travaux en cours depuis l'année 1980 porte sur une superficie totale de 99.600 ha.

En matière d'exploitation de la petite et moyenne hydraulique, 380.000 ha sont recensés comme irrigués au nord et au sud par les eaux souterraines. Par rapport à des besoins en eau estimés à 2.1 milliards de m³, 1.5 milliards de m³ sont utilisés, soit un taux de couverture de 70 %.

La figure n° 4 en page 17bis est une carte du territoire national qui montre la répartition des ressources hydriques et les grands périmètres irrigués.

I – 3 Structure d'un réseau d'irrigation de l'amont vers l'aval :

Un réseau ou système d'irrigation, également connu sous le nom de "réseau de canaux", transporte l'eau de sa source aux parcelles cultivées et à irriguer, et se compose d'une multitude de canaux (Van Den Boscsh & *all*, 1993).

La figure n° 5 montre une morphologie type d'un système d'irrigation, où une partie d'un cours d'eau est dérivée à l'aide d'une prise avec barrage. Celle-ci dessert en eau le canal principal qui à son tour transmet l'eau aux canalisations secondaires.

Les dernières sont considérées comme étant des conduites d'amenées en tête des parcelles à irriguer. Dans ce cas, la technique d'arrosage appliquée, étant l'irrigation gravitaire par siphons.

Pour alimenter les rigoles en eau, ils sont placés au niveau de la conduite d'amenée, à des intervalles réguliers, correspondant à ceux des sillons (rigoles).

Autrement dit, l'eau captée par la prise, et via le canal principal, arrive à la conduite d'amenée (canalisation secondaire), et est prélevée par les siphons disposés le long de celle-ci pour servir les rigoles et irriguer ainsi la (les) parcelle (s) cultivée (s).

Les canaux sont conçus au niveau de la zone à irriguer, de telle sorte que l'eau qui y circule soit dans le sens de la pente normale (ni faible ni forte), et assurer ainsi un écoulement par gravité.

L'eau dans ces canaux devrait être à un niveau plus élevé que dans les champs.

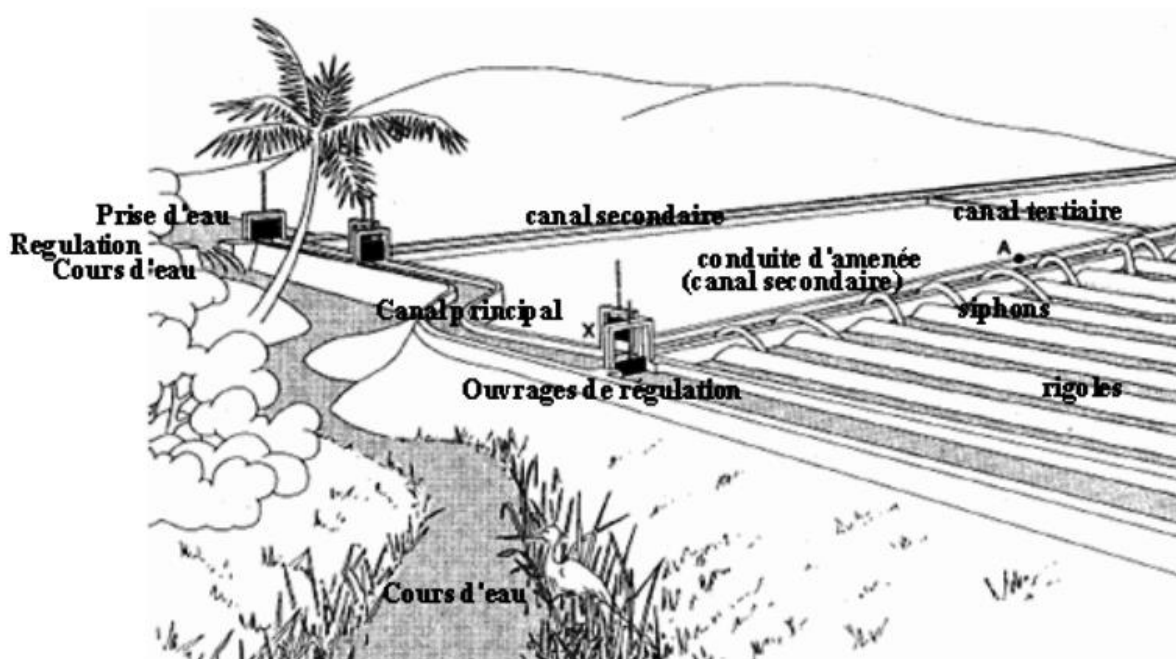


Figure n° 5 : Présentation simplifiée d'un système d'irrigation

Notons enfin, qu'un système d'irrigation est aussi doté d'ouvrages permettant de maintenir et de contrôler les débits et réguler les niveaux d'eau dans les canalisations dans les cours d'eau de prélèvement (fig. 5).

Il est important de signaler que d'autres ouvrages d'irrigation sont très pratiqués aux seins même des parcelles agricoles à l'instar de ceux situés en leur amont. A titre d'exemple, une prise d'eau est un ouvrage d'irrigation qui prélève de l'eau de la source vers la parcelle à irriguer via le système d'irrigation. C'est aussi, une brèche (ouverture), réalisée dans une première rigole pour servir en eau une deuxième pour irriguer une partie donnée d'une parcelle.

Dans un aménagement hydro agricole, on peut classer les équipements ou les ouvrages qu'il met en jeu en plusieurs niveaux :

a) Les ouvrages de mobilisation, ce sont des réalisations en amont qui mettent de l'eau, à partir de sa source d'origine (souterraine et/ou de surface) à la disposition du réseau d'irrigation pour la transporter, la distribuer et enfin irriguer les parcelles cultivées.

Il s'agit essentiellement en Algérie, de captage d'eau de nappes souterraine (puits, forages,...) et de barrages réservoirs, retenues. Dans d'autres régions de réseau hydrographique important, on peut avoir des barrages de dérivation ou prises d'eau mobilisant ainsi des fleuves ou rivières pour irriguées les cultures.

b) Les ouvrages de transport, acheminent l'eau d'irrigation depuis la prise d'eau jusqu'aux périmètres à desservir. Ces ouvrages transitent des débits importants (quelques mètres cubes à quelques dizaines de mètres cubes par seconde) sur de longues distances. Ils sont constitués d'ouvrages linéaires (canaux, galeries) et d'ouvrages ponctuels (aqueducs, siphons, régulateurs, ...).

c) Les ouvrages de distribution répartissent à l'intérieur du périmètre et jusqu'aux prises d'irrigation propres à chaque agriculteur, l'eau amenée par les ouvrages de transport, ces réseaux ont une structure généralement ramifiée.

d) L'irrigation à la parcelle est relative à la mise en œuvre de l'eau d'irrigation délivrée aux prises du réseau. On entend par parcelle d'irrigation l'unité de surface disposant d'une surface disposant d'une prise individualisée sur le réseau de distribution

Ce que nous avons présenté ici, n'est qu'une morphologie simplifiée comparé aux grands projets d'aménagement hydro agricole, où les systèmes d'irrigation font l'objet de plusieurs étapes de réalisations ; mobilisation de la source hydrique et prélèvement d'eau, transport de l'eau jusqu'à l'entrée du périmètre d'irrigation, ensuite c'est le réseau collectif qui prend le relais pour la distribution des eaux aux niveaux des prise d'eau (bornes).

Cette technologie rentre dans le cadre de la réalisation des grands projets d'aménagement hydro agricole de périmètres irrigués, notamment en Algérie, et consiste à concevoir et réaliser des systèmes d'irrigation basés sur des réseaux collectifs sous pression, modernes de façon où les quantités d'eau sont délivrées automatiquement en terme de débits prédéfinis et lis à la disposition de l'irrigant par le biais des bornes d'irrigation. C'est le cas de cas de la majorité de nos périmètres irrigués en Algérie.

I – 4 Les besoins en eau d'irrigation :

La détermination de ce paramètre fondamentale pour une culture irriguée et productive, exige d'abord, la connaissance et quantification de ses besoins hydriques sans savoir ce qu'il y a dans la réserve hydrique du sol. C'est les besoins en eau des cultures (B en m³/ha ou en mm).

a) Les besoins en eaux des cultures

Les plantes consomment de l'eau qu'elles rejettent dans l'atmosphère par évaporation. L'énergie solaire est à l'origine d'une demande climatique potentielle en eau ou évapotranspiration potentielle (ETP exprimé en mm). (L. Rieul, 1990)

Dans de telles conditions, une culture annuelle donnée a, en fonction de son stade de développement et en l'absence de facteurs limitants, une évapotranspiration maximale (ETM exprimé en mm).

Pour des périodes données, le rapport **Kc = ETM/ETP** définit un coefficient cultural Kc ou rythme de consommation d'eau de cette culture. Si la plante manque d'eau, elle réduit sa consommation, et a une évapotranspiration réelle inférieure (ETR, exprimé en mm).

Donc les besoins en eau des cultures s'exprime par :

$$\mathbf{B = ETM \text{ ou } ETR = Kc \ ETP \quad (m^3/ha \text{ ou } mm).$$

L'ETP est déterminé expérimentalement (Bacs, évaporomètres,...) ou empiriquement moyennant les données climatiques nécessaires (formules, Penmann, TURC, Blany–Criddle,...).

Le déficit hydrique, qui peut également s'exprimer sous le terme de besoins en eau (B), se définit comme la différence entre l'évapotranspiration réelle (ETR) de la culture considérée et les précipitations efficaces (Peff).

L'évapotranspiration réelle s'obtient en multipliant l'évapotranspiration standard par le coefficient cultural.

La pluie efficace, Peff, représente la fraction des précipitations qui est effectivement utilisée par la culture après déduction des pertes par ruissellement de surface et par percolation

profonde. Le choix de la méthode appropriée pour le calcul des précipitations efficaces demande une réflexion sérieuse. (W. R. Walker, 1989).

$$ETR = ETo * Kc$$

ETo représente l'évapotranspiration standard définie par Penman (1956) comme étant la quantité d'eau transpirée par unité de temps par une végétation courte et verdoyante, recouvrant complètement le sol, de hauteur uniforme et qui ne manque jamais d'eau. Elle se calcule à partir de la formule de Penman-Monteith et des données climatiques de la région.

Kc correspond au coefficient cultural, fonction du type de culture et de son état végétatif.

- Tm : températures moyenne, exprimées en °C.

- HRm : humidités de l'air moyenne, exprimées en %.

- Vm : vitesses du vent moyenne, exprimées en m/s.

- Pa : pression de l'air, exprimée en kPa.

- P : précipitations exprimées en mm.

- N : nombre de jours de précipitation par mois

- Insol. : durée d'insolation, exprimée en heure.

- Eto : évapotranspiration de référence calculée par la méthode de

Penmann-Montheih, exprimée en mm/jour.

- La première formule propose un pourcentage fixe : $P_{eff} = A * P_{moy}$ dans laquelle A est une fraction donnée par l'utilisateur. En général, A est compris entre 0.7 et 0.9.

- La deuxième formule a été développée à partir de données provenant de zones arides et semi-arides : $P_{eff} = 0.6 * P_{moy} - 10$ pour $P_{moy} < 70$ mm/mois

$P_{eff} = 0.8 * P_{moy} - 25$ pour $P_{moy} > 70$ mm/mois

- La troisième est une formule empirique développée localement. Les coefficients utilisés sont déterminés à partir d'une analyse des données climatiques locales:

$P_{eff} = A * P_{moy} + B$ pour $P_{moy} < x$ mm/mois

$P_{eff} = C * P_{moy} + D$ pour $P_{moy} > x$ mm/mois

- La quatrième formule a été mise au point par le département américain de l'agriculture (USDA) :

$P_{eff} = P_{moy} * (1 - 0.2 * P_{moy} / 125)$ pour $P_{moy} < 250$ mm/mois

$P_{eff} = 125 + 0.1 * P_{moy}$ pour $P_{moy} > 250$ mm/mois

Les besoins en eau s'expriment en m³/ha. (Allen R. G., Luis S., Pereira L.S., Raes D., Smith M, 1998).

b) Détermination des besoins en eau d'irrigation

L'irrigation d'appoint se distingue de l'irrigation pérenne par le fait qu'elle consiste à apporter une petite quantité d'eau aux cultures pour palier à l'insuffisance des précipitations, dans le but de stabiliser les rendements. Elle ne pourrait à elle seule permettre aux cultures d'arriver à maturité, mais elle complète les précipitations et l'irrigation classique. L'effet de l'irrigation d'appoint est maximal lorsqu'elle est pratiquée à un stade critique du développement de la culture (floraison, maturation, etc.).

Pour satisfaire les besoins en des cultures et palier à tout déficit hydrique, il a lieu de calculer période par période le bilan suivant: $BI = Kc ETP - P_{eff} \pm \Delta RFU$ avec ΔRFU variation de la RFU compte tenu de l'utilisation la réserve hydrique initiale du sol en fonction de la profondeur d'enracinement. (R.Clément & A. Galand, 1979).

I – 5 Le déficit pédoclimatique :

L'étude rationnelle du déficit en eau par rapport aux besoins en des cultures, repose deux aspects ; le déficit pluviométrique et l'état hydrique du sol donc on fait référence la réserve hydrique du sol qui caractérise le déficit pédoclimatique (Ch. Ollier et M. Poirée, 1983).

a) Le déficit pluviométrique

Connaissant l'évapor-transpiration ETP (mm) et le module pluviométrique P(mm), il est possible de définir le déficit pluviométrique DP(mm) pour une période donnée :

$DP = ETP - P$. Les valeurs mensuelles, permettent de déterminer le déficit pluviométrique annuel. Pour un déficit négatif, on assiste à un excédant pluviométrique. Mais il faut noter que ce terme ne tient pas compte des excédents ou pertes d'eau par ruissellement et par infiltration au niveau du sol.

b) Le déficit pédoclimatique

Théoriquement, pour combler le déficit pluviométrique, un volume d'eau égal devrait être apporté au niveau du sol cultivé. Mais en réalité ce n'est pas toujours le cas puisque la réserve utile (RU) du sol peut emmagasiner de l'eau. Donc on apporte de l'eau pour remplir une fraction de RU. C'est la réserve facilement utilisable (RFU) qui d'ailleurs très variable en raison de la nature du sol, la profondeur racinaire, le type et le stade végétatif cultural et enfin de l'excédent en eau hivernal. A cet effet donc, on prend plutôt k RFU, où k est compris entre 0 et 1.

Dés lors, le déficit pédoclimatique ou en pratique appelé souvent déficit agricole D_a , encore déficit pédoagroclimatique, D_a (mm) = $ETP - P - k$ RFU.

Remarque, au moment où RFU est puisée, le sol n'intervient plus dans l'alimentation en eau des cultures. Le déficit agricole est égal au déficit pluviométrique.

I – 6 Notion de débit fictif continu et débit caractéristique :

Ayant la quantité totale en eau d'appoint qu'un hectare d'une certaine culture nécessite au cours des 06 mois de sa période végétative, on peut la donner en terme de débit constant pendant cette période. Ce qui exprime le débit fictif continu q en $l/s/ha$.

Mais l'application d'une telle mesure, assez simpliste, n'est pas réaliste, puisque les besoins de cultures sont très variables au cours de la période végétative.

En effet, la consommation en eau des cultures (mm) croit progressivement durant les premiers mois pour atteindre des maximums pendant les mois les plus secs, ensuite il y a diminution en fin de période. Comparée au débit supposé constant durant la même période, cette variabilité de consommation en eau des plantes, offre au début un excédant d'eau suivie d'un manque d'eau important et finie ensuite encore par un excès d'eau (fig. 6).

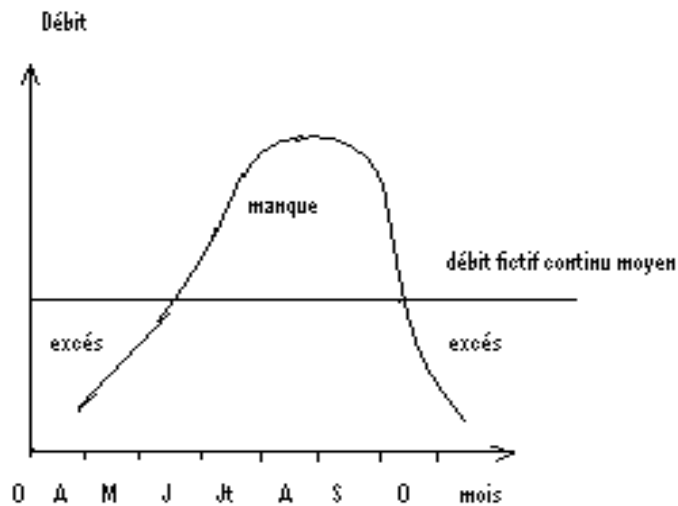


Figure n° 6 : Variations des besoins journaliers des plantes

Maintenant si on exprime ces besoins (mm) variables en terme de débit, il faut les transformer en m^3 par hectare et par jour. Ce qui donne donc des débits fictifs continus variables durant la période végétative. Et le maximum atteint, parmi ces débits pendant la période sèche, est appelé débit caractéristique $qc \text{ l/s/ha}$.

Exemple : Si pour le mois de juin, le besoin journalier maximal en eau pour une culture de blé, est de 4 mm soit $40 \text{ m}^3/\text{ha}$, le débit caractéristique $qc \text{ l/s/ha}$ sera :

$$40000 / 86400 = 0.46 \text{ l/s/ha.}$$

I – 7 Le Module d'arrosage :

Appelé aussi débit pratique d'arrosage (**m**), c'est le débit dont l'irrigant dispose pour le déverser sur les parcelles à irriguer pendant le temps nécessaire pour que ces parcelles reçoivent les doses dont elles ont besoin. Exprimé en l/s ou m^3/s , on l'appelle le module aussi "main d'eau". (M. L. Rieul, 1990)

Sa détermination tient compte de plusieurs paramètres:

- La méthode d'arrosage; plus elle perfectionnée plus (**m**) est réduit.

- L'état général du sol et de sa pente; peut conduire à choisir un petit module quand le sol est bien nivelé et la pente est convenable.
- La perméabilité K (m/s) du sol; il faut que l'eau arrive sur une parcelle et s'infiltré normalement dans le sol sans être totalement absorbé en tête de parcelle, ni s'écouler en dehors de ces limites.

L'eau doit être absorbée au fur et à mesure de son déversement sur la totalité de la parcelle irriguée sans excès ni insuffisance.

- Les dimensions des parcelles à arroser.

Le module ne doit être ni trop important ni trop faible. Il varie entre 20 et 100l/s, une valeur couramment adoptée est 40l/s.

I – 8 Notion d'îlot d'irrigation ou quartier d'arrosage :

Un îlot d'irrigation consiste en une surface irriguée à partir de l'unité de production du débit (borne, puits, lac....). Dans un réseau collectif un débit est issu de la borne à partir de laquelle un agriculteur arrose une parcelle.

C'est aussi ensemble de parcelles alimentées par une borne (débit donné) (unité de gestion spatiale d'un débit disponible) Un îlot comprend différents types de sol qui ne correspond ni à des parcelles ni à des positions.

I – 9 Principes directeurs de calcul des doses et fréquences d'arrosage :

a) La dose d'arrosage

C'est la quantité d'eau apportée au sol cultivé à chaque arrosage, mesurée en m^3 , en litres ou en mm, elle exprime la dose maximale (D_m ou dm) remplissant la RU sans tenir compte de ses variations, ni celles de la profondeur de prospection racinaire.

$$\text{Soit: } D_m \text{ (m}^3\text{/ha)} = h \cdot 10^4 \cdot (H_v r - H_v f) \%$$

$$\text{Ou } dm \text{ (mm d'eau)} = h \cdot (H_v r - H_v f) \% \quad \text{avec:}$$

h : profondeur du sol exploitée par les racines (m).

$H_v r$: humidité volumétrique à la capacité de rétention = H_{pr} . da

$H_v f$: humidité volumétrique au point de flétrissement H_{pf} . da

Hp : humidité pondérale en %

On considère donc, que d_m est une valeur "plafond" de la quantité d'eau apportée au sol cultivé à chaque arrosage. Et qu'en principe, n'est jamais atteinte et doit rester une donnée théorique servant de base au calcul de la dose pratique d_p .

En effet d_p , consiste à remplir plutôt la RFU, d'où :

$$D_p(\text{m}^3/\text{ha}) = 1/3 \text{ à } 2/3 [h \cdot 10^4 \cdot (H_v r - H_v f) \%] \text{ ou}$$

$$d_p (\text{mm d'eau}) = 1/3 \text{ à } 2/3 [h \cdot (H_v r - H_v f) \%]$$

1/3 à 2/3 en fonction du type de sol.

D'autre part, la quantité d'eau exacte à donner aux plantes ou la dose réelle d_r se détermine comme suit:

$d_r \leq d_p$, elle se calcule en fonction de la fréquence des arrosages.

Exemple: Si les besoins B (mm/mois) = 115 et si d_p est de 20 mm, le nombre d'arrosage serait de $N = (115 / 20) = 5.75$. On adopte $N = 6$ et $d_r = (115 / 6) = 19.5 \text{ mm} \leq d_p$. (R. Clément & A. Galand, 1979).

b) Nombre (N) ou fréquences et espacement (T) des arrosages

C'est le temps écoulé en jours, entre les arrosages sur la même surface à irriguer.

Pour un nombre d'arrosage N sur un mois (30 jours) donné, on écrit : $T = (30 / N)$ avec $N = B / d_p$, respectivement B (mm/mois) et d_p (mm), sont les besoins en eau et la dose pratique d'arrosage.

Exemple; $B = 100\text{mm/mois}$ et $d_p = 30 \text{ mm}$. $N = (100/30) = 3.33$, on opte pour $N = 4$ avec $d_r = (100/4) = 25 \leq d_p = 30 \text{ mm}$ (soit un arrosage par semaine). Ou encore

L'espacement entre les arrosages est de : $T = (30/ 4) = 7.5$ jours (une semaine).

I – 10 Concepts d'avertissement et de pilotage des irrigations :

Avec la diminution des ressources en eau dans les régions arides et semi-arides, des nombreuses techniques et méthodes se sont développées au cours des années pour la conduite de l'irrigation. Elles sont basées sur les informations issues du sol, du climat ou de la plante, exploitées séparément ou de manière complémentaire. Certaines méthodes constituent des

outils d'aide à la décision pour programmer l'irrigation (quand dois-je irriguer ?) ; d'autres vont jusqu'à calculer le volume d'eau nécessaire par apport.

Le choix d'une méthode repose sur de nombreux facteurs tels que l'espèce (c'est-à-dire le cycle de développement et les pratiques culturales), le type d'application (surface, aspersion, goutte à goutte), le coût des équipements de pilotage, le temps disponible pour collecter les données, etc.

Le niveau de connaissance de l'utilisateur intervient également dans la mesure où seules des données correctement interprétées s'avèrent utiles. Nous préconisons quant à nous des méthodes de conduite de l'irrigation basées sur des données liées au sol.

En effet, les méthodes basées sur des données climatiques sont parfois difficiles à mettre en œuvre (difficulté d'obtention de données valides), et les méthodes basées sur des mesures plantes (température de surface du couvert végétal, variation des dimensions des organes végétaux) nécessitent des appareils coûteux et délicats à manipuler.

a) La conduite de l'irrigation basée sur des données sol Potentiel hydrique et teneur en eau du sol

Les mesures de l'eau dans le sol sont faciles à réaliser et suffisamment fiables pour une conduite efficace de l'irrigation. Selon l'appareil utilisé, elles peuvent compléter, voire remplacer la méthode du bilan hydrique basée sur les données météorologiques (se reporter à la brève description en colonne de droite). En général, les paramètres mesurés sont la teneur en eau du sol (en %), ou le potentiel hydrique du sol (aussi appelé succion ou tension du sol).

b) Le potentiel hydrique du sol – Quand irriguer ?

C'est la mesure de la pression requise pour extraire l'eau du sol (exprimée en centibars ou millibars). Plus le sol est sec, plus le niveau de succion est élevé, car plus l'eau est fortement retenue par les particules du sol. A priori, on peut penser qu'il est plus intéressant de mesurer directement la teneur en eau du sol, et de calculer la quantité d'eau présente dans la zone d'extraction racinaire. Cependant, le potentiel hydrique constitue une donnée précieuse lorsqu'elle est correctement interprétée.

c) Matériels et Méthodes d'avertissement et pilotage des irrigations

Divers matériels et dispositifs sont utilisés d'avertissement et pilotage des irrigations (phot. 1).



a) Station météo automatisée



b) terrain cultivé et équipé par lysimètre



c) Bac d'évaporation classA



d) mesure du potentiel hydrique par le tensiomètre



Photo n° 1: Appareillage et dispositifs pour le pilotage de l'irrigation.

L'utilisation du type d'appareillage, est tributaire des méthodes adoptées pour une gestion en eau de précision d'une agriculture irriguée.

A cet effet, on distingue de façon très simpliste deux méthodes de pilotage des irrigations:

- *Pilotage des irrigations non automatisé* : c'est le déclenchement manuel de l'arrosage grâce aux tensiomètres, Bacs d'évaporation (Bac class A, ou autres),...permettant respectivement, d'avertir de l'état hydrique du sous-sol et des pertes par évaporation à sa surface. Ce qui constitue une aide à la décision d'irriguer ou non.
- *Pilotage des irrigations automatisé* : c'est la programmation et le déclenchement de l'arrosage de façon automatique, suite aux avertisseurs cités de manque d'eau au niveau du sol et même au niveau des cultures (capteurs, appareil infrarouge,...) (phot. 1).

Il faut noter qu'à ce niveau, le système d'arrosage employé est raccordé à ces dispositifs et à une station météo automatisée, le tout via une assistance par ordinateur permettant le calcul des volumes d'eau délivrés aux cultures et enfin le déclenchement des arrosages.

I – 11 Les différents modes d'irrigation :

Le Choix d'un système d'irrigation est un paramètre important, qui a des conséquences plus ou moins directes sur l'efficacité de l'irrigation ou sur les rendements des cultures irriguées. Mais avant de choisir le mode d'irrigation, il a lieu de connaître, les différents modes.

a) Classification

Les différents modes, techniques ou modes d'arrosages se subdivisent en sous-systèmes qui correspondent à des procédés différents d'aménagement du sol. On distingue :

- Irrigation par ruissellement (déversement)
 - par rigole de niveau
 - par rigole à eau courante (rases)
 - par ados (ordinaires ou en étages)
 - par calants provençaux

*** Irrigation par submersion**

- submersion naturelle
- Submersion artificielle

*** Irrigation par infiltration**

- par rigoles ouvertes
- par fossés
- par conduites souterraines

* Irrigation par aspersion

* Micro irrigation ou irrigation localisée

Il a lieu de noter qu'au niveau de ces deux derniers paragraphes, les informations présentées ici, ne sont que de simples descriptions. A ce titre nous soulignons à nos étudiants, que ces notions seront plus abordées en détails dans des modules spécialisés en 4^{ème} et 5^{ème} année hydraulique.

Ainsi, nous nous limiterons ici aux améliorations apportées à l'irrigation de surface particulièrement à l'irrigation à la raie et aux systèmes d'arrosage par aspersion et ses variantes et enfin à l'irrigation au goutte à goutte.

b) Irrigation de surface

L'irrigation de surface ou irrigation gravitaire consiste à répartir l'eau sur la parcelle cultivée par ruissellement sur le sol dans les sillons (irrigation à la raie) ou en nappe (irrigation par planche ou calant) ou encore par submersion contrôlée (irrigation par bassins).

Peu coûteux en investissement, nécessitant peu d'énergie, c'est le mode d'irrigation le plus ancien et le plus répandu dans le monde.

Sous la forme traditionnelle, l'eau est amenée au niveau de la parcelle, puis distribuée en tête de celle-ci dans des canaux en terre. L'alimentation des raies, des planches ou des bassins se fait par ouverture de brèches dans les berges de ces canaux. Les pertes par infiltration dans les canaux en terre ainsi que la difficulté de contrôler les débits délivrés à travers les brèches conduisent à un gaspillage de l'eau et à une grande hétérogénéité des arrosages.

On a constaté sur des vieux réseaux de cette espèce, des prélèvements de l'ordre de 2000 m³ par ha et par an, alors que les besoins ne sont que de l'ordre de 4 à 5 m³ par ha et par an.

Les techniques actuellement disponibles permettent d'apporter une solution à ce, problème.

Au niveau de la parcelle, des dispositifs mécaniques permettent de mieux contrôler la répartition de l'eau en tête de parcelle et les débits délivrés dans les raies ou sur les planches et dans les bassins.

Modernisation de l'irrigation à la raie

Pour ce qui concerne l'irrigation la raie, les dispositifs les plus courants sont les siphons, les gaines souples, les tubes à vannettes, les systèmes dits "californiens" et les dispositifs automatiques appelés "transirrigation" (G.TRON et P.BERTHOME, 1989).

Les siphons sont des tuyaux de petit diamètre (20 à 50mm) d'une longueur comprise entre 1 m et 1m50. Ils sont réalisés en matériaux rigides ou semi-rigides, les plus courants étant en PVC.

Ils nécessitent une faible charge de 10 à 20 cm et permettent, sous ces charges, de délivrer un débit pouvant varier de 0'4 l/s à 2 l/s environ. On peut modifier les débits en plaçant des bouchons percés à la sortie du siphon ou en utilisant des siphons de diamètres différents ou encore en jouant sur le nombre de siphons.

Les siphons présentent l'avantage de ne pas coûter cher, ils permettent d'assurer une bonne répartition des débits (fig. 6). Néanmoins le transport et l'amorçage des siphons nécessitent une manutention relativement importante. Il faut d'autre part surveiller les risques de désamorçage en cours d'irrigation.

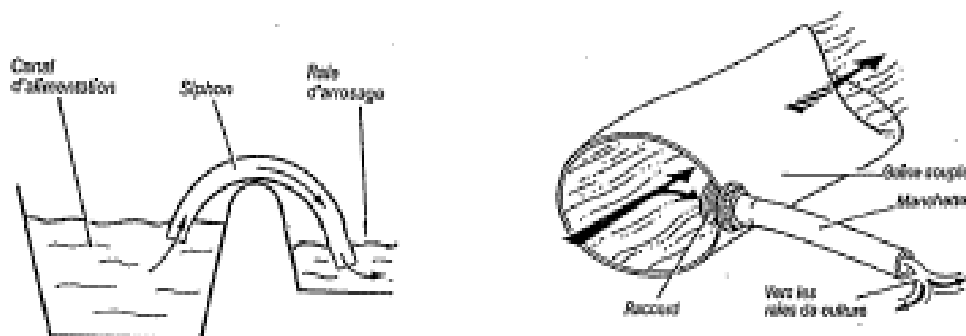


Figure n° 6: Représentation schématique d'un siphon et d'une gaine souple pour l'irrigation à la raie

Les gaines souples sont constituées d'une manche souple en matière plastique placée en tête de parcelle sur laquelle sont fixées des manchettes de dérivation qui alimentent les raies. Ces

manchettes sont souvent munies d'un dispositif permettant d'ajuster plus ou moins le tube pour limiter les débits.

Les pièces de raccordement de ces manchettes à la gaine ainsi que limiteurs de débits sont en polyéthylène. On trouve des gaines de 150mm de diamètre et de 50m de long ou de 105mm de diamètre et de 30m de longueur.

Les manchettes de dérivation ont un diamètre de 50mm et une longueur de 0m50. Plusieurs éléments de gaines peuvent être raccordés avec des manchons en PVC. Lorsque l'installation n'est pas en service, la gaine est aplatie sur le sol.

L'utilisation correcte des gaines nécessite une charge de 40 cm à 1 m de colonne d'eau. A titre indicatif, le débit à pleine ouverture d'une dérivation est de l'ordre de 2 l/s pour une charge de 50 à 60 cm.

Les gaines souples présentent l'avantage de pouvoir être installées rapidement et de ne pas créer d'obstacles au passage d'engins agricoles. Elles peuvent être pliées et rangées aisément en fin de campagne. L'inconvénient majeur est de ne pas permettre un réglage précis des débits admis dans les raies. Il faut d'autre part veiller à les stocker à l'abri des rats.

Les tubes à vannettes sont des tuyaux en PVC rigide traité, contre l'ultraviolet sur lesquels on fixe des vannettes coulissantes à l'écartement souhaité en fonction de l'espacement des raies. Les tuyaux utilisés sont des éléments de 6m de long et de 200mm de diamètre.

Plusieurs éléments peuvent être raccordés entre eux facilement. Les tubes sont disposés sur un sol préalablement nivelé en tête de parcelle en alignant toutes les vannettes (Fig. 7). Le raccordement des tubes au canal d'irrigation ou à la pompe peut être réalisé soit avec des pièces en PVC ou au moyen de gaines souples ou de raccords en acier.

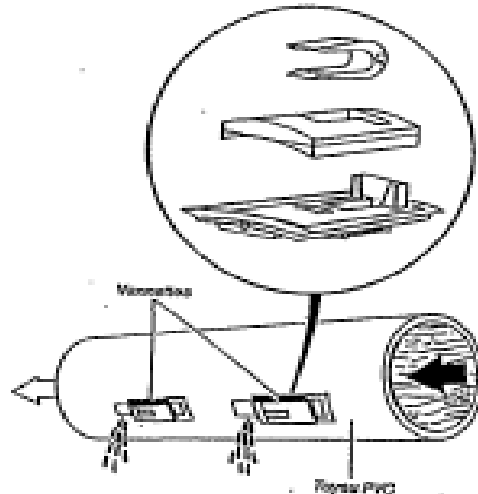


Figure n° 7 : Tubes à vannettes

Cet équipement exige une charge minimale disponible en tête de parcelle de l'ordre de 30cm; les joints sont étanches jusqu'à 1 bar de pression. Avec des ouvertures de vannettes de 10 à 40mm et des charges sur la vannette de 10 cm à 1 m de colonne d'eau, on peut obtenir des débits variant de 0,35 à environ 4 l/s (fig. 7).

Les tubes à vannettes permettent de régler et de contrôler les débits admis dans des raies de manière précise et fiable. Ils présentent par ailleurs l'avantage de pouvoir être posés et déposés aisément en début et fin de campagne. Ils constituent néanmoins un obstacle au passage en tête de parcelle et leur stockage doit être organisé en fin de campagne d'irrigation.

Les systèmes "californiens" sont constitués de tubes rigides en PVC enterrés en tête de parcelle, sur lesquels on fixe des petites cheminées de sortie ou cannes qui alimentent les raies. Les tuyaux enterrés ont un diamètre de 160 à 300mm et les petites cannes un diamètre, de 70 à 100mm.

Les cannes de sortie peuvent être munies d'un dispositif permettant de régler le débit, tel que des manchettes souples avec pinces, ou des caches coulissants qui obstruent l'orifice de sortie (fig. 8).

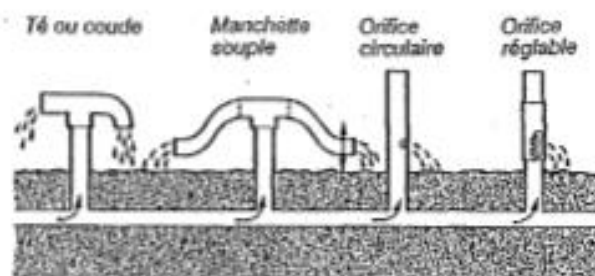


Figure n° 8 : Système « californien »

Le système présente l'avantage d'être fixe, ce qui supprime toutes les manipulations de pose et de dépose. L'installation étant enterrée, elle ne crée aucune gêne pour les travaux agricoles. Il est facile d'utilisation. Il doit néanmoins être dimensionné correctement et le processus d'installation nécessite une étude hydraulique correcte.

Le système "transirrigation" (câble irrigation aux USA) (fig. 9) est constitué d'un tuyau rigide pose avec une pente régulière en tête de parcelle et perce d'orifices calibres qui alimentent les raies. Le déplacement automatique d'un piston à l'intérieur du tube entraîne le déplacement de la main d'eau sur l'ensemble de la parcelle.

Le nombre de trous alimentés est toujours le même, et le débit de chaque trou décroît progressivement jusqu'à s'annuler au fur et à mesure que le piston se déplace vers l'aval du trou.

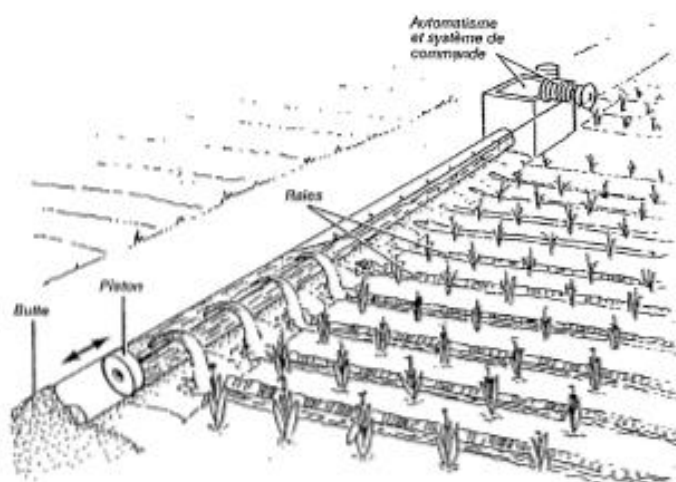


Figure n° 9 : Le système transirrigation

Le tuyau est en PVC rigide traité anti ultraviolet de diamètre de 150mm7 il est pose avec une pente comprise entre 2,5 et 6mm par mètre et les orifices sont calcules en fonction du débit que l'on souhaite obtenir. L'avancement du piston est commande par le déroulement d'un câble.

A la fin de l'irrigation, le piston est relevé et ramené en tête et le câble est rembobiné. Le déroulement du câble peut être règle manuellement ou dans les systèmes automatiques, par l'intermédiaire d'un micro-ordinateur et de balises qui contrôlent le déroulement de l'irrigation. La main d'eau délivrée est de l'ordre de 30 à 50 l/s.

Ce dispositif présente l'avantage de nécessiter peu de travail pendant l'irrigation. Il permet par ailleurs une très bonne maîtrise de la dose apportée grâce à la modulation automatique des débits décroissants à chaque trou, ce qui permet de réduire les pertes en colature.

C'est néanmoins une installation onéreuse qui nécessite une étude hydraulique préalable correcte et beaucoup de soins dans la mise en place. L'installation peut être en surface ou enterrée (fig. 10) avec des cannes de sortie sur chaque orifice.

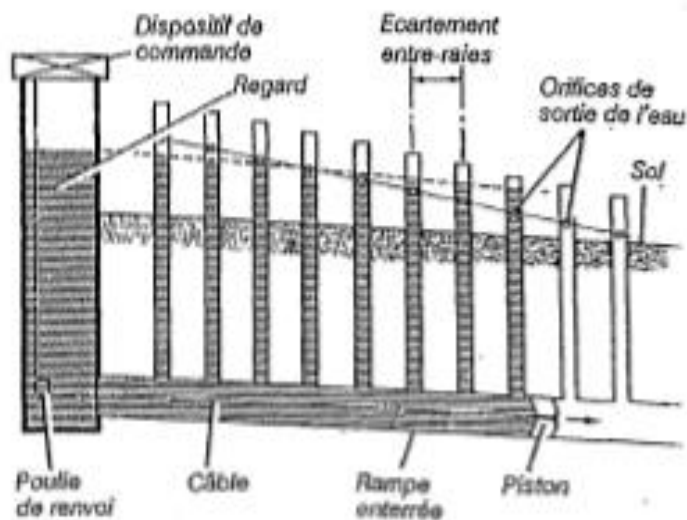


Figure n° 10: Transirrigation enterrée

Le coût d'investissement de ces matériels est fonction du coût au mètre linéaire des dispositifs de distribution en tête de parcelle. Dans l'ordre décrit ci-dessus, les coûts vont croissant du siphon au système automatique "transirrigation". Le coût à l'hectare est par ailleurs pour un même dispositif d'autant plus faible que les raies sont longues.

Modernisation de l'irrigation par planches ou bassins

La modernisation des systèmes d'irrigation par planches ou par bassins consiste à étancher le canal qui distribue l'eau en tête de parcelle et à l'équiper de vannes de régulation qui permettent d'alimenter successivement les biefs de ce canal, et de vannes de prises latérales qui alimentent les planches ou bassins (A.S.HUMPHERYYS, 1987).

b) L'irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion s'est rapidement développée après la seconde guerre mondiale, notamment en Europe et aux Etats-Unis. L'eau est transportée dans des réseaux de conduites sous pression puis délivrée au niveau de la parcelle par des bornes qui régulent la pression et le débit. A l'aval de la borne des conduites (porte-rampes et rampes) alimentent sous pression des asperseurs rotatifs qui répandent l'eau en pluie.

Le porte-rampes et les rampes sont constitués de tubes d'une longueur de 3, 6 ou 9 m et sont faits en alliage d'aluminium, en acier galvanisé ou encore en polychlorure de vinyle.

On trouve également des rampes en polyéthylène à haute densité. Les rampes ont généralement un diamètre de 50mm. L'asperseur est caractérisé par le diamètre de sa buse qui, pour une pression déterminée, définit son débit, la portée du jet et la répartition de l'eau, en un mot la pluviométrie de l'asperseur.

Il existe des asperseurs équipés d'une seule buse et d'autres qui sont munis de deux buses de différent diamètre pour améliorer l'homogénéité de la répartition pluviométrique dans la surface arrosée. Les asperseurs peuvent être montés directement sur la rampe par l'intermédiaire d'une allonge rigide de 0,50m à 2 m que l'on fiche sur un Té à clapet, fixe sur une plaque stabilisatrice. On peut également monter les asperseurs sur un bipieds ou sur un trépied de 1 à 2m50 de hauteur.

Les asperseurs les plus couramment utilisés sont des asperseurs à moyenne pression qui fonctionnent sous une pression de 2 à 5 bars, avec des débits de l'ordre de 1 à 3m³/h et des portées de jet de 12 à 18m. On obtient des pluviométries de 3,5 à 6,5mm/h. Si la pression est supérieure à la pression nominale, notamment en bas de pente, on peut équiper chaque asperseur d'un régulateur de pression que l'on monte juste l'amont de celui-ci.

La quantité d'eau qui arrive au sol le long du jet d'asperseur diminuant lorsque l'on s'éloigne de celui-ci, pour obtenir une répartition de l'eau homogène on doit disposer les asperseurs de manière à avoir un recoupement suffisant des jets. Ils sont généralement disposés

en carré, rectangle ou en triangle dont les dimensions les plus courantes sont 18 X18m, 18 X 21 m, 21x21 m, 18 X 24m.(fig.11a et 11b).

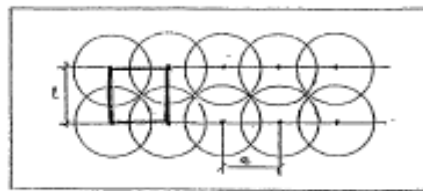


Fig.(a)- en carré : $e = l$
en rectangle : $e < l$

Fig.(b)- en triangle

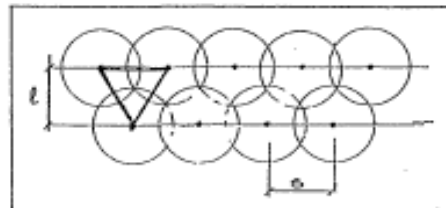


Figure n° 11 : Disposition des asperseurs en carré (a) et en triangle (b)

Les premiers réseaux étaient équipés de petits asperseurs disposés le long d'une rampe mobile en alliage léger que l'on déplaçait à la main de poste en poste, pour irriguer l'ensemble de la parcelle. (fig.12).

Relativement peu coûteux en investissement, ce système était très exigeant en main-d'œuvre.

On a peu à peu évolué vers la couverture totale (fig. 13) qui consiste à disposer sur la parcelle en début de campagne un quadrillage de rampes de petits diamètres, le long desquelles on déplace ensuite manuellement les asperseurs.

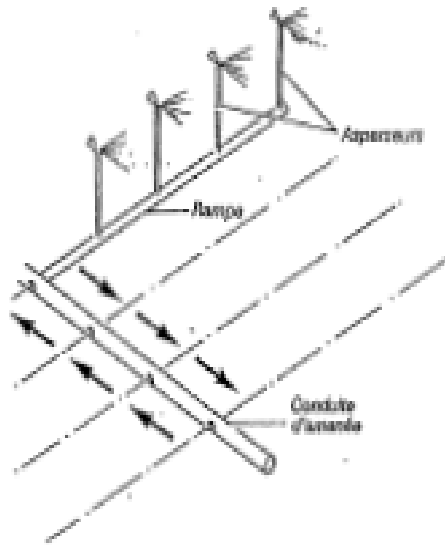


Figure n° 12 : Rampe mobile déplaçable

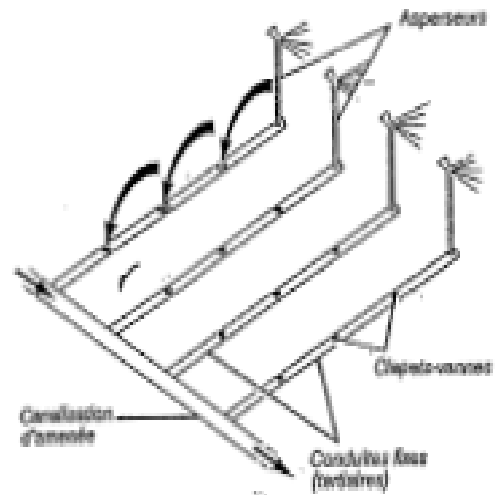


Figure n° 13: Couverture totale

On a finalement abouti à la couverture intégrale qui consiste à équiper les rampes fixes de l'ensemble des asperseurs. Une fois post l'ensemble n'est plus déplacé pendant toute la saison d'irrigation. La mise en eau successive des postes d'arrosages est réalisée par l'ouverture ou la fermeture de petites vannes en tête de chaque rampe.

Ces vannes peuvent être commandées manuellement ou à l'aide de vannes semi-automatiques comme les vannes volumétriques ou encore de manière automatique par des programmeurs d'arrosage. (fig. 14).

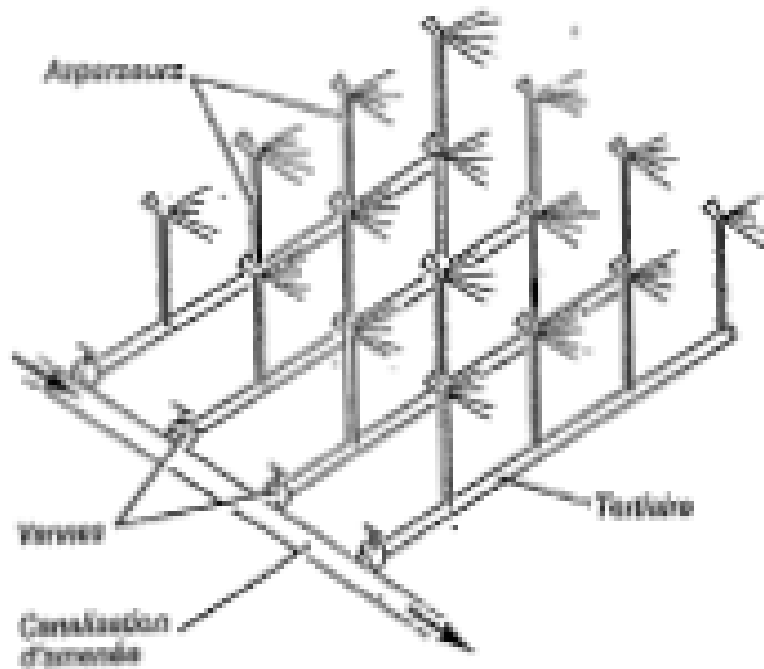


Figure n° 14 : couverture intégrale

La couverture intégrale présente l'avantage de supprimer les interventions manuelles pour les changements de poste, presque totalement lorsque les manœuvres des vannes sont manuelles ou totalement si ces manœuvres sont automatiques. Cet avantage est néanmoins obtenu au prix d'un investissement d'autant plus élevé que le système est automatisé.

Le gros intérêt de la couverture intégrale est qu'avec une bonne disposition d'asperseurs on peut obtenir une répartition bien homogène de l'eau sur l'ensemble de la surface irriguée. Les pertes d'eau sont pratiquement nulles et dans des dispositifs bien conçus, on obtient des rendements hydrauliques de l'ordre de 90 à 95 %. Ces systèmes peuvent être bien adaptés à toutes les formes de parcelle, à toutes les natures de sol quelle que soit la topographie et à toutes cultures. La couverture intégrale convient particulièrement bien aux cultures annuelles, dont la sole irriguée peut être déplacée dans l'assolement sur l'ensemble de l'exploitation.

Le problème en aspersion est l'influence du vent qui augmente très sensiblement l'hétérogénéité de répartition de l'eau dès que la vitesse du vent atteint environ 10 km/h.

Au-delà de 30 km/h l'irrigation devient pratiquement impossible. On atténue l'effet du vent en rapprochant le plus possible les asperseurs et en les disposant en triangle ou en rectangle, dont la plus grande dimension est orientée dans le sens du vent.

Peu à peu, pour arroser de plus grandes surfaces, les asperseurs ont évolué vers les canons d'arrosage qui sont de gros asperseurs rotatifs fonctionnant sous une pression élevée de l'ordre de 5 à 8 bars, équipés de buses de 16 à 301mm. Ces canons ont un débit de 30 à 100 m³ /h et une portée du jet qui peut aller d'une vingtaine de mètres à plus de cinquante mètres. Il faut savoir que l'irrigation au canon est d'autant plus sensible au vent que la portée du jet est importante. Par ailleurs les gros canons ont une forte pluviométrie avec de grosses gouttes qui peuvent poser des problèmes de battances du sol (formation de croûte superficielle) sur des sols limoneux ou fins.

Les systèmes ont également évolué peu à peu vers des appareils mobiles ou machines d'arrosage. Les plus répandus sont les enrouleurs et les pivots. (fig. 15 et 16).

L'enrouleur est constitué d'une bobine mue par un moteur hydraulique, sur laquelle s'enroule un tuyau flexible en polyéthylène. L'enroulement du tuyau provoque le déplacement d'un canon d'arrosage monté sur un chariot à roues fixe à l'extrémité du tuyau. L'enrouleur effectue ainsi un arrosage en bande, sans intervention. Au cours de l'arrosage, la vitesse d'enroulement est réglée automatiquement de façon à apporter la dose d'eau choisie. En fin de parcours l'enroulement s'arrête automatiquement et l'ensemble est déplacé au moyen d'un tracteur pour arroser la bande suivante.

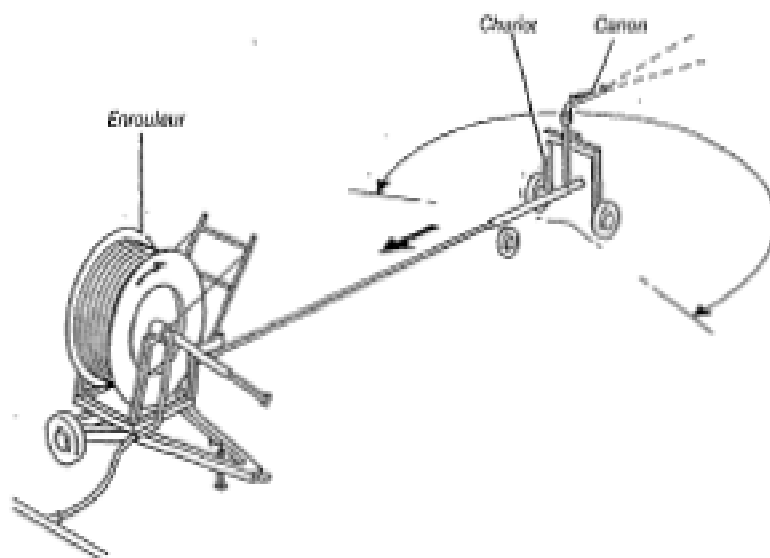


Figure n° 15: Irrigation par canon enrouleur

L'enrouleur est le dispositif le plus utilisé pour arroser les grandes cultures annuelles. Il présente l'avantage d'une grande souplesse d'utilisation, pouvant être aisément déplacé d'une sole à l'autre. Il présente l'inconvénient du canon à savoir que la sensibilité au vent qui peut entraîner un arrosage très hétérogène. On peut y palier en remplaçant le canon par une rampe d'asperseurs montée sur roue. Le dispositif, beaucoup plus encombrant, perd alors de sa souplesse. Exigeant une pression de fonctionnement élevée (7 à 8 bars) il consomme beaucoup d'énergie.

Le pivot ou rampe pivotante est constitué d'une rampe articulée dont les travées sont portées par des tourelles automotrices entraînées par des moteurs électriques. La rampe peut comprendre jusqu'à une quinzaine de travées de 35 à 65 m chacune. Elle est alimentée eau par l'une de ses extrémités, par un tuyau vertical ou pivot, autour duquel elle tourne.

Le pivot arrose automatiquement un cercle ou une portion de cercle dont la superficie peut atteindre 100 à 150 ha. (fig. 16).

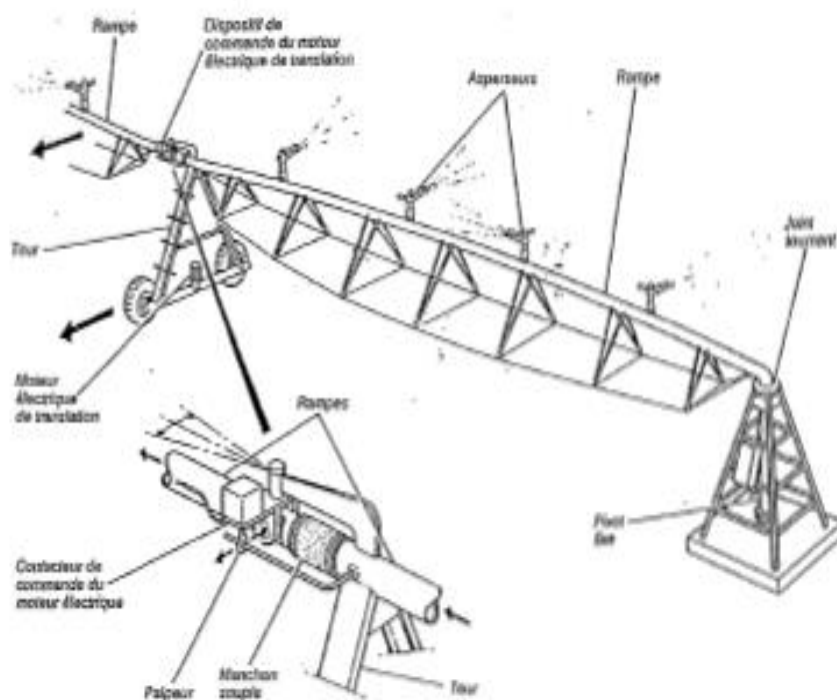


Figure n° 16 : Irrigation par Pivot

c) *L'irrigation localisée*

D'abord utilisée sous serre, la micro-irrigation ou irrigation localisée, fut appliquée en plein champ en Israël vers 1950 et s'est ensuite développée progressivement à partir des années 1960, notamment en Australie, aux Etats-Unis, en Afrique du Sud et en Europe.

L'irrigation localisée consiste humidifier une partie du sol dans la zone des racines des cultures en y apportant des petites doses d'eau fréquentes à faible débit. L'eau véhicule dans des tuyaux en plastique de faible diamètre; est diffusée au voisinage des racines par des organes de distribution tels que des goutteurs, diffuseurs ou des ajutages calibres. (fig. 17).

Ces organes fonctionnent sous une pression de l'ordre de 1 bar avec des débits de 1 à 8 l/h pour ce qui concerne les goutteurs ou les gaines perforées, 20 à 60 l/h pour ce qui concerne les diffuseurs, 35 à 100 l/h pour les ajutages calibres (RNED-HA, 1992)

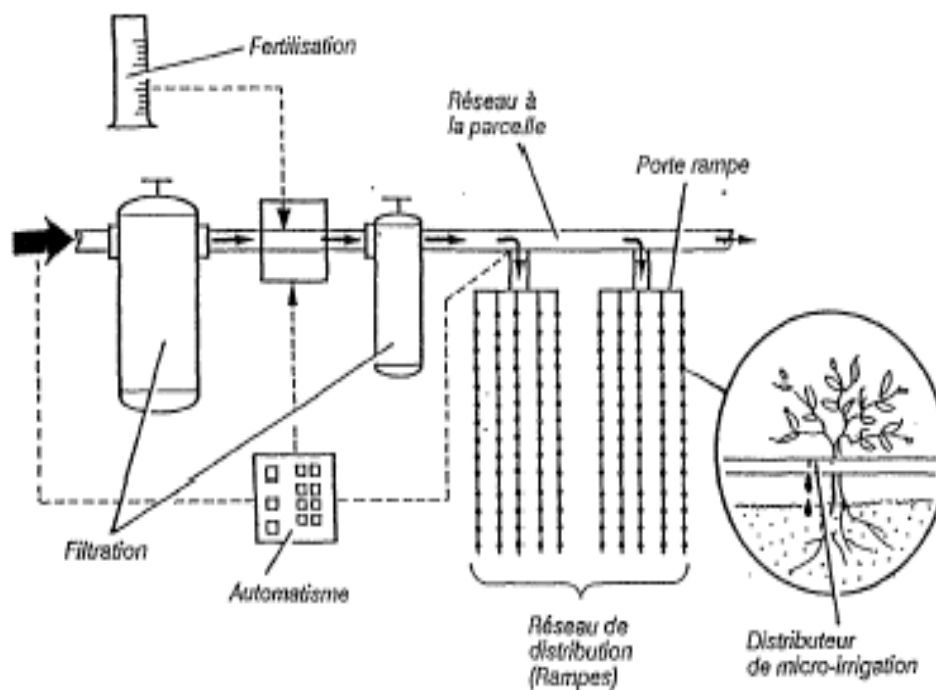


Figure n° 17: Schéma d'une installation de micro-irrigation

Utilisant de faibles débits avec de faibles pressions, cette technique présente l'avantage sur l'aspersion d'exiger peu d'énergie et des équipements légers. Les arrosages ne mouillent pas les feuilles, ne sont pas sensibles au vent et les pertes par évaporation sont limitées. La micro-irrigation permet un très bon contrôle des apports d'eau tant en ce qui concerne les quantités

apportées que l'uniformité des apports : on peut atteindre des rendements hydrauliques de 95%, voire même plus élevés.

Cela à condition toutefois que le système soit bien conçu et fonctionne bien. La conception du réseau, c'est-à-dire le choix de débits et de l'espacement des goutteurs, ainsi que la conduite de l'irrigation nécessitent une étude assez précise, qui tienne compte des caractéristiques du sol et de son aptitude à diffuser l'eau latéralement.

Les dispositifs de micro-irrigation sont sensibles au colmatage physique (particules solides), chimique (dépôts, incrustations) et biologique (développement d'organismes).

Leur bon fonctionnement exige une eau de bonne qualité, ce qui nécessite en général un poste de filtration, une surveillance et un entretien du réseau efficaces.

L'apport fréquent de doses faibles impose pratiquement une automatisation du réseau. Mais celle-ci est facile tant pour l'irrigation que pour les apports d'engrais par le réseau.

La concentration des racines dans les volumes limités des bulbes humides rend les plantes sensibles à toutes défaillances qui peuvent affecter les apports d'eau.

Enfin les investissements d'un bon réseau de micro-irrigation sont élevés.

C'est un système particulièrement bien adapté aux cultures à haut revenu telles que les vergers, les vignes et le maraîchage. Sur les grandes cultures sont coût d'investissement limite son développement.

Moderniser l'irrigation ne signifie pas obligatoirement qu'il faut remplacer l'irrigation de surface par l'aspersion ou par la micro-irrigation. Des progrès, qui permettent la diminution des interventions manuelles pénibles et l'amélioration des performances des réseaux, ont été réalisés dans tous les modes d'irrigation.

Mais cela au prix d'équipements industriels plus ou moins automatisés, souvent coûteux et dont l'utilisation peut exiger une bonne technicité.

Certes, l'irrigation de surface ne permet pas d'atteindre les rendements hydrauliques maximaux des réseaux sous pression. Mais un système d'irrigation de surface modernisé bien utilisé peut avoir une performance bien supérieure à celle d'un réseau d'irrigation par aspersion ou de micro-irrigation qui fonctionne mal.

II – DRAINAGE AGRICOLE :

II – 1 Les bases fondamentales du drainage :

Dans les conditions de notre époque, il est évident que la gestion rationnelle de l'eau disponible est devenue une nécessité absolue pour l'agriculture et ce, dans son propre intérêt et en partage avec les autres activités de l'homme.

Dans ce contexte, drainage et irrigation, séparément ou le plus souvent conjointement, doivent intervenir pour corriger le cycle de l'eau dans le processus de production agricole. Cette intervention impose l'aptitude à maîtriser correctement et rationnellement les volumes d'eau manipulés.

Cette nécessité de maîtrise rationnelle a induit le développement de l'étude de l'irrigation drainage en tant que science et technique.

Classiquement, le drainage agricole fait référence à une pratique d'assainissement par laquelle on soustrait les excès d'eau d'une terre pour accroître sa productivité. Ceci se fait au moyen d'un réseau de canaux ouverts ou de drains souterrains.

En réalité, il est nécessaire de distinguer deux situations différentes requérant le drainage :

1. Dans les terres submergées ou présentant une nappe d'eau proche de la surface, le drainage est pratiqué pour rabattre la nappe et éliminer les excès d'eau dans le sol. Le problème de l'engorgement des sols par l'eau peut affecter des superficies très variables, allant de taches humides de quelques centaines de mètres carrés au sein d'un champ à des centaines de km² et plus dans le cas de terres marécageuses ou de polders.

2. Dans les systèmes irrigués en zone (semi-)arides, un excédent d'irrigation par rapport aux besoins en eau des cultures est souvent requis pour éliminer les sels qui s'accumulent dans le sol par suite de la forte demande évaporative. Le drainage est alors nécessaire pour éliminer ces excédents d'eau d'irrigation dont la qualité chimique (type de sel et concentration en sel) peut être néfaste à la bonne croissance des cultures.(Agronomy series # 3, 1983).

Cependant, malgré ses effets positifs sur l'agriculture, le drainage n'est pas sans conséquences sur l'environnement :

. La mise en valeur des terres pour l'agriculture par le drainage a contribué à la disparition de vastes zones humides dont l'importance en termes d'habitats pour des espèces animales et végétales et pour la sauvegarde de la biodiversité a longtemps été ignorée.

. Les eaux de drainage chargées en sels ou en produits phytosanitaires se déversent dans les eaux de surface et contribuent à la dégradation de la qualité des eaux. L'utilisation de ces eaux contaminées à des fins domestiques ou industrielles peut engendrer des coûts importants de purification et des coûts de maintenance des réseaux d'adduction plus élevés (corrosion ou dépôts dans les conduites).

. Dans certains cas, les eaux de drainage peuvent accumuler, outre les sels d'origine, des sels potentiellement toxiques provenant de la dissolution de minéraux dans le sol. C'est le cas d'une vaste pollution au sélénium (Se) aux E.U. résultant de l'enrichissement des eaux de drainage en cet élément lors de la percolation des eaux au travers d'une couche riche en Se.

Les terres drainées n'ayant dans ce cas précis pas d'exutoire naturel, les eaux de drainage aboutissaient dans un bassin endoréique marécageux. Ceci s'est traduit par l'accumulation du Se lors de l'évaporation des eaux et une forte mortalité de l'avifaune pour laquelle ces zones marécageuses constituaient un habitat permanent ou temporaire. (Agronomy series # 3, 1983)

Lors de la mise en place d'un plan de drainage, il est donc primordial de trouver un juste équilibre pour notre société entre les avantages résultant d'une production agricole intensive et soutenue et ceux résultant du maintien d'un écosystème sain et de la sauvegarde de la biodiversité.

En zone humide, le but principal du drainage agricole est de contrôler l'engorgement des sols et donc d'assurer des conditions d'humidité du sol qui soient favorables au développement des cultures et qui favorisent les pratiques de gestion du sol. On peut citer à cet effet les avantages potentiels suivants

. Maintien de conditions d'aération favorables pour la croissance acinaire et pour l'activité biologique dans le sol;

. réduction des risques liés à la présence de certains éléments chimiques toxiques à l'état réduit;

. réduction des pertes en azote par dénitrification liées aux conditions anaérobies;

. Amélioration de la résistance mécanique du sol et réduction des risques de compaction par les engins agricoles;

. Dessèchement plus rapide du sol en début de saison de culture, permettant de travailler la terre plus tôt et donc d'assurer une saison de culture plus longue;

. Réchauffement plus rapide du sol en début de saison;

. Réduction du risque de ruissellement / érosion.

En zone aride ou semi-aride, le but principal du drainage agricole est souvent d'assurer l'écoulement des eaux de ruissellement pour contrôler l'érosion, ou l'élimination des eaux de percolation chargées en sel sur les terres irriguées pour éviter les risques de salinisation du sol.

Le drainage est également utilisé pour l'élimination des zones d'eau stagnantes ou marécageuses qui peuvent favoriser la transmission de certains agents pathogènes pour les humains et les animaux : moustiques/paludisme, etc.(Handbook of Agriculture Engineering. Vol. 1).

a) Définition et terminologie

Au sens large du terme le drainage agricole peut être défini comme étant l'élimination par voie naturelle ou artificielle des eaux de surface et/ou souterraines en excès par rapport aux besoins de la production végétale.

L'assainissement, englobe tous les procédés d'évacuation des eaux nuisibles d'une zone délimitée on parle d'assainissement urbain et agricole.

Le drainage par voie artificielle, qui est le problème nous intéressant, peut être défini comme suit : tout travaux ayant pour objet l'évacuation contrôlée, intensive, dans des délais déterminés et courts, en tous les points d'une parcelle et d'une façon uniforme des eaux excédentaires qui saturent la couche superficielle du sol ou stagnent à sa surface.

Cette définition a été proposé pour les régions humides, pour les zones arides et semi-arides, on pourrait la corriger de la manière suivante : deux eaux excédentaires et des sels associés...

Bassin et Talweg :

Le bassin versant en une section droite d'un cours d'eau, est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de cette section. Il est entièrement caractérisé par son exutoire, à partir duquel nous pouvons tracer le point de départ et d'arrivée de la ligne de partage des eaux qui le délimite.

Ou encore « bassin de drainage » est un territoire associé à des cours d'eau. Il regroupe tous les terrains sur lesquels ruissellent, s'infiltrent et courent toutes les eaux qui alimentent cette rivière. Aussi dans un bassin versant, il y a continuité longitudinale, de l'amont vers l'aval (ruisseaux, rivières, fleuves) ; latérale, des crêtes vers le fond de la vallée ; et verticale, des eaux

superficielles vers des eaux souterraines et vice versa. Les limites sont la ligne de partage des eaux superficielles (fig. 18).

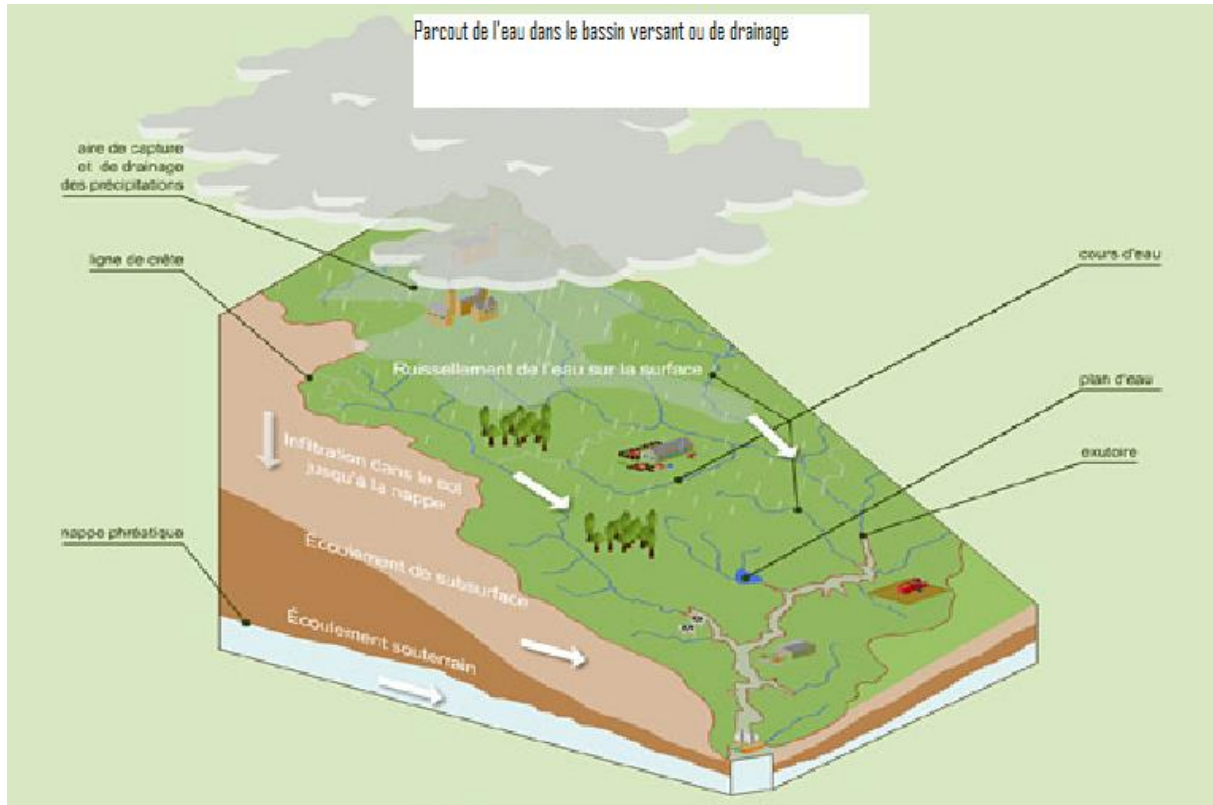


Figure n° 18: Parcours des eaux au sein du bassin de drainage

En effet, à grand échelle et analogiquement à une zone irriguée et drainée, un bassin versant représente un système de drainage naturel.

Il est aussi drainée suite aux eaux de pluies reçues en amont dans ses vallées et ses plaines, et ce grâce aux talwegs (lignes joignant les points les plus bas du bassin de drainage) et cours d'eau assurant des écoulements jusqu'à l'exutoire.

Collecteur, émissaire et exutoire :

Ce sont les canaux qui composent le réseau de drainage au niveau des parcelles ou de périmètre irrigués et drainés (fig. 20).

- Collecteurs secondaires

Ils recueillent les eaux des fossés et les véhiculent vers le collecteur principal.

Ils sont à section trapézoïdale et sont disposés suivant les thalwegs du second ordre.

- Collecteur principal

Il reçoit les eaux des collecteurs secondaires et les véhicule jusqu'au bas du périmètre à assainir où il débouche dans l'émissaire. Il est disposé suivant le thalweg principal du périmètre et utilise, dans la plupart des cas, le tracé d'un cours d'eau qui est alors redimensionnés pour évacuer le débit de drainage

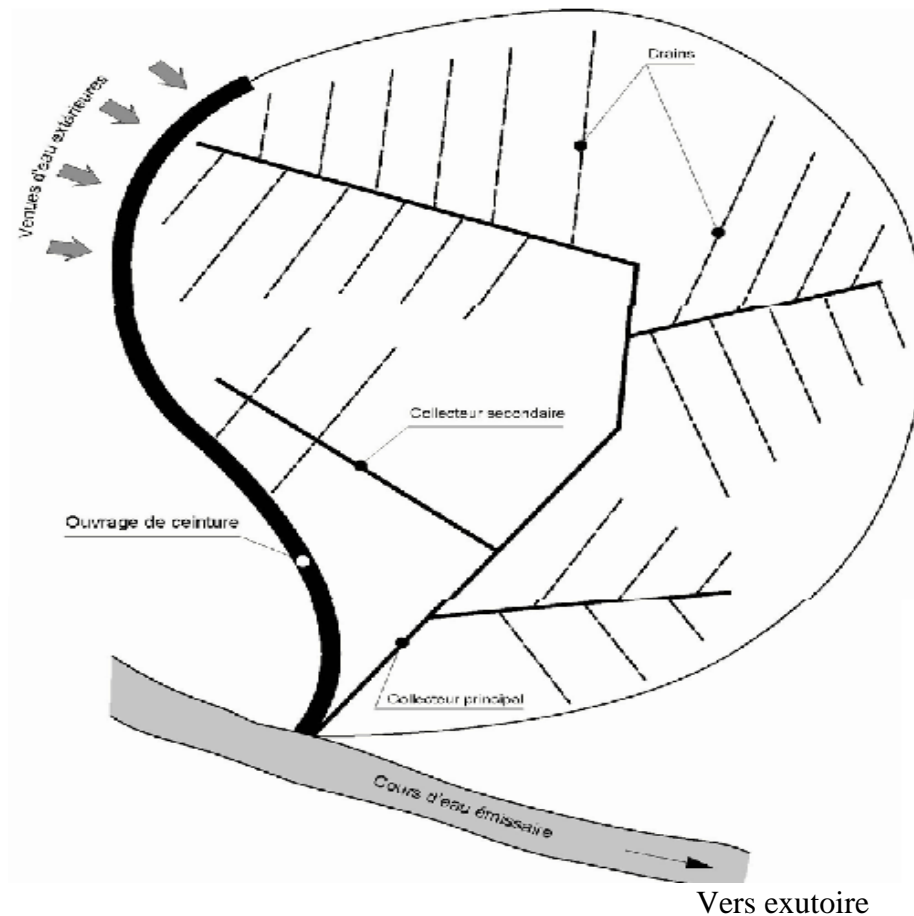


Figure n° 20 : Schéma de structure d'un réseau de drainage

- Ouvrages de ceinture

Ils sont destinés à protéger le périmètre contre les eaux extérieures qui ruissellent sur les versants.

La pente de ces canaux doit être régulière et suffisante pour éviter les dépôts de matières en suspension. La section est trapézoïdale et ils doivent comprendre une revanche minimum de 0,20 m. les ouvrages peuvent être une digue ou un canal de ceinture.

Les drains se jettent dans un réseau de collecteurs qui évacuent l'eau vers un émissaire (rivière, canal artificiel, etc.).

Les collecteurs recueillent également souvent les eaux de ruissellement de surface par l'intermédiaire de regards couverts de grille.

En cas de pente insuffisante pour évacuer par gravité, les eaux sont relevées par une station de pompage. Aux points névralgiques (jonctions entre collecteurs, changements de direction et de pente, etc.), on peut placer des chambres de visite.

L'émissaire récupère toutes les eaux en excès et drainées pour les éloigner en dehors de la zone agricole. Il peut être un cours d'eau avoisinant le périmètre d'irrigation à drainer ou réaliser artificiellement (canal trapézoïdal).

L'exutoire peut faire l'objet d'une sebkha, dépression inculte sans eau souterraine et cours d'eau.

Systèmes et techniques de drainage :

Avant de voir les différentes techniques de drainage, faut-il classer ces systèmes :

* Drainage de surface

* Drainage de subsurface

- par fossés à ciel ouvert

- par drains enterrés ; classique et techniques associés (drainage taupe et drainage par galeries).

- par des techniques qui sont actuellement marginale (A. Mermoud, 2006) (Puits, biodrainage).

Pour le drainage de surface, il est pratiqué, dans les zones plates à très faible pente ou à surface irrégulière, en présence de défauts d'infiltrabilité ou de drainage ou de drainage interne.

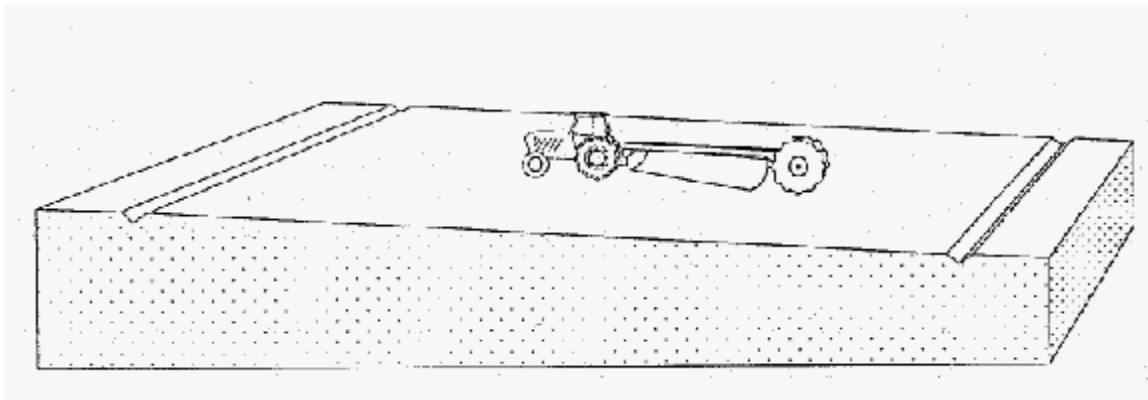
Il s'agit donc principalement de réduire les risques de submersion prolongée du sol sans provoquer d'érosion.

Dés lors, il a lieu de modeler le terrain, par aplanissement en éliminant les irrégularités du sol (dépressions locales, obstacles, etc.), sans modifier la topographie globale.

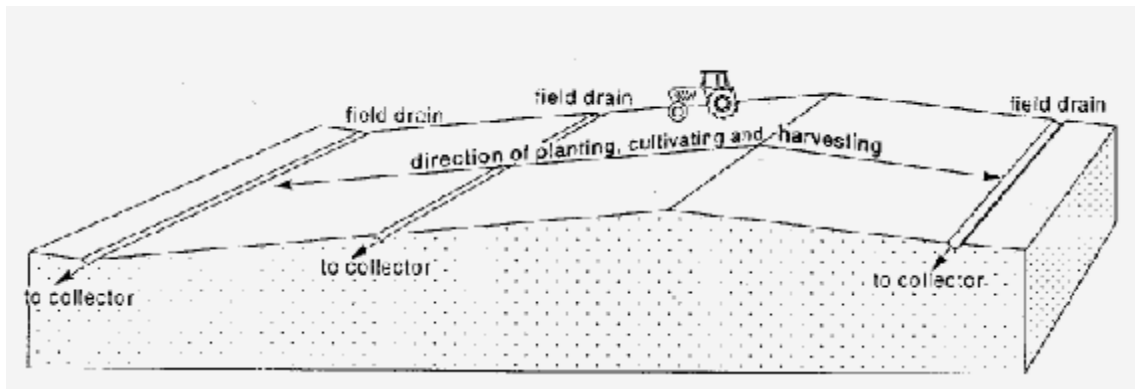
On procède par nivellement du terrain simple ou par ados (fig. 21a et 21b). Avec un choix judicieux de la pente et la longueur du terrain qui tient compte de l'état du sol :

- Sols érodés ; la pente est inférieure à 0.5 et de longueur moins de 150 m.
- Sols lourds ; la pente peut atteindre 2% avec une longueur de 300m.

Mais ces actions sont coûteuses et avec un terrain façonné de cette manière, cela offre une gêne aux travaux du sol et engendre des frais d'entretien des fossés.



a) nivellement simpli



b) nivellement par ados

Figure n° 21 : Types de nivellement du sol pour assurer un drainage de surface.

En ce qui concerne le drainage de subsurface, soit par fossés à ciel ouvert ou ce qui est très pratiqué à l'heure actuelle le drainage par tuyaux enterrés.

Il doit être réalisé sur des préalables d'étude de critères de dimensionnement encore plus poussés, tenant des facteurs du milieu (climat, sol, culture, écoulement souterrain). Et pouvoir

ainsi déterminer, les écartements entre drains, profondeur d'installation, pente, diamètres des tuyaux drains ou collecteurs (fig. 22).

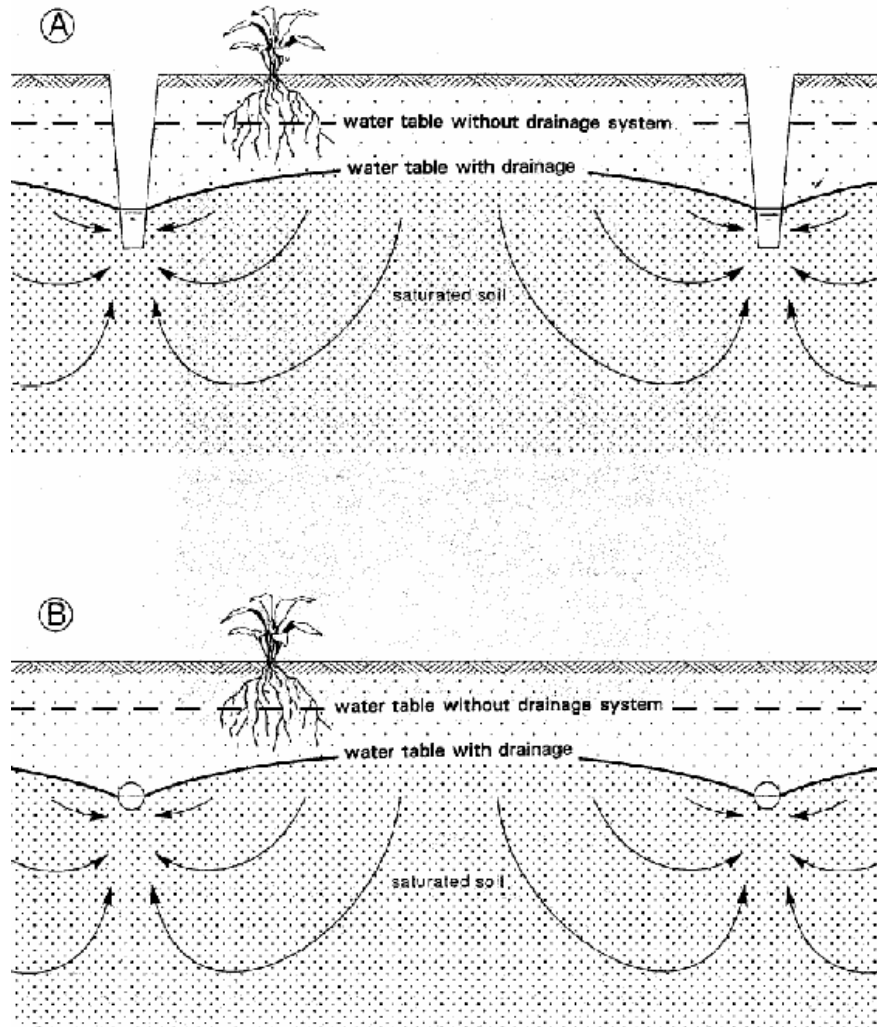


Figure n° 22: Drainage de subsurface (A) à ciel ouvert (B) par tuyaux enterrés

Les drains à ciel ouvert ont la faculté d'intercepter les eaux de ruissellement, en plus du drainage des eaux en excès de subsurface. Mais ils font perdre du sol en raison des déblais causés à leur creusement.

En revanche, le deuxième type (B) peut palier à ces inconvénients. Dans les deux cas le drainage permet d'empêcher le niveau de l'excès d'eau ou celui de la nappe quand elle existe près de la surface du sol.

Le drainage par tuyaux enterrés, consiste à ouvrir dans le sol des tranchées et y installer des drains en PVC perforés et annelés enrobés ou non de diamètre compris entre 4 à 10 cm (fig. 23) et (fig. 24). L'enrobage des drains permet de les protéger contre le colmatage des perforations par les particules fines du sol.

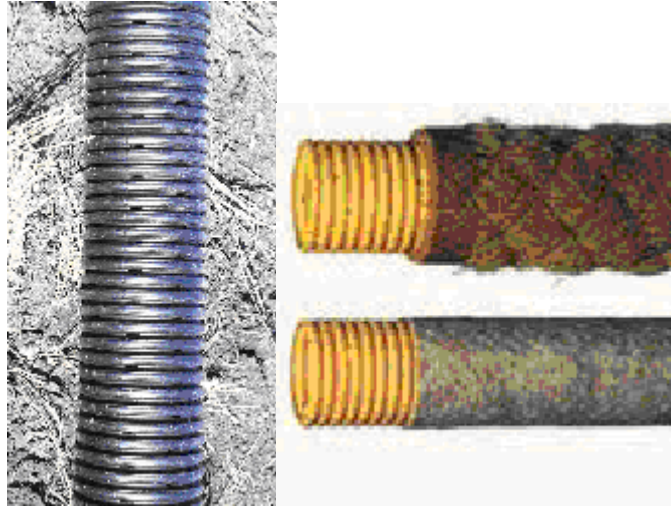


Figure n° 23: Drains en PVC annelés et perforés enrobés ou non.

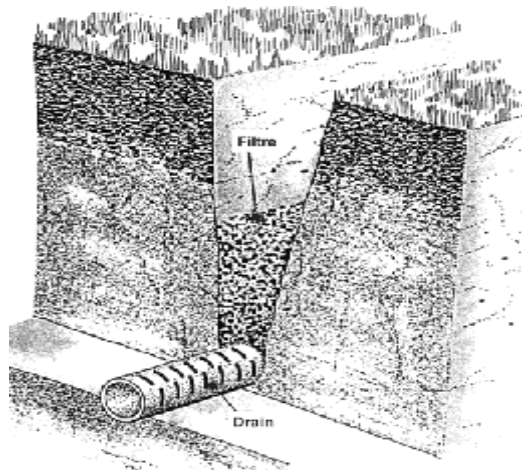
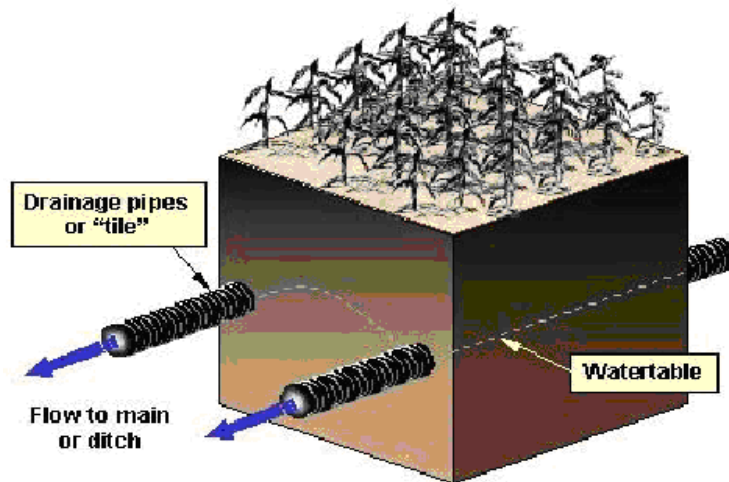


Figure n° 24: Terrain cultivé et équipé par drains par tuyaux posés dans des tranchées et enterrés.

En pratique, on peut rencontrer quelques valeurs d'écartements entre drains :

- Sols lourds ou compacts : 10 - 15 m
- Sols fins : 15 - 20 m
- Sols limono- sableux : 15 – 25 m
- Sols sableux : 20 – 35 m.

Parfois on associe d'autres techniques aux systèmes de drainage comme pour le rendre plus efficace. On peut citer le drainage par taupe qui réalise des galeries ;

- diamètre 4 cm environ,
- profondeur 40 à 70 cm,
- écartement 2 à 4m,
- durée de vie variable (quelques années).

perpendiculaires aux files des drains (fig. 25).

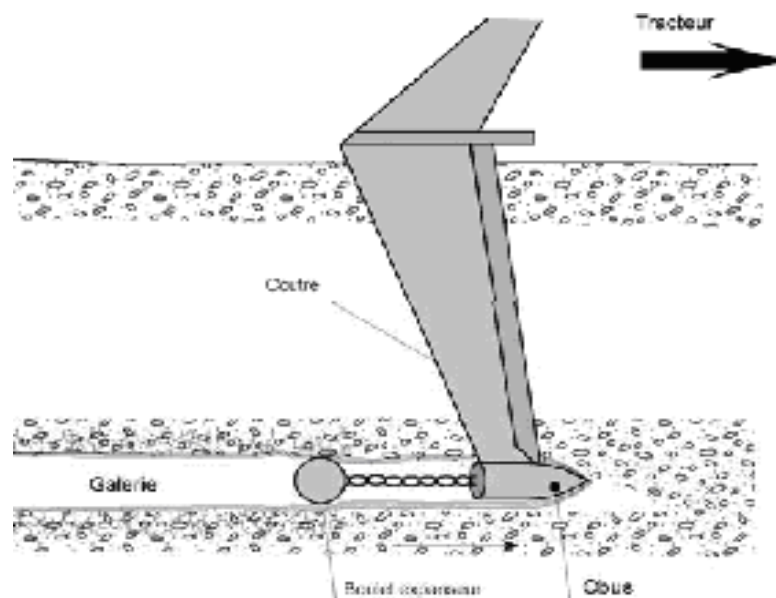


Figure n° 25: réalisation de galeries avec la charrue à drainage taupe.

Ou encore des techniques de contrôle de la nappe par drainage puits. Cela consiste

A provoquer par pompage dans un réseau de puits régulièrement distribués dans l'espace de sorte à ce que leurs cônes de dépression se recoupent.

Méthode utilisée principalement quand la nappe doit être abaissée fortement, en particulier pour prévenir une salinisation du sol par remontée capillaire.

Mise en place du système de drainage souterrain et entretien :

Contrôle de la profondeur d'installation :

L'installation des drains selon une pente uniforme est primordiale pour le bon fonctionnement des drains et la prévention de l'envasement. On estime que la précision de contrôle de la profondeur doit être supérieure à r et le contrôle de la pente doit être supérieure à $r/100$, où r est le diamètre du tuyau de drainage (en mètre).

Le principe du contrôle de profondeur repose sur la mise en place d'un niveau ou d'un plan de référence au-dessus du sol ayant la pente désirée.

Les drains sont alors installés à une profondeur constante sous ce niveau de référence. La méthode la plus simple consiste à établir un niveau de référence pour chaque drain par une suite de piquets tel que le sommet des piquets suive une pente constante.

Lors du placement des drains ou du creusement des fossés, on veillera à maintenir une distance constante entre le niveau de référence et le drain ou le fond du fossé. En particulier lors de l'installation mécanique, l'opérateur veillera à maintenir un repère au niveau du bras dans l'alignement du niveau de référence.

Un opérateur qualifié est en mesure de contrôler la profondeur d'installation endéans les normes données ci-dessus.

Actuellement, le contrôle de profondeur se fait régulièrement de manière automatisée. A cet effet on crée un plan de référence au moyen d'un faisceau laser rotatif.

Un capteur sur le bras des machines de drainage permet de détecter ce faisceau et d'ajuster en permanence la profondeur du creusement en fonction de la topographie de façon à maintenir un gradient constant au niveau du drain.

La qualité de contrôle de la profondeur de ce système est généralement meilleure que pour le contrôle manuel.

Période de placement des drains :

L'installation des drains doit se faire idéalement en saison sèche. Cette condition permet de minimiser les problèmes de compaction dû au passage des engins de drainage lourds, pesant jusqu'à plusieurs dizaines de tonnes.

L'utilisation d'engins montés sur chenilles plutôt que sur roues permet de réduire la compaction. Le creusement mécanique des tranchées de placement des drains en saison sèche évite aussi la compaction du sol au niveau des drains.

Equipements et Machines

Aussi bien le creusement des fossés de drainage que des tranchées dans lesquelles seront placés les drains peut être fait manuellement ou mécaniquement.

De même, le placement des drains peut être fait manuellement ou mécaniquement. Il existe actuellement des équipements réalisant l'ensemble des opérations en une seule passe. (Guyon G., 1962).

Creusement des fossés ou des tranchées :

Le creusement manuel des fossés ou tranchées peut être justifié lorsque les superficies à traiter sont faibles, lorsque les équipements ne sont pas disponibles localement ou lorsque le coût de la main-d'œuvre est faible et que l'utilisation de la main-d'œuvre est souhaitée. Sinon, il est fait appel à des 5-48 pelleteuses.

La largeur de la pelle peut être très réduite pour limiter le volume de sol perturbé et permettre juste le passage des drains souterrains et le placement de l'enveloppe. Il est à noter que la précision du travail mécanique est souvent meilleure que celle du travail manuel.

Placement des drains :

Selon la superficie à traiter, le type de drains et la disponibilité des équipements et de main d'œuvre, le placement des drains peut être manuel ou mécanique.

La combinaison du creusement mécanique et placement manuel est fréquent pour le placement de gros collecteurs ou lorsque les superficies à traiter sont faibles et ne justifient pas la mise à disposition d'équipements de placement coûteux et pas toujours disponibles.

Actuellement, on utilise fréquemment des engins permettant le placement des drains sans devoir creuser une tranchée ("trenchless"). Dans ce cas, le drain est placé dans le sol dans le sillage d'une lame conçue de telle manière à ce que l'ouverture créée dans le sol à la profondeur désirée ne soit pas obtenue par compaction (déformation plastique) mais par soulèvement du sol vers le haut.

Ce processus de rupture dépend des caractéristiques géométriques de la lame et des conditions du sol.

En pratique, ce mode de placement limite la profondeur d'installation à 1.5 – 2 m dans des sols secs et sera considérablement moins profond dans un sol humide.

Le tableau n° 3 renseigne sur les principales caractéristiques des engins utilisés pour le placement des drains souterrains.

Le choix des engins dépend du coût, de la disponibilité et des conditions techniques dans lesquelles le réseau sera mis en place. Les principaux avantages et inconvénients sont détaillés ci-dessous.

Backacter : permet le creusement mécanique des tranchées mais pas le placement des drains:

- faible coût;
- versatile;
- contrôle de la pente difficile et lent;
- bien adapté pour les projets de faible superficie à topographie vallonnée;
- efficace en sol caillouteux;
- nécessite le placement manuel des tuyaux;

permet le placement de tout type de drains et d'enveloppe.

Continuous trencher: permet le creusement mécanique des tranchées et le placement des drains dans la tranchée:

- existe dans une grande diversité en fonction des conditions de sol (sol meuble, sol caillouteux,...);

permet le placement de tuyaux en plastique ou en terre cuite;

permet le placement manuel ou automatique de tout type d'enveloppe, y compris en gravier;

- requiert des engins additionnels pour le remplissage de la tranchée.

Trenchless machine: permet le placement mécanique des drains souterrains sans creusement préalable d'une tranchée.(Zimmer D., 1986).

- sont en mesure de travailler plus rapidement et plus économiquement que les continuous trenchers lorsque l'appui logistique est bien assuré;

□□ idéal pour les tuyaux en plastique crénelé (60-180 mm diam.) avec ou sans enveloppe;

□□ peut travailler dans les sols caillouteux;

besoins en puissance élevé;

□□ capable de travailler à grande profondeur ($D > 2$ m) mais la puissance requise est proportionnelle à D^3 !

Nécessité des conditions de traction très bonne pas toujours facile à assurer (ancrage)

Tableau n° 3: Principales caractéristiques des machines de drainage présentées (fig. 26).

Type	Puissance requise (kW)	Profondeur max. (m)	Largeur tranchées cm	Vitesse de travail km/h
Backacter	30-50	jusqu'à 4	20-60	0.2
Continuous crawler				
léger	60-90	1.5-2	20-30	0.5-1
medium	100	2.5	20-45	1-2
lourd	150	3-3.5	20-45	jusqu'à 3
Trenchelss, winched	50-80	1.2-1.7	/	1.7-2
Trenchless, crawler	100-150	1.6-2.0	/	jusqu'à 5

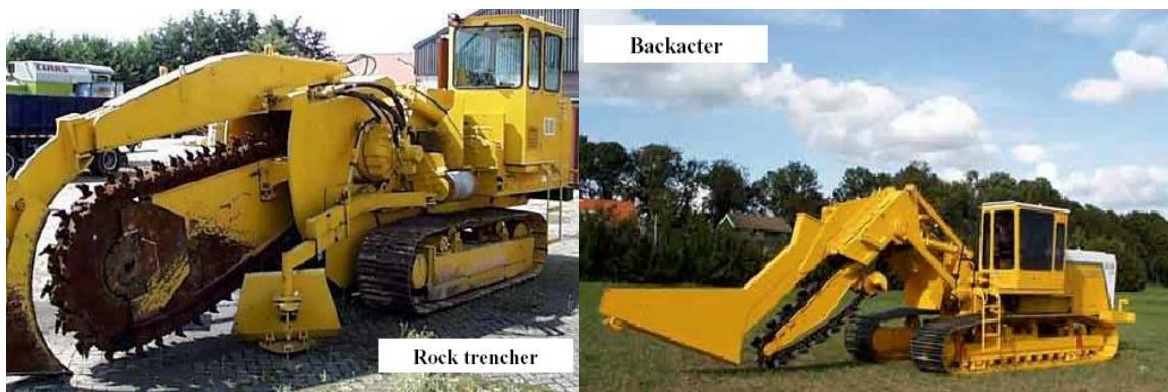


Figure n° 26: Principaux types de machines de drainage (Bailey et Trafford, 1978 in Zimmer D., 1986).

b) Effets nuisibles d'un excès d'eau

On peut dire qu'il y a excès d'eau chaque fois que l'humidité supérieure à la capacité au champ du sol demeure pendant plusieurs jours ou semaines, sans que l'eau de gravité ne

s'écoule. Les effets de cet excès sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol entraînent des conséquences sur la rentabilité des cultures et des élevages.

Le but de l'assainissement agricole est la mise en valeur des terres humides.

1) - L'eau en excès favorise la dégradation de la structure et la rend moins stable :

Les agents de dégradation de structure ont tous un rapport avec l'eau. Mais tant que l'eau s'infiltré bien, la dégradation est minime. Ce n'est que lorsque le sol est gorgé et que cette saturation se prolonge que les colloïdes se gonflent et que les fissures séparant les agrégats disparaissent et se ressoudent / la structure fragmentaire ou grumeleuse qu'elle était, devient compacte, elle se dégrade.

Le tassement en période humide précipite cette dégradation en écrasant les agrégats devenus plastiques d'autant plus rapides que celle-ci est plus instable. L'excès diminue la stabilité structurale en dispersant les colloïdes et en entravant l'activité biologique : le sol a tendance à se glacer en surface sous l'effet des pluies.

2) - L'eau en excès diminue l'aération des sols et les rend plus froids :

L'eau de saturation occupe l'ensemble des espaces normalement remplis d'air. Comme il faut plus de calories pour élever la température de l'eau que celle du sol, un sol humide se réchauffe lentement : c'est un sol froid et tardif.

3) - Il accélère la décalcification et l'acidification

Dans le sol détrempe, les ions Ca^{++} s'éloignent du complexe argilo-humique et sont naturellement remplacés par des ions H^+ : les sols trop humides sont souvent acides. Ainsi décalcifié, le complexe se disperse aisément, rendant la structure plus instable, plus compacte et plus imperméable encore.

4) - Il rend le sol réducteur

L'absence d'oxygène contraint les bactéries aérobies à réduire les oxydes ferriques, à leur arracher de l'oxygène : de rouille qu'ils étaient, ces oxydes prennent la teinte gris bleu puis verdâtre des oxydes ferreux. Ainsi apparaissent les tâches de gley caractéristiques des milieux asphyxiants.

5) - Il ralentit la décomposition des matières organiques et leur humification
et freine leur minéralisation

Le manque d'oxygène et de chaleur, l'excès d'humidité et le pH trop acide qui caractérisent les sols trop humides, entrave le développement de la faune et de la flore aérobie. Les matières organiques se décomposent mal : on les retrouve presque intactes d'un labour à un autre. En outre des bactéries anaérobies les transforment en produits toxiques : des acides organiques et des sulfures, d'où l'odeur de vase décelable au labour de ces types de sols.

6) - Il limite le développement et la nutrition des racines et provoque leur asphyxie

Les racines souffrent de trois manières de l'excès d'humidité des sols :

- des obstacles mécaniques s'opposent à leur pénétration : zones tassées, ou semelles formées par le travail en période humide,
- les maladies fongiques sont favorisées par l'humidité du sol (fusariose, piétin) et par celle qu'entretiennent les mauvaises herbes au pied des cultures ;
- les parasites digestifs, pulmonaires ou hépatiques (strongles, douves) trouvent dans les prés très humides les conditions favorables aux déroulements de leur cycle reproductif, et contaminent gravement le bétail.

7) Le coût du travail est plus élevé en sol trop humide à cause :

- des difficultés de propulsion : l'adhérence diminue et le patinage des roues des tracteurs et des machines de récolte augmente. La durée des travaux s'allonge, et avec elle la dépense en carburant et en main-d'œuvre ;
- des difficultés de travail du sol : au-delà d'un certain d'humidité, la cohésion diminue et l'adhésivité augmente. L'effort de traction s'accroît, et les mottes, au lieu de se briser, se déforment et se compriment : on atteint la zone de gâchage. De ce fait les périodes favorables pour le travail du sol sont plus courtes.

8) Le rendement des récoltes diminue

Par la durée de végétation :

- la levée des semences ou des plantes est plus longue à cause de la faible température du sol, et il arrive que les plantules soient atteintes ou détruites par des champignons tel que le fusarium ;
- la réduction de la durée végétative impose le choix de variétés plus précoces, en général moins productives que les variétés tardives.

Par l'entrave aux travaux d'entretien et de traitement en cours de culture :

Sous peine de compacter le sol, il est souvent difficile en sol trop humide de faire à temps les binages, désherbages, traitements antiparasitaires et apports d'engrais en couverture. Cette entrave est d'autant plus grave que ces sols ont, plus que d'autres, besoins de ces interventions.

Par la mauvaise croissance des plantes due aux obstacles à la pénétration des racines, l'asphyxie et la mauvaise assimilation minérale. La sensibilité à l'excès d'eau est variable selon les espèces.

Par l'impossibilité de pratiquer certaines cultures plus rémunératrices :

Le choix des cultures doit tenir compte de la vocation des terres et de la région. La mise en culture de nombreux sols humides après drainage s'avère souvent peu rentable ou même dangereuse pour la conservation des sols et la régulation hydraulique et microclimatique de la région.

Il faut donc, remarquer les effets néfastes d'excès d'eau sur les cultures. Le remède réside dans le fait de la connaissance de l'origine et le type d'excès d'eau (irrigation- lessivage ou pluviométrie) et faire ensuite des traitements statistiques, l'analyse fréquentielle, entre autre, sur les données collectées en la matière et estimer les volumes d'eau maximum pouvant provoquer des excès d'eau. Utiliser ensuite ces résultats obtenus pour déterminer le débit de projet q_c (mm/j).

Le réseau de drainage doit être calculé de façon à pouvoir évacuer la pluie critique dont la durée est égale à la durée φ de submersion et dont la périodicité moyenne de retour est fixée en fonction des caractéristiques de la plante.

Le débit par unité de surface à évacuer de la parcelle est fonction de l'intensité "i" de la pluie critique. Il est appelé débit caractéristique du réseau.

$$q_c \frac{(l/s/ha)}{0,36} = \frac{1 - e - e'}{0,36} \cdot i_c \text{ (mn/h)}$$

sachant que : $e + e' + r = 1 \longrightarrow 1 - e - e' = r$

- avec e - coefficient d'évaporation
- e' - coefficient d'infiltration
- r - coefficient de ruissellement
- i_c - intensité de la pluie critique.

En l'absence d'observation météorologique donnant l'intensité des pluies, la formule de Montana en donne une évaluation approximative en fonction de la durée et de la fréquence de retour des précipitations :

$$I = \frac{a'}{\sqrt{t} \text{ (min)}} \text{ mn/h}$$

Fréquence	A
1 an	47
2 ans	79
5 ans	113
10 ans	145

Le débit spécifique de crue c'est le débit de crue par unité à surface de bassin versant. Formule analogue au débit caractéristique.

$$q_c = \frac{r}{0,36} \cdot i_c \text{ (mn/h)}$$

Exemple

Pour une culture maraîchère dont la durée admissible de submersion est d'un jour par an, l'intensité de la pluie correspondante sera :

$$I = \frac{47}{24 \times 60} = 1,24 \text{ mn/h}$$

c) Problème de salinité

Un autre problème est à considérer, à l'instar de l'excès d'eau, c'est la salinité des sols agricole, dans les périmètres irrigués des zones à climat semi- aride et aride. Dans ces régions l'eau d'irrigation est souvent chargée en sels et compte tenu du caractère « agressif » du climat (longue période de chaleur), l'irrigation des cultures est excessive, par crainte d'un quelconque stress hydrique (tab. 4).

Tableau n° 4: Qualité des eaux de quelques barrages en Algérie en matière de salinité en dS/m.

Périmètre	Barrage	C.E.	S.A.R	Classe Riverside	Qualité
Haut Chélif Ghrif	- Deurdeur	2.92	5.42	C4S1	Médiocre
Moyen Chélif	Sly	1.69	6.34	C3S1	Satisfaisante
Bas Chélif	O.Fodda	1.50	3.43	C3S1	Satisfaisante
Mina	S.M.B.A.	1.47	4.08	C3S1	Satisfaisante
Habra	Bouhanifia Fergoug Ouzet	1.16 1.39 0.83	3.01 4.65 2.13	C3S1 C3S1C2S1	Satisfaisante Satisfaisante Bonne
Sig	Cheurfa II - Sarno	2.01	6.05	C3S1	Satisfaisante
MitidjaOuest	Bouroumi	1.42	4.24	C3S1	Satisfaisante
Hamiz	Hamiz - Nappes	1.0	0.94	C3S1	Bonne
Maghnia	Beni Behdel	0.64	1.55	C2S1	Bonne

Source ANARH 2000.

A cet effet, il se produit des dépôts de sels dans les premières couches de sol suite aux infiltrations de l'eau d'irrigation, à son évaporation et à sa consommation.

Ces phénomènes se déroulent lentement (des années voir des dizaines d'années) et dont agriculteurs, agronomes et aménagistes peuvent ne pas s'en rendre compte.

Plus grave encore, parmi les eaux d'irrigations salées, qui s'infiltrent dans le sous-sol, une quantité peut rejoindre la nappe d'eau superficielle existante, et à la contaminer à son tour.

Durant les périodes de chaleur (températures élevées) et avec les remontées de celle-ci par capillarité en raison des évaporations, le sol est également affecté par les sels accumulés devient salin et /ou alcalin.

Les conséquences aussi bien pour le sol (baisse de fertilité physique) que les productions culturales (baisse de rendements), sont bien sur néfastes.

Si des actions et des recherches scientifiques sont entamées pour le lessivage et le drainage des sels, lutter contre la salinité des sols, il en demeure pas moins que le problème reste posé, surtout en matière d'accroissement de ce phénomène qu'est la salinisation (vitesse de progression de la salinité) ou même l'alcalinisation.

Par ailleurs, le problème du drainage se pose en Algérie avec acuité dans certaines régions. Dans les zones arides ou désertiques du sud, dans les palmeraies et oasis, la lutte contre la

salinisation des sols par suite de la montée des nappes phréatiques est permanente depuis la mise en culture de ces zones.

Les réseaux de drainage (presque toujours par fossé) y sont plus ou moins bien entretenus et fonctionnels suivant les régions.

Dans le nord, il existe de vastes périmètres irrigués, installés très souvent dans des dépressions, des plaines alluviales à faible drainage naturel.

Ces périmètres sont soit dépourvus de réseaux de drainage, soit équipés de vieux réseaux de fossés non ou mal entretenus et peu fonctionnels.

Ces périmètres souffrent beaucoup de ce mauvais contrôle des nappes. On peut citer par exemple, le périmètre de Bouna Moussa (près d'Annaba) qui souffre d'un engorgement des sols notamment à cause de la pluviométrie importante dans la région.

Le périmètre de la Mina près de Relizane qui souffre de la salinisation des sols à cause de la montée des nappes suite à la non maîtrise des volumes d'eau d'irrigation apportés,

- A des apports latéraux importants
- A la détérioration progressive de drainage d'un réseau de drainage insuffisamment entretenu.

Il est évident qu'en Algérie le drainage est une technique qui doit être presque toujours associée à l'irrigation (l'un ne va pas sans l'autre).

A titre indicatif, des chiffres publiés par l'agence nationale des ressources hydrauliques en (ANARH) en l'an 2000 Sont groupés dans le tableau n° 5:

Bassin hydrographique	Périmètre	Date de création	Surface drainée(ha)	Méthode	Surface nécessitant un drainage (ha)
Cheliff	HautCheliff	1941	5780	Fossé	8410
	Moyen	1938	5290	Fossé	10500
			12950	Fossé	16650
	Bas	1937	220	Poterie	/
	Mina	1943	7920	Fossé	9380
Algérois	MitidjaOuest	1988	600		7000
	Hamiz	1937	/	Poterie	2565
Constantinois	Safsaf	1991	/	/	/
	Bounamoussa	1977	/	/	9000
	Eltaraf	/	/	Fossé	/
Macta	Habra	1940	14310	Fossé	18960
	Sig	1956	6850	Fossé	8500
Sahara	Abadla	1972		Fossé	/
	Ouedrhir	/		Fossé	/

Avec la diversité des conditions climatiques, les superficies souffrant ou risquent de souffrir des défauts d'assainissement, d'évaluées à près de 100 000 ha.

La problématique du drainage et de la salinisation des sols se pose différemment selon le drainage et des problèmes de salinité des eaux et des sols, sont contexte climatique, géologique et pédologique de chaque région.

La superficie drainée en Algérie est d'environ 56 000 ha.

Cependant, le réseau de drainage actuel constitué de fossés, est ancien et peu efficace. Les besoins en drainage sont estimés à 100 000 ha, cette superficie pouvant augmenter avec le lancement de nouveaux projets.

Les objectifs de drainage en Algérie ne sont pas les mêmes d'un périmètre à un autre et peuvent être résumés comme suit :

- L'élimination des excès d'eau d'hiver dans les périmètres irrigués à climat relativement humide (Est du pays).
- Le contrôle de la remontée de la nappe et de la salinisation des sols par remontées capillaires principalement dans les périmètres irrigués de l'ouest du pays.
- La lutte contre la salinisation secondaire des sols par l'irrigation avec de l'eau de mauvaise qualité chimique. C'est le cas principalement des périmètres irrigués arides et semi arides (Habra, Sig, Mina, Bas Cheliff, Moyen Cheliff.)

d) Salinisation et alcalinisation

La salinité a eu des effets sur l'agriculture depuis très longtemps. Depuis cinq mille ans, les peuples de la Mésopotamie ont cultivé le Croissant fertile des rivières du Tigre et de l'Euphrate (actuellement Turquie et Iraq), une des terres agricoles les plus riches du monde de l'époque.

Quand le sel a commencé à s'accumuler dans le sol, résultat de lessivage et de drainage inadéquat de l'eau d'irrigation, la principale culture pratiquée a changé du blé à l'orge qui est plus tolérante à la salinité. Par la suite, les sels se sont accumulés au point que rien ne peut croître et la terre a été abandonnée (Hadas, 1965).

Les sels ont été reconnus comme un problème depuis des milliers d'années, particulièrement dans les régions arides et semi-arides où il n'y a pas suffisamment de pluie pour lessiver les sels au-delà de la zone racinaire (Miller and Donahue, 1995).

Comme la croissance des plantes est sévèrement inhibée par des concentrations en sels solubles au-dessus d'une certaine limite, le maintien d'une production agricole dans ces régions nécessite une série de mesures permettant le déplacement, par lixiviation, des sels apportés au sol.

En même temps, ceci montre la nécessité d'un "dépôt" approprié sinon on aura un simple transfert de sels vers une autre localisation. Ceci indique que les problèmes de salinité et de sodicité des sols ne peuvent pas/ne doivent pas être étudiés/résolus au niveau du profil de sol sur place seulement.

En plus de son effet sur la concentration de la solution du sol, l'addition des sels au profil du sol peut entraîner l'altération de la composition du complexe d'échange: augmentation de la proportion de sodium échangeable sur le complexe adsorbant car les sels de sodium sont les plus solubles dans la nature et donc ceci va entraîner la sodication ou la formation de sols sodiques. La vitesse de sodication dépend de la composition de l'eau utilisée, de la quantité d'eau apportée par année et de la CEC du sol.

Origines des sels dans les eaux et les sols :

Les éléments chimiques qui sont importants à considérer dans l'étude de la salinité sont:

- Cations : Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Li^+ .
- Anions : Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- .
- Autres éléments chimiques : Si, B, Se.

L'origine ultime des sels est la décomposition des roches ignées et l'activité des volcans. Les ions sont ensuite libérés par des processus tels que l'hydratation, l'hydrolyse, l'oxydation et des réductions et échanges.

Accumulation des sels dans l'eau :

Toutes les eaux naturelles contiennent des minéraux dissous et des matières gazeuses. L'accumulation de sels dans une eau dépend de son origine.

- Eau de pluie : gaz atmosphériques dissous et sels cycliques.
- Eau de surface : sa composition et sa concentration varie dans l'espace et dans le temps. Cette variation dépend de :

- Géologie du bassin versant. Exemple des eaux de Oued Oum Rbia traversent, avant et au niveau de la source, le Trias salifère sont assez salées.
 - Climat : la neige contient moins de sels que la pluie.
 - Evaporation : la concentration de la solution augmente avec l'augmentation de l'évaporation. Ceci entraîne une variation de la salinité d'un cours d'eau avec la saison.
- Eau souterraine : En général, leur composition est assez variable d'une place à une autre mais elle n'est pas très variable d'une année (ou saison) à l'autre s'il n'y a pas d'effet notable de l'homme. La composition et la concentration en sels dépendent de la formation géologique qu'elle traverse, de sa température et de la composition de l'eau de recharge, s'il y en a.

La solubilité des sels augmente avec la température, à l'exception du CaCO_3 dont la solubilité diminue de 2,3 % pour une augmentation de la température de 1°C.

A titre d'exemple, on attribue fréquemment la disparition de la civilisation mésopotamienne, largement basée sur l'irrigation, à la salinisation des terres et à la perte de production agricole qui en a résulté.

Malgré que le problème soit bien connu, la perte de terres irriguées par salinisation des sols continue à se poursuivre dans de nombreux périmètres irrigués de part le monde. (Jacquin F., Florentin L., 1977).

En pratique, les eaux d'irrigations sont classées selon leur salinité (teneur en sel, mesurée par leur conductivité électrique) et par leur teneur relative en sodium, l'excès de cet ion ayant un effet néfaste direct aussi bien sur la structure du sol que sur les cultures. La teneur en sodium de l'eau est généralement mesurée par le Sodium adsorption ratio (SAR) :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{[(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2]^{0.5}}$$

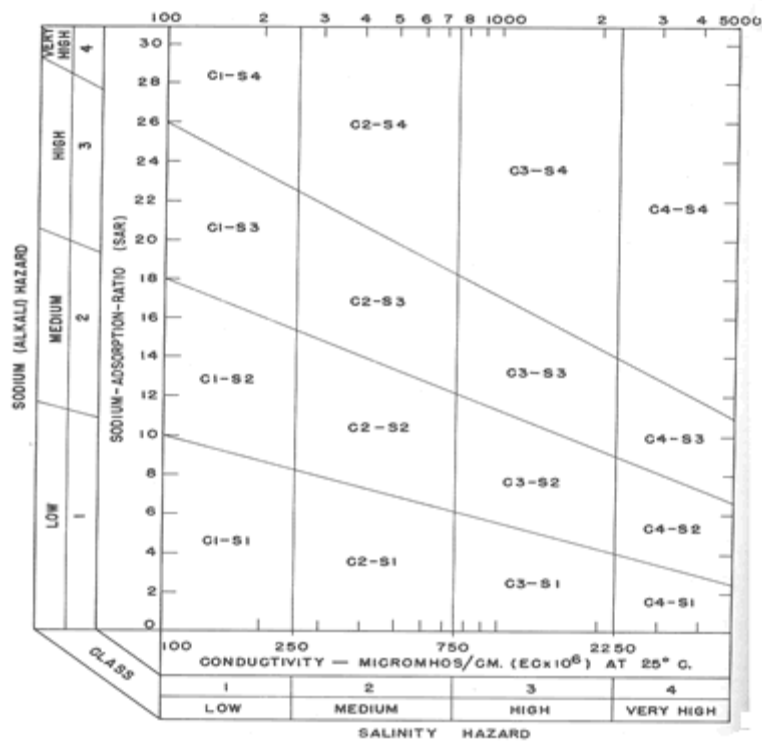


Figure n° 27: **Diagramme pour la classification de l'eau d'irrigation.**

où les [] font référence à la concentrations des ions en solution, exprimée en milliéquivalents par litre. Le US Salinity Laboratory a défini des normes de qualité des eaux d'irrigation selon leur salinité et leur SAR. (fig. 27).

Sur base de ces normes, on peut estimer le besoin d'irrigation supplémentaire pour lessiver les sels ("leaching requirement") et donc le besoin éventuel d'installer un réseau de drainage au cas où les eaux salées ne pourraient pas être évacuées du profil par drainage naturel.

Accumulation des sels dans le sol :

Les principales causes d'accumulation des sels dans le sol sont :

- Décomposition in-situ des roches: effet pas très significatif à l'échelle humaine.
- Eau de nappe : capillarité et évaporation d'eau
- Anthropique: irrigation
- Eau de surface

La concentration des sels solubles dans la solution du sol est influencée par la teneur en eau. Ainsi la détermination de la teneur du sol en sels nécessite une humidité standard. On utilise, en général, l'extrait de la pâte saturée et des fois des rapports sol: solution de 1:1 à 1:5.

Analyses de la salinité de l'eau et du sol

- **Gravimétrie: TDS (sels totaux dissous)**

Historiquement, la salinité du sol ou de l'eau a été déterminée en déterminant la quantité de sels dissous dans la solution. On lui faisant évaporer l'eau de sorte à faire précipiter les sels dont le poids est ensuite déterminée.

- Pour l'eau : Poids des sels solubles dans un aliquote d'eau évaporée à 82°C. Cette méthode n'est pas précise car la réaction $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ entraîne une volatilisation d'une partie des carbonates sous forme de gaz carbonique et donc une sous-estimation de la teneur en sels.
- Pour le sol :
 - Extrait 1:5 : Détermination de la salinité dans un filtrat d'une suspension de sol dans l'eau dans un ratio sol:eau de 1:5. Mais elle donne des valeurs élevées car elle cause la dissolution de CaCO_3 et du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).
 - Extrait de la pâte saturée: Détermination de la salinité dans un extrait (filtré) de la pâte saturée. C'est la méthode la plus appropriée du fait que cette humidité est la plus proche de celles rencontrées sous les conditions au champ. Mais elle est fastidieuse comparée aux autres extraits plus dilués.

- **Conductivité électrique (CE)**

La conductivité électrique est basée sur le principe que la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité) augmente avec l'augmentation de la concentration de la solution en ions

Cette conductivité électrique peut être déterminée sur différents rapports sol: solution. Elle est exprimée en déci-Siéemens par mètre ou dS/m. A titre de rappel 1 dS/m = 1 mmhos/cm (l'ancienne unité utilisée).

- **Formules approximatives**

Cations ou Anions (méq/l) = CE*10 (fig. 28). Cette expression est valable pour une conductivité électrique comprise entre 0.1 et 5 dS/m.

Teneur en sels (ppm) = CE*640 (fig. 29). Cette expression est valable pour une conductivité électrique comprise entre 0.1 et 5 dS/m.

PO (atm) = 0.36*CE (fig. 30). avec PO : pression osmotique de la solution.

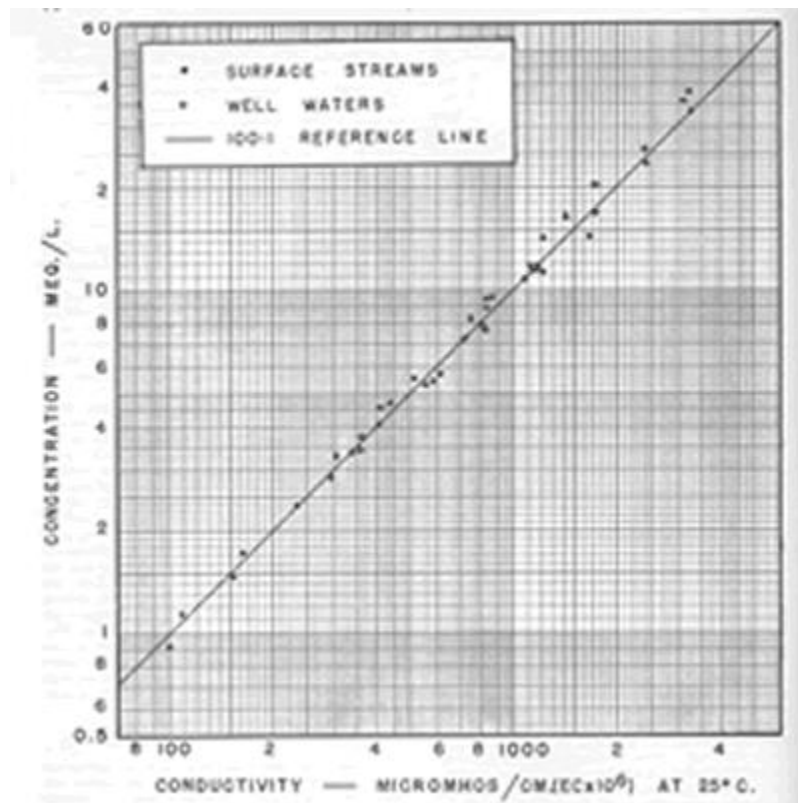


Figure n° 28 : Relation CE et concentration en cations ou anions en méq/l.

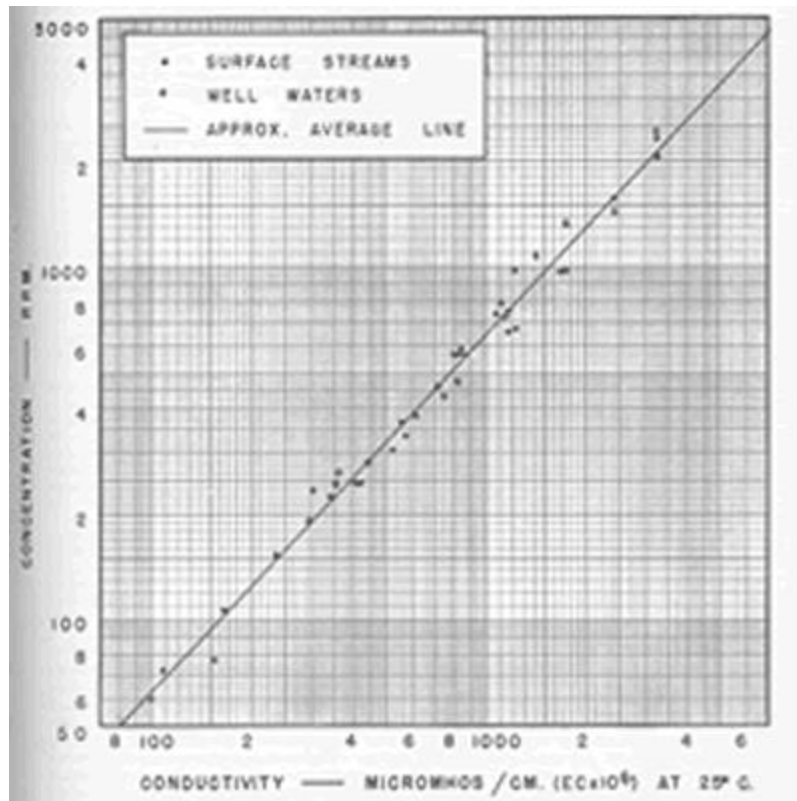


Figure n° 29 : Relation CE et concentration en sels en ppm.

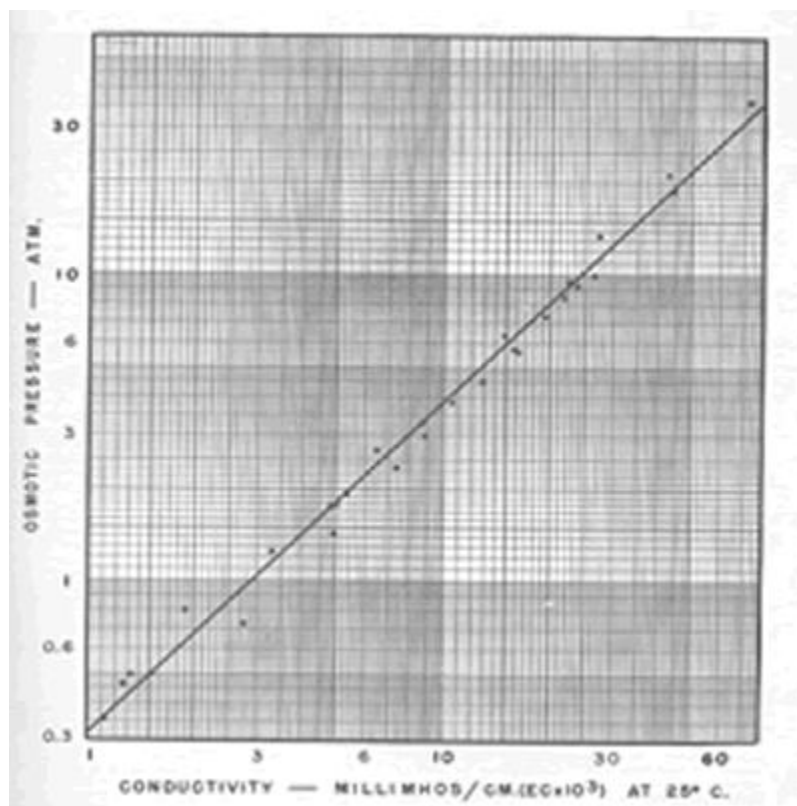


Figure n° 30 : Relation CE et pression osmotique.

Analyses de sol en relation avec la sodicité

- pH du sol
- Capacité d'échange cationique (CEC)
- Pourcentage de sodium échangeable ESP (%) = $(Na/CEC)*100$
- Teneur en gypse: Généralement déterminée sur un extrait 1:5 ou 1:10 après agitation pour 30 minutes à 48 heures (sols à gros cristaux).
 - Précipitation par l'acétone (valeurs faibles car erreur d'échange).
 - Précipitation par le mélange acétone- $Ca(NO_3)_2$ (pour compenser pour l'erreur d'échange).
 - Déterminée par différence entre SO_4 dans un extrait dilué et SO_4 dans l'extrait de saturation (plus précise).
- Besoin en gypse : Mesure de la quantité de calcium adsorbée par le sol après agitation avec une solution saturée en gypse.
- Teneur du sol en calcaire: déterminée quand on veut utiliser un amendement formant un acide comme S ou H_2SO_4 .

Processus de salinisation des sols :

Les sols salins normalement existent dans des zones qui reçoivent des sels à partir d'autres lieux ou de l'eau d'irrigation. Le degré avec lequel cette salinisation se produit dépend de la composition de l'eau d'irrigation et aussi du bilan entre l'apport d'eau d'irrigation à la surface du sol et le déplacement de l'eau de drainage de la limite inférieure du profil. Ainsi on peut dire qu'on aura salinisation quand :

$$CE_i * Q_i > CE_d * Q_d$$

avec :

CE_i : conductivité électrique moyenne de l'eau d'irrigation.

Q_i : quantité d'eau d'irrigation.

CE_d : conductivité électrique moyenne de l'eau de drainage.

Q_d : quantité d'eau de drainage

Généralement, on effectue ces calculs pour une période de 1 année. La vitesse de salinisation annuelle peut être exprimée par :

$$\Delta CE_{PS} = \frac{(CE_i * Q_i - CE_d * Q_d)}{Z_{sol} * PS * d_a / 100} = \frac{\text{Quantité de sels apportés} - \text{Quantité de sels drainés}}{\text{Humidité de saturation}}$$

avec Q_{sol} : profondeur du sol (cm).

PS: Humidité du sol au point de saturation (%).

Z_{sol} : profondeur du sol (cm).

d_a : Densité apparente du sol (g/cm^3).

On peut dire que pour un apport d'une quantité d'eau (Q_i) ayant une conductivité électrique, CE_i , la vitesse de salinisation est hautement dépendante de la quantité d'eau de drainage déplacée vers le bas du profil (Q_d). Ceci devient clair si on considère les situations où $Q_d = 0$ (stagnation d'eau superficielle ou présence de couche du sous-sol imperméable) ou $Q_d < 0$ (remontée capillaire de l'eau). Dans ces cas, la vitesse de salinisation (ΔCE_{PS}) est nettement élevée.

La sodicité des sols :

Si les quantités totales d'ions apportées par l'irrigation pendant plusieurs années sont très supérieures aux quantités adsorbées sur les sols on peut dire qu'à long terme la composition de la solution deviendra identique à celle de l'eau d'irrigation. Ce processus est accompagné par un ajustement graduel de la composition du complexe adsorbant. Le pourcentage de sodium échangeable (ESP) final peut être estimé à partir de la composition de l'eau d'irrigation et de la concentration totale de la solution du sol sous les condensations moyennes au champ.

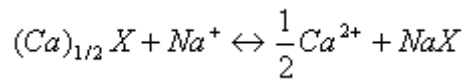
Comme il est difficile de décrire en détail la composition de la solution du sol pendant la saison de croissance, on peut être amené à faire des hypothèses. En supposant que l'humidité "moyenne" du sol sous conditions irriguées est de près de 2/3 de l'humidité à la capacité au champ, on peut estimer les concentrations du sodium et du calcium en multipliant ces concentrations à HCC par 1,5. La concentration moyenne dans le profil à HCC peut être ainsi estimée en multipliant la concentration moyenne dans l'eau d'irrigation par le facteur Q_i/Q_d . On obtient ainsi, une estimation raisonnable :

$$c_o = 1.5 * \frac{Q_i}{Q_d} c_i$$

Avec c° : concentration moyenne d'un ion donné dans la solution du sol en conditions au champ.

c_i : sa concentration dans l'eau d'irrigation.

Pour évaluer le danger de sodication on utilise la réaction :



Les données expérimentales ont montré que pour la majorité des sols humides, l'échange d'équilibre monovalent-divalent suit à peu près l'expression suivante :

$$K_G = \frac{[Ca^{2+}]^{1/2} * NaX}{CaX * [Na^+]} \Rightarrow \frac{NaX}{CaX} = K_G * \frac{[Na^+]}{[Ca^{2+}]^{1/2}} = K_G * r$$

avec r exprimé en (mol/l)^{1/2}.

Quand ces concentrations sont exprimées en méq/l, cette relation devient :

$$\frac{NaX}{CaX} = K_G * \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}]}{2}}}$$

Le laboratoire national de salinité des U.S.A. utilise un rapport similaire dans lequel Mg est ajouté à Ca au dénominateur :

$$\frac{NaX}{CaX} = K_G * \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

avec Na, Ca et Mg exprimées en mmol/l.

Cette appellation de SAR indique qu'il détermine la composition du complexe adsorbant.

La relation qui existe entre SAR et r est $SAR = r * \sqrt{1000}$.

On sait que $K_{Na/Ca} = 1/2$ (mol/l)^{1/2}. Donc, on peut écrire :

$$\frac{ESP}{100 - ESP} = \frac{NaX}{CaX} = \frac{1}{2 * \sqrt{1000}} * SAR$$

ou

$$\frac{ESP}{100 - ESP} = 0.015 * SAR$$

Cette équation paraît être satisfaisante aussi pour des sols contenant Mg. Du fait que Ca et Mg sont adsorbés presque à la même préférence; (100 - ESP) tient compte du Mg adsorbé aussi.

Les chercheurs du laboratoire national de salinité des USA ont trouvé pour des sols une relation empirique similaire à la précédente (fig. 31) :

$$\frac{NaX}{(Ca + Mg)X} = Constante + 0.015 * \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca + Mg)}{2}}}$$

avec un coefficient de corrélation de 0.92 par Na-

Sol # 50%

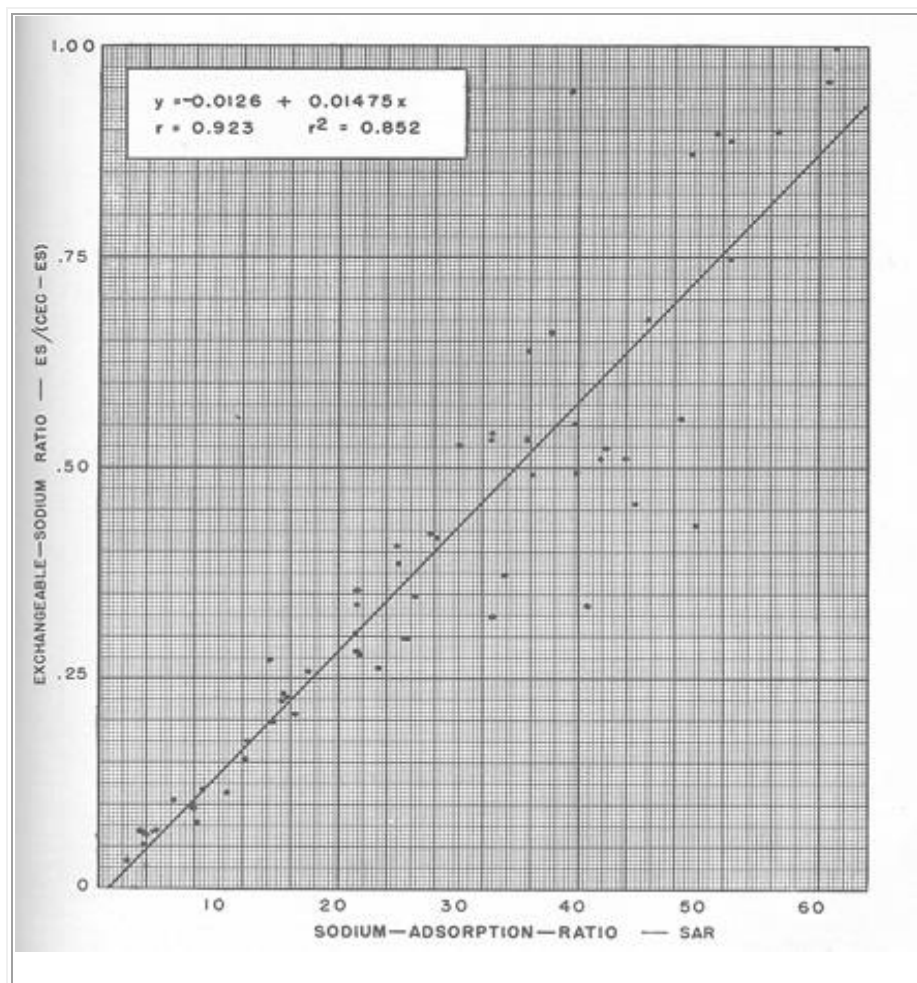


Figure n° 31 : Relation entre le ratio de sodium échangeable (ESR = Na/(CEC - Na)) et le SAR de l'extrait de la pâte saturée du sol.

e) Tolérance des cultures aux sels

La tolérance des cultures a été habituellement exprimée en terme de diminution du rendement due à un certain niveau de salinité dans la zone racinaire comparée aux rendements sous des conditions non salines. Ainsi, la tolérance à la salinité est une valeur relative basée sur les conditions de croissance de la culture.

Le paramètre choisi pour relier la salinité à la tolérance des cultures doit être bien corrélé à la croissance et au rendement de la culture. Mis à part les effets spécifiques des ions, la réduction du rendement est liée d'abord à la pression osmotique de la solution du sol dans la zone racinaire.

La distribution de la salinité dans le sol varie dans l'espace et dans le temps. En fonction de la fraction de lessivage, le profil de salinité peut être soit uniforme et varier relativement peu avec la profondeur, ou il peut être très non uniforme, avec des salinités variant d'une concentration proche de celle de l'eau d'irrigation près de la surface du sol à une concentration beaucoup plus élevée à la base de la zone racinaire. Résultat de l'évapotranspiration et du drainage, la concentration des sels change avec le temps les irrigations; ainsi la fréquence des irrigations influence l'amplitude de ces changements.

Afin de minimiser les ambiguïtés dans l'interprétation des résultats obtenus dans les profils de salinité non uniformes, la plupart des données sur la tolérance des cultures à la salinité, ont été obtenues à travers des expérimentations conduites dans des parcelles salinisées artificiellement où la salinité a été maintenue à un niveau uniforme sur la profondeur de la zone racinaire en irriguant avec des eaux de différentes salinités et utilisant des fraction de lessivage élevées.

Puisque l'absorption de l'eau est la plus élevée dans la couche supérieure de la zone racinaire, où proportionnellement les racines se concentrent, la salinité moyenne pondérée est influencée plus par la salinité de la couche supérieure de la zone racinaire plutôt que par la salinité la plus élevée et qui se trouve à la base de la zone racinaire.

Ainsi, l'utilisation du nouveau concept de salinité moyenne pondérée donne plus de signification à la CE de l'eau d'irrigation en terme d'effets sur la croissance de la plante.

Le tableau n°6, développé par Maas, donne la diminution du rendement relatif due à la salinité quand elle dépasse un niveau critique, caractéristique de chaque espèce. Il vous est demandé de remplir les informations manquantes dans ce tableau.

Tableau n° 6: Niveau critique de la CEes provoquant des chutes de rendement des cultures.

Cultures	Niveau critique de conductivité électrique de l'extrait de la pate saturée(CEes)
GRANDES CULTURES	dS/m
Arachide	3.2
Betterave à sucre	7.0
Blé	6.0
Canne à sucre	1.7
Carthame	5.3
Coton	7.7
Fève	1.5
Haricot	1.0
Lin	1.7
Mais	1.7
Orge	8.0
Riz (paddy)	3.0
Soja	5.0
Sorgho	6.8
CULTURES MARAICHERES	
Betterave rouge	4.0
Brocoli	2.8
Cantaloupe	2.5
Carotte	1.0
Céleri	1.8
Chou	1.8
Citrouille	4.7
Epinard	2.0
Haricot	1.0
Laitue	1.3
Maissucré	1.7
Navette	0.9
Oignon	1.2
Patate douce	1.5
Poivron	1.5
Pomme de terre	1.7
Radis	1.2

Tomate	2.5
CULTURESFOURRAGERES	
Alpiste bulbeuse	4.6
Chiendent à crête	7.5
Chiendent allongé	7.5
Dactyle pelotonné	1.5
Dolique	2.5
Eragrotis	2.0
Fétuque élevée	3.9
Gros chiendent	6.9
Lotier,lotiercorniculé	5.0
Lotus des marais	2.3
Luzerne	2.0
Maisfourrage	1.8
Orge fourrage	6.0
Ray Gras anglais	5.6
Seigle sauvage,sans barbe	2.7
Sesbanie	2.3
Sudangrass	2.8
Trèfle Bersim	1.5
Trèfle blanc	1.5
Trèfle des prés	1.5
Trèfle fraise	1.5
Trèfle hybride	1.5
Vesce commune	3.0
Vulpin des prés	1.5
CULTURESFRUITIERES	
Abricotier	1.6
Amandier	1.5
Avocatier	1.3
Baies	1.5
Citronnier	1.7
Figuier	
Fraisier	1.0
Framboisier	1.0
Grenadier	
Mures	1.5
Noyer	1.7
Olivier	2.7
Oranger	1.7
Palmier dattier	4.0
Pamplemoussier	1.8

Pêcher	1.7
Poirier	1.7
Pommier	
Prunier	1.5
Vigne	1.5

Egalement le tableau n° 7, donne la tolérance de quelques cultures vis de l'ESP.

Tableau n° 7: Tolérance relative de certaines cultures au sodium échangeable.

Sensibles : ESP < 15%	Tolérantes : 15 < ESP < 40%	Très tolérantes : ESP > 40%
<ul style="list-style-type: none"> • Avocatier • Noyer • Haricot • Coton (à la germination) • Mais • Pois • Pomelo • Oranger doux • Pêcher • Pamplémousse • Haricot • Lentille • ArachidePois chiche 	<ul style="list-style-type: none"> • Carotte • Trèfle blanc • Paspalum dilatatum • Fétuque élevée • Laitue • Millet d'Afrique • Canne à sucre • Bersim allongé • Avoine • Oignon • Radis • Riz • Seigle • Ray-grass d'Italie • Sorgho • Epinard • Tomate • Vesce commune • Blé 	<ul style="list-style-type: none"> • Luzerne • Orge • Betterave rouge • Betterave à sucre • Gros chiendent • Coton • Chiendent à crête • Agropyre allongé

¹ Dans chaque colonne, la tolérance décroît de haut en bas. Ces tolérances sont relatives car, en général, des facteurs nutritionnels et des conditions de sol défavorables arrêtent la croissance avant que ces niveaux de ESP soient atteints. Un sol avec un ESP>30 présentera, en général, une structure trop médiocre pour permettre une bonne production agricole. Dans la plupart des cas, les tolérances ont été établies après une stabilisation préalable de la structure du sol.

Effets de la salinité sur les plantes :

Généralement, l'accumulation de sels dans les tissus de plantes au-dessus de la normale va causer une certaine inhibition de la création et du rendement. Les effets de la salinité peuvent être :

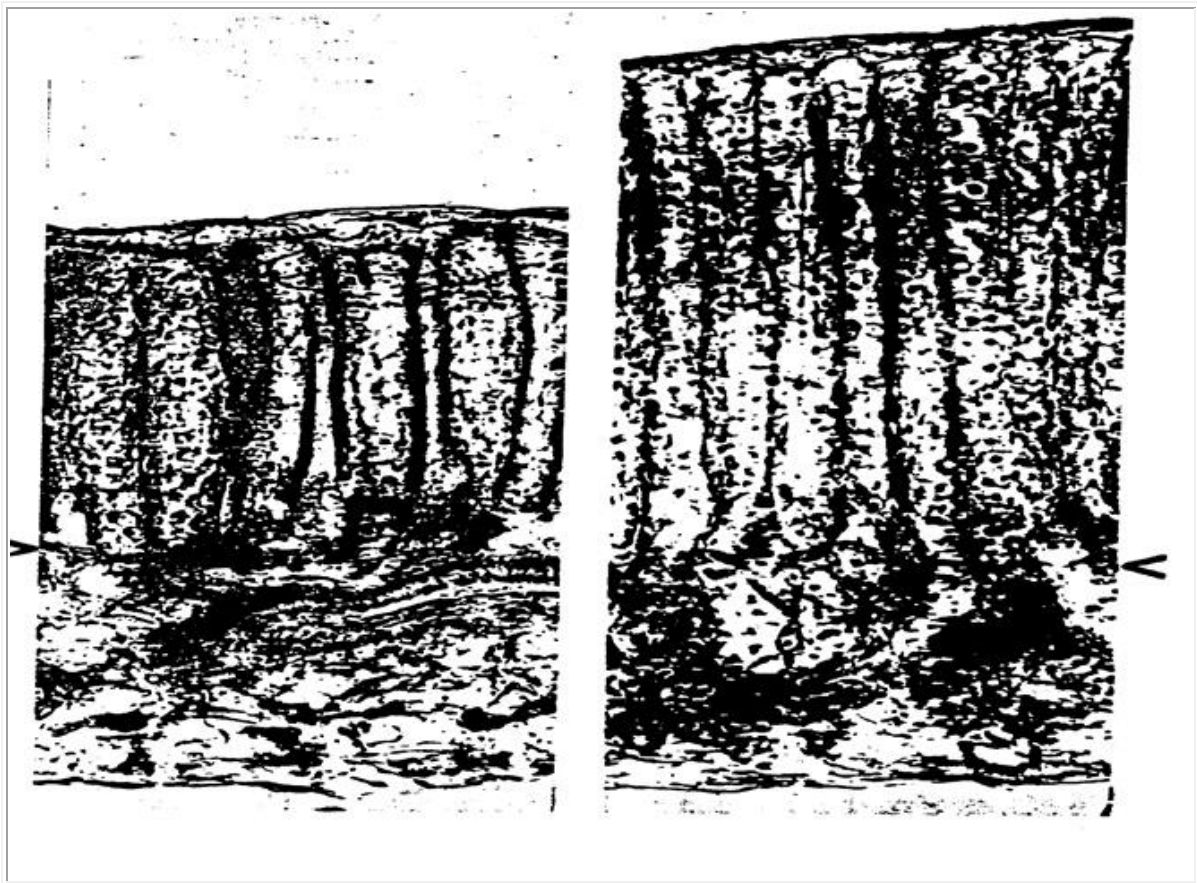
1. Réduction générale de la croissance
2. Réduction de la croissance causée par une nutrition déséquilibrée en éléments essentiels.
3. Réduction de la croissance causée par des ions toxiques (Bore). Mais il n'y pas de limites entre ces différents effets. La suppression de la croissance peut être le résultat d'effets combinés

Mécanisme de réduction générale de la croissance

Une absorption excessive de sels peut réduire la division cellulaire en affectant directement les processus de base de la croissance sans qu'une nutrition déséquilibrée ou des ions toxiques interviennent. La division des cellules suit les étapes suivantes:

- Mitose et accomplissement de la division cellulaire
- Elargissement des cours et initiations de la synthèse de l'ARN et des protéines.
- Synthèse de l'ADN.

Ce qui résulte dans la réduction de la division cellulaire mais un élargissement cellulaire plus prolongé (fig. 32).



Témoin non soumis à la salinité

Traitement soumis à la salinité

Figure n° 32 : Coupe transversale de feuilles trifoliées de plante témoin et de plante ayant été soumise à la salinité (3 atm. NaCl). Les cellules ont été photographiées vivantes (Accroissement = 385 fois).

La figure n° 33 montre que la synthèse de l'ADN dans les feuilles de haricot est plus réduite que celle de l'ARN par l'apport de NaCl.

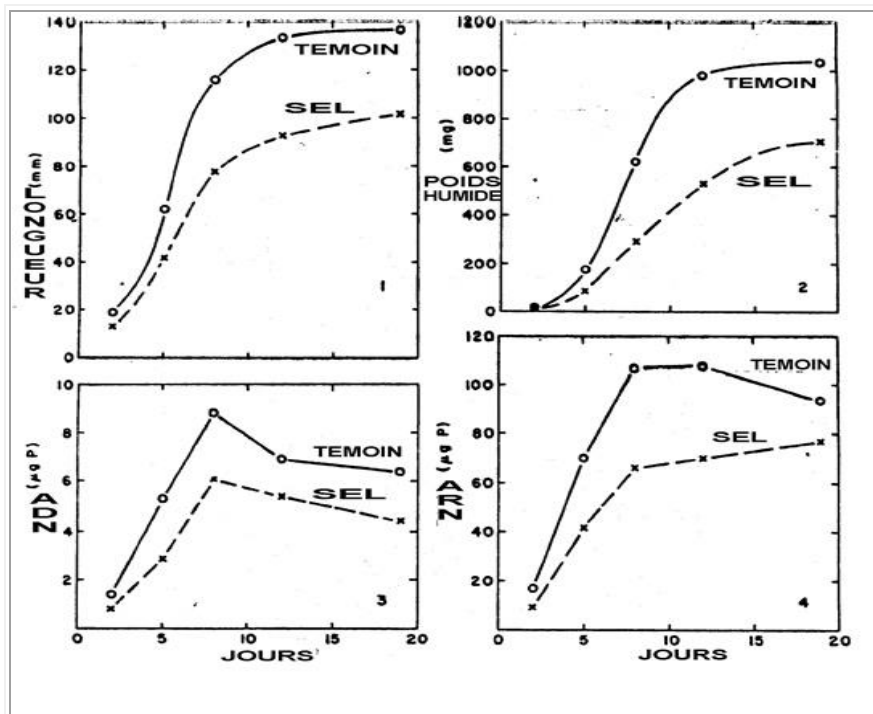


Figure n° 33 : Courbe de croissance des folioles latérales de la 1ère feuille trifoliée de plantes témoins et de plantes soumises à la salinité.

Théorie de la disponibilité d'eau (effet osmotique)

Les symptômes visibles produits par un stress de salinité sont très similaires à ceux produits par un stress dû à un déficit hydrique. C'est pour ça que pendant longtemps l'effet de la salinité a été affecté à une diminution de la disponibilité d'eau résultant d'un stress osmotique dans la solution du sol.

Plusieurs résultats supportaient cette théorie. Des plantes de maïs ont été d'abord laissées croître dans une solution nutritive et après transférées dans des solutions dont les concentrations et les natures des solutés sont différentes (fig. 34).

La vitesse d'absorption d'eau a été mesurée 6 heures après que les plantes avaient été transférées et à des intervalles de 30 minutes. La vitesse d'absorption d'eau diminue quand la concentration du soluté diminue. Cette vitesse était indépendante de la nature du soluté quand les concentrations sont exprimées en terme de succion du soluté.

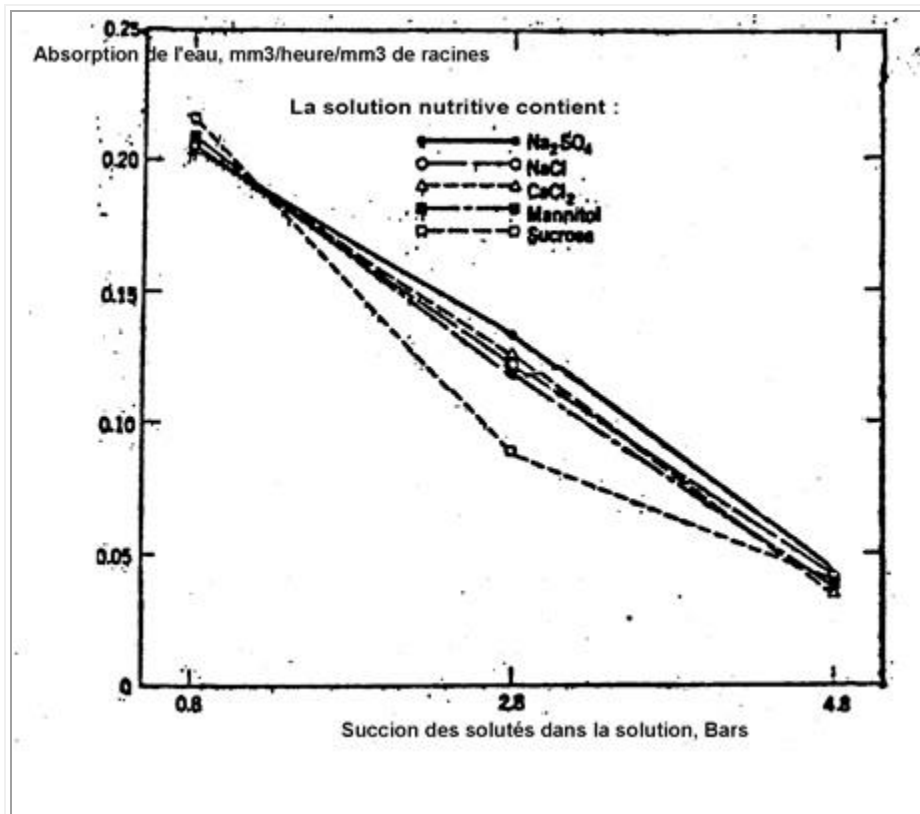


Figure n° 34 : Vitesse d'absorption de l'eau par des racines de maïs en fonction de la succion de la solution nutritive contenant différents solutés (Hayward and Spurr, 1944).

Plusieurs auteurs ont rapporté qu'au-dessus d'une certaine concentration, une concentration croissante en sels produit une diminution dans la croissance. La relation entre la réduction de la croissance pour une douzaine de plantes cultivées et la diminution du potentiel osmotique de la solution du sol (-0,4 et -4,5 bars) était pratiquement linéaire.

Théorie d'absorption de sels (effet spécifique)

La validité de la théorie de la disponibilité d'eau a été remise en question du fait qu'admettre que les plantes agissent comme un osmomètre parfait est très simpliste. Il a été, depuis longtemps, avancé qu'aussi bien dans les racines que dans les parties aériennes, l'absorption des sels s'adapte aux pressions osmotiques des solutions.

Slatyer (1961) a trouvé que des plantes de tomate dans une solution nutritive à laquelle on a ajouté du KNO₃, du NaCl ou du sucrose en plus pour diminuer le potentiel osmotique entre -5 et -10 bars ont regagné leur turgescence après 28 heures d'exposition à la salinité (fig.35).

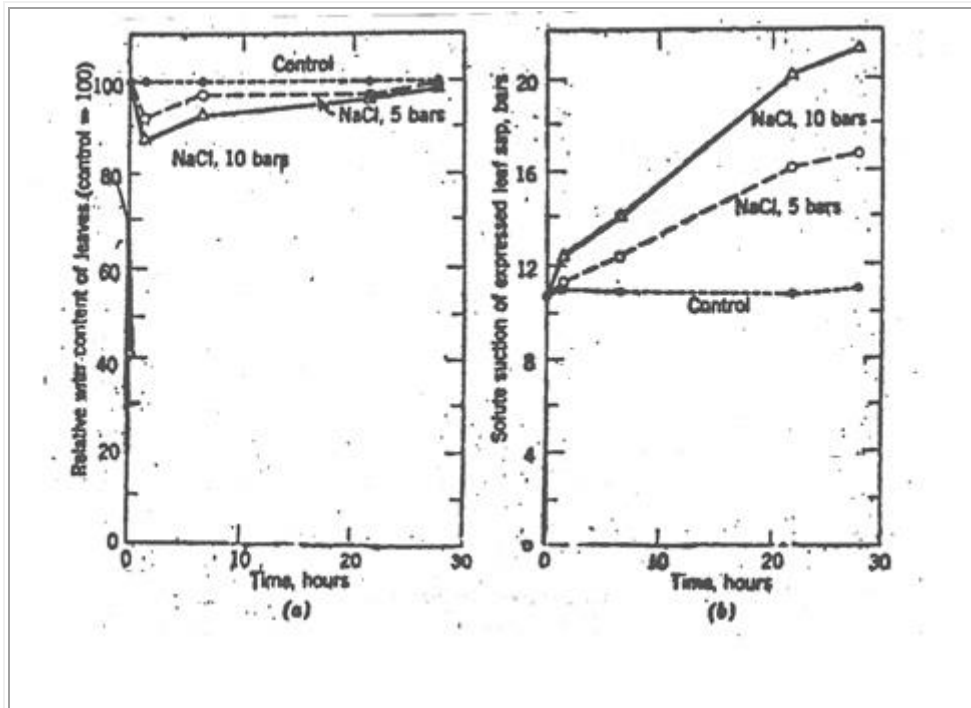


Figure n° 35: (a) Teneur des feuilles en eau et (b) suction de solutés de sève extraite des feuilles de tomate à différents moments après leur transfert d'une solution nutritive à suction 0.7 bars vers d'autres solution à succions augmentées à 5 ou 10 bars par additon de NaCl (Slatyer, 1961).

Gauch and Wadleigh (1944) ont ajouté des sels différents (NaCl, CaCl₂, Na₂SO₄, MgCl₂ et MgSO₄) à une solution nutritive tels qu'ils produisent les mêmes potentiels osmotiques (Tableau n° 8)

Tableau n° 8 : Quantités de sels (en milliéquivalents) ajoutées à la solution nutritive pour obtenir les pressions osmotiques indiquées (Gauch and Wadleigh, 1944).

Sels utilisés	Pression osmotique objectif (atm.)					
	1.5		2.5	3.5	4.5	
	Quantité de sel apportée (méq/l)	Condcutivité électrique résultante (dS/m)	Quantité de sel apportée (méq/l)	Quantité de sel apportée (méq/l)	Quantité de sel apportée (méq/l)	Condcutivité électrique résultante (dS/m)
Na ₂ SO ₄	39	3.4	78	117	156	12.75
NaCl	24	2.8	48	72	96	10.25
CaCl ₂	32	3.6	64	96	128	13.5
MgCl ₂	34	3.6	68	102	136	13.5
MgSO ₄	70	4.0	144	225	312	14.25

Bien que les pressions osmotiques obtenues sont les mêmes pour différents sels, ces derniers ont entraîné des réductions variables du rendement du haricot (fig. 36). Si la plante avait répondu strictement au potentiel osmotique alors les rendements devaient être les mêmes pour les mêmes potentiels indépendamment de la nature des sels.

Par contre, les rendements sont plus liés à la concentration totale des sels ou conductivité électrique de la solution qu'au potentiel osmotique (Tab.8).

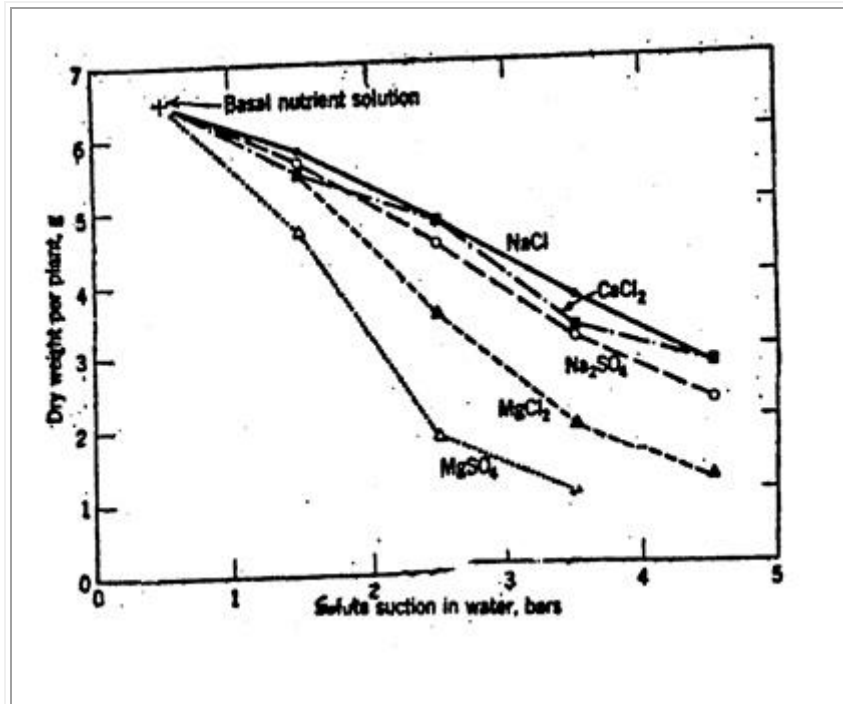


Figure n° 36 : Rendement de haricot en fonction de la succion de soluté dans une solution nutritive avec ou sans addition de différents sels selon le tableau précédent (Gauch and Wadleigh, 1944).

Nutrition en ions essentiels déséquilibrée :

Des concentrations élevées d'un sel ajoutées à une solution nutritive équilibrée peuvent causer un déséquilibre nutritionnel ou une déficience spécifique. La figure n° 36 et le tableau n° 8 montrent une réduction du rendement élevée dans le cas de MgCl₂ et MgSO₄ : Toxicité due à Mg ou déficience de Ca due à un excès de Mg.

Ions toxiques :

Quelques ions causent des symptômes visibles liés à l'accumulation de ces ions dans la plante et qui ne sont pas liés nécessairement à une réduction générale de la croissance ou au déséquilibre ionique". On note les plus répandus ; le bore, le chlore et le sodium échangeable.

f) Bilan de salinité et besoin en lessivage

On peut dire que pour un apport d'une quantité d'eau (Q_i) ayant une conductivité électrique, CE_i , la vitesse de salinisation est hautement dépendante de la quantité d'eau de drainage déplacée vers le bas du profil (Q_d). Ceci devient clair si on considère les situations où $Q_d = 0$ (stagnation d'eau superficielle ou présence de couche du sous-sol imperméable) ou $Q_d < 0$ (remontée capillaire de l'eau). Dans ces cas, la vitesse de salinisation (ΔCE_{PS}) est nettement élevée.

Cette équation montre aussi que CE_d est importante, mais elle ne peut pas être mesurée facilement. De plus, elle augmente au fur et à mesure que la salinisation progresse, car l'eau de drainage peut être considérée, en première approximation, comme la solution du sol à une humidité juste au-dessus de la capacité au champ :

$$CE_d \approx CE_{HCC}$$

Considérant cette égalité valable, la salinisation va atteindre un équilibre aussitôt que :

$$CE_{HCC} \approx CE_d = \frac{Q_i}{Q_d} * CE_i$$

qui provient de la substitution de (2) dans (1) avec (ΔCE_{PS}) = 0. Car à l'équilibre c'est à dire qu'il n'y a pas de salinisation du sol, on a $CE_d * Q_d = Q_i * CE_i$

et la salinité aura atteint un niveau constant de :

$$CE_{PS} = \frac{HCC}{PS} * CE_{HCC} \approx \frac{HCC}{PS} * \frac{Q_i}{Q_d} * CE_i$$

Cette équation peut être utilisée pour calculer la quantité d'eau d'irrigation (Q_d) qu'il faut apporter en plus de l'eau qui sera consommée par la plante ($Q_c - Q_p$) (Q_c : eau consommée et Q_p : précipitations) afin de maintenir la salinité du sol au-dessous d'une conductivité électrique (CE_e) déterminée. Cette CE_e dépend de la tolérance de la culture en question à la salinité.

En pratique cette quantité d'eau en excès est souvent exprimée en terme de fraction de la quantité totale d'eau d'irrigation nécessaire et est appelée : Leaching requirement, LR (Besoin en lessivage). Elle est calculée à partir de l'équation:

$$LR = \frac{Q_d}{Q_i} \approx \frac{HCC * CE_i}{PS * CE_{ps}}$$

En supposant une distribution de l'eau d'irrigation sans pertes dues au ruissellement, le besoin en eau est :

$$Q_i = Q_{ET} + Q_d$$

$$Q_i = Q_{ET} + LR \times Q_i$$

et donc
$$Q_i = \frac{Q_{ET}}{1 - LR}$$

En résumé et de plus simple, on pourrait raisonner comme suit ;

Bilan de salinité du sol suite à des apports (pluies, irrigation) en eau sur le sol serait :

$$\text{Apports} - \text{Pertes} = \Delta Ms \text{ (variation de la masse de sel dans le sol)}$$

Apports:

- apports par précipitations : $Pe Cp$
- apports par irrigation : $Ir Ci$
- apports par remontées capillaires : $G Cg$
- apports par dissolution : Md
- apports par l'agriculture : Ma

Pertes:

- pertes par percolation : $D Cd$
- prélèvements par les végétaux : Mv
- adsorption ou précipitation : Mp

$$\text{On a donc } \Delta Ms = Pe Cp + Ir Ci + G Cg + Md + Ma - D Cd - Mv - Mp$$

Hypothèses fréquentes:

$$Cp = 0 \quad Md = 0 \quad Ma = 0 \quad Mv = 0 \quad Mp = 0$$

$$\text{Et finalement } \Delta Ms = Ir Ci + G Cg - D Cd$$

La quantité d'eau d'irrigation pour assurer les besoins en eau des végétaux et le lessivage du sol est déterminée comme suit.

L'équation approchée du bilan de salinité est :

$$\Delta Ms = Ir Ci + G Cg - D Cd$$

Pour prévenir une accumulation de sel, on doit avoir: $\Delta Ms = 0$

$$\text{Et } Ir Ci = D Cd - G Cg$$

Cas d'une nappe profonde: $G = 0$: Donc $Ir Ci = D Cd$

Si Cd ne doit pas dépasser une valeur maximale Cs donnée:

D'où $Ir Ci = D Cs$ soit : $LR = D / Ir = Ci / Cs$

Or (équation du bilan hydrique sur une période prolongée):

$$D = Pe + Ir - ETP$$

$$Ir Ci = (Pe + Ir - ETP) Cs \quad \text{ou: } Ir = (ETP - Pe) Cs / Cs - Ci$$

La quantité d'eau d'irrigation en excès ne doit pas dépasser la capacité de drainage du sol. Mis à part le problème de disponibilité d'eau à apporter en excès, cette capacité de drainage constitue souvent le facteur limitant à l'apport d'excès d'eau pour deux raisons :

- Faible drainages, du à une couche imperméable dans le profil ou sous-sol : L'amélioration peut être réalisée par des mesures chimiques (gypse par exemple) ou mécaniques (sous-solage).
- Nappe élevée : ce qui va nécessiter un drainage artificiel.

En fonction du temps et de la quantité, les pluies qui contribuent à une percolation profonde de l'eau, peut réduire significativement le besoin en lessivage de l'eau d'irrigation. Puisque les cultures sont sensibles à la salinité du sol plutôt qu'à celle de l'eau d'irrigation, si le sol reçoit de l'eau de pluie supplémentaire pour le lessivage, de l'eau d'irrigation à salinité plus élevée peut être utilisée sans que ça entraîne une perte de production.

Pour estimer le besoin en lessivage, on doit connaître la salinité de l'eau d'irrigation (CE_i) et la tolérance de la culture à la salinité (CE_c). La salinité de l'eau peut être obtenue à partir d'analyses au laboratoire et la CE_c peut être estimée à partir de données de tolérance de la culture à la salinité qui sont données par le tableau suivant. Ce tableau donne les niveaux critiques de salinité (CE_c) au dessus de laquelle on risque d'avoir une réduction du rendement. Pour une culture donnée, le besoin en lessivage peut être estimé à partir de l'équation suivante (Rhoades 1974; and Rhoades and Merrill 1976) :

$$LR = \frac{CE_i}{5 * (CE_c - EC_i)}$$

II - 2 Critères de dimensionnement en matière de drainage :

a) Profondeur de substratum imperméable

La nécessité d'installation d'un réseau de drainage est d'installation d'un réseau de drainage est souvent induite par présence d'une couche peu présence d'une couche peu perméable à relativement faible profondeur.

Si on place les drains dans cette couche de sol, leur efficacité sera bien sûr très réduite.

Il y a alors trois possibilités :

- Placer les drains au-dessus de la couche imperméable pour autant qu'une profondeur minimum de 1 m (par exemple) soit respectée.
- Placer les drains dans la couche imperméable avec un remblai poreux par-dessus
- Choisir un autre système de drainage.

b) Hauteur optimale de la nappe

Le ressuyage du sol qui reçoit les racines est indispensable pour obtenir un bon rendement. Une inondation permanente réduit l'aération du sol et conduit à un processus d'oxydation. Par contre un assainissement trop poussé devient néfaste car il demeure la quantité d'eau fournie aux plants par ascension capillaire.

Il y a donc, pour une plante donnée, un niveau optionnel de nappe lui permettant un meilleur développement.

Dans les sols inondés présentant une nappe à faible (< 2m) profondeur, il existe en principe une profondeur de rabattement de la nappe assurant un rendement optimal pour une culture donnée (fig. 37).

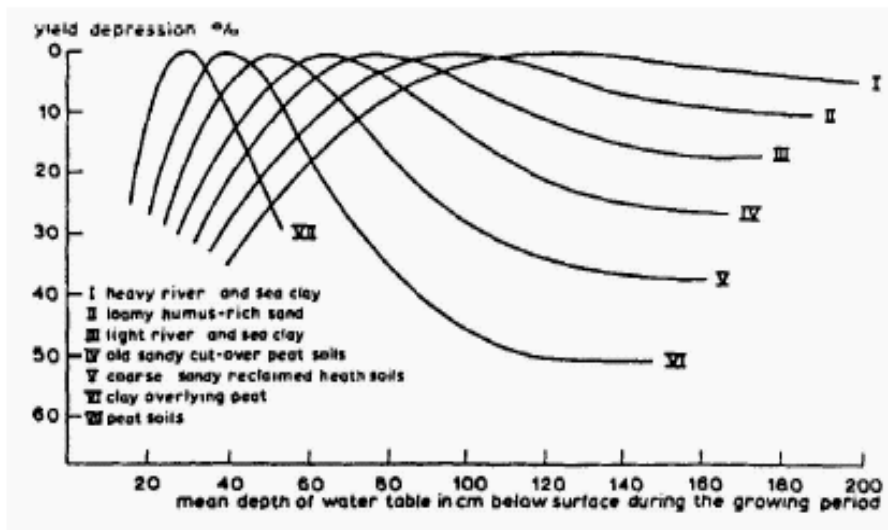


Figure n° 37: Effet de la profondeur de la nappe pendant la saison de culture sur la baisse de rendement par rapport à l'optimum pour différents types de sol (d'après Visser, 1958).

Cette profondeur optimale résulte de l'interaction entre un certain nombre de facteurs influençant la croissance des plantes (aération des sols, disponibilité en eau et en éléments nutritifs, température du sol, etc.) et la possibilité de mettre en œuvre les pratiques agricoles requises au bon moment.

En général, l'optimum sera plus bas pour des sols à texture plus fine, ou lorsque la fréquence des pluies / des irrigations est plus élevée. Il dépendra par ailleurs dans une certaine mesure de la profondeur d'enracinement des cultures, et donc du stade phénologique de celle-ci.

En pratique, il est cependant difficile de maintenir une nappe à un niveau constant du fait de l'hétérogénéité des sols et des variations dans les conditions climatiques qui vont influencer la pluie et l'évapotranspiration. A titre indicatif, le tableau n° 9 renseigne sur la profondeur optimale de la nappe en fonction du type de sol et de culture.

Tableau n° 9: Valeur optimale de la profondeur de la nappe phréatique en fonction du type de sol et de culture en Hongrie (Musy, 1972)

Type de plantes	Type de sol	Profondeur optimale de la nappe (cm)
Plantes à enracinement peu profond (prairie, trèfle, légumes)	sol meuble	50-70
	sol moyennement compact	70-100
	sol compact	80-120
plantes à enracinement moyen (pomme de terre, maïs, blé, ...)	sol meuble	60-65
	sol moyennement compact	85-115
	sol compact	95-125
plantes à enracinement profond (betteraves, tournesol, luzerne, sorgho, ...)	sol meuble	70-95
	sol moyennement compact	80-120
	sol compact	95-135
Vignes, arbres fruitiers, etc.	sol meuble	150-210
	sol moyennement compact	190-260
	sol compact	210-270

c) Durée de submersion admissible

Il suffit de quelques heures de submersion pour que la teneur en oxygène dans la rhizosphère tombe en dessous du seuil critique et l'impact sur les racines sera d'autant plus élevé que la température est élevée.

Dans le cas du maïs, on a observé que la croissance des racines était complètement arrêtée après 24h dans un sol saturé.

Après trois jours, on a observé des réductions irréversibles de la masse racinaire, de la profondeur d'enracinement et de la consommation d'eau par la culture.

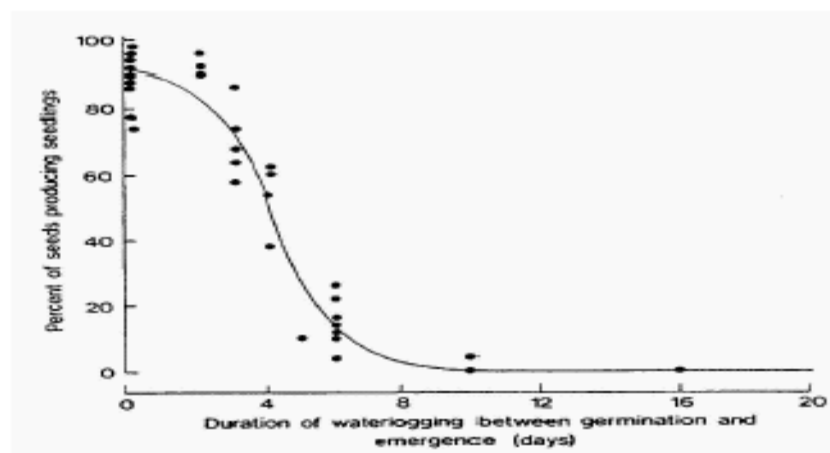


Figure n° 38 : Impact de la durée de submersion sur la germination de semences de froment d'hiver(Cannell et Belford, 1982).

Les symptômes les plus fréquents liés à de mauvaises conditions d'aération sont le flétrissement, le dessèchement, la chlorose, la sénescence prématurée, la chute de feuilles.

Ces symptômes sont liés à l'accroissement de la résistance de l'écoulement de l'eau dans les racines, à des réponses de type hormonales et à des déficiences nutritionnelles.

Le manque d'oxygène peut entraîner la fermeture des stomates et donc affecter l'activité métabolique des plantes.

La durée de submersion acceptable est fixée en fonction des limites de submersion admises pour chaque plante.

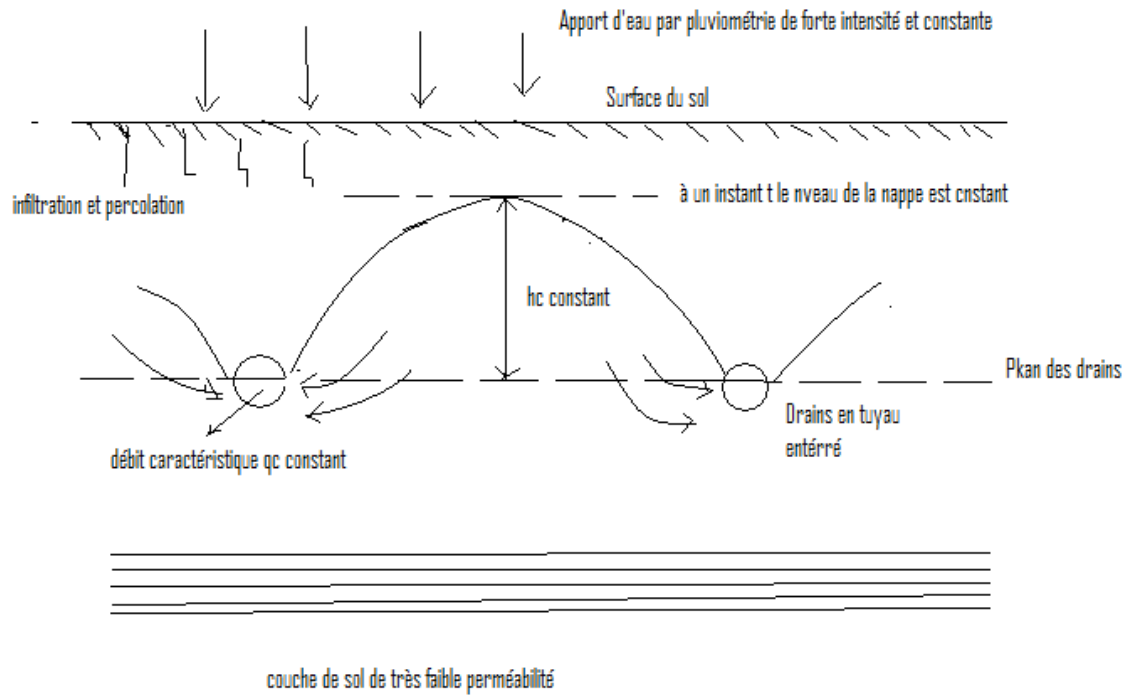
La durée de submersion ne sera dépassée en moyenne qu'une fois pendant la période de retour qui pourra être de 1an, 5 ans ou 10 ans.

A titre d'exemple le tableau n° 10: montre la baisse de rendement ou de productivité (%) pour différentes cultures suite à une submersion de 3, 7, 11 ou 15 jours à différentes périodes de l'année (Musy A., 1972).

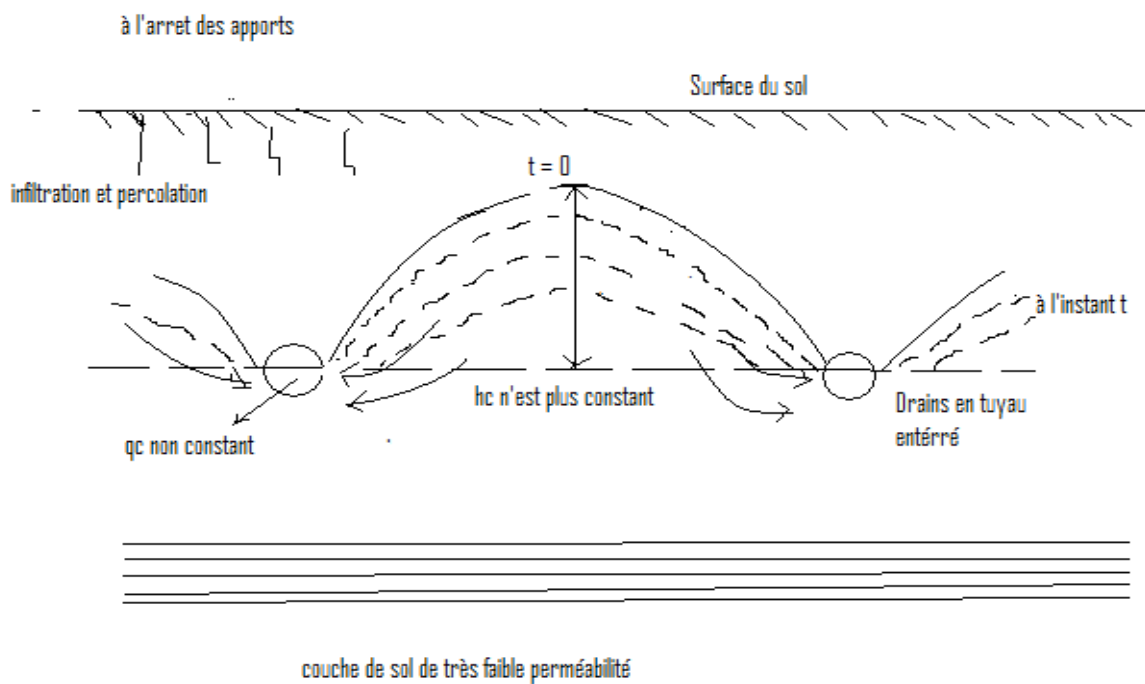
Durée de submersion	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Pâturages												
3	0	0	0	10	10	10	10	10	10	0	0	0
7	0	0	10	25	30	40	40	30	30	10	0	0
11	5	5	20	40	50	70	70	50	50	20	5	5
15	10	10	30	60	100	100	100	80	70	30	10	10
Betteraves sucrières												
3	/	/	10	10	10	10	10	10	10	0	/	/
7	/	/	50	50	50	40	40	40	40	10	/	/
11	/	/	100	90	90	90	90	90	90	30	/	/
15	/	/	100	100	100	100	100	100	100	50	/	/
Pomme de terre												
3	/	/	30	30	40	50	50	50	20	/	/	/
7	/	/	80	80	90	100	100	100	40	/	/	/
11	/	/	100	100	100	100	100	100	60	/	/	/
15	/	/	100	100	100	100	100	100	80	/	/	/
Blé d'hiver												
3	0	0	5	10	20	20	0	/	/	0	0	0
7	5	5	15	25	40	50	0	/	/	5	5	5
11	10	10	30	40	70	80	10	/	/	10	10	10
15	15	20	50	70	100	100	20	/	/	20	20	20
Blé de printemps												
3	/	/	10	15	15	20	0	/	/	/	/	/
7	/	/	20	40	50	50	0	/	/	/	/	/
11	/	/	40	75	75	75	10	/	/	/	/	/
15	/	/	100	100	100	100	20	/	/	/	/	/
Maïs												
3	/	/	/	20	10	10	0	0	0	0	/	/
7	/	/	/	80	50	40	10	10	10	0	/	/
11	/	/	/	100	80	75	50	40	20	10	/	/
15	/	/	/	100	100	100	80	60	30	10	/	/

d) Régime d'évacuation des eaux

Soit un sol équipé d'un réseau de drainage souterrain (fig. 39a et 39b) avec un mécanisme classique de développement d'une nappe.



a) Instauration du régime d'écoulement permanent.



b) Régime d'écoulement variable

Figure n° 39: Régime d'écoulement de l'eau de la surface du sol vers le voisinage des drains.

Soit une pluie d'intensité I (en mm/j), supposons que cette pluie dure plusieurs jours d'affilée à intensité constante (fig. 39a).

L'eau apportée s'infiltré en principe dans le sol, un front d'humidification se développe, finit par atteindre l'horizon imperméable, la nappe se forme et « monte » vers la surface au fur et à mesure des apports.

A un moment donné, la nappe atteint et dépasse le niveau des drains, l'écoulement dans les tuyaux démarre, le drainage est amorcé.

L'écoulement vers les drains se produit avec une perte de charge, d'où la forme concave (tournée vers le bas) adoptée par la surface libre de la nappe.

Il est évident que la quantité d'eau évacuée dans les drains sera directement liée à la hauteur atteinte par la nappe au dessus des drains (la charge h au dessus des drains) puisque c'est cette dernière qui constitue la force motrice de l'écoulement. Ainsi tant que le volume d'eau fourni à la nappe (pluie infiltrée) demeure supérieure au volume d'eau évacué dans les drains, la nappe constitue de « grimper ».

Il est probable, qu'à un moment donné le régime des apports sera compensé exactement par le régime d'évacuation, à ce moment le nouveau de la nappe ne bouge plus, le débit évacué par les drains demeure constant, un régime permanent s'est établi.

Ce régime durera tant que les apports se poursuivront à la même cadence. Si la pluie s'arrête, la nappe n'est plus alimentée, elle continue, cependant à alimenter les drains en « épuisant » la charge h acquise, elle s'abaisse progressivement. Le régime correspondant est variable (ou transitoire) car la charge h et le débit q évacué varient à chaque instant (fig.39b).

Il est rare de rencontrer dans la réalité le régime permanent. On peut rencontrer parfois ce genre de situation dans des régions à climat très humide avec pluies d'intensité plus moins constante plusieurs jours.

Dans la plupart des cas le régime effectif d'écoulement est du type variable. L'hypothèse du régime permanent est plutôt pour le calcul.

Le fait de pouvoir considérer h et q constant dans le temps, permet en effet de développer des équations relativement simples lorsque l'on décrit mathématiquement l'écoulement vers les drains.

