

# CHAPITRE 4: Conception du système

## ***INTRODUCTION***

---

La conception technique est le second stade de la planification de l'irrigation, le premier stade concernant les besoins en eau des cultures, les types de sol, le climat, la qualité de l'eau et le programme d'irrigation. Les conditions d'approvisionnement en eau, l'électricité disponible et la topographie du terrain doivent également être considérées, de même que les considérations économiques, les disponibilités en main-d'œuvre et le niveau de compétence. Le système d'irrigation est sélectionné après une évaluation approfondie des données ci-dessus et un processus de calcul détaillé, intégrant les débits dans le système, la dose d'irrigation, la durée d'application et le programme d'irrigation.

Une fois la conception achevée, une liste détaillée de tous les équipements requis pour la mise en place du système est préparée avec des descriptions complètes, les normes et les spécifications de chaque élément.

## ***CONCEPTION DU SYSTÈME***

---

La procédure de conception hydraulique et technique est presque la même pour tous les types de systèmes d'irrigation sous pression. Il s'agit d'une série de calculs intrinsèquement liés, dont les différents stades sont résumés ci-dessous.

**Sélection du distributeur d'eau** (asperseur, goutteur, mini-asperseur, barboteur, tuyau, etc.) en fonction de la culture à irriguer, des méthodes d'irrigation et des besoins en eau:

- type, débit, pression de service, diamètre de couverture;
- espacement et nombre de distributeurs par ligne latérale.

## ***CONCEPTION DES CONDUITES LATÉRALES***

---

- longueur, direction, espacement et nombre total de lignes latérales (dans les systèmes fixes) ou positions des conduites latérales (dans les systèmes semi-permanents);
- débit dans la conduite latérale: nombre de distributeurs par conduite x débit du distributeur;

- nombre de conduites latérales fonctionnant simultanément = débit du système/débit de la conduite latérale;
- nombre de tours pour réaliser une irrigation = nombre total de lignes latérales ou positions ÷ nombre de conduites latérales fonctionnant simultanément;
- durée d'application = dose d'irrigation en mm ÷ taux d'application en millimètres par heure; ou dose d'irrigation en mètres cubes par heure ÷ débit du système en mètres cubes par heure.

## **CONCEPTION DES CONDUITES**

---

### **Les conduites latérales**

Il est important de comprendre les fonctions et les principes de fonctionnement des distributeurs d'eau avant de commencer le processus de conception. L'une des principales caractéristiques de tous les types de distributeurs est la relation entre le débit et la pression de fonctionnement, habituellement exprimée par la formule empirique:

$$q = kdH^*$$

où  $q$  est le débit du distributeur;  $k$  et  $d$  sont des coefficients (constantes),  $H$  est la pression au niveau du distributeur et  $*$  est un exposant caractérisé par le régime d'écoulement dans le distributeur et la courbe de variation du débit en fonction de la pression.

Plus la valeur de  $*$  est basse, plus l'influence des variations de pression sur le débit du distributeur le long de la conduite latérale est faible. La plupart des régimes d'écoulement des distributeurs sont entièrement turbulents, avec une valeur d'exposant égale à 0,5. Ainsi la variation de débit est la moitié de la variation de pression, lorsque le ratio de deux pressions différentes est  $< 1,3/1$ .

Afin d'assurer une bonne uniformité de l'application d'eau au niveau du champ, les variations de débit des distributeurs doivent être minimales, et en aucun cas supérieures à 10 pour cent. Ce critère a été établi par J. Christiansen pour les asperseurs, mais est actuellement appliqué à tous les systèmes sous pression. En règle générale, la différence de pression maximale admise entre deux distributeurs qui fonctionnent ne doit pas être supérieure à 20 pour cent. Les conduites latérales avec distributeurs doivent être dimensionnées de manière à ce que la perte de charge (pression) due au frottement dans la conduite latérale ne dépasse pas 20 pour cent.

La perte de charge due au frottement dans les conduites latérales est fournie par un graphique ou un tableau. La valeur donnée indique normalement une perte de charge en mètres ou pieds par 10 mètres ou 100

pieds de conduites. Par exemple, pour une conduite latérale d'asperseurs à raccord rapide de 50 mm de diamètre transitant un débit de 15 m<sup>3</sup>/h, les pertes de charge sont de 7 pour cent. Pour une conduite latérale de 120 m, les pertes de charge sont de  $7/100 \times 120 = 8,4$  m. Mais cette perte correspond à un débit total de 15 m<sup>3</sup>/h parcourant la totalité des 120 m de la conduite latérale. Cela ne correspond donc pas à la réalité car le débit diminue en route après chaque distributeur. Afin de prendre en compte les pertes de charge réelles, la valeur ci-dessus est multipliée par F, le coefficient de réduction de Christiansen, pour compenser les débits distribués en route par la conduite latérale. Les valeurs de F dépendent du nombre de distributeurs uniformément répartis le long de la conduite (tableau 4.1).

Trois différentes séries de valeurs de F existent, correspondant à l'exposant (m) de la valeur de Q, qui varie dans les formules de Hazen Williams (1,85), Scobey (1,9) et Darcy Weisbach (2). En outre, on prend les valeurs les plus basses si la distance de la première sortie équivaut à la moitié de l'espacement des distributeurs. Les différences entre les diverses valeurs de F sont toutefois quasi-négligeables.

TABLEAU 4.1 - Valeurs de F pour des sorties multiples

Nombre de sorties	F (m = 2)	Nombre de sorties	F (m = 2)
1	1,0	12	0,376
2	0,62	15	0,367
3	0,52	20	0,360
4	0,47	24	0,355
5	0,44	28	0,351
6	0,42	30	0,350
7	0,41	40	0,345
8	0,40	50	0,343
9	0,39	100	0,338
10	0,385	>	0,333

En supposant qu'il y ait dans l'exemple ci-dessus dix distributeurs (asperseurs en l'occurrence) sur la conduite latérale, la valeur de F est de 0,4. Ainsi, pour une conduite latérale à raccord rapide de 50 mm de diamètre transitant un débit de 15 m<sup>3</sup>/h, avec 10 asperseurs distribuant 1,5 m<sup>3</sup>/h avec une pression de 2 bars, les pertes de charge sont de  $7/100 \times 120 \times 0,4 = 3,36$  m. Cette valeur ne doit pas excéder le maximum autorisé, qui est de 20 pour cent de la pression moyenne de fonctionnement de l'asperseur, c'est-à-dire  $2 \text{ bars} \times 0,20 = 0,4$  bar, soit 4 m sur terrain plat. Lorsque la conduite latérale est en pente descendante, la différence de niveau s'additionne à la perte de pression maximale admissible. A l'inverse, en cas de montée, la différence de niveau est déduite.

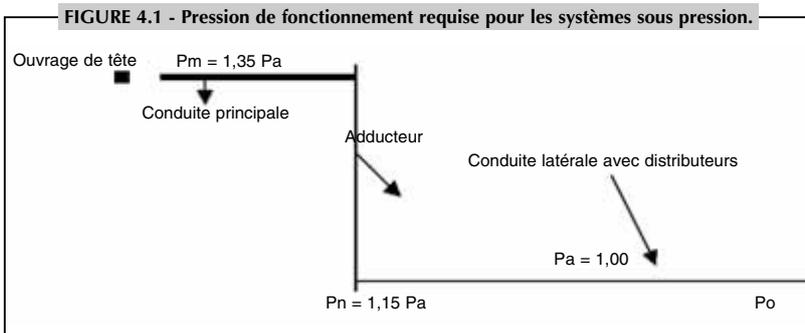
En raison de la multiplicité des distributeurs avec des régimes de débit variables et des autres facteurs affectant le rapport pression/débit le long des conduites latérales dans les champs, telles les pertes minimales de

charge locales qui se produisent à la jonction des distributeurs sur les tuyaux de faibles dimensions, ainsi que les fluctuations de température, le fournisseur est toujours tenu de fournir des barèmes pour la longueur optimale des conduites latérales avec distributeurs, basés sur le diamètre de la conduite latérale, l'espacement des distributeurs, la pression de fonctionnement, le débit et la pente du terrain.

### Les adducteurs, conduites principales et secondaires

À partir des adducteurs, qui peuvent également être des conduites principales ou secondaires, plusieurs rampes latérales peuvent être alimentées simultanément. Le débit sur ces conduites est distribué en route, comme sur les rampes portant des distributeurs. Par conséquent, lorsque l'on détermine les pertes de charge dues au frottement, il faut également appliquer le coefficient de réduction  $F$  de Christiansen. Exemple: adducteur de 120 m en tube de PEHD de 75 mm, 6 bars, 16,3 m<sup>3</sup>/h, 6 rampes latérales fonctionnant simultanément: la perte de charge à plein débit est de 3,3 pour cent, soit  $4 \text{ m} \times 0,42 = 1,7 \text{ m}$  environ.

Les conduites principales et secondaires et toutes les bornes sont dimensionnées de telle façon que les pertes de charge n'excèdent pas environ 15 pour cent de la charge dynamique totale requise à la tête du réseau de conduites. Sur terrain plat, ces pertes de charge s'élèvent à environ 20 pour cent de la pression de fonctionnement fixée pour les distributeurs. Il s'agit d'une règle pratique pour tous les réseaux de conduites sous pression pour obtenir des conditions de pression et de distribution de l'eau uniformes en tous points du système. La figure 4.1 ci-dessous ne doit pas être confondue ou associée d'aucune façon avec la perte de charge maximale autorisée le long des rampes latérales.



Dans la figure ci-dessus,  $P_a$  est la pression moyenne au distributeur ou la pression fixe relevée dans le catalogue;  $P_n$  est la pression en tête de la

conduite latérale;  $P_o = 0,95$ .  $P_a$  est la pression au sortir du distributeur et  $P_m$  est la pression à l'entrée de la conduite principale. En résumé:

$$\begin{aligned} P_n - P_o &= 0,20 \text{ Pa;} \\ P_o &= P_n \div 1,21; \\ P_n &= 1,15 \text{ Pa;} \\ P_m &= 1,35 \text{ Pa.} \end{aligned}$$

La perte de charge dans une rampe avec distributeurs est très élevée au début et chute rapidement après les premiers distributeurs, puis diminue graduellement vers la fin de la rampe. Dans le quart amont de la rampe, la perte de charge est d'environ 75 pour cent de la charge totale. Un autre élément important est la vitesse de l'écoulement dans les conduites principales et secondaires ainsi que dans les bornes, qui doit toujours être maintenue en-dessous de 1,7 m/s dans les tubes en plastique et à 2 m/s maximum dans les autres tuyaux (aluminium, acier, etc.). De la formule du débit  $V = Q/A$ , le diamètre intérieur du tube peut être déterminé pour un débit donné:

$$\text{diamètre}(mm) = \sqrt{\frac{Q(m^3/h)}{V(m/s)}} \times 18.8$$

## **OUVRAGE DE TÊTE**

Les composantes de l'ouvrage de tête et leurs dimensions sont sélectionnées en fonction des besoins du système. Dans les systèmes de micro-irrigation, les ouvrages de tête sont munis de filtres et d'injecteurs de fertilisants, alors qu'en aspersion et en irrigation par tuyaux (gainés), ces ouvrages sont simples avec un équipement minimal. Les pertes de charge dans les diverses composantes de l'ouvrage peuvent varier de 3 à 10 m.

Les formules de perte de charge sont empiriques et incluent de nombreuses variables et facteurs correctifs. Pour calculer à partir d'équations les pertes de charge dues au frottement dans les conduites, une grande expérience pratique est nécessaire. L'utilisation de tableaux et nomogrammes est recommandée pour le calcul des pertes de charge, car il n'est pas possible d'atteindre une grande précision en raison des modifications imprévisibles dans la rugosité des conduites, la viscosité de l'eau, l'usure et l'obstruction des buses, etc.

## **CHARGE DYNAMIQUE TOTALE DU SYSTÈME**

La charge dynamique totale requise pour le fonctionnement normal du système est la somme des pressions suivantes (tableau 4.2):

**TABLEAU 4.2 - Charge dynamique totale du système**

Pression au distributeur	mètres
Pertes de charge dans la conduite latérale (rampe)	mètres
Pertes de charge dans l'adducteur	mètres
Pertes de charge dans les conduites principales et secondaires	mètres
Pertes de charge dans les vannes, raccords et petites pertes diverses (normalement jusqu'à 15 pour cent des pertes totales dans les conduites)	mètres
Différence d'altitude (en + ou en -)	mètres
Pertes de charge dans l'ouvrage de tête	mètres
<b>Charge totale dans le système</b>	<b>mètres</b>

### **CHARGE DYNAMIQUE TOTALE DE L'UNITÉ DE POMPAGE**

Cette charge est la somme de la charge totale dans le système plus la hauteur de pompage. La formule de la puissance au frein est:

$$BHP = \frac{Q \times TDH}{270 \times e1 \times e2}$$

où **Q** est le débit en mètres cubes par heure, **TDH** est la charge dynamique totale en mètres, **e1** est l'efficacité de la pompe (fraction), **e2** est l'efficacité du moteur (fraction) et 270 est une constante pour les unités métriques.

- efficacité de la pompe: 0,5 – 0,8;
- efficacité d'un moteur électrique: 0,7 – 0,9;
- efficacité d'un moteur diesel: 0,5 – 0,75.

L'efficacité globale du pompage dans les conditions du terrain est comprise respectivement entre 0,35 pour les unités diesel et 0,50 pour les unités électriques. Il ne serait pas réaliste d'adopter des efficacités plus élevées.

## CHAPITRE 5: Description, normes et appels d'offres pour l'approvisionnement de l'équipement

Pour finaliser la conception du système, une liste de l'ensemble de l'équipement requis pour son installation (devis quantitatif) doit être établie avec les descriptions complètes, normes et spécifications de chaque élément. La préparation de cette liste est très importante. En plus des quantités, il est impératif de déterminer et de spécifier:

- les dimensions et noms de l'élément (vanne à boisseau sphérique de 2 pouces, conduite de 50 mm de diamètre, etc.);
- le type de matériau (laiton, uPVC, etc.);
- la pression nominale (PN 16 bars, 6 bars, etc.);
- le type de raccords et joints (à vis, soudés à la colle, etc.);
- les normes (conformes à ISO 161, 3606, BS 21, ISO 7, etc.).

Trois listes différentes seront établies: une pour les conduites principales, les conduites secondaires, les adducteurs et les bornes; une pour les conduites latérales et les distributeurs, et une pour l'ouvrage de tête. Les dimensions auront été fixées à l'étape de la conception.

### ***PRESSION DE SERVICE DE L'ÉQUIPEMENT***

---

L'installation d'un système fermé de conduites sous pression comprend des conduites soumises à diverses pressions de service selon leur implantation. Les conduites principales, soumises à de plus fortes pressions que les conduites secondaires, adducteurs et conduites latérales, doivent être plus résistantes que les autres types. La pression nominale des conduites à installer sera toujours supérieure à la pression de fonctionnement du réseau. Par exemple dans un réseau de micro-jets (mini-asperseurs), la pression approximative de fonctionnement est de 2,3 à 2,5 bars dans les conduites latérales, 2,5 à 2,7 bars dans les adducteurs et 2,7 à 3 bars dans les conduites principales. On pourrait penser qu'une pression nominale de 4,0 bars pour les conduites pourrait convenir aux besoins du réseau. Toutefois, bien que les systèmes à basse et moyenne pressions ne soient pas soumis aux très hautes surpressions provoquées par les coups de bélier, il est conseillé de prendre des conduites principales résistant à 6 bars, et à 4 bars pour les autres conduites.

### **CONDUITES PRINCIPALES, CONDUITES SECONDAIRES, ADDUCTEURS ET BORNES**

---

Les types de tuyaux les plus couramment utilisés pour ces conduites sont le PVC rigide, le PEHD, le PEFD et l'acier léger ou l'aluminium pour les tuyaux à raccords rapides. Il faut déterminer les éléments suivants:

- les longueurs totales et le nombre d'éléments des conduites (ajouter environ 5 pour cent au total);
- la quantité de raccords de conduite (coudes, tés, bouchons, réducteurs, etc.) du même type à utiliser avec les conduites ci-dessus;
- le nombre de coudes, tés, colliers de prise en charge nécessitant deux types de raccord différents, par exemple té de 90 mm x 90 mm x 2 pouces (filetage intérieur), coude 110 mm x 3 pouces (avec bride);
- la quantité d'adaptateurs (raccords de démarrage). Ces accessoires ont une extrémité fileté (ou bridée) tandis que l'autre est adaptée aux types de connection des conduits. Ils sont utilisés au départ des conduites et partout où des vannes sont installées;
- le nombre de vannes de sectionnement et de purgeurs d'air nécessaires sur le réseau de distribution. Les purgeurs d'air sont montés sur des tubes de rallonge branchés sur les conduites principales avec des colliers de prise en charge;
- les quantités de tubes de rallonge pour les bornes, si les conduites sont souterraines et de vannes de contrôle ou de vannes spéciales de bornes. Si les conduites principales ne sont pas enterrées, il faut déterminer les accessoires nécessaires pour connecter les colliers de prise en charge avec les vannes de sectionnement. Il doit y avoir le même nombre d'accessoires que de bornes.

### **CONDUITES LATÉRALES**

---

Des tuyaux à raccords rapides et des tubes en PEFD sont utilisés comme conduites latérales en surface dans la plupart des systèmes. Il faut déterminer les caractéristiques suivantes:

- les longueurs totales de tuyaux requis et le nombre d'éléments;
- les quantités d'adaptateurs, tés, coudes, prises d'extrémités et filtres en ligne;
- le nombre total de distributeurs et, le cas échéant, leurs raccords, par exemple: mini-asperseur complet avec piston, tuyau flexible de raccord et coin en plastique; ou bien spécifier l'équipement nécessaire en termes d'ensemble, par exemple ensemble complet de mini-asperseur.

### **OUVRAGE DE TÊTE**

---

Toutes les composantes de l'ouvrage de tête du système doivent être déterminées, c'est-à-dire les vannes de sectionnement, la vanne de contrôle,

le purgeur d'air, l'injecteur d'engrais, les filtres, les régulateurs de pression, etc. En outre, tous les raccords auxiliaires doivent être inclus, tels que les éléments de conduites, gaines et raccords nécessaires pour assembler l'ouvrage, ainsi que les manomètres et les autres dispositifs mineurs requis.

## **UNITÉ DE POMPAGE**

---

Une description complète et détaillée de l'unité de pompage doit être donnée, incluant:

- la puissance (BHP) moyenne calculée de la force motrice et le type de moteur (diesel ou électrique);
- le type de pompe (centrifuge simple ou à étages, turbine, électro-submersible), les diamètres des entrées et sorties, et le type et nombre d'étages;
- la capacité et le débit de l'unité de pompage, c'est-à-dire la hauteur de refoulement dynamique et le débit d'eau fourni.

## **NORMES**

---

Les normes sont des documents élaborés par consensus par des groupes de travail et comités techniques pour définir les conditions mécaniques, fonctionnelles et autres auxquelles doivent satisfaire les équipements d'irrigation (qualité d'exécution, matériaux, dimensions, pressions, méthodes d'essai, fourniture et distribution). L'élaboration permanente de nouvelles normes répond au rythme accéléré du développement technologique dans le domaine des techniques d'irrigation sous pression. Certaines normes anciennes peuvent toutefois donner une indication des conditions fondamentales. Toutes les conduites, raccords et autres équipements d'irrigation sont fabriqués selon diverses normes appliquées dans les pays d'origine du matériel. Ces normes, bien qu'équivalentes les unes aux autres, varient en termes de mode de dimensionnement, de classification, de facteur de sécurité et de nomenclature. L'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) a déployé des efforts techniques considérables pour établir des normes et spécifications internationales, de manière à rendre conformes toutes les normes nationales et régionales.

Dans de nombreux pays, on a généralement tendance à adopter progressivement les normes européennes (NE) et à retirer les standards nationaux contradictoires. Les normes européennes sont préparées par le Comité technique du Comité européen de normalisation (CT/CEN) et la plupart des pays européens et le Royaume-Uni les reconnaissent comme normes nationales. Chaque norme européenne fait partie d'un système de normes basé sur les résultats des travaux entrepris par le Comité technique correspondant de l'ISO. Les systèmes de normes sont compatibles avec les normes générales concernant la fonction et l'installation et appuyés par des normes distinctes portant sur les méthodes d'essai, auxquelles il est fait

référence dans l'ensemble du système de normes. D'autres publications sont également proposées dans le cadre des normes européennes.

Cependant, la variété de normes pour les équipements d’irrigation en thermoplastique sème à l'heure actuelle la confusion chez les petits exploitants. Le tableau 5.1 ci-dessous montre l'exemple d’un tuyau en PVC rigide de 4 pouces de diamètre et 6 bars de pression de fonctionnement selon deux normes nationales différentes:

**TABLEAU 5.1 - Tuyau en PVC rigide de 4 pouces de diamètre (6 bars) selon deux normes nationales différentes**

Caractéristiques	Selon DIN 8062	Selon ASTM D2241(SDR 4.1)
Diamètre nominal (mm)	110,0 mm	4 inches
Diamètre extérieur (mm)	110,0 mm	114,3 mm
Diamètre intérieur (mm)	103,6 mm	108,7 mm
Épaisseur de parois (mm)	3,2 mm	2,8 mm
Pression nominale (bars)	6,0 bars	6.8 bars (100 psi)

La description de l’équipement doit être aussi simple et claire que possible. On donne ci-dessous un exemple des spécifications minimales requises pour deux éléments:

- Élément 1:** Tuyau noir en PEFD, PN 4 bars, conforme à la norme DIN 8072 ou une norme équivalente compatible avec la norme ISO, fourni en rouleaux de 200 m:
- a. 32 mm DN, 1 800 m;
  - b. 25 mm DN, 3 200 m.

- Élément 2:** Raccords en polypropylène fabriqués selon la norme ISO en dimensions métriques. Raccord rapide, extrémités mâle ou femelle, type à pression et /ou fileté (type à vis) selon la norme ISO 7 ou BS 21, pression PN 10 bars pour être utilisés avec les tuyaux PE suivants:
- a. adaptateur (mâle) 63 mm x 2 pouces, 7 unités;
  - b. collier de prise en charge (femelle) 63 mm x 2 pouces (femelle), 2 unités;
  - c. adaptateur (mâle) 50 mm x 2 pouces, 2 unités.

Si, pour diverses raisons, l’équipement ne se conformait à aucune norme, une description technique complète devrait mentionner le matériau constitutif, la pression de fonctionnement et son utilisation. Ce dernier élément est très important car les raccords doivent être réalisés avec le matériau recommandé pour un type de conduite particulière.

La majorité de l’équipement d’irrigation doit satisfaire les spécifications appropriées de matériau, dimensions et qualité recommandées dans le tableau 5.2.

TABLEAU 5.2 - Normes et spécifications de l'équipement

Code de la norme:	Nom de la norme:
ASAE EP419.1	Évaluation des systèmes d'irrigation par sillons (février 2003)
ASAE EP405.1	Conception et installation des systèmes de micro-irrigation (février 2003)
ANSI/ASAE S261.7	Conception et installation de systèmes d'irrigation avec conduites en béton non armé (décembre 2001)
ASAE S526.2	Terminologie des sols et des eaux (janvier 2001)
ASAE S491	Symboles graphiques pour la conception de systèmes d'irrigation sous pression (février 2003)
ANSI/ASAE S395	Norme de sécurité pour les systèmes d'irrigation autonomes à rampe mobile (février 2003)
BSR/ASAE S577-200x	Spécifications pour les raccords de conduites en PVC
ANSI/ASAE S376.2	Conception, installation et performances des conduites thermoplastiques souterraines d'irrigation (février 2004)
ANSI/ASAE S436.1	Méthodes d'essai pour la détermination de l'uniformité de la distribution d'eau des machines d'irrigation à pivot central et conduites latérales équipées de mini-diffuseurs et d'asperseurs (décembre 2001)
ANSI/ASAE S330.1	Procédures pour les essais de la distribution des asperseurs dans un but de recherche (février 2003)
ANSI/ASAE S539	Filtres pour l'irrigation: rapports d'essai et de performances (février 2003)
ASAE S447	Procédures d'expérimentation et d'établissement de rapports pour les pertes de charge dans les vannes d'irrigation (février 2003)
ANSI/ASAE S397.2	Service et matériel électriques pour l'irrigation (février 2003)
ASAE EP409.1	Dispositifs de sécurité pour la chimigation (février 2004)
ASAE S435	Tuyaux en polyéthylène utilisés pour les conduites latérales de micro-irrigation (février 2004)
ASAE S398.1	Procédures pour l'essai et l'établissement de rapports sur l'aspersion (janvier 2001)
ASAE EP367.2	Guide de procédure pour préparer la calibration des nébulisateurs de terrain (février 2003)
ASAE S327.2	Terminologie et définitions pour l'application des produits chimiques agricoles (février 2003)
ANSI/ASAE S553	Tuyaux distributeurs souples: Spécifications et essais de performances (mars 2001)
ASAE EP369.1	Projet de stations de pompage pour le drainage agricole (décembre 1999)
ASAE S561	Procédures pour mesurer les dépôts apportés des mini-diffuseurs au sol, en verger et aériens (février 2003)
ASAE EP400,2T	Projet et construction des puits pour l'irrigation (février 2003)
ASAE EP285.7	Utilisation du système métrique (janvier 2001)
ASAE S431.3	Signes de sécurité (février 1999)
ASAE S471 February 2003	Procédures de mesure du taux d'usure des buses d'aspersion (février 2003)
ASAE S263	Normes minimales pour les tubes d'irrigation par aspersion en aluminium
ISO 7714:2000	AMatériel agricole d'irrigation – Vannes volumétriques – Exigences générales et méthodes d'essai
ISO 7749-1:1995	Matériel agricole d'irrigation - Asperseurs rotatifs – Partie 1: Exigences de conception et de fonctionnement
ISO 8026:1995	Matériel agricole d'irrigation – Diffuseurs – Exigences générales et méthodes d'essai
ISO 8026:1995/Amd 1:2000	Matériel d'irrigation – Systèmes d'irrigation automatiques – Régulation hydraulique
ISO/TR 8059:1986	Machines d'irrigation mobiles – Partie 1: Caractéristiques de fonctionnement et méthodes d'essai en laboratoire et au champ
ISO 8224-1:2003	Machines d'irrigation mobiles – Partie 1: Caractéristiques de fonctionnement et méthodes d'essai en laboratoire et au champ
ISO 8224-2: 1991	Machines d'irrigation mobiles – Partie 2: Tuyau flexible et raccords – Méthodes d'essai

TABLEAU 5.2 - Normes et spécifications de l'équipement (continué)

Code de la norme:	Nom de la norme:
ISO 8779:2001	Tubes en polyéthylène(PE) pour branchements d'irrigation – Spécifications
ISO 8796:2004	Tubes en polyéthylène PE 32 et PE 40 pour branchements d'irrigation – Sensibilité à la fissuration sous contrainte produite par les raccords à inserts – Méthode d'essai et exigences
ISO 9261:2004	Matériel agricole d'irrigation – Distributeurs et tuyaux-distributeurs – Spécifications et méthodes d'essai
ISO 9625:1993	Raccords mécaniques pour tubes en polyéthylène utilisés avec pression et destinés à l'irrigation
ISO 9635-1:2006	Matériel agricole d'irrigation – <b>Vannes d'irrigation – Partie 1: Exigences générales</b>
ISO 9635-2:2006	Matériel agricole d'irrigation – <b>Vannes d'irrigation – Partie 2: Vannes d'isolation</b>
ISO 9635-3:2006	Matériel agricole d'irrigation – <b>Vannes d'irrigation – Partie 3: Clapets anti-retour</b>
ISO 9635-4:2006	Matériel agricole d'irrigation – <b>Vannes d'irrigation – Partie 4: Vannes de purge d'air</b>
ISO 9635-5:2006	Matériel agricole d'irrigation – <b>Vannes d'irrigation – Partie 5: Vannes de contrôle</b>
ISO 9644:1993	Matériel agricole d'irrigation - Pertes de pression dans les vannes d'irrigation – Méthode d'essai
ISO 9644:1993/Amd 1:1998	Matériel agricole d'irrigation – Petites vannes en matière plastique commandées manuellement
ISO 9911:2006	Matériel agricole d'irrigation – <b>Filtres pour micro-irrigation – Partie 1: Termes, définitions et classification</b>
ISO 9912-1:2004	Matériel agricole d'irrigation – <b>Filtres - Partie 2: Filtres à tamis</b>
ISO 9912-2:1992	Matériel agricole d'irrigation – <b>Filtres – Partie 3: Filtres à tamis à autonettoyage automatique</b>
ISO 9912-3:1992	Matériel agricole d'irrigation - Vannes de régulation de la pression à action directe
ISO 10522:1993	Matériel agricole d'irrigation - Pivots et rampes frontales équipés de buses d'arrosage ou d' aspersion - Méthode de détermination de l'uniformité de la distribution d'eau
ISO 11545:2001	Matériel agricole d'irrigation – Installations de tête
ISO 11678:1996	Irrigation agricole – Câblage et matériel pour les machines d'irrigation entraînées ou commandées électriquement
ISO 11738:2000	Matériel agricole d'irrigation – Pompes doseuses à moteur hydraulique pour l'injection de produits chimiques
ISO 12347:1995	Matériel agricole d'irrigation – Selles de dérivation en matière plastique pour le raccordement de tuyaux en polyéthylène utilisés sous pression
ISO 13457:2000	Matériel agricole d'irrigation – <b>Symboles graphiques des systèmes d'irrigation sous pression</b>
ISO 13460:1998	Matériel d'irrigation – Injecteurs d'engrais liquides de type venturi à pression différentielle
ISO 15081:2005	Matériel agricole d'irrigation – <b>Asperseurs – Partie 1: Définition des termes et classification</b>
ISO 15873:2002	Matériel agricole d'irrigation – <b>Asperseurs – Partie 3: Caractérisation de la distribution et méthodes d'essai</b>
ISO 15886-1:2004	Matériel agricole d'irrigation – <b>Tube en PVC, posé au-dessus du sol et utilisé avec basse pression pour l'irrigation en surface – Spécifications et méthodes d'essai</b>
ISO 15886-3:2004	Tubes en matières thermoplastiques – Tableau universel des épaisseurs de paroi
ISO 16149:2006	Filetages de tuyauterie pour raccordement avec étanchéité dans le filet – <b>Partie 1: Dimensions, tolérances et désignation</b>
ISO 4065	
ISO 7-1:1994	

TABLEAU 5.2 - Normes et spécifications de l'équipement (continué)

Code de la norme:	Nom de la norme:
ISO 7-2:2000	Filetages de tuyauterie pour raccordement avec étanchéité dans le filet – <b>Partie 2: Vérification par calibre à limites</b>
ISO 49:1994/Cor 1:1997	Raccords en fonte malléable filetés conformément à l'ISO 7-1
ISO 4422-1:1996	Tubes et raccords en poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) pour l'adduction d'eau – Spécifications – Partie 1: Généralités
ISO 4422-2:1996	Tubes et raccords en poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) pour l'adduction d'eau – Spécifications – Partie 2: Tubes (avec ou sans emboîtures incorporées)
ISO 4422-3:1996	Tubes et raccords en poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) pour l'adduction d'eau – Spécifications – Partie 3: Raccords et assemblages
ISO 4422-4:1997	Tubes et raccords en poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) pour l'adduction d'eau – Spécifications – Partie 4: Robinets et accessoires
ISO 4422-5:1997	Tubes et raccords en poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) pour l'adduction d'eau – Spécifications – Partie 5: Aptitude à l'emploi du système
ASTM D1785-06	Normes pour des tuyaux en plastique poly(chlorure de vinyle)(PVC), Classe 40, 80 et 120
ASTM D2241-05	Spécifications pour les tuyaux PVC pression
ASTM D2447-03	Spécifications standard pour les tuyaux en PE. Annexes 40 et 80, basées sur les diamètres extérieurs
ASTM D2464-99	Normes pour les raccords de tuyaux filetés en plastique poly(chlorure de vinyle) (PVC), Annexe 80
ASTM D2466-02	Normes pour les raccords de tuyaux filetés en plastique poly(chlorure de vinyle) (PVC), Annexe 40
ASTM D2467-02	Normes pour les types d'emboîtements de raccords de tuyaux en plastique poly(chlorure de vinyle) (PVC), Annexe 80
ASTM D2609-02	Normes des raccords de tuyaux en plastique de polyéthylène (PE)
ASTM D2683-98	Spécifications pour les accessoires en PE sur des tuyaux plastique en polyéthylène (PE) à emboîtement sur diamètre extérieur
ASTM D2683-04	Spécifications pour les accessoires en PE sur des tuyaux plastique en polyéthylène (PE) à emboîtement sur diamètre extérieur
ASTM D3139-98(2005)	Spécifications pour les joints, pour les tuyaux sous pression en plastique en utilisant une colle élastomère
ASTM D3261-03	Spécifications pour les accessoires en plastique PE pour des tubes plastique en PE
BS 21:1985	Spécifications pour les filetages de tuyaux et accessoires - joints étanches à pression sur les filetages (dimensions métriques)(ISO 7-2: 1982)
BS 3867:1987	Méthode pour spécifier les diamètres extérieurs et valeurs de pression pour les tuyaux thermoplastiques (série en pouces) (ISO 161-2:1977)
BS 4346 (Part 1-3)	Joints et accessoires pour utilisation avec les tuyaux sous pression en PVC non plastifié
BS 143 and 1256:2000	Raccords de tuyauterie filetés en fonte malléable et alliages de cuivre
DIN 2440/41/42	Tubes en acier (poids moyen) adaptés au vissage
DIN 2999 (1-6)	Filetages de tuyaux pour conduites et accessoires
DIN 8062 (1988)	Tubes PVC non plastifié, tubes PVC-HI – Dimensions
DIN 8072 (1987)	Tubes en polyéthylène à faible densité (PEFD) – Dimensions
DIN 8074 (1999)	Tubes en polyéthylène à haute densité (PEHD) – Dimensions
DIN 8075 (1999)	Tubes en polyéthylène à haute densité (PEHD) – Expérimentation
DIN 8161 (1994)	Tubes en polychlorure de vinyle non plastifié – Exigences générales de qualité et expérimentation
EN 2452-2	Systèmes de canalisations en plastique pour alimentation en eau – Poly(chlorure de vinyle) non plastifié (PVC-U) – Partie 2: Tubes
EN 12201-2	Systèmes de canalisations en plastique pour alimentation en eau – Polyéthylène (PE) – Partie 2: Tubes

Remarques:

- ASAE:** The Society for Engineering in Agriculture, Food and Biological Systems (anciennement American Society of Agricultural Engineers);
- ANSI:** American National Standards Institute;
- ASTM:** American Society for Testing Material;
- BS:** British Standards;
- DIN:** Deutsches Institut für Normung (normes allemandes);
- ISO:** Organisation internationale de standardisation;
- EN:** Norme européenne.

### ***APPEL D'OFFRES***

---

L'achat d'équipements d'irrigation ou l'exécution de services tels que l'installation, le fonctionnement ou l'entretien de réseaux d'irrigation et/ou de pompes, doit faire l'objet d'un appel d'offres public.

Pour les équipements et services de moins de 500 dollars EU, l'achat peut se faire par une simple cotation, c'est-à-dire une estimation écrite de la part d'un nombre représentatif de fournisseurs (deux ou trois). Lorsque la valeur des équipements excède un certain montant (par exemple 600 dollars EU), leur achat doit être effectué par appel d'offres. Ceci doit être fait dans le respect de certaines règles spécifiques et procédures appliquées dans le projet ou le pays concerné.

Une large publicité doit être accordée à chaque "avis d'appel d'offres". Elle doit mentionner le nom de l'acheteur, une brève description des articles à fournir dans le cadre de l'appel d'offres, l'adresse de livraison de l'équipement et la date et l'heure limites de réception des offres. En plus, elle doit inclure une déclaration que l'acheteur n'est pas lié d'accepter n'importe quelle offre, en particulier l'offre la plus basse; l'organisme chargé de fournir toutes les particularités de l'appel d'offres doit également être précisé.

Dans le cas d'un appel d'offres au niveau local, pour l'achat de quantités relativement limitées, le dossier d'appel d'offres, qui doit être disponible et fourni sur demande aux soumissionnaires potentiels, ne devra inclure que les conditions générales de l'appel d'offres et les spécifications techniques des biens. Il est important que toutes les conditions requises soient exposées clairement et en détail dans le dossier d'appel d'offres, y compris le délai et la méthode de livraison, par exemple FAB (franco à bord), CAF (coût, assurance et fret), sur stock et les méthodes de paiement, c'est-à-dire lettre de crédit, paiement comptant contre documents, paiement à la livraison, etc. et toutes les autres informations pertinentes. Pour les appels d'offres supérieurs à 3 000 dollars EU, les soumissionnaires doivent fournir une garantie bancaire ou un chèque égal à 10 pour cent du montant de l'offre. Le paragraphe suivant donne un exemple de ce type d'appel d'offres.

Dans le cas d'un appel d'offres international, les documents contractuels doivent inclure les pièces détaillées suivantes:

- l'appel d'offres (comme décrit ci-dessus);
- les instructions aux soumissionnaires (source de financement, éligibilité des soumissionnaires, biens et services, coût, contenu des dossiers d'appel d'offres, préparation et soumission des offres, ouverture et évaluation des offres, attribution du contrat);
- les conditions générales du contrat (définitions, pays d'origine et normes, performances, sécurité, inspections et essais, assurance, transport, garanties, paiement, modifications, retards, cas de force majeure, etc.);
- les conditions spéciales;
- les spécifications techniques: généralités, matériaux et main-d'œuvre, inventaire des besoins, bordereau des quantités (tableau 5.3) et exigences/spécifications techniques particulières (tableau 5.4);
- formule d'appel d'offres et bordereaux des prix;
- formule de contrat, nantissement au niveau de l'offre et du contrat.

## **EXEMPLE**

---

### ***Appel d'offres pour la fourniture d'un équipement d'irrigation***

Un appel d'offres est lancé pour la fourniture d'un équipement d'irrigation requis pour une exploitation privée de la région du projet, selon les quantités, descriptions et spécifications jointes.

#### ***Conditions générales de la soumission***

- ❶ **Prix:** les soumissionnaires soumettront des offres de prix unitaires et totaux, CAF au port le plus proche, République de ..., incluant les frais bancaires sur le bordereau des prix joint. Les prix doivent être fermes pour au moins 90 jours calendaires à partir de la date de réception des offres.
- ❷ **Livraison:** la date de livraison au lieu du projet ne devra pas excéder 60 jours après l'adjudication du contrat.
- ❸ Les offres seront remises sous enveloppe scellée, adressée au Directeur général du Projet d'irrigation, boîte postale 5564. Elles porteront la mention «Offre pour la fourniture d'un équipement d'irrigation pour une exploitation privée» sur l'enveloppe et devraient arriver au Bureau principal du Projet le 31 décembre 2007 au plus tard.
- ❹ Les soumissionnaires s'engagent à respecter les prix fournis. L'offre liera le soumissionnaire choisi et devra être exécutée après avoir été acceptée par le Projet. Si le soumissionnaire retarde ou refuse l'exécution de l'offre, il sera redevable de toute dépense supplémentaire ainsi occasionnée pour le Projet.

- 5 **Paiement:** Le Projet prendra toutes les mesures requises pour l'ouverture d'une lettre de crédit en dollars EU pour les biens qui lui seront livrés en son nom, et au profit du fournisseur dans un délai de sept jours après réception de la licence d'importation. Le Projet effectuera un premier paiement de 50 pour cent de la valeur de l'offre après présentation de tous les documents relatifs à l'expédition des biens. Ces documents devront être présentés au projet au moins un mois avant la date prévue de l'arrivée des biens dans le port d'entrée. Un second paiement de 50 pour cent de la valeur du contrat sera versé au fournisseur après la réception des biens dans le magasin du projet et l'établissement d'un certificat de réception en accord avec les spécifications techniques.
- 6 Assurance pour couvrir tous les risques pour la valeur CAF, plus 10 pour cent pour le transport depuis les entrepôts jusqu'aux magasins du projet.
- 7 Les soumissionnaires mentionneront le pays d'origine des biens. Il est impératif de citer les articles en accord avec les spécifications et normes, selon la liste jointe. A défaut, il faudra fournir le détail complet de ces articles.
- 8 Les soumissionnaires devront garantir l'excellente qualité de l'exécution et l'absence de défauts du matériel sur au moins douze mois.
- 9 Les candidats sélectionnés doivent confirmer sans délai par télécopie la réception de l'appel d'offres.
- 10 Les offres ne seront pas prises en considération si toutes les conditions ci-dessus ne sont pas strictement respectées.
- 11 Les offres seront présentées en double exemplaire.
- 12 Le Projet n'est pas tenu d'accepter les offres, en particulier les plus basses.

TABLEAU 5.3 - Bordereau des quantités

Art. Description	Unité	Quantité	Taux \$EU	Prix \$EU
1. Tube PEHD ø 75 mm	m	300		
2. Tube PEHD ø 63 mm	m	650		
3. Tube PEHD ø 50 mm	m	100		
4. Tube PEFD ø 25 mm	m	3 600		
5. Tube PEFD ø 16 mm	m	1 400		
6. Collier de prise en charge ø 75 mm x 2 in (F)	U	8		
7. Collier de prise en charge ø 63 mm x ¾ in (F)	U	70		
8. Collier de prise en charge ø 50 mm x ¾ in (F)	U	10		
9. Adaptateur ø 75 mm x 3 in (M)	U	1		
10. Adaptateur ø 63 mm x 2 in (M)	U	7		
11. Adaptateur ø 50 mm x 2 in (M)	U	1		
12. Adaptateur ø 25 mm x ¾ in (M)	U	240		
13. Adaptateur ø 16 mm x ¾ in (M)	U	150		
14. Raccord ø 75 mm	U	2		
15. Raccord ø 63 mm	U	4		
16. Raccord ø 50 mm	U	1		
17. Raccord ø 25 mm	U	30		
18. Raccord ø 16 mm	U	10		
19. Té ø 50 x 50 x 50 mm	U	1		
20. Té ø 25 x 25 x 25 mm	U	10		
21. Té ø 25 mm x ¾ in (M)	U	10		
22. Té ø 25 mm x ½ in (F)	U	150		
23. Croix ø 2 in	U	1		
24. Embout hexa. ø 2 in	U	8		
25. mbout hexa. ø ¾ in	U	80		
26. Bouchon ø 75 mm	U	1		
27. Bouchon ø 63 mm	U	10		
28. Bouchon ø 50 mm	U	1		
29. Vanne à boisseau sphérique ø 2 in	U	8		
30. Vanne à boisseau sphérique ø ¾ in	U	80		
31. Filtre à tamis ø 3 in	U	1		
32. Distributeur 24 litres/h	U	5 000		
33. Asperseur rétractable	U	4		
34. Purgeur d'air ¾ in	U	2		
35. Boîte de soupapes	U	8		
36. Excavation et remblai de tranchée	m	1 050		

**TABLEAU 5.4 - Spécification de l'équipement**

N° de l'article	Spécifications de l'équipement
1,2,3	Tuyaux PEHD noirs, PN 6 bars, conformes à CYS104: Partie 1:1985 (normes chypriotes) ou autres normes nationales équivalentes conformes à l'ISO. Livrés en rouleaux de 60 et 100 m.
4,5	Tuyaux PEFD noirs, PN 4 bars, conformes à CYS106: Parties 1 et 2:1985 ou autres normes nationales équivalentes, conformes à l'ISO. Livrés en rouleaux de 200 m.
6-28	Raccords en polypropylène pour utilisation avec des tubes PE normalisés aux dimensions CYS et ISO, type de compression et/ou à embouts à vis normalisés BS 21 ou ISO 7, PN 10 bars.
29,30	Vannes à boisseau sphérique (type : quart de tour, avec commande « marche ou arrêt»), en laiton, PN 16 bars selon BS, 5154, fileté selon BS 21 ou ISO 7.
31	Filtre à tamis ou à disques à rainures, 120 «mesh»/130 microns, corps métallique revêtu d'époxy ou d'autre matériau de haute qualité, PN 10, complet avec vannes d'inspection sous pression, vanne drainante d'évacuation, raccord fileté selon BS 21.
32	Goutteurs localisés en ligne à écoulement turbulent, en plastique de haute qualité, débit 24 l/h, pression de fonctionnement 1 bar, coefficient de variation (cv) < 7 %, filtration requise 120 «mesh»/130 microns.
33	Asperseurs rotatifs rétractables à couverture complète, débit: 0,7-0,8 m <sup>3</sup> /h à une pression de fonctionnement de 2-2,5 bars, rayon 7 m, buses interchangeables, avec petits filtres, mécanisme de vidange et couverture plastique, raccord fileté 3/8 in (F) selon BS 21.
35	Boîtes de soupapes à vannes en plastique renforcé ou autre matériau, avec ouverture pour le passage des tubes sur les côtés opposés au fond ouvert, avec un couvercle étanche au sommet. Dimensions approximatives: 33 cm x 45 cm (base) x 30 cm hauteur.
36	La tranchée doit être aussi uniforme et nivelée que possible, dépourvue de grosses pierres et autres matériaux tranchants. Le cas échéant, elle sera remplie d'un matériel sableux ou de terre granuleuse sur environ 10 cm. Les dimensions de la tranchée seront: profondeur minimale de 60 cm pour les tuyaux de 75 mm, et de 50 cm pour ceux de 50 et 63 mm, et 35 cm de profondeur minimale dans tous les autres cas.

## CHAPITRE 6: Programmation de l'irrigation

La programmation de l'irrigation est l'un des facteurs qui influence la viabilité agronomique et la viabilité économique des petites exploitations, aussi important pour économiser l'eau que pour accroître les rendements des cultures. L'eau d'irrigation est appliquée aux cultures selon des programmes prédéterminés, basés sur la gestion de:

- l'état de l'eau dans le sol;
- les besoins en eau des cultures.

Le type de sol et les conditions climatiques ont un effet significatif sur les principaux aspects pratiques de l'irrigation, qui sont la détermination de la quantité d'eau à distribuer et le moment auquel elle doit être appliquée à une certaine culture.

En plus des facteurs de base liés à la préparation des programmes d'irrigation étudiés ci-dessous, d'autres éléments importants doivent être aussi considérés, tels que la tolérance des plantes et la sensibilité au déficit en eau à différents stades de croissance, ainsi que l'utilisation optimale de l'eau.

### RELATIONS EAU – SOL

Le tableau 6.1 ci-dessous présente un tableau résumant les propriétés physiques du sol.

**TABLEAU 6.1 - Propriétés physiques des sols (valeurs moyennes)**

Type de sol	Texture légère (grossière)	Texture moyenne	Texture lourde (fine)
Capacité de saturation, % poids	25–35%	35–45%	55–65%
Capacité au champ (CC), % poids	8–10%	18–26%	32–42%
Point de flétrissement (WP), % poids	4–5%	10–14%	20–24%
Capacité de saturation/CC	2/1	2/1	2/1
CC/WP	2/1	1,85/1	1,75/1
Densité en vrac (poids par volume) g/cm <sup>3</sup>	1,4–1,6	1,2–1,4	1,0–1,2
Humidité disponible du sol en volume (CC-WP x densité)	6%	12%	16–20%
Humidité disponible (Sa) en mm par prof. de sol en m (CC-WP x densité x 10)	60 mm	120 mm	160–200 mm
Tension d'humidité des sols (bars):			
• à la capacité au champ	0,1	0,2	0,3
• au point de flétrissement	15,0	15,0	15,0
Temps requis de la saturation à la capacité au champ (h)	18–24 h	24–36 h	36–89 h
Taux d'infiltration (mm/h)	25–75 mm/h	8–16 mm/h	2–6 mm/h

**Exemple:**

La capacité au champ (CC) d'une couche de sol de 45 cm est de 18 pour cent. Quelle est la quantité d'eau contenue dans cette couche en mètres cubes par hectare?

**Réponse:**

CC = 18%, WP = CC ÷ 1,85 = 9,7%, Sa = 18 - 9,7 = 8,3%;  
 Densité en vrac = 1,2 g/cm<sup>3</sup>; Sa mm/m = 8,3 x 1,2 x 10 = 99,6, Sa mm/45 cm = 8,3 x 1,2 x 10 x 0,45 = 44,8 mm; m<sup>3</sup>/ha = 0,0996 ÷ 1 x 0,45 x 10 000 (1 ha) = 448,2, ou en m<sup>3</sup>/ha = Sa (mm/m) x profondeur de la couche (m) x 10.

Par conséquent, la quantité d'eau est de 448,2 m<sup>3</sup>/ha.

**PROFONDEUR EFFECTIVE D'ENRACINEMENT**

Il s'agit de la profondeur de sol dans laquelle les plantes puisent environ 80 pour cent de leurs besoins en eau, principalement par la partie supérieure de la plus dense du système racinaire. La profondeur d'enracinement dépend de la physiologie de la plante, du type de sol et de la disponibilité en eau (mode d'irrigation). Des valeurs indicatives sont données dans le Bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO n° 24 (tableau 39).

En général, les légumes (pois, tomates, pommes de terre, oignons, arachides, concombre, etc.) ont des racines peu profondes, de l'ordre de 50 à 60 cm. Les arbres fruitiers, le coton et quelques autres plantes ont un enracinement moyen de 80 à 120 cm. La luzerne, le sorgho, et le maïs ont de profondes racines (tableau 6.2). En outre, l'enracinement varie en fonction de l'âge de la plante.

**TABLEAU 6.2 - Exemple d'enracinement (en mètres) pendant la saison culturale**

	août	septembre	octobre	novembre	décembre	janvier
Maïs	-	0,4	0,9	1,2	1,2	-
Coton	0,4	0,8	1,0	1,0	1,0	-
Tomate	-	-	0,3	0,7	0,9	0,9

**DÉFICIT ADMISSIBLE OU TARISSEMENT DE L'EAU DISPONIBLE DANS LE SOL**

La fraction de l'humidité du sol qui équivaut à 20 à 70 pour cent de l'humidité totale (Sa) et est facilement absorbée par les plantes (sans aucun stress provoquant une réduction de rendement,) est appelée l'humidité facilement utilisable. C'est le produit de Sa par p, qui représente le tarissement maximal admissible de l'eau disponible (humidité). La valeur de p varie en fonction du type de plante, de la profondeur des racines, des

conditions climatiques et des modes d'irrigation. Des valeurs indicatives de  $p$  sont données dans le Bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO n° 33 (tableaux 19 et 20); elles varient de 0,25 pour les cultures sensibles à faible enracinement à 0,70 pour les cultures tolérantes à racines profondes. Le Tableau 23 du même bulletin donne des informations sur les périodes de croissance sensibles de différentes cultures.

Les observations de terrain ont montré que moins le tarissement en eau était important, plus le développement et le rendement des cultures étaient élevés. Par conséquent les valeurs recommandées pour  $p$  sont:

- 0,20 à 0,30 pour les cultures de saison à faible enracinement;
- 0,40 à 0,60 pour les cultures en plein champ à racines profondes et les arbres adultes.

### **PROFONDEUR NETTE D'APPLICATION DE L'IRRIGATION**

L'irrigation doit être appliquée lorsque le pourcentage admissible  $p$  d'humidité disponible ( $S_a$ ) est épuisé dans la profondeur d'enracinement, c'est-à-dire quand elle doit réalimenter l'eau épuisée. Par conséquent:

$$\text{Profondeur nette de la dose d'irrigation } d \text{ en mm} = (S_a \times p) D$$

Où:  $S_a$  = humidité disponible en mm par mètre,  $p$  = tarissement admissible (fraction), et  $D$  = profondeur d'enracinement en mètres.

#### **Exemple:**

Si  $S_a = 99$  mm/m,  $p = 0,5$ ,  $D = 0,4$  m, quelle est la dose d'irrigation nette qui compensera le déficit d'humidité?

$$d = 99 \times 0,5 \times 0,4 = 19,8 \text{ mm.}$$

### **BESOINS EN EAU DES CULTURES**

La quantité d'eau qui s'évapore des sols humides et des végétaux, y compris la transpiration des plantes, est nommée l'évapotranspiration (ET). Sa valeur est largement conditionnée par les facteurs climatiques, comme la radiation solaire, la température, l'humidité et le vent, ainsi que par l'environnement. L'évaporation représente environ 10 pour cent de l'évapotranspiration totale et la transpiration des plantes les 90 pour cent restants. Les besoins en eau des cultures englobent la quantité d'eau totale utilisée pour l'évapotranspiration.

Diverses approches pour l'estimation de l'évapotranspiration, telles que les méthodes par radiation, Penman et du bac d'évaporation, sont présentées dans les Bulletins d'irrigation et de drainage de la FAO n° 24, 33 et 56.

L'évapotranspiration de référence (ET<sub>o</sub>) représente le taux d'évapotranspiration d'herbe haute de 8 à 15 cm, dans des conditions idéales, avec une couverture végétative couvrant entièrement le terrain. C'est une valeur moyenne qui s'exprime en mm par jour sur une période de 10 à 30 jours.

La méthode la plus pratique pour déterminer l'ET<sub>o</sub> est la méthode de l'évaporation en bac, qui intègre les effets de la température, de l'humidité, du vent et de l'ensoleillement. Les bacs les plus utilisés sont: le bac d'évaporation de classe A (circulaire) et le bassin submergé Colorado (carré).

L'évaporation dans le bac est très proche de l'évapotranspiration de l'herbe prise comme un indice de l'ET<sub>o</sub> pour les besoins du calcul. Les relevés directs du bac (Epan) sont liés à l'ET<sub>o</sub> par le coefficient du bac (kpan), qui dépend du bac utilisé, de son emplacement (proximité ou non d'une végétation couvrant le sol aux environs) et du climat (humidité et vitesse du vent) (tableau 6.3); par conséquent:  $ET_o = Epan \times kpan$ .

Les valeurs de kpan pour les deux types de bac sont données dans le Bulletin d'irrigation et de drainage de la FAO n° 24 (tableaux 18 et 19). Pour le bac de classe A, la valeur moyenne de kpan est de 0,70 et pour le bac Colorado, de 0,80.

**Exemple:**

**TABLEAU 6.3 - Estimation de l'ET<sub>o</sub> en mm/jour dans le delta du Wadi Tuban (Yémen)**

Mois	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
Epan	9,0	8,8	8,8	8,2	8,0	6,5	5,7
kpan			moyenne:	0,70			
ET <sub>o</sub>	6,3	6,2	6,2	5,7	5,6	4,5	4,0

Il faut, pour pouvoir corréliser l'ET<sub>o</sub> aux besoins en eau des cultures (ET<sub>c</sub>), définir le coefficient cultural spécifique (kc):  $ET_c = ET_o \times kc$ .

Le coefficient cultural (kc) dépend de la surface de la feuille de la plante, de sa rugosité, de son stade de croissance, de la saison culturale et les conditions météorologiques (tableau 6.4). Les tableaux 6.5 et 6.6 donnent les valeurs de kc pour différentes cultures à divers stades de croissance.

**Exemple:**

**TABLEAU 6.4 - Coton, saison culturale: août à décembre**

	août	septembre	octobre	novembre	décembre
ET <sub>o</sub> mm/jour	6,2	5,7	5,6	4,5	4,0
kc coton	0,4	0,7	1,1	1,0	0,8
Etc coton mm/j	2,5	4,0	6,2	4,5	3,2
Etc coton mm/mois	78	120	192	135	99

Besoins en eau totaux: environ 580 mm (la moitié de décembre est considérée)

**TABLEAU 6.5 - Coefficient cultural (kc) pour certaines cultures saisonnières (valeurs moyennes)**

Culture	Phase initiale	Phase de croissance	Phase mi-saison	Phase tardive et récolt
Arachide	0,45	0,75	1,00	0,75
Aubergine	0,45	0,75	1,15	0,80
Betterave à sucre	0,45	0,80	1,15	0,80
Canne à sucre	0,45	0,85	1,15	0,65
Carotte	0,45	0,75	1,05	0,90
Chou	0,45	0,75	1,05	0,90
Concombre	0,45	0,70	0,90	0,75
Coton	0,45	0,75	1,15	0,75
Courge	0,45	0,70	0,90	0,75
Épinard	0,45	0,60	1,00	0,90
Haricot (sec)	0,35	0,75	1,10	0,50
Haricot (vert)	0,35	0,70	1,00	0,90
Laitue	0,45	0,60	1,00	0,90
Maïs (doux)	0,40	0,80	1,15	1,00
Maïs (grain)	0,40	0,75	1,15	0,70
Melon	0,45	0,75	1,00	0,75
Oignon (sec)	0,50	0,75	1,05	0,85
Oignon (vert)	0,50	0,70	1,00	1,00
Pois (frais)	0,45	0,80	1,15	1,05
Poivron	0,35	0,75	1,05	0,90
Pomme de terre	0,45	0,75	1,15	0,75
Sorgho	0,35	0,75	1,10	0,65
Tomate	0,45	0,75	1,15	0,80
Tournesol	0,35	0,75	1,15	0,55

**TABLEAU 6.6 - Coefficient cultural (kc) pour certaines cultures permanentes**

Culture	jeune	mûre
Agrumes	0,30	0,65
Amandes, abricots, poires, pêches, noix de pecan, prunes	0,40	0,75
Bananes	0,50	1,10
Kiwis	0,90	0,90
Luzerne	0,35	1,10
Olives	0,55	0,55
Pommes, cerises, noix	0,45	0,85
Raisin, palmiers	0,70	0,70

## PLUIES EFFICACES

Dans beaucoup de régions, les précipitations saisonnières (P) peuvent couvrir une partie des besoins en eau durant la saison d'irrigation. La quantité d'eau pluviale retenue dans la zone racinaire est nommée *pluie efficace* (Pe) et doit être déduite des besoins totaux calculés en eau d'irrigation. On peut estimer Pe approximativement de la manière suivante:

$$Pe = 0,8 P \text{ si } P > 75\text{mm/mois};$$

$$Pe = 0,6 P \text{ si } P < 75 \text{ mm/mois.}$$

## **COUVERTURE VÉGÉTALE**

---

Un autre élément à considérer lorsqu'on estime les besoins en eau des cultures est le pourcentage de la surface du champ (terrain) couvert par la culture. Un coefficient de réduction ( $k_r$ ) est appliqué au calcul conventionnel de l'ET de la culture. Ce facteur est légèrement supérieur, d'environ 15 pour cent, au sol réellement couvert par la culture. Par exemple, si le sol réellement couvert par la culture est de 70 pour cent,  $k_r = 0,70 \times 1,15 = 0,80$ .

## **INTERVALLE D'IRRIGATION OU FRÉQUENCE**

---

Il s'agit du nombre de jours entre deux irrigations consécutives:  $i = d \div E_{Tc}$ , où  $d$  est la profondeur nette d'application de l'irrigation en mm (dose) et  $E_{Tc}$  est l'évapotranspiration journalière de la culture en mm/jour.

**Exemple:**

Si  $d = 19,8$  mm et  $E_{Tc} = 2,5$  mm/jour,  $i = 19,8 \div 2,5 = 8$  jours.

## **EFFICIENCE D'APPLICATION DE L'IRRIGATION**

---

La quantité d'eau à stocker dans la zone racinaire correspond à la dose nette d'irrigation ( $d$ ). Toutefois, durant l'irrigation, des quantités importantes d'eau se perdent par évaporation, infiltration, percolation profonde, etc. La quantité perdue dépend de l'efficacité du système (tableau 6.7). L'efficacité d'application de l'irrigation ( $E_a$ ) s'exprime par:

$$E_a = \frac{d}{\text{eau appliquée (brute)}} \times 100$$

où  $d$  est l'eau stockée dans la zone racinaire et **l'eau appliquée (brute)** l'eau d'irrigation.

**Exemple:**

La dose nette d'irrigation ( $d$ ) pour une surface de 1 ha est de 19,8 mm, c'est-à-dire 198 m<sup>3</sup>. Le volume d'eau distribué durant l'irrigation est de 280 m<sup>3</sup>. Quelle est l'efficacité d'application?

**Réponse:**

$E_a = 198 \div 280 = 70,7$  pour cent, ou 0,70 en fraction. Les 30 pour cent restants de l'eau appliquée sont considérés comme perdus.

**TABEAU 6.7 - Efficacités approximatives d'application de l'irrigation pour divers systèmes ou méthodes d'irrigation au niveau de l'exploitation**

Système/méthode	Ea %
Réseau de canal en terre, irrigation de surface	40-50
Réseau de canal revêtu, irrigation de surface	50-60
Réseau de conduites sous pression, irrigation de surface	65-75
Systèmes d'irrigation par tuyaux souples	70-80
Systèmes d'aspersion basse et moyenne pression	75
Micro-asperseurs, micro-jets, mini-asperseurs	75-85
Irrigation goutte-à-goutte	80-90

### ***PROFONDEUR BRUTE D'APPLICATION DE L'IRRIGATION***

Si l'on considère l'efficacité d'application de l'irrigation comme une fraction, c'est-à-dire  $E_a = 0,60$  (60 pour cent), la profondeur brute d'application de l'irrigation, ou dose brute d'irrigation ( $d_g$ ) est définie par:

$$d_g = \frac{d}{E_a \text{ (fraction)}}$$

### ***BESOINS DE LESSIVAGE***

Le niveau de salinité dans la zone racinaire est directement lié à la qualité de l'eau, à la quantité de fertilisants et à la profondeur d'application de l'irrigation. Une concentration en sel trop élevée dans le sol peut être contrôlée par le lessivage (voir chapitre 7: Qualité de l'eau d'irrigation). Un volume d'eau supplémentaire de 10 à 15 pour cent sera appliqué durant l'irrigation pour les besoins de lessivage lorsque ce sera nécessaire. De cette façon, une partie de l'eau percole au travers et en dessous de la zone racinaire, entraînant avec elle une partie des sels solubles accumulés dans le sol. Les besoins de lessivage sont pris en compte pour le calcul de la dose nette d'irrigation ( $d$ ).

### ***DÉBIT DU SYSTÈME (CAPACITÉ DU SYSTÈME)***

La capacité minimale de débit de tout réseau d'irrigation doit satisfaire les besoins en eau de la surface sous irrigation en période de demande de pointe:

$$\text{minimum } Q = 10 A \frac{d_g}{it}$$

où  $Q$  est le débit du réseau en m<sup>3</sup>/heure,  $A$  est la superficie en hectares,  $dg$  est la profondeur brute d'application (dose d'irrigation) en mm,  $i$  est l' intervalle en jours entre deux irrigations en période de pointe,  $t$  est le nombre d'heures de fonctionnement par jour et 10 est une constante (pour hectares). Toutefois, le débit minimum du système doit permettre l'irrigation complète de la surface au moins deux jours avant l'irrigation suivante. Ceci donne le temps nécessaire pour réparer tout dommage au système ou à l'unité de pompage. Par conséquent, on réduira de deux jours la valeur de  $i$  dans la formule ci-dessus.

La durée d'application par irrigation est déterminée par:

$$T = 10 A \frac{dg}{Q}$$

où  $T$  est le nombre total d'heures de fonctionnement du système.

### EXEMPLE GÉNÉRAL

Dans l'exemple suivant (tableau 6.8), la pluie efficace ( $Pe$ ), la couverture végétale ( $kr$ ) et les besoins en lessivage ne sont pas pris en compte. Toutefois, ces éléments sont importants dans les systèmes de micro-irrigation localisés.

- culture: coton;
- surface: 1,5 ha ; situation: Delta du Wadi Tuban;
- saison culturale: août à décembre;
- méthode d'irrigation: irrigation de surface, conduites sous pression;
- efficacité d'irrigation: 70%;
- sol de texture moyenne,  $Sa = 99$  mm/m.

TABLEAU 6.8 - Exemple d'une culture de coton

	août	septembre	october	novembre	décembre
Eau disponible dans le sol $Sa$ (mm/m)	99	99	99	99	99
Epuisement de l'eau disponible $p$	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
Profondeur racines coton $D$ (m)	0,4	0,7	1,0	1,0	1,0
Dose nette d'irrigation $d$ (mm)	19,8	41,6	59,4	59,4	59,4
Epan (mm/jour)	8,8	8,2	8,0	6,5	5,7
$kpan$	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
$ETo$ (mm/jour)	6,2	5,7	5,6	4,5	4,0
$kc$ coton	0,4	0,7	1,1	1,0	0,8
Etc coton (mm/jour)	2,5	4,0	6,2	4,5	3,2
Intervalle d'irrigation (jours)	8	10,5	9,6	13	18,5
Dose brute d'irrigation $dg$ (mm)	28,3	59,4	85,0	85,0	85,0
Dose brute d'irrigation $dg$ (m <sup>3</sup> /h)	425	891	1 275	1 275	1 275

La demande de pointe se produit en octobre lorsque l'ETc est de 6,2 mm/jour et l'intervalle (fréquence) d'irrigation de 8 jours. Si le nombre d'heures de fonctionnement journalier est de 7 heures, le débit du système est de:

$$Q = 10 \frac{1.5ha \times 85mm}{(9jours - 2jours) \times 7h/jour} = 26m^3/hr$$

La durée de l'application de l'irrigation se détermine de la manière suivante:

- Août:  $T = 10 \times 1,5 \times 28,3 \div 26 = 16,3$  h, i.e. 2 jours;
- Septembre:  $T = 10 \times 1,5 \times 59,4 \div 26 = 34,3$  h. i.e. 5 jours;
- Octobre:  $T = 10 \times 1,5 \times 85,0 \div 26 = 49,0$  h. i.e. 7 jours;
- Novembre:  $T = 10 \times 1,5 \times 85,0 \div 26 = 49,0$  h. i.e. 7 jours;
- Décembre:  $T = 10 \times 1,5 \times 85,0 \div 26 = 49,0$  h. i.e. 7 jours.

**TABLEAU 6.9 - Programme d'irrigation**

Fin juillet	Irrigation avant semis (pour humidifier une profondeur de 0,6 m de sol)	1 273 m <sup>3</sup>
Début août	mise en culture	
8 août	irrigation	425 m <sup>3</sup>
16 août	irrigation	425 m <sup>3</sup>
24 août	irrigation	425 m <sup>3</sup>
1 <sup>er</sup> septembre	irrigation	891 m <sup>3</sup>
11 septembre	irrigation	891 m <sup>3</sup>
22 septembre	irrigation	891 m <sup>3</sup>
2 octobre	irrigation	1 275 m <sup>3</sup>
11 octobre	irrigation	1 275 m <sup>3</sup>
21 octobre	irrigation	1 275 m <sup>3</sup>
31 octobre	irrigation	1 275 m <sup>3</sup>
13 novembre	irrigation	1 275 m <sup>3</sup>
26 novembre	irrigation	1 275 m <sup>3</sup>

La dernière irrigation du 26 novembre peut durer jusqu'au 9 décembre, c'est-à-dire jusqu'à la récolte. La quantité totale d'eau qui doit irriguer cette culture sur une superficie de 1,5 ha est de 11 598 m<sup>3</sup> plus 1 273 m<sup>3</sup> comme minimum de pré-irrigation, soit un total de 12 871 m<sup>3</sup>.



# CHAPITRE 7: Qualité de l'eau d'irrigation

## **INTRODUCTION**

---

Les eaux d'irrigation, qu'elles proviennent de sources, qu'elles soient dérivées de cours d'eau ou qu'elles soient pompées dans des forages, contiennent d'appréciables quantités de substances chimiques en solution susceptibles de réduire les rendements des cultures et de détériorer la fertilité des sols. En plus des sels dissous, problème majeur récurrent depuis des siècles, l'eau d'irrigation transporte toujours des substances dérivées de son environnement naturel ou des déchets des activités humaines (effluents domestiques et industriels). Ces substances peuvent varier dans de larges mesures, mais se composent principalement d'impuretés et de matières solides en suspension qui provoquent le bouchage des distributeurs des systèmes de micro-irrigation, ainsi que de populations bactériennes et de coliformes dangereux pour les humains et les animaux.

## **CLASSIFICATION DE LA QUALITÉ DES EAUX POUR L'IRRIGATION**

---

Dans plusieurs études réalisées dans les années 80 sur les diverses causes de colmatage des distributeurs, les ingénieurs, en se basant sur les trois principaux facteurs associés responsables de ce problème spécifique, ont classifié les eaux selon leurs qualités chimiques, physiques et biologiques. Cette classification, bien que simple, semblait adéquate pour une évaluation relativement étendue permettant de couvrir la gamme entière des qualités d'eau d'irrigation pour la production de cultures. Avec la réutilisation en agriculture des eaux municipales usées et traitées, l'évaluation de la qualité des eaux a été élargie afin de couvrir toutes les propriétés physio-chimiques, biologiques et microbiologiques de l'eau, qui pourraient avoir un impact sur les sols, les plantes, l'environnement ainsi que sur les consommateurs (hommes ou animaux). Les méthodes d'évaluation de la qualité des eaux abordées dans ce chapitre, bien que succinctes, se base sur d'importants paramètres et critères pour faire l'évaluation pratique des qualités chimiques, physiques et biologiques de l'eau d'irrigation distribuée sous conduites:

- a) les paramètres chimiques (risques de salinité et toxicité pour les sols, les plantes et les systèmes d'irrigation, tels la corrosion des tuyaux et le colmatage chimique des distributeurs);
- b) les paramètres physiques (problèmes de bouchage des distributeurs par des particules solides en suspension et autres impuretés);

- c)  $\Sigma$  les paramètres biologiques (problèmes de bactéries et autres éléments dangereux pour la santé humaine et animale, ainsi que pour les sols, les plantes et les systèmes d'irrigation).

L'information sur l'évaluation physique et biologique est présentée sous forme moins complète que l'évaluation chimique. En réalité, un examen exhaustif et en profondeur devrait inclure les propriétés physiques des sols et les conditions climatiques, ainsi que bien d'autres facteurs ayant des influences directes ou indirectes sur l'utilisation de l'eau en agriculture et pour l'aménagement du paysage.

## **LA QUALITÉ CHIMIQUE DES EAUX D'IRRIGATION**

### ***Composition et concentration en sels solubles***

La salinité est un problème qui se pose couramment aux exploitants irriguant dans les climats arides, en raison des sels solubles contenus dans toutes les eaux d'irrigation. Toutes les eaux provenant de sources, de rivières ou pompées à partir de puits contiennent d'appréciables quantités de substances chimiques en solution, dissoutes au travers des couches géologiques, et sur lesquelles les eaux se sont écoulées. Les eaux avec une forte concentration en sels peuvent provenir d'un aquifère salin. Dans les zones d'agriculture intense, la fertilisation est une cause majeure de salinisation des aquifères.

La composition des sels dans l'eau varie selon la source et les propriétés des composés chimiques constituants. Ces sels incluent des substances telles que le gypse (sulfate de calcium  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), le sel de table (chlorure de sodium  $\text{NaCl}$ ) et la poudre à lever (bicarbonate de sodium  $\text{NaHCO}_3$ ). Dissous dans l'eau, les sels se séparent en ions: par exemple, le chlorure de sodium se divise en ions sodium et ions chlore. C'est pourquoi on parle plus couramment d'ions que de sels. Les principaux ions de l'eau d'irrigation et leurs caractéristiques sont présentés dans le tableau 7.1.

**TABLEAU 7.1 - Principaux ions présents dans l'eau d'irrigation**

<b>Ions</b>	<b>Symbole chimique</b>	<b>Poids équivalent</b>
<b>Anions (ions acides)</b>		
Chlorure	$\text{Cl}^-$	35,5
Sulfate	$\text{SO}_4^{--}$	48
Carbonate	$\text{CO}_3^{--}$	30
Bicarbonate	$\text{HCO}_3^-$	61
Nitrate	$\text{NO}_3^-$	62
<b>Cations (ions basiques)</b>		
Sodium	$\text{Na}^+$	23
Potassium	$\text{K}^+$	39,1
Calcium	$\text{Ca}^{++}$	20
Magnésium	$\text{Mg}^{++}$	12,2

Tous les ions sont exprimés en milligrammes par litre (mg/l ou ppm) et milliéquivalents par litre (meq/l). Cette dernière unité est préférable car les critères de qualité de l'eau impliquent des calculs en milliéquivalents par litre (meq/l).

La formule de conversion est:

$$\text{meq/litre} = \frac{\text{mg/litre}}{\text{poids équivalent}}$$

Le bore est également présent dans les eaux d'irrigation sous forme d'acide borique non ionisé, exprimé comme élément de bore (B) en milligrammes par litre. La concentration en sels de la majeure partie des eaux d'irrigation est comprise entre 200 et 4 000 mg/l de la quantité totale de matière dissoute (TDS). Le pH de l'eau, qui est également un indicateur de qualité, est habituellement compris entre 6,5 et 8,4.

La méthode la plus communément utilisée pour évaluer le contenu total des sels dans l'eau consiste à mesurer la conductivité électrique de l'eau (EC<sub>w</sub>) à 25°C. La conductivité électrique s'exprime en deciSiemens par mètre. Il y a une relation entre la conductivité électrique et la concentration en sels en milliéquivalents par litre (meq/l) et en milligrammes par litre, lorsque EC<sub>w</sub> est compris entre 1 et 5 dS/m. Ainsi chaque 10 meq/l de sels (concentration en cations) crée une EC<sub>w</sub> de 1 dS/m. La relation liant la conductivité électrique et la quantité totale de sels dissous (TDS) est la suivante:

$$\text{EC}_w \text{ (dS/m)} \times 640 = \text{TDS (mg/litre)}$$

La somme des cations doit égaler la somme des anions. La précision des analyses chimiques de l'eau doit être vérifiée au moyen des relations ci-dessus.

### **Effets des sels solubles sur les plantes**

L'application d'eau d'irrigation sur un sol entraîne des sels dans la zone racinaire de la plante; celle-ci puise l'eau, mais n'absorbe que peu de sels de la solution. D'une manière similaire, l'eau s'évapore de la surface du sol, mais les sels restent et s'accumulent. Les deux processus conduisent à un accroissement graduel des sels dans la zone racinaire, même avec une eau de faible salinité. Cette situation peut affecter les plantes de deux manières: a) en créant des problèmes de salinité et de carences en eau, et b) en causant une certaine toxicité et d'autres problèmes.

### *Problèmes de salinité et carences en eau*

L'accroissement de la salinité dans la zone racinaire augmente la pression osmotique de la solution du sol et cause une réduction aussi bien dans le taux d'absorption de l'eau par les plantes que dans la disponibilité en eau du sol. Ainsi, une carence continue en eau peut se produire même si le sol est abondamment irrigué. Même si la plante ne montre pas de symptômes de flétrissement, son développement et son rendement s'en ressentiront. Dans de telles conditions, il n'est pas possible de maintenir des conditions favorables à un bon développement des cultures et d'obtenir des rendements élevés; la croissance est retardée et le rendement est considérablement réduit. La germination des semences est aussi affectée par la présence des sels; elle est en général retardée et peut même ne pas se produire du tout.

Le niveau d'accroissement de la salinité dépend aussi bien de la concentration que de la composition des sels dans l'eau. Le chlorure est très soluble et reste dans la solution du sol, alors que les sulfates et bicarbonates se combinent avec le calcium et le magnésium, s'ils sont présents, pour former des sulfates et carbonates de calcium, des composés modérément solubles.

### *Problèmes de toxicité*

Beaucoup d'arbres fruitiers et d'autres cultures sont susceptibles de souffrir de la toxicité des sels. Les chlorure, sodium et bore sont absorbés par les racines et transportés jusqu'aux feuilles dans lesquelles ils s'accumulent. À des taux nocifs, ils conduisent à une nécrose et une brûlure des feuilles. En outre, les gouttes d'eau avec une haute teneur de chlorure projetées pendant l'aspersion peuvent causer des brûlures aux feuilles dans des conditions d'évaporation élevée. Même le bicarbonate est également toxique dans une certaine mesure. D'autres symptômes de toxicité incluent une chute des feuilles prématurée, une croissance réduite et un rendement diminué. Dans beaucoup de cas, les plantes ne montrent pas de problèmes évidents de toxicité, jusqu'à ce qu'il soit trop tard pour y remédier.

Les ions de chlorure et de sodium sont tous deux présents dans la solution. Ainsi, il est difficile de distinguer si le dommage est causé par l'un ou l'autre. Les ions de chlorure en concentration élevée sont réputés dangereux pour les agrumes et d'autres plantes ligneuses et feuillues. Un taux de chlorure supérieur à 10 meq/l peut causer de sérieux dommages aux cultures. Les effets toxiques du sodium sont mal connus. On a toutefois observé qu'il peut causer des dégâts directs ou indirects à beaucoup de plantes.

Le bore est un élément essentiel pour les plantes. Toutefois, lorsqu'il est présent en trop grandes quantités, il est extrêmement toxique, même à un taux de concentration relativement faible de 0,6 mg/l. La toxicité intervient avec l'absorption du bore à partir de la solution du sol. Le bore tend à s'accumuler dans les feuilles, jusqu'à ce qu'il devienne toxique pour le tissu de la feuille, ce qui provoque la mort de la plante. Dans les zones arides, le bore est considéré comme l'élément le plus dangereux de l'eau d'irrigation.

### *Autres problèmes*

En plus des effets de disponibilité en humidité et des problèmes de toxicité auxquels les sels solubles contribuent, certains constituants salins peuvent interférer avec la nutrition normale des plantes. De hautes concentrations en ions de bicarbonate peuvent affecter l'assimilation d'éléments minéraux nutritifs et leur métabolisme dans la plante. Des symptômes chlorotiques dans les plantes sensibles peuvent être dus aux effets directs ou indirects du bicarbonate, comme par exemple un accroissement du pH du sol.

Une concentration excessive en nitrates, supérieure à 100 mg/l, peut affecter les greffes et les cultures sensibles au stade initial de croissance. Toutefois, aucun effet négatif n'a été enregistré au cours des trois dernières décennies de fertilisation avec des concentrations d'azote pur dans l'eau d'irrigation d'environ 200 ppm. Bien qu'il n'existe aucun doute sur l'existence de ce problème, il semble que la préoccupation principale réside dans la concentration en nitrate de l'eau d'irrigation, lorsqu'en calculant l'application totale d'azote,  $\text{NO}_3$  atteint 0,226 N (azote pur).

### **Effets des sels solubles sur le sol**

#### *Risques liés au sodium*

Un problème de perméabilité du sol se produit lorsque l'eau d'irrigation présente une teneur en sodium élevée. Dans l'eau salée, le sodium a une plus grande concentration que tout autre cation, ses sels étant très solubles. Chargés positivement, les ions sodium sont attirés par les particules du sol chargées négativement, remplaçant les cations dominants du calcium et du magnésium. Le remplacement des ions calcium par des ions sodium entraîne la dispersion des agrégats du sol et la détérioration de sa structure, rendant ainsi le sol imperméable à l'eau et à l'air. L'augmentation en concentration du sodium échangeable peut entraîner une augmentation du pH du sol au-dessus de 8,5 et une réduction de la disponibilité de certains micro-nutriments, par exemple le fer et le phosphore.

Le degré d'absorption des particules d'argile dépend de sa concentration dans l'eau et de la concentration en ions de calcium et de magnésium. La réaction, appelée *échange de cations*, constitue un processus réversible. La capacité du sol à adsorber et à échanger les cations est limitée. Le pourcentage de la capacité du sodium à adsorber est défini comme le *sodium échangeable*. Les sols qui présentent un sodium échangeable supérieur à 15 sont sérieusement affectés par le sodium adsorbé.

Le problème du sodium est diminué si la quantité de calcium plus magnésium est élevée par rapport à la quantité de sodium. Cette relation est nommée *taux d'adsorption du sodium (SAR)*, une valeur calculée par la formule:

$$SAR = \frac{Na_{(meq/litre)}}{\sqrt{\frac{Ca_{(meq/litre)} + Mg_{(meq/litre)}}{2}}}$$

L'utilisation d'eau avec une valeur de taux d'adsorption du sodium élevée et une salinité basse à modérée peut être risquée et réduit le taux d'infiltration du sol. Le taux d'adsorption du sodium de l'eau d'irrigation indique approximativement le sodium échangeable d'un sol avec l'eau.

### *Carbonate de sodium résiduel*

Il est défini comme étant la différence en milliéquivalents par litre entre les ions de bicarbonate et les ions de calcium et de magnésium. Le calcium et le magnésium peuvent réagir avec le bicarbonate, et être précipités comme carbonates. La concentration relative en sodium dans le complexe échangeable augmente, provoquant la dispersion du sol. Quand la valeur du carbonate de sodium résiduel est inférieure à 1,25 meq/litre, l'eau est considérée comme étant de bonne qualité tandis que si elle excède 2,5 meq/litre, l'eau est considérée comme dangereuse.

### ***Tolérance des cultures à la salinité***

La tolérance des cultures est le degré de salinité d'un sol salin, dans lequel une culture peut croître et avoir un rendement acceptable. La réaction de différentes cultures à la salinité est très variable. Certaines peuvent tolérer moins de 2dS/m et d'autres jusqu'à 8dS/m et au-delà. La tolérance au sel dépend aussi considérablement des conditions culturales et des pratiques de gestion de l'irrigation. Beaucoup d'autres facteurs, tels que la plante, le sol, l'eau et le climat, peuvent interagir pour influencer la tolérance en sel des cultures.

Des données relatives à la tolérance en sel ont été déterminées pour de nombreuses plantes et sont utilisées comme normes générales. Les données suivantes sont relatives aux baisses de rendements attendues. La valeur d'ECe est la salinité du sol en termes de conductivité électrique (EC) mesurée à partir de l'extrait de sol saturé, avec une valeur de 1,5 EC pour l'eau d'irrigation (ECiw). Les tableaux 7.2 à 7.7 (extraits de Maas, 1990) donnent deux paramètres importants pour exprimer la tolérance au sel de la plante:

- le seuil: la salinité maximale admissible de l'extrait de sol saturé (ECe);
- le gradient: le pourcentage de diminution de rendement par unité d'accroissement de la salinité.

La classification des plantes en fonction de leur sensibilité/tolérance au sel (tableaux 7.2, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6 et 7.7) est même plus importante, car elle procure à première vue des informations vitales pour l'évaluation et le diagnostic des problèmes potentiels de salinité.

TABLEAU 7.2 - Tolérance relative au sel des cultures herbacées: légumes et fruits (Maas, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil dS/m	Gradient% par dS/m	Classe
Artichaut	<i>Cynara scolymus</i>	--	--	MT*
Asperge	<i>Asparagus officinalis</i>	4,1	2	T
Aubergine	<i>Solanum melongena esculentum</i>	1,1	6,9	MS
Betterave rouge	<i>Beta vulgaris</i>	4,0	9	MT
Broccoli	<i>Brassica oleracea botrytis</i>	2,8	9,2	MS
Carotte	<i>Daucus carota</i>	1	14	S
Céleri	<i>Apium graveolens</i>	1,8	6,2	MS
Chou	<i>B. oleracea capitata</i>	1,8	9,7	MS
Chou-fleur	<i>Brassica oleracea botrytis</i>	--	--	MS*
Chou-rave	<i>B. oleracea gongylode</i>	--	--	MS*
Chou vert	<i>Brassica oleracea acephala</i>	--	--	MS*
Choux de Bruxelles	<i>Oleracea gemmifera</i>	--	--	MS*
Concombre	<i>Cucumis sativa</i>	2,5	13	MS
Courge	<i>Curcubita melo melopepo</i>	3,2	16	MS
Courgette	<i>Curcubita pepo</i>	4,7	9,4	MT
Épinard	<i>Spinacia oleracea</i>	2	7,6	MS
Fraise	<i>Fragaria sp.</i>	1	33	S
Gombo	<i>Abelmoschus esculentus</i>	--	--	S
Haricot	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1	19	S
Haricot mungo	<i>Vigna radiata</i>	1,8	20,7	S
Laitue	<i>Lactuca sativa</i>	1,3	13	MS
Maïs	<i>Zea mays</i>	1,7	12	MS
Melon	<i>Cucumis melo</i>	--	--	MS
Navet	<i>Brassica rapa</i>	0,9	9	MS
Oignon	<i>Akkium cepa</i>	1,2	16	S
Panais	<i>Pastinaca sativa</i>	--	--	S*
Pastèque	<i>Citrullus lanatus</i>	--	--	MS*
Patate douce	<i>Ipomoea batatas</i>	1,5	11	MS
Piment	<i>Capsicum annuum</i>	1,5	14	MS
Pois	<i>Pisum sativa</i>	--	--	S*
Pommes de terre	<i>Solanum tuberosum</i>	1,7	12	MS
Potiron	<i>Cucurbita pepo pepo</i>	--	--	MS*
Radis	<i>Raphanus sativus</i>	1,2	13	MS
Tomate	<i>Lycopersicon lycopersicum</i>	2,5	9,9	MS
Tomate cerise	<i>L.esculentum var cerasiforme</i>	1,7	9,1	MS

Remarques:

S: sensible, MS: modérément sensible, MT: modérément tolérant, T: tolérant. Les données ci-dessus ne doivent être considérées que comme un guide de valeur relative de tolérance entre les cultures. Les tolérances en valeurs absolues sont variables en fonction du climat, des conditions du sol et des pratiques culturales.

Dans les sols gypseux, les plantes toléreront un ECe d'environ 2 dS/m plus élevé que le niveau indiqué.

\*: classes estimées

TABLEAU 7.3 - Tolérance relative au sel des cultures herbacées: cultures boisées (Maas, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil dS/m	Gradient% par dS/m	Classe
Abricot **	<i>Prunus americana</i>	1,6	24	S
Amande **	<i>Prunus dulcis</i>	1,5	19	S
Ananas	<i>Ananas comosus</i>	--	--	MT*
Avocat **	<i>Persea americana</i>	--	--	S
Cerise	<i>Prunus besseyi</i>	--	--	S*
Cerise douce	<i>Prunus avium</i>	--	--	S*
Cherimole	<i>Annona cherimola</i>	--	--	S*
Citron **	<i>Citrus limon</i>	--	--	S
Figue	<i>Ficus carica</i>	--	--	MT*
Framboise	<i>Rubus idaeus</i>	--	--	S
Fruit de la passion	<i>Passiflora edulis</i>	--	--	S*
Grenade	<i>Punica granatum</i>	--	--	MT*
Groseille	<i>Ribes sp.</i>	--	--	S*
Groseille verte	<i>Ribes sp.</i>	--	--	S*
Guayule	<i>Parthenium argentantum</i>	15	3	T
Jambose	<i>Syzygium jambos</i>	--	--	S*
Jojoba **	<i>Simmondsia chinensis</i>	--	--	T
Jujube	<i>Ziziphus jujuba</i>	--	--	MT*
Kaki	<i>Diospyros virginiana</i>	--	--	S*
Lime	<i>Citrus aurantiifolia</i>	--	--	S*
Mangue	<i>Mangifera indica</i>	--	--	S*
Mûre	<i>Rubus sp.</i>	1,5	22	S
Mûre (de Boysen)	<i>Rubus ursinus</i>	1,2	22	S
Néfle	<i>Japoneriobotrya japonica</i>	--	--	S*
Olive	<i>Olea europea</i>	--	--	MT
Orange	<i>Citrus sinensis</i>	1,7	16	S
Palmier dattier	<i>Phoenix dactylifera</i>	4	3,6	T
Pamplemousse**	<i>Citrus paradisi</i>	1,8	16	S
Papaye **	<i>Carica papaya</i>	--	--	MT
Pêche	<i>Prunus persica</i>	1,7	21	S
Poire	<i>Pyrus communis</i>	--	--	S*
Pomélo	<i>Citrus maxima</i>	--	--	S*
Pomme	<i>Malus sylvestris</i>	--	--	S
Prune **	<i>Prunus domestica</i>	1,5	18	S
Raisin **	<i>Vitis sp.</i>	1,5	9,6	MS
Ricin	<i>Ricinus communis</i>	--	--	MS
Tangerine	<i>Citrus reticulata</i>	--	--	S*
Zapote blanche	<i>Casimiroa edulis</i>	--	--	S*

Remarques:

Données applicables lorsque les rhizomes utilisés n'accumulent pas rapidement le Na ou le Cl, ou lorsque ces ions ne sont pas prédominants dans le sol.

Dans les sols gypseux, les plantes toléreront un ECe d'environ 2dS/m plus élevé que le niveau indiqué.

\*: classes estimées

\*\* : tolérance en cours de croissance plutôt qu'à la récolte

TABLEAU 7.4 - Tolérance relative au sel des cultures herbacées: graminées et fourrages (Maas, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil dS/m	Gradient% par dS/m	Classe
Agropyrum cristatum	<i>A. cristatum</i>	7,5	6,9	T
Agropyrum elongatum	<i>A. elongatum</i>	7,5	4,2	T
Agropyrum intermedium	<i>A. intermedium</i>	--	--	MT*
Agropyrum sibiricum	<i>Agropyron sibiricum</i>	3,5	4	MT
Agropyrum smithii	<i>A.smithii</i>	--	--	MT*
Agrostis stolonifère	<i>Agrostis stolonifera palustris</i>	--	--	MS
Alkali sacaton	<i>Sporobolus airoides</i>	--	--	T*
Alpiste-roseaux	<i>Phalaris arundinacea</i>	--	--	MT
Alpiste tubéreux	<i>Phalaris tuberosa</i>	4,6	7,6	MT
Astragale	<i>Astragalus cicer</i>	--	--	MS*
Avoine (fourrage)	<i>Avena sativa</i>	--	--	MS*
Barbon, Angleton	<i>Dichanthium aristatum</i>	--	--	MS*
Blé (fourrage)	<i>Triticum aestivum</i>	4,5	2,6	MT
Blé dur (fourrage)	<i>T. turgidum</i>	2,1	2,5	MT
Boutelou gracieux	<i>Bouteloua gracilis</i>	--	--	MS*
Brome	<i>Bromus unioloides</i>	--	--	MT*
Brome de montagne	<i>Bromus marginatus</i>	--	--	MT*
Brome inerme	<i>B. inermis</i>	--	--	MS
Cenchrus	<i>Cenchrus ciliaris</i>	--	--	MS*
Chiendent à tiges rudes	<i>A. trachycaulum</i>	--	--	MT
Chloris	<i>Chloris gayana</i>	--	--	MT
Colza	<i>Brassica napus</i>	--	--	MT*
Dactyle pelotonné	<i>Dactylis glomerata</i>	1,5	6,2	MS
Diplachne fusca	<i>Diplachne fusca</i>	--	--	T*
Distichlis dressé	<i>Distichlis stricta</i>	--	--	T*
Elyme de l'Altai	<i>Elymus angustus</i>	--	--	T
Elyme canadien	<i>E. canadensis</i>	--	--	MT*
Elyme non barbu	<i>E. triticoides</i>	2,7	6	MT
Elyme russe	<i>E. junceus</i>	--	--	T
Eragrostis	<i>Eragrostis sp.</i>	2,0	8,4	MS
Fétuque, grande	<i>Festuca elatior</i>	3,9	5,3	MT
Fétuque, prairie	<i>F. pratensis</i>	--	--	MT*
Fromental haut	<i>Arrhenatherum danthonia</i>	--	--	MS*
Herbe de Dallis	<i>Paspalum dilatatum</i>	--	--	MS*
Herbe des Bermudes	<i>Cynodon dactylon</i>	6,9	6,4	T
Lotier	<i>Sphaerophysa salsula</i>	2,2	7	MS
Lotier corniculé, feuille étroite	<i>L. corniculatus tenuifolium</i>	5	10	MT
Lotier corniculé, feuille large	<i>L. corniculatus arvensis</i>	--	--	MT
Lotier des marais	<i>Lotus uliginosus</i>	2,3	19	MS
Luzerne	<i>Medicago sativa</i>	2	7,3	MS
Mais (fourrage)	<i>Zea mays</i>	1,8	7,4	MS
Métilot	<i>Melilotus</i>	--	--	MT*
Métilot blanc	<i>Melilotus alba</i>	--	--	MT*
Niébé (fourrage)	<i>Vigna unguiculata</i>	2,5	11	MS
Orge (fourrage)	<i>Hordeum vulgare</i>	6	7,1	MT
Panic bleu	<i>Panicum antidotale</i>	--	--	MT*
Phléole des prés	<i>Phleum pratense</i>	--	--	MS*
Pimprenelle	<i>Poterium sanguisorba</i>	--	--	MS*
Puccinellie de Nuttal	<i>Puccinellia airoides</i>	--	--	T*
Raygrass, Italien	<i>Lolium italicum multiflorum</i>	--	--	MT*
Raygrass, pérenne	<i>L. perenne</i>	5,6	7,6	MT
Seigle (fourrage)	<i>Secale cereale</i>	--	--	MS*
Sesbania	<i>Sesbania exaltata</i>	2,3	7	MS
Siratro	<i>Macropitilium atropurpureum</i>	--	--	MS
Sorgho du Soudan	<i>Sorghum sudanense</i>	2,8	4,3	MT
Trèfle alsike	<i>Trifolium hybridum</i>	1,5	12	MS
Trèfle, Bersim	<i>Trifolium alexandrinum</i>	1,5	5,7	MS
Trèfle, blanc hollandais	<i>Trifolium repens</i>	--	--	MS*

TABLEAU 7.4 - Tolérance relative au sel des cultures herbacées: graminées et fourrages (Maas, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil dS/m	Gradient% par dS/m	Classe
Trèfle ladino	<i>Trifolium repens</i>	1,5	12	MS
Trèfle rouge	<i>Trifolium pratense</i>	1,5	12	MS
Vesce commune	<i>Vicia angustifolia</i>	3	11	MS
Vulpin des prés	<i>Alopecurus pratensis</i>	1,5	9,6	MS

\*: classes estimées

Remarques:

Les données ci-dessus ne doivent être considérées que comme un guide de valeur relative de tolérance entre les cultures. Les tolérances en valeurs absolues sont variables en fonction du climat, des conditions du sol et des pratiques culturales.

Dans les sols gypseux, les plantes toléreront un ECe d'environ 2 dS/m plus élevé que le niveau indiqué.

TABLEAU 7.5 - Limites de tolérance au bore pour les cultures agricoles (MAAS, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil dS/m **	Gradient% par mg/l
<b>Très sensible</b>			
Citron*	<i>Citrus limon</i>	--	--
Mûre	<i>Rubus sp.</i>	--	--
<b>Sensible</b>			
Avocat	<i>Persea americana</i>	0,5–0,75	--
Pamplemousse*	<i>Citrus paradisi</i>	0,5–0,75	--
Orange*	<i>C. sinensis</i>	0,5–0,75	--
Abricot*	<i>Prunus americana</i>	0,5–0,75	--
Pêche*	<i>P. persica</i>	0,5–0,75	--
Cerise*	<i>P. avium</i>	0,5–0,75	--
Prune*	<i>P. domestica</i>	0,5–0,75	--
Kaki*	<i>Diospyros kaki</i>	0,5–0,75	--
Figue «kadota»**	<i>Ficus carica</i>	0,5–0,75	--
Raisin*	<i>Vitis vinifera</i>	0,5–0,75	--
Noix*	<i>Juglans regia</i>	0,5–0,75	--
Noix de Pécan*	<i>Carya illinoensis</i>	0,5–0,75	--
Oignon	<i>Allium cepa</i>	0,5–0,75	--
Ail	<i>Allium sativum</i>	0,75–1,0	--
Patate douce	<i>Ipomea batatas</i>	0,75–1,0	--
Blé	<i>Triticum aestivum</i>	0,75–1,0	0,33
Tournesol	<i>Helianthus annuus</i>	0,75–1,0	--
Haricot mungo*	<i>Vigna radiata</i>	0,75–1,0	--
Sésame*	<i>Sesamum indicum</i>	0,75–1,0	--
Lupin*	<i>Lipinus hartwegii</i>	0,75–1,0	--
Fraise*	<i>Fragaria ap.</i>	0,75–1,0	--
Topinambour**	<i>Helianthus tuberosus</i>	0,75–1,0	--
Haricot rouge*	<i>Phaseolus vulgaris</i>	0,75–1,0	--
Haricot de Lima	<i>P. lunatus</i>	0,75–1,0	--
Arachide	<i>Arachis hypogaea</i>	0,75–1,0	--

\*: tolérance basée sur une réduction de la croissance végétative

TABLEAU 7.5 - Limites de tolérance au bore pour les cultures agricoles (MAAS, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil dS/m **	Gradient% par mg/l
<b>Modérément sensible</b>			
Broccoli	<i>Brassica oleracea botrytis</i>	1,0	1,8
Poivron rouge	<i>Capsicum annuum</i>	1,0–2,0	--
Pois*	<i>Pisum sativa</i>	1,0–2,0	--
Carotte	<i>Daucus carota</i>	1,0–2,0	--
Radis	<i>Raphanus sativus</i>	1,0–2,0	1,4
Pomme de terre	<i>Solanum tuberosum</i>	1,0–2,0	--
Concombre	<i>Cucumis sativus</i>	1,0–2,0	--
<b>Modérément tolérant</b>			
Chou*	<i>Brassica oleracea capitata</i>	2,0–4,0	--
Navet	<i>B. rapa</i>	2,0–4,0	--
Pâturin des prés*	<i>Poa pratensis</i>	2,0–4,0	--
Orge	<i>Hordeum vulgare</i>	3,4	4,4
Niébé	<i>Vigna unguiculata</i>	2,5	12
Avoine	<i>Avena sativa</i>	2,0–4,0	--
Mais	<i>Zea mays</i>	2,0–4,0	--
Artichaut*	<i>Cynara scolymus</i>	2,0–4,0	--
Tabac*	<i>Nicotiana tabacum</i>	2,0–4,0	--
Moutarde*	<i>Brassica juncea</i>	2,0–4,0	--
Trèfle doux*	<i>Melilotus indica</i>	2,0–4,0	--
Courge	<i>Cucurbita pepo</i>	2,0–4,0	--
Melon*	<i>Cucumis melo</i>	2,0–4,0	--
Chou-fleur	<i>B. oleracea botrytis</i>	2,0–4,0	1,9
<b>Tolérant</b>			
Luzerne*	<i>Medicago sativa</i>	4,6–6,0	--
Vesce, grenat*	<i>Vicia bengalensis</i>	4,6–6,0	--
Persil*	<i>Petroselinum crispum</i>	4,6–6,0	--
Betterave rouge	<i>Beta vulgaris</i>	4,6–6,0	--
Betterave sucrière	<i>B. vulgaris</i>	4,9	4,1
Tomate	<i>Lycopersicum</i>	5,7	3,4
<b>Très tolérant</b>			
Sorgho	<i>Sorghum bicolor</i>	7,4	4,7
Coton	<i>Gossypium hirsutum</i>	6,0–10,0	--
Céleri*	<i>Apium graveolens</i>	9,8	3,2
Asperge*	<i>Asparagus officinalis</i>	10,0–15,0	--

\*: tolérance basée sur une réduction de la croissance végétative

\*\* : concentration maximale autorisée dans l'eau du sol, sans réduction de rendement. La tolérance au bore peut varier en fonction du climat, des conditions dans le sol et des variétés de culture.

**TABLEAU 7.6 - Tolérance au sel des buissons ornementaux,  
arbres et couvertures de sols (Maas, 1990)**

Nom commun	Nom botanique	Max. autorisé ECe dS/m
<b>Très sensible</b>		
Jasmin	<i>Trachelospermum jasminoides</i>	1-2
Cotonéastre	<i>Cotoneaster congestus</i>	1-2
Mahonia à feuille de houx	<i>Mahonia aquifolium</i>	1-2
Photinia	<i>Photinia fraseri</i>	1-2
<b>Sensible</b>		
Feijoa	<i>Feijoa sellowiana</i>	2-3
Houx chinois.	<i>Burford Ilex cornuta</i>	2-3
Rosier cv. Grenoble	<i>Rosa sp.</i>	2-3
Abelia à grandes fleurs	<i>Abelia grandiflora</i>	2-3
Podocarpus à grosses fleurs	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	2-3
Tulipier	<i>Liriodendron tulipifera</i>	2-3
Hedera Algérien	<i>Hedera canariensis</i>	3-4
Pittosporum japonais	<i>Pittosporum tobira</i>	3-4
Bambou Nandina	<i>Nandina domestica</i>	3-4
Hibiscus chinois	<i>Hibiscus rosa sinensis</i>	3-4
Laurier tin	<i>Viburnum tinus</i>	3-4
Arbousier commun	<i>Arbutus unedo</i>	3-4
Lilas des Indes	<i>Lagerstroemia indica</i>	3-4
<b>Modérément sensible</b>		
Troène	<i>Ligustrum lucidum</i>	4-6
Lantana	<i>Lantana camara</i>	4-6
Orchidée	<i>Bauhinia purpurea</i>	4-6
Magnolia à grandes fleurs	<i>Magnolia grandiflora</i>	4-6
Buis japonais	<i>Buxus microphylla var. japonica</i>	4-6
Xylosma	<i>Xylosma congestum</i>	4-6
Pin noir japonais	<i>Pinus thunbergiana</i>	4-6
Aubépine d'Inde	<i>Raphiolepis indica</i>	4-6
Bois de rainette	<i>Dodonaea viscosa</i>	4-6
Arbre de vie oriental	<i>Platyclusus orientalis</i>	4-6
Elaeagnus épineux	<i>Elaeagnus pungens</i>	4-6
Genévrier chinois	<i>Uniperus chinensis</i>	4-6
Buisson ardent	<i>Pyracantha fortuneana</i>	4-6
Prunier cerise	<i>Prunus cerasifera</i>	4-6
<b>Modérément tolérant</b>		
Osier	<i>Callistemon viminalis</i>	6-8
Laurier rose	<i>Nerium oleander</i>	6-8
Palmier	<i>Chamerops humilis</i>	6-8
Dracaena bleu	<i>Cordiline indivisa</i>	6-8
Romarin	<i>Rosmarinus officinalis</i>	6-8
Pin d'Alep	<i>Pinus halepensis</i>	6-8
Copalm	<i>Liquidambar styraciflua</i>	6-8
<b>Tolérant</b>		
Cerisier en brosse	<i>Syzygium paniculatum</i>	> 8
Ceniza	<i>Leucophyllum frutescens</i>	> 8
Prune du Natal	<i>Carsa grandiflora</i>	> 8
Poirier à feuillage persistant	<i>Pyrus kawakamii</i>	> 8
Bougainvillée	<i>Bougainvillea spectabilis</i>	> 8
Pin parasol	<i>Pinus pinea</i>	> 8
<b>Très tolérant</b>		
Ficoïde blanc	<i>Delosperma alba</i>	> 10
Ficoïde rose	<i>Drosanthemum hispidum</i>	> 10
Ficoïde pourpre	<i>Labranthus productus</i>	> 10
Ficoïde cruciforme	<i>Hymenocylus croceus</i>	> 10

**Remarque:**

Les salinités excédant le maximum admissible d'ECe peuvent entraîner la brûlure des feuilles, la perte du feuillage et/ou un flétrissement excessif.

TABLEAU 7.7 - Limites de tolérance au bore pour les plantes ornementales (Maas, 1990)

Nom commun	Nom botanique	Seuil en mg/litre
<b>Très sensible</b>		
Mahonia à feuille de houx	<i>Mahonia aquifolium</i>	
Photinia	<i>Photinia x fraseri</i>	
Xylosma	<i>Xylosma congestum</i>	
Elaeagnus épineux	<i>Elaeagnus pungens</i>	
Laurier tin	<i>Viburnum tinus</i>	
Troène japonais	<i>Ligustrum japonicum</i>	
Feijoa	<i>Feijoa sellowiana</i>	
Fusain	<i>Euonymu japonica</i>	
Pittosporum japonais	<i>Pittosporum tobira</i>	
Houx chinois	<i>Ilex cornuta</i>	
Genévrier	<i>Juniperus chinensis</i>	
Lantana jaune	<i>Lantana camara</i>	
Orme américain	<i>Ulmus americana</i>	
<b>Sensible</b>		
Zinnia	<i>Zinnia elaeagnus</i>	0,5-1,0
Pensée	<i>Viola tricolor</i>	0,5-1,0
Violette	<i>Viola odorata</i>	0,5-1,0
Pied d'alouette	<i>Delphinum sp.</i>	0,5-1,0
Abelia à grandes fleurs	<i>Abelia x grandiflora</i>	0,5-1,0
Romarin	<i>Rosmarinus officinalis</i>	0,5-1,0
Arbre de vie oriental	<i>Platyclusus orientalis</i>	0,5-1,0
Géranium	<i>Pelargoium x hortorum</i>	0,5-1,0
<b>Modérément sensible</b>		
Glaïeul	<i>Gladiolus sp.</i>	1,0-2,0
Souci	<i>Calendula officinalis</i>	1,0-2,0
Poinsettia	<i>Euphorbia pulcherrima</i>	1,0-2,0
Aster de Chine	<i>Callistephus chinensis</i>	1,0-2,0
Gardenia	<i>Gardenia sp.</i>	1,0-2,0
Podocarpe à grandes feuilles	<i>Podocarpus macrophyllus</i>	1,0-2,0
Cerisier à brosse	<i>Syzygium paniculatum</i>	1,0-2,0
Dracéna bleu	<i>Cordyline indivisa</i>	1,0-2,0
Ceniza	<i>Leucophyllus frutescens</i>	1,0-2,0
<b>Modérément tolérant</b>		
Callistème à feuilles lancéolées	<i>Callistemon citrinus</i>	2,0-4,0
Pavot de Californie	<i>Eschscholzia californica</i>	2,0-4,0
Buis du Japon	<i>Buxus microphylla</i>	2,0-4,0
Laurier rose	<i>Nerium oleander</i>	2,0-4,0
Hibiscus chinois	<i>Hibiscus rosa-senensis</i>	2,0-4,0
Pois de senteur	<i>Lathyrus odoratus</i>	2,0-4,0
Oeillet	<i>Dianthus caryophyllus</i>	2,0-4,0
<b>Tolérant</b>		
Aubépine d'Inde	<i>Raphiolepis indica</i>	6,0-8,0
Prunier du Natal	<i>Carissa grandiflora</i>	6,0-8,0
Oxalis	<i>Oxalis bowiei</i>	6,0-8,0

**Remarques:**

Les espèces sont classées dans l'ordre croissant de tolérance, sur la base de l'apparence aussi bien que de la réduction de croissance.

Une concentration de bore excédant le seuil admissible peut conduire à une brûlure ou même à une perte des feuilles.

### ***Critères de qualité des eaux***

L'établissement de normes permettant de disposer d'un guide pour juger si une eau convient pour l'irrigation a souvent été demandé. Toute classification doit être basée sur la concentration totale et la composition des sels. Toutefois, la qualité de l'eau pour l'irrigation dépend aussi d'autres facteurs associés, tels que la plante, le sol, le climat et les pratiques de gestion. La classification adoptée par la FAO en 1985 (d'après Maas), et proposée comme guide initial (tableau 7.8), s'est révélée très pratique et utile pour évaluer la qualité de l'eau pour son utilisation au niveau de l'exploitation. Les paramètres principaux de la classification de l'eau (réaction des cultures à la salinité, risques du sodium et toxicité) sont clairement définis et compris, aussi bien par les agents de vulgarisation que par les fermiers eux-mêmes pour répondre aux besoins d'une bonne gestion et d'un suivi des activités d'irrigation.

Avec la méthode d'évaluation de la FAO, les quatre paramètres pris en considération sont ceux présentés ci-dessous, à savoir la salinité totale, la réaction des cultures à la salinité, les risques liés au sodium et les problèmes de toxicité.

#### *La salinité totale*

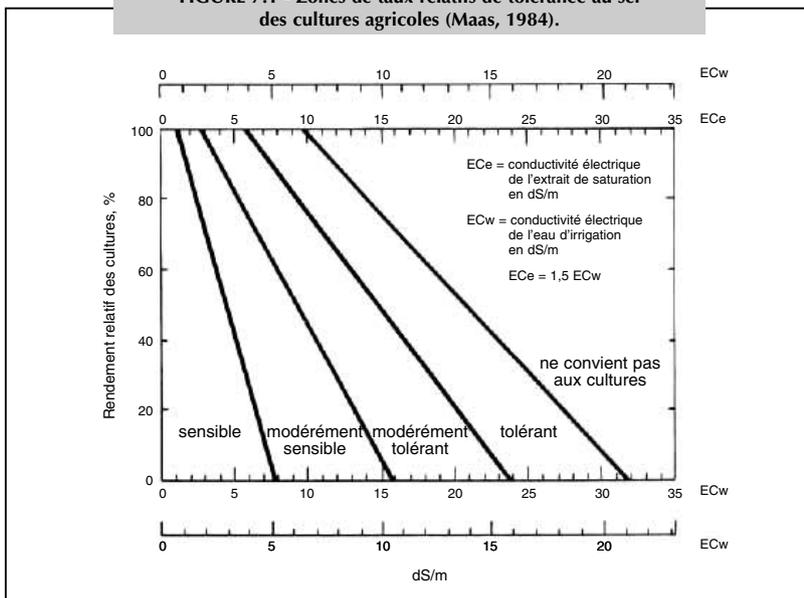
**TABLEAU 7.8 - Classification de l'eau en fonction de la salinité**

	<b>EC dS/m</b>	<b>TDS mg/litre</b>
Eau non saline	< 0,7	< 500
Eau saline	0,7–42	500–30 000
Eau légèrement saline	0,7–3,0	500–2 000
Eau modérément saline	3,0–6,0	2 000–4 000
Eau très saline	> 6,0	> 4 000
Eau très fortement saline	> 14,0	> 9 000
Saumure	> 42	> 30 000

#### *La réaction des cultures à la salinité*

La figure ci-dessous indique la réduction de rendement attendue pour chaque culture en fonction de sa sensibilité/tolérance au sel. Ce graphique permet une estimation rapide des deux principaux paramètres de qualité de l'eau.

FIGURE 7.1 - Zones de taux relatifs de tolérance au sel des cultures agricoles (Maas, 1984).



### Les risques liés au sodium

Le taux d'adsorption du sodium est couramment utilisé comme indice des risques liés au sodium dans les eaux et les sols, et comme un substitut du sodium échangeable du sol. Le taux d'adsorption du sodium (SAR) d'une eau donnée définit, dans une certaine mesure, la quantité relative de sodium susceptible d'être adsorbée par le sol. L'effet des ions de sodium dans l'eau d'irrigation sur la réduction du taux d'infiltration et de la perméabilité du sol est fonction de la concentration totale en sels, comme le montre le tableau 7.9.

TABLEAU 7.9 - Problème potentiel d'infiltration dû au sodium dans l'eau d'irrigation

Niveaux de salinité de l'eau d'irrigation (dS/m)	Réductions			
	Aucune	Légère	Moyenne	Sévère
$EC_w = 0,7$	SAR < 1	SAR 1-5	SAR 5-11	SAR > 11
$EC_w = 0,7-3,0$	< 10	10-15	15-23	> 23
$EC_w = 3,0-6,0$	< 25	> 25	Pas d'effet	Pas d'effet
$EC_w = 6,0-14,0$	< 35	> 35	Pas d'effet	Pas d'effet
$EC_w > 14$	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet	Pas d'effet

Source: extrait de Rhoades, Oster et Schroer.

*Les problèmes de toxicité*

Les problèmes de toxicité peuvent survenir à cause d'un excès de chlorure, de sodium, de bore, de bicarbonate, de nitrate et d'un pH anormal. L'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation doit inclure ces paramètres et quelques autres, en association avec tous les autres facteurs entrant en jeu.

**Contrôle de la salinité**

Les sels qui s'accumulent dans le sol ne peuvent être éliminés effectivement que par lessivage. Pour ce faire, suffisamment d'eau doit pénétrer la surface du sol pour engendrer une percolation profonde de haut en bas et un flux entraînant l'eau de drainage hors de la zone racinaire. La dose additionnelle nécessaire en plus de la dose d'irrigation est nommée besoin de lessivage (BL) et peut être estimée avec précision grâce à la relation:

$$LR = \frac{EC_w}{5(EC_e) - EC_w}$$

où **BL** est le besoin de lessivage en pourcentage de la dose d'irrigation et **EC<sub>e</sub>** le niveau de salinité admissible dans la solution de sol, essentiellement lié à la tolérance au sel de la plante cultivée à un potentiel de rendement de 100 pour cent. La valeur moyenne habituellement utilisée pour EC<sub>e</sub> est 1,5 EC<sub>w</sub>; dans ce cas BL = 0,15.

Le lessivage est particulièrement nécessaire pour préparer le sol pour des cultures à haute densité de semis, telles que les carottes, les oignons et les arachides. La salinité sur toute la zone doit être la même, sans différence entre les parties humidifiées et non humidifiées du champ durant la saison précédente. Le lessivage des sels dans la couche supérieure est particulièrement important, car les plantes sont sensibles à la salinité durant les premiers stades de leur croissance.

Il faut, pour contrôler le niveau de salinité dans la zone racinaire, effectuer de fréquentes observations avec échantillonnage du sol, qui permettront de déterminer en laboratoire la conductivité électrique de l'extrait de sol. L'utilisation de solutions du sol, extracteurs et dispositifs de mesure portables permet un suivi continu, qui favorise une intervention immédiate, de toute modification significative de EC dans la solution de sol, du taux de chlorure et nitrate, ainsi que du pH du sol résultant de l'irrigation et de la fertilisation.

### ***Micro-irrigation et contrôle de la salinité***

En irrigation par goutte-à-goutte, la distribution des sels dissous dans le profil du sol suit le modèle de l'écoulement d'eau, avec une tendance à l'accumulation à la périphérie de la masse de sol humide. Pendant la saison d'irrigation, il n'y a pas de concentration de sel dans la majeure partie de la zone humidifiée en dessous du distributeur, là où la plupart des racines se concentrent et fonctionnent et les valeurs de salinité y sont basses ou modérées. Près de la surface, en raison de l'évaporation, l'accumulation de sel est cinq fois plus élevée que dans les couches plus profondes, et augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du distributeur. Ce facteur, en combinaison avec l'utilisation d'eau d'irrigation de basse qualité et l'application de fertilisants dans l'ensemble du système, causera une augmentation de la salinité susceptible de créer des problèmes dans des zones où la pluviométrie annuelle n'excède pas 250 mm/an. Dans ce cas, il est essentiel d'inonder la superficie totale au moins une fois par an, à la fin de la saison, avec des quantités d'eau adéquates, de manière à lessiver les sols en dessous de la profondeur d'enracinement.

Le niveau de salinité dans la zone racinaire est lié à la qualité de l'eau, à la quantité de fertilisants et à la dose d'irrigation. L'accumulation de sels à proximité des distributeurs est inférieure à la moitié de celle qui existe entre les lignes de distributeurs. La valeur de conductivité électrique de l'extrait de saturation au-delà du distributeur est deux ou trois fois la valeur d'EC<sub>v</sub>, et entre les lignes elle est de 6 à 10 fois plus élevée. La concentration élevée en sels ne peut être contrôlée que par le lessivage ou la réduction des quantités de fertilisants durant la saison de croissance. En aucun cas la concentration en fertilisants dans l'eau d'irrigation ne doit être supérieure à EC = 0,5 dS/m, qui s'ajoute à la salinité totale de l'eau d'irrigation.

En irrigation par goutte-à-goutte, il n'est pas recommandé d'effectuer un surlessivage avec des quantités d'eau supplémentaires à chaque application durant la saison d'irrigation, car l'accumulation de sels atteindrait des niveaux dangereux. Le lessivage aura lieu après la récolte des cultures, entre les saisons d'irrigation, lorsque le taux de salinité est excessif et la pluviométrie déficitaire. Le lessivage est effectué en inondant la zone ou en utilisant des asperseurs à basse pluviométrie avec de très fines gouttes (tableaux 7.10, 7.11 et 7.12).

## Exemples d'analyses

TABLEAU 7.10 - Cas n° 1: Fiche d'analyse chimique de l'eau

<b>Soumis par:</b> Andreas Christoforou			<b>Date:</b> 11.9.97		
<b>Localité:</b> Potamia			<b>N° laboratoire:</b> W-76/97		
<b>Analyses requises:</b> Tous les ions + bore			<b>N° forage:</b> N332		
<b>Remarque:</b> Assolement prévu: arbres fruitiers, légumes					
<b>RESULTATS D' ANALYSE</b>					
<b>Conductivité électrique:</b> EC <sub>w</sub> dS/m: 3.6			<b>pH:</b> 7.1		
<b>Anions</b>	<b>mg/litre</b>	<b>meq/litre</b>	<b>Cations</b>	<b>mg/litre</b>	<b>meq/litre</b>
<b>Chlorure (Cl<sup>-</sup>)</b>	429	2.09	<b>Sodium (Na<sup>+</sup>)</b>	480	20.8
<b>Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>)</b>	552	11.50	<b>Potassium (K<sup>+</sup>)</b>	19	0.5
<b>Carbonate (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>)</b>	néant	néant	<b>Calcium (Ca<sup>++</sup>)</b>	160	8.0
<b>Bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	480	7.90	<b>Magnésium (Mg<sup>++</sup>)</b>	60	5.0
<b>Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	180	2.90	<b>Bore (B)</b>	1.5	--
<b>Total</b>	1 641	34.3		719	34.3
<b>TDS:</b>	2 360				
<p><b>Évaluation et remarques:</b> SAR = 8, Carbonate de sodium résiduel = néant  Eau de salinité moyenne – taux élevé de sodium et de bore à des niveaux toxiques pour la plupart des arbres fruitiers (agrumes, arbres à feuilles caduques, etc.), raisins, fraises et quelques légumes (oignon, ail, haricot) – aucun risque de sodium – avec une gestion appropriée, sur des sols légers avec une bonne infiltration et un drainage interne, sans couche imperméable, elle peut être utilisée pour l'irrigation de cultures tolérantes à la salinité et au bore, tels que l'olive, la grenade, la pistache, la datte, la plupart des légumes, melon, pomme de terre, etc. et les cultures fourragères – s'attendre à un retard probable dans le développement de la culture et à une certaine réduction du rendement – tout problème de bicarbonate peut être facilement résolu – à cause du taux élevé de nitrate, égal à 40 g net d'azote par m<sup>3</sup> d'eau, l'application de fertilisant azoté doit être réduit de 66 pour cent pour les fruitiers et de 20–30 pour cent pour les légumes. – irrigation fréquente recommandée – besoins de lessivage 0,15</p>					
<b>Signature:</b> <u>A. Phocaides</u>					

TABLEAU 7.11 - Cas n° 2: Fiche d'analyse chimique de l'eau

<b>Soumis par:</b> N. Papas			<b>Date:</b> 2.10.1997		
<b>Localité:</b> Orini			<b>N° laboratoire:</b> W/400/97		
<b>Analyses requises:</b> Tous les ions + bore			<b>N° forage:</b> N335		
<b>Remarque:</b> Utilisation pour l'irrigation					
<b>RESULTATS D' ANALYSE</b>					
<b>Conductivité électrique:</b> ECw dS/m: 2.1			<b>pH:</b> 8.35		
<b>Anions</b>	<b>mg/litre</b>	<b>meq/litre</b>	<b>Cations</b>	<b>mg/litre</b>	<b>meq/litre</b>
Chlorure (Cl <sup>-</sup> )	215	6.05	Sodium (Na <sup>+</sup> )	320	13.9
Sulfate (SO <sub>4</sub> )	244	5.10	Potassium (K <sup>+</sup> )	2	--
Carbonate (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	néant	néant	Calcium (Ca <sup>++</sup> )	48	2.4
Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	432	7.11	Magnésium (Mg <sup>++</sup> )	31	2.6
Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	41	0.66	Bore (B)	0.56	
<b>Total</b>	932	18.9		401	18.9
<b>TDS:</b>	1 333				
<p><b>Évaluation et remarques:</b> SAR = 9, Carbonate de sodium résiduel = 2,11  Eau légèrement salée – pas de risque dû au sodium, aucun problème sérieux de toxicité – avec une gestion appropriée, sur des sols légers avec une bonne structure et un drainage interne, elle convient pour la plupart des cultures – le bicarbonate peut entraîner quelques problèmes de déficience en micro-nutriments qui peuvent être résolus.</p>					
<b>Signature:</b> <u>A. Phocaidès</u>					

TABLEAU 7.12 - Cas n°3: Fiche d'analyse chimique de l'eau

<b>Soumis par:</b> G. Demosthenous			<b>Date:</b> 3.11.97		
<b>Localité:</b> Limassol			<b>N° laboratoire:</b>		
<b>Analyses requises:</b> Tous les ions + bore			<b>N° forage:</b>		
<b>Remarque:</b> Irrigation d'oliviers et autres cultures					
<b>RESULTATS D' ANALYSE</b>			<b>Analyste:</b> E. Iasonos		
			<b>Date:</b> 10.11.97		
<b>Conductivité électrique:</b> ECw dS/m: 2.3			<b>pH:</b> 8.7		
<b>Anions</b>	<b>mg/litre</b>	<b>meq/litre</b>	<b>Cations</b>	<b>mg/litre</b>	<b>meq/litre</b>
<b>Chlorure (Cl<sup>-</sup>)</b>	107	3.02	<b>Sodium (Na<sup>+</sup>)</b>	410	17.80
<b>Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)</b>	278	5.80	<b>Potassium (K<sup>+</sup>)</b>	6	0.10
<b>Carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)</b>	14	0.48	<b>Calcium (Ca<sup>++</sup>)</b>	8	0.40
<b>Bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	624	10.27	<b>Magnésium (Mg<sup>++</sup>)</b>	14	1.20
<b>Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	néant	néant	<b>Bore (B)</b>	2.88	
<b>Total</b>	1 023	19.5		438	19.5
<b>TDS:</b>	1 461				

**Évaluation et remarques:** SAR = 20, Carbonate de sodium résiduel = 8,67  
 Eau légèrement salée, bien que problématique – taux de bore de niveau toxique pour la majorité des arbres fruitiers et la plupart des cultures herbacées – danger de sévères problèmes d'infiltration dans le sol et de perméabilité suite à l'utilisation de cette eau – l'excès de sels bicarbonatés peut conduire à la chlorose de certaines plantes – le pH est plus élevé que la normale et peut conduire à un déséquilibre nutritionnel – cette eau doit être utilisée avec précaution, faire l'objet d'une excellente gestion, sur des sols légers avec un taux d'infiltration et une perméabilité élevés, ainsi qu'avec des cultures sélectionnées pour leur tolérance à la toxicité au bore, tels le palmiers-dattier, le chou, le chou-fleur, la courge, le persil, la tomate, le céleri, l'asperge, le maïs, la luzerne, la betterave sucrière – les oliviers existants seront irrigués avec réserve – des adjuvants pour l'amélioration des sols (fumier humide, gypse, etc.) devront être appliqués occasionnellement – des irrigations fréquentes seront recommandées – un suivi programmé avec précision est essentiel.

**Signature:** A. Phocaides

## **LA QUALITÉ PHYSIQUE DES EAUX D'IRRIGATION ET LEUR TRAITEMENT (FILTRATION)**

---

L'eau d'irrigation ne se trouve généralement pas à l'état pur, mais portant la plupart du temps des particules étrangères solides et d'autres impuretés. Le contenu solide des eaux d'irrigation se compose essentiellement de matériaux terreux, de matières inorganiques en suspension (limon, sable, feuilles, fines argiles et poussières de rouille) et de substances organiques (algues, bactéries, protozoaires) d'origine végétale, d'organismes vivants et de populations de bactéries. L'introduction de systèmes d'irrigation améliorés avec l'utilisation de réseaux de conduites fermées et de distributeurs à petits orifices, vulnérables au blocage, requiert l'élimination des solides en suspension pour protéger les distributeurs des risques de colmatage.

Le taux de matières en suspension dans l'eau d'irrigation peut varier dans de grandes proportions en fonction de la nature de la source. Les quatre principales sources d'eau utilisées dans les réseaux sous pression et les principaux types de solides en suspension (SS) qu'on y trouve sont:

- a) barrages et réservoirs de surface: algue verte (phytoplancton), bactéries et zooplancton de différents types et vase bactérienne (sulfates, fer et autres), fer et manganèse dissous, et autres types d'impuretés d'origine inorganique (débris, limon, argile, etc.);
- b) eaux souterraines (puits et forages): sable, limon, fer, manganèse, sulfate, carbonate et bactéries;
- c) eaux usées traitées: particules solides en suspension de diverses dimensions et formes;
- d) eaux des réseaux de conduites; zooplancton (se développant dans les conduites depuis des années, en colonies pouvant atteindre 5 mm et se transformant en deux ou trois jours en vers qui bloquent les filtres).

La qualité des eaux d'irrigation ne peut pas être clairement définie en fonction des problèmes de colmatage, mais peut seulement être classifiée de manière générale en quatre catégories: bonne – modérée – mauvaise – très mauvaise. Les diverses matières contenues dans l'eau, qui contribuent au colmatage des systèmes de micro-irrigation, peuvent être divisées en trois groupes principaux:

- particules en suspension de matières organiques ou inorganiques;
- éléments constitutifs précipités (fer, manganèse, calcium, magnésium);
- vases bactériennes.

Pour une évaluation plus approfondie, il est nécessaire d'examiner la quantité totale de matières en suspension, la distribution des dimensions des particules, la quantité totale de matières dissoutes, le pH de l'eau, la dureté, la turbidité, la teneur en fer et manganèse, la teneur en hydrogène sulfuré, ainsi que la population microbienne.

## **Filtration**

La filtration de l'eau d'irrigation est essentielle pour éviter le blocage du passage étroit des distributeurs, goutteurs, asperseurs et diffuseurs. Il s'agit d'un traitement mécanique de l'eau obtenu par l'installation de dispositifs de filtrage principaux (filtres) au niveau de la tête du réseau d'irrigation. Il fait partie intégrante des installations de conduites sous pression. Le débit de l'écoulement (capacité de filtration) peut influencer le type de filtration des ouvrages hydrauliques principaux, mais au niveau de la ferme, où les taux d'application sont faibles, le type et degré de filtration dépendent:

- du type de matières en suspension dans l'eau d'irrigation; et
- du besoin de filtration du système (des distributeurs, en particulier).

Les principaux filtres disponibles pour l'eau d'irrigation sont:

- **les filtres à gravier (à sable)**, qui fonctionnent sur le principe d'une filtration en profondeur et retiennent efficacement les grosses particules de matières organiques non fractionnées (algues) et poussières;
- **les hydrocyclones (ou séparateurs de dessablage)** fonctionnant sur le principe du flux à vortex et utilisés pour récolter les grandes quantités de sable présentes dans les eaux souterraines pompées;
- **les filtres à tamis (ou à disques ou anneau rainuré)** efficaces pour filtrer les matières en suspension inorganiques. Ils sont équipés d'éléments filtrants dont les perforations sont plus petites que les orifices de sortie (diodes) des distributeurs (jusqu'à 70 pour cent).

Dans les cas où l'eau contient toutes sortes de matières en suspension, il est nécessaire d'installer les trois types de filtres. Les hydrocyclones et les filtres à gravier sont toujours placés à l'amont de l'ouvrage de tête et les filtres à tamis à l'aval. Dans les systèmes de micro-irrigation, ces derniers sont toujours placés à l'aval du dispositif de fertilisation. Le degré de filtration est généralement indiqué en «mesh» (ancienne unité anglaise correspondant au nombre de perforations par pouce linéaire) ou en microns. Les besoins en filtration des divers distributeurs d'eau sont:

- 16–25 mesh (1 000–500 microns) pour des asperseurs à rotation lente sous moyenne pression (actionnés par impact);
- 60–100 mesh (250–120 microns) pour les mini et micro-asperseurs et mini-diffuseurs;
- 80–160 mesh (200–100 microns) pour les goutteurs.

## **Fonctionnement et entretien**

Le bon fonctionnement et l'entretien correct (nettoyage en particulier) des filtres sont d'une importance capitale pour assurer une filtration

efficace et éviter la formation d'une croûte d'impuretés générant d'autres risques de colmatage du système. Certains filtres sont conçus pour un fonctionnement complètement automatique sans main-d'œuvre, d'autres sont autonettoyants et certains sont équipés de mécanismes manuels de nettoyage et d'élimination des impuretés (une brève description des types de filtres figure au chapitre 3). La pression hydraulique du système assure le fonctionnement du filtre, mais l'automatisation du filtre requiert de l'électricité (courant alternatif ou continu). La fréquence de nettoyage est programmée soit à intervalle de temps fixe entre deux nettoyages consécutifs, soit lorsque la différence de pression des deux côtés du filtre augmente au-delà de la valeur initiale normale (0,2–0,3 bar). Les fournisseurs donnent des instructions détaillées pour le rétro-nettoyage (débit et vitesse de l'écoulement, direction du courant, etc.), selon le mécanisme et le mode de fonctionnement du dispositif filtrant.

### ***Application des produits chimiques***

L'application de produits chimiques dans l'eau d'irrigation avant le système de filtration peut réduire la quantité de matières en suspension, contrôler le développement des bactéries dans le système, décomposer les algues, dissoudre les particules solides et prévenir la sédimentation. Dans les réservoirs, le sulfate de cuivre est largement utilisé à une concentration de 2 ppm pour contrôler le développement des algues. Un traitement à l'acide réduira le pH de l'eau, prévenant ainsi la précipitation de solides dissous (en particulier des carbonates) et dissolvant les précipités existants. Les divers acides recommandés sont l'acide chlorhydrique (HCl), l'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et l'acide phosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Ce dernier est également un engrais, mais sa concentration doit être suffisante pour diminuer le pH < 6 et éviter les sédiments phosphoreux. La quantité d'acide dépend du pH de l'eau requis.

Le produit chimique le plus sûr et le moins coûteux utilisé en irrigation, pour un pH normal et des températures autour de 20°C, est le chlore sous la forme d'hypochlorite de sodium (NaOCl). Le temps d'exposition influence également l'efficacité de la chloration. Ce produit est disponible partout comme liquide ménager à des concentrations de 2 à 15 pour cent de chlore libre. L'application se fait par des injections permanentes ou intermittentes en cours d'irrigation, à de faibles concentrations régulières d'approximativement 5 à 10 ppm respectivement. Le contrôle de la chloration effective s'effectue par la mesure de la concentration du résidu libre en chlore de l'eau, qui doit être de l'ordre de 1 à 2 ppm à l'extrémité de la conduite d'irrigation. L'utilisation d'engrais ammoniacal doit être évitée durant la chloration. Un surdosage de chlore dans les réseaux d'irrigation peut entraîner le mouvement des sédiments, qui peut causer un colmatage sévère des distributeurs.

## ***LA QUALITÉ DES EAUX USÉES TRAITÉES POUR L'IRRIGATION (PHYSIQUE, BIOLOGIQUE ET CHIMIQUE)***

---

Les eaux usées traitées constituent une nouvelle source d'eau, qui devrait couvrir progressivement plus de 10 pour cent des besoins en eau de l'irrigation pour l'agriculture et l'aménagement du paysage. Les eaux traitées peuvent contenir divers contaminants chimiques (sels, éléments nutritifs et oligo-éléments) et des constituants biologiques indésirables (éléments pathogènes de l'eau, c'est-à-dire helminthes, protozoaires, bactéries et virus contenus dans les excréments de personnes saines et malades). L'utilisation incontrôlée de ce type d'eau est souvent associée avec d'importants impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement. Ceux-ci peuvent être minimisés par des pratiques de bonne gestion. Ce phénomène introduit ainsi un nouvel élément dans l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation. L'expression «eaux usées» se réfère aux égouts domestiques et aux eaux usées municipales ne contenant pas de quantités substantielles d'effluents industriels.

### ***Critères et paramètres d'évaluation***

L'utilisation d'eaux usées traitées doit toujours être planifiée, projetée et gérée de façon rationnelle. Dans le cas contraire, elle peut être dangereuse pour les humains, le bétail et l'environnement. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) a publié en 1989 des directives pour une utilisation sans danger des eaux usées et excréments pour l'agriculture et l'aquaculture (Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture). Ces directives sont actuellement en cours de révision et leur version réactualisée devrait être publiée en 2004. Dans ce contexte, on a défini certains critères supplémentaires de qualité des eaux, fondés sur la validité des eaux pour leur réutilisation dans l'irrigation en agriculture et dans l'aménagement du paysage et sur les manières et méthodes d'amélioration et de gestion, pour satisfaire les besoins des installations, des gestionnaires et des consommateurs.

L'évaluation des effluents traités est basée sur des critères mondialement établis et reconnus, se référant aux valeurs limites de certains paramètres physiques, chimiques et biologiques, de façon à éviter de possibles conséquences néfastes, lors de leur utilisation ou de leur rejet. Les paramètres suivants seront considérés afin de donner une vision correcte de la possibilité d'utiliser les eaux usées traitées et du niveau de leur validité pour les besoins de l'irrigation.

#### ***Paramètres chimiques***

- salinité totale, EC<sub>w</sub> (dS/m), TDS (mg/l);
- acidité/basicité, pH;
- dureté CaCO<sub>3</sub> mg/l;
- types et concentration en anions et cations me/l;

- taux d'adsorption du sodium, SAR;
- nitrate – azote NO<sub>3</sub> – N mg/l;
- phosphate phosphoreux, PO<sub>4</sub> - mg/l;
- oligo-éléments, mg/l;
- métaux lourds, mg/l.

### ***Paramètres physiques et biologiques***

- couleur;
- odeur;
- turbidité NTU;
- DBO 5, mg/l (demande biochimique en oxygène);
- DCO, mg/l (demande chimique en oxygène);
- SS, mg/l (solides en suspension);
- coliformes totaux /100 mg;
- coliformes fécaux;
- nématodes intestinaux.

### ***Impact sur les sols et les plantes***

L'évaluation des eaux usées et en particulier de leur qualité chimique, telle qu'elle est décrite ci-dessus, est une opération bien comprise, mise en place pour anticiper tous les effets à long terme possibles sur les sols et plantes irrigués, ainsi que pour protéger les eaux souterraines. L'expérience acquise jusqu'à ce jour indique qu'avec une gestion correcte (système d'irrigation amélioré, calendrier d'irrigation adapté), les effets de la salinité, de la toxicité et de l'azote sur les sols peuvent être maîtrisés. L'excès de NO<sub>3</sub> peut toutefois causer certains problèmes pour les plantes. Les oligo-éléments et les métaux lourds, présents dans bien des eaux traitées, ne sont que rarement à l'origine de sévères toxicités, bien que pour de nombreux végétaux ils s'accumulent dans les plantes elles-mêmes. Lorsque ces plantes sont consommées par le bétail, des risques sanitaires peuvent se développer. Par exemple, le plomb et le vanadium sont toxiques pour les cultures fourragères à des taux de concentration respectifs normaux et bas. Toutefois, le développement de risques sanitaires pour le bétail se fait sur de très longues périodes, 20 à 50 ans, et nécessite des applications répétées de métaux lourds au-dessus des taux maximums autorisés. Même dans ce cas, cela ne signifie pas qu'une phytotoxicité va apparaître. Aucun problème n'a été enregistré avec l'accumulation de métaux lourds dans les cultures ou les sols. En fait, il a été observé que les engrais conventionnels apportent de plus grandes quantités de métaux lourds.

### ***Effets sur l'environnement***

En ce qui concerne les effets sur l'environnement, les valeurs des paramètres chimiques et biologiques des effluents traités doivent être maintenues à des niveaux acceptables en vue de leur utilisation ou de leur rejet. Il existe toujours un risque que les eaux résiduelles utilisées pour l'irrigation puissent faciliter la transmission des infections par nématodes

intestinaux et des maladies causées par les bactéries fécales, aux consommateurs aussi bien qu'aux travailleurs agricoles. En fait, on n'a pas d'expérience ni de connaissances pratiques sur le mouvement vers l'aval des polluants des égouts, et les dispositifs et détecteurs de contaminants du sol sont trop coûteux. On sait toutefois que les nitrates contenus dans l'eau d'irrigation s'infiltrent et finalement atteignent les nappes souterraines. Il n'y a pas de doute qu'un processus similaire peut se produire avec le bore. En ce qui concerne les métaux lourds toxiques, les études ont montré que plus de 85 pour cent des oligo-éléments appliqués s'accumulent dans les quelques centimètres à la surface du sol. Il est néanmoins possible qu'à long terme l'application d'effluents traités contenant des éléments toxiques, plus particulièrement dans des sols acides ou sableux, puisse finalement conduire à leur mobilisation et leur lessivage vers des couches inférieures, polluant en dernier ressort les nappes souterraines. Il doit être souligné qu'aucun cas de ce genre n'a été signalé récemment.

### *Effets sur le système d'irrigation*

Les eaux résiduelles traitées contiennent généralement d'importantes quantités de matières organiques en suspension, d'autres immondices contenues dans l'eau et des impuretés d'origine inorganique, qui peuvent entraîner des obstructions et colmatages dans les distributeurs des systèmes d'irrigation.

### *Protection sanitaire (selon l'OMS)*

Du point de vue de la protection de la santé publique, les mesures disponibles peuvent être groupées selon les quatre grandes catégories suivantes:

- Processus de traitement et degré d'élimination des pathogènes: l'élimination des pathogènes est l'objectif principal du traitement des eaux usées en vue de leur utilisation pour l'irrigation. Les divers processus conventionnels de traitement primaire et secondaire, **sédimentation simple, boues activées, bio-filtration (filtres goutte-à-goutte), lagons aérés, fossés d'oxydation, désinfection des eaux brutes, et étangs de stabilisation des rejets**, ne peuvent éliminer efficacement les œufs des bactéries et des helminthes. Des **désinfections et filtrations supplémentaires** (traitement tertiaire) sont requises pour produire une eau de qualité acceptable pour satisfaire les recommandations permettant une irrigation sans restriction. Dans les régions arides et semi-arides, on utilise plutôt les étangs de stabilisation des eaux d'égouts. Avec une durée minimale de rétention de 11 jours, selon la température, ce procédé de traitement peut conduire, en comptant environ deux fois plus de temps, à un taux acceptable d'élimination des pathogènes (helminthes et bactéries), conforme aux normes de réutilisation. Il faut prévoir d'autres étangs de purification, en plus des installations conventionnelles de traitement.

- Sélection des cultures: en fonction de la qualité des eaux traitées, les diverses cultures pouvant être cultivées sans risque pour le consommateur sont classées en catégories (A, B et C), en accord avec les mesures requises pour la protection de la santé publique. (directives de l'OMS sur la qualité microbiologique recommandée pour l'utilisation des eaux usées en agriculture – 1989).
  - catégorie A: protection pour les travailleurs agricoles incluant les cultures industrielles, les cultures céréalières et les forêts, ainsi que les cultures alimentaires pour la mise en conserve;
  - catégorie B: protection pour les consommateurs, les fermiers et le public en général, qui porte sur les pâturages, les fourrages verts et les cultures arbustives, ainsi que sur les fruits et légumes, pelés ou cuits avant consommation;
  - catégorie C: irrigation sans restriction pour les légumes frais, les fruits irrigués par aspersion, les herbages et pelouses de parcs publics et terrains de sport, etc.

Il faut noter que la sélection en catégorie B fournit une protection seulement aux consommateurs, et non aux exploitants et travailleurs agricoles. Des mesures additionnelles doivent être prises, telles que des contrôles de l'exposition humaine.

- Méthode d'application de l'irrigation: l'irrigation au moyen de systèmes sous pression a beaucoup d'avantages par rapport aux méthodes traditionnelles de surface. Les méthodes gravitaires de surface exposent les fermiers à de plus grands risques, qui sont éliminés avec les systèmes de distribution par conduites posées en surface. Toutefois, si les eaux traitées ne sont pas recommandées pour l'irrigation sans réserve, les méthodes d'aspersion et de pulvérisation ne doivent pas être utilisées pour des cultures susceptibles d'être mangées crues, les fruits, et pour l'herbe et les pelouses des parcs publics et les terrains de sport. L'irrigation par goutte-à-goutte conventionnelle ou par barboteurs peut donner un degré plus élevé de protection sanitaire. L'irrigation par goutte-à-goutte sur paillis et l'irrigation souterraine procurent une protection maximale.
- Exposition humaine: la population potentiellement touchée par les risques de l'utilisation de l'eau résiduelle traitée sont les exploitants et leurs familles, les manutentionnaires des récoltes, les consommateurs des produits et les personnes vivant près des champs irrigués. Le risque peut être réduit par plusieurs mesures de protection telles qu'une bonne gestion, l'immunisation contre la typhoïde, l'hépatite et d'autres infections, l'exposition réduite par l'utilisation de vêtements et chaussures appropriés, une cuisson appropriée des aliments et d'autres mesures d'hygiène.

### ***Directives nationales et normes (le cas de Chypre)***

Dans de nombreux pays, les directives nationales pour la réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation sont généralement conformes à celles publiées par l'OMS. L'objectif de l'OMS est de fournir les connaissances générales et un guide pour les gouvernements, afin qu'ils puissent développer leurs normes nationales en accord avec les recommandations sanitaires internationales et en respectant la protection de la santé publique et la préservation de l'environnement. Un excellent exemple est le cas de Chypre. Dans ce pays, la réutilisation des effluents traités constitue une pratique relativement nouvelle, commencée au milieu des années 80; actuellement de nombreux progrès ont été réalisés et cette expérience peut servir de modèle pour de nombreux autres pays.

#### ***Les normes chypriotes***

Le Comité technique sur les effluents d'égouts et les boues, sous l'égide du Ministère de l'agriculture, des ressources naturelles et de l'environnement de la République de Chypre, a préparé des normes de qualité pour les effluents traités et boues en vue de leur réutilisation en agriculture et dans les aires d'agrément. Ces normes comprennent deux parties, les *Directives* et le *Code d'usage* qui semblent être à l'heure actuelle les normes les plus élaborées en comparaison des autres standards nationaux; c'est pourquoi elles ont été utilisées pour la rédaction de ce chapitre.

Les *Directives* prennent la variable DBO comme le principal indicateur d'un meilleur suivi et contrôle du processus de traitement, et la variable «solides en suspension» pour une désinfection effective des pathogènes et spécialement des virus, ainsi que pour éviter le colmatage des filtres et l'engorgement des distributeurs. Les coliformes fécaux sont inclus comme indicateur de pollution et les nématodes intestinaux comme un paramètre directement lié à un groupe de pathogènes et comme indicateur de pollution des protozoaires retirés des eaux résiduelles traitées, comme les vers intestinaux. Les méthodes de traitement (secondaire, tertiaire/stockage et désinfection, ou maturation par stabilisation) sont aussi incluses pour garantir les paramètres de qualité. Le *Code d'usage* rassemble des règles de pratique complémentaires indissociables des *Directives*, spécifiant les techniques de traitement, les méthodes d'irrigation pour chaque culture ainsi que les critères de manutention des systèmes d'irrigation, les mesures de sécurité, etc. Il incorpore également des mesures additionnelles qui empêchent la transmission des maladies. Les techniques et méthodes de traitement tertiaire sont également spécifiées.

#### ***Irrigation sous pression avec les eaux usées traitées***

Tous les systèmes d'irrigation sous pression décrits dans ce manuel peuvent être utilisés pour l'irrigation avec des eaux résiduelles traitées. Les normes de

qualité micro-biologique de l'eau, les pratiques culturales et le type de culture sont les principaux facteurs associés qui influencent la sélection du système d'irrigation. Différentes techniques et méthodes sont suggérées, pour de nombreuses raisons, pour l'irrigation de différentes cultures.

En général, les systèmes de micro-irrigation (goutte-à-goutte, asperseurs à faible débit, barboteurs et mini-asperseurs) conviennent pour l'utilisation de ce type d'eau, car ces méthodes localisées permanentes assurent un contact minimum de l'eau traitée avec les cultures et les fermiers (figures 7.2 et 7.3). L'aspersion conventionnelle (installations fixes) et les systèmes d'aspersion mécanisés (pivot central ou rampe transversale) conviennent sous certaines conditions. Les systèmes à bas coût (bassin ou sillon alimenté par tuyau, et tuyaux de distribution en surface) sont aussi recommandés. Leur utilisation dépend essentiellement de la qualité des eaux, du type de cultures, du risque potentiel pour la santé des ouvriers, le public et l'environnement et, finalement, des connaissances et compétences

**FIGURE 7.2 - Irrigation goutte-à-goutte du maïs avec des eaux recyclées.**



**FIGURE 7.3 - Aspersion avec des eaux municipales traitées.**



**TABLEAU 7.13 - Directives chypriotes pour l'utilisation  
en irrigation des effluents domestiques traités**

Cultures irriguées	DBO mg/l	SS mg/l	Coliformes fécaux /100 ml	Vers intestinaux/l	Traitement requis
Toutes cultures (a)	(A) 10*	10*	5* 15**	Nil	Secondaire et tertiaire + désinfection
Aires d'agrément d'accès illimité Légumes mangés cuits (b)	(A) 10* 15**	10* 15**	50* 100**	Nil	Secondaire et tertiaire + désinfection
Cultures pour consommation humaine Aires d'agrément d'accès limité	(A) 20*	30* 45**	200* 1 000**	Nil	Secondaire et stockage >7 jours et désinfection ou tertiaire et désinfection
	(B) --	--	200* 1 000**	Nil	Étang de stabilisation- maturation, temps total de rétention >30 jours ou secondaire et stockage >30 jours
Cultures fourragères	(A) 20* 30**	30* 45**	1 000* 5 000**	Nil	Secondaire et stockage >7 jours et désinfection ou tertiaire et désinfection
	(B) --	--	5 000*	Nil	Étang de stabilisation- maturation, temps total de rétention >30 jours ou secondaire et stockage >30 jours
Cultures industrielles	(A) 50* 70**	--	3 000* 10 000**	--	Secondaire et désinfection
	(B) --	--	3 000* 10 000**	--	Étang de stabilisation- maturation, temps total de rétention >30 jours ou secondaire et stockage >30 jours

(A) Méthodes de traitement mécanisées (boues activées)

(B) Méthodes physiques de traitement (étangs de stabilisation)

\* Ces valeurs ne doivent pas être dépassées dans 80 pour cent des échantillons par mois; 5 échantillons au minimum

\*\* Valeur maximale admise

(a) L'irrigation de plantes à feuilles, à bulbes et à racines mangé crus n'est pas autorisée

(b) Pommes de terre, betteraves, colocale

Remarque:

Les effluents ne doivent pas contenir de substances susceptibles de s'accumuler dans la partie comestible des cultures et prouvées toxiques pour les humains et les animaux.

des fermiers pour l'utilisation de ce type d'eau. Pour de plus amples détails, consulter le *Code d'usage chypriote* (voir tableau 7.13 ci-dessous), qui fournit les informations adéquates et spécifiques pour la presque totalité des cultures et techniques d'irrigation appropriées. L'installation de dispositifs de filtrage efficaces sur l'ouvrage de tête du système est d'une importance majeure, tout comme celle de l'automatisation des méthodes d'aspersion et de nébulisation pour l'application de l'eau.

### *Code d'usage pour l'utilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation à Chypre*

1. Les installations de traitement des eaux d'égout et de désinfection doivent être conservées et entretenues en permanence dans un état de fonctionnement satisfaisant et efficient aussi longtemps que les effluents traités sont destinés à l'irrigation, et conformément à la licence établie selon la législation existante.
2. Des employés qualifiés seront recrutés pour assurer le bon fonctionnement de l'installation de traitement et de désinfection; leurs nominations devront être approuvées par les pouvoirs compétents qui veilleront à ce que les personnes soient compétentes pour accomplir les missions requises, nécessaires pour satisfaire les conditions définies en 1).
3. L'installation de traitement et de désinfection doit être gérée sur une base quotidienne, conformément au programme établi par les pouvoirs compétents et les comptes-rendus de toutes les opérations effectuées, selon les instructions des pouvoirs compétents, seront établis et archivés. Une copie facilement accessible sera conservée dans les bâtiments de l'usine.
4. Tous les robinets, prises, et vannes du système d'irrigation seront cadenassés afin d'éviter leur utilisation par des personnes non autorisées. Toutes les prises seront peintes en rouge et étiquetées, de façon à avertir le public que l'eau n'est pas potable.
5. Aucune connection n'est autorisée avec des conduites ou ouvrages d'eau potable. Toutes les conduites transitant des eaux usées traitées seront marquées en rouge, de façon à les distinguer de celles utilisées pour l'eau potable. Dans les cas inévitables où des conduites d'eaux usées traitées et d'eau potable doivent être posées l'une à côté de l'autre, on enterrera la conduite d'eaux d'égout à au moins 50 cm en dessous de la conduite d'eau domestique.
6. Les méthodes d'irrigation autorisées et les conditions d'application diffèrent entre les divers types de plantations de la manière suivante:

- 6.1. Pelouses de parcs et plantes ornementales dans les aires d'agrément d'accès illimité:
- méthodes d'irrigation souterraine;
  - irrigation goutte-à-goutte;
  - asperseurs rétractables à basse pression, pluviométrie élevée, faible angle du jet ( $< 11^\circ$ ). L'aspersion se fera de préférence de nuit, quand il n'y a personne.

- 6.2. Pelouses de parcs et plantes ornementales dans les aires d'agrément d'accès limité, cultures industrielles et fourragères:
- méthodes d'irrigation souterraine;
  - irrigation goutte-à-goutte;
  - barboteurs;
  - méthodes d'irrigation de surface;
  - asperseurs à basse capacité;
  - irrigation par aspersion ou vaporisation, autorisée avec une zone tampon de 300 m.

Pour les cultures fourragères, il est recommandé d'arrêter l'irrigation au moins une semaine avant la récolte; aucun animal en lactation ne pourra brouter sur des pâturages irrigués par les effluents traités. Les services vétérinaires en seront informés.

- 6.3. Vignobles
- irrigation goutte-à-goutte;
  - mini-asperseurs et asperseurs (au cas où les cultures seraient mouillées, l'irrigation sera interrompue deux semaines avant la récolte).

Systèmes d'irrigation mobiles non autorisés. Aucun fruit ne sera récolté sur le sol.

- 6.4. Arbres fruitiers
- irrigation goutte-à-goutte;
  - barboteurs;
  - bassin alimenté par un tuyau;
  - mini-asperseurs.

Aucun fruit ne sera ramassé sous l'arbre, excepté pour les fruits à coque. Si les fruits récoltés sont mouillés, l'irrigation devra être arrêtée une semaine avant la récolte.

- 6.5. Légumes
- irrigation souterraine;
  - irrigation goutte-à-goutte.

Les cultures ne doivent pas entrer en contact avec les eaux traitées. D'autres méthodes d'irrigation peuvent être considérées.

6.6. Légumes consommés cuits

- irrigation souterraine;
- irrigation goutte-à-goutte;
- aspersion.

D'autres méthodes d'irrigation peuvent être autorisées après approbation des pouvoirs compétents, qui pourront restreindre les méthodes proposées afin de protéger la santé publique et l'environnement.

7. Les méthodes de traitement tertiaire suivantes sont acceptables:

- 7.1. coagulation plus floculation suivie d'une filtration rapide au travers de sable;
- 7.2. filtres à sable lents;
- 7.3. toute autre méthode susceptible d'assurer l'élimination totale des œufs d'helminthe et de réduire les coliformes fécaux à un niveau acceptable, sous réserve d'approbation par les pouvoirs compétents.

8. Des méthodes appropriées de désinfection doivent être appliquées lorsque les effluents d'eaux d'égout sont susceptibles d'être utilisés pour l'irrigation. En cas de chloration, le niveau total de chlore libre dans l'effluent à la sortie du réservoir de chloration, après une durée de contact d'une heure, doit être au moins de 0,5 mg/l mais inférieur à 2 mg/l.

9. Des dispositifs appropriés pour le suivi des paramètres essentiels de qualité seront maintenus sur le site de traitement.

