

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama Khemis-Miliana



Faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la terre
Département: Sciences Agronomiques

POLYCOPIE

Cours de qualité des eaux en Agriculture

Préparé par :

Dr : Merouche Abdelkader

Destiné aux étudiants de première année master en Aménagement hydro-agricole

Année Universitaire : 2019/2020

Avant propos

Ce cours est élaboré en faisant recours à différentes ressources bibliographiques : livres, articles et rapports publiés par les organisations internationales, principalement l'Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et l'organisation mondiale de la santé (OMS). Il est destiné aux étudiants de première année master en aménagement hydro-agricole. Comme il peut constituer un support pédagogique très utile pour tous les étudiants des autres spécialités issues de la filière des sciences agronomiques.

Ce cours synthétise les méthodes d'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation en passant par la présentation des critères de qualité, les relations de calcul des indices, leurs interprétations selon les normes internationales.

Également y est inclus un aperçu sur les facteurs de détérioration de la qualité des eaux. Il traite enfin la caractérisation des eaux usées ainsi les recommandations scientifiques indispensables pour leurs réutilisations dans le domaine de l'agriculture sans risques sur le sol et la santé humaine.

L'importance de ce cours réside dans le fait de permettre au lecteur d'avoir une synthèse de tous les paramètres relatifs à la qualité ainsi que les normes de leurs utilisations dans le même document. Le contenu est enrichi avec des exemples d'application corrigés pour faciliter l'assimilation au lecteur.

Une bibliographie succincte est présentée à la fin du cours qui servira comme base aux étudiants pour approfondir leurs recherches scientifiques.

On doit noter que le contenu de ce cours dans le canevas a été réorganisé ici en quatre chapitres pour plus d'assimilation pédagogique et enrichi avec un premier chapitre sur les notions fondamentales de l'eau et ses relations existantes avec le sol et la plante. Le volume horaire global du module est 45 heures dont 22,5 heures de cours et 22,5 heures de travaux pratiques.

Tables des matières

Introduction générale	1
Chapitre I : Notions fondamentales sur l'eau, le sol et la plante.....	2
1.1 Introduction.....	2
1.2 Propriétés et rôle de l'eau.....	2
1.3 Absorption racinaire de l'eau.....	3
1.4 Réserves en eau du sol.....	4
1.4.1 Reserve utile.....	4
1.4.2 Reserve facilement utilisable.....	5
1.4.3 Exemple d'application.....	5
1.5 Besoins en eau des cultures.....	6
Chapitre II : Qualité principale de l'eau d'irrigation.....	7
2.1 Introduction.....	7
2.2 Facteurs de dégradation de la qualité de l'eau.....	8
2.3 Echantillonnage et analyses de l'eau.....	8
2.4 Principaux éléments de qualité.....	9
2.4.1 Risques liés à la salinité.....	9
2.4.1.1 Conductivité électrique.....	9
2.4.1.2 Salinité potentielle	11
2.4.2 Risques liés à l'alcalinité.....	12
2.4.2.1 Risques liés au sodium.....	12
2.4.2.1.1 Ratio du sodium adsorbé.....	12
2.4.2.1.2 Ratio du sodium adsorbé ajusté	15
2.4.2.1.3 Exemple d'application.....	17
2.4.2.2 Risques liés aux carbonates et bicarbonates.....	19
2.4.2.2.1 Alcalinité résiduelle.....	19

2.4.2.2 Exemple d'application.....	19
2.5 Application des diagrammes de classification de l'eau d'irrigation	20
2.5 .1 Diagramme USSL.....	20
2.5.2 Diagramme de Wilcox.....	21
Chapitre III : Qualité spécifique de l'eau d'irrigation.....	21
3.1 Introduction.....	21
3.2 Indices de qualité spécifiques.....	22
3.2.1 Pourcentage du sodium.....	22
3.2.2 Pourcentage du sodium soluble.....	22
3.2. 3 Ratio de Kelly.....	23
3.2.4 Indice de Perméabilité	23
3.2.5 Ratio du magnésium.....	24
3.2.6 Exemple d'application sur les indices spécifiques.....	25
3.3 Risques liés à la toxicité spécifique.....	27
3.4 Actions de l'eau sur les ouvrages hydro-agricoles et réseaux d'irrigation.....	29
Chapitre IV : Réutilisation des eaux usées traitées en irrigation.....	30
4.1 Introduction.....	30
4.2 Mesures de précautions.....	31
4.3 Caractéristiques des eaux usées.....	32
4.3.1 Composition des eaux usées.....	32
4.3.2 Eléments polluants.....	33
4.4 Traitements des eaux usées.....	34
4.4.1 Prétraitement.....	34
4.4.2 Traitement primaire.....	34
4.4.3 Traitement secondaire (biologique).....	34
4.4.4 Traitement tertiaire (complémentaire).....	35
4.5 Recommandations sur la réutilisation des eaux usées traitées.....	36
4.5.1 Recommandations internationales.....	36

4.5.1.1 Paramètres microbiologiques.....	36
4.5.1.2 Eléments métalliques toxiques.....	39
4.5.2 Recommandations Algériennes.....	41
4.5.2.1 Paramètres physico-chimiques.....	41
4.5.2.2 Paramètres microbiologiques.....	41
4.5.2.3 Eléments métalliques toxiques.....	42

Introduction générale

La qualité des eaux en agriculture constitue l'une des préoccupations majeures des chercheurs et des décideurs dans le monde. Le développement de l'agriculture intensive faisant recours à l'irrigation est devenu une nécessité mondiale pour répondre aux besoins alimentaires croissants des populations. La sécurité alimentaire exige donc une meilleure productivité agricole tout en préservant simultanément les ressources naturelles relatives et la santé humaine. L'irrigation fut une source de richesse pour les nations depuis ses premières pratiques. Cependant, ceci ne peut pas exclure ses conséquences néfastes sur la dégradation, la salinisation des sols et même leurs pollutions dans certaines régions dans le monde. L'accélération du phénomène de la salinisation des surfaces agricoles dans les régions arides et semi-arides est due aux énormes quantités d'eau exigées par les cultures sous l'action d'une forte évapotranspiration potentielle.

L'eau, par ses utilisations rationnelles et diversifiées dans les différents secteurs d'activité: domestique, industriel et agriculture est au centre de tout développement durable.

En 2015, l'organisation mondiale des nations unies a prévu que la population mondiale affronterait un déficit en eau global de 40 % à l'horizon 2030.

En présence d'une démographie galopante et la tendance croissante du développement du niveau de vie des populations, les besoins en volumes d'eau douce ne cessent pas d'augmenter. Cela conduit systématiquement à la pollution de réserves d'eau importantes après leurs utilisations initiales. Cette situation de détérioration de la qualité de l'eau douce prend donc de plus en plus de l'ampleur dans le monde. Elle ne fait qu'aggraver le problème de pénurie surtout dans les pays à climat chaud et à ressources d'eau limitées. Devant ces faits accomplis, le recours à l'utilisation des eaux à moindre qualité d'une part et à la réutilisation des eaux usées traitées, principalement dans le secteur de l'agriculture d'autre part est devenu une réalité difficile à éviter.

Le présent support scientifique contribue à apporter un savoir faire pratique sur la qualité de l'eau en irrigation. Une connaissance préalable des caractéristiques qualitatives de l'eau aidera sans doute l'utilisateur de prévoir les risques et les impacts sur la plante, le sol et l'environnement. Par conséquent, l'exploitation de cette ressource vitale dans un cadre de développement durable pour le bien être des populations serait incontestable.

Chapitre I Notions fondamentales sur l'eau, le sol et la plante

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, on se limite à présenter brièvement les propriétés spécifiques de l'eau liées à son rôle naturel, ses disponibilités dans le sol et son absorption par les plantes. Egalement y ont été expliquées, les méthodes empiriques et expérimentales d'estimation des besoins en eau des cultures. Ceci permet aux utilisateurs d'optimiser les apports en eau d'irrigation suivant les exigences des cultures en réalisant une meilleure économie de cet élément vital.

1.2 Propriétés et rôle de l'eau

L'eau possède des propriétés exceptionnelles qui sont dues principalement à sa constitution moléculaire qui comporte deux pôles, l'un négatif et l'autre positif. En plus de sa meilleure chaleur spécifique, sa puissance de régulateur thermique..., l'eau est considérée comme un solvant naturel pour plus de 80 % des minéraux existants. Cette dernière caractéristique lui permet de faire dissoudre les différentes substances minérales et organiques, constituant en conséquence une source de nutriments disponibles pour les plantes. C'est en présence d'eau que les solutés sont formés dans le sol pour être absorbés ensuite par les racines des plantes suivant des mécanismes complexes qu'elles développent. Les caractéristiques diélectriques de l'eau permettent également son adsorption par le sol en restant donc disponible à l'absorption par les racines des plantes pour des périodes importantes. Il s'agit donc de réserve d'eau dans le sol utilisable par les racines en périodes sèches et en absence d'irrigation. L'eau joue

aussi le rôle de régulateur des activités photosynthétiques. Le développement des zones de végétation à l'échelle mondiale, régionale et locale et lié en partie à la disponibilité de l'eau dans le sol pour les plantes.

L'eau absorbée par les racines des plantes rentre dans le processus de la photosynthèse qui permet la réduction du dioxyde de carbone de l'atmosphère pour la formation des glucides.

Les mécanismes morpho physiologiques d'adaptation et d'évitement qu'utilisent les plantes sont enclenchés principalement suite aux déficits hydriques ressentis.

1.3 Absorption racinaire de l'eau

L'eau reçue par le sol provient essentiellement de la pluie, neige et apports d'irrigation. Les taux d'humidité du sol dépendent des caractéristiques d'adsorption du sol ainsi que son type de structure lui assurant une certaine porosité et conductivité hydraulique.

On doit savoir que la circulation de l'eau dans le sol est conditionnée par la présence des forces osmotiques, capillaires, colloïdales et gravitaires. Les plantes possèdent en réalité des forces d'absorption d'eau différentes qui s'exercent dans le sens inverse des forces de succion de l'eau par le sol. Les forces de rétention de l'eau par le sol montrent l'existence dans le sol de deux types d'eau : une eau utilisable par les plantes et une eau non utilisable par les plantes appelée aussi eau hygroscopique ou de constitution.

L'absorption de l'eau par les plantes se fait par l'intermédiaire des poils absorbants que développent les racines au niveau de leurs extrémités. Pour que l'eau entre dans la cellule végétale, il faut qu'elle soit dans un milieu hypotonique. Dans le cas inverse où le milieu devient hypertonique, c'est à dire plus concentré, l'eau sort de la cellule vers le milieu extérieure, il s'agit là d'une plasmolyse. Ceci s'explique par le fait que l'eau se déplace du haut potentiel vers un potentiel décroissant. Une eau pure possède un potentiel nul (niveau de référence). Ce niveau de potentiel devient négatif de plus en plus que sa charge en soluté augmente. Les sels dissous dans l'eau constituent une source de charges

électriques due aux ions auxquelles sont fixées les molécules d'eau qui ont le caractère diélectrique. Une eau trop concentrée en sels dissous n'est pas absorbée par les racines des plantes à cause de la réduction du potentiel osmotique de la solution du sol, ceci peut entraîner une plasmolyse cellulaire [19].

1.4 Réserves en eau du sol

1.4.1 Réserve utile

La réserve d'eau utilisable par les plantes est située entre deux niveaux d'humidité critiques à savoir ; l'humidité à capacité au champ et l'humidité au point de flétrissement permanent. Cette réserve utile est composée d'une réserve facilement utilisable et une réserve difficilement utilisable appelée réserve de survie. La teneur en eau d'un sol à capacité au champ approche celle mesurée au laboratoire à une valeur de pF égale à 2.5 [17]. Tandis que l'humidité au point de flétrissement permanent correspond à une valeur de pF égale à 4,2. La valeur du pF est le logarithme décimal de la force de succion du sol exprimée en hauteur de pression (cm). Cette valeur est égale à 4,2 correspond à la force de succion extrême des plantes qui est moyennement proche à 15 bars. La réserve utile (RU) varie en fonction de la texture et structure du sol, le taux de matière organique ainsi que la profondeur racinaire considérée. Elle représente la quantité d'eau utilisable par les plantes qui est définie comme la différence entre l'humidité à capacité au champ (H_{cc}) et l'humidité au point de flétrissement permanent (H_{pf}) [15]. Le calcul de réserve utile pour une couche de sol donnée, d'une épaisseur Z, possédant des caractéristiques pédologiques homogènes, s'effectue à l'aide de la relation généralisée suivante :

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) Da \times Z$$

Avec,

Da : densité apparente moyenne de la couche du sol considérée.

Quand on ne dispose pas de la courbe de rétention de l'eau (pF) du sol qui permet d'avoir les valeurs critiques exactes de (H_{cc}) et (H_{pf}), on fait recours au rapport ci-après où (H_{cc}) est remplacée par une valeur d'humidité très proche, appelée humidité équivalente (H_e), laquelle est utilisée dans le calcul de la RU à la place de (H_{cc}) [27].

$$H_{pf} = \frac{H_e}{1,84}$$

On rappelle également qu'il existe des méthodes expérimentales simples et directes de mesure in situ de la valeur de (H_{cc}) auxquelles on peut faire recours.

1.4.2 Réserve facilement utilisable

La réserve utile décrite précédemment est constituée de deux fractions différentes : une réserve facilement utilisable (RFU) et une réserve de survie (RS). La RFU représente du 1/3 jusqu'à 2/3 de la RU suivant le type de sol [10]. En pratique, habituellement, ce rapport est pris égal à 1/2 pour les sols dont la texture est à domination argileuse et 2/3 pour le reste des sols. On doit noter que ces rapports RU/RFU définis par rapport à la granulométrie des sols resteront très approximatifs, car en réalité, dans un même sol, la réserve facilement utilisable n'est pas égale pour des cultures caractérisées par des résistances à la sécheresse différentes.

1.4.3 Exemple d'application

Soit un sol agricole ayant les caractéristiques suivantes:

- Une humidité pondérale à capacité au champ (H_{cc}) de 25 %
- Une humidité pondérale au point de flétrissement permanent (H_{pf}) de 13 %
- Une densité apparente moyenne (D_a) de 1,3

Quelle est donc sa réserve utile (**RU**), sa réserve facilement utilisable (**RFU**) et sa réserve de survie (**RS**) pour une profondeur racinaire (Z) de 50 cm ?

Réponse

$$RU = (H_{cc} - H_{pf}) Da \times Z$$

$$RU = (0,25 - 0,13) \times 1,3 \times 50 = 7,8 \text{ cm} = \mathbf{78 \text{ mm}}$$

$$RFU = 2/3 RU$$

$$RFU = 2/3 \times 78 = \mathbf{52 \text{ mm}}$$

$$RS = 78 - 52 = \mathbf{26 \text{ mm}}$$

1.5 Besoins en eau des cultures

Les besoins en eau maximums ou évapotranspiration maximale (**ETM**) représentent la quantité d'eau maximale que peut consommer une culture. Pour qu'une culture atteigne ce niveau de consommation, le sol doit être bien alimenté en eau de telle sorte que sa réserve facilement utilisable n'est jamais épuisée.

En pratique, cet état de luxe pour une culture en place, peut être assuré à l'aide d'un pilotage d'irrigation sur la base d'un bilan hydrique régulier tenant compte des apports et consommations de la culture.

L'ETM (mm) d'une culture peut être déterminée indirectement par la fameuse relation ci-après [27].

$$\mathbf{ETP = K_c \times ETP}$$

K_c : Coefficient cultural qui dépend du stade phénologique de la culture

ETP : Evapotranspiration potentielle (mm)

L'évapotranspiration potentielle exprime la demande climatique en molécule d'eau pour atteindre sa capacité de saturation. Elle est liée aux différents paramètres caractéristiques du climat : température de l'air, humidité relative de l'air, vitesse du vent, insolation.... L'ETP varie également en fonction de la position géographique du lieu (longitude, latitude et altitude).

Plusieurs formules empiriques sont appliquées pour déterminer l'ETP. Les formules courantes les plus utilisées par les chercheurs sont celles de : Thornthwait, Turk, Penman classique. La formule de Penman-Monteith plus

adaptée aux zones semi-arides est très conseillée car elle offre plus de facilité dans le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET_o) du fait qu'elle est informatisée en plusieurs versions en langue anglaise et française sous le logiciel Cropwat. Ce logiciel est mis librement à la disposition des utilisateurs sur internet par l'Organisation des Nations Unies de l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) [2].

L'ETM peut être également déterminée par une méthode de mesure directe basée sur un bilan hydrique simplifié à effectuer sur cuves lysimétriques suivant l'équation ci-après:

$$ETM = I + P - D$$

I = Irrigation (mm)

P = Pluviométrie (mm)

D = Drainage (mm), c'est le volume excédentaire récupéré dans la fosse de drainage en aval de la cuve.

Comme mesure de précaution, les apports d'eau doivent être réguliers et en quantités suffisantes pour garder le sol toujours proche de sa capacité au champ. Cet état d'humidité n'aurait lieu qu'en présence d'un drainage continu observé en aval durant toute la période expérimentale.

Chapitre II Qualité principale de l'eau d'irrigation

2.1 Introduction

L'évaluation de la qualité d'une eau avant son utilisation constitue un premier moyen préventif aidant à optimiser son utilisation en réduisant ses risques et prévoir les mesures nécessaires à entreprendre pour la protection des sols, l'environnement en général et par conséquent la santé humaine.

Afin de mieux comprendre le niveau d'aptitude de l'eau à l'irrigation, il faut savoir déterminer les paramètres de qualité principal et les interpréter en fonction des principaux problèmes qu'ils peuvent engendrer au niveau du sol, la plante et l'environnement à court, moyen et long terme..

2.2 Facteurs de dégradation de la qualité de l'eau

La qualité de l'eau a des effets sur les écosystèmes et les produits agricoles et par conséquent sur la santé humaine. Les pollutions identifiées sur l'eau sont de divers types : physique, organique, chimique et microbiologique. Elles sont dues aux principaux facteurs suivants :

- * Les concentrations des habitations
- * La mauvaise gestion des réseaux d'assainissement
- * Le développement des industries polluantes
- * Le manque de traitement des eaux utilisées
- * La sédimentation due au phénomène des inondations
- * La fertilisation des sols agricoles.

Cette pollution modifie énormément sa composition et qui peut la rendre en dehors des normes tolérées pour son utilisation dans les différents secteurs sans risques majeurs.

2.3 Echantillonnage et analyses de l'eau

En premier lieu, les échantillons d'eau prélevés doivent répondre aux conditions d'homogénéité et de représentativité. En second lieu, lors des prélèvements de ces échantillons, certaines mesures de précaution sont nécessaires à entreprendre pour éviter toute modification des propriétés physico-chimique de l'eau [34].

Le transport, la conservation et les analyses des échantillons doivent obéir aux normes. Avant de procéder aux calculs des paramètres d'évaluation de la qualité de l'eau en question, il faut vérifier la fiabilité des résultats d'analyses effectuées au laboratoire. La fiabilité des analyses est atteinte à l'aide du calcul de l'erreur de la balance ionique (e), exprimée en pourcentage selon la relation [22] ci-dessous :

$$e = \frac{TC - TA}{TC + TA} \times 100$$

Avec

TC : Total des cations dans l'eau

TA : Total des anions dans l'eau

Les résultats d'analyses obtenues ne sont considérées fiables que lorsque la valeur calculée de l'erreur ionique (e) est inférieure à la valeur limite de 10 %.

2.4 Principaux éléments de qualité

2.4.1 Risques liés à la salinité

2.4.1.1 Conductivité électrique

La salinité d'une eau est exprimée soit en quantité totale de matières dissoutes (TDS) en mg/l ou g/m³ soit exprimée indirectement par la conductivité électrique qui est définie physiquement comme étant l'inverse de la résistivité. Elle traduit l'aptitude de l'eau à faire passer un courant électrique. Elle est proportionnelle à la concentration ionique de l'eau en question. C'est un paramètre facile à déterminer à l'aide de conductimètre. La conductivité électrique peut être exprimée en plusieurs unités. Son unité internationale est déciSiemens/m (dS/m). D'autres unités sont couramment utilisées comme le microSiemens par cm (µS/cm), le millimhos par centimètre (mmho/cm) [8].

Il faut savoir que : 1ds/m = 1000 µS/cm = 1mmho/cm

Il existe une importante relation pratique approximative entre la concentration en sels d'une eau et sa conductivité électrique (CE) qui s'écrit comme suit :

$$\text{Concentration en sels dissous (mg/l)} = 640 \times \text{CE (dS/m)}$$

Exemple d'application

Calculer la concentration en sels, exprimée mg/l et g/m³ d'une eau d'irrigation ayant une conductivité électrique de 2500 µS/cm.

$$2500 \mu\text{S/cm} = 2,5 \text{ dS/m.}$$

Réponse

Concentration en sels = 2,5 x 640 = 1600 mg/l, équivalent à 1600 g/m³.

En fonction des valeurs mesurées de la conductivité électrique, ‘United State Department of Agriculture’ (USDA) a proposé quatre catégories de classe (Tableau1) à différents degré de salinité de l’eau d’irrigation [32].

Tableau 1 : Catégories de classes

Classe	CE ($\mu\text{S/cm}$)	degré de salinité
C1	< 250	Basse salinité
C2	250 – 750	Salinité modérée
C3	750 – 2250	Haute salinité
C4	> 2250	Très haute salinité

Source : [32]

Principales caractéristiques des quatre classes précédentes

C1 : L’eau convient à l’irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols avec une faible probabilité de développement de la salinité du sol. Un certain lessivage est nécessaire, mais cela se produit sous des pratiques normales d’irrigation, sauf dans les sols à très faible perméabilité.

C2 : L’eau peut être utilisée en présence d’un lessivage modéré. Les plantes à tolérance modérée à la salinité peuvent être cultivées dans la plupart des cas sans pratiques spéciales pour le contrôle de la salinité.

C3 : L’eau ne peut être utilisée sur des sols dont le drainage est limité. Même avec un drainage adéquat, une gestion spéciale pour le contrôle de la salinité peut être nécessaire et les plantes avec une bonne tolérance à la salinité doivent être sélectionnées.

C4 : L’eau n’est pas appropriée à l’irrigation dans des conditions ordinaires, mais peut être utilisée occasionnellement dans des circonstances très spéciales. Les sols doivent être perméables, le drainage doit être adéquat, l’eau d’irrigation doit être appliquée en excès pour assurer un lessivage considérable et des cultures très tolérantes à la salinité doivent être sélectionnées.

Egalement sur la base du degré de salinité de l’eau, un guide de classification pratique a été proposé par US Salinity Laboratory [3] en fonction du niveau d’aptitude de cette eau à l’irrigation (Tableau 2).

Tableau 2 : Classification de l'eau d'irrigation en fonction de sa salinité

Paramètre	Excellente	Bonne	Admissible	Mauvaise
CE (dS/m)	< 0,25	0,25 – 0,75	0,75 – 2,25	2,25 – 5
TDS (mg/l)	< 200	200 – 500	500 – 1500	1500 – 3000

Source : [3]

Le guide d'interprétation (Tableau 3) montre le degré de restriction à respecter pour l'utilisation d'une eau d'irrigation en fonction de sa conductivité électrique et sa concentration en sels dissous [3].

Tableau 3 : Degré de restriction de l'eau pour l'irrigation en fonction de sa salinité

CE (ds/m)	TDS (mg/l)	Degré de restriction
< 0,7	> 450	Nul
0,7 – 3	450 – 2000	Leger à modéré
> 3	> 2000	Sévère

Source : [3]

L'échelle d'appréciation de la salinité proposée [11] pour les sols irrigués en Algérie afin d'évaluer la qualité de l'eau est résumée dans le tableau 4

Tableau 4 : Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation

Conductivité électrique (dS/m)	Concentration (g/l)	Appréciation
CE < 0,25	< 0,2	Non saline
0,25 < CE < 0,75	0,2 – 0,5	Salinité moyenne
0,75 < CE < 2,25	0,5 – 1,5	Forte salinité
2,25 < CE < 5	1,5 – 3	Très forte salinité
5 < CE < 20	3 – 7	Salinité excessive

Source : [11]

2.4.1.2 Salinité potentielle

L'aptitude de l'eau à l'irrigation ne dépend pas directement du niveau concentration en sels solubles. Il a été montré que les sels à faible solubilité s'accumulent dans le sol après des irrigations successives, alors que la concentration en sels à forte solubilité augmente la salinité du sol. La salinité potentielle (*PS*) : *Potential salinity* est la somme de la concentration de chlorure et la moitié de la concentration des sulfates [11] comme est montré dans la formule suivante :

$$PS = Cl^- + \frac{SO_4^{2-}}{2}$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l

Les normes d'interprétation de la salinité potentielle sont synthétisées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Normes d'interprétation de la salinité potentielle

Salinité potentielle (PS)	Qualité de l'eau
<5	Excellente à bonne
5 –10	Bonne à nocive
>10	Nocive à insatisfaisante

Source : [11]

2.4.2 Risques liés à l'alcalinité

2.4.2.1 Risques liés au sodium

Le sodium est l'élément qui présente le plus de danger s'il est en grande quantité dans l'eau d'irrigation. Il agit très négativement sur la perméabilité du sol. Il se substitue au calcium et magnésium fixés sur le complexe adsorbant du sol. Ces derniers par leurs charges positives contribuent à donner au sol sa bonne structure qui améliore sa perméabilité. Une fois ces deux éléments sont remplacés par le sodium, les agrégats seront détruits et les particules fines prennent place. Le sol devient donc dur et compact et perd significativement sa perméabilité.

2.4.2.1.1 Ratio du sodium adsorbé

Le paramètre de qualité utilisé pour exprimer la concentration en sodium par rapports aux concentrations en cations, calcium et magnésium est le ratio du sodium adsorbé (SAR) (*Sodium Adsorption Ratio*) [32] : Ce paramètre de qualité est calculé par la relation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l.

La classification de l'eau d'irrigation sur la base du paramètre : Ratio du sodium adsorbé (SAR) est représentée dans le tableau 6 où la qualité de l'eau d'irrigation a été subdivisée en quatre classes : S1, S2, S3 et S4.

Tableau 6 : Classification de la qualité de l'eau d'irrigation

Classe	SAR (meq/l)	Taux de sodium	Qualité de l'eau
S1	< 10	Faible	Excellente
S2	10 – 18	Moyen	Bonne
S3	18 – 26	Elevé	Douteuse
S4	> 26	Très élevé	Inappropriée

Source : [32]

Principales caractéristiques des quatre classes précédentes

S1 : L'eau peut être utilisée pour l'irrigation sur presque tous les sols avec de très faibles risques sur les arbres fruitiers et l'avocatier qui peuvent accumuler une concentration nocive en sodium.

S2 : L'eau présentera un risque de sodium appréciable sur les sols à texture fine ayant une grande capacité d'échange cationique, spécialement sous des conditions de faible lessivage, sauf si le gypse est présent dans les sols. Cette eau peut être utilisée sur des sols à texture grossière ou organique avec une bonne perméabilité.

S3 : L'eau peut produire des niveaux nocifs de sodium échangeable dans la plupart des sols et nécessitera une gestion spéciale du sol, un bon drainage, un grand lessivage et apports de matières organiques. L'eau est à risque important pour tous types de sol, son utilisation nécessite des amendements comme le gypse.

S4 : L'eau est généralement impropre pour un but d'irrigation sauf à une faible ou peut être une moyenne salinité, lorsque la solution de calcium du sol ou l'utilisation de gypse ou d'autres amendements peuvent rendre l'utilisation de ces eaux possible.

Les risques de l'eau d'irrigation en fonction du SAR sont résumés comme suit :

- Pour un SAR < 3 : le risque est nul, l'eau peut être utilisée sans restriction particulière.
- Pour un SAR entre 3 et 9 : le risque est léger à modéré, avec un SAR plus de 6, l'utilisation de l'eau nécessite des amendements gypseux.
- Pour un SAR > 9, le risque est élevé, l'utilisation de l'eau conduit à des dommages sévères.

Le guide ci-après (Tableau7) montre les différents degrés de restriction de l'utilisation d'une eau en irrigation sous l'effet cumulé de son SAR et sa conductivité électrique sur la perméabilité du sol [3].

Tableau 7: Guide d'interprétation de l'effet de la qualité de l'eau sur la perméabilité du sol.

Paramètres	Degré de restriction		
	Nul	Leger à modéré	Sévère
Avec SAR (0 – 3) méq/l et CE en dS/m =	> 0,7	0,7 – 0,2	< 0,2
Avec SAR (3 – 6) méq/l et CE en dS/m =	>1,2	1,2 – 0,3	< 0,3
Avec SAR (6 – 12) méq/l et CE en dS/m =	>1,9	1,9 – 0,5	< 0,5
Avec SAR (12 – 20) méq/l et CE en dS/m =	>2,9	2,9 – 1,3	< 1,3
Avec SAR (20 – 40) méq/l et CE en dS/m =	> 5	5 – 2,9	< 2,9

Source : [3]

On constate que pour un SAR donné, la perméabilité diminue avec la diminution de la salinité du sol. Ceci s'explique par l'augmentation de l'effet corrosif de l'eau moins salée sur les minéraux du sol contribuant à la dégradation du sol.

2.4.2.1.2 Ratio du sodium adsorbé ajusté

Pour les eaux fortement concentrées en carbonates et bicarbonates, un autre concept appelé SAR ajusté (*Sodium Adsorption Ratio ajusted*), vient de compléter l'ancien SAR. Il prend en compte l'effet des carbonates et bicarbonates sur l'agressivité du sol à travers le paramètre PH_c [23]. Ce concept permet d'évaluer les problèmes de perméabilité dus à une carence en calcium ou à un excès de sodium.

La formule du SAR ajusté mise au point par U. S Salinity Laboratory [20] s'écrit comme suit :

$$\text{SAR}_{\text{ajusté}} = \text{SAR} [1 + (8,4 - \text{PH}_c)]$$

$$\text{PH}_c = (\text{PK}'_2 - \text{Pk}'_c) + \text{p}(\text{Ca} + \text{Mg}) + \text{pAlk}$$

Avec,

PH_c : le PH d'équilibre d'une eau avec de la calcite (CaCO₃).

PK'₂ = le logarithme négatif de la deuxième constante de dissociation de l'acide carbonique (H₂CO₃),

Pk'_c = la constante de solubilité de la calcite (CaCO₃),

p (Ca + Mg) = le log négatif de la somme des concentrations en calcium et magnésium dans l'eau.

pAlk = le log négatif de la concentration en carbonates et bicarbonates dans l'eau.

Le paramètre PH_c évalue la tendance de l'eau d'irrigation à dissoudre le calcaire du sol ou sa tendance à la précipitation dans le sol [23].

La valeur limite de 8,4 indique le pH théorique d'un sol étant en équilibre avec le carbonate de calcium. Pour un calcul facile du PH_c, on fait recours au tableau 8 ci-après [20].

Tableau 8 : Calcul du PH_c

Ca + Mg + Na meq/l	PK' ₂ - PK' _C	Ca + Mg meq/l	p (Ca+Mg)	CO ₃ +HCO ₃ meq/l	pAlk
0,50	→ 2,11	0,05	→ 4,60	0,05	→ 4,3
0,70	2,12	0,10	4,30	0,10	4,0
0,90	2,13	0,15	4,12	0,15	3,8
1,2	2,14	0,20	4,00	0,20	3,7
1,6	2,15	0,25	3,90	0,25	3,6
1,9	2,16	0,32	3,80	0,31	3,5
2,4	2,17	0,39	3,70	0,40	3,4
2,8	2,18	0,50	3,60	0,50	3,3
3,3	2,19	0,63	3,50	0,63	3,2
3,9	2,20	0,79	3,40	0,79	3,1
4,5	2,21	1,00	3,30	0,99	3,0
5,1	2,22	1,25	3,20	1,25	2,9
5,8	2,23	1,58	3,10	1,57	2,8
6,6	2,24	1,98	3,00	1,98	2,7
7,4	2,25	2,49	2,90	2,49	2,6
8,3	2,26	3,14	2,80	3,13	2,5
9,2	2,27	3,90	2,70	4,00	2,4
11,0	2,28	4,97	2,60	5,00	2,3
13,0	2,30	6,30	2,50	6,30	2,2
15,0	2,32	7,90	2,40	7,90	2,1
18,0	2,34	10,00	2,30	9,90	2,0
22,0	2,36	12,50	2,20	12,50	1,9
25,0	2,38	15,80	2,10	15,70	1,8
29,0	2,40	19,80	2,00	19,80	1,7
34,0	2,42				
39,0	2,44				
45,0	2,46				
51,0	2,48				
59,0	2,50				
67,0	2,52				
76,0	2,54				

Source : [20]

Interprétation de la valeur du pH_c

Premier cas

Quand la valeur du pH_c calculée est supérieure à 8,4, la valeur du SAR_{ajusté} sera donc inférieure à celle du SAR, l'eau a tendance à dissoudre le calcaire (CaCO₃) du sol. L'eau joue donc un rôle négatif sur la structure du sol.

Deuxième cas

Quand la valeur du pH_c calculée est inférieure à 8,4, la valeur du SAR_{ajusté} sera donc supérieure à celle du SAR, l'eau a tendance à précipiter le calcaire (CaCO₃) dans le sol. L'eau joue donc un rôle positif sur la structure du sol en enrichissant le sol avec l'élément calcium.

Le guide ci-après (tableau 9) montre le degré de problèmes que peut engendrer une eau d'irrigation sous l'effet simultané de sa conductivité électrique et son SAR_{ajusté} sur la perméabilité du sol [20].

Tableau 9 : Interprétation de l'effet simultané du SAR_{ajusté} et la conductivité électrique sur la perméabilité du sol

Paramètres	Sans problèmes	Problèmes	Problèmes sévères
CE (mmho/cm)	> 0,5 mmho/cm	< 0,5mmho/cm	< 0,2mmho/cm
SAR _{ajusté}	< 6	6 à 9	> 9

2.4.2.1.3 Exemple d'application

Interprétez l'effet de l'eau d'irrigation ayant les concentrations suivantes sur la perméabilité du sol :

Ca⁺⁺ = 23,6mg/l, Mg⁺⁺ = 9,6 mg/l, Na⁺ = 87,86 mg/l ,

CO₃²⁻ = 54 mg/l, HCO₃⁻ =134,2 mg/l.

Conductivité électrique = 0,4 mmho/cm

Réponse

Rappel : les masses atomiques des éléments chimiques

Calcium = 40g, Magnésium =24g, Oxygène =16g, Carbone =12 g

Conversion des concentrations en meq/l

$$\text{Ca}^{++} = 23,6/20 = 1,18 \text{ meq/l},$$

$$\text{Mg}^{++} = 9,6/12 = 0,8 \text{ meq/l}$$

$$\text{Na}^+ = 87,86/23 = 3,82 \text{ meq/l}$$

$$\text{CO}_3^{2-} = 54/30 = 1,8 \text{ meq/l}$$

$$\text{HCO}_3^- = 134,2/61 = 2,2 \text{ meq/l}$$

$$\text{SAR} = \frac{3,82}{\sqrt{\frac{1,18 + 0,8}{2}}} = 3,83$$

En se référant à la table précédente pour le calcul du PHc

$$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ = 5,8 \text{ meq/l} \longrightarrow \text{PK}'_2 - \text{PK}'_c = 2,23$$

$$\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} = 1,98 \text{ meq/l} \longrightarrow p(\text{Ca}+\text{Mg}) = 3$$

$$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} = 4 \text{ meq/l} \longrightarrow p \text{ Alk} = 2,4$$

$$\text{PHc} = (\text{PK}'_2 - \text{PK}'_c) + p(\text{Ca} + \text{Mg}) + p \text{ Alk}$$

$$\text{PHc} = 2,23 + 3 + 2,4 = 7,63$$

$$\text{SAR}_{\text{ajusté}} = \text{SAR} [1 + (8,4 - \text{PHc})]$$

$$\text{SAR}_{\text{ajusté}} = 3,83 [1 + (8,4 - 7,63)] = 6,78$$

Interprétation des résultats

Étant donné que la valeur du PHc < 8,4 et SAR_{ajustée} > SAR, l'eau a tendance à précipiter le calcaire sur le sol, contribuant à l'amélioration de sa structure. Cependant comme son SAR_{ajusté} est situé entre 6 et 9, en présence d'une conductivité de 0,4 mmho/cm; l'irrigation avec cette eau peut poser des problèmes de perméabilité du sol en question dans le temps.

2.4.2.2 Risques liés aux carbonates et bicarbonates

Les auteurs ont constaté que les risques liés au sodium d'une eau d'irrigation sur la structure du sol soulevés précédemment dépendent aussi de sa concentration élevée en carbonates (CO_3^{2-}) et bicarbonates (HCO_3^-).

Les carbonates et bicarbonates de l'eau réagissent avec le calcium du sol en formant des composés moins solubles comme le CaCO_3 et $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Cette fixation du calcium favorise l'action destructive de la structure du sol par le sodium.

2.4.2.2.1 Alcalinité résiduelle

Le paramètre qualitatif proposé pour compléter l'indication du risque d'alcalinisation lié aux carbonates et bicarbonates de l'eau est l'alcalinité résiduelle qui est appelée : RSC (*Residual Sodium Carbonate*) [12].

Elle est calculée à l'aide de la relation suivante :

$$\text{RSC} = [\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l

Normes d'interprétation

Si :

RSC < 1,25 meq/l, l'eau est considérée bonne à l'irrigation

1,25 < RSC < 2,25, l'eau est considérée admissible à l'irrigation

RSC > 2,25 meq/l, l'eau est considérée impropre à l'irrigation

2.4.2.2.2 Exemple d'application

Une eau d'irrigation contenant les concentrations ioniques suivantes :

$\text{Ca}^{2+} = 65 \text{ mg/l}$, $\text{Mg}^{2+} = 18 \text{ mg/l}$, $\text{HCO}_3^- = 350 \text{ mg/l}$, $\text{CO}_3^{2-} = 40 \text{ mg/l}$

Réponse

Conversion des concentrations en meq/l

$\text{Ca}^{2+} = 65/20 = 3,25 \text{ meq/l}$, $\text{Mg}^{2+} = 18/12 = 1,5 \text{ meq/l}$,

$$\text{HCO}_3^- = 350/61 = 5,74 \text{ meq/l}, \text{CO}_3^{2-} = 40/30 = 1,33 \text{ meq/l}$$

$$\text{RSC} = [5,74 + 1,33] - [3,25 + 1,5] = 7,07 - 4,75 = 2,32 \text{ meq/l}$$

RSC > 2.25 meq/l, l'eau est donc considérée impropre à l'irrigation.

2.5 Application des diagrammes de caractérisation de l'eau d'irrigation

2.5.1 Diagramme USSL

U.S. salinity laboratory, a conçu le diagramme ci-dessous (figure 1) pour la classification de l'eau d'irrigation sur la base de l'effet combiné de la conductivité électrique (CE) de l'eau et le ratio du sodium adsorbé (SAR).

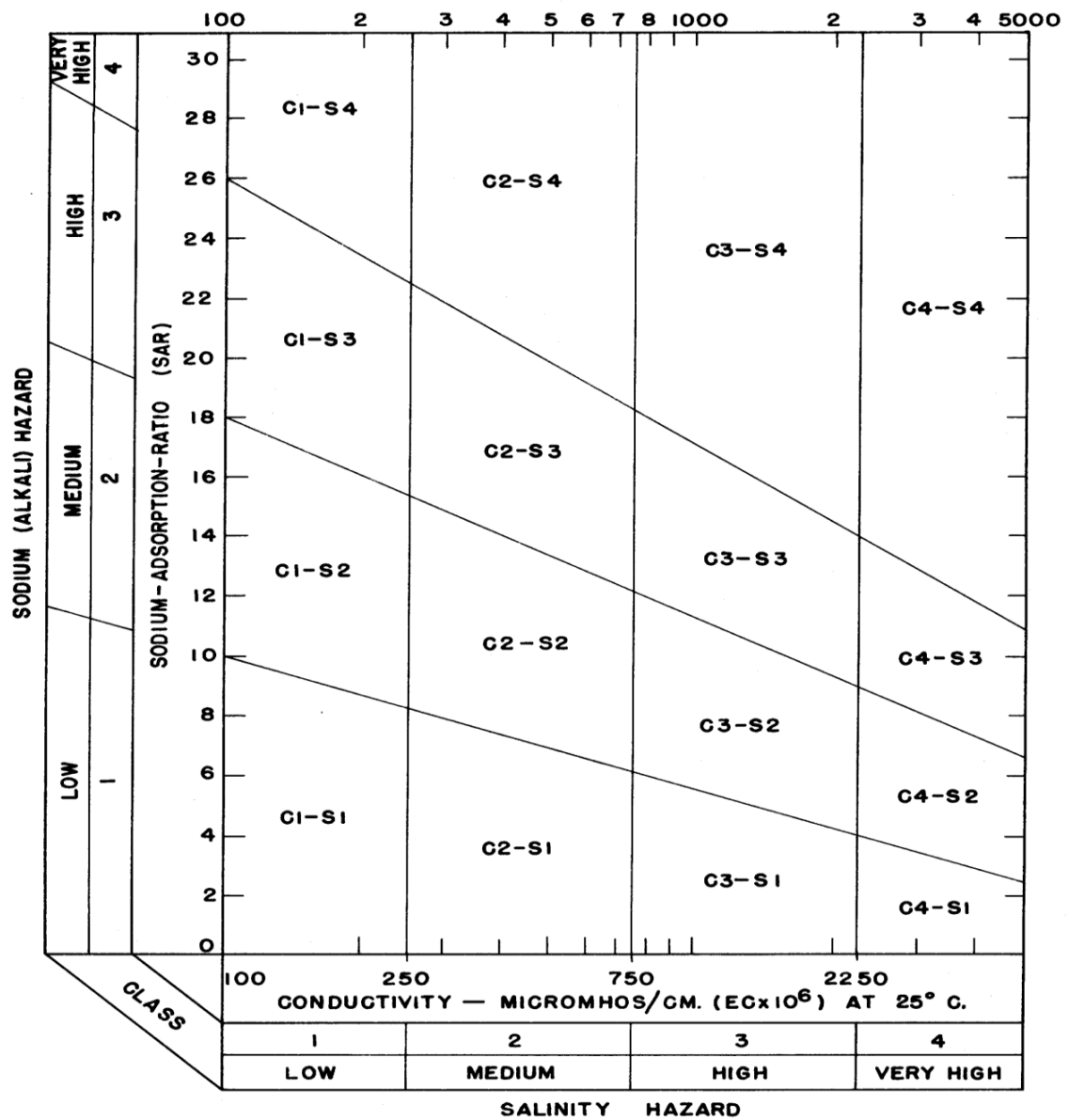


Figure 2 Diagramme USSL

2.5.2 Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox (figure 2) permet de classer l'eau d'irrigation en quatre classes de qualité allant de l'excellente à la mauvaise [38].

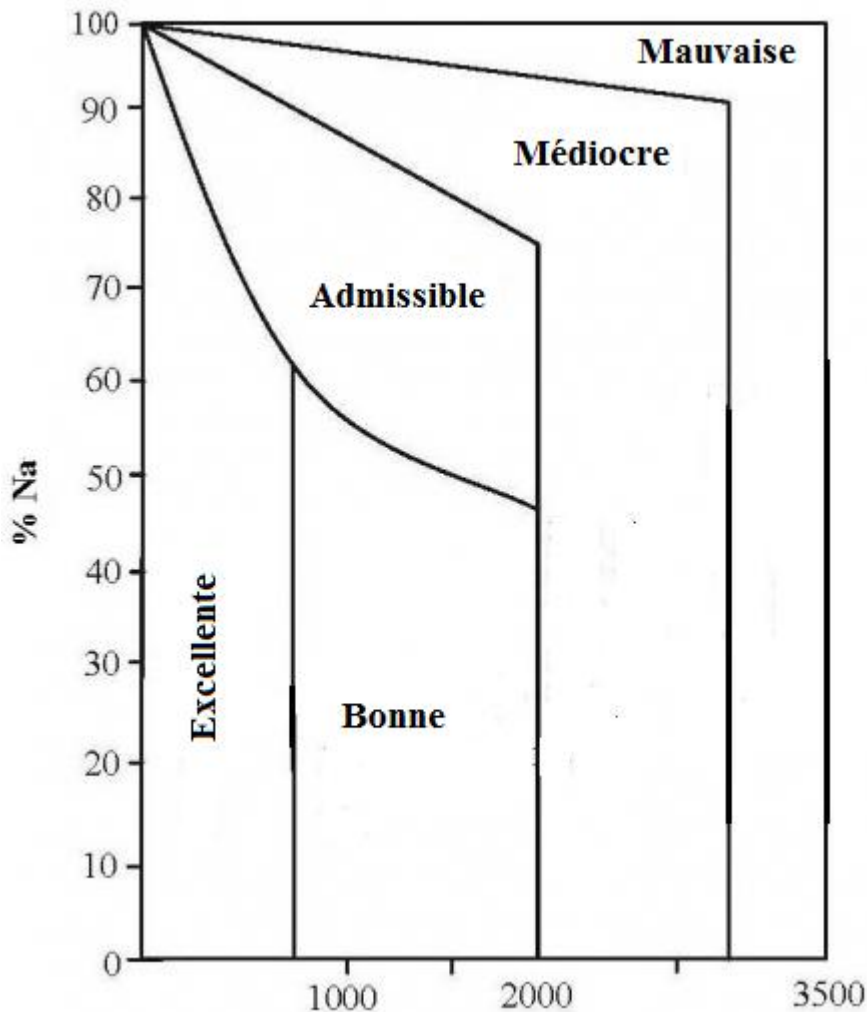


Figure 2 : Diagramme de Wilcox

NB/ Le logiciel diagramme libre [35] permet de tracer les diagrammes spécifiques à la qualité de l'eau à partir de données importées d'un tableur.

Chapitre III : Qualité spécifique de l'eau d'irrigation.

3.1 Introduction

Au delà des concepts de base d'évaluation de la qualité liée à la salinité et l'alcalinité, il est très recommandé de déterminer la qualité spécifique de l'eau

d'irrigation. Son évaluation est faite à l'aide d'indices spécifiques qui permettent d'expliquer les combinaisons ainsi que les rapports existants entre les concentrations des ions chimiques contenus dans l'eau. Ses indices apportent plus d'information sur les effets de l'eau sur les propriétés du sol, essentiellement sa perméabilité et son aération. La connaissance des concentrations de certains ions toxiques spécifiques auxquels les plantes présentent des sensibilités différentes est également importante car les réactions des plantes aux seuils de toxicité de ces éléments sont parfois confondues visiblement avec certaines carences en éléments nutritifs.

3.2 Indices de qualité spécifiques

3.2.1 Pourcentage du sodium

Le pourcentage du sodium (% Na) [38] est donnée par la formule suivante :

$$\% \text{ Na} = \frac{\text{Na}^+ + \text{k}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{k}^+} \times 100$$

Les concentrations sont exprimées en meq/L.

Tableau 10 : Normes d'interprétation du % Na

% Na	Qualité de l'eau d'irrigation
< 20	Excellente
20 – 40	Bonne
40 – 60	Permissible
60 – 80	Inappropriée

Source : [38]

3.2.2 Pourcentage du sodium soluble

Le pourcentage du sodium soluble (SSP) : *Soluble Sodium percentage* [37] est donné par la formule suivante :

$$SSP = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

Les concentrations sont exprimées en meq/L.

Normes d'interprétation

Quand :

SSP < 50, l'eau est considérée bonne à l'irrigation

SSP > 50, l'eau est considérée mauvaise à l'irrigation

3.2.3 Ratio de Kelly

Le ratio de Kelly (KR) : *Kelly Ratio* [16] est donné par la relation ci-dessous:

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l

Normes d'interprétation

Quand :

KR < 1, l'eau est considérée bonne à l'irrigation.

KR > 1, l'eau est considérée impropre à l'irrigation.

3.2.4 Indice de Perméabilité

La perméabilité d'un sol agricole est liée principalement à sa texture et structure. Cependant, il a été montré qu'elle est également influencée par l'effet combiné de la concentration totale de l'eau en sels, sodium et bicarbonates [9]. Cet effet est exprimé par l'indice de perméabilité (PI): *Permeability Index*, calculé par la formule suivante :

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l

En fonction des valeurs de l'indice de perméabilité exprimées en pourcentage, l'eau d'irrigation est répartie en trois catégories de classes (Tableau 11).

Tableau 11 : Classification de l'eau d'irrigation

IP (%)	Classe	Qualité de l'eau
Supérieur à 75 %	I	Excellente
Entre 25 % et 75 %	II	Bonne
Inférieur à 25 %	III	Inappropriée

Source : [9]

Il faut noter qu'une mauvaise perméabilité du sol serait à l'origine des engorgements en eaux qui gênent les pratiques agricoles. Elle constitue également une cause de mauvaise aération et de nutrition chez les plantes [21].

3.2.5 Ratio du magnésium

L'état d'équilibre dans la plupart des eaux est généralement maintenu par le rapport de concentration entre le magnésium et le calcium. L'important indice qui exprime ce rapport est appelé le ratio du magnésium (MR) : *Magnesium Ratio*. Il montre l'effet de la concentration relative du magnésium par rapport au calcium sur la qualité de l'eau d'irrigation. Cet indice est calculé à l'aide de la formule ci-dessous [36].

$$MR = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$$

Les concentrations sont exprimées en meq/l

Normes d'interprétation

Quand :

MR > 50 %, l'eau est considérée mauvaise à l'irrigation

MR < 50 %, l'eau est considérée bonne à l'irrigation

Des taux supérieurs à 50 % font augmenter le pH du sol vers la zone alcaline qui affecte à son tour négativement les rendements des cultures ([29 ; 25].

3.2.6 Exemple d'application sur les indices spécifiques

Soit une eau d'irrigation contenant les concentrations chimiques suivantes :

$\text{Ca}^{++} = 173 \text{ (mg/l)}$, $\text{Mg}^{++} = 84,83 \text{ (mg/l)}$, $\text{Na}^+ = 276 \text{ (mg/l)}$,

$\text{K}^+ = 9 \text{ (mg/l)}$, $\text{HCO}_3^- = 149 \text{ (mg/l)}$.

Déterminez les indices de qualité de cette eau d'irrigation suivants avec interprétation des résultats.

1-Pourcentage du sodium (% Na)

2-Pourcentage du sodium soluble (SSP)

3-Ratio de Kelly (KR)

4-Indice de Perméabilité (PI)

5- Ratio du Magnésium (MR)

Réponse

1- Calcul du Pourcentage du sodium (% Na)

$$\% \text{ Na} = \frac{\text{Na}^+ + \text{k}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{k}^+} \times 100$$

Conversion des concentrations en meq/l

Rappel : Masse atomique du sodium = 23g, Masse atomique du potassium = 39g

$\text{Ca}^{2+} = 173/20 = 8,65 \text{ meq/l}$

$\text{Mg}^{2+} = 84,83/12 = 7,07 \text{ meq/l}$

$\text{Na}^+ = 276 /23 = 12 \text{ meq/l}$

$$K^+ = 9/39 = 0,23 \text{ meq/l}$$

$$HCO_3^- = 149/61 = 2,44 \text{ meq/l}$$

$$\% Na = \frac{12 + 0,23}{8,65 + 7,07 + 12 + 0,23} \times 100$$

$$\% Na = 43,77$$

La valeur obtenue de cet indice est située entre 40 et 60, l'eau est donc d'une qualité considérée permmissible à l'irrigation.

2 - Pourcentage du sodium soluble (SSP)

$$SSP = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

$$SSP = \frac{12}{8,65 + 7,07 + 12} \times 100$$

$$SSP = 43,29$$

La valeur du SSP obtenue est inferieure à 50, l'eau est donc considérée bonne à l'irrigation.

3- Ratio de Kelly (KR)

$$KR = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

$$KR = \frac{12}{8,65 + 7,07} = 0,76$$

La valeur du KR obtenue est inferieure à 1, l'eau est donc considérée bonne à l'irrigation.

4- Indice de perméabilité (PI)

$$PI = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100$$

$$PI = \frac{12 + \sqrt{2,44}}{8,65 + 7,07 + 12} \times 100 = 48,92$$

La valeur du PI obtenue est située entre 25 et 75 %, l'eau est donc considérée bonne à l'irrigation, elle ne pose pas de problèmes de perméabilité ni d'aération des sols.

5- Ratio du Magnésium (MR)

$$MR = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100$$

$$MR = \frac{7,07}{8,65 + 7,07} \times 100 = 44,97$$

La valeur obtenue du (MR) est inférieure à 50 %, l'eau est donc considérée bonne à l'irrigation car elle ne fait pas augmenter le pH à la zone alcaline pour affecter négativement les rendements des cultures.

3.3 Risques liés à la toxicité spécifique

Les éléments sous forme d'ions toxiques que peut contenir une eau d'irrigation sont habituellement: le bore, le chlorure et le sodium. Les plantes ne possèdent pas la même sensibilité à un niveau de concentration donnée en ces éléments toxiques.

Bore

Le bore est considéré un élément essentiel pour le développement des plantes à condition que sa concentration soit inférieure à 1 mg/l. Les effluents domestiques constituent la source principale du bore. Sa carence très répandue sous les climats très pluvieux, favorisant le lessivage de l'acide borique dans les sols alcalins et argileux. Sa disponibilité dans le sol sous sa forme assimilable la plus dominante qui est l'acide borique dépend du taux de matière organique et du pH du sol qui doit être inférieur à 7 [30].

Cependant, on doit noter que la toxicité des plantes par le bore peut se produire à des concentrations très faibles ([3 ; 24].

Les symptômes de cette toxicité apparaissent aux bords et extrémités des feuilles les plus anciennes qui deviennent jaunâtres en portant des taches.

Les expériences américaines affirment qu'avec des concentrations de 2 à 10 mg/l de bore dans l'eau d'irrigation, seules les plantes tolérantes qui peuvent donner des productions satisfaisantes. D'autre part, il n'existe pas de technique pour éliminer le bore de l'eau ni moyen d'inhibition de son effet toxique [20].

Chlorure

Le chlorure n'est pas adsorbé par le sol. Il est présent dans la solution du sol. Il constitue un élément essentiel à la croissance des plantes. Cependant en quantités élevées, supérieures aux limites de tolérances des cultures, il peut causer des problèmes comme les blessures, brûlures et dessèchements des feuilles [3]. Les brûlures des feuilles ou leur défoliation peuvent apparaître suite à l'irrigation par aspersion avec une eau chargée en chlorures, car on assiste à une accumulation de sels sur les parties aériennes après évaporation de l'eau. Ce problème est fortement présent sous climat chaud. Son atténuation relative peut être réalisée avec la pratique de l'irrigation la nuit où l'évaporation devient minimale.

Sodium

L'irrigation avec une eau chargée en sodium dépassant les limites admissibles est à l'origine de la toxicité des cultures. Cette toxicité due au sodium est difficilement diagnostiquée. Elle se manifeste par des brûlures au niveau des tissus et des bordures des feuilles. On doit noter que la toxicité par l'élément sodium peut être atténuée en présence de sol riche en calcium. Des amendements gypseux peuvent donc relativement contrecarrer ce type de toxicité.

Les niveaux de toxicité de ces trois ions spécifiques [24] sont indiqués dans le tableau 12. Ces concentrations resteront indicatives car leur convenance dépend encore du type de culture, son état de croissance et du climat.

Tableau 12: Niveaux de toxicité des ions spécifiques (meq/)

	Nul	Leger à modéré	Sévère
Bore	< 1	1 – 3	> 3
Chlorure	< 4	4 –10	> 10
Sodium	< 3	3 – 9	> 9

Source : [24]

3.4 Actions de l'eau sur les ouvrages hydro-agricoles et réseaux d'irrigation

Les phénomènes naturels les plus répandus qui traduisent les actions de l'eau sur les principaux ouvrages hydro-agricoles comme les barrages et les digues de retenues d'une part et les réseaux d'irrigation d'autre part sont détaillés comme suit

Sédimentation

Le cycle des sédiments débute par le processus d'érosion [13]. L'érosion hydrique est un phénomène naturel qui se traduit par l'arrachage de matériaux par l'eau lors de ses écoulements au niveau des réseaux hydrographiques. Ces matériaux seront transportés par les cours d'eau le plus long chemin possible en fonction de l'énergie disponible. Les plus fines atteignent l'exécutoire où sont généralement implantés les grands barrages ou digues de retenues d'eau. A ce niveau, commence la phase finale du processus de sédimentation des particules solides minérales et organiques. Cette sédimentation est un processus complexe, il est à l'origine du phénomène d'envasement de ces ouvrages. La vitesse d'envasement dépend directement de la charge d'eau en matière de suspension à l'aval du bassin versant. Cet envasement peut toucher même les canaux d'irrigation installés à la sortie des barrages ou retenues.

Corrosion

Le phénomène de la corrosion des composants des réseaux d'irrigation est le résultat d'agressivité de l'eau ; il est assez complexe en raison de l'interaction délicate entre les caractéristiques des matériaux, les paramètres de qualité et les facteurs physiques associés au couple métaux-milieu environnant [18].

Entartrage

L'entartrage est le dépôt de tartre sur les parois internes des canalisations d'eau. Ce dépôt contient essentiellement les sels de carbonates comme les carbonates de calcium, de sulfates et de magnésium. Les dépôts de tartre de façon concentrique sont les plus fréquents, ils réduisent le débit de l'eau à cause de la diminution du diamètre interne de la canalisation.

Les eaux d'irrigation qui traversent les formations calcaires lors de leurs parcours naturels sont systématiquement plus chargées en carbonates. Elles accélèrent par conséquent ce phénomène d'entartrage qui est particulièrement visible dans les réseaux d'irrigation goutte à goutte en provoquant l'obstruction des goutteurs. Les bouchures des goutteurs modifient les débits d'installations prévus qui auront à leur tour une répercussion négative sur l'efficacité du système.

Chapitre IV : Réutilisation des eaux usées traitées en irrigation

4.1 Introduction

La réutilisation des eaux usées urbaines en irrigation est une pratique très ancienne. Cette pratique s'élargit actuellement de plus en plus à l'échelle mondiale avec plus d'intensité pour répondre aux besoins des sociétés en développement, de l'accroissement démographique d'une part et des changements climatiques qui sont à l'origine de sécheresses agricoles d'autre part. Le recours donc à la réutilisation des eaux usées traitées en agriculture peut contribuer relativement à faire face aux diminutions des volumes d'eau douce importants en conséquence réservés aux autres secteurs utilisateurs, principalement domestique. Cette réutilisation des eaux usées, en fournissant des volumes d'eau supplémentaires, permettrait de combler relativement les déficits hydriques surtout dans les régions frappées par la sécheresse.

En Algérie, 148 stations d'épuration sont en exploitation au niveau du territoire dont 72 stations de type boues activées, 73 stations par lagunage naturel ou aéré et 03 filtres plantés. Elles produisent 19 millions de m³ d'eau épurée par mois [26].

4.2 Mesures de précautions

La création de nouvelles aires irriguées dans les zones déshéritées contribue au changement même des systèmes de production faisant apparaître de nouvelles activités agricoles tel que le petit élevage. Ceci constitue une source de revenu et donc un moyen de lutte contre la pauvreté chez les populations. Cependant malgré ces avantages, toute utilisation n'exclue pas les risques potentiels que possèdent ces eaux sur l'environnement, la santé des manipulateurs directs, consommateurs des produits agricoles et tous autres intermédiaires. Le risque potentiel de propagation de la contamination par les maladies au sein des cultures, les travailleurs ainsi que les populations avoisinantes varie significativement avec le mode d'irrigation adopté à savoir : submersion, infiltration, aspersion ou localisé [28].

Le principal danger réside dans la consommation des légumes et salades crus irrigués avec les eaux usées. Ces produits provoquent fréquemment chez les consommateurs le choléra, la fièvre typhoïde ainsi que des maladies bactériennes fécales, la diarrhée bactérienne et la dysenterie [6].

Pour une utilisation prospère et durable, il est indispensable que les collectivités locales assurent l'accompagnement des agriculteurs utilisateurs en entreprenant les principales démarches suivantes :

- Le suivi régulier de la qualité de l'eau traitée à la sortie des stations de traitement et sera mieux même au niveau de la parcelle.
- Sensibilisation des agriculteurs sur les risques potentiels de ces eaux sur la santé humaine, animale et l'environnement.
- Assurer des formations de vulgarisation au profit des agriculteurs sur les précautions et moyens nécessaires pour une meilleure manipulation seine durant tout le circuit.

4.3 Caractéristiques des eaux usées

4.3.1 Composition des eaux usées

On distingue trois grandes catégories d'eaux usées : les eaux domestiques, les eaux industrielles et les eaux pluviales. Cet ensemble constitue les eaux urbaines. Elles sont très chargées en polluants dus à l'activité humaine [31].

Eaux usées domestiques

Ce sont des eaux qui proviennent des habitations après différents usages domestiques. Elles comportent :

- Les eaux ménagères provenant des cuisines, salles de bains, machines à laver..., appelées « eaux grises ». Elles sont très chargées en détergents, graisses, solvants etc.
- Les eaux de toilettes appelées « eaux de vanes ». Elles sont très chargées en matières organiques et micro-organismes pathogènes.

Eaux industrielles

Les eaux résiduelles d'origine industrielle proviennent des usines, des ateliers de fabrication et des établissements agricoles. Leurs caractéristiques dépendent du type d'industrie en question ; elles possèdent donc des toxicités spécifiques suivant les produits chimiques véhiculés [33]. Ces eaux peuvent contenir divers types de polluants tel que : les matières organiques et minérales, les solvants, les graisses, les métaux lourds, les hydrocarbures et même les produits toxiques comme les effluents radioactifs.

Eaux pluviales

Les eaux pluviales proviennent des précipitations. En premier lieu, elles se chargent d'impureté au contact de l'air comme les fumées industrielles. En second lieu, elles se chargent de divers résidus (huile de vidange, carburant, métaux lourds etc.) lors de leurs ruissellements à la surface du sol naturel, des chaussées des villes et des toits. Ces eaux pluviales chargées de polluants ruissellent ensuite vers le milieu naturel ou vers le réseau d'assainissement.

4.3.2 Eléments polluants

Le suivi des concentrations en éléments polluants dans le sol s'avère très indispensable pour la protection de la santé humaine. Ces éléments polluants provenant des eaux usées s'accumulent dans le sol puis passent par le végétal et rentrent dans la chaîne alimentaire pour être consommés par l'être humain. A travers cette approche simplifiée, l'OMS a défini des valeurs limites de concentrations de produits chimiques polluants admissibles dans le sol qui sont synthétisées dans le tableau 13 [28].

Tableau 13 Concentrations maximales tolérables dans le sol de divers produits chimiques toxiques sur la base des exigences de protection de la santé humaine

Elément	Concentration (mg/kg de sol)	Elément	Concentration (mg/kg de sol)
Antimoine	36	2,4-D	0,25
Argent	3	DDT	1,54
Arsenic	8	Dichlorobenzène	15
Baryum ^a	302	Dieldrine	0,17
Béryllium ^a	0,2	Dioxines	0,00012
Bore ^a	1,7	Heptachlore	0,18
Cadmium	4	Hexachlorobenzène	1,40
Fluor	635	HPA (tels que le benzo[<i>a</i>]pyrène)	16
Mercure	7	Lindane	12
Molybdène ^a	0,6	Méthoxychlore	4,27
Nickel	107	PCB	0,89
Plomb	84	Pentachlorophénol	14
Sélénium	6	Phtalate	13 733
Thallium ^a	0,3	Pyrène	41
Vanadium ^a	47	Styrène	0,68
Composés organiques		2,4,5-T	3,82
Aldrine	0,48	Tétrachloroéthane	1,25
Benzène	0,14	Tétrachloroéthylène	0,54
Chlordane	3	Toluène	12
Chlorobenzène	211	Toxaphène	0,0013
Chloroforme	0,47	Trichloroéthane	0,68

Source : [28]

4.4 Traitements des eaux usées

Généralement dans les pays en voie de développement, toutes les catégories des eaux usées sont collectées dans un même réseau d'assainissement pour être traitées ensuite dans une station d'épuration.

Le but principal préconisé dans les traitements des eaux usées à des fins d'irrigation des cultures destinées à la consommation humaine, des espaces verts est l'élimination des micro-organismes pathogènes.

Classiquement, le traitement des eaux usées dans une station d'épuration complète passe par les quatre grandes étapes suivantes :

4.4.1 Prétraitement

Cette étape comporte trois opérations successives :

- Le dégrillage qui permet l'élimination des déchets volumineux,
- Le dessablage pour l'élimination des sables et gravier par sédimentation,
- Le dégraissage et déshuilage pour l'élimination des graisses et des huiles par flottation.

4.4.2 Traitement primaire

La décantation primaire est basée sur le principe de la coagulation-floculation. Il s'agit de la séparation de la phase liquide des matières solides. Parmi les réactifs coagulants qui peuvent être utilisés sont : FeCl_3 et $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Au cours de cette étape, s'effectue la décantation de la plus grande proportion des matières minérales et organiques en suspension sous l'effet de la pesanteur dans des bassins en formant les boues primaires qui seront traitées à leur tour.

4.4.3 Traitement secondaire (biologique)

La présence de bassins possédant un équipement spécifique d'aération tel que les turbines permettent de fournir l'oxygène nécessaire aux micro-organismes existants dans les effluents afin qu'ils puissent dégrader la matière organique

dissoute [1]. L'élimination donc de la pollution est basée sur l'activité bactérienne qui permet de transformer la matière organique soluble et colloïdale des eaux usées en sous-produits inorganiques et en nouvelles substances biologiques cellulaires [4].

Actuellement, le traitement biologique comporte deux procédés aérobie et anaérobie. Ce traitement est suivi d'une étape de clarification qui consiste à séparer l'eau épurée et les boues ou des résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques à l'aide de clarificateurs. Ces boues sont essentiellement composées de bactéries.

Une épuration biologique (boues activées) suivie d'une clarification permet d'éliminer 90 % des virus, 60 à 90 % des bactéries, mais ses effets sur les kystes de protozoaires et les œufs d'helminthes sont faibles [14].

4.4.4 Traitement tertiaire (complémentaire)

Le traitement tertiaire complète le traitement primaire et le traitement secondaire afin de détruire entièrement les germes pathogènes issus des eaux domestiques. Après ce traitement, les eaux épurées peuvent être rejetées dans le milieu naturel et réutilisées en irrigation des cultures, des espaces verts et nettoyages des surfaces urbaines.

En général, le traitement tertiaire vise l'élimination des éléments suivants :

- Matière en suspension et matière organique,
- Azote
- Phosphore
- Micro-organismes pathogènes (virus, bactéries, protozoaires et helminthes).

Les méthodes de désinfection des eaux usées utilisées sont :

- Le lagunage
- Chloration
- Ozone
- Ultraviolet

En principe, le choix des substances à éliminer dépend du type d'usage attendu de ces eaux traitées à la sortie de la station d'épuration.

Les boues déposées au fond du bassin seront évacuées et traitées ensuite pour une éventuelle utilisation en agriculture. La présence des métaux lourds en grande concentration dans ces boues remet en cause leur utilisation directe. Elles doivent donc subir des traitements spécifiques pour l'élimination de ces métaux. Parmi les technologies adoptées pour l'élimination de ces traces métalliques dans les eaux usées sont : la précipitation chimique sous forme d'hydroxydes ou de sulfure, l'adsorption sur charbon, l'échange d'ion et l'osmose inverse.

4.5 Recommandations sur la réutilisation des eaux usées traitées

Le développement de la pratique de la réutilisation des eaux usées dans le monde pour des fins agricoles a incité plusieurs pays de mettre en place leurs normes et réglementations spécifiques pour protéger l'environnement et la santé humaine. On doit noter qu'on assiste à des implications différentes entre les règlements et lignes directrices concernant la réutilisation des eaux usées traitées. Les règlements sont issus des instances législatives et possèdent par conséquent un caractère d'obligation tandis que les lignes directrices sont présentées sous formes indicatives, leur respect est soumis à la volonté des utilisateurs [7].

4.5.1 Recommandations internationales

4.5.1.1 Paramètres microbiologiques

Les recommandations internationales de l'OMS (organisation mondiale de la santé) ciblant les paramètres microbiologiques eurent été décrites en 1989 puis révisées en 2000. Elles tiennent compte de nouvelles études épidémiologiques aboutissant à des modifications, principalement sur les normes des œufs d'helminthes [5]. Ces recommandations sont représentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Directives microbiologiques recommandées de l'oms (1989) révisées pour l'utilisation des eaux usées traitées en agriculture ^a

Catégorie	Condition de réutilisation	Groupes Exposés	Techniques d'irrigation	Nématodes Intestinaux ^b (moyenne Arithmétique nbre d'œufs/l ^c)	Coliformes Fécaux (moyenne géométrique nbre./10 ml ^d)	Traitement des eaux usées pour atteindre la qualité microbiologique requise.
A	Irrigation sans Restrictions A1 Pour les cultures maraîchères et salades consommées crues, terrains de sport, parc publics	Travailleurs, consommateurs, public	Toute	$\leq 0,1$ ^f	$\leq 10^3$	Série de bassin de stabilisation bien conçus, réservoir de stockage et de traitement remplis séquentiellement, ou traitement équivalent (p.ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit d'un lagunage tertiaire, soit d'une filtration et d'une désinfection)
B	Irrigation avec restrictions céréalières, Cultures industrielles, Cultures fourragères, pâturages et arbres ^g	B1 Travailleurs (mais pas les enfants < 15 ans), Communautés avoisinantes. B2 comme B1 B3 Travailleurs y compris les enfants < 15 ans, Collectivités Avoisinantes	Aspersion Inondation/ Rigoles Toute	≤ 1 ≤ 1 $\leq 0,1$	$\leq 10^5$ $\leq 10^3$ $\leq 10^3$	Série de bassins de rétention dont un bassin de maturation ou un bassin séquentiel ou un traitement équivalent (p.ex. traitement secondaire conventionnel suivi soit par des lagunages tertiaires, soit une filtration) <i>Comme pour la catégorie A</i> <i>Comme pour la catégorie A</i>
C	Irrigation localisée des cultures de la catégorie B s'il n y a pas d'exposition de travailleurs et du public	Aucun	Goutte-à goutte, micro-jet, etc	Sans objet	Sans objet	Prétraitement comme requis par la technologie d'irrigation, mais moins qu'une sédimentation primaire

Source :[5]

Eléments d'interprétation du contenu du tableau précédent

^a *Dans des cas spécifiques, des facteurs épidémiologiques, socioculturels et environnementaux devraient être pris en compte et les directives modifiées en conséquence.*

^b *Les espèces *Ascaris* et *Trichuris*, et les ankylostomes; la limite recommandée vise à protéger également contre les risques des protozoaires parasites.*

^c *Durant la saison d'irrigation (si les eaux usées sont traitées en bassins de stabilisation ou en réservoirs de stockage et traitement séquentiels qui ont été conçus pour obtenir ces nombres d'œufs, alors la surveillance régulière de la qualité des effluents n'est pas nécessaire.*

^d *Durant la saison d'irrigation (le comptage des coliformes fécaux devrait être réalisé de préférence une fois par semaine, mais au minimum une fois par mois).*

^e *Une limite de ligne directive plus stricte (≤ 200 coliformes fécaux/100 ml) est appropriée pour les pelouses publiques, comme les pelouses des hôtels, avec lesquelles le public peut entrer en contact direct.*

^f *Cette limite directive peut être augmentée à 41 œuf/l si (i) si les conditions sont chaudes et sèches et que l'irrigation de surface n'est pas utilisée ou (ii) si le traitement des eaux usées est complété avec des campagnes de chimiothérapie anthelminthique dans les zones de réutilisation des eaux.*

^g *Dans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation devrait cesser deux semaines avant la cueillette des fruits, et aucun fruit ne devrait être ramassé sur le sol. L'irrigation par aspersion ne devrait pas être utilisée.*

4.5.1.2 Eléments métalliques toxiques

Les principaux éléments toxiques présents dans les eaux usées sont les oligo-éléments et les métaux lourds. Il faut souligner que certains oligo-éléments sont indispensables à la croissance des plantes en petites quantités comme le fer (Fe), manganèse (Mn), Molybdène (Mo) et le zinc (Zn). Tandis qu'en quantités excessives, ils deviennent indésirables dans les tissus des végétaux et agissent négativement sur leurs croissances.

Comme l'absorption des oligo-éléments par les plantes se fait en fines quantités, il y a donc accumulation de la plupart de la quantité dans le sol surtout en surface. Cette accumulation sera donc à l'origine d'une contamination du sol. Les seuils phytotoxiques des principaux éléments [3] sont représentés dans le tableau 15.

Tableau 15 : Concentrations maximales recommandées d'éléments de trace dans l'eau d'irrigation

Élément	Concentration (mg / l)	Remarques
Al (aluminium)	5,0	Peut causer une non-productivité dans les sols acides (pH <5,5), mais des sols plus alcalins à pH > 7,0 précipiteront les ions et élimineront toute toxicité.
Comme (arsenic)	0,10	La toxicité pour les plantes varie beaucoup, allant de 12 mg / l pour l'herbe du Soudan à moins de 0,05 mg / l pour le riz.
Be (béryllium)	0,10	La toxicité pour les plantes varie considérablement, allant de 5 mg / l pour le chou frisé à 0,5 mg / l pour le haricot noir.
Cd (cadmium)	0,01	Toxique pour les haricots, les betteraves et les navets à des concentrations aussi faibles que 0,1 mg / l dans des solutions nutritives. Limites conservatrices recommandées en raison de son potentiel d'accumulation dans les plantes et les sols à des concentrations pouvant être nocives pour l'homme.
Co (cobalt)	0,05	Toxique pour les plants de tomates à 0,1 mg / l dans une solution nutritive. A tendance à être inactivé par les sols neutres et alcalins.
Cr (chrome)	0,10	Non généralement reconnu comme un élément essentiel de la croissance. Limites conservatrices recommandées en raison du manque de connaissances sur sa toxicité pour les plantes.
Cu (cuivre)	0,20	Toxique pour un certain nombre de plantes à raison de 0,1 à 1,0 mg / l dans des solutions nutritives.
F (fluorure)	1,0	Inactivé par les sols neutres et alcalins.
Fe (fer)	5,0	Non toxique pour les plantes dans les sols aérés, mais peut contribuer à l'acidification du sol et à la perte de disponibilité de phosphore et de molybdène essentiels. L'aspersion en hauteur peut entraîner des dépôts inesthétiques sur les plantes, les équipements et les bâtiments.
Li (lithium)	2,5	Toléré par la plupart des cultures jusqu'à 5 mg / l; mobile dans le sol. Toxique pour les agrumes à faibles concentrations (< 0,075 mg / l). Agit de la même manière que le bore.
Mn (manganèse)	0,20	Toxique pour un nombre de cultures allant de quelques dixièmes à quelques mg / l, mais généralement uniquement dans les sols acides.
Mo (molybdène)	0,01	Non toxique pour les plantes à des concentrations normales dans le sol et dans l'eau. Peut être toxique pour le bétail si le fourrage est cultivé dans des sols contenant de fortes concentrations de molybdène disponible.
Ni (nickel)	0,20	Toxique pour un certain nombre de plantes à raison de 0,5 mg / l à 1,0 mg / l; toxicité réduite à pH neutre ou alcalin.
Pd (plomb)	5,0	Peut inhiber la croissance des cellules végétales à des concentrations très élevées.
Se (sélénium)	0,02	Toxique pour les plantes à des concentrations aussi faibles que 0,025 mg / l et toxique pour le bétail si le fourrage est cultivé dans des sols avec des niveaux relativement élevés de sélénium ajouté. Un élément essentiel pour les animaux mais à de très faibles concentrations.
Sn (étain)	-	-
Ti (titane)	-	Effectivement exclu par les plantes; tolérance spécifique inconnue.
W (tungstène)	-	-
V (vanadium)	0,10	Toxique pour de nombreuses plantes à des concentrations relativement faibles.
Zn (zinc)	2,0	Toxique pour de nombreuses plantes à des concentrations très variables. toxicité réduite à un pH > 6,0 et dans des sols à texture fine ou organiques.

Source : [3]

NB : La concentration maximale est basée sur un taux d'application de l'eau conforme aux bonnes pratiques d'irrigation (10 000 m³ par hectare et par an). Si le taux d'application de l'eau dépasse largement ce niveau, les concentrations maximales doivent être ajustées à la baisse en conséquence. Aucun ajustement ne doit être effectué pour des taux d'application inférieurs à 10 000 m³ par hectare et par an. Les valeurs indiquées concernent l'eau utilisée de manière continue sur un site.

4.5.2 Recommandations Algériennes

4.5.2.1 Paramètres physico-chimiques

En Algérie, la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles est réglementée par l'arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 qui fixe les spécifications nécessaires pour cet objectif. Les concentrations maximales admissibles physico- chimiques indiquées dans cet arrêté sont synthétisées dans le tableau 16.

Tableau 16: Concentrations maximales admissibles des paramètres physico-chimiques dans l'eau.

Paramètres		Unité	Concentration maximale admissible
Physiques	pH	-	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	3
	Infiltration le SAR = 0 - 3	ds/m	0,2
	3 - 6		0,3
6 - 12	0,5		
12 - 20	1,3		
20 - 40	3		
Chimiques	DBO5	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	Chlorure (Cl)	meq/l	10
	Azote (NO ₃ - N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	8,5

Source : Journal officiel de la République Algérienne n°41, 15 juillet 2012

4.5.2.2 Paramètres microbiologiques

En Algérie, les valeurs limites admissibles des paramètres microbiologiques des eaux usées épurées à des fins agricoles arrêtées officiellement le 15 janvier 2012 sont résumées dans le tableau 17

Tableau 17 : Valeurs limites admissibles des paramètres microbiologiques dans l'eau.

Groupes de cultures	Paramètres microbiologiques	
	Coliformes fécaux (CFU/100ml) (moyenne géométrique)	Nématodes intestinaux (.ufs/1) (moyenne arithmétique)
Irrigation non restrictive. Culture de produits pouvant être consommés crus.	< 100	Absence
Légumes qui ne sont consommés que cuits. Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire. Arbres fruitiers	< 250	< 0,1
Arbres fruitiers (1). Cultures et arbustes fourragers (2). Cultures céréalières. Cultures industrielles (3). Arbres forestiers. Plantes florales et ornementales (4).	Seuil recommandé < 1000	< 1
Cultures du groupe précédent (CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée (5) (6).	pas de norme recommandée	pas de norme recommandée

(1) L'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la cueillette. Aucun fruit tombé ne doit être ramassé sur le sol. L'irrigation par aspersion est à éviter.
(2) Le pâturage direct est interdit et il est recommandé de cesser l'irrigation au moins une semaine avant la coupe.
(3) Pour les cultures industrielles et arbres forestiers, des paramètres plus permissifs peuvent être adoptés.
(4) Une directive plus stricte (< 200 coliformes fécaux par 100 ml) est justifiée pour l'irrigation des parcs et des espaces verts avec lesquels le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.
(5) Exige une technique d'irrigation limitant le mouillage des fruits et légumes.
(6) A condition que les ouvriers agricoles et la population alentour maîtrisent la gestion de l'irrigation localisée et respectent les règles d'hygiène exigées. Aucune population alentour.

Source : Journal officiel de la République Algérienne n°41, 15 juillet 2012

4.5.2.3 Eléments métalliques toxiques

En Algérie, les concentrations maximales admissibles des éléments métalliques toxiques dans l'eau indiquées dans l'arrêté interministériel précédent sont synthétisées dans le tableau 18.

Tableau 18 Concentrations maximales admissibles des éléments métalliques toxiques dans l'eau.

Elément	Concentration maximale admissible (mg/l)
Aluminium	20,0
Arsenic	2
Béryllium	0,5
Bore	2,0
Cadmium	0,05
Chrome	1,0
Cobalt	5,0
Cuivre	5,0
Cyanures	0,5
Fluor	15,0
Fer	20,0
Phénols	0,002
Plomb	10,0
Lithium	2,5
Manganèse	10
Mercure	0,01
Molybdène	0,05
Nickel	2,0
Sélénium	0,02
Vanadium	1
Zinc	10,0

Source : Journal officiel de la République Algérienne n°41, 15 juillet 2012.

Références bibliographiques

[1] Alexandre O., Boutin C., Duchène Ph., Lagrange C., Lakel A., Liénard A., Orditz D. (1998) Filières d'épuration adaptées aux petites collectivités. - Technique et documentation Lavoisier (FNDAE N22), Paris, France.

[2] Allen R. G., Luis S., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy, FAO. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>

[3] Ayers R. S and Westcot D. W. (1985) "Water Quality for Agriculture," Irrigation and Drainage Paper No. 29, FAO, Rome, 174p.

[4] Benefield L.D. and Randall C. W. (1980) Biological process design for treatment. Prentice-Hall, Toronto, 526 pages.

[5] Blumenthal U.J., Mara D.D., Peasey A., Ruiz-Palacios G., Stott R. (2000) Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines. Bull. World Health Organ., 78(9) : 1104-16.

[6] Buechler S., Hertog W., Veenhuizen R. (2003) L'utilisation des eaux usées dans l'agriculture urbaine Magazine Agriculture Urbaine, n°8 :1-4.

[7] Charland K. (2014) Analyse des perspectives de réutilisation des eaux usées municipales au Québec, Maitrise en environnement, université de Sherbrook, 70p.

[8] Couture I. (2004) Analyse d'eau pour fin d'irrigation , agri- division, MAPAQ Montérégie-Est , 8p.

[9] Doneen L.D. (1964) Notes on Water Quality in Agriculture. Water Science and Engineering, Paper 4001, Department of Water Sciences and Engineering, University of California, Davis.

[10] Duchaufour P. (2000) Introduction à la science du sol. 331p.

[11] Durant J H. (1958) Les sols irrigables. Etude pédologique. S.E.S Alger, 198p.

[12] Eaton, F.M. (1950) Significance of carbonates in irrigation waters: Soil Science, 39, 123-133.

- [13] Environnement Canada. (2011) Érosion et sédimentation. En ligne: <http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=32121A74-1>. Consulté le 28 septembre 2019.
- [14] Faby J.A., Brissaud F. (1997) L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l'Eau, 76p.
- [15] Hillel D. (1998) Environmental soil physics. Academic Press, San Diego
- [16] Kelley W.P. (1963) Use of saline irrigation water. Soil Science, 95(4), 385-391.
- [17] Kramer P.J., Boyer J.S. (1995) Water relations of plants and soils. San Diego, Etats-Unis, Academic Press, 495 p.
- [18] Labye Y., Olson M. A., Galand A., Tsiourtis N. (1996) Conception et optimisation des reseaux d'irrigation. Bulletin , irrigation drainage n°44, Fao, Rome.
- [19] Lachâal M., Abdelly C., Seleimi N., Hajji M., Soltani A., Grignon C. (1997) Recherche de critères physiologiques pour le tri de plantes tolérantes au sel. 6ème journée scientifique du réseau des biotechnologies végétales. Aupelf-uref, pp: 283-289.
- [20] Landreau A., Monition L. (1977) Nouvelle évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation Rapport BRGM inédit 77 SGL 628 HYD.
- [21] Maait J. (1997) La réutilisation des eaux usées en irrigation. Synthèse bibliographique. Engref de Montpellier.
- [22] Matthes G. (1982) The properties of ground water. Wiley, New York, 397p
- [23] Monition L. (1969) Données sur l'utilisation des eaux selon leur qualité chimique. Rapport BRGM inedit 69 SGL 122 HYD
- [24] Morris,R.et Devitt, D. (1991) Sampling and interpretation of landscape irrigation water. Fact Sheet 01 – 91. University of Nevada, Reno, USA. 5p.
- [25] Obiefuna G.I. and Sheriff A (2011) Assessment of shallow ground water quality of Pindiga Gombe Area, Yola Area, NE, Nigeria for irrigation and domestic purposes. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 3, 131–141

[26] Office national de l'assainissement (ONA). (2018) Site internet: <https://ona-dz.org/L-ONA-en-chiffres.html>.

[27] Ollier C. H., Poirée M. (1981) Les réseaux d'irrigation-théorie, technique et économie des arrosages. Ed, Eyrolles, Paris, 503 p.

[28] Organisation mondiale de sante (OMS). (2012) Directives oms pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères, Volume II, Utilisation des eaux usées en agriculture.

[29] Paliwal K.V. (1972) Irrigation with saline water, Monogram No. 2 (New series). IARI, New Delhi, 198p.

[30] Parent L.O., Rivest R. (2003) Les éléments nutritifs Dans le Guide de fertilisation. 1ère édition. CRAAQ, Québec. 294p.

[31] Rejsek F. (2002) Analyse des eaux - aspects réglementaires et techniques. Ed CRDP, Aquitaine. France.

[32] Richards L.A. (1954) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, in Agricultural Handbook 60: Washington D.C., United States Department of Agriculture, 160 p.

[33] Rodier J., Legube B., Merlet N. (2005) L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Ed Dunod, Paris.

[34] Rodier J. (2009) L'Analyse de l'Eau (9ème édition). Ed. Dunod : Paris.

[35] Simler R. (2009). Diagrammes software. Downloadable at <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

[36] Szabolcs I., Darab C. (1964) The influence of irrigation water of high sodium carbonate content on soils. In I. Szabolics (Ed.), Proc 8th International Congress Soil Science Sodics Soils, Res Inst Soil Sci Agric Chem Hungarian Acad Sci, ISSS Trans II, 802–812.

[37] Todd D.K., Mays L. (1980) Groundwater Hydrology. (3a. ed.). New York: Wiley International Edition.

[38] Wilcox L.V. (1955) Classification and use of irrigation waters: Washington D.C., United States Department of Agriculture, 19p.