



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

---

UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR- DJELFA  
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE  
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET VÉTÉRINAIRES

## **COURS**

---

# **Hydrogéochimie de la solution du sol**

---

DESTINÉ AUX ÉTUDIANTS DE :

1<sup>ÈRE</sup> ANNÉE MASTER, EAU ET ENVIRONNEMENT

Présenté par : Dr. BOUTELDJAOUI Fatah, MCB, Université Ziane Achour- Djelfa

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

# Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

## IV.1 Introduction

Toutes les **eaux d'irrigation** contiennent des **sels dissous**. Certains sont utiles même si les eaux en sont très riches ; d'autres utiles à faibles doses, et deviennent nuisibles si la teneur s'accroît ; d'autre enfin sont nocifs. Les facteurs les plus importants pour déterminer la qualité requise de l'eau dans l'agriculture sont : La **salinité**, le **sodium**, l'**alcalinité**, le pH de l'**eau** et en fin la **concentration en élément** qui peuvent être toxique pour le **végétal**.

## IV.2 La salinité

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de **calcium** ( $\text{Ca}^{2+}$ ), de magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), de **sodium** ( $\text{Na}^+$ ), de **potassium** ( $\text{K}^+$ ), les **chlorures** ( $\text{Cl}^-$ ), les **sulfates** ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) et les **bicarbonates** ( $\text{HCO}_3^-$ ) (Harivandi, 1999).

### Le sodium ( $\text{Na}^+$ )

Le **sodium** est l'un des éléments les plus **indésirables** dans l'**eau d'irrigation**. Le problème principal avec une grande quantité de cet élément est son effet sur la **perméabilité du sol** et sur l'**infiltration de l'eau**. En effet, le **sodium** peut se substituer aux ions **alcalino-terreux** des argiles ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ ) et **défloccule** celles-ci, d'où la **détérioration** de la **structure du sol** et une **diminution remarquable** de sa **perméabilité** (Baize, 1988).

Un excès de **sodium** peut également être à l'origine de la **toxicité** chez **certaines plantes**, or le sodium est absorbé par les **cultures** en même temps que l'eau et celui-ci se concentre dans les feuilles tandis que l'eau s'échappe par transpiration (Ayers & Westcot, 1984). Une fois que la concentration de cet élément atteint le seuil de la **tolérance de la culture** on peut constater des **toxicités** qui se manifestent par des **brulures** et des **dessèchements** des feuilles qui aboutissent toujours à une mort certaine du végétal.

## IV.3 Alcalinité

L'abondance des ions **carbonates** ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et **bicarbonates** ( $\text{HCO}_3^-$ ) dans l'eau d'irrigation mérite d'être évaluée. Lorsque l'eau d'irrigation contient un taux de **carbonates** et de **bicarbonates** plus **élevé** que celui de **calcium** et du **magnésium**, on constate une tendance à la **précipitation** de ces deux derniers éléments ce qui fait augmenter le **SAR**.

### Remarque

La **salinité** et le **sodium** sont d'importance majeure, car un excès de sel augmente la **pression osmotique** de l'**eau du sol** et provoque des conditions qui **empêchent** les **racines d'absorber l'eau**. Ces conditions engendrent une **sécheresse physiologique**. Même si le sol semble avoir beaucoup d'humidité, les plants **flétrissent** parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celle perdue par **évapotranspiration**.

## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

**Le bore :** Il est l'un des **éléments essentiels** à la **croissance** des végétaux, mais il n'est nécessaire qu'à **doses relativement faibles**, en quantités excessives, il devient toxique. Il faut **0,2 mg/l** dans l'eau d'irrigation pour la croissance des plantes alors que la toxicité peut apparaître de **1 à 2 mg/l**.

### IV.4. Classifications des eaux d'irrigation

Plusieurs classifications ont été proposées pour classer les eaux par rapport à leur qualité pour l'irrigation. La plupart de ces classifications se basent sur le calcul de deux facteurs essentiels, à savoir la salinité présentée par la **conductivité électrique (CE)** et le **SAR (Sodium Absorption ratio)**

**Tableau 1.** Évaluation du danger de salinité selon plusieurs sources

Classe de salinité	US Salinity Laboratory de Riverside (1954)	Thorn and Peterson (1954)	Carter (1969)	Ayers and Westcot (1976)
	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)	CE (dS/m)
C1	0.1-0.25	<0.25	<0.4	<0.75
C2	0.25-0.75	0.25-0.75	0.4-1.2	0.75-1
C3	0.75-2.25	0.75-2.25	1.2-2.25	1.5-3.0
C4	>2.25	2.5-4.0	2.25-4.0	>3.0
C5		4.0-6.0		

**C1:** satisfaisante pour toutes les cultures exceptées les cultures très sensibles.

**C2:** Généralement satisfaisante bien que quelques cultures sensibles seront affectées.

**C3:** Satisfaisante pour la plupart des grandes cultures, mais des conditions de salinité vont se développer si le lessivage et le drainage ne sont pas adéquats.

**C4:** Normalement non recommandée sauf si des cultures tolérantes sont cultivées. Le lessivage et le drainage sont impératifs.

#### IV.4.1. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Richards :

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

Le SAR (Sodium Absorption Ratio) est calculé par la formule élaborée par (Richards, 1954) et elle est formulée comme suit :

## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

$$S. A. R. = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}}$$

Tous les **ions** sont exprimés en **méq/L**.

Le **S.A.R.** permet d'évaluer le risque d'alcalinisation du sol par l'eau d'irrigation, selon le risque croissant, les eaux sont classées de **S1** à **S4**. Le **tableau 2** montre la désignation de différentes classes de ce dernier.

Il est possible également de classer les eaux d'irrigation selon leur conductivité électrique à **25°C**, les classes sont données dans le tableau suivant :

**Tableau 2.** Classification des **eaux d'irrigation** selon la **conductivité électrique** à **25°C**

Nomination	Classe	Interprétation
Classe 1(S1)	0<SAR<10 Bas taux de sodium	Eaux utilisables pour l'irrigation de presque <b>tous les sols</b> . Danger d' <b>alcalinisation réduit</b> , bien que certaines <b>cultures sensibles</b> au sodium puissent être <b>gênées</b> .
Classe2(S2)	10<SAR<18 Taux moyen de sodium	Le <b>danger d'alcalinisation</b> des sols est <b>appréciable</b> dans les <b>sols à textures fine</b> et à <b>forte capacité d'échange</b> , surtout dans la condition de <b>faible lessivage</b> . Eau utilisable sur les sols de <b>texture grossière</b> , ou sur les <b>sols organiques</b> ayant une <b>bonne perméabilité</b> .
Classe3(S3)	18<SAR<26 Taux élevé de sodium	Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une <b>alcalinité dangereuse</b> dans la <b>plupart des sols</b> , à l'exception des <b>sols pauvres en argile</b> . Emploi exigeant la mise en œuvre d'un <b>aménagement</b> spécial assurant un <b>bon drainage</b> et fort lessivage. L'addition de <b>matière organique</b> , d' <b>amendements chimiques</b> est souvent nécessaire.
Classe4(S4)	SAR>26 Taux très élevé de sodium	Eaux souvent <b>inutilisables pour l'irrigation</b> , présentant un <b>fort danger d'alcalinisation</b> . Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation seulement si leur <b>salinité</b> permet l'addition de <b>calcium</b> ou si le <b>sol</b> en contient suffisamment.

Dans la plupart des cas et pour la **prédiction de l'effet** des eaux d'irrigation en considérant les deux critères en même temps (**salinisation et sodium**), la classification de Riverside de l'**USSSL (1954)** est la plus utilisée. Comme il est expliqué dans la figure 26, le diagramme de Riverside repose sur le croisement des deux critères : Le premier est la conductivité électrique (CE) en abscisse, les eaux sont classées de C1 à C4 selon le risque croissant de salinisation (**Tableau 3**). Ce critère vise à quantifier la charge en sels de la solution et par voie de conséquence le risque de

## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

salinisation (accumulation de sel dans les sols). Le second est le **SAR**. (**Sodium Adsorption Ratio**) de l'eau en ordonnées, les eaux sont classées de **S1** à **S4** selon le risque croissant d'alcalinisation (Tableau 2).

Nomination	Classes	Interprétations
Classe 1 (C1)	$CE < 250 \mu\text{S/cm}$	Eau non saline, utilisée pour l'irrigation de la plupart des cultures et sur différents sols.
Classe 2 (C2)	$250 < CE < 750 \mu\text{S/cm}$	salinité moyenne, utilisée avec un léger lessivage.
Classe 3 (C3)	$750 < CE < 2250 \mu\text{S/cm}$	Eau à forte salinité, non utilisable dans les sols à drainage restreint.
Classe 4 (C4)	$2250 < CE < 5000 \mu\text{S/cm}$	Eau à très forte salinité inutilisable pour l'irrigation.
Classe 5 (C5)	$5000 < CE < 20000 \mu\text{S/cm}$	Eau à salinité excessive.

Source (Durand, 1982)

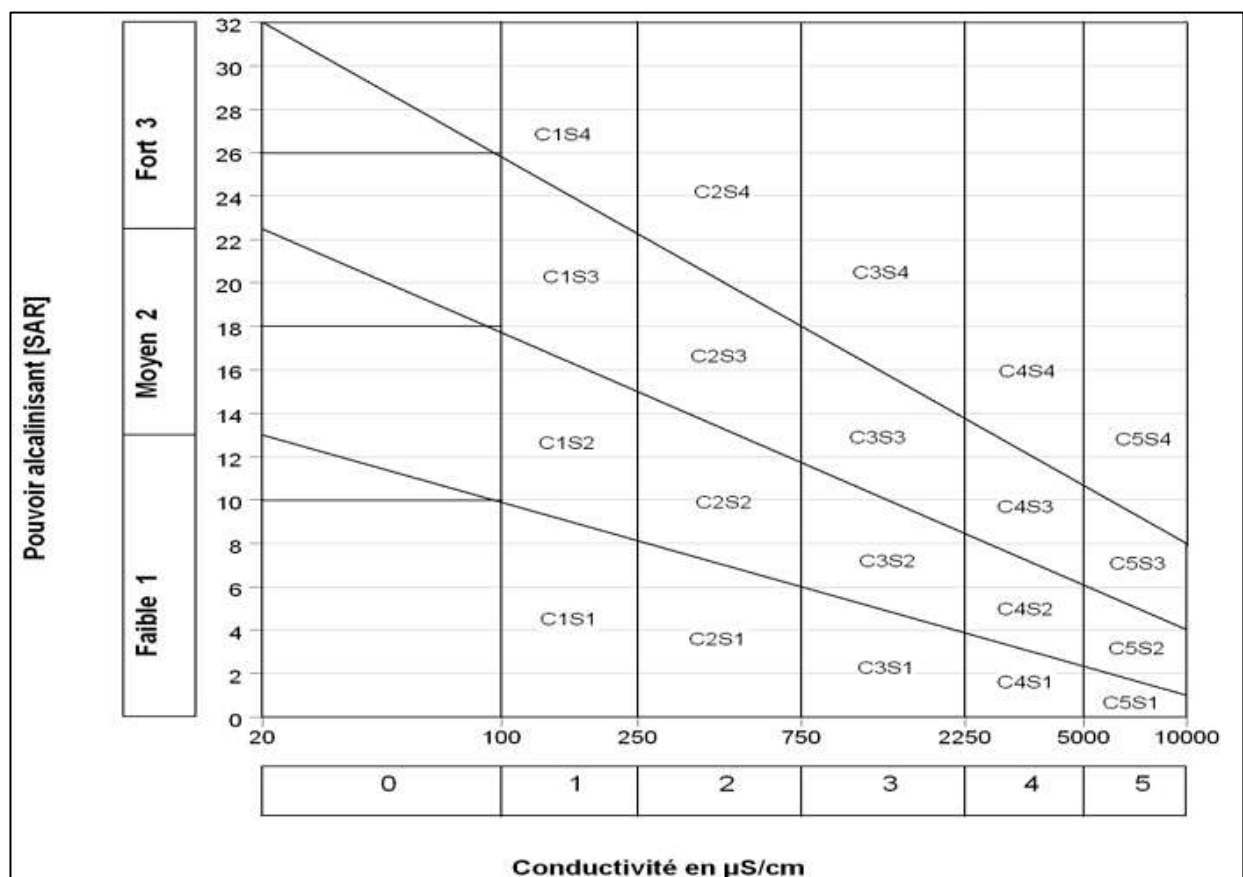


Figure 1. Classification des eaux d'irrigation par le diagramme de Richards

## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

Tableau 4. Classification des eaux d'irrigation par le diagramme de Richards

Classes	Qualité	Appréciation
C1-S1	Bonne	Eau présentant une <b>bonne qualité</b> pour l'irrigation, utilisable avec <b>précautions</b> pour les <b>plantes sensibles</b> .
C1-S2, C2-S1	Moyenne à bonne	Eau de qualité <b>bonne</b> à <b>moyenne</b> a utilisé avec <b>précaution</b> pour les <b>sols mal drainés</b> et pour les <b>plantes sensibles</b> .
C2-S2, C1-S3, C3-S1	moyenne à médiocre	Qualité moyenne à médiocre a utilisé avec précaution ; nécessite un drainage avec des doses de lessivage et/ou apport de gypse.
C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1	médiocre à mauvaise	Eau de <b>qualité médiocre</b> à mauvaise, utilisée avec précaution pour les <b>sols lourds</b> et les <b>plantes sensibles</b> , l'emploi pour les <b>sols légers</b> et bien drainés nécessite une dose de <b>lessivage et/ou apport de gypse</b> .
C2-S4, C4-S2, C3-S3	mauvaise	Eau de <b>qualité mauvaise</b> utilisée que pour les <b>sols légers</b> et bien drainés et pour les <b>plantes résistantes</b> avec nécessité de <b>doses de lessivages</b> et/ou <b>apport de gypse</b> .
C3-S4, C4-S3	très mauvaise	Qualité <b>très mauvaise</b> a n'utilisé que pour les <b>circonstances exceptionnelles</b> .
C4-S4	Inutilisable	<b>Déconseillée pour l'irrigation.</b>

### IV.4.2. Classification des eaux d'irrigation par la méthode de Wilcox:

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La **classification de Wilcox** fondée sur la **conductivité électrique** et la **teneur en sodium** dans l'eau qui est exprimée en **pourcentage**, est définie par la **relation** :

Le % Na<sup>+</sup> peut être calculé par la relation suivante :

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

Cette classification définit **cinq classes** d'eau qui sont : **Excellente** – **Bonne** – **Admissible** - **Médiocre** – **Mauvaise**

## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

### IV.5. L'alcalinité résiduelle

L'alcalinité résiduelle n'est qu'autre que le concept proposé par **Eaton, (1950), et Richards, (1954)**, nommée « **Residuel Sodium Carbonates (RSC)**», elle est définie comme étant la part de l'**alcalinité** qui n'est pas neutralisée par les cations divalents). Elle est souvent considérée à la précipitation de la calcite et de la sépiolite.

$$RSC = (HCO_3 + CO_3) - (Ca + Mg)$$

Tous les ions sont exprimés en **méq/l**.

Classes de RSC :

- **RSC < 1,25 meq/l** → **Bonne**
- **1,25 < RSC < 2,5 meq/l** → **Médiocre**
- **RSC > 2,5 meq/l** → **Mauvaise**

### IV.6. L'indice de perméabilité, en anglais «Permeability Index (PI)»

La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation et est influencée par le contenu de sodium, de calcium, de magnésium et de bicarbonate dans le sol.

L'indice de perméabilité est déterminé par l'équation suivante :

**Doneen en 1964**, à classé les eaux d'irrigation en se basant sur l'indice de perméabilité

Il est défini par la relation suivante:

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

Si **PI > 75%** : l'eau est excellente pour l'irrigation;

Si **25% < PI < 75%** : l'eau est de bonne qualité pour l'irrigation ;

Si **PI < 25%** : l'eau est de mauvaise qualité

### IV.7. Pourcentage de magnésium ou danger de magnésium, en anglais "Magnesium Hazard (MH)"

Le pourcentage de magnésium ou danger de magnésium exprime la mesure de l'effet du magnésium dans l'eau d'irrigation. L'excès de magnésium affecte la qualité des sols qui peut se traduire en faible rendement des cultures. Le **%Mg** est calculé comme suit :

## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

$$\%Mg = (Mg^{2+} / (Ca^{2+} + Mg^{2+})) \times 100$$

Où toutes les concentrations sont indiquées milliéquivalent par litre.

- Si  $\%Mg > 50\%$  : l'eau est mauvaise pour l'irrigation.
- Si  $\%Mg < 50\%$  : l'eau est bonne pour l'irrigation.

### IV.8. L'indice Kelly's Ratio (K.R.) :

Cet indice est représenté par le rapport des concentrations de  $Na^+$  (meq/L) et la somme de  $Ca^{2+}$  (meq/L) et  $Mg^{2+}$  (meq/L). Il est parmi les indices constituant une base pour la détermination de l'aptitude des eaux à l'irrigation.

Une grande concentration en  $Na^+$  dans l'eau d'irrigation est considérée comme inappropriée pour son utilisation, cet indice est donné par la relation suivante :

$$K.R. = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

Si :  $K.R. < 1$  : l'eau est considérée comme bonne pour l'irrigation.

Si :  $K.R. > 1$  : l'eau est mauvaise pour l'irrigation (elle est déconseillée).



## Chapitre III : Salinisation et dégradation physico-chimique des sols

Tableau 5. Les normes des eaux d'irrigation

Paramètre de l'eau	Symbole	Unité	Valeur maximale admissible
Conductivité électrique	CE	dS/m	3
Total des sels dissous	TDS	mg/l	2000
Calcium	Ca <sup>++</sup>	mg/l	400
Magnésium	Mg <sup>++</sup>	mg/l	60,75
Sodium	Na <sup>+</sup>	mg/l	920
Carbonates	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	mg/l	3
Bicarbonates	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	610
Chlore	Cl	mg/l	1065
Sulfates	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	960
Nitrates	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	10
Ammonium	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	5
Phosphate	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	2
Potassium	K	mg/l	2
Acidité	pH	-	6 – 8,5
Coefficient d'absorption du sodium	SAR	-	15
Bor	B	mg/l	2