

JR
BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

**AMÉNAGEMENT DES SOLS SALÉS
IRRIGATION AVEC DES EAUX SALÉES**

ÉTUDE DOCUMENTAIRE

SGN/DOC
Bibliothèque



Département EAU

80 SGN 922 EAU ⁽²⁾

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

**AMÉNAGEMENT DES SOLS SALÉS
IRRIGATION AVEC DES EAUX SALÉES**

ÉTUDE DOCUMENTAIRE

par

A. LALLEMAND-BARRÈS



Département EAU

B.P. 6009 - 45060 Orléans Cedex - Tél.: (38) 63.80.01

80 SGN 922 EAU

Décembre 1980

R E S U M E

L'approvisionnement en eaux d'irrigation est un facteur déterminant de l'extension de surfaces irriguées en pays aride et semi-aride. Cependant l'agriculture irriguée rencontre souvent le problème de la salinisation soit naturelle soit secondaire du sol.

Comme se fait cette salinisation du sol ?

Comment peut-on y remédier et l'éviter ?

Cette étude documentaire succincte réalisée sur crédits propres, se propose de cerner le problème et d'apporter quelques éléments de réponse à l'hydrogéologue amené à être confronté aux problèmes d'aménagement en zone aride.

S O M M A I R E

	<u>Pages</u>
INTRODUCTION	
1. - LES SOLS SALES	2
1.1. MECANISMES DE LA SALINISATION DES SOLS	2
1.2. MESURE DE LA SALINITE DU SOL	2
1.3. CARACTERISTIQUES DES SOLS SALES	7
1.4. RESTAURATION DES SOLS SALES	8
1.5. CONTROLE DE LA SALINITE APRES RESTAURATION.....	15
1.6. SIMULATION ET PREVISION DE LA SALINISATION DU SOL	17
2. - IRRIGATION AVEC DES EAUX SALEES	19
2.1. CARACTERISATION DES EAUX D'IRRIGATION	19
2.2. CARACTERISATION DES SOLS A IRRIGUER	24
2.3. METHODES D'IRRIGATION	27
2.4. LE DRAINAGE	28
CONCLUSION	
BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE	

AVERTISSEMENT : *Le sujet traité est vaste et la bibliographie existante très abondante . Il ne nous était pas possible de tout analyser dans le cadre de cette étude. Nous avons volontairement laissé de coté les aspects théoriques, les expérimentations décrites, pour n'exposer que les notions de base fondamentales pour l'hydrogéologue amené à être confronté à ces problèmes.*

INTRODUCTION

Les problèmes de sol salé et d'irrigation avec des eaux salées ne sont pas spécifiques d'une région particulière du monde. Ils sont connus en Europe (Russie, Hongrie) aussi bien qu'en zone aride. Cependant ce problème est particulièrement répandu en zone aride et semi-aride, et il a été étudié surtout dans ces régions. On estime qu'un tiers des douze millions d'hectares de terres irriguées du monde est affecté par les problèmes de salinité.

Tous les sols contiennent une certaine quantité de sels solubles ; cependant ils ne sont pas tous considérés comme étant salés. Ils ne sont considérés comme tels que lorsque l'accumulation dans le sol des sels solubles atteint un niveau de concentration portant préjudice à la croissance des plantes.

Le développement de l'irrigation en zones aride et semi-aride demande un contrôle permanent de la salinité dans les sols et dans l'eau d'irrigation. Le calcul des besoins en eau dans un système d'irrigation doit prendre en compte les besoins en eau des plantes et la quantité d'eau nécessaire pour déplacer les sels en dehors de la zone racinaire. Connaissant la salinité de l'eau d'irrigation et les besoins en eau des plantes, on peut prédire l'accumulation des sels et calculer la quantité d'eau qu'il faut pour maintenir la teneur en sel suffisamment basse pour une croissance normale des plantes.

I. - LES SOLS SALES

1.1. MECANISMES DE LA SALINISATION DES SOLS

Il y a lieu de distinguer :

- La salinisation primaire

que l'on rencontre par exemple en Mésopotamie, et qui résulte du processus d'altération des roches. La migration et le dépôt des sels dissous dans l'eau dépendent des caractéristiques du milieu naturel et des précipitations. Dans les régions arides ou semi-arides, le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous n'existent plus et l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol.

Dans les régions cotières l'intrusion d'eaux salées et la submersion des terres basses par l'eau de mer provoquent la salinisation de l'eau souterraine et celle des sols.

- La salinisation secondaire

des sols irrigués due à l'accumulation des sels solubles dans le sol. Elle résulte de divers facteurs dont l'irrigation avec des eaux de mauvaise qualité, un lessivage insuffisant, un drainage inefficace, un taux important d'évaporation, des remontées du niveau des nappes.

Lorsque les sols reçoivent un excès de sels solubles, il y a échange entre le Na^+ et les ions Ca^{++} et Mg^{++} fixés sur les minéraux argileux. C'est un phénomène d'alcalinisation. Il faut une quantité notable de Na^+ pour qu'il y ait adsorption par les argiles. Les ions Ca^{++} et Mg^{++} échangés précipiteront quand le produit de solubilité de leurs sels sera dépassé par suite d'évaporation. Au-dessus d'un taux de 15% de Na^+ échangeable on parlera de sols à alcalis. Il apparaîtra alors une dégradation des propriétés physiques du sol.

1.2. MESURE DE LA SALINITE DU SOL

1.2.1. Définition

La salinité des sols a été longtemps mesurée par la résistivité des extraits de sol, qui permet de calculer leur teneur en sels solubles. Cette salinité s'exprime en conductibilité spécifique à 25°C, de la solution obtenue à partir du sol, soit C.E. 25°C, en mmhos/cm.

1.2.2. Tolérance des plantes au sel

La tolérance au sel d'une culture s'évalue soit en fonction du critère biologique (survivance ou non dans un milieu salin), soit en fonction du rendement relatif d'une culture sur sol salin comparé à son rendement sur sol non salin, c'est ce dernier critère qui est utilisé en général. On peut aussi évaluer le rendement absolu d'une culture sur sol salin, qui détermine le choix d'un assolement en milieu salin.

La classification courante est celle proposée par RICHARDS en 1954 :

C.E. 25°C mmhos/cm	Réponse des plantes
0 - 2	Effet sur les plantes , négligeable
2 - 4	Les récoltes des cultures très sensibles peuvent être réduites.
4 - 8	Les récoltes de nombreuses cultures sont réduites en quantité et en qualité
8 -16	Seules les cultures tolérantes donnent de bonnes récoltes.
> 16	Seules les cultures très tolérantes donnent des récoltes.

Les tableaux en annexe donnent la tolérance relative des plantes cultivées au sel.

1.2.3. Méthodes de mesure

La méthode classique il y a encore quelques années consistait à extraire l'eau des échantillons de sol et à mesurer la salinité . Cette méthode de "l'extrait saturé" a été décrite par RICHARDS.

- Préparation de l'extrait saturé

L'échantillon de sol à étudier est placé dans une capsule et on lui ajoute de l'eau jusqu'au refus d'absorption . Quand on a obtenu la pâte de terre saturée on la place sur un buchner et on extrait l'eau sous vide . La mesure de conductibilité de cet extrait donne la mesure de salinité.

Cette méthode présente quelques inconvénients : l'humidité à saturation est fonction de l'observation , l'extraction sous un vide qui n'est pas déterminé n'est peut être pas complète, l'abondance des échantillons à prélever entraîne une quantité importante d'analyses . Notons qu'il est possible aussi d'extraire l'eau du sol à l'aide de bougies poreuses implantées dans le profil de sol et d'analyser l'eau récoltée dans les bougies. Dans ce cas on ne mesure que la salinité de l'eau du sol , qui sera inférieure à celle de l'extrait saturé.

Un certain nombre de dispositifs techniques semblent maintenant remplacer les mesures sur extraits aqueux.

- Les détecteurs de salinité (salt sensors)

Ces cellules mesurent la salinité du sol in situ. KEMPER (12), le premier a montré que la conductibilité électrique CE d'une solution de sol pouvait être mesurée directement sur le terrain par une cellule dans laquelle les électrodes étaient scellées dans une céramique poreuse.

Différents types de "sensors" ont été développés , par RICHARDS, (20), ENFIELD et EVANS (7), RIECOSKY et al (19) . Le principe de leur fonctionnement est basé sur la diffusion des solutés vers l'intérieur et vers l'extérieur de l'élément sensible d'un "sensor" . Cette vitesse de diffusion détermine le temps de réponse.

C'est RICHARDS qui a mis au point la première cellule utilisable sur le terrain . Il restait quelques points à améliorer tels que la vitesse de diffusion qu'il fallait réduire et les compensations de température . Ce qui fut fait par les auteurs précédemment cités.

WESSELING et OSTER (30) ont étudié la réponse du "sensor" aux variations de salinité du sol. Ils ont conclu de leur recherche que les mesures de salinité du sol obtenues à partir de ces cellules ne demandaient pas de correction du facteur de réponse du "sensor" quand les variations de salinité

se faisaient avec un intervalle de temps d'au moins 5 jours. Dans le cas contraire ces mesures peuvent être corrigées. Ces cellules sont maintenant utilisées de façon courante par l'U.S. Salinity Laboratory.

Elles ont l'inconvénient d'être enterrées, donc pas faciles à déplacer, et de ne mesurer la salure que d'un volume très limité de sol.

On donne ci-dessous le schéma du "sensor" de REISCOSKY et al :

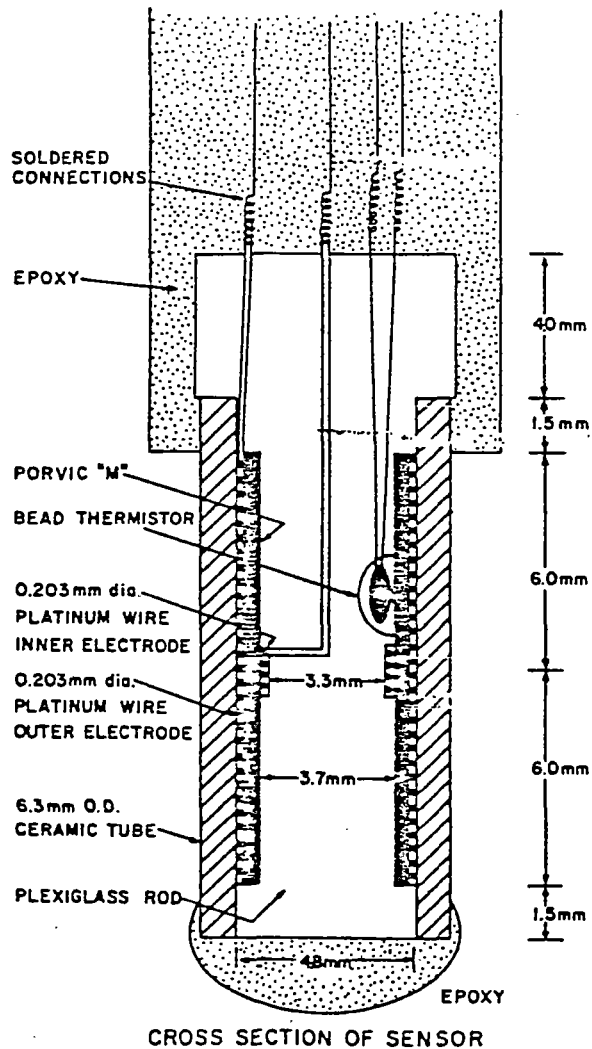


Figure 1 - Schéma montrant la coupe du détecteur de salinité

- Les appareils de mesure de la résistance du sol

Le principe est le suivant : la capacité du sol à conduire le courant électrique est fonction de la concentration en électrolytes de la solution du sol, d'où l'idée de mesurer directement la résistance offerte par ce dernier.

La méthode est exposée par RHOADES et INGVALSON (22) . Les mesures de résistance sont faites avec quatre électrodes placées dans le sol et un résistivimètre de géophysicien. Les électrodes sont piquées très près de la surface du sol (4 cm) , horizontalement selon la configuration de WENNER (schéma ci-dessous) :

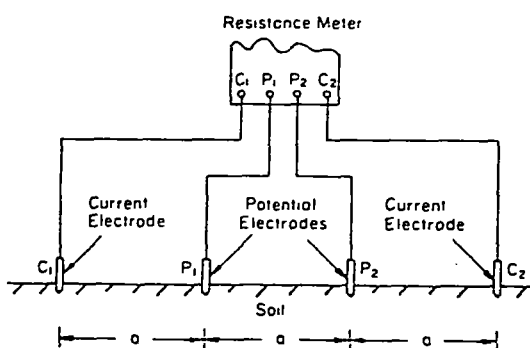


Figure 2 - Disposition de Wenner pour les électrodes utilisées dans les mesures de résistance. (a représente la distance entre les électrodes)

La paire d'électrodes intérieures mesure le potentiel tandis qu'un courant constant circule entre les électrodes externes.

La conductibilité du sol peut être calculé par l'équation :

$$E_{ca} = 1 / (2 \pi a R)$$

a : distance entre les électrodes internes en cm,

R : résistance en ohms

E_{ca} : mho/cm.

On exprime souvent les résultats en mmho/co ($E_{ca} \times 10^3$)

RHOADES et INGVALSON ont testé leur méthode sur de nombreux cas et ont comparé les résultats obtenus aux résultats obtenus par la mesure des extraits saturés. Les résultats montrent une très bonne concordance entre eux.

Cette méthode est simple, rapide, élimine la nécessité de prélever des échantillons, l'équipement est maniable, facile à déplacer et se prête parfaitement aux travaux de reconnaissance ou de surveillance.

Il faut cependant émettre la réserve suivante : les cations échangeables du sol interviennent sur la conductivité mesurée, d'où la nécessité d'opérer dans des conditions standardisées. La relation entre conductivité du sol et salinité du sol doit être établie à une teneur en eau connue. Il est recommandé d'opérer à la capacité au champ, par exemple après une irrigation.

1.3. CARACTERISTIQUES DES SOLS SALES

Le taux de Na⁺ échangeable du sol tend vers une certaine valeur limite qui est en relation avec l'équilibre cationique de l'eau.

$$\text{E.S.P. : \% Na échangeable} = \frac{100 (- 0.013 + 0.015 \text{ S.A.R.})}{1 + (- 0.013 + 0.015 \text{ S.A.R.})}$$

S.A.R. étant le taux d'absorption du sodium caractéristique de l'eau

$$\text{S.A.R.} = \frac{\text{Concentr. Na}}{\sqrt{\frac{\text{conc. Ca} + \text{conc Mg}}{2}}} \quad (**)$$

Quand E.S.P. dépasse 15, les sols se dégradent rapidement.

- Les sols salins

Le terme de salin désigne des sols dont la C.E. dépasse 4 mmhos/cm et dont le pourcentage de sodium échangeable est inférieur à 15. Le pH est en général < 8,5.

Les sels solubles en excès peuvent être éliminés par lessivage et le sol redevient un sol normal. Les caractères chimiques de ces sols sont déterminés par la nature et les quantités de sels présents. Le Na⁺ représente en général moins de 50 % des cations solubles, les quantités de Ca⁺⁺, Mg⁺⁺ et K⁺ sont très variables.

(**) : exprimées en meq/l.

Les principaux anions sont Cl^- , SO_4^{--} et parfois NO_3^- , ou HCO_3^- . En plus de ces sels solubles, on rencontre des sels de faible solubilité, tels que SO_4Ca (gypse) et les carbonates de calcium et magnésium.

Ces sols sont souvent floкулés par suite d'un excès de sels solubles et leur perméabilité est égale ou supérieure à celle des sols identiques non salins.

- Les sols salins-alcalins

Ce terme s'applique aux sols dont la conductivité est supérieure à 4 mmhos/cm à 25°C et le pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15. Ces sols sont dus à la fois à la salinisation et à l'alcalisation. Tant qu'il y a des sels solubles en excès, ils ont les mêmes propriétés que les sols salins. Quand la concentration de la solution du sol est abaissée, du sodium échangeable s'hydrolyse et forme de la soude. Après lessivage le sol peut devenir très alcalin ($\text{pH} > 8,5$) et les possibilités de culture fortement compromises.

- Les sols alcalins

Il s'agit de sols non salés à alcali, dont le E.S.P. est supérieur à 15 et la conductibilité de l'extrait saturé < 4 mmhos/cm à 25°C. Ces sols sont peu perméables.

1.4. RESTAURATION DES SOLS SALES

Avant d'examiner dans quelles conditions il est recommandé de conduire un aménagement agricole pour éviter la formation de tels sols, on peut considérer qu'il y a des surfaces importantes où le problème existe et ces sols doivent être récupérés avant que l'on puisse y pratiquer l'agriculture. Cette restauration est très onéreuse et le prix doit être estimé avant de l'envisager. Nous n'examinons ici que les méthodes les plus récentes utilisées dans cet objectif.

1.4.1. Principes méthodologiques

- Récupération des sols salins

Pour récupérer un sol salin il est nécessaire de réduire la concentration en sels solubles jusqu'à une limite acceptable ; ceci peut être fait par lessivage en supposant qu'il existe un drainage naturel ou artificiel adéquat.

Il existe différents projets de récupération basés sur des expériences acquises sur le terrain . On retiendra la technique développée en Irak, et mise au point au centre d'agriculture de Wageningen notamment (15) . Cette technique basée sur les courbes de lessivage peut être utile pour estimer la quantité d'eau à utiliser, le temps nécessaire et la vitesse d'infiltration dans le sol . La courbe de lessivage s'obtient en pratiquant des tests d'infiltration dans deux anneaux concentriques, l'eau utilisée étant la même que celle qui sera utilisée pour la récupération du sol salé. Le sol est échantillonné avant l'essai et dans l'anneau interne une fois que la hauteur d'eau infiltrée est de 50 ou 100 cm. On détermine les teneurs en sel des échantillons. La hauteur d'eau infiltrée est calculée en soustrayant de la hauteur d'eau amenée dans l'anneau de l'infiltromètre, la hauteur d'eau nécessaire pour amener le sol à la capacité de rétention (déduite des mesures de teneur en eau avant et après l'essai) . (voir définition page 26).

Les essais peuvent être menés soit avec submersion continue (continuous ponding), soit avec submersion intermittente (intermittent ponding).

Pour une qualité donnée de l'eau de lessivage, le sol tend vers une concentration en sel d'équilibre qui sera atteinte dans les dix premiers centimètres du sol. Les résultats sont portés sur des graphiques tels que ceux des figures suivantes :

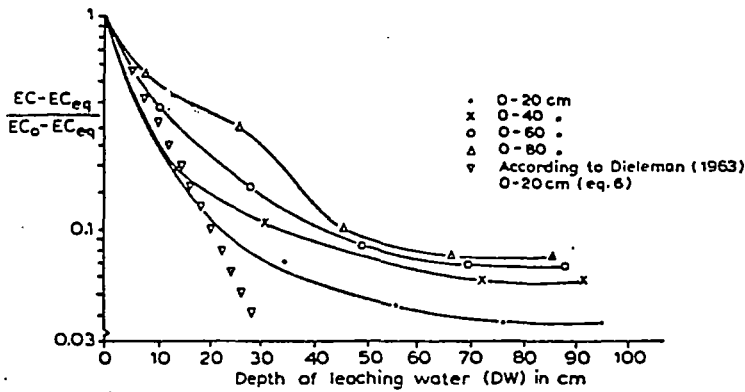
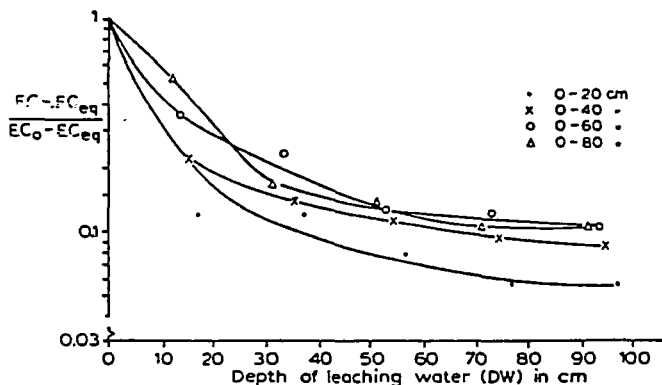


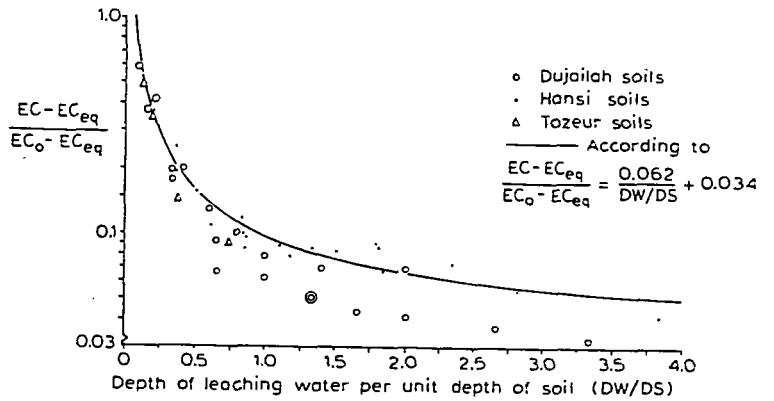
Figure 3 - Courbes de lessivage pour la submersion continue

d'après LEFFELAAR et SHARMA



Courbes de lessivage pour la submersion intermittente.

Comparaison des mesures expérimentales avec la relation empirique.



EC₀ = conductivité électrique initiale avant l'essai

EC_{eq} = conductivité électrique finale à l'équilibre

EC = conductivité électrique du sol après qu'une hauteur donnée d'eau de lessivage (DW) soit passée, pour une hauteur unité de sol (DS).

Notons que les courbes ne sont valables que pour le sol particulier étudié et les conditions initiales de concentration en sel, et de qualité de l'eau de lessivage.

La courbe d'infiltration cumulée en fonction du temps donnera le temps nécessaire pour aboutir à la concentration d'équilibre.

Pour illustrer ceci on peut faire un raisonnement sur l'exemple du sol DUJAILAH en Irak :

EC₀ = 50 mmhos/cm pour 0 - 30 cm
 40 mmhos/cm pour 0 - 60 cm

EC_{eq} = 2.8 mmhos/cm

Vitesse d'infiltration 2 cm/jour

Evaporation 2 cm/jour

eau requise pour amener 30 cm de sol à la capacité au champ*: 15 cm

Imaginons que l'on veuille réduire la conductivité électrique des 30 premiers centimètres, à 10 mmhos, pour planter une culture qui tolère le sel pendant deux ans. Pendant cette période, la CE de la couche 0.60 cm doit être réduite à 4 mmhos.

(*) : synonyme de capacité de rétention au champ.

Pour la couche à 30 cm, on aura :

$$\frac{EC - EC_{eq}}{EC_0 - EC_{eq}} = \frac{10 - 2.8}{50 - 2.8} = 0.15$$

D'après la courbe de lessivage $\frac{DW}{DS} = 0.5$

Il faut donc 15 cm d'eau pour lessiver les 30 cm de sol et porter la conductivité électrique à 10 .

Avec une infiltration de 2 cm/jour, l'opération demandera 7 à 8 jours
L'eau totale nécessaire = lessivage + évaporation + besoin du sol

$$15 \text{ cm} + 15 \text{ cm} + 15 \text{ cm} = 45 \text{ cm}$$

Au bout de deux ans de culture, EC jusqu'à 60 cm doit être 4 , d'où:

$$\frac{EC - EC_{eq}}{EC_0 - EC_{eq}} = \frac{4 - 2.8}{40 - 2.8} = 0.032$$

d'après la courbe $\frac{DW}{DS} = 0.95$

d'où la hauteur d'eau nécessaire = $0.95 \times 60 = 57 \text{ cm}$. On a déjà infiltré 15 cm pendant la première phase, il faut encore utiliser 42 cm pour le lessivage au cours des deux années.

LEFFELAAR et SHARMA ont tenté d'ajuster une relation empirique aux valeurs expérimentales (fig ci-dessus) . L'ajustement de l'équation leur apparaît correct.

Il serait intéressant d'éviter un grand nombre de travaux expérimentaux en prédisant les courbes de lessivage à partir de certains modèles théoriques. C'est pourquoi LEFFELAAR et SHARMA ont aussi comparé les courbes obtenues expérimentalement avec celles obtenues à partir de différents modèles et ont montré qu'il y avait bonne concordance entre les deux types de courbes.

- Récupération des sols salins-alcalins

Lors de la récupération des sols salins-alcalins, l'objectif est de remplacer le Na échangeable par le calcium ou un autre ion, puis de lessiver le Na échangé et les autres sels solubles. Il est important que les opérations se passent dans cet ordre si l'on veut éviter une détérioration de la structure du sol. S'il y a détérioration, il faudra ajouter des produits chimiques pour remplacer le sodium échangeable. Le test de lessivage donne une indication de la vitesse de variation du ESP (pourcentage de sodium échangeable).

- Récupération des sols alcalins

L'objectif dans ce cas est de réduire ESP et d'éliminer les sels sodiques. La difficulté dans ces sols est d'y introduire l'eau puis de l'éliminer en raison de leur imperméabilité. La perméabilité des sols peut être temporairement modifiée en transformant le sol alcalin en sol salin-alcalin par irrigation avec une eau salée. On introduit ensuite du gypse et aussi du soufre pour augmenter la concentration du calcium soluble qui remplacera le sodium échangeable. Ces amendements chimiques sont mélangés au sol.

Une fois que le sodium est remplacé, il ne peut être éliminé que par lessivage et drainage. Vu la faible perméabilité de ces sols on a souvent intérêt à installer des drains peu profonds de façon à ce que les couches de surface puissent être utilisées pour l'agriculture.

Le choix de l'amendement chimique dépend des caractéristiques du sol, de la disponibilité et du prix de ce produit à l'endroit considéré. La quantité de produit nécessaire dépend de la quantité de sodium à remplacer, de la capacité d'échange cationique du sol.

Le tableau ci-dessous indique le poids de gypse ou soufre requis pour remplacer des quantités de Na échangeable comprises entre 1 et 10 Meq /100 g de sol. Par exemple si :

ESP = 20

Cap. ech. cation : 50 meq/100 g sol

quantité de sodium échangeable : 10 meq/100 g sol.

On souhaite ESP = 10. Il faut donc remplacer 5 meq/100 g sol de Na, ce qui demande 69,6 tonnes par ha x m de sol.

Quantités de gypse et de soufre nécessaires pour remplacer les quantités indiquées de sodium échangeable

d'après WITHERS ET VIPOND

Sodium échangeable (Meq/100g de sol)	Gypse (Ca SO ₄ 2H ₂ O)		Soufre (S)	
	tonnes/ha m	tonnes/acre pied	tonnes/ha m	tonnes/acre pied
1	13.9	1.7	2.59	0.32
2	27.8	3.4	5.18	0.64
3	41.8	5.2	7.77	0.96
4	55.7	6.9	10.35	1.28
5	69.6	8.6	12.9	1.60
6	83.5	10.3	15.5	1.92
7	97.4	12.0	18.1	2.24
8	111.3	13.7	20.7	2.56
9	125.1	15.5	23.3	2.88
10	139.2	17.2	25.9	3.20

Note : 1 m³ de sol pèse approximativement 1.5 tonne

1 acre pied de sol pèse approximativement 4 x 10⁶ lb

<u>Amendement</u>	<u>Tonnes équivalentes à 1 tonne de soufre</u>
- Soufre	1.00
- Solution chaux-soufre, 24 % Soufre	4.17
- Acide sulfurique	3.06
- Gypse (Ca SO ₄ 2H ₂ O)	5.38
- Sulfate de fer (Fe SO ₄ .7H ₂ O)	8.69
- Sulfate d'aluminium (Al ₂ (SO ₄) ₃ .18H ₂ O)	6.94
- Calcaire (CaCO ₃)	3.13

1.4.2. Conditions opératoires

Ainsi qu'il a été dit précédemment le lessivage des sols salés peut être conduit avec submersion continue ou submersion intermittente.

Dans le premier cas, l'eau est maintenue à une hauteur de 10 cm, cette méthode n'est à conseiller que si l'on se trouve en face de :

- une bonne perméabilité du sol
- un niveau de nappe élevé, saumâtre
- un taux d'évaporation élevé.

Dans le cas de la submersion intermittente, on épand d'abord une quantité d'eau suffisante pour dissoudre les sels solubles, suivie d'un apport un peu plus important pour les lessiver. L'opération est répétée à intervalles réguliers de façon à éviter la resalinisation des couches superficielles, cet intervalle ne devrait pas dépasser 20 jours l'hiver et 10 jours l'été (15) . Cette façon d'opérer est préconisée si l'on a :

- un sol peu perméable,
- une nappe phréatique profonde,
- des périodes où l'évaporation est faible.

Ce sont les disponibilités en eau qui détermineront l'époque du lessivage. Le lessivage d'été requiert des doses plus importantes pour compenser les pertes par évaporation , on peut aussi considérer que le meilleur moment pour lessiver se situe quand le toit de la nappe est à son niveau le plus bas et que l'évaporation est réduite. Ceci signifie que le choix du lessivage d'été ou d'hiver dépendra du type de sel, de l'état du sol, et des disponibilités en eau.

1.5. CONTROLE DE LA SALINITE APRES RESTAURATION ET PREVISION DE LA RESALINISATION

Les niveaux de l'eau et du sel sont constamment variables dans les terrains qui ont été restaurés. Il faut maintenir un équilibre entre les entrées et les sorties d'eau et de sel d'une année à l'autre ou d'une culture à l'autre. *Le bilan de salinité* est un bon indicateur des tendances de la salinité.

Entrées d'eau :

Hauteur de l'irrigation + Pluie efficace + Ascension capillaire

D_i

D_r

D_g

Sorties d'eau :

Infiltration + Evapotranspiration + Variation du stock d'eau

D_p

E_t

D_m

Entrées de sel :

Sel dans l'eau d'irrigation + Sel par ascension capillaire

$D_i C_i$

$D_g C_g$

Sorties de sel :

Sel précipité dans le sol + Sel dans les plantes + Sel dans l'eau d'infiltration

S

P

$D_p C_p$

C_i , C_g et C_p représentent les valeurs de conductivité électrique de l'eau d'irrigation, de l'eau souterraine et de l'eau d'infiltration**.

D'une année à l'autre on doit avoir :

$$D_i + D_r + D_g = D_p + E_t + D_m$$

$$D_i C_i + D_g C_g = S + P + D_p C_p$$

(**) : On suppose que l'on connaît la relation permettant de passer de la conductivité électrique à la concentration.

Quand la remontée capillaire est négligeable ainsi que les pertes dans les plantes et par précipitation; le bilan de salinité devient :

$$D_i C_i = D_p C_p$$
$$D_p = \frac{D_i C_i}{C_p}$$

D_p représente la quantité d'eau d'infiltration ou de lessivage, de concentration C_p , qui doit traverser la zone racinaire annuellement pour éliminer les sels amenés par l'eau d'irrigation. La qualité de l'eau qui s'infiltrera sera identique à celle de l'eau du sol au plancher de la zone racinaire. La qualité de l'eau du sol est une constante liée à la nature de la plante à cultiver (voir annexe), si cette valeur de concentration critique est attribuée à C_p , D_p représentera la quantité de cette eau d'irrigation qui devra traverser la zone racinaire pour maintenir l'équilibre du sel :

$$\frac{D_p}{D_i} = \frac{C_i}{C_p}$$

ce rapport dit "leaching requirement" représente la fraction d'eau d'irrigation nécessaire pour le lessivage :

$$D_i = (E_t - D_r) + D_p$$
$$D_i = \frac{(E_t - D_r)}{1 - \frac{C_i}{C_p}}$$

Cette estimation néglige la contribution de la pluie et l'eau s'infiltrant par les fissures éventuellement. Dans le cas où ces facteurs sont négligeables, cette équation donne à l'aménageur de bonnes estimations des quantités annuelles nécessaires pour le lessivage.

De nombreux aménageurs ont utilisé ce bilan de salinité pour évaluer et justifier les facilités de drainage, les programmes de lessivage les besoins en eau. Il ne suffit pas cependant comme critère pour évaluer les possibilités de lessivage et de drainage (23).

(*) : C'est le cas quand l'entrée de sel est importante, les pertes par les plantes et par précipitation sont négligeables par rapport aux pertes par percolation.

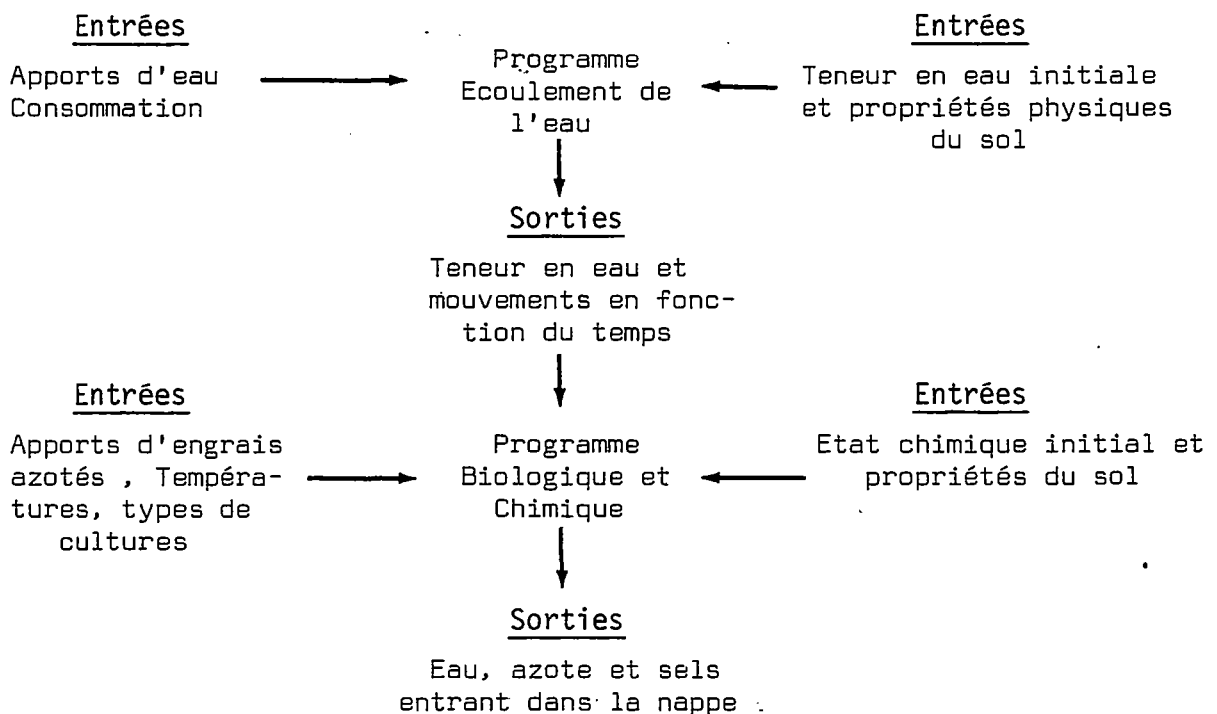
1.6. MODELES DE SIMULATION D'UN SOL SALE SOUMIS A L'IRRIGATION

C'est une voie de recherche qui a été particulièrement développée ces dernières années. Citons les modèles de BRESLER, TERKELTOUB et BABCOK (26) TANJI, DONEEN (25) , DROUBI (5) . La plupart des modèles nécessite des informations sur les quantités d'eau apportées dans la zone racinaire , les fonctions d'infiltration, les caractéristiques des sols, les teneurs en eau initiales et les caractéristiques hydrodynamiques du sol telles que perméabilité, relation succion - teneur en eau . De plus, il faut connaître des informations telles que concentrations respectives des divers ions dans la solution, température du sol en fonction de la profondeur et les réaction chimiques des principaux ions. Ces dernières mesures auront été faites avec soin au laboratoire.

Le principal objectif de ces modèles est de simuler le transport des sels à travers les sols.

Un modèle transitoire de l'écoulement d'eau et des réactions chimiques et biologiques se produisant dans la zone racinaire a été développé par DUTT et SCHAFFER (6) . Le modèle consiste en trois segments . Le premier segment décrit le mouvement de l'eau du sol et la distribution de teneur en eau en fonction du temps. Le second fait interférer les mouvements de l'eau avec un modèle chimique-biologique pour tenir compte des différences dans les différentes couches de sol. Le troisième segment du programme calcule l'activité biologique et chimique dans le profil de sol .

La figure ci-dessous illustre le bloc diagramme de ce modèle :



Il apparaît ainsi que grâce à une série de calculs , si l'on dispose de l'analyse chimique brute d'un extrait du sol, on peut connaître la composition réelle de la solution du sol pour un état d'humidité quelconque, ainsi que la quantité des sels précipités ou solubilisés.

Disposant en plus de l'analyse chimique brute d'une eau d'irrigation on peut simuler une ou plusieurs irrigations et préciser la composition des eaux de drainage au terme de l'une quelconque des irrigations.

Pour conclure sur ce sujet, on citera le travail récent de DOSSO (4) qui illustre les possibilités dont on dispose pour prévoir la salinisation des sols. Citons aussi les travaux récents de VAN RODYEN et MOOLMAN (31) qui ont simulé les mouvements de l'eau et du sel pour deux profondeurs de nappe et trois programmes d'irrigation. Les résultats montraient qu'on avait intérêt à irriguer fortement en début de saison avec des fréquences faibles. D'autre part, il apparaissait qu'il fallait maintenir le niveau de la nappe sous deux mètres.

2. - IRRIGATION AVEC DES EAUX SALEES

La qualité de l'eau d'irrigation est déterminée par sa teneur en sels solubles ; teneurs en sodium, bore et bicarbonates . Plus cette teneur en sels sera grande, plus il y aura risque de créer un sol salé ou d'aboutir à une eau du sol impropre au développement des plantes . *

2.1. CARACTERISATION DES EAUX D'IRRIGATION

2.1.1. Classification américaine

(U.S. Salinity Laboratory)

Les eaux sont classées en quatre catégories établies sur les valeurs de conductivité électrique :

Teneur en sel g/l	Conductivité électrique micro mhos/cm à 25°C	
< 0,2	< 250	C ₁ Eaux faiblement salines
0,2-0,5	250 - 750	C ₂ Salinité moyenne
0,5-1,5	750 - 2250	C ₃ Salinité forte
1,5-3	> 2250	C ₄ Très forte salinité

Les eaux faiblement salines peuvent être utilisées pour irriguer la plupart des cultures sur pratiquement tous les sols, mais quand la salinité croît , l'eau devient moins appropriée pour les plantes sensibles au sel et pour l'utilisation sur sols peu perméables.

Les eaux à forte salinité ne peuvent être utilisées que pour les plantes très tolérantes au sel, avec des techniques d'aménagement particulières sur sols perméables bien drainés.

- Risques liés au sodium

Plus il y a de sodium et plus on risque de voir se développer des problèmes de structure du sol et de pH.

Le sodium est évalué par le "sodium adsorption ratio"

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \quad \text{mais l'effet d'un SAR donné dépend aussi}$$

de la concentration totale en sels solubles .

Pour un SAR donné le risque de voir se développer des problèmes augmente avec la concentration en sel croissante .

Le diagramme 2 montre qu'il existe également quatre classes d'eaux en ce qui concerne les risques liés au sodium :

- S₁ : peu de danger d'alcalinisation,
- S₂ : danger d'alcalinisation appréciable dans les sols à textures fines et forte capacité d'échange.
Cette eau est utilisable dans les sols à texture grossière.
- S₃ : danger d'alcalinisation dans la plupart des sols qui exigeront bon drainage , fort lessivage, addition de matières organiques .
- S₄ : très grand risque d'alcalinisation . A n'utiliser que si faible salinité permettant l'addition de calcium soluble.

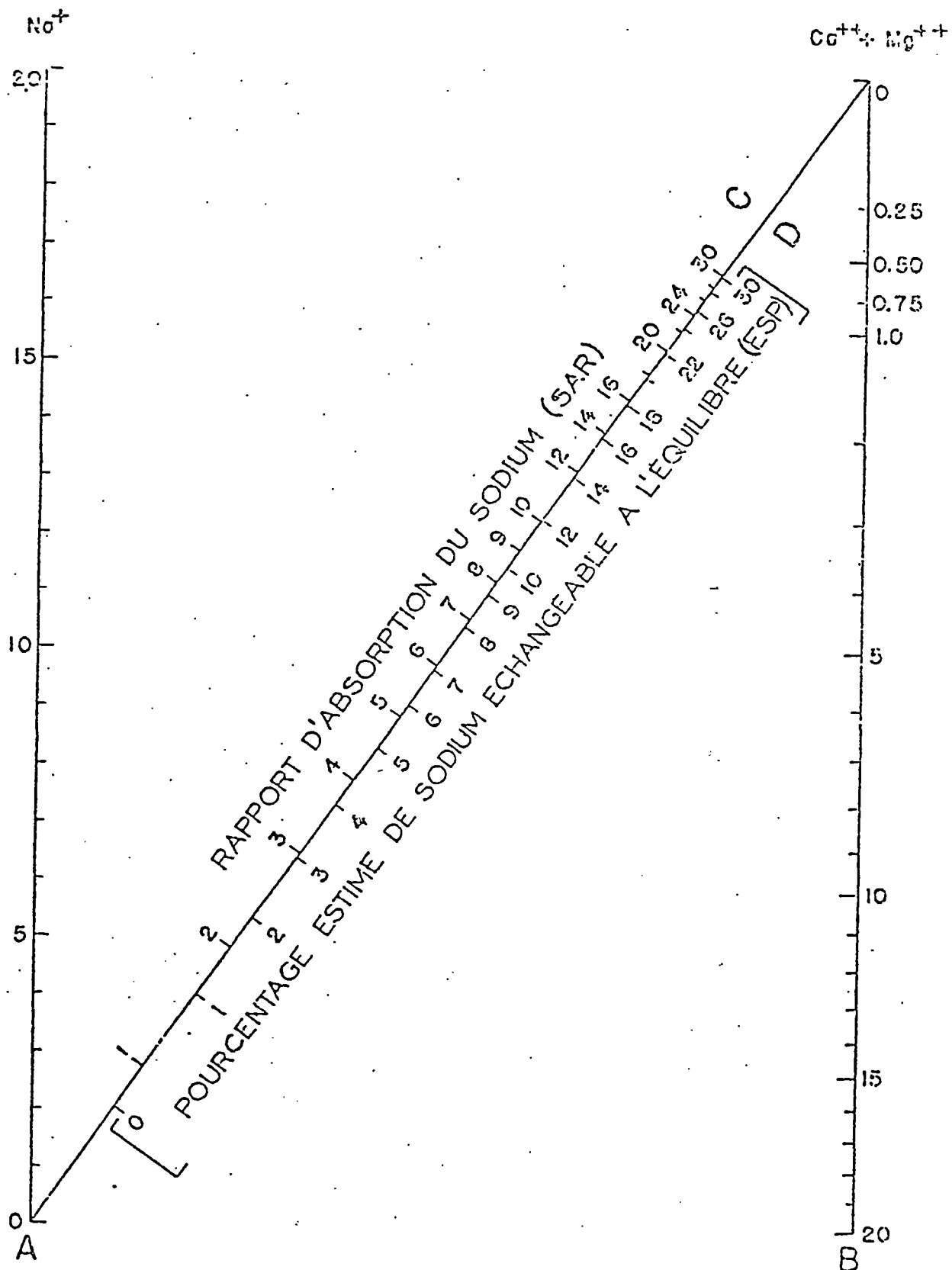


DIAGRAMME 1 (extrait de LEGOUPIL (15))

Nomogramme permettant de déterminer le SAR d'une Eau d'Irrigation et permettant d'apprécier le ESP correspondant d'un Sol en Equilibre avec l'Eau.

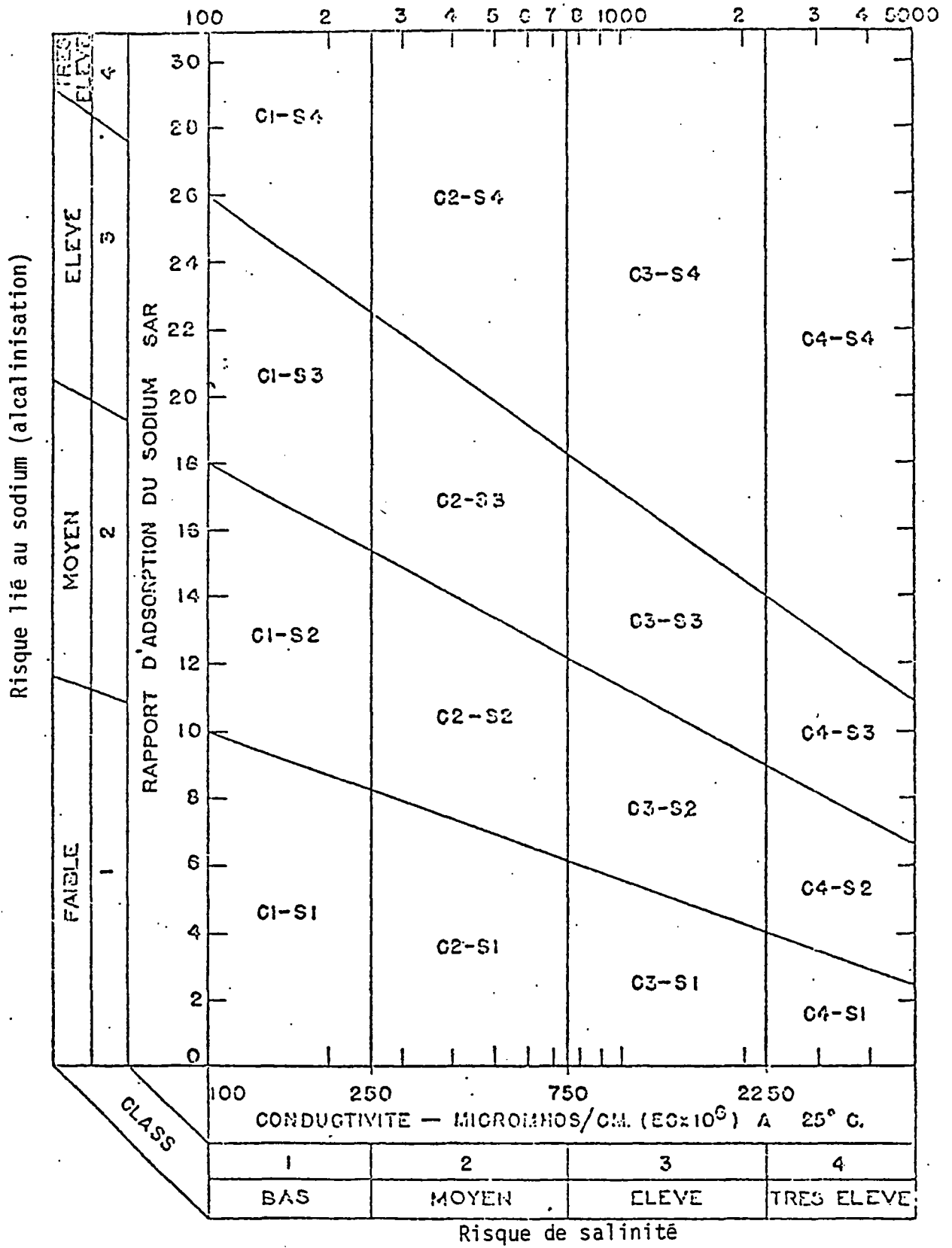


DIAGRAMME 2 - CLASSIFICATION DES EAUX D'IRRIGATION (extrait de LEGOUPIL(15))

d'après US Dpt of Agriculture - Agricultural Handbook n°60

- Risques liés aux bicarbonates

L'effet des bicarbonates est exprimé en terme de carbonate de sodium résiduel . Dans les eaux à forte teneur en bicarbonate , les ions Ca et Mg s'ils sont fréquents auront tendance à précipiter sous forme de carbonates, diminuant ainsi la teneur en Ca et Mg solubles et augmentant le SAR. Le carbonate de sodium résiduel s'écrit :

$$RSC = (CO_3^{--} + HCO_3^-) - (Ca^{++} + Mg^{++}) \text{ en me/l.}$$

On estime qu'une eau contenant plus de 2,5 me/l de RSC est impropre à l'irrigation ; de 1,5 à 2,5 me/l , elle sera limite, et avec moins de 1,25 me/l elle sera sure.

Le concept de "SAR ajusté" (14) prend en compte l'effet des carbonates bicarbonates au travers d'une formule théorique pH_C qui vient compléter l'ancien SAR. Cette valeur calculée pH_C évalue la tendance de l'eau d'irrigation à dissoudre le calcaire du sol :

$$pH_C = (pk'_2 - pk'_c) + p(C_a + M_g) + pALK (**)$$

$$SAR \text{ aj.} = \frac{N_a}{\sqrt{\frac{C_a + M_g}{2}}} \left[1 + 8,4 - pH_C \right]$$

valeurs en meq/l

Un tableau de valeurs de pH_C et un programme de calcul de ce SAR ajusté sont décrits dans le rapport de LANDREAU et MONITION (14) auquel nous renvoyons le lecteur.

2.1.2. Classification U.R.S.S.

teneur en g/l
de sel

0,2 - 0,5	Eau de la meilleure qualité
1 - 2	Eau comportant des risques de salinité
3 - 7	Eau ne pouvant être utilisée par l'irrigation qu'avec lessivage et drainage parfaits.

(**) : pk'_2 est une constante qui caractérise le deuxième équilibre du gaz carbonique dissous dans l'eau.

pk'_c concerne l'équilibre de dissolution du carbonate de calcium.

$pALK$ concerne l'alcalinité.

2.2. CARACTERISATION DES SOLS A IRRIGUER

Pour l'irrigation le sol est la partie meuble de surface susceptible d'être irriguée et de produire des récoltes ; En vue de déterminer si un sol est apte ou non à être irrigué, il y aura lieu d'étudier les paramètres suivants :

1. Propriétés physiques

La texture du sol donne une indication sur sa perméabilité . La perméabilité tend à décroître à mesure que la teneur en argile augmente . La capacité d'échange de cations augmente avec la teneur en argile.

La structure du sol conditionne ses propriétés physiques et sa valeur agromique ; un sol bien structuré est aéré et perméable. En culture irriguée cette notion est fondamentale , car un sol non structuré gonflera sous l'effet de l'humidité et donnera naissance à des fentes de retrait lorsqu'il sèchera. Il pourra s'imperméabiliser et se saler.

Une notion importante est la stabilité du sol ; c'est à dire la propriété du sol à retrouver sa structure en sèchant. Cette stabilité se mesure par un test de dispersion.

2. Perméabilité

Ce facteur est très important puisqu'il influe sur les possibilités d'irrigation et de drainage. Le taux d'infiltration dépend de la structure de la couche superficielle, de la teneur en eau du sol ainsi que de la perméabilité .

Une faible perméabilité des couches jusqu'à 1 m peut entraîner une stagnation de l'eau de surface, et un lessivage insuffisant. Un tel sol ne sera pas très apte à l'irrigation.

La perméabilité des couches profondes est très importante pour les problèmes de drainage.

Nous n'entrerons pas dans le détail de la mesure des perméabilités in situ, par la méthode de HILLEL. De tels essais sont abondamment décrits dans les rapports sur les études effectuées au Niger (2, 3, 9, 13) et des exemples de courbes perméabilité - teneur en eau sont décrits pour des sols sableux , sableux - argileux argileux.

3. Infiltrabilité

C'est un facteur important pour les schémas d'irrigation , c'est d'elle que dépendra le débit d'apport de l'eau, le temps nécessaire pour appliquer la quantité d'eau voulue. L'infiltrabilité varie au cours de l'irrigation, elle décroît en fonction du temps, et dépend de la teneur en eau.

L'infiltrabilité est mesurée également par la méthode des deux anneaux. On mesure le volume cumulé infiltré en fonction du temps. Des exemples de ces mesures sont également donnés dans (3, 9) .

Le tableau ci-dessous donne une classification grossière des sols suivant leur infiltrabilité après une heure d'injection :

Classe	Infiltrabilité au bout d'une heure d'irrigation (mm/h)	Remarques
Très basse	5	Irrigation par submersion recommandée
basse	5 - 15	Aspersion possible (faible intensité)
moyenne	15 - 25	Submersion possible pour certaines conditions
élevée	25 - 50	Submersion impossible
très élevée	50	Toute irrigation est difficile

4. La capacité au champ et le point de flétrissement

La capacité au champ est considérée comme une valeur d'équilibre : un sol en conditions de drainage ne reste pas à une valeur de teneur en eau au-dessus de la capacité au champ, et d'autre part l'eau ne se déplacera pas si le profil de sol est à la capacité au champ, quand il n'y aura que les forces de gravité qui seront appliquées.

Dans les problèmes d'irrigation la capacité au champ θF_C est utilisée pour calculer la quantité d'eau à appliquer quand la teneur en eau volumique moyenne du sol $\bar{\theta}$ est connue. Cette quantité W_D sera :

$$W_D = 10 (\theta F_C - \bar{\theta}) D$$

W_D est la quantité en mm d'eau qu'il faut pour porter la teneur en eau du sol de $\bar{\theta}$ à θF_C jusqu'à une profondeur de D_{cm} , F_C étant la capacité au champ moyenne, sur cette épaisseur du sol.

W_D est appelé aussi le "déficit hydrique" du sol sur l'épaisseur D .

- le point de flétrissement est la teneur en eau à partir de laquelle les plantes ne peuvent plus extraire l'eau du sol pour leur croissance. Le volume d'eau utilisable par les plantes se situe donc entre la valeur du point de flétrissement et celle de la capacité au champ.

On peut dire que pour les sols à texture moyenne et fine l'eau disponible est de l'ordre de 11 à 13 %, tandis que pour les sols grossiers, cette valeur peut descendre à 4 - 8 %, ce qui nécessite de fréquents apports d'eau en irrigation. Nous n'entrerons pas ici dans le détail des mesures de ces caractéristiques du sol. On peut se reporter à l'article de GAIRON (10).

(*) : d'après CASTANY, MARGAT : Dictionnaire d'hydrogéologie :

Capacité au champ : poids d'eau non mobilisable par gravité que peut contenir un milieu poreux/poids total sec.

Capacité de rétention : volume d'eau maximal non mobilisable par gravité que peut contenir un milieu poreux saturé/volume total.

Les deux termes sont souvent employés dans le même sens.

2.3. METHODES D'IRRIGATION

La méthode d'irrigation choisie joue un rôle important voir décisif pour l'utilisation de l'eau salée en irrigation :

- Irrigation par aspersion et irrigation par submersion

Certaines plantes, en particulier les agrumes absorbent les ions à travers leurs feuilles . L'irrigation par aspersion sur les feuilles peut entraîner des dommages importants en brûlant les feuilles. Par contre cette méthode a l'avantage de réduire l'accumulation du sel dans le sol. Le lessivage est plus efficace quand la teneur en eau est faible. Par conséquent le lessivage, après aspersion à des débits inférieurs à la capacité d'infiltration du sol aboutira à un meilleur déplacement des sels que le lessivage par submersion.

NIELSEN a constaté lors d'une expérimentation , que l'irrigation par submersion nécessitait trois fois plus d'eau que l'aspersion pour réduire la salinité du sol du même taux.

D'un autre côté , le lessivage après submersion a l'avantage de prendre moins de temps que lors de l'aspersion pour déplacer la même quantité de sel. Donc, si le temps est le facteur le plus important on choisira la submersion, s'il est plus important d'économiser l'eau, on recommandera l'aspersion, si elle n'est pas préjudiciable aux cultures.

- Irrigation à la raie

La teneur en sel du sol varie beaucoup plus d'un endroit à l'autre avec l'irrigation à la raie qu'avec les deux autres types d'irrigation cités. Cette méthode d'irrigation est à manier avec soin surtout au stade de la germination, les sels s'accumulent jusqu'à des taux importants entre les raies. Lorsque les planches entre sillons sont aménagées en plans inclinés de telle façon que le sel soit transporté au-delà de la ligne de semis, les risques de salinité peuvent être atténués.

(*) : teneur en sel maximale possible des eaux d'irrigation : 1000 à 1500 ppm.

- Irrigation au goutte à goutte

Cette méthode a été utilisée avec succès avec des eaux fortement chargées en sel. Son avantage est dû au fait qu'elle garde la teneur en eau du sol élevée, au moins dans la zone des racines, maintenant ainsi un niveau de concentration en sel peu élevé. De plus il se produit un lessivage sous le goutteur, et une forte teneur en eau, les racines évitant ainsi les zones d'accumulation du sel. Après la récolte il faut lessiver pour éliminer le sel avant les semailles suivantes.

Nous n'entrerons pas plus dans le détail des techniques d'irrigation. Le lecteur intéressé pourra se reporter à l'ouvrage de WITHERS et VIPOND (29).

2.4. DRAINAGE

Le drainage est un élément essentiel dans les problèmes d'irrigation surtout quand la teneur en sel de l'eau d'irrigation est élevée et qu'un certain lessivage est nécessaire pour maintenir un bilan de salinité adéquat.

Quand les conditions de drainage naturel existent (sols perméables, nappe très profonde) il n'est pas utile d'utiliser un drainage artificiel ; mais si ces conditions sont inexistantes ou limitées, ou si une remontée du niveau piézométrique est envisagée, il faut prévoir un drainage dans le schéma d'irrigation .

Les quatre principaux facteurs à considérer sont :

- 1 - *le niveau acceptable pour la nappe*
- 2 - *le débit de drainage*
- 3 - *les caractéristiques physiques du sol.*
- 4 - *l'espacement des drains.*

1 - Le niveau acceptable pour la nappe ..

La profondeur de la nappe dépendra de la culture et du sol.

En zone aride et semi-aride, pour des cultures saisonnières, une profondeur de nappe supérieure à 1 m en période d'irrigation est suffisante pour permettre un développement normal des racines et l'aération du sol!

2 - Le débit de drainage

Les quantités d'eau à éliminer dépendent du lessivage nécessaire pour amener la salinité à un niveau donné (leaching requirement).

3 - Les caractéristiques physiques du sol

Les facteurs importants sont la porosité et la perméabilité, dont on a parlé précédemment.

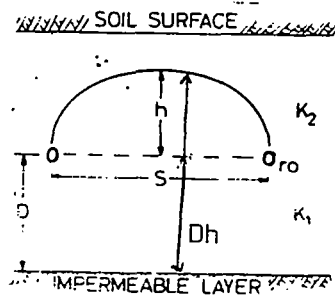
4 - L'espacement des drains

En zone irriguée, il est en général nécessaire d'avoir un système de drains parallèles .

L'espacement des drains est calculé à partir d'une équation de drainage. Il existe beaucoup d'équations adaptées chacune à un type de situation. Elles tiennent compte de la perméabilité du sol (K) de la charge hydraulique (h) ou hauteur du niveau piézométrique par rapport au drain, de la profondeur de la couche imperméable (D), et du débit des drains(V). La porosité (p) peut également intervenir.

La solution utilisée le plus souvent est celle de HOOGHOUDT :

$$S = \frac{8K_1 D h}{V} + \frac{4 K_2 h^2}{V}$$



C O N C L U S I O N S

La salinité des sols est un problème que l'on rencontre assez fréquemment en zone aride et semi-aride : ce problème est souvent lié à la mauvaise qualité et au mauvais emploi de l'eau d'irrigation, ainsi qu'à un drainage insuffisant.

Une étude préalable à tout aménagement doit comporter la détermination des caractéristiques physiques du sol et de son état de salinisation, la restauration par lessivage dans le cas où cela est nécessaire, l'analyse chimique des eaux qui seront utilisées pour l'irrigation . On peut par simulation prévoir les réactions de ces eaux dans le sol considéré.

Les études et expérimentations réalisées par exemple en Tunisie (28) ou en Algérie (16) montrent que la salinité des sols, aussi bien que l'emploi d'eau salée en irrigation ne constituent pas des problèmes insolubles pour autant que l'on puisse intervenir préventivement et curativement contre eux.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1 - VAN AART (R.) . - 1974 . - Le drainage et la récupération des terres dans la basse Mésopotamie . - *Nature et ressources*, vol X, n°2, avril-juin 1974, p. 12-19.
- 2 - BONNET (M.), JAMONEAU (M.), LALLEMAND-BARRÈS (A.), MOUTONNET (P.). - 1978 - Détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques des sols sur le site de Sona (Niger) . - *Rapport B.R.G.M. 78 SGN 139 HYD.*
- 3 - BONNET (M.), FLEURANT (R.), LALLEMAND-BARRÈS (A.), MOUTONNET (P.). - 1979 - Détermination in situ des caractéristiques hydrodynamiques des sols sur le site de Sona (2è partie) . - Etude des mouvements de l'eau sous culture d'oignons . - *Rapport B.R.G.M. 79 SGN 119 HYD.*
- 4 - DOSSO (M.). - 1980 - Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation - Aménagement de la basse vallée de l'Euphrate en Syrie . - *Thèse de Doct. Ing. Toulouse.*
- 5 - DROUBI (A.) . - 1976 - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation . - Modèle thermodynamique de simulation . - Application aux sols salés du Tchad . - *Thèse de Doct. Ing. Strasbourg et Mém. Sci. Géol. 46.*
- 6 - DUTT , SHAFFER , MOORE . - 1972 - Computer simulation model of dynamic bio-physical processes in soils. - *Depart. of Soils Water and Engineering . Agricult. Exp. Station , University of Ariz. Tech. Bull. 196, Tucson.*
- 7 - ENFIELD (C.G.), EVANS (D.D.) . - 1969 - Conductivity instrumentation for in situ measurements of soil salinity. - *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. vol 33, p. 787 - 789.*

- 8 - FaO/Unesco . - 1973 - Irrigation, Drainage and Salinity : An Irrigation source book Hutchinson .
- 9 - FLEURANT (R.), LALLEMAND-BARRÈS (A.), BONNET (M.), MOUTONNET (P.). - 1979 - Détermination in situ des paramètres hydrodynamiques d'un sol sablo-argileux à Lossa. Etude comparée des mouvements de l'eau sous sol nu et sous cultures en saison pluviale au Niger . - *Rapport B.R.G.M. 79 SGN 440 HYD.*
- 10 - GAIRON (S.). - 1973 - Important soil characteristics relevant to irrigation . Arid zone irrigation . - *Ecological studies 5 - Springer - Verlag Berlin - Heidelberg - NEW YORK.*
- 11 - JURY (W.A.), JARRELL (W.M.), DEVITT (D.). - 1979 - Reclamation of saline sodic soils by leaching . - *Soil Sci. Soc. Am. J. Vol 43, p. 1100-1106.*
- 12 - KEMPER (W.D.) . - 1959 - Estimation of osmotic stress in soil water from the electrical resistance. - *Soil Sci. 87, p. 345-349.*
- 13 - LALLEMAND-BARRÈS (A.), LONGHI (P.), MOUTONNET (P.) . - 1980 - Etude des mouvements de l'eau sous cultures irriguées et en saison pluviale à Lossa (2è partie) - Simulation de l'irrigation d'un sol sableux de Sona . - *Rapport B.R.G.M. 80 SGN 581 EAU.*
- 14 - LANDREAU (A.), MONITION (L.). - 1977 - Nouvelle évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation . - *Rapport B.R.G.M. 77 SGN 628 HYD.*
- 15 - LEFFELAAR (P.A.), PALSHARMA (R.). - 1977 - Leaching of a highly saline - sodic soil . - *Journ. of Hydrology, 32, p. 203-218.*
- 16 - LEGOUPIIL (J.C.). - (année non précisée) - Evolution de la salure du sol sous irrigation . Aménagement et mise en valeur des sols salés . - *Institut de technologie agricole Mostaganem (rapport Irat Montpellier).*

- 17 - OSTER (J.D.), INGVALSON (R.D.) . - 1967 - In situ measurement of soil salinity with a sensor . - *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. vol 31, p. 572-574.*
- 18 - OSTER (J.D.), WILLARDSON (L.S.), VAN SCHILFGAARDE (J.), GOERTZEN (J.O.). - 1976 - Irrigation control using tensiometers and salinity sensors - *Transactions of the ASAE, t.19, n°2.*
- 19 - REICOSKY (D.C.), MILLINGTON (R.J.), PETERS (D.B.) . - 1970 - A salt sensor for use in saturated and unsaturated soils . - *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. vol 34.*
- 20 - RICHARDS (L.A.) . - 1966 - A soil salinity sensor of improved design . - *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. vol. 30, p. 333 - 337.*
- 21 - RIEU (M.), CHEVERRY (C.). - 1976 - Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés . - *Cah. Orstom, sér. Pédol. vol XIV , n°1, p. 39-61.*
- 22 - RHOADES (J.D.), INGVALSON (R.D.) . - 1971 - Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. - *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. vol. 35.*
- 23 - RHOADES (J.D.) . - (entre 1976 et 1979) . - Measuring , mapping and monitoring field salinity and water table depths with soil resistance measurements . - *U.S. Salinity Laboratory of Riverside. FAO soil bul. paper 12.*
- 24 - SCHILFGAARDE (J.V.), ASCE (M.), BERNSTEIN (L.), RHOADES (J.D.), RAWLINS (S.) 1974 - Irrigation management for salt control . - *Journ. Irrig. Drainage Division , septembre 1974.*
- 25 - SKOGERBOE (J.V.), WALKER (W.R.), EVANS (R.G.). - 1979 - Planning framework for alleviating waterlogging and salinity problems. - *Water supply and Management , vol. 3, p. 439-451.*

- 26 - TANJI, DONEEN et al. - 1972 - Computer simulation analysis on reclamation of salt affected soils in San Joaquin Valley , California. - *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36-1, p. 127-134.
- 27 - TERKELTOUB, BABCOCK . - 1971 - A simple method for predicting salt movement through soil . - *Soil Sci. III*, 3, p. 182-187.
- 28 - Tunisie - Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées - 1962 - 1969 Rapport technique . - *Tech. Rpt/Unesco (UNDP (SF) TUN. 5 - Paris août 1970.*
- 29 - WITHERS (B.), VIPOND (S.). - 1974 - Irrigation design and practice. - *BT Batsford limited.*
- 30 - WESSELING (J.), OSTER (J.D.). - 1973 - Response of salinity sensors to rapidly changing salinity . - *Soil Sci. Soc. Amer. Proc. vol.37.*
- 31 - VAN ROOYEN (P.C.), MOOLMAN (J.H.). - 1980 - Effect of irrigation management and water table depth on water and salt distribution as predicted by a computer simulation model . - *Water SA Vol 6, N°2, avril 1980.*

A N N E X E

Annexe (d'après LEGOUPIL - (16))

TOLERANCE RELATIVE DES PLANTES CULTIVEES AU SEL (1)

Cultures fruitières

Tolérance au sel élevée	Tolérance au sel moyenne	Tolérance au sel faible
Palmier dattier	Grenadier	Poirier
	Figuier	Pommier
	Olivier	Orange
	Vigne	Pamplemousse
	Cantaloup	Amandier
		Abricotier
		Pêcher
		Fraisier
		Citronnier
		Avocatier

Cultures potagères

$EC_e \times 10^3 = 12$	$EC_e \times 10^3 = 10$	$EC_e \times 10^3 = 4$
Betteraves potagères	Tomates	Radis
Choux à ferille	Choux broccoli	Céleri
Asperges	Choux	Haricots verts
Epinards	Poivre	
	(variété américaine)	
	Chou-fleur	
	Laitue pommée	
	Maïs sucré	
	Pommes de terre	
	(White rose)	
	Carotte	
	Oignon	
	Petits pois	
	Citrouille	
	Concombre	
$EC_c \times 10^3 = 10$	$EC_c \times 10^3 = 4$	$EC_c \times 10^3 = 2$

(1) Les chiffres suivant $EC_c \times 10^3$ sont les valeurs de conductivité électrique de l'extrait saturé en millimhos par centimètre à 25°, qui sont associées à une diminution de 50 % du rendement.

Cultures fourragères

$ECc \times 10^3 = 18$	$EC \times 10^3 = 10$	$EC \times 10^3 = 4$
Sporobolus airoides Distichlis stricta Puccinellia airoides Cynodon Dactylon Chloris gayana Bromus catharticus Elymus virginicus Agropyron smithii Orge (foin) Trifolium jaminianum	Melilotus alba Melilotus officinalis Lolium perenne Bromus emarginata Trifolium fragiferum Paspalum dilatatum Sorghum sudanense Trifolium annua Luzerne de Californie Festuca a.elator Seigle (foin) Blé (foin) Avoine (foin) Dactylis glomerata Bouteloua gracilis Festuca elatior Phalaris arundinacca Lotus corniculatus Bromus inermis Arrhenaterum elatius Vicia sp. Sourclover Vicia	Trifolium repens Alopecurus pratens Trifolium hybridum Trifolium pratens Trifolium repens "Burnet"
$ECe \times 10^3 = 12$	$ECe \times 10^3 = 4$	$ECe \times 10 = 2$

Grandes Cultures

$ECc \times 10^3 = 16$	$ECc \times 10^3 = 10$	$ECc \times 10^3 = 4$
Orge (grains) Betterave sucrière Colza Coton	Seigle (grains) Blé (grains) Avoine (grains) Riz Sorgho (grains) Maïs Lin Tournesol Ricin	Fèves
$ECc \times 10^3 = 10$	$ECc \times 10^3 = 6$	

TOLERANCE RELATIVE DES PLANTES AU BORE

Tolérantes	Semi Tolérantes	Sensibles
: Tamarix aphylla	: Tournesol	: Pacanier
: Asperge	: Pomme de terre	: Juglans nigra
: Phoenix canariensis	: Coton Acla	: Juglans regia
: Phoenix dactylifera	: Coton Pima	: Topinambour
: Betterave sucrière	: Tomate	: Haricot blanc
: Betterave fourragère	: Lathyrus odoratus	: Ulmus (variété américaine)
: Blette	: Radis	: Prunier
: Luzerne	: Pisumaryense	: Poirier
: Glaieul commun	: Centaurea cyanus	: Pommier
: Fève	: Olivier	: Raisin (variété Sultanine et Malaga)
: Oignon	: Orge	: Figuiier (variété Kadota)
: Navet	: Blé	: Diospyros kaki
: Choux	: Maïs	: Cerisier
: Laitue	: Milo	: Pêcher
: Carotte	: Avoine	: Mûre sauvage (variété sans épines)
	: Zinnia	: Oranger
	: Citrouille	: Avocatier
	: Poivre (variété américaine)	: Pamplemousse
	: Patate douce	: Citronnier
	: Haricots de Lima	: Abricotier