

AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT
WASHINGTON, D. C. 20523
BIBLIOGRAPHIC INPUT SHEET

FOR AID USE ONLY

Batch 71

1. SUBJECT CLASSIFICATION	A. PRIMARY Food production and nutrition	AF25-0000-0000
	B. SECONDARY Soil fertility, fertilizers, and plant nutrition	

2. TITLE AND SUBTITLE
L'amelioration des sols salins

3. AUTHOR(S)
(101) U.S. Agr. Research Service

4. DOCUMENT DATE 1962	5. NUMBER OF PAGES 149p.	6. ARC NUMBER ARC
--------------------------	-----------------------------	----------------------

7. REFERENCE ORGANIZATION NAME AND ADDRESS
AID/AFR/RTAC

8. SUPPLEMENTARY NOTES (Sponsoring Organization, Publisher, Availability)
(In Collection: techniques am., 87)

9. ABSTRACT

10. CONTROL NUMBER PN-AAE-721	11. PRICE OF DOCUMENT
12. DESCRIPTORS Irrigation Saline soils Tolerances	13. PROJECT NUMBER
	14. CONTRACT NUMBER AID/AFR/RTAC
	15. TYPE OF DOCUMENT

TECHNIQUES AMÉRICAINES - 87

L'amélioration des sols salins

CENTRE RÉGIONAL D'ÉDITIONS TECHNIQUES

Traduction de 12 études en langue anglaise
élaborées par divers spécialistes et pédologues de
Agricultural Research Service
United States Department of Agriculture
Washington D. C.
qui a publié ces études originellement
sous forme de bulletins d'information agricole

La présente édition en langue française est publiée par le
Regional Technical Aids Center (RTAC)
dénommé
Centre Régional d'Éditions Techniques (CRET)
Paris - France
qui relève du
DEPARTMENT OF STATE
Agency for International Development
Washington D. C.

Pour tous renseignements au sujet des publications CRET
s'adresser à la
Mission Américaine de l'A.I.D.
Ambassade des États-Unis d'Amérique
(Capitale du pays d'où émane la demande)

PRÉFACE

Les sols salés ont été utilisés de tous temps. Dans les pays antiques du Moyen Orient les peuplades sédentaires ont appris par tâtonnement que l'orge pousse mieux que le blé sur un sol salé. Elles ont aussi appris que les résultats étaient meilleurs en plantant l'orge dans un sol salin sec, irrigué par la suite, qu'en opérant dans l'ordre inverse. Elles parvinrent même à planter sur des sols très salés des melons et des légumes — plantes très sensibles au sel — en semant sur les côtés fortement inclinés des fosses d'irrigation. Les systèmes racinaires étaient ainsi situés au-dessous de la zone de perte intensive d'humidité et d'accumulation du sol.

Heureusement que de nos jours les agriculteurs n'ont plus besoin de recourir à des méthodes empiriques, coûteuses et lentes, pour apprendre à se servir de leurs sols salés. Ils disposent des résultats d'études effectuées par des pédologues sur les conditions génératrices de la salinité du sol, son diagnostic, et les moyens de la combattre. En outre, le comportement de la plupart des cultures importantes a été étudié dans des conditions de salinité et d'alcalinité variables pour déterminer leur degré de tolérance spécifique à la salinité et à l'alcalinité du sol.

Rédigée à l'origine sous forme de bulletins distincts par des techniciens du Département de l'Agriculture des Etats-Unis, spécialisés dans l'étude des problèmes soulevés par les sols salés, cette brochure présente, sous une forme simple mais rationnelle, les dernières recommandations relatives à l'usage et à l'exploitation des sols salés et alcalins.

La version originale anglaise des bulletins a été conçue et rédigée dans le seul but de fournir aux agriculteurs sachant lire et écrire, aux agents agricoles et à d'autres personnes intéressées au problème, des renseignements sûrs et utiles.

Les sols salés sont très répandus dans beaucoup de pays francophones d'Afrique. La zone littorale de l'Afrique Occidentale est fortement affectée par des ingressions d'eau salée de la mer. On trouve de

vastes régions de terres salées au Maroc, en Tunisie, en Algérie, au Niger, au Tchad, au Sénégal, au Mali et au Cameroun.

Ces bulletins, traduits, assemblés et publiés en une seule brochure pour des raisons de commodité, seront extrêmement utiles aux agronomes et autres techniciens qui, sur le plan pratique, sont aux prises avec des problèmes soulevés par l'utilisation de sols salés et alcalins. Les auteurs y expliquent, en termes simples et précis, les causes de la salinité des sols, la façon de la diagnostiquer et les mesures à prendre pour améliorer et utiliser ces terres.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	IX
I. LES PROBLÈMES DE SALINITÉ DANS LES TERRES IRRIGUÉES ..	1
Origine du sel et causes de son accumulation	1
— D'où provient le sel?	1
— Pourquoi le sel s'accumule-t-il dans le sol?	2
Action sur les plantes et les sols	4
— Action d'une trop forte quantité de sel sur les plantes	4
— Action d'une trop forte quantité de sel sur le sol.	4
— Moyens de déceler les sols salins	7
— Moyens de déceler les sols sodiques	7
Amélioration des sols salins	8
— Comment peut-on améliorer les sols salins?	8
— Comment peut-on améliorer les sols sodiques?	8
— Moyens d'améliorer les sols salins-sodiques	12
— Dans quelle mesure peut-on améliorer les sols? ..	12
Analyses d'eau et de sol	14
II. DIAGNOSTIC DE LA SALINITÉ DU SOL, par C. A. BOWER ..	15
Echantillonnage du sol	15
— Choix des lieux où prélever les échantillons	16
— Prélèvement de l'échantillon	17
— Renseignements recueillis sur le terrain destiné à accompagner les échantillons	19
Analyses de sols	19
— Types d'analyses à entreprendre	19
— A qui s'adresser pour effectuer les analyses?	22
Interprétation des analyses de sols	23
Résumé	24
III. TOLÉRANCE AU SEL DES CULTURES DE LÉGUMES, par Léon BERNSTEIN	25
Que faut-il entendre par tolérance au sel?	25
Action du sel sur la croissance des légumes	25

	Action du sel sur le rendement et la qualité des légumes.	26
	Degré de salinité que les légumes peuvent supporter	28
	Comment réduire les risques d'une salinité excessive ?..	30
IV.	TOLÉRANCE AU SEL DES CULTURES DE PLEIN CHAMP, par Léon BERNSTEIN	33
	Que faut-il entendre par tolérance au sol, et comment peut-elle être mesurée ?	33
	Action de la salinité sur le rendement et la qualité des cultures de plein champ	34
	La tolérance au sel se modifie-t-elle lorsque la plante mûrit ?	35
	Degré de salinité que les diverses cultures de plein champ peuvent tolérer	36
	Traitement des terres salées pour minimiser les dégâts occasionnés aux cultures par le sel	38
	Faits à retenir	39
V.	TOLÉRANCE AU SEL DES GRAMINÉES ET DES LÉGUMINEUSES FOURRAGÈRES, par Léon BERNSTEIN	40
	Que faut-il entendre par tolérance au sel ?	40
	Pourquoi les cultures fourragères sont-elles importantes pour les terres salines ?	41
	Action du sel sur la croissance des plantes fourragères..	42
	Degré de salinité que les diverses graminées et légumi- neuses fourragères peuvent supporter	43
	Action du sel sur la qualité du fourrage	45
	Comment utiliser les renseignements relatifs à la tolérance au sel pour choisir une culture fourragère convenant à une situation déterminée ?	46
	Traitement des terres salées en vue d'en améliorer le rendement	46
	Eléments à considérer	47
VI.	TOLÉRANCE DES CULTURES AU SODIUM ÉCHANGEABLE, par George A. PEARSON	48
	Que faut-il entendre par sodium échangeable ?	48
	Comment peut-on déceler des sels sodiques ?	49
	Action du sodium échangeable sur le rendement des cultures	50
	Quantités de sodium échangeable que les cultures peuvent tolérer	51
	Effets de la salinité sur un sol sodique	55
	Comment peut-on améliorer la croissance des plantes sur des sols sodiques ?	55
VII.	DÉGÂTS OCCASIONNÉS AUX PLANTES PAR LE BORE, par L. V. WILCOX	56
	Qu'est-ce que le bore ?	56
	D'où provient le bore excédentaire ?	57

	Comment le bore attaque-t-il les plantes ?	57
	Comment déceler les accidents provoqués par le bore ?	58
	L'analyse chimique permet-elle de déceler la présence d'une quantité toxique de bore ?	58
	Que peut-on faire si l'on craint la présence d'une quantité toxique de bore ?	59
VIII.	DÉTERMINATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION, par L. V. WILCOX	61
	Les sels dans les eaux d'irrigation	61
	— Quels sont les sels présents dans l'eau ?	61
	— Quelles sont les difficultés qui peuvent surgir du fait de la présence de sels dans l'eau d'irrigation ?	62
	Qualité de l'eau	63
	— Comment déterminer la qualité de l'eau ?	63
	— Quel type d'analyse faut-il faire ?	63
	— Comment évaluer la qualité de l'eau d'après les résultats de l'analyse ?	63
IX.	UTILISATION DES EAUX SAUMÂTRES POUR L'IRRIGATION DANS DES RÉGIONS HUMIDES, par Jesse LUNIN, M. H. GALLATIN, C. A. BOWER et L. W. WILCOX	68
	Que faut-il entendre par eaux saumâtres ?	68
	Quelles sources d'eaux saumâtres utilise-t-on pour l'irri- gation ?	68
	Comment les sels s'accumulent-ils dans le sol et comment peut-on les éliminer ?	69
	Action de l'accumulation des sels sur le sol	71
	Action du sel sur les plantes	71
	Quantités de sel tolérées par les cultures	71
	Comment déterminer la salinité des eaux d'irrigation ?	73
	Quantité d'eau saumâtre qu'un cultivateur peut utiliser.	73
	Précautions à prendre en utilisant des eaux saumâtres pour l'irrigation	74
X.	AMENDEMENTS CHIMIQUES POUR AMÉLIORER LES SOLS SODIQUES, par C. A. BOWER	76
	Mode d'action des amendements	76
	Amendements chimiques employés sur les sols sodiques.	77
	Votre sol a-t-il besoin d'un amendement chimique ?	79
	Types d'amendements qu'il faut appliquer	80
	Comment comparer le coût des amendements ?	81
	Quantités d'amendements qu'il faut appliquer	82
	Manière d'appliquer les amendements	83
	Points qui méritent une attention spéciale	83
XI.	LE RIZ EN TANT QUE CULTURE SUR LES SOLS SALÉS EN COURS D'APPROPRIATION, par George A. PEARSON et Alvin D. AYERS	85

Introduction	85
Mouvements des sels dans les sols submergés	88
Culture du riz et lessivage	96
Résumé	96
Bibliographie	98
XII. SALINITÉ ET IRRIGATION, par Lowell E. ALLISON	100
Introduction	101
Salinité des eaux d'irrigation	101
A. Classification des eaux	101
B. Interprétation des analyses des eaux d'irrigation ..	104
Effets des sels sur les sols	107
A. Caractéristiques des sols salés	107
B. Diagnostic des sols salés et sodiques	112
Effet des sels sur les plantes	115
A. Effets généraux et spécifiques	115
B. Tolérance des cultures au sel, sodium et bore	119
Récupération des terres salées	125
A. Lessivage en vue d'évacuer les sels solubles	126
B. Lessivage en vue d'évacuer le bore	127
C. Procédés de récupération	128
Aménagement des sols salés	132
A. Lessivage pour combattre la salinité	132
B. Drainage nécessaire pour lutter contre la salinité ..	135
C. Procédés spéciaux de culture	135
D. Amélioration qualitative de l'eau d'irrigation	136
E. Méthodes et fréquence d'irrigation	137
Conclusions	138
Références	139

CHAPITRE PREMIER

LES PROBLÈMES DE SALINITÉ DANS LES TERRES IRRIGUÉES

Aux Etats-Unis, plus d'un quart des terres agricoles irriguées ne produisent pas abondamment parce que le sol est salé.

Les sols salés peuvent contenir trop de sel, trop de sodium, ou les deux à la fois. L'accumulation de sel dans le sol peut retarder la croissance des plantes. Lorsque le sodium qui est contenu dans les sels communs est absorbé par les (adhère aux) particules du sol, ce dernier peut être difficile à labourer et la pénétration de l'eau peut être médiocre.

Les difficultés occasionnées par le sel sont particulièrement graves dans 17 Etats de l'ouest, où 2 833 000 hectares de terres irriguées sont affectées par le sel. Il en est de même pour une superficie moins vaste de cultures non irriguées et de pâurages.

ORIGINES DU SEL ET CAUSES DE SON ACCUMULATION

D'où provient le sel ?

Le sel provient des minéraux de la croûte terrestre. Les agents atmosphériques décomposent les minéraux et libèrent le sel sous une forme soluble.

Les régions humides ont généralement une pluviosité suffisamment forte pour lessiver le sel à travers le sol et dans la nappe phréatique qui l'entraîne vers les cours d'eau. Ces derniers le transportent dans les océans.

Dans les régions arides, les pluies sont trop rares pour lessiver le sel du sol. La pluie est largement dissipée par évaporation et absorption par les plantes. Ces deux processus — évaporation et absorption par les plantes — se font à un rythme plus élevé dans les régions arides que dans les régions humides.

La rareté des pluies, l'évaporation et l'absorption par les plantes favorisent l'accumulation de sel dans les régions arides. Cependant, une accumulation de sel occasionnée uniquement par ces facteurs n'est généralement pas assez importante pour causer des difficultés. Une accumulation dangereuse peut se produire lorsqu'un champ reçoit constamment du sel d'autres endroits. Le sel est amené dans la région par les eaux de surface ou par les eaux souterraines. L'irrigation active souvent le processus.

Pourquoi le sel s'accumule-t-il dans le sol ?

Le sel s'accumule lorsque l'eau s'évapore à la surface ou bien est absorbée par les racines des plantes. Ces deux processus séparent le sel de l'eau. Le sel reste sur place. Le sel est enlevé du sol lorsque l'eau s'écoule vers le bas à travers la zone des racines et dans le sol sous-jacent ou dans un réseau de drainage souterrain.

La rapidité avec laquelle le sel s'accumule dans la zone des racines est fonction de la qualité de l'eau d'irrigation, des méthodes d'irrigation, du type de drainage du champ et autres conditions.

Qualité de l'eau d'irrigation

Toutes les eaux d'irrigation contiennent du sel dissous. La teneur en sel varie de 0,1 à 5 tonnes ou davantage par acre/pied. Comme il faut appliquer au moins 5 acre/pied d'eau d'irrigation au cours d'une campagne, un acre/pied peut recevoir jusqu'à 25 tonnes de sel au cours d'une campagne.

Il est extrêmement important d'analyser l'eau d'irrigation pour en déterminer la qualité. Une analyse de l'eau d'irrigation peut attirer l'attention de l'agriculteur sur deux dangers : la présence de salinité ou la possibilité de formation d'un sol sodique. Elle peut aussi révéler la présence de quantités excessives de bicarbonate, ou de bore, ou des deux. Le bicarbonate est dangereux si la quantité contenue dans l'eau d'irrigation est élevée par rapport au calcium ou au magnésium. Bien que le bore en faible quantité soit indispensable à la croissance des plantes, il est toxique pour un grand nombre de plantes lorsque sa concentration est légèrement supérieure à celle qui est nécessaire pour assurer une croissance normale.

Méthodes d'irrigation

L'eau est généralement abondante lorsqu'on met en œuvre un projet d'irrigation. En conséquence, on applique trop d'eau. Cet excès d'eau, souvent, fait plus de mal que de bien car il tend à relever le plan d'eau et à aggraver ainsi les problèmes de drainage.

Une trop faible quantité d'eau empêche le processus naturel de lessivage grâce auquel les sels sont entraînés au-delà des racines de la plante.

La quantité d'eau d'irrigation fournie à un champ doit être suffisante pour compenser les pertes par transpiration et évaporation des

plantes et pour lessiver le sel qui s'est accumulé au cours des irrigations précédentes.

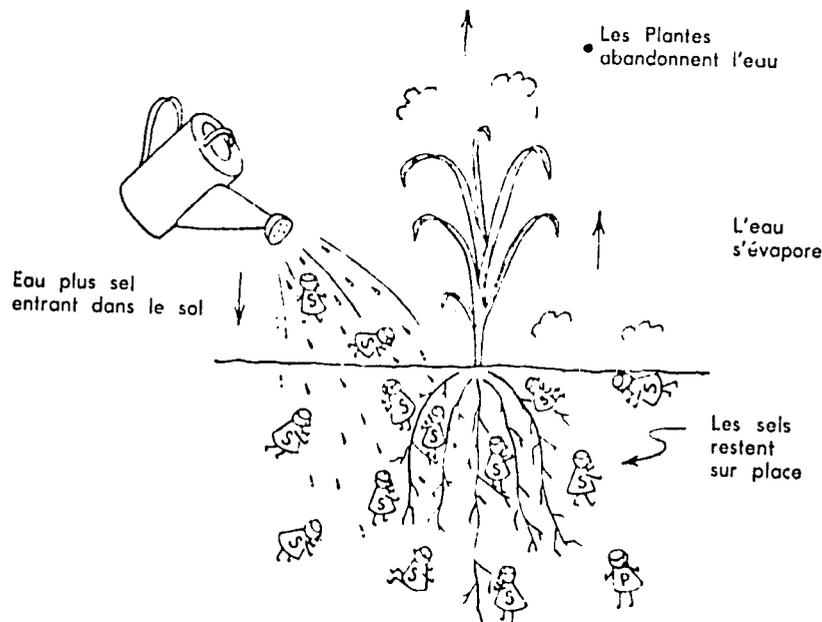
Type de drainage

Un drainage suffisant est important pour maintenir un faible niveau de salinité. Si le champ n'est pas suffisamment bien drainé, l'eau peut s'accumuler dans la zone des racines et saturer le sol. Ceci entraîne le relèvement du niveau du plan d'eau et lorsque celui-ci s'élève jusqu'à 1,50 m ou 1,80 m de la surface, l'eau du sol et le sel qu'il contient remontent vers la zone des racines et la surface du sol. La raison en est que l'eau souterraine tend à remonter vers le sol plus sec et elle contribue à la salinité de ce dernier.

Un bon drainage empêche le niveau de la nappe phréatique de se relever et permet à l'eau de s'écouler avant de pouvoir s'élever dans la zone du sol occupée par les racines des plantes.

Autres conditions

Dans certains champs, le sel s'accumule en raison de l'emplacement, parce qu'ils ne sont pas plans ou parce que le sol est imperméable. Les vallées basses situées près des cours d'eau sont généralement irriguées les premières parce que l'eau y est abondante. Lorsque l'irrigation se développe, les champs qui se trouvent plus haut sur les pentes de la



Toutes les eaux d'irrigation contiennent des sels. Les sels s'accumulent dans le sol lorsque la quantité d'eau appliquée est juste suffisante pour satisfaire aux besoins de la plante.

vallée sont également irrigués. Ce processus continue et aboutit à la création d'un système de terrasses. L'eau d'irrigation appliquée aux champs les plus élevés s'écoule dans la nappe phréatique des champs situés au-dessous. En conséquence, le champ situé le plus bas reçoit toute l'eau du drainage et peut devenir pollué irrémédiablement par le sel.

Un champ qui n'est pas plan a tendance à accumuler du sel. Les endroits élevés reçoivent rarement suffisamment d'eau. Trop peu d'eau favorise l'accumulation du sel.

La perméabilité des sols est variable, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas tous la même aptitude à absorber l'eau. Les sols les moins perméables sont généralement les plus vulnérables à l'accumulation du sel parce que l'eau ne peut pas traverser ces sols facilement. On trouve dans certains sols des formations analogues à du ciment, qui aggravent le problème du drainage.

ACTION SUR LES PLANTES ET LES SOLS

Action d'une trop forte quantité de sel sur les plantes

L'effet défavorable d'une trop forte quantité de sel sur les plantes est de deux ordres :

1) Le sel empêche les plantes de recevoir suffisamment d'eau, même lorsque le sol est bien arrosé. Les plantes sont alors rabougries et ont fréquemment une couleur caractéristique bleu-verdâtre. Si le sel est réparti également dans le champ, toutes les plantes seront rabougries. La baisse des rendements peut atteindre jusqu'à 25 %.

2) Le sel a un effet toxique direct sur les plantes. La plupart des arbres fruitiers sont sujets à des dégâts lorsque la quantité de sel est élevée. Il en résulte des brûlures caractéristiques des feuilles qui ensuite tombent. Les arbres peuvent mourir lorsque se fait une accumulation d'une quantité nocive de sodium ou de chlorure. La plupart des cultures de plein champ, fourragères et maraîchères, peuvent cependant tolérer de grosses quantités de sodium ou de chlorure sans que leurs feuilles montrent des symptômes visibles d'attaque du fait de la toxicité du sel. Le bore et le bicarbonate sont toxiques pour toutes les espèces de plantes, mais le degré de tolérance peut varier d'une plante à une autre.

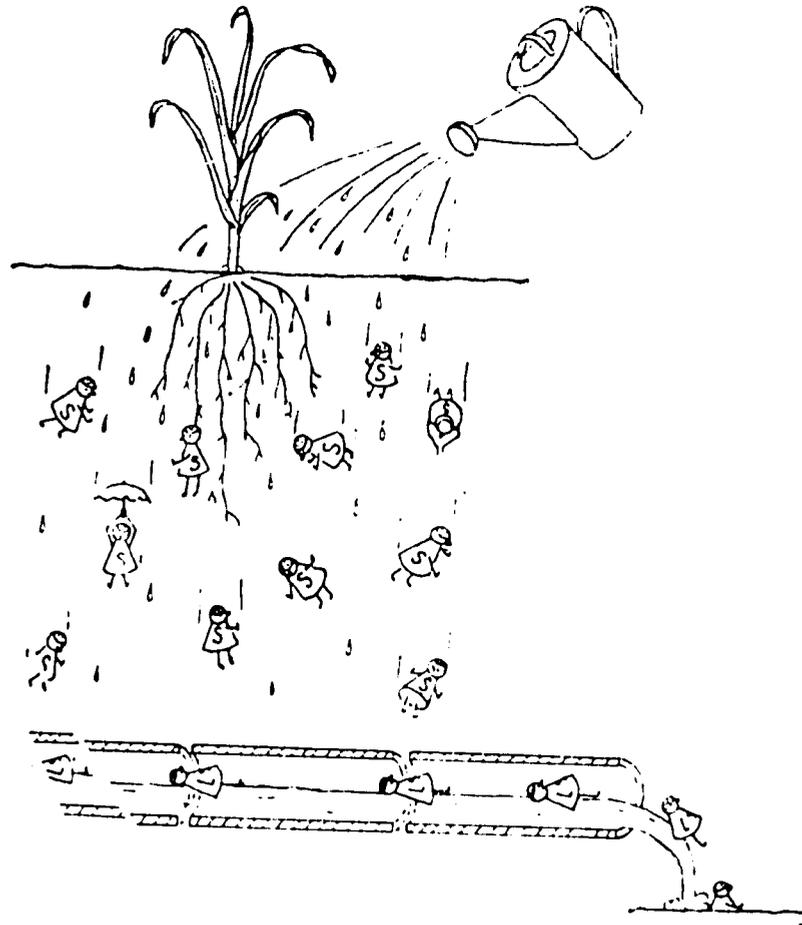
Action d'une trop forte quantité de sel sur le sol

Les sols salés sont des sols qui ont été endommagés par des sels solubles. Ils sont classés en trois catégories différentes : les sols salins, les sols sodiques et les sols salins/sodiques.

Sols salins

Le sol qui contient une trop forte quantité de sels solubles est appelé sol salin. Ces sols sont généralement floclés, c'est-à-dire que les

particules de sol sont groupées ensemble en masse compacte. Ces masses compactes sont granuleuses et ne s'agglomèrent pas ensemble ; l'eau et l'air circulent librement entre elles. Bien que cette condition améliore la structure du sol, le sel soluble réduit le taux d'absorption de l'eau par les plantes. En conséquence, la croissance des plantes se trouve retardée.



Lorsque le drainage naturel n'est pas suffisant, les drains en tuile ou en tranchées à ciel ouvert peuvent contribuer à l'élimination du sel de la zone des racines.

Sols sodiques

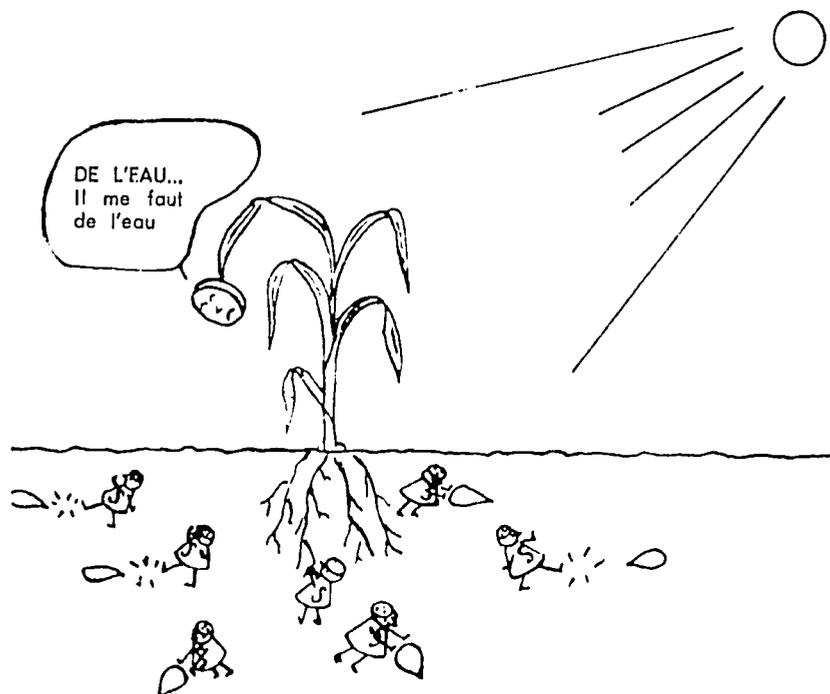
Les sols qui contiennent des quantités appréciables de sodium adsorbé (qui adhère) par leurs différentes particules sont appelés sols sodiques. Ils ne flocculent pas parce que les particules de sol sur les-

quelles le sodium est adsorbé se séparent des blocs floclés. Cette séparation réduit les vides entre les blocs. L'eau et l'air ne peuvent pas circuler librement à travers le sol, bien qu'il puisse y avoir plus d'ouvertures. Dans certaines localités, le sol devient une masse gélatineuse gonflée, imperméable aussi bien à l'air qu'à l'eau. Cet effet nocif du sodium s'aggrave lorsque la teneur en sels solubles est faible.

Les sols sodiques secs sont durs. Les particules dispersées de sol se collent les unes aux autres et forment une croûte qui retarde ou empêche la sortie des plantules. Le sol se divise en mottes dures lorsqu'il est labouré.

Le sodium est également toxique pour certaines plantes. Les signes visibles de toxicité n'apparaissent cependant pas avant que la concentration en sodium ait atteint un point où elle est suffisante pour détruire les propriétés physiques du sol, bien que les arbres et quelques autres plantes soient sensibles à des concentrations plus faibles.

Les sols sodiques sont formés par un processus chimique. Le sodium, qui est en fait un des constituants du sel, existe en solution sous forme de « cation ». Les cations sont de très petites particules chargées d'électricité positive. Les particules de sol qui sont chargées d'électricité négative attirent les cations positifs. Il s'ensuit que les cations de sodium sont adsorbés sur les particules de sol.



La présence de sels dans le sol rend difficile l'absorption de l'eau par les plantes.

D'autres cations, ou particules positives qui adhèrent aux particules de sol, sont le calcium et le magnésium. Le calcium et le magnésium sont les principaux cations de la plupart des sols productifs dans les régions arides.

Lorsque les sols productifs sont irrigués avec des eaux d'irrigation ayant une forte teneur en sodium, le sodium ne tarde pas à remplacer une partie du calcium et du magnésium. Cette réaction est appelée « échange des cations ». C'est un processus réversible. La capacité du sol à adsorber et échanger des cations est limitée. Le pourcentage de cette capacité que le sodium absorbe est appelé « pourcentage de sodium échangeable ». Les sols qui sont endommagés par le sodium adsorbé ont généralement un pourcentage de sodium échangeable égal ou supérieur à 15.

Sols salins-sodiques

On trouve des sols salins/sodiques lorsque la salinité et le sodium adsorbé affectent le sol en même temps.

Moyens de déceler les sols salins

La croissance des plantes sur sols salins est généralement médiocre et éparse parce que le sel retarde ou empêche la germination des semences. Si les semences ne donnent pas de germe, les jeunes plants ne tardent pas à mourir. Il se produit alors des plaques irrégulières dénudées dans le champ. Le peuplement médiocre et épars, ainsi que ces plaques nues et irrégulières sont généralement entourés par des zones de croissance inégales.

Un autre indice de salinité du sol est la présence d'une croûte blanche à la surface du sol. Cependant, ce signe peut ne pas être une indication de salinité car les sols non salins qui contiennent du gypse présentent également des croûtes blanches.

Il n'est pas toujours possible de déterminer par inspection visuelle si un champ contient trop de sel. Un meilleur système consiste à analyser les sols suspects. Il revient meilleur marché de payer le prix d'une analyse que d'attendre l'apparition de signes visibles. Lorsque ces derniers apparaissent, il est généralement trop tard pour sauver la récolte.

Moyens de déceler les sols sodiques

Les sols sodiques présentent souvent à la surface des dépôts noirs. Ces sols sont généralement appelés « sols alcalins noirs ». Les dépôts noirs sont dus au fait que le sodium dissout les matières organiques contenues dans le sol. Les petites zones irrégulières de sols sodiques sont appelées « taches alcalines ».

Les sols sodiques, généralement, absorbent lentement l'eau. Ce fait, cependant, n'est pas une indication infaillible. D'autres types de

sols — en particulier les sols argileux et ceux qui ont un fond de raie au labour, et ceux qui sont cultivés lorsqu'ils sont humides — absorbent également lentement l'eau.

AMÉLIORATION DES SOLS SALÉS

Comment peut-on améliorer les sols salés ?

Les sols salés peuvent être améliorés par lessivage.

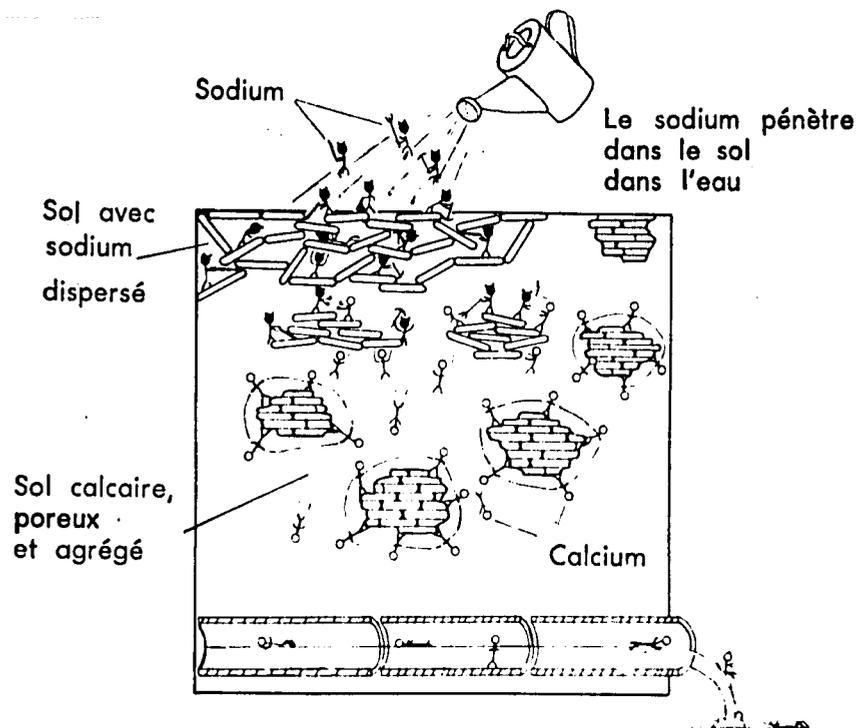
Le lessivage est le processus qui consiste à inonder un champ et à laisser l'eau pénétrer dans le sol et dans le sol sous-jacent. Une méthode classique de lessivage est celle qui consiste à laisser l'eau séjourner entre des diguettes sur toute la surface du champ. Le lessivage n'est pas efficace si la nappe phréatique est trop proche de la surface du sol. S'il n'est pas possible d'éliminer par drainage naturel l'eau supplémentaire, il faut installer des drains artificiels. Parfois, on élimine l'excès d'eau par pompage dans des puits. Les profondeurs possibles du niveau de la nappe phréatique varient selon le type de sol irrigué. La quantité d'eau de lessivage qui pénètre dans le sol par submersion détermine la quantité de sel qui est enlevée du sol. Lorsque l'eau est lessivée à travers le sol, une hauteur de 15 cm d'eau en surface pour chaque 30 cm de la zone des racines, lessive plus de 50 % du sel. Trente centimètres d'eau pour chaque 30 centimètres de la zone des racines lessivent 80 % du sel. Soixante cm d'eau appliqués sur 30 cm de la zone des racines lessiveront 90 % du sel. Si l'eau de lessivage est envoyée dans le champ par des méthodes autres que la submersion, il faut davantage d'eau pour obtenir le même résultat.

Le mouvement ascendant de l'eau salée provenant de la nappe phréatique peu profonde peut entraîner l'accumulation de sel dans la zone des racines. Une nappe phréatique doit être située au moins à 1,35 m - 1,50 m au-dessous de la surface pendant la majeure partie de la période de croissance des plantes. Des mesures fréquentes du niveau de la nappe phréatique dans des trous ouverts pratiqués en plusieurs endroits d'un champ indiquent si le drainage est suffisant.

Un nivelage bien fait de la terre permet une application plus uniforme d'eau et une meilleure lutte contre la salinité. Les endroits élevés dans un champ inégal peuvent ne pas recevoir suffisamment d'eau pour assurer la bonne croissance des plantes ou le lessivage.

Comment peut-on améliorer les sols sodiques ?

Les sols sodiques peuvent être améliorés au moyen d'amendements chimiques, par lessivage du sol et par l'emploi de pratiques culturales qui rétablissent la structure du sol.



Lorsqu'on applique une eau d'irrigation contenant une forte proportion de sodium sur un sol poreux et agrégé sur lequel le calcium est adsorbé, le sodium remplace le calcium adsorbé et modifie la répartition des particules de sol qui forment alors de petites pores à travers lesquelles l'eau s'écoule lentement. Le processus inverse se produit lorsqu'on applique du sodium soluble dans le sol et que l'on emploie des méthodes qui permettent d'améliorer la structure du sol.

Apport d'amendements chimiques

La plupart des sols sodiques ont besoin d'amendements chimiques pour retrouver leur productivité. Il existe un grand nombre d'amendements qui peuvent être utilisés. Le gypse et le soufre sont les plus communs. Comme la plupart des amendements sont coûteux, il est toujours bon de faire analyser le sol pour déterminer le type et la quantité nécessaires.

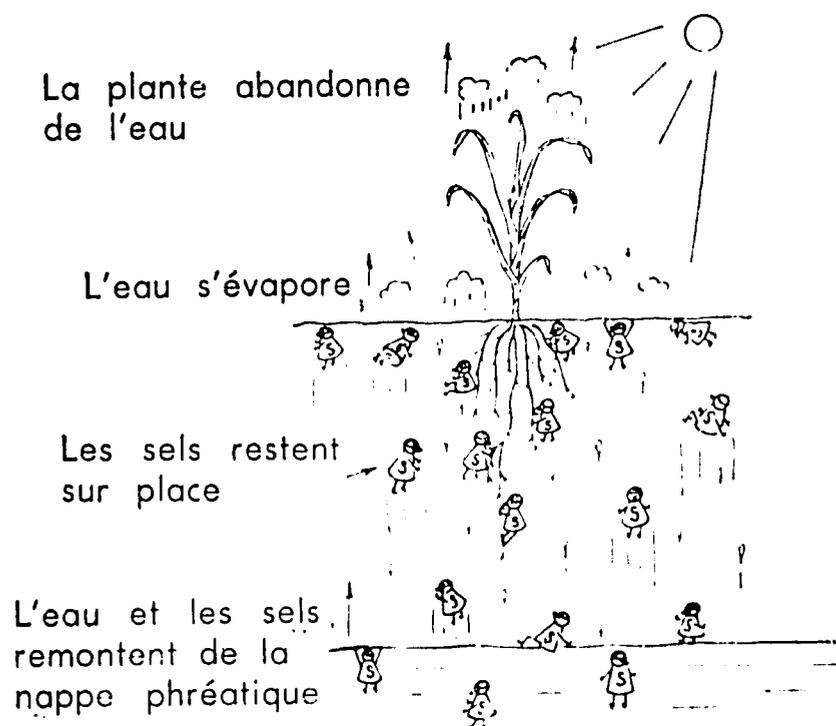
Il n'est pas toujours indispensable d'apporter des amendements pour améliorer des sols sodiques. Certains sols sodiques, par exemple, contiennent du sulfate de calcium (gypse) et, lorsqu'ils sont lessivés, l'eau dissout le gypse et libère le calcium. Ce calcium dissous remplace le sodium adsorbé. Les sels de sodium formés par réaction peuvent être enlevés par lessivage.



1. *Un peuplement médiocre et clairsemé est un signe de salinité des sols dans ce champ de haricots en Californie.*



2. *Les plaques sans végétation et la végétation inégale indiquent la présence de sel dans cette parcelle d'orge près d'El Centro, en Californie.*



Les sels s'accumulent dans le sol lorsque le niveau de la nappe phréatique est peu profond.

Certaines eaux d'irrigation contiennent des quantités appréciables de calcium ou de magnésium. Lorsque ces eaux sont appliquées sur des sols sodiques, il se produit une réaction par échange. Le sodium est remplacé et éliminé du sol.

Lessivage du sol

Les sols sodiques peuvent être lessivés après application d'un amendement. Ce processus est nécessaire pour éliminer le sodium du sol. La plupart des amendements permettent de lessiver le sol immédiatement après application de l'amendement. Cependant, si on utilise du soufre, il est préférable d'attendre deux ou trois mois avant de lessiver le sol. Cette période d'attente est nécessaire pour permettre à la réaction chimique de se produire. Les réactions se font plus facilement quand le sol est humide.

Amélioration de la structure du sol

Le sous-solage ou labour en profondeur contribue parfois à rétablir la structure du sol sodique. Ces pratiques ont cependant peu de valeur à elles seules si on n'emploie pas en même temps un amendement.

L'application de fumier ou autre matière organique sur le sol contribue aussi à améliorer la structure de ce dernier.

Moyens d'améliorer les sols salins/sodiques

Les sols salins/sodiques peuvent être améliorés de la même manière que les sols sodiques. En général, il est préférable d'appliquer des amendements avant de lessiver. Si on commence par faire le lessivage, la perméabilité du sol diminue sensiblement et la remise en état du sol est plus lente.

Dans quelle mesure peut-on améliorer les sols ?

Il n'est pas toujours économiquement possible de remettre entièrement en valeur des sols salés. Un ou plusieurs des facteurs suivants peuvent entrer en ligne de compte :

1. Le coût élevé des amendements chimiques.
2. La faible perméabilité du sol.
3. L'insuffisance du drainage.
4. L'usage, impossible à éviter, d'eau d'irrigation médiocre.

Si le sol ne peut pas être mis entièrement en valeur, des pratiques culturales judicieuses peuvent contribuer à maintenir la production.

Choix des cultures

La tolérance des cultures au sel varie considérablement. Les betteraves à sucre, le coton et l'orge peuvent tolérer jusqu'à 10 fois autant de sel que la plupart des trèfles, des haricots et des arbres fruitiers. Pour la plupart des plantes moyennement tolérantes et des plantes sensibles au sel, il n'y a pas de limite de sécurité pour la salinité. Même pour un faible niveau de salinité, les plantes peuvent être rabougries et on enregistre une réduction des rendements sans symptômes visibles du mal. Lorsque le sol devient de plus en plus salé, le rabougrissement est plus prononcé et les rendements diminuent davantage.

L'accumulation de sodium échangeable sur les particules de sol a des effets néfastes sur un grand nombre de cultures. Les arbres qui sont particulièrement sensibles au sodium sont en particulier les amandiers, les abricotiers, les avocatiers, les agrumes et les pruniers. Les plantes, comme la betterave, l'orge et l'agropyne géante, sont relativement tolérantes au sodium.

Les pédologues du Service de Vulgarisation Agricole et du Service de Conservation des Sols peuvent fournir des listes indiquant la tolérance relative au sel et au sodium des cultures.

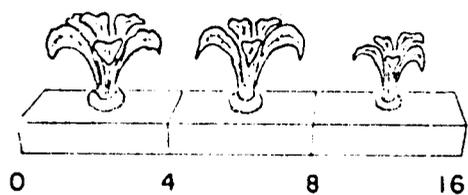
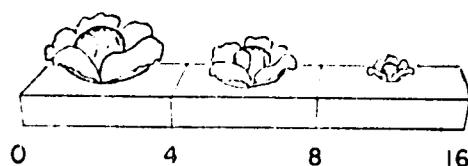
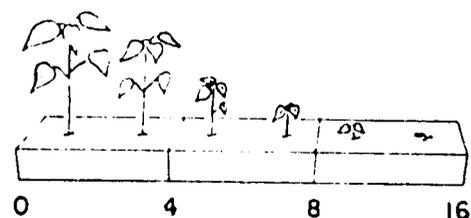
Méthodes de labourage

Des méthodes spéciales de labourage doivent être employées sur les sols salés pour réduire la salinité et la teneur en sodium. Ces sols ne doivent pas être labourés lorsqu'ils sont humides. Il ne faut pas faire circuler des machines lourdes. L'irrigation plus fréquente, surtout pen-

dant la période de germination et de sortie des germes tend à amollir la croûte des sols sodiques et contribue à obtenir un meilleur peuplement.

Le fait de modifier la méthode d'irrigation ainsi que la forme des couches de semis peut modifier considérablement la tendance du sel à s'accumuler près des semences. Par exemple, une irrigation avant la sortie des pousses dans des rigoles spéciales assez près des semences réduit la concentration en sel soluble et permet la germination.

Après sortie des plants, on peut abandonner les rigoles spéciales et en creuser de nouvelles entre les rangées.



SALINITE DU SOL (millimhos)

La tolérance au sel des plantes varie considérablement.

Méthodes d'irrigation

Les principales méthodes d'irrigation sont : la submersion, l'irrigation par rigoles, par aspersion et l'irrigation souterraine.

La submersion est la méthode qui permet de lutter le mieux contre la salinité si la terre est suffisamment plane et si la culture est d'un type qui peut être inondé.

L'irrigation par rigoles est bien adaptée aux cultures en ligne, en particulier si la terre est trop en pente pour être inondée. Bien que cette méthode provoque une accumulation des sels dans les rangées, un labourage et un mélange de toute la surface du sol à intervalles périodiques empêchent un accroissement dangereux de la teneur en sel du sol.

Si les sels s'accumulent dans le sol pendant la période de croissance, ils peuvent parfois en être éliminés par un lessivage en morte saison.

L'irrigation par aspersion permet de régler exactement la quantité et la répartition de l'eau. Les cultivateurs peuvent ne pas appliquer suffisamment d'eau par cette méthode et il ne se produit pas alors un lessivage complet des sels au-delà de la zone des racines.

L'irrigation souterraine n'est pas praticable lorsqu'il y a du sel dans le sol.

La teneur en humidité des sols salins peut être maintenue aussi élevée que possible, surtout pendant la période de croissance végétative.

La quantité d'eau appliquée doit être suffisante pour répondre aux besoins des cultures et permettre le lessivage, mais pas trop élevée pour surcharger le système de drainage. Si la capacité du système est dépassée, le niveau de la nappe phréatique se relève jusqu'à un niveau dangereux. Le maintien d'un système de drainage est également important. A cet effet, il faut réparer les tuyauteries en tuiles, nettoyer les fossés et les creuser suffisamment.

Autres pratiques

Parmi les pratiques recommandées, il faut signaler l'adoption de traitements spéciaux, comme ceux qui consistent à ajouter des amendements au sol, des matières organiques et enfin la culture d'un gazon destiné à maintenir la structure du sol.

ANALYSES D'EAU ET DE SOLS

Les analyses chimiques de l'eau d'irrigation disponible et des sols suspects sont recommandées. Une analyse de la qualité de l'eau comprend des analyses de la quantité totale de sels en solution, calcium plus magnésium, sodium, bicarbonate et bore. Les agents de Comté et les représentants du Service de Conservation des sols peuvent être consultés pour donner des renseignements sur l'analyse des échantillons et l'interprétation des résultats obtenus.

Des méthodes d'analyse des sols salés ont été mises au point par le Laboratoire de Salinité et sont expliquées dans la Circulaire 982 du Département de l'Agriculture des États-Unis, intitulée Analyses de Salinité et quantités de sodium contenues dans le sol et l'eau d'irrigation. Grâce à des méthodes d'analyses adéquates, on peut modifier les méthodes de travail du sol et d'irrigation afin d'éliminer le sel du sol ou d'empêcher que des sols légèrement salés ne le deviennent trop.

CHAPITRE II

DIAGNOSTIC DE LA SALINITÉ DU SOL

par C.A. BOWER

*Pédologue — Laboratoire de Salinité des Etats Unis
Division de la Recherche sur la conservation des sels et des eaux
Service de recherche agronomique*

L'entretien et le traitement satisfaisant des sols salés dépendent d'une connaissance exacte de la nature et de la gravité du problème qui se pose en matière de sel. Des renseignements insuffisants peuvent conduire les agriculteurs à cultiver des plantes sensibles au sel, au lieu d'espèces tolérantes au sel, ou à ne pas appliquer des amendements chimiques lorsqu'il le faudrait. On connaît certains cas où l'on a appliqué du gypse, à grands frais, sur des sols qui contenaient déjà naturellement des quantités importantes de ce minéral.

L'observation visuelle des sols et des plantes qui poussent sur ceux-ci suffit rarement à diagnostiquer convenablement un problème de salinité. Ces observations indiquent souvent que le sol contient du sel, mais il peut y avoir un problème de salinité sans que les symptômes visuels soient apparents. La salinité peut réduire les rendements des cultures jusqu'à 25 % sans symptôme apparent. En outre, l'observation visuelle peut conduire à un diagnostic erroné. Par exemple, le gypse, sel qui est essentiellement inoffensif pour les plantes, peut former une croûte blanche à la surface des sols et indiquer que ceux-ci sont salés, alors qu'en réalité il n'y a pas de sel.

Un diagnostic exact de la salinité exige des analyses de laboratoire sur des échantillons qui sont réellement représentatifs des sols. Ces prélèvements d'échantillons et ces analyses nécessitent un certain temps et une dépense modérée, mais l'expérience a prouvé que ce système est rentable.

ECHANTILLONNAGE DU SOL

Les sels qui sont à l'origine de la salinité sont solubles dans l'eau et se déplacent avec l'eau du sol. Le mouvement de l'eau dans le sol

est complexe. Il est influencé par la perméabilité des diverses couches de sol, par le relief de la surface, les pluies, les méthodes d'irrigation et de culture. Dans les champs qui sont irrigués par des rigoles, la teneur en sel du sol sur le sommet du billon peut être plus élevée que dans le fond de la rigole. Ainsi, la teneur en sel des sols peut varier considérablement à différentes profondeurs (verticalement) et dans le sens de la largeur (horizontalement) à de très courtes distances. En outre, la répartition du sel dans certaines régions peut changer sensiblement de temps à autre. Le diagnostic de la salinité par des analyses de sol n'a donc de valeur que dans la mesure où les échantillons représentent vraiment les conditions qui existent dans le champ. Il est inutile de faire des analyses exactes d'échantillons si le choix des lieux où doivent être prélevés les échantillons et la façon dont ceux-ci sont prélevés ne sont pas faits avec discernement et grand soin.

Choix des lieux où prélever les échantillons

Les échantillons destinés aux analyses doivent être prélevés dans les champs où l'on soupçonne la présence de sel, et, à des fins de comparaison, en certains endroits où il n'y a pas de sel si le cas se pré-



1. *Il faut prélever des échantillons de sol là où l'on soupçonne la présence de sel (zone dénudée) et, à titre de comparaison, dans les zones où la croissance des plantes est satisfaisante.*

sente. Si le champ est cultivé ou couvert d'une végétation spontanée, l'aspect de la végétation peut être utile pour choisir les zones atteintes et non atteintes. Pour les champs de 40 acres (environ 16 hectares) ou moins, il suffit de prélever les échantillons dans deux endroits pour les zones qui semblent être atteintes, et en deux endroits pour les zones qui sont vraisemblablement non atteintes.

Il faut choisir un nombre relativement plus élevé de lieux d'échantillonnage dans les champs ayant plus de 40 acres. Si l'on peut distinguer les zones modérément et gravement atteintes, il convient de prélever des échantillons représentant chaque zone.

Prélèvement de l'échantillon

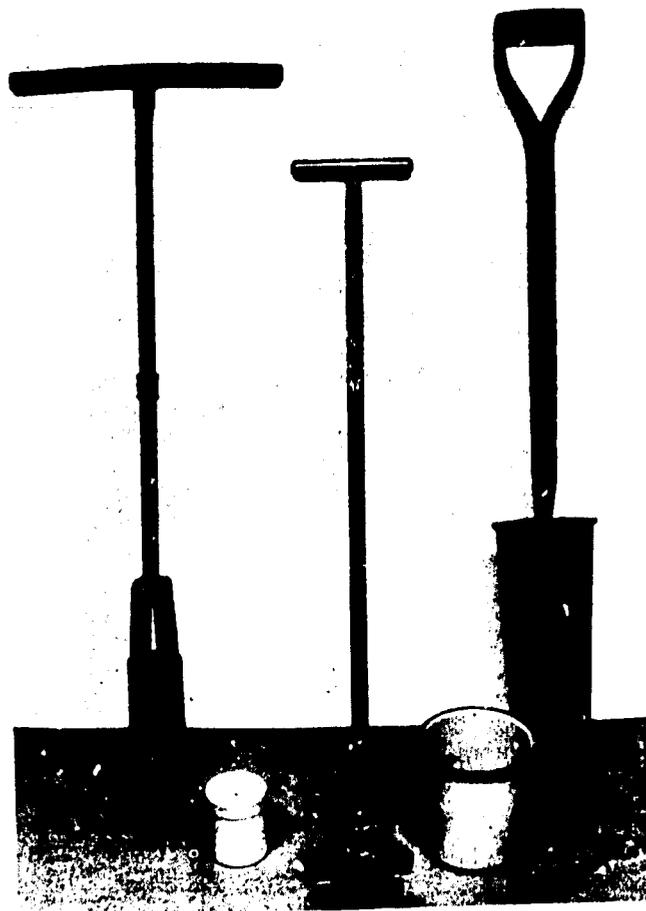
L'équipement nécessaire pour prélever des échantillons de sols consiste en un outil pour enlever le sol, un seau ou un récipient similaire pour mélanger l'échantillon, des récipients imperméables pour transporter les échantillons qui contiennent environ 1/2 litre de sol sec, et des étiquettes pour l'identifier. Un tube d'échantillonnage ou une sonde cylindrique le cas échéant, sont préférables pour prélever des échantillons, mais une bêche pour faire les tranchées ou un appareil pour mettre en place les piquets peuvent également servir. Les récipients imperméables peuvent être constitués par du papier paraffiné ou des sacs en plastique, des cartons paraffinés ou des boîtes en métal. Si l'on place un sol salin humide dans un récipient qui n'est pas imperméable, le sel sera absorbé par le récipient et lorsque le sol séchera, l'échantillon sera modifié.

Comme l'état du sol varie considérablement dans un champ, il n'est pas possible d'indiquer une méthode normalisée d'échantillonnage applicable à toutes les situations. Rien ne remplace le discernement et l'expérience pour prélever les échantillons de sol. Il est conseillé aux agriculteurs de s'assurer l'aide de leur agent local de vulgarisation ou d'un technicien du service local de conservation des sols pour prélever les échantillons.

Si, par exemple, le sol a des couches distinctes dont la texture varie, les échantillons devront être prélevés par couches. Les croûtes de sel visibles ou celles que l'on soupçonne être du sel doivent être échantillonnées séparément. En l'absence de couches distinctes, les échantillons doivent être prélevés à la profondeur de la charrue (15 à 22,5 cm) et à des intervalles de 30 cm de profondeur ensuite.

Dans les champs cultivés, les échantillons doivent être prélevés dans toute la profondeur principale de la zone des racines, qui varie de 15 cm pour les plantes à racines peu profondes jusqu'à 1,20 m ou 1,50 m pour les plantes à racines profondes. Dans les champs qui ne sont pas cultivés, on prélève généralement des échantillons jusqu'à une profondeur de 0,90 m ou 1,20 m. Dans les champs irrigués par des rigoles, il convient de prélever des échantillons distincts sur le billon et dans la rigole voisine.

Si l'on emploie une bêche pour faire des tranchées, il faut prélever une mince couche verticale de sol qui représente tout l'intervalle d'échan-



2. *Équipement nécessaire pour le prélèvement des échantillons.*

tillonnage. Le sol est ensuite placé dans un seau ou un récipient analogue, mélangé soigneusement et on prélève environ 1/2 litre du mélange. Le reste du sol est rejeté. Il faut ensuite étiqueter aussi bien l'intérieur que l'extérieur du récipient et indiquer sur cette étiquette l'emplacement et la profondeur à laquelle a été prélevé l'échantillon.

**Renseignements recueillis sur le terrain
destinés à accompagner les échantillons**

Les données d'observation recueillies sur place au moment de l'échantillonnage facilitent l'interprétation des analyses de laboratoire et l'élaboration de recommandations concernant les traitements et les méthodes de culture. Les données recueillies sur place sur chaque ter-

rain d'échantillonnage doivent comporter : 1) une brève description du sol — le type de sol si on le connaît, et les caractéristiques inhabituelles, comme la présence d'une couche résistante à la charrue — 2) une description de la végétation, si le champ en est couvert — 3) la topographie et l'état du drainage y compris la profondeur du plan d'eau — 4) l'origine et la qualité de l'eau d'irrigation, et 5) la méthode d'irrigation. La plupart des laboratoires qui font des analyses de sol pour les agriculteurs fournissent des formulaires de renseignements qui doivent être remplis pour chaque lieu de prélèvement des échantillons.

ANALYSES DE SOLS

Lorsqu'on a obtenu des échantillons représentatifs de sol et recueilli sur le terrain les renseignements nécessaires, la phase suivante, le diagnostic des sols salés, consiste à faire les analyses appropriées. Les méthodes d'analyse et d'enregistrement des résultats peuvent varier. Certains laboratoires font des analyses qui sont plus que suffisantes à certains égards, mais nettement insuffisantes à d'autres. D'autres laboratoires font des essais qui sont difficiles à interpréter en raison des méthodes utilisées ou de la façon dont les résultats sont indiqués.

Types d'analyses à entreprendre

Les sels solubles peuvent être dangereux en augmentant la concentration de sel en solution dans le sol ou en faisant adsorber par la surface des particules de sol une quantité excessive de sodium ou les deux à la fois. De fortes concentrations de sel dans la solution du sol retardent directement la croissance des plantes et des quantités excessives de sodium sur les particules de sol diminuent le taux d'absorption d'eau du sol et ne permettent pas un bon labourage. Les objectifs des analyses de sols sont donc d'obtenir une estimation du degré de concentration de la solution de sol et de déterminer s'il y a présence d'une quantité excessive de sodium adsorbé.

Il n'est pas pratique d'effectuer des mesures directes de la concentration de sel dans la solution du sol parce que le degré de concentration varie avec la teneur en eau du sol et parce qu'il est difficile de prélever des échantillons de solution du sol avec leur teneur en eau originale. Cependant, une partie de la solution dans un sol qui a été saturée avec de l'eau et mélangée pour former une pâte peut être enlevée facilement et la concentration en sel de cette solution sert d'indice exact pour évaluer la concentration pour une teneur en eau initiale. Dans la plupart des sols, la solution de la pâte saturée de sol représente à peu près la moitié de la concentration de la solution de sol peu après l'irrigation et le quart environ de la concentration de la solution du sol lorsque les plantes ont réduit la teneur en eau jusqu'au point de flétrissement permanent.

L'eau ne contenant pas de sel ne conduit pratiquement pas l'électricité, mais l'eau qui contient des sels dissous conduit une quantité

RENSEIGNEMENTS RECUEILLIS SUR LE TERRAIN
AU SUJET DU LIEU D'ÉCHANTILLONNAGE

Lieu Recueilli
N° 3 par : Dupont Date : 2/6/62

Emplacement : Ferme Durand

Description : Sol argileux, couche résistante à la charrue à 15 cm

Végétation : zone dénudée dans un champ de coton

Topographie : terrain plat; pente inférieure à 1%

Conditions de drainage : Nappe phréatique à 2 m 10

Origine et qualité de l'eau d'irrigation : Eau de la rivière conductivité électrique = 12 millimhos/cm
taux d'absorption de sodium = 3

Méthode d'irrigation : en rigoles

3. A) Feuille d'enregistrement des observations sur le lieu d'échantillonnage.

d'électricité qui est proportionnelle à la concentration totale de sels présents. La mesure de la conductivité électrique de la solution obtenue de pâte de sol fournit donc un bon indice du degré moyen de concentration de la solution de sol dans le champ. L'unité généralement employée pour indiquer la conductivité électrique des solutions est le millimhos par centimètre à 25 °C.

Lorsqu'il y a prédominance de sels de sodium, celui-ci remplace ou échange une partie du calcium ou du magnésium qui sont normalement adsorbés à la surface des particules de sol. Chaque sol a une capacité totale assez bien définie d'adsorption de ces sels. En général, l'adsorption de sodium est excessive lorsque plus de 15 % environ de la capacité d'échange (adsorption) est constituée par du sodium. Le

pourcentage de la capacité d'échange assurée par le sodium est généralement appelée le pourcentage de sodium échangeable. Ce pourcentage peut être estimé lorsqu'on connaît le degré de concentration en sodium et calcium plus magnésium de la solution prélevée dans la pâte de sol, ou bien il peut être déterminé avec plus d'exactitude au moyen de méthodes chimiques plus complexes. Pour établir un diagnostic, la méthode d'estimation est généralement suffisante.

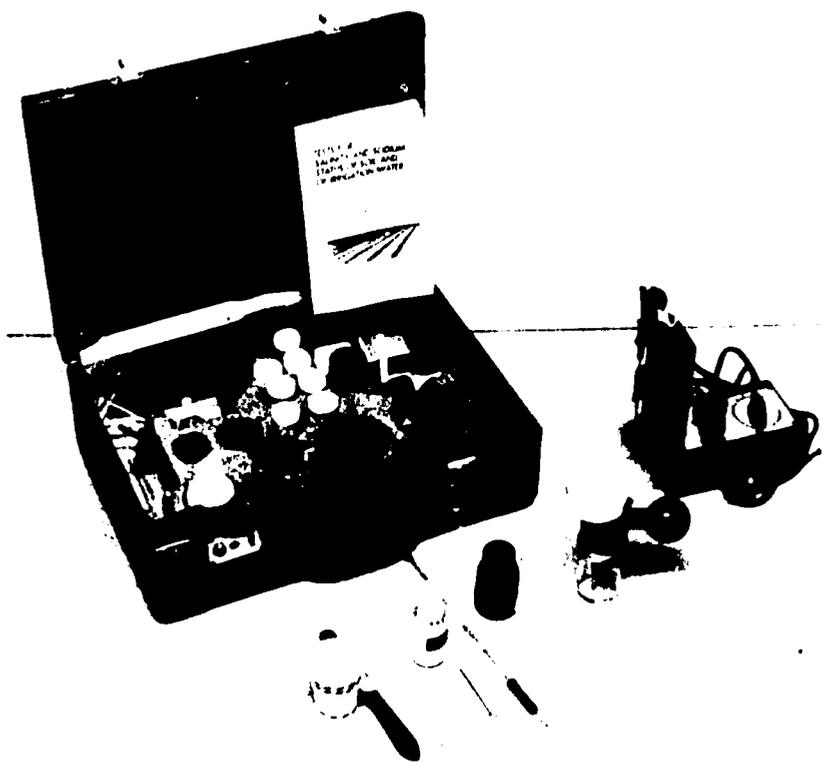
COMPTÉ RENDU D'ANALYSES DE SOL	
Lieu N°	Recueilli par : <u>Dupont</u> Date : <u>5/6/62</u>
Emplacement et profondeur d'échantillonnage :	<u>Ferme Durand</u> <u>0,15 cm</u>
Extrait saturé :	
Conductivité électrique :	<u>19,8</u> millimhos par centimètre à 25°
Sodium :	<u>138</u> milliéquivalents par litre
Calcium + magnésium :	<u>14,8</u> milliéquivalents par litre
Taux d'adsorption du sodium ($\text{Na}/\sqrt{\text{Ca} + \text{Mg}/2}$) :	<u>16,1</u>
Pourcentage estimé de sodium échangeable :	<u>18</u> .
Besoin en calcium soluble	<u>1,5</u> milliéquivalents par 100 gr.
Valeur du pH :	<u>7,6</u> Analyse de la chaux : présence/trace <input checked="" type="checkbox"/> absence <input type="checkbox"/>

4. Exemple d'un bon bulletin d'analyse de sol.

Si l'échantillon de sol contient un pourcentage excessif de sodium échangeable, il convient de faire des analyses supplémentaires pour déterminer la quantité et la nature de l'amendement chimique qui doit être appliqué pour enlever l'excès de sodium adsorbé. Les analyses supplémentaires nécessaires sont la détermination des besoins en calcium soluble, du pH et de la teneur en chaux. La quantité nécessaire de calcium soluble sert à estimer la quantité de calcium soluble qui doit être fournie par application d'un amendement chimique, alors que le pH et la teneur en chaux servent à déterminer le type d'amendement à appliquer.

Certains constituants des sels, notamment le sodium, le chlorure et le bore, peuvent être nettement toxiques pour les plantes. Un grand nombre d'arbres fruitiers accumulent des quantités excessives de sodium

et de chlorure et leurs feuilles présentent ensuite des symptômes de brûlure. Bien que de faibles quantités de bore soient indispensables à la croissance des plantes, des quantités plus fortes sont toxiques. Parfois, on trouve des sols qui contiennent des quantités toxiques de bore. Le Bulletin d'Information N° 211 du Département de l'Agriculture des Etats Unis, intitulé : Dégâts occasionnés aux plantes par le Bore, indique des méthodes pour diagnostiquer le degré de toxicité du bore. (Voir chapitre VII.)



5. *Trousse d'analyse pour diagnostiquer la salinité du sol.*

A qui s'adresser pour effectuer les analyses

La plupart des gouvernements des Etats possèdent des laboratoires d'analyse des sols, qui sont adjoints aux stations expérimentales agricoles ou qui relèvent des services de vulgarisation. Dans certaines régions, il existe des laboratoires commerciaux pour l'analyse des sols. En conséquence, les services d'analyse auxquels on devra recourir dépendent de la situation sur le plan local. De toute manière, avant de soumettre à l'analyse des échantillons de sol, il faut se renseigner pour savoir si le laboratoire peut effectuer le type d'analyses nécessaires.

Le Laboratoire de Salinité des Etats Unis n'analyse pas les échantillons de sols, excepté pour ses propres études ou celles qui sont conduites pour le compte d'autres organismes gouvernementaux. Les agriculteurs qui ont certaines connaissances en chimie et qui ont fréquemment à faire face à des problèmes de salinité peuvent vouloir faire eux-mêmes leurs propres essais. La Circulaire N° 982 du Département de l'Agriculture des Etats Unis, intitulée : Analyses pour déterminer le degré de salinité et la teneur en sodium du sol et de l'eau d'irrigation contient des directives pour réunir l'équipement nécessaire et pour faire des essais sur des échantillons de sol ainsi que sur l'eau d'irrigation. La trousse complète nécessaire pour effectuer les analyses décrites dans la circulaire N° 982 est également vendue dans le commerce.

INTERPRETATION DES ANALYSES DE SOL

Un compte rendu d'analyses satisfaisant pour le diagnostic des sols contenant du sel donnera des valeurs de la conductivité électrique de l'extrait saturé en millimhos par centimètre à 25 °C et pour le pourcentage de sodium échangeable. Si le pourcentage de sodium échangeable dépasse 10, la quantité de chaux soluble nécessaire exprimée en milliéquivalents par 100 grammes de sol peut aussi être indiquée, ainsi que le pH et des renseignements sur la teneur en chaux du sol.

Si la conductivité électrique de l'extrait saturé est égale ou inférieure à 4 millimhos par centimètre, on peut pratiquer toutes les cultures, sauf celles qui sont extrêmement sensibles au sel. Si la valeur de la conductivité électrique est comprise entre 4 et 8, on ne peut pratiquer que des cultures modérément tolérantes au sel et si la valeur est comprise entre 8 et 16, seules des cultures extrêmement tolérantes au sel sont possibles. Pratiquement, il n'est pas possible de faire la moindre culture sur un sol sans le lessiver préalablement pour enlever le sel en excédent si la conductivité électrique dépasse 16. Des renseignements sur la tolérance au sel de certaines cultures communes figurent aux chapitres III et V.

Le pourcentage de sodium échangeable indique la mesure dans laquelle le sodium adsorbé influence les propriétés physiques d'un sol. Les taux d'absorption de l'eau et la couche arable sont en général nettement modifiés lorsque les valeurs du pourcentage échangeable de sodium sont supérieures à 20 pour les sols sablonneux et supérieures à 10 pour les sols argileux. Un grand nombre d'arbres fruitiers sont particulièrement sensibles au sodium lorsque le pourcentage de sodium échangeable est égal ou inférieur à 5.

La quantité nécessaire de calcium soluble indique l'excès de sodium adsorbé par rapport au gypse qui pourrait se trouver naturellement dans le sol et elle est donc liée à la quantité d'amendement chimique nécessaire. Une faible quantité de sodium adsorbé n'est pas dangereuse et aucune application d'un amendement n'est généralement nécessaire si la teneur en calcium soluble dépasse 2 milliéquivalents par 100 grammes

de sol. Le gypse est un amendement qui convient à presque tous les sols qui contiennent un excès de sodium adsorbé, mais le soufre et l'acide sulfurique, en particulier s'il en faut de grosses quantités, ne doivent être appliqués que sur des sols contenant de la chaux. Sur des sols ayant un pH inférieur à 7 et ne contenant pas de chaux, l'application de chaux sera utile pour remplacer le sodium adsorbé.

Le chapitre X donne des renseignements complémentaires au sujet de l'emploi des amendements chimiques.

RÉSUMÉ

1. Le bon entretien et le traitement rationnel des sols salés dépendent de la connaissance exacte de la nature et de la gravité du problème.
2. L'observation visuelle des sols et de la pousse des plantes sur ceux-ci est rarement suffisante pour diagnostiquer dans de bonnes conditions un problème de salinité. La seule méthode sûre de diagnostic consiste à effectuer des analyses appropriées sur des échantillons représentatifs de sols.
3. La valeur des analyses de sol dépend de l'exactitude avec laquelle sont prélevés les échantillons représentatifs de l'état du champ.
4. Les échantillons de sol doivent être prélevés avec soin, à plusieurs profondeurs dans les endroits où le sol semble être salé et, aux fins de comparaison, également dans les endroits où le sol semble ne pas être salé.
5. Les échantillons de sol doivent être accompagnés de renseignements notés sur le terrain.
6. Les analyses de sol doivent indiquer la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de sol et le pourcentage de sodium échangeable.
7. Si le pourcentage de sodium échangeable dépasse 10, il est nécessaire de faire des analyses supplémentaires pour déterminer les besoins en calcium soluble, le pH et la teneur en chaux.
8. Les analyses de sol doivent être interprétées judicieusement, et il faut faire au maximum usage des renseignements recueillis sur le terrain.

CHAPITRE III

TOLÉRANCE AU SEL DES CULTURES DE LÉGUMES

par Léon BERNSTEIN

*Division de la Recherche sur la Conservation des sols et des eaux -
Service de Recherches agronomiques*

Le présent chapitre décrit :

- L'action de la salinité sur la croissance, le rendement et la qualité des cultures de légumes,
- Le degré de salinité que peuvent tolérer les différentes cultures de légumes,
- Les méthodes culturales qui réduisent les risques dûs au sel.

Que faut-il entendre par tolérance au sel ?

La tolérance au sel est le degré auquel une culture peut produire un bon rendement sur un sol salé.

La salinité du sol est une condition très répandue dans les zones arides et semi arides, et le long des côtes basses. Lorsqu'on pratique l'irrigation, une quantité excessive de sels solubles dans l'eau d'irrigation ou dans le sol peut créer un danger de salinité. Le degré de salinité peut être faible au point de n'affecter que les cultures les plus sensibles, ou si élevé qu'il est possible de ne pratiquer que de rares cultures ou même aucune. La tolérance à la salinité des différentes cultures varie considérablement. Il est donc souvent utile d'avoir des renseignements sur la tolérance au sel pour décider du type de culture à pratiquer dans les conditions présentes.

Action du sel sur la croissance des légumes

Le sel agit sur la croissance des légumes essentiellement en diminuant la quantité d'eau qu'ils peuvent absorber. Dans certains cas, la salinité agit aussi sur la nutrition.

L'eau du sol contient toujours des sels dissous. Certains de ces

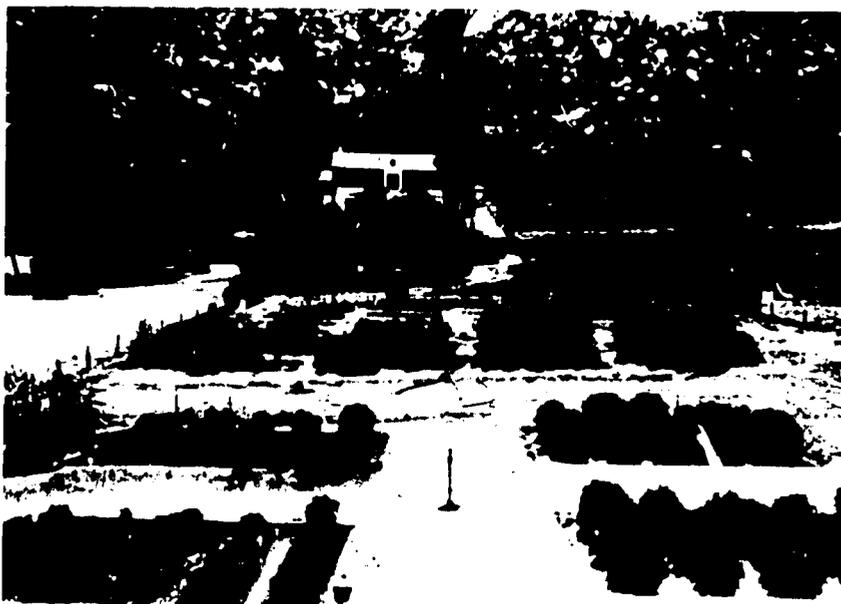
sels fournissent les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des plantes. Une concentration excessive de sel tend cependant à empêcher que l'humidité du sol soit aussi facilement absorbée par les racines des plantes. Même si un sol salin est maintenu constamment en état d'humidité, la disponibilité limitée de l'eau à l'usage des plantes provoque leur rabougrissement. Plus la solution de sol est salée, moins l'eau du sol est absorbable et plus les plantes sont rabougries. Un grand nombre de légumes qui redoutent le sel, en particulier les crucifères (chou, brocoli, chou-fleur et plantes similaires), ont des feuilles plus petites, d'une couleur bleu-verdâtre et un feuillage d'aspect cireux, au lieu d'avoir un feuillage vert clair comme les plantes normales. Si la salinité est extrêmement élevée pour la culture, les brûlures progressives des vieilles feuilles peuvent entraîner la mort des plantes. Ces effets du sel sont très similaires à ceux de la sécheresse. Cependant, la salinité et la sécheresse diffèrent sous un aspect important. Alors que les plantes affectées par la sécheresse présentent des caractéristiques symptomatiques de flétrissement lorsque la sécheresse devient rigoureuse, les plantes attaquées par le sel ne se flétrissent pas, en général. La quantité limitée d'eau disponible dans les sols salins est absorbée plus progressivement par la plante, de sorte qu'à la suite d'une période d'humidité abondante, il ne se produit pas de grave carence d'humidité ni de flétrissement.

Les sels solubles que l'on trouve généralement dans les sols salés comprennent non seulement le sodium et le chlorure, éléments constitutifs du sel de cuisine ordinaire, mais aussi du calcium, du magnésium, du sulfate, du bicarbonate et parfois même d'autres sels. Outre l'action de tous les sels solubles sur la quantité d'eau qui peut être absorbée par les plantes, certains éléments constitutifs des sels peuvent entraver la nutrition normale de certaines cultures. Un excès de sulfate réduit généralement l'absorption du calcium par les plantes et certaines variétés de laitues présentent souvent des symptômes de déficience de calcium lorsque la quantité de sulfate contenue dans le sol est trop élevée. Une quantité excessive de calcium restreint parfois l'absorption de potassium, ce qui peut réduire les rendements en haricots et carottes. Ces effets sur la nutrition, combinés à l'effet qu'ils ont sur l'absorption de l'humidité peuvent diminuer davantage encore le rendement. Sur la plupart des légumes, l'effet sur l'humidité prédomine nettement et les effets sur la nutrition sont soit absents ou n'ont qu'une importance tout à fait secondaire.

Les effets du sodium sur la croissance des plantes sont compliqués. Une quantité excessive de sodium dans le sol (forts pourcentages de sodium échangeable) freine fréquemment la croissance des plantes, en raison d'un état physique défavorable, comme une infiltration insuffisante, une mauvaise aération, et la formation de croûtes. La plupart des légumes semblent être au moins modérément tolérants au sodium échangeable et les facteurs physiques défavorables limitent généralement la croissance sur les sols sodiques. Les haricots, cependant, sont sensibles aux facteurs de nutrition dans les sols sodiques et peuvent être grave-

ment atteints, même avant que l'état physique du sol ne soit sérieusement dégradé.

Le bore, qui est un élément indispensable à la croissance des plantes, se présente parfois en excès dans les sols salins et produit des effets toxiques. La toxicité du bore et les limites de tolérance au bore sont décrites au chapitre VII. Des quantités excessives d'ions de bicarbonate produisent une chlorose caractéristique des plantes. Cette situation n'est pas rare.



Parcelles de sol pour l'étude de la tolérance au sel de légumes au Laboratoire de salinité de Riverside (Californie). On peut voir, au premier plan, 5 variétés de poivrons sur quatre parcelles dont les niveaux de salinité sont spécialement mesurés.

Action du sel sur le rendement et la qualité des légumes

Le sel diminue généralement le rendement et affecte la qualité des légumes, mais il peut aussi avoir certains effets favorables.

En raison du rabougrissement des plantes provoqué par la salinité, la plupart des légumes produits sur des sols salins ne sont pas de pre-

mière qualité. Les rendements de cultures, comme les tomates et les poivrons, diminuent en partie en raison du nombre réduit de fruits par plant, mais aussi par suite d'une diminution sensible de la dimension des fruits. La dimension diminue généralement en proportion des fruits non consommables et augmente généralement lorsque le rabougrissement s'aggrave. Comme toutes les parties de la plante sont rabougries, les racines, les feuilles ou les hampes florales, et autres parties de la plante qui sont récoltées, présentent toutes des diminutions caractéristiques de leurs dimensions. Le maïs doux fait exception en ce sens que la dimension des épis n'est pas modifiée à un niveau modéré de salinité, bien que le nombre d'épis commercialisables par plante diminue sensiblement.

La salinité, en freinant la croissance, peut avoir des effets favorables sur certains légumes. Elle peut augmenter la teneur en sucre dans certains légumes, tels que les carottes, mais ce gain de qualité est plus que compensé par une diminution du rendement. Les choux des champs salés sont généralement plus résistants que ceux des champs non salés, mais de même la diminution des rendements compense cet effet favorable. On considère généralement que les engrais à base de chlorure diminuent la quantité de fécula dans les pommes de terre, et les rend plus aqueuses. Mais, sur les sols salins à forte teneur en chlorure, la diminution de la quantité d'eau disponible combat cet effet, de sorte que les tubercules produits ont une teneur normale en fécula. La salinité active la maturation des pommes de terre bien que les tubercules soient plus petits. En revanche, la salinité retarde la floraison et, par conséquent la maturation du maïs doux. Ainsi les effets de la salinité sur la qualité des cultures sont variables, sauf en ce qui concerne la diminution caractéristique de la dimension.

Degré de salinité que les légumes peuvent supporter

Certains légumes peuvent ne tolérer que 2 millimhos ; d'autres tolèrent jusqu'à 8 millimhos ou davantage.

Les dégâts occasionnés par le sel augmentent lorsque la salinité s'accroît. Les limites de tolérance au sel pour la plupart des cultures peuvent être indiquées seulement si l'on peut tolérer une légère diminution du rendement. Le tableau de tolérance au sel groupe les légumes en trois catégories : tolérants, modérément tolérants et sensibles. Dans chaque catégorie, les plantes sont classées par ordre décroissant de tolérance au sel. Cependant, une différence de une ou deux places dans la liste n'a généralement pas d'importance. Les valeurs de salinité auxquelles on peut s'attendre à de faibles pertes de rendement sont indiquées en haut et en bas de chaque colonne. Ces valeurs de salinité sont exprimées en conductivité électrique d'extrait saturé de sol, mesure qui concorde bien avec la quantité d'eau disponible dans les sols salins.



L'augmentation de la salinité (de gauche à droite) réduit progressivement la croissance des légumes. Les épinards (en haut) sont résistants, les choux (au milieu) sont modérément tolérants et les oignons (en bas) sont relativement sensibles.

Le climat exerce une influence sur la tolérance au sel de certaines cultures. Par exemple, les oignons sont beaucoup plus atteints dans les régions chaudes et sèches que dans les régions plus fraîches et plus humides. Le climat a beaucoup moins d'influence sur les betteraves potagères. Le tableau de tolérance au sel est fondé sur la réaction des plantes pendant la saison normale de production de ces cultures dans les régions irriguées. La classification suppose aussi que les conditions de culture sont normales pour chaque plante, au lieu d'être identiques pour toutes les plantes. Ainsi, les pommes de terre sont normalement irriguées plus fréquemment que les autres plantes énumérées et il est tenu compte

de ce fait pour juger de la tolérance au sel des pommes de terre. On suppose que dans tous les cas la quantité d'engrais est suffisante.

TABLEAU I
Tolérance au sel des légumes

Tolérant	Modérément tolérant	Sensible
8 millimhos ¹	5 millimhos ¹	3 millimhos ¹
betteraves potagères choux asperges épinards	tomates broccoli choux chou-fleur laitue maïs doux pomme de terre (White rose) patates douces et ignames poivrons carottes oignons pois aubergines concombres	radis céleri haricots verts
5 millimhos ¹	3 millimhos ¹	2 millimhos ¹

1. Niveaux de salinité (conductivité électrique de l'extrait saturé) auxquels on peut s'attendre à une nette, mais faible, réduction du rendement. Dans les sols contenant du gypse, on observera des effets correspondants pour des conductivités de 2 millimhos plus élevées. Par exemple, sur des sols contenant du gypse, la limite serait de 10 à 7 millimhos au lieu de 8 à 5.

Comment réduire les risques d'une salinité excessive ?

- Il faut assurer un drainage suffisant*
- Choisir des cultures tolérantes*
- Utiliser des méthodes appropriées de plantation*
- Irriguer en quantités suffisantes*

La plupart des légumes sont cultivés en ligne et l'irrigation se fait généralement dans les sillons. Cette pratique soulève des difficultés particulières pendant la germination, car le sel peut être entraîné à la partie supérieure de la couche et se concentrer dans la rangée où se trouvent les semences. Ce phénomène a souvent été responsable de l'échec partiel ou complet de certaines cultures. L'accumulation de sel est beaucoup plus grande au centre de la couche que près des bords ;

des couches à double rangée sont donc moins atteintes que les couches à une seule rangée. Lorsqu'on incline les couches de semis, la couche où se trouvent les semences est très au-dessous de la zone d'accumulation, de sorte que l'irrigation peut effectivement entraîner le sel de la rangée où sont les semences au lieu d'y apporter du sel. Lorsque le sol est salin, une modification des méthodes de plantation et d'irrigation peut assurer le succès au lieu de l'échec.

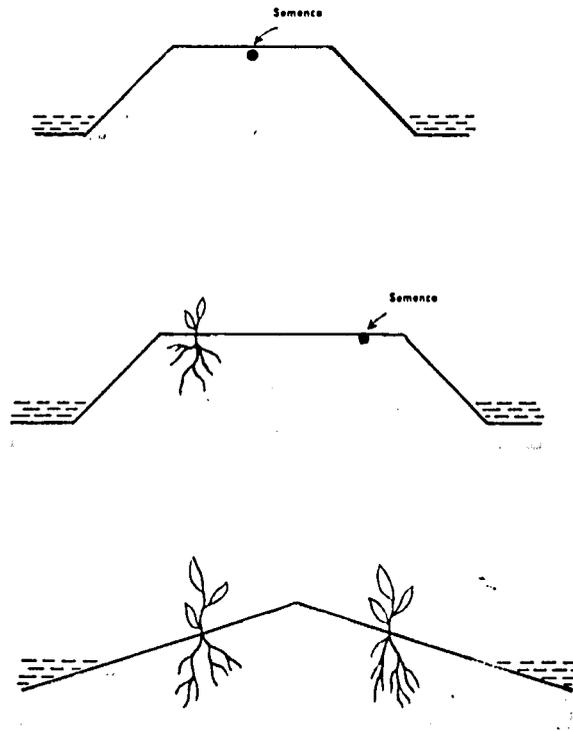
La salinité est particulièrement nuisible aux plants repiqués. En raison de la taille des racines qu'on ne peut éviter, les sujets repiqués éprouvent toujours plus de difficultés que les autres à absorber de l'eau. La quantité d'eau limitée des sols salins doit donc être considérée comme leur étant particulièrement nuisible. Chaque fois que possible, il faut éviter de repiquer des plants dans des sols salins. Le repiquage dans des sols salins est particulièrement nuisible pour les cultures pratiquées par temps chaud, comme celles de la patate douce.

Comme la réaction des plantes à la salinité dépend du degré de concentration du sel dans la solution de sol, l'irrigation doit être organisée de manière à éviter une concentration excessive de sel. Les plantes absorbent de l'eau dans le sol mais laissent la majeure partie du sel. Il en résulte une forte concentration de sel lorsque l'eau est absorbée et que l'évaporation se fait. Les effets nuisibles des solutions de sel salin peuvent généralement être fortement diminués par l'irrigation, au point d'empêcher une concentration excessive de la solution contenue dans le sol. En outre, pour éviter un accroissement du niveau de salinité avec chaque irrigation, il faut appliquer une quantité suffisante d'eau afin que l'excès d'eau entraîne le sel au-delà de la zone des racines. Un bon drainage est indispensable.

L'irrigation dans les sillons peut provoquer à certains moments une accumulation de sel dans la partie supérieure de la couche et la quantité de sel sera alors de 10 à 50 fois plus élevée que dans le sillon. Normalement, les racines des plantes ne se développent pas dans cette zone fortement salée, mais elles poussent dans le sol moins salin placé sous le sillon. A la suite de l'établissement de cette structure de la répartition du sel dans l'irrigation, les pluies peuvent modifier la distribution du sel et endommager gravement la culture. Pour éviter des dégâts dans ce cas, le champ doit être irrigué rapidement pour lessiver le sel au-delà des racines.

On pratique de plus en plus l'irrigation par aspersion. Ceci empêche l'accumulation de sel dans la couche. Le champ peut recevoir une quantité suffisante d'eau qui empêche les sels de s'accumuler dans la zone des racines. Ceci est particulièrement important car on a tendance à appliquer une quantité minimale d'eau par aspersion. Les études qui ont été faites indiquent que l'application d'eau saline directement sur le feuillage des légumes a des effets nuisibles insignifiants ou nuls. De même que pour les plantes irriguées par le sillon, le facteur qui contribue à restreindre la salinité dans les cultures de légumes irriguées par aspersion semble être le niveau de salinité dans la zone des racines.

Parfois il n'est pas possible de réduire la salinité au-dessous d'un certain niveau, en particulier lorsque l'eau saline est la seule source disponible d'eau d'irrigation. Le choix de cultures suffisamment tolérantes pour obtenir de bons rendements est nécessaire dans ces conditions.



Diagrammes indiquant les régions où s'accumule le sel dans les couches surélevées lorsqu'on emploie différentes pratiques culturales.

CHAPITRE IV

TOLÉRANCE AU SEL DES CULTURES DE PLEIN CHAMP

par Léon BERNSTEIN

*Service de Recherche de la Conservation des sols et des eaux
Service de recherches agronomiques*

Le présent chapitre :

- explique comment la salinité du sol peut affecter les cultures de plein champ ;
- fournit des renseignements sur la tolérance au sel de certaines cultures ;
- indique comment aménager les cultures sur des sols salés.

Que faut-il entendre par tolérance au sel et comment peut-elle être mesurée ?

On entend par tolérance au sel l'aptitude à tolérer de fortes concentrations de sels solubles dans la zone des racines. Elle est généralement exprimée par le degré de salinité qui entraîne un certain fléchissement du rendement.

Les sels solubles, qui se trouvent normalement dans tous les sols fournissent une grande partie des éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes. Cependant, un excès de sel peut gravement endommager les plantes. Dans les régions humides, la pluie tend à lessiver les sels du sol qui ainsi ne s'accumulent que rarement au point de devenir dangereux. Dans les régions arides cependant, les pluies sont si rares que les sels éliminés des roches par un processus normal de formation des sols et ceux qui sont apportés par les eaux d'irrigation, par les engrais et par tout autre moyen, peuvent contribuer à rendre le sol dangereux pour les plantes. Certaines plantes sont si sensibles aux sels solubles que le fait de doubler ou de tripler la concentration de sel dans des sols non salins peut gravement endommager les cultures.

D'autres plantes peuvent tolérer jusqu'à 10 fois plus de sel sans en souffrir ou à peine. Les renseignements sur la tolérance au sel des plantes sont importants pour le diagnostic des dégâts imputés au sel dans les champs, pour le choix des cultures tolérantes sur les terres salines et pour déterminer les besoins en irrigation et drainage ainsi que les pratiques culturales à effectuer sur les sols salés.

Des analyses simples ont été mises au point pour mesurer la salinité du sol ⁽¹⁾. Ces analyses tiennent compte non seulement de la teneur en sels solubles, mais aussi de la capacité de rétention de l'eau des sols. Ces deux éléments sont importants pour déterminer la concentration de sel dans l'eau du sol.

Les sols salins contiennent généralement un mélange de constituants de sels tels que le calcium, le sodium, le chlorure, le sulfate et le bicarbonate. Etant donné que les diverses combinaisons de sels que l'on trouve normalement dans les sols salins attaquent à peu près dans les mêmes proportions la plupart des plantes de grande culture, il suffit généralement de mesurer la teneur totale en sel. Il est facile de le faire en mesurant la conductivité électrique d'un extrait de pâte de sol saturé. La conductivité électrique est étroitement liée à la pression osmotique de la solution, qui détermine dans quelle mesure les racines des plantes peuvent absorber l'eau du sol. La salinité du sol est donc généralement exprimée par la conductivité électrique d'extrait saturé du sol (EC) en millimhos par centimètre.

Les sols qui ont une forte teneur en sodium échangeable (sols sodiques) présentent des difficultés particulières. L'appropriation des sols sodiques et la tolérance des cultures au sodium échangeable sont étudiées aux chapitres X et VI.

Bien que le bore soit un élément indispensable à la croissance des plantes, une teneur excessive en bore est extrêmement dangereuse. La tolérance au bore des plantes est décrite au chapitre VII. Une quantité excessive de bicarbonate provoque la chlorose d'un grand nombre de plantes de grande culture, qui ressemble à celle qui est provoquée par la chaux. Il est rare que la teneur en bicarbonate soit élevée au point d'être toxique.

Action de la salinité sur le rendement et la qualité des cultures de plein champ

La salinité donne des peuplements médiocres, des plantes rabougries et elle provoque une diminution du rendement. Elle a des effets variables sur la qualité des cultures.

La salinité d'un champ varie considérablement. Les taches salines qui ne supportent aucune végétation peuvent entraver la croissance des

(1) Richards L.A., Bower C.A. et Fireman, Milton. Tests for Salinity and Sodium Status of Soil and of Irrigation Water (Essais pour déterminer la salinité du sol et sa teneur en sodium ainsi que celle de l'eau d'irrigation). Circulaire 982 du Département de l'Agriculture des Etats-Unis.

plantes dans les zones non salées. Les peuplements clairsemés et les taches sans végétation sont donc un indice fréquent de salinité.

Bien qu'il soit possible d'obtenir des peuplements normaux lorsque la salinité est faible ou modérée, la croissance des plantes est généralement freinée. Un rabougrissement modéré réduit le rendement des cultures, comme celles de maïs et de haricots, mais il peut avoir des effets insignifiants ou nuls sur les rendements d'autres cultures. L'orge et, à un moindre degré, le coton, peuvent être sensiblement rabougris par la salinité et donner cependant des rendements normaux en grains et graines de coton. Cependant, le riz, qui n'est que légèrement rabougri, peut ne produire que 10 ou 20 % du rendement normal en grains pour un niveau de salinité moyen. Les plantes rabougries ont généralement des feuilles plus petites, d'une couleur verte plus foncée que les plantes normales et ressemblent beaucoup à des plantes souffrant de la sécheresse. Cependant, les plantes rabougries par le sel fanent rarement.

Outre la réduction des rendements, la salinité amoindrit la qualité de certaines plantes. Le pourcentage en sucre des variétés de sorgho augmente généralement lorsque la croissance est entravée par un niveau de salinité faible ou moyen et elle diminue lorsque la croissance est fortement freinée par un niveau de salinité élevé. L'accumulation de sel dans la betterave à sucre complique le processus de raffinage du sucre.

Même avec une diminution de 50 % des rendements, la salinité a peu d'effet sur la qualité des graines de coton. Le pourcentage de fibres tend à augmenter un peu avec une augmentation de la salinité, tandis que l'indice des graines et la longueur des fibres, leur résistance et leur maturité tendent à diminuer. La salinité a peu d'effet sur l'indice des fibres, sur les semences mortes et la finesse ainsi que l'élongation des fibres.

La tolérance au sel se modifie-t-elle lorsque la plante mûrit ?

Certaines plantes sont particulièrement sensibles pendant les premiers stades de leur croissance.

Les betteraves à sucre sont réputées pour leur tolérance au sel, mais elles ne sont guère plus tolérantes à la salinité pendant la germination que les haricots de plein champ. Il est donc très important de réduire la salinité pendant la germination des betteraves à sucre. Lorsque les jeunes plants sont bien enracinés, ils peuvent tolérer une forte concentration de sel.

Le riz est assez tolérant au sel pendant la germination, mais les jeunes plants sont très sensibles au sel. Un niveau modéré de salinité de 4 à 8 millimhos dans l'humidité du sol peut permettre une germination normale, mais entraînera une forte mortalité des jeunes plants.

L'orge est fortement tolérante au sel pendant la germination et lorsqu'elle atteint une certaine hauteur. Les jeunes plants ne peuvent cependant pas tolérer plus de 5 ou 6 millimhos (EC). Les jeunes plants

de *Sesbania* sont également sensibles au sel : environ 4 millimhos (EC) leur sont nuisibles tandis que les plantes plus âgées ne souffrent pas d'une salinité allant jusqu'à 8 millimhos.

Pour autant qu'on le sache, la tolérance des autres cultures de plein champ est essentiellement la même pendant tous les stades de la croissance. Cependant, le sel s'accumule fréquemment en fortes quantités dans la couche superficielle de sol lorsque l'eau s'évapore. Ceci est particulièrement vrai pour les cultures irriguées par des rigoles. Les semences peuvent donc être exposées à des concentrations de sel plusieurs fois supérieures à celles qui existent dans les couches plus profondes. Pour cette raison, les cultures peuvent sembler moins tolérantes pendant la germination que pendant les stades ultérieurs de croissance.

Degré de salinité que les diverses cultures de plein champ peuvent tolérer

Certaines cultures sont affectées par une très faible salinité, d'autres tolèrent jusqu'à 10 fois plus de sel.

L'inhibition de la croissance et les pertes de rendements sont généralement plus graves au fur et à mesure que la salinité augmente. Il n'est donc pas possible d'indiquer un seuil de sécurité, sauf pour les cultures très résistantes, comme la betterave à sucre, l'orge et le coton. Ces plantes donnent des rendements normaux jusqu'à un niveau de salinité assez élevé : jusqu'à 6 ou 8 millimhos pour le coton et 12 millimhos pour la betterave à sucre et l'orge.

Pour les cultures plus sensibles, on peut indiquer des niveaux de salinité auxquels les rendements diminueront de moins de 10 ou 15 %.



Etude de parcelles de la tolérance au sel du coton et du maïs au Laboratoire de salinité des Etats-Unis, Riverside, Californie.

Dans le Tableau I, les cultures de plein champ sont divisées en groupes : tolérant, modérément tolérant et sensible et, dans chaque groupe, les plantes sont énumérées par ordre de tolérance décroissante. Des différences d'une ou deux places dans la liste peuvent ne pas avoir beaucoup d'importance. Les valeurs de conductivité figurant en haut et en bas de chaque colonne indiquent pour chaque groupe de plantes l'écart de salinité auquel on peut s'attendre à de faibles diminutions de rendement. On suppose que pour chaque plante les conditions de culture sont normales et la fertilité suffisante.

Les facteurs climatiques peuvent exercer une certaine influence sur la tolérance au sel, en particulier si les cultures sont pratiquées en dehors de leur zone d'élection.

Différentes variétés de plantes peuvent avoir une tolérance variable à la salinité. Ceci est vrai pour les variétés d'orge, aussi bien pendant la germination que pendant les stades ultérieurs de croissance. Le California Mariout est très tolérant, tandis que le Chevron résiste moins bien au sel que d'autres variétés pendant les stades ultérieurs de croissance. Toutes les variétés de coton à fibres courtes qui ont été expérimentées ont à peu près la même tolérance au sel sauf le Hopi-Acala 46-124 et l'Arizona 124-68 qui ont tendance à tolérer des salinités élevées (de l'ordre de 10 à 15 millimhos) alors qu'il n'en est pas de même pour Acala 4-42. Toutes les variétés de sorgho qui ont été essayées ont la même tolérance au sel.

TABLEAU I
Tolérance au sel des plantes de grande culture

Tolérantes	Modérément tolérantes	Sensibles
12 millimhos ¹	8 millimhos ¹	2 millimhos ¹
orge (grains) ² betterave à sucre ² colza coton (à fibres courtes)	seigle (grains) blé (grains) avoine (grains) sorgho (grains) sorgho (sucre) soja sesbania ² fève maïs riz ² lin tournesol ricin	haricots de plein champ
8 millimhos ¹	4 millimhos ¹	

1. Conductivité électrique de l'extrait saturé de sol (EC) à laquelle on peut s'attendre à des pertes de rendement. Pour les sols contenant du gypse, il faut ajouter 2 millimhos à ces chiffres.

2. Cf. Passage relatif à la tolérance de l'orge, de la betterave à sucre, de la sesbania et du riz aux stades de la germination et de la levée des semis.

Traitement des terres salées pour minimiser les dégâts occasionnés aux cultures par le sel

Les dégâts occasionnés par le sel peuvent être minimisés par les moyens suivants :

1. *Un drainage suffisant.*
2. *Un bon nivellement.*
3. *L'utilisation de pratiques culturales appropriées.*
4. *L'irrigation fréquente en quantité suffisante.*
5. *Le choix de plantes suffisamment tolérantes.*

Un bon drainage est indispensable au maintien de l'équilibre des sels. Une partie de l'eau appliquée à un champ doit traverser la zone des racines et être éliminée par drainage naturel ou artificiel de façon à empêcher le sel de s'accumuler sur le sol au point de devenir dangereux. Plus l'eau appliquée est saline et plus la culture est sensible au sel, plus il faut pratiquer le drainage ou le lessivage du sol.

Pour assurer une pénétration uniforme de l'eau, il faut niveler soigneusement la terre. Le sel s'accumule dans les parties élevées qui finalement peuvent ne plus porter de végétation.

La concentration de sel dans la rangée des semences des cultures en ligne irriguées par rigoles entraîne souvent un échec partiel ou total du peuplement. Les couches à double rangée, avec des côtés inclinés et d'autres techniques diminuent l'accumulation de sel autour des semences. L'accumulation de sel est beaucoup plus forte dans le centre de la couche que sur les bords. En conséquence, le sel n'influe pas autant sur les couches à double rangée que sur celles à une seule rangée. En inclinant les couches de semis, la rangée de semences se trouve bien au-dessous de la zone d'accumulation du sel, de sorte que l'irrigation peut effectivement enlever le sel de la rangée de semences. Des petites rigoles d'irrigation creusées près de la rangée des semences peuvent aussi enlever le sel.

Les racines des plantes absorbent l'eau contenue dans le sol et laissent la plupart des sels. Lorsque l'eau est absorbée et évaporée, la partie de la solution du sol qui reste devient progressivement de plus en plus salée. Le fait de pratiquer l'irrigation en temps opportun pour éviter une concentration dangereuse de sel minimise les effets nocifs de la salinité du sol. Les racines des plantes ne peuvent pas épuiser l'humidité du sol d'un sol salin dans les mêmes proportions que lorsqu'il s'agit d'un sol non salin. Les sols salins ont donc besoin d'être plus fortement irrigués que les sols non salins du même type.

Une bonne irrigation est indispensable pour que les sels ajoutés à chaque irrigation soient entraînés à travers les couches de terrain et finalement éliminés de la zone des racines. Le fait de ne pas donner de l'eau plus qu'il n'en faut pour l'utilisation des plantes et l'évaporation entraîne une accumulation progressive de sel dans la zone des racines.

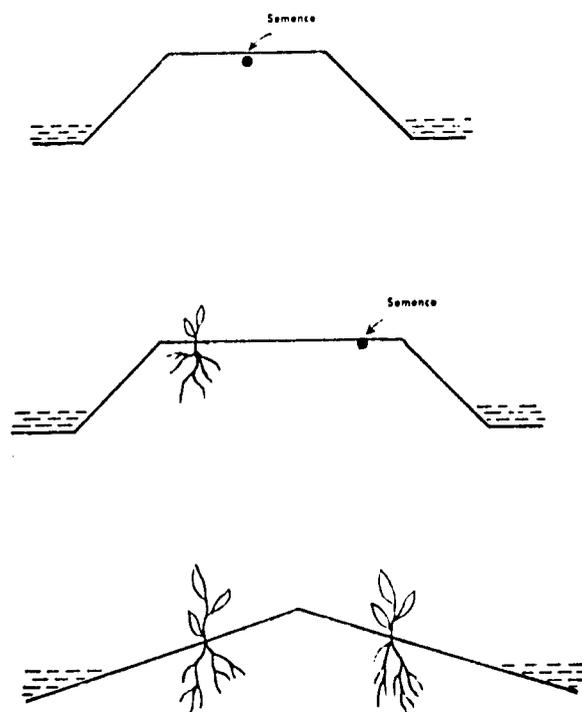
Il est parfois impossible ou difficile d'empêcher la salinité du sol.

L'eau d'irrigation peut contenir suffisamment de sel pour occasionner des problèmes de salinité. Dans ce cas, il ne faut pas pratiquer des cultures très sensibles comme les haricots de plein champ, mais seulement les plantes qui peuvent tolérer la salinité existante.

Bien que le riz soit relativement sensible au sel, sa culture favorise l'enlèvement rapide des sels des couches superficielles de sol qui constituent la zone peu profonde des racines du riz. Si l'eau d'irrigation est de bonne qualité, on peut cultiver le riz sur des sols initialement fortement salés.

Faits à retenir :

1. Toutes les cultures n'ont pas la même tolérance au sel.
2. Certaines cultures sont particulièrement sensibles pendant les premiers stades de leur croissance.
3. Une bonne irrigation et un drainage satisfaisant, l'emploi de pratiques culturales appropriées et l'utilisation de cultures tolérantes au sel réduisent les dégâts occasionnés par celui-ci.



Diagrammes indiquant les zones où s'accumule le sel dans les couches élevées lorsqu'on emploie différentes pratiques culturales.

CHAPITRE V

TOLÉRANCE AU SEL DES GRAMINÉES ET DES LÉGUMINEUSES FOURRAGÈRES

par LÉON BERNSTEIN

*Division de la Recherche du Service de la Conservation
des Sols et des Eaux,
Service de recherche agronomique*

Le présent bulletin :

1. **Donne des réenseignements sur la tolérance au sel des graminées et légumineuses fourragères en vue de faciliter le choix des cultures convenant aux terres salines,**
2. **Explique comment la salinité agit sur la croissance des plantes fourragères,**
3. **Indique comment des méthodes améliorées de culture du sol peuvent compenser en partie les effets défavorables de la salinité.**

Que faut-il entendre par tolérance au sel ?

C'est le degré auquel une culture peut donner un rendement satisfaisant sur un sol salé.

La salinité du sol est un état qui se rencontre fréquemment dans les régions arides et semi arides. Le degré de salinité varie d'une faible quantité qui permet de pratiquer la plupart des cultures à une quantité si élevée qu'aucune culture ne peut être pratiquée. Cependant, certaines plantes peuvent tolérer beaucoup plus de sel que d'autres. Il est important en conséquence de connaître la résistance au sel des différentes plantes et variétés, afin de ne cultiver que celles qui donneront les meilleurs rendements possibles sur des sols salés.

Lorsqu'on choisit une culture pour une terre saline, il faut tenir compte de facteurs autres que la tolérance au sel. L'adaptation aux conditions climatiques est toujours un facteur critique et, pour culture à sec, la résistance à la sécheresse peut jouer un rôle important.



Parcelles d'essai pour étudier la tolérance au sel des herbes et légumineuses fourragères. Les légumineuses sur des parcelles modérément salées cessent de croître ou dépérissent, tandis que celles plantées sur les parcelles non salées croissent vigoureusement.

Pourquoi les cultures fourragères sont-elles importantes pour les terres salines ?

Les cultures fourragères peuvent être des cultures d'un prix de revient peu élevé destinées aux terres marginales.

Elles peuvent améliorer la structure du sol des terres asséchées.

Elles peuvent produire de bons rendements en fourrage ou en graines sur des sols salés, à condition de planter des espèces résistantes au sel.

Il y a parfois une limite précise à l'amélioration des terres salines. C'est le cas lorsqu'il faut utiliser de l'eau d'irrigation salée ou lorsque, pour une raison ou une autre, le drainage ne peut pas être suffisamment amélioré pour empêcher une certaine accumulation de sel dans le sol. Dans ces conditions, l'agriculteur doit cultiver ses terres salées aussi bien qu'il le peut. Il est évident que des cultures à faible prix de revient qui nécessitent des dépenses minimales pour la préparation du sol, les engrais, les semences, la destruction des mauvaises herbes, seront les

plus intéressantes, étant donné que les risques de perte seront réduits au minimum. Les cultures fourragères répondent bien souvent à ces exigences.

Lorsqu'on enlève le sel par lessivage, le sol peut avoir tendance tout d'abord à se tasser et à absorber l'eau lentement. Il est nécessaire de rétablir la structure du sol sur les terres dessalées avant de pouvoir y faire des cultures dans des conditions satisfaisantes. Les racines fibreuses des graminées contribuent tout particulièrement à rendre au sol une consistance satisfaisante. Les graminées sont fréquemment utilisées seules ou en combinaison avec des légumineuses fourragères, comme première culture après le lessivage et avant la plantation de cultures en ligne ou l'établissement de vergers.

Étant donné que quelques-unes des graminées sont très résistantes au sel, elles peuvent être utilisées comme cultures fourragères sur des terres tellement salées que peu d'autres cultures peuvent y prospérer. En outre, la couverture fournie par les cultures fourragères peut contribuer à réduire les pertes de sol par érosion éolienne ou par les eaux.

Action du sel sur la croissance des plantes fourragères

Le sel a pour premier effet de diminuer la quantité d'eau disponible.

L'effet principal de la salinité du sol sur les cultures fourragères est de rendre difficile aux racines l'absorption de l'eau. Plus le sol est salé, moins il contiendra d'eau facilement absorbable. Par leur aspect, les graminées et les légumineuses fourragères cultivées sur sol salé ressemblent beaucoup aux plantes poussant sur une terre desséchée. Elles sont rabougries et ont peu de feuilles qui, généralement, ont une couleur bleue-verte, plutôt que le vert brillant des plantes qui disposent d'une quantité suffisante d'eau. Bien entendu, si l'eau du sol est trop salée, les plantes finiront par devenir marron et par mourir. C'est généralement la conséquence d'une insuffisance extrême en eau plutôt que d'un effet toxique de la salinité.

La salinité peut aussi agir sur la nutrition des plantes. Le dactyle pelotonné, par exemple, souffre lorsqu'il y a prédominance de sel de calcium dans un sol salin. La tolérance au sodium varie aussi selon les espèces. La plupart des graminées et des légumineuses fourragères semblent être suffisamment tolérantes au sodium. Le mauvais état physique des sols sodiques peut être le principal responsable de l'échec des cultures. Les sols qui ont une forte teneur en sodium absorbent généralement l'eau très lentement et deviennent durs, avec une croûte superficielle lorsqu'ils sont secs. D'une manière générale, les sols doivent être appropriés avant qu'on puisse y pratiquer une culture quelconque. On dispose de renseignements spéciaux pour diagnostiquer et améliorer les sols imprégnés de sodium.

Pour vérifier la salinité du sol dans le cas des cultures fourragères,

il n'est pas nécessaire d'analyser la teneur du sol en différents sels. Une mesure de la salinité totale est généralement suffisante. On prépare un extrait de sol saturé d'eau et on recherche dans quelle mesure il peut laisser passer un courant électrique. Cette mesure de la conductivité électrique donne une idée juste de la salinité du sol et elle est liée à la disponibilité en eau du sol dans un champ. La salinité est généralement indiquée en millimhos. La réaction des cultures en fonction des différents degrés de salinité est indiquée ci-dessous :

<i>Gamme de salinité en millimhos</i>	<i>Réaction des cultures</i>
0 à 2	Les effets de la salinité sont pratiquement négligeables
2 à 4	Les rendements des cultures très sensibles peuvent être réduits
4 à 8	Les rendements de la plupart des cultures sont réduits
8 à 16	Seules les cultures résistantes ont un rendement satisfaisant
Au-dessus de 16	Un très petit nombre seulement de cultures donne des rendements satisfaisants

1. Conductivité d'un extrait saturé (millimhos par centimètre à 25 °C).

Degré de salinité que diverses graminées et légumineuses fourragères peuvent supporter

Ces cultures peuvent tolérer de 2 à 3 millimhos seulement, jusqu'à 12 millimhos ou davantage.

Pour la plupart des espèces sensibles au sel ou modérément tolérantes au sel, il n'y a pas de limite de sécurité pour la salinité. Les rendements diminuent même pour un faible niveau de salinité, et plus la salinité est élevée, plus la diminution du rendement est forte. Si l'on suppose qu'une diminution peu importante du rendement est acceptable, les limites de tolérance au sel des cultures fourragères peuvent être indiquées pour les régions irriguées.

Dans la liste suivante des plantes tolérantes au sel, les espèces sont divisées en 3 groupes : tolérantes, modérément tolérantes et sensibles. Dans chaque groupe, les espèces sont rangées par ordre de tolérance décroissante au sel, bien qu'une différence de deux ou trois places dans la liste puisse ne pas avoir d'importance. C'est ainsi que le *Sporobolus* prospère généralement dans de bonnes conditions si la salinité ne dépasse pas 12 millimhos, mais, pour obtenir de bons rendements de lotier corniculé, la salinité ne doit pas dépasser 6 millimhos. Sur les sols ayant une forte teneur en gypse, les degrés de salinité auxquels une réduction nette de rendement se produit généralement dépassent de 2 millimhos ceux qui sont indiqués dans la liste. Par exemple, le *Sporobolus* pour-

rait tolérer une salinité allant jusqu'à 14 millimhos et le lotier corniculé jusqu'à 8 millimhos dans des sols qui contiennent du gypse. Les rendements en semences sont généralement moins affectés par la salinité que les rendements en fourrage. Ceci est particulièrement vrai pour les graminées les plus tolérantes.

Bonne tolérance au sel (12 à 6 millimhos)

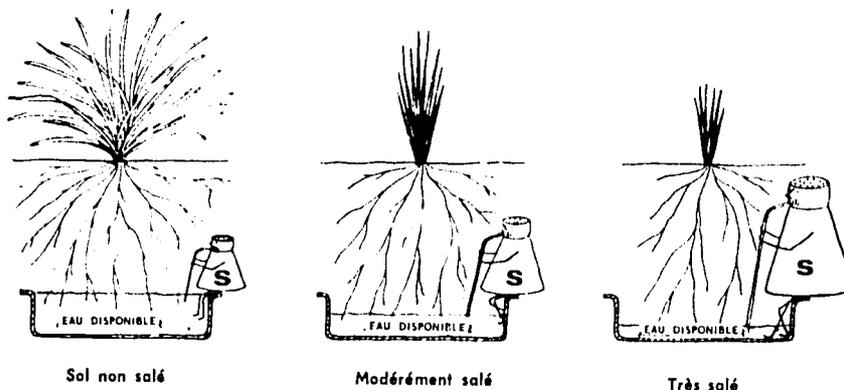
Sporobolus	(<i>Sporobolus airoides</i>)
Salicorne	(<i>Distichlis stricta</i>)
Puccinelle	(<i>Puccinellia nuttalliana</i>)
Chiendent pied de poule	(<i>Cynodon dactylon</i>)
Chiendent rampant	(<i>Agropyron elongatum</i>)
Chiendent géant	(<i>Chloris gayana</i>)
Brome	(<i>Bromus catharticus</i>)
Elymus du Canada	(<i>Elymus canadensis</i>)
Chiendent occidental	(<i>Agropyron smithii</i>)
Fétuque élevée	(<i>Festuca arundinacea</i>)
Orge (fourragère)	(<i>Hordeum vulgare</i>)
Lotier corniculé	(<i>Lotus corniculatus</i>)

Résistance modérée au sel (6 à 3 millimhos)

Méfilot blanc	(<i>Melilotus alba</i>)
Méfilot jaune	(<i>Melilotus officinalis</i>)
Raygrass vivace	(<i>Lolium perenne</i>)
Brome des montagnes	(<i>Bromus marginatus</i>)
Alpiste	(<i>Phalaris tuberosa var. stenoptera</i>)
Elymus	(<i>Elymus triticoïdes</i>)
Trèfle rose	(<i>Trifolium fragiferum</i>)
Paspalum	(<i>Paspalum dilatatum</i>)
Sorgho	(<i>Sorghum sudanese</i>)
Trèfle blanc	(<i>Melilotus alba var. annua</i>)
Luzerne	(<i>Medicago sativa</i>)
Seigle (fourrager)	(<i>Secale cereale</i>)
Blé (fourrager)	(<i>Triticum aestivum</i>)
Avoine (fourragère)	(<i>Avena sativa</i>)
Dactyle pelotonné	(<i>Dactylis glomerata</i>)
Bouteloue	(<i>Bouteloua gracilis</i>)
Fétuque des prés	(<i>Festuca elatior</i>)
Beldingère	(<i>Phalaris arundinacea</i>)
Lotier géant	(<i>Lotus uliginosus</i>)
Brome inerme	(<i>Bromus inermis</i>)
Fétuque géante	(<i>Arrhenatherum elatius</i>)
Astragale	(<i>Astragalus species</i>)
Méfilot à petites fleurs	(<i>Melilotus indica</i>)

Tolérance médiocre au sel (3 à 2 millimhos)

Trèfle rampant	(<i>Trifolium repens</i>)
Vulpin des prés	(<i>Alopecurus pratensis</i>)
Trèfle hybride	(<i>Trifolium hybridum</i>)
Trèfle violet	(<i>Trifolium pratense</i>)
Trèfle ladino	(<i>Trifolium repens forma giganteum</i>)
Pimprenelle	(<i>Sanguisorba minor</i>)



Quelques variétés de cultures fourragères sont plus sensibles au sel que d'autres. Les variétés à feuilles dures du brome inerme sont généralement plus tolérantes que les variétés à feuilles fines et certaines variétés d'orge résistent mieux au sel que d'autres. Le lotier corniculé à feuilles étroites est plus tolérant que la variété à feuilles larges. Les variétés de luzerne, en revanche, ne semblent pas différer sensiblement au point de vue tolérance au sel. Pour la plupart des espèces fourragères, on ne possède que peu de renseignements exacts sur les différences variétales en ce qui concerne la tolérance au sel.

Action du sel sur la qualité du fourrage

Les effets varient selon les espèces.

Certaines espèces de graminées absorbent de grandes quantités de sel dans les sols salins et peuvent devenir impropres à l'alimentation du bétail. Par exemple, le Rhodes grass peut provoquer une dysenterie chez les bovins car il absorbe trop de sel lorsqu'il est cultivé sur des terres salées. Comme la salinité enraye la croissance végétative, le fourrage peut en fait être plus riche en certaines vitamines et éléments nutritifs que le fourrage des terres non salées. La diminution des rendements, cependant, compense largement l'enrichissement en éléments nutritifs. En outre, le freinage de la croissance peut avoir pour effet de rendre le fourrage plus dur et moins agréable au goût que le fourrage cultivé sur des terres non salines. Par exemple, le chiendent rampant est tolérant au sel et la fétuque élevée peut devenir dure et filandreuse sur des terres salines, alors que le raygrass vivace qui est moins tolérant conserve un meilleur goût.

**Comment utiliser les renseignements relatifs
à la tolérance au sel
pour choisir une culture fourragère convenant
à une situation déterminée ?**

La tolérance au sel n'est que l'un des divers facteurs dont il faut tenir compte.

Les Services de Vulgarisation agricole de l'Etat et le Service de Conservation du sol peuvent recommander les espèces fourragères qui conviennent aux conditions locales. Ils tiendront compte des températures pendant la période de croissance, de la rigueur des hivers et de facteurs pédologiques, tels que l'humidité (précipitations et irrigation), la texture, la fertilité et le drainage. Le cultivateur peut choisir dans la liste des fourrages ceux qui ont une tolérance satisfaisante au sel en vue d'obtenir des rendements suffisants, compte tenu du niveau de salinité de ses terres. Par exemple, sur les terres humides et mal drainées des Etats des montagnes, le trèfle rose, qui est tolérant à l'eau peut être préféré au lotier corniculé qui est plus tolérant au sel.

**Traitement des terres salées en vue
d'en améliorer le rendement**

Le nivellement, le lessivage, l'irrigation et le drainage amélioreront les rendements sur les terres salées.

Une irrigation bien conçue est l'élément essentiel de la lutte contre la salinité. Dans les régions sèches, le cultivateur peut difficilement lutter contre la salinité, il peut seulement faire le nécessaire pour assurer la pénétration maximale des eaux de pluie en réduisant le ruissellement. Sur les terres irriguées, les possibilités de lutter contre la salinité sont infiniment meilleures. Il est nécessaire de bien niveler les terres pour que l'eau pénètre d'une manière uniforme et pour empêcher l'accumulation de sel en plaques dans le champ. Les sels amenés par l'eau d'irrigation ont tendance à s'accumuler jusqu'à un niveau très élevé dans le sol, mais une bonne irrigation empêche généralement une telle accumulation. Le sel enlevé par lessivage ou par une forte irrigation peut finalement être entraîné dans les canaux de drainage naturels ou artificiels.

Entre les irrigations, l'eau est absorbée par les plantes et s'évapore aussi du sol. Il s'ensuit que l'eau qui reste dans le sol devient plus ou moins salée. Des irrigations plus fréquentes tendent à empêcher l'eau du sol de devenir par trop salée. Les rendements peuvent souvent être considérablement améliorés par une irrigation fréquente, à condition que le drainage soit bien fait.

En raison de la présence de sel, les plantes disposent d'une moins grande quantité d'humidité. L'irrigation peut alors être nécessaire sur les sols salés même si le sol a une bonne teneur en humidité. L'humidité qui reste dans le sol peut ne pas profiter du tout aux plantes.

**Chiendent géant****Ryegrass vivace****Brome sinerme****Vulpin des prés**

La salinité arrête la croissance de la plupart des plantes fourragères.

Éléments à considérer :

1. Choisir pour les terres salées des cultures tolérantes au sel. Certaines graminées et légumineuses fourragères sont beaucoup plus résistantes que d'autres.
2. Irriguer suffisamment pour que le sel soit entraîné dans les couches profondes du sol.
3. Irriguer fréquemment. Ne pas laisser les terres salées se « dessécher » entre deux irrigations.

CHAPITRE VI

TOLÉRANCE DES CULTURES AU SODIUM ÉCHANGEABLE

par George A. PEARSON

*Division de la Recherche sur la Conservation des Sols et des Eaux
Service de la Recherche Agronomique*

Le présent chapitre :

1. **Définit le sodium échangeable**
2. **Décrit l'effet du sodium échangeable sur les propriétés du sol et la croissance des plantes**
3. **Indique la tolérance relative de certaines cultures au sodium échangeable**
4. **Explique comment la croissance des plantes peut être améliorée sur les sols sodiques.**

Que faut-il entendre par sodium échangeable ?

Le sodium échangeable est la fraction de sodium contenue dans le sol qui est adsorbée par celui-ci et qui peut être remplacée par ou échangée contre d'autres constituants de sels tels que le calcium ou le magnésium.

L'eau d'irrigation contient des sels dissous qui sont dissociés ou séparés en ions. Les sels que l'on rencontre le plus fréquemment dans l'eau comprennent les cations à charge positive, comme le calcium, le magnésium et le sodium, et les anions à charge négative, comme le bicarbonate, le chlorure et le sulfate. Lorsque de l'eau qui contient un sel dissous traverse le sol, les cations à charge positive sont attirés et retenus par les particules de limon et d'argile à charge négative. Les cations ainsi retenus à la surface des particules de limon et d'argile peuvent être échangés contre d'autres cations contenus dans l'eau d'irrigation ou en solution dans le sol et que l'on appelle les cations échangeables.

Les quantités des divers cations retenus sous une forme échangeable par le sol sont liées à la composition relative de l'eau d'irrigation. C'est ainsi que l'utilisation continue d'une eau d'irrigation contenant une forte proportion de sodium par rapport au calcium et au magnésium, finira par donner un sol qui contient une quantité excessive de sodium échangeable. Les sols qui contiennent une quantité excessive de sodium échangeable sont appelés sols sodiques².

Comment peut-on déceler les sols sodiques ?

Habituellement les sols sodiques absorbent lentement l'eau, forment des croûtes quand ils sont secs et sont collants lorsqu'ils sont mouillés ; en outre, ils ont une surface noire.

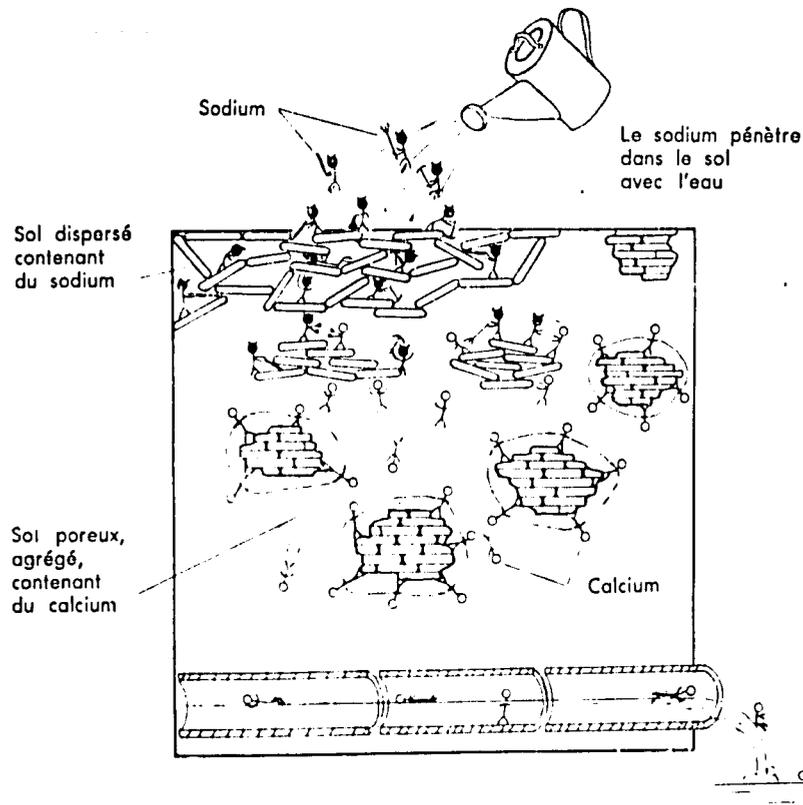
Lorsqu'une eau d'irrigation qui contient une forte proportion de sodium traverse un sol, le sodium déplace une partie du calcium et du magnésium adsorbés à la surface des particules de sol. Le sodium adsorbé entraîne la dispersion ou la déflocculation des particules du sol. Dans des cas extrêmes, les particules du sol peuvent être complètement dispersées. Cette dispersion produit un sol ayant des pores de très petite dimension. Ainsi, tout comme il est relativement plus difficile pour l'eau de traverser du sable que du gravier, il est difficile pour l'air et l'eau de pénétrer dans un sol sodique. Il ne faut pas confondre les sols sodiques avec des sols à texture fine (forte teneur en argile) dont la capacité d'absorption de l'eau peut également être faible.

Les sols surchargés de sodium échangeable sont difficiles à cultiver. Le labourage ou la culture des sols dispersés qui sont trop secs produit de grosses mottes qui sont difficiles à briser. Si les sols sont trop humides, ils sont très collants. Ainsi, il est difficile de préparer une bonne couche de semis ou de cultiver dans de bonnes conditions. Les particules de sol sodique tendent à adhérer les unes aux autres, lorsqu'elles sont humides, et à former des croûtes très dures lorsque la surface se dessèche.

Les matières organiques se dissolvent dans les sols sodiques. Lorsque ces sols se dessèchent, ces matières organiques dissoutes remontent à la surface et elles forment une couche noirâtre à la surface du sol.

L'analyse chimique est le seul moyen sûr d'identifier les sols sodiques. Les renseignements concernant l'analyse des sols et l'interprétation de leurs résultats peuvent être fournis par les agents locaux ou les représentants des services de conservation des sols. On trouvera également ces renseignements dans la Circulaire n° 982 du Département de l'Agriculture des Etats-Unis, intitulée : Tests for Salinity and Sodium Status of Soil and Irrigation Water (Essais pour déterminer le degré de salinité et la quantité de sodium contenue dans l'eau d'irrigation).

(2) Les sols sodiques sont parfois appelés sols à sodium, à alcali ou à alcali noir. Les zones restreintes constituées par des sols sodiques sont appelées taches alcalines.



Lorsqu'une eau d'irrigation qui contient une forte proportion de sodium est appliquée sur un sol poreux et agrégé, sur lequel le calcium est absorbé, le sodium remplace le calcium adsorbé et modifie la disposition des particules de sol en formant des pores plus petites à travers lesquelles d'eau circule lentement.

Action du sodium échangeable sur le rendement des cultures

Les rendements des cultures se trouvent réduits en raison de l'inégalité des peuplements et du retard dans la croissance.

Le sodium échangeable provoque la dispersion des particules du sol résultant en la réduction des dimensions des pores. Les problèmes relatifs à l'aération, au mouvement de l'eau et à la croissance des racines sont associés à ces changements dans l'état physique ou la structure du sol.

La croûte dure qui se forme fréquemment à la surface d'un sol sodique lorsqu'il sèche empêche souvent les jeunes plants de pousser.

L'irrigation empêche généralement la formation d'une telle croûte. Cependant, en raison de la faible dimension des pores d'un sol sodique, il est parfois difficile d'empêcher le déplacement complet de l'air du sol par l'eau d'irrigation. Si l'eau chasse complètement l'air, le manque d'oxygène peut réduire la germination.

En outre, les sols sodiques peuvent réduire l'allongement des racines et la croissance des plantules. Cette croissance réduite des racines est liée à la mauvaise structure des sols et à l'insuffisance de mouvement de l'eau dans et à l'intérieur des sols sodiques par suite de la dispersion des particules de sol. De même que pour la germination, une trop grosse quantité d'eau pose un problème d'aération. Outre les problèmes de croissance liés à la mauvaise structure des sols sodiques, il peut se poser des problèmes de nutrition.

La solution du sol d'un sol sodique contient moins de calcium que de sodium. Les résultats d'expériences indiquent que la croissance des plantes est liée à la composition de la solution de sol. Les problèmes de nutrition qui se posent sur les sols sodiques sont généralement liés à l'accumulation de calcium et de sodium par les plantes. Les plantes cultivées sur un sol sodique ont généralement une teneur en calcium plus faible que celles qui sont cultivées sur des sols non sodiques ou sur un sol contenant moins de sodium échangeable. Les plantes qui ont besoin d'une forte quantité de calcium peuvent en fait souffrir d'une carence de calcium lorsqu'elles sont cultivées sur des sols sodiques. De même, les plantes cultivées sur les sols sodiques ont généralement une teneur en sodium plus élevée que celles qui sont cultivées sur des sols non sodiques. Les arbres fruitiers à feuilles caduques et ceux qui donnent des fruits à coque, qui sont particulièrement sensibles au sodium, peuvent même accumuler des quantités toxiques de sodium lorsqu'ils sont cultivés sur des sols qui ne sont pas considérés comme sodiques sur la base du pourcentage de sodium échangeable. Une quantité excessive de sodium dans les feuilles les brûle progressivement vers l'intérieur en partant de la pointe ou des bords, puis elles tombent de l'arbre. Si cet état persiste, l'arbre finit par mourir.

Quantités de sodium échangeable que les cultures peuvent tolérer

Le niveau de tolérance des diverses cultures varie considérablement suivant leur sensibilité particulière à des facteurs de nutrition défavorables et à une mauvaise condition physique du sol.

Les problèmes de nutrition dans les sols sodiques sont généralement liés à la quantité relative de calcium et de sodium accumulée par les plantes. En d'autres termes, la tolérance des cultures n'est pas si étroitement liée à la quantité absolue de sodium échangeable (ES) contenue dans le sol qu'au pourcentage de sodium échangeable (ESP) ou au pourcentage du total des cations échangeables qui sont des cations de sodium. Certaines cultures tolèrent beaucoup mieux un sol ayant une



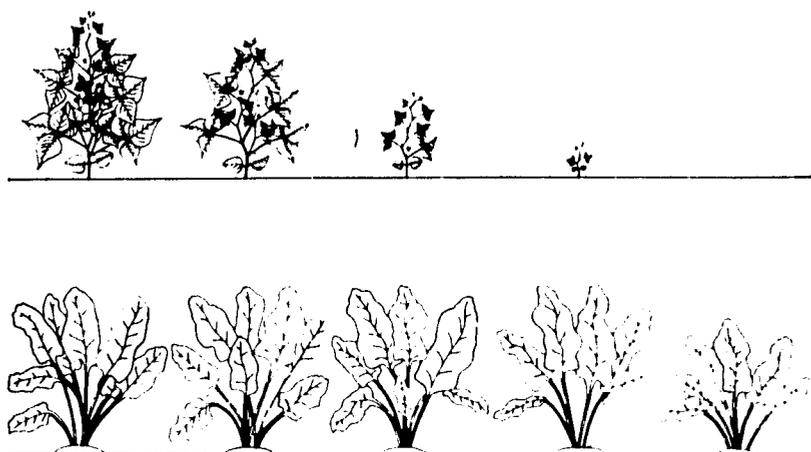
Un pâturage irrigué ayant subi les effets nocifs du sodium échangeable. La tache alcaline noire due à la dissolution de matière organique, et l'eau stagnante dans les sillons sont des indications de la présence de sodium échangeable.

faible teneur en calcium ou une forte teneur en sodium que d'autres cultures.

Pour un ESP donné, l'état physique des divers types de sols diffère sensiblement. Par exemple, la structure d'un sol à texture fine (argile) est généralement pire que celle d'un sol à texture grossière (sol sableux). Cette différence de structure est liée au plus grand nombre de particules fines qui peuvent être dispersées dans un sol argileux. Certaines cultures sont plus sensibles que d'autres à une humidité insuffisante et au mauvais état physique du sol qui empêchent le développement normal des racines.

La croissance des plantes qui sont les plus sensibles au sodium échangeable peut être retardée même lorsqu'elles sont cultivées sur des sols où les effets physiques défavorables dus au sodium échangeable ne sont pas perceptibles. Les arbres qui sont particulièrement sensibles au sodium peuvent accumuler une quantité suffisante de sodium qui occasionne une brûlure des feuilles qui finissent par tomber. La croissance retardée des cultures modérément tolérantes est due en partie au pro-

blème de nutrition associé aux sols sodiques et en partie aux mauvaises caractéristiques de la structure des sols. La plupart des cultures sont modérément tolérantes au sodium échangeable. Les cultures les plus tolérantes ne sont pas, apparemment, affectées sensiblement dans leur nutrition, même pour un ESP assez faible, mais elles sont retardées par suite du mauvais état physique du sol. La croissance réduite de plantes cultivées sur des sols sodiques peut donc être due à des facteurs défavorables de nutrition, à un mauvais état physique ou à une combinaison des deux.



L'augmentation de la quantité de sodium échangeable (de gauche à droite) réduit progressivement la croissance. Les haricots (rangée supérieure) sont beaucoup plus sensibles que les betteraves (rangée inférieure).

En raison des variations de la structure des sols sodiques due à leur texture, la tolérance des cultures au sodium échangeable est fréquemment fondée sur les réactions de nutrition en l'absence d'un mauvais état physique. Les plantes énumérées au tableau I ont été étudiées dans ces conditions au Laboratoire de Salinité des Etats-Unis et dans plusieurs Stations Expérimentales d'Etats. Elles sont disposées approximativement par ordre de tolérance croissante au sodium échangeable.

Le Tableau I n'envisage que le facteur de nutrition. L'état physique du sol dans ses rapports avec la structure et le mouvement de l'eau à travers le sol doit être évalué avant qu'il soit possible de déterminer si une culture peut être pratiquée avec succès dans un sol ayant un pourcentage déterminé de sodium échangeable. Certaines méthodes de mesure, comme le degré d'agrégation ou la conductivité hydraulique sont utilisés pour déterminer l'état physique du sol. La mesure du module de rupture indique la tendance d'un sol à former des croûtes.

La procédure à suivre pour faire ces mesures est expliquée dans le Manuel 60 du Département de l'Agriculture des Etats-Unis intitulé : Diagnostic et Amélioration des sols salins et alcalins ⁽³⁾.

TABLEAU I

Tolérance des diverses cultures au pourcentage de sodium échangeable

Tolérance au PSE et gamme entre lesquelles les plantes sont affectées	Plantes	Réaction de croissance en plein champ
Extrêmement sensible (PSE = 2-10)	Arbres fruitiers à feuilles caduques Arbres donnant des fruits à coque Agrumes - Avocatiers	Symptômes de toxicité par le sodium même pour un faible PSE
Sensible (PSE = 10-20)	Haricots	Plante rabougrie pour un faible PSE même lorsque l'état physi- que du sol est bon
Modérément tolérante (PSE = 20-40)	Trèfle Avoine Fétuque élevée Riz Paspal	Croissance chétive en raison de mauvais facteurs de nutrition et d'un état défavo- rable du sol
Tolérant (PSE = 40-60)	Blé Coton Luzerne Orge Tomate Betterave	Croissance rabougrie due à un mauvais état physique du sol
Très tolérant (PSE = plus de 60)	Agropyre variétés Crested et Fairway Agropyre géant Rhodes grass	d"

1. PSE pourcentage de sodium échangeable.

(3) Pour se procurer ce Manuel, s'adresser au Superintendent of Documents, Government Printing Office, Washington 25 D.C., 2 dollars l'exemplaire.

Effets de la salinité sur un sol sodique

Pour un PSE donné, la salinité améliore généralement l'état physique et la capacité d'un sol sodique de fournir du calcium.

Les sels solubles ont tendance à flocculer (maintenir ensemble) les particules de sol ; ceci compense en partie l'effet de dispersion du sodium échangeable. La flocculation augmente la perméabilité du sol à l'eau et rend le sol plus facile à cultiver. Cependant, si des sels solubles sont lessivés par le sol alors que le sodium échangeable se trouve encore sur les particules d'argile, il y aura dispersion et le sol se trouvera dans un état physique médiocre.

Une partie au moins du sel soluble contenue dans un sol salin est constituée par du calcium. Ainsi, le pouvoir de fournir du calcium pour un PSE déterminé est plus fort en présence de la salinité qu'en son absence. Les problèmes de nutrition liés à une faible teneur en calcium des sols sodiques ne sont donc pas aussi graves ou même peuvent ne pas se poser du tout.

Ces effets de la salinité sur un sol sodique ne signifient pas que l'on puisse s'attendre à ces rendements normaux, mais plutôt que les effets néfastes du sodium échangeable sur la croissance peuvent être moins graves qu'on ne le craignait. Non seulement le sodium échangeable, mais aussi les conditions de salinité limitent quelque peu la croissance des plantes. L'effet relatif de ces deux facteurs sur la limitation de la croissance des plantes dépend du degré de salinité et de la quantité de sodium échangeable ainsi que de la tolérance des plantes à chacun d'eux.

Comment peut-on améliorer la croissance des plantes sur des sols sodiques ?

La croissance des plantes peut être améliorée par appropriation du sol et par l'emploi de pratiques culturales convenables.

La condition physique des sols sodiques peut être améliorée par un remplacement partiel ou complet du sodium échangeable par du calcium. On peut obtenir ce résultat en ajoutant au sol une source de calcium soluble ou un amendement qui dissoudra les composés de calcium déjà présents dans le sol. Les techniques et les produits qui peuvent être employés pour approprier les sols sodiques sont décrits au chapitre X.

Le sodium qui a été remplacé par du calcium doit être lessivé du sol pour l'empêcher de remplacer de nouveau le calcium. Ce lessivage se fait fréquemment en faisant stagner de l'eau sur la surface du sol. Quand on lessive un sol, il peut être possible de cultiver du riz, culture qui peut être pratiquée sur des sols submergés. Le riz est modérément tolérant au sodium échangeable, mais il est assez sensible à la salinité. Si le sol sodique en cours d'appropriation est aussi salin, le riz peut ne pas pousser.

CHAPITRE VII

DÉGATS OCCASIONNÉS AUX PLANTES PAR LE BORE

par L.V. WILCOX

*Pédologue, Laboratoire de Salinité des Etats-Unis,
Division de la Recherche des Services de Conservation
des Sols et des Eaux,
Service de Recherches Agronomiques.*

Le bore est indispensable à la croissance normale de toutes les plantes mais la quantité nécessaire est extrêmement faible. Dans certaines régions, en particulier lorsque les pluies sont abondantes, les sols ont une faible teneur en bore et un grand nombre de plantes peuvent présenter des symptômes caractéristiques de carence en bore. Dans d'autres régions, la teneur en bore est excessive et il n'est pas rare que les plantes soient soumises aux effets toxiques du bore.

On a trouvé des concentrations toxiques de bore dans les sols d'un grand nombre de régions arides du monde. Aux Etats-Unis, un tel phénomène se produit presque exclusivement dans la zone irriguée de l'Ouest. La superficie totale sur laquelle la toxicité du bore est une source de difficulté n'est pas grande, mais les dégâts sont parfois très graves.

Le présent bulletin a pour objet :

1. **D'étudier la nature et la source du bore,**
2. **De décrire les symptômes d'empoisonnement par le bore,**
3. **D'indiquer des remèdes pour prévenir l'empoisonnement par le bore.**

Qu'est-ce que le bore ?

Le bore est un élément caractéristique de substances bien connues comme l'acide borique et le borax. Il ne se trouve jamais dans la nature à l'état libre mais toujours en combinaison avec d'autres éléments. En plus de l'acide borique et du borax, un grand nombre d'autres minéraux complexes peuvent contenir de faibles quantités de bore. Ce

sont généralement des borosilicates. Ils sont largement répartis et se trouvent dans la plupart des sols. Ils ne sont que modérément solubles dans l'eau et, en conséquence, ils ne sont pas lessivés du sol par la pluie. Ces minéraux fournissent du bore à la racine des plantes et sont donc la principale source de bore pour les plantes.

Des composés de bore qui se dissolvent facilement dans l'eau, comme l'acide borique et le borax, ne sont que modérément toxiques pour les humains et les animaux, mais sont extrêmement toxiques pour un grand nombre de plantes.

D'où provient le bore excédentaire ?

On a trouvé des concentrations toxiques de bore dans certains sols vierges. En général, il s'accumule dans le sol à la suite d'une évaporation d'eau de la surface du sol ou lorsque le niveau de la nappe phréatique est peu profond. Cependant, la source la plus commune est l'eau d'irrigation. Toutes les eaux naturelles contiennent du bore, mais généralement en concentration faible. Un petit nombre seulement de cours d'eau de surface sont contaminés, mais un grand nombre d'eaux de puits ont une forte teneur en bore. Elles produisent des concentrations toxiques de bore dans le sol, en particulier lorsque le drainage est médiocre.

Une autre source de contamination par le bore réside dans les applications accidentelles de trop fortes quantités de bore. Lorsqu'on veut remédier à une carence en bore. Il ne faut pas oublier que les composés à base de bore utilisés à cet effet peuvent occasionner de graves dégâts aux cultures s'ils sont appliqués en quantités excessives.

Comment le bore attaque-t-il les plantes ?

Les racines des plantes prélèvent de faibles quantités de bore dans la solution de sol. Ce bore est amené aux feuilles où l'eau se perd par transpiration. Il reste dans la feuille et tend à s'accumuler dans le bout et sur les bords. Lorsque ce processus se poursuit, la concentration en bore devient suffisamment élevée pour être toxique pour le tissu de la feuille. Il en résulte un jaunissement ou des brûlures, et, finalement, la pointe et les bords se nécrosent. Ce type d'accident ne se produit que sur les feuilles mûres et diffère des symptômes de carence en bore qui ne se présentent que sur les nouvelles feuilles. Les autres symptômes d'excès de bore comprennent la chute prématurée des feuilles, le ralentissement de la croissance et la diminution du rendement.

Les feuilles de plusieurs arbres fruitiers ne manifestent pas les symptômes, bien qu'ils soient très sensibles au bore. Il s'agit des arbres donnant des fruits à noyaux, comme les abricotiers, les pruniers, les cerisiers et les amandiers, ainsi que des arbres donnant des fruits à pépins, comme les pommiers, les poiriers et les cognassiers. Ils ne présentent que des décolorations ou des brûlures minuscules ou nulles et aucune accumulation de bore dans les feuilles comme dans les autres

plantes, mais les jeunes rameaux se dessèchent et on peut noter sur les grosses branches la présence de gomme, sans compter un ralentissement de la croissance et une diminution du rendement.

Comment déceler les accidents provoqués par le bore ?

Les feuilles d'un grand nombre de plantes attaquées par le bore présentent des symptômes très caractéristiques et facilement reconnaissables. Les voici :

Brûlure de la pointe. — Cet accident commence par un jaunissement, suivi d'un brunissement et de la nécrose du bout de la feuille. Lorsque les dégâts sont très graves, il peut se produire une brûlure et un jaunissement marginal entre les nervures. Ce type d'accident se constate sur les feuilles des citronniers, orangers, pamplemoussiers, noyers, eucalyptus et autres plantes. (Cf. planche I, A, B et C.)

Brûlure du bout et des bords. — Sur les céréales et les graminées, on note une brûlure du bout de la pointe et un jaunissement des bords de la feuille, en arrière de la pointe. Les dégâts se constatent sur des plantes comme l'avoine, le millet, le maïs, le blé et l'orge. (Cf. planche I, D.)

Brûlure des bords. — La brûlure des bords se constate sur les feuilles d'un grand nombre de plantes à feuilles caduques. Le développement des bords se ralentit ou s'arrête suivant la gravité des dégâts. Les cellules situées en arrière du bord continuent à se développer et provoquent un renflement ou un affaissement caractéristique de la feuille. Les plantes qui sont atteintes de ce type d'accident sont les arbustes à baies, la luzerne, le coton, les rosiers, et la violette. (Cf. planche I, E.)

Zones irrégulières. — Certaines feuilles ne présentent pas la structure caractéristique des accidents occasionnés par le bore. Des zones jaunes ou brunes apparaissent sur les bords et sur le limbe. Les plantes ainsi atteintes sont les ormes, la vigne, les figuiers, le haricot, le poivron, la tomate, les pommes de terre, les avocatiers, les citrouilles, les pois, les radis, le tournesol, les navets et les betteraves. (Cf. planche I, F, G et H.)

Zones jaunes ou nécrosées entre les nervures. — Les noyers d'Angleterre présentent un type d'accident très caractéristique. Des taches brunes et rondes apparaissent sur les bords et entre les nervures. (Cf. planche I, I.)

L'analyse chimique permet-elle de déceler la présence d'une quantité toxique de bore ?

Les analyses chimiques d'échantillons représentatifs de feuilles permettent de déceler la présence d'une quantité toxique de bore dans la plupart des plantes, sauf les arbres ayant des fruits à noyau ou à pépins qui viennent d'être mentionnés. Le conseiller agricole ou le technicien

du Service de conservation des sols peut vous donner des conseils au sujet de la façon de recueillir et d'analyser des échantillons. Le Laboratoire de salinité des Etats-Unis à Riverside, Californie, n'analyse pas ces échantillons, sauf lorsqu'il entreprend un projet de recherche.

A l'exception des feuilles des arbres donnant des fruits à noyau et à pépins, les feuilles mûres normales contiennent de 40 à 100 parties par million de bore. Les valeurs inférieures à 20 parties indiquent une carence, et les valeurs supérieures à 250 parties une trop grande quantité toxique.

Que peut-on faire si l'on craint la présence d'une quantité toxique de bore ?

1. Il faut diagnostiquer le problème. Etudier les symptômes présentés par les feuilles et, le cas échéant, faire faire une analyse chimique.

2. Si l'on constate la présence d'une quantité toxique de bore, il faut en déterminer l'origine, qui peut être l'eau d'irrigation, le sol ou les engrais.

3. Si l'eau d'irrigation est contaminée, il faut la mélanger avec une autre eau d'irrigation à faible teneur en bore, en proportion telle que le mélange puisse être utilisé sans danger. Si cela n'est pas possible, il faut pratiquer des cultures tolérantes au bore. Le Tableau I indique la tolérance relative au bore de plusieurs plantes. Elles sont classées en trois catégories : tolérantes, semi-tolérantes et sensibles. Dans chaque groupe, les plantes les plus tolérantes sont disposées en haut et les plantes les plus sensibles en bas. La quantité de bore indiquée en haut des colonnes est suffisante pour occasionner des dégâts aux cultures les plus tolérantes et de graves dégâts aux cultures les plus sensibles de la catégorie. Par exemple, si l'analyse de l'eau indique une teneur de 2,0 p.p.m. de bore, cette quantité sera trop élevée pour les cultures classées dans la catégorie sensible. Les plantes indiquées en haut de la catégorie « semi-tolérantes » seraient légèrement endommagées, tandis que celles figurant au bas seraient plus gravement endommagées. Il est probable que toutes les cultures de la catégorie « tolérante » pourraient être irriguées avec de l'eau contenant 2,0 p.p.m. de bore sans en être incommodées.

4. Si l'on constate que le sol est contaminé par du bore, il est nécessaire de le remettre en état et de le lessiver avec une forte quantité d'eau. En général, un sol salé qui n'est pas contaminé par le bore peut être lessivé de tous les sels jusqu'à une profondeur de 1,20 mètre, en faisant passer à travers le sol une nappe d'eau de 1,20 m. Si le sol est fortement contaminé par le bore, il est nécessaire pour l'enlever de faire passer une hauteur d'eau de 2,40 m à 3,60 m.

Il n'existe pas de méthode économiquement réalisable pour enlever le bore de l'eau d'irrigation. De même, il n'existe pas de produit

chimique ou d'amendement que l'on puisse ajouter au sol pour rendre le bore non toxique. Cependant, si la teneur en bore est toxique, en appliquant des quantités suffisantes d'engrais, les plantes pousseront mieux et seront moins attaquées par le bore.

TABLEAU I

Limites de bore contenu dans l'eau d'irrigation
pour les cultures ayant des degrés différents de tolérance au bore

TOLÉRANTES	SEMI-TOLÉRANTES	SENSIBLES
<i>4,0 p.p.m. de bore</i>	<i>2,0 p.p.m. de bore</i>	<i>1,0 p.p.m. de bore</i>
Tamaris (<i>Tamarix</i> <i>Aphylla</i>)	Tournesol (indigène)	Pacanier
Asperge	Pomme de terre	Noyer (noir et de Perse ou Anglais)
Palmier (<i>Phoenix cana-</i> <i>riensis</i>)	Coton (Acala et Pima)	Artichaut de Jérusalem
Palmier dattier (<i>P. dactylifera</i>)	Tomate	Haricots à gros grains
Betterave à sucre	Pois doux	Orme d'Amérique
Betterave fourragère	Radis	l'unier
Betterave potagère	Pois fourrager	Poirier
Luzerne	Véronique	Pommier
Glaieul	Olivier	Vigne (Sultanina et Malaga)
Fève	Orge	Figuier
Oignon	Blé	Kaki
Navet	Maïs	Cerisier
Chou	Millet	Pêcher
Laitue	Avoine	Abricotier
Carotte	Zinia	Mûrier
	Potiron	Oranger
	Poivron	Avocatier
	Patate douce	Pamplemoussier
	Haricot de Lima	Citronnier
<i>2,0 p.p.m. de bore</i>	<i>1,0 p.p.m. de bore</i>	<i>0,3 p.p.m. de bore</i>

CHAPITRE VIII

DÉTERMINATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION

par L.V. WILCOX

*Pédologue, Laboratoire de Salinité des Etats-Unis,
Division de la Recherche de la Conservation
des Sols et des Eaux,
Service de Recherche agronomique.*

La qualité d'une eau d'irrigation dépend de la nature et de la quantité des sels qui y sont dissous. Une analyse chimique indique la nature des sels présents et leur quantité. Grâce à une telle analyse, il est possible de décider si l'eau peut convenir à l'irrigation.

Le présent chapitre a pour objet :

1. **De décrire les caractéristiques d'une eau d'irrigation qui déterminent sa qualité,**
2. **D'indiquer le type d'analyse d'eau qui est nécessaire,**
3. **De montrer comment on peut évaluer la qualité d'après une analyse d'eau.**

LES SELS DANS LES EAUX D'IRRIGATION

Quels sont les sels présents dans l'eau ?

L'eau, du fait qu'elle est en contact avec les roches et les sols, dissout des sels qui se trouvent dans ces matériaux. Ces sels comprennent des substances bien connues, comme le gypse (sulfate de calcium, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), le sel d'Epsom (sulfate de magnésium $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), le sel de Glauber (sulfate de soude $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), le bicarbonate de soude (NaHCO_3) et le sel de cuisine (chlorure de sodium NaCl).

Les sels perdent leur identité lorsqu'ils sont dissous dans l'eau du fait qu'ils se dissocient en ions. Ainsi, lorsqu'on dissout du chlorure de

sodium dans de l'eau, il se divise en ions sodium et ions chlorure. Il est habituel en conséquence d'établir les analyses d'eau d'irrigation en ions plutôt qu'en sels.

Les principaux ions d'une eau d'irrigation sont les suivants :

<i>Ion</i>	<i>Symbole chimique</i>
Calcium	Ca ⁺⁺
Magnésium	Mg ⁺⁺
Sodium	Na ⁺
Potassium	K ⁺
Carbonate	CO ³⁻
Bicarbonate	HCO ³⁻
Sulfate	SO ⁴⁻
Chlorure	Cl ⁻
Nitrate	NO ³⁻

Les quatre premiers sont des cations, ou ions basiques, et les cinq derniers des anions ou ions acides. Le potassium, le carbonate et le nitrate se trouvent généralement en faibles concentrations.

Toutes les eaux d'irrigation contiennent du bore, mais, dans la plupart des cas, il ne s'y trouve qu'en très faibles concentrations. Il diffère des autres constituants de l'eau en ce sens qu'il se présente sous forme d'acide borique non ionisé. Pour plus de facilité, il est indiqué comme l'élément bore (symbole chimique B).

Quelles sont les difficultés qui peuvent surgir du fait de la présence de sel dans l'eau d'irrigation?

Trois problèmes peuvent se présenter à la suite de l'utilisation d'eau d'irrigation contenant des sels :

1. Un problème de salinité.
2. Un problème de sodium.
3. Un problème de bore.

Par « problème de salinité » on entend l'accumulation de sels dans le sol au point que les cultures sont endommagées. Ceci peut se produire si le drainage est médiocre, si l'irrigation est insuffisante ou si l'on utilise une eau très salée.

Le « problème de sodium » peut se produire si la quantité de sodium contenue dans l'eau d'irrigation est élevée par rapport à la quantité de calcium plus magnésium. Dans ces conditions, le sol n'absorbera pas facilement l'eau, il deviendra collant lorsqu'il est mouillé et dur ainsi que difficile à labourer lorsqu'il est sec.

Le problème sodium peut être aggravé si la teneur en bicarbonate ainsi que la teneur en sodium sont élevées par rapport au calcium plus magnésium. Dans ce cas, le calcium se dépose dans le sol sous forme

de carbonate de calcium ou de calcaire. Lorsqu'il y a moins de calcium dans la solution, le sodium est plus dangereux car il constitue une fraction plus importante du total des sels restant en solution.

Toutes les plantes ont besoin de bore pour croître normalement, mais si la quantité contenue dans l'eau d'irrigation est trop élevée, elles peuvent être endommagées.

QUALITÉ DE L'EAU

Comment déterminer la qualité de l'eau ?

1. Faites analyser l'eau.
2. Utilisez l'analyse pour évaluer la qualité de l'eau.

Un représentant du Service de Conservation des Sols ou votre vulgarisateur local peut vous dire où vous pouvez faire analyser votre eau et vous aider à interpréter les résultats de l'analyse.

Le Laboratoire de Salinité des Etats-Unis n'analyse pas les eaux, sauf pour ses propres études ou pour celles qui sont effectuées pour d'autres organismes gouvernementaux.

Quel type d'analyse faut-il faire ?

Il faut faire une analyse chimique en laboratoire des substances suivantes et en indiquer la teneur :

<i>Analyse de</i>	<i>sous forme de</i>
Conductivité électrique	Micromhos/cm à 25 °C
Calcium plus magnésium	Milliéquivalent par litre
Sodium	d"
Carbonate plus bicarbonate	d"
Bore	Parties par million

Le calcium et le magnésium peuvent être déterminés séparément, puis on les ajoute, bien qu'il existe une méthode satisfaisante pour les déterminer ensemble.

Comment évaluer la qualité de l'eau d'après les résultats d'analyse ?

Suivez les quatre étapes suivantes puis lisez le paragraphe final.

1^{re} étape - Salinité

Déterminez dans quelle catégorie de salinité énumérée ci-dessous la valeur de conductivité obtenue peut être classée. Par exemple, une conductivité de 1 500 tombe dans la catégorie « C3 » entre les conduc-

tivités 750 et 2 250, et représente une eau fortement saline. Les indications portées sous C3 expliquent la qualité de l'eau en ce qui concerne la salinité.

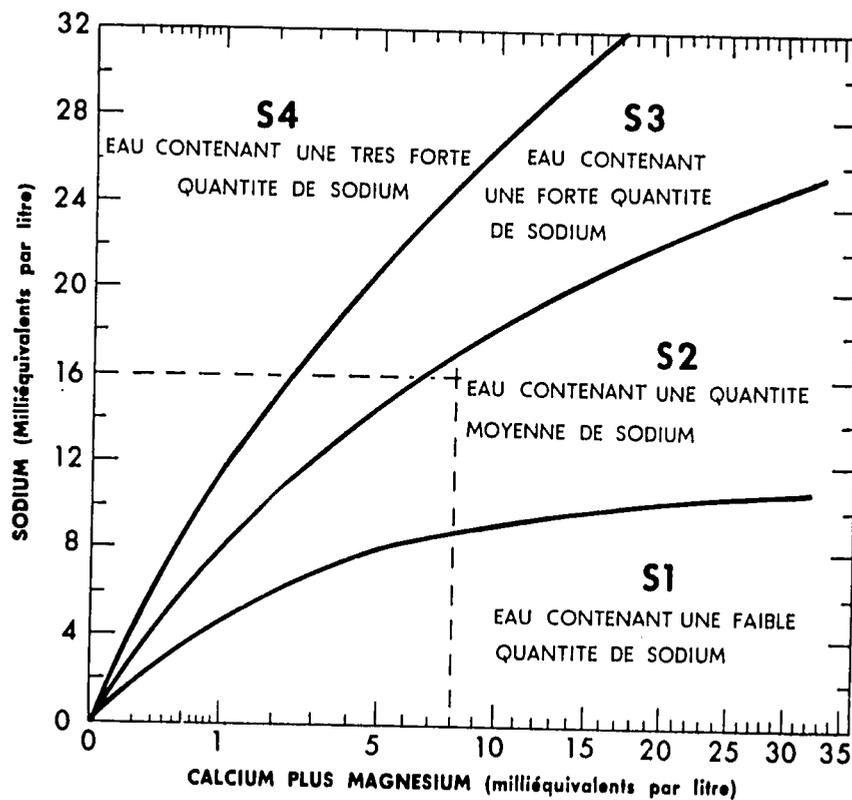
Classification de l'eau	Conductivité électrique (Micromhos par cm à 25 °C)
C 1 - Eau à faible salinité - Elle peut être utilisée pour irriguer la plupart des cultures sur la plupart des sols et il est peu probable qu'elle provoque des difficultés. Un certain lessivage est nécessaire mais celui-ci fait partie des pratiques normales d'irrigation, sauf sur les sols de très faible perméabilité	0 à 250
C 2 - Eau d'une salinité moyenne - Elle peut être utilisée s'il se produit un lessivage modéré. Les plantes ayant une résistance modérée au sel peuvent être cultivées dans la plupart des cas, sans qu'il soit nécessaire de prendre des précautions spéciales pour abaisser la salinité	250 à 750
C 3 - Eau à forte salinité - Elle ne peut pas être utilisée sur des sols faiblement drainés. Même lorsque le drainage est suffisant, il est nécessaire de prendre des dispositions spéciales pour abaisser la salinité et on doit choisir des plantes ayant une forte résistance au sel	750 à 2 250
C 4 - Eau à très forte salinité - Elle ne convient pas à l'irrigation dans des conditions ordinaires, mais peut être utilisée occasionnellement dans des conditions très particulières. Les sols doivent être perméables, le drainage doit être suffisant, l'eau d'irrigation doit être appliquée à refus pour provoquer un lessivage très important, et il faut pratiquer des cultures extrêmement résistantes au sel	2 250 à 5 000

2^e étape - Sodium

1. Consultez le diagramme relatif au sodium sur la figure 1. Notez que l'ordonnée de gauche comporte une échelle pour le sodium graduée en milliéquivalents par litre, de 0 en bas à 32 en haut. Notez aussi qu'en abscisses il y a une échelle pour le calcium plus magnésium graduée en milliéquivalents par litre, de 0 à gauche à 35 à droite.

2. Prenez le chiffre pour le calcium plus le magnésium donné par l'analyse d'eau et déterminez l'endroit sur l'échelle calcium plus magnésium (abscisse) où il vient s'insérer. Prenez le chiffre pour le sodium donné par l'analyse d'eau et déterminez sa position sur l'échelle sodium (ordonnée) du diagramme. A partir de ce point, tracez une ligne horizontale vers la droite, jusqu'au-dessus du point calcium plus magnésium déterminé précédemment sur l'échelle inférieure. Notez où cette position se trouve sur le diagramme — en bas, au milieu, en haut, ou dans les zones à très forte concentration de sodium. Se reporter ensuite au paragraphe ci-dessous qui explique la qualité de l'eau en ce qui concerne le sodium.

Exemple : Supposons que l'analyse d'eau indique pour le calcium plus le magnésium 8, et pour le sodium 16 milliéquivalents par litre. Repérer le chiffre 16 sur l'échelle du sodium. Tracer une horizontale sur le diagramme jusqu'à atteindre une position située directement au-dessus du point 8 de l'échelle calcium plus magnésium. Ce point est déterminé par un signe (+) près du centre du diagramme. C'est la zone « S2 Teneur Moyenne-Sodium ». Le paragraphe « S2 Teneur Moyenne-Sodium » ci-dessous explique le problème du sodium que soulève l'emploi de cette eau.



1. Diagramme du sodium

BN-0537

CLASSIFICATION DU SODIUM

L'eau contenant une faible quantité de sodium (S1) peut être utilisée pour l'irrigation de presque tous les sols sans qu'il y ait à craindre que des difficultés ne surgissent. Cependant, les plantes sensibles au sodium, comme les arbres à fruits à noyaux et les avocatiers peuvent accumuler des quantités dangereuses de sodium dans leurs feuilles.

Eau contenant une quantité moyenne de sodium (S2). Elle peut présenter quelques difficultés dans les sols à texture fine (argile), à moins qu'il n'y ait du gypse dans le sol. Cette eau peut être utilisée sur des sols à texture grossière (sols sableux) ou sur des sols organiques qui absorbent bien l'eau.

Eau contenant une forte quantité de sodium (S3). Elle peut provoquer des difficultés dans la plupart des sols et ne peut être employée qu'avec des précautions spéciales — bon drainage, lessivage important et addition de matières organiques. S'il y a une forte quantité de gypse dans le sol, il peut ne pas surgir de difficultés pendant quelque temps. S'il n'y a pas de gypse, il faut en ajouter ou un autre matériau semblable.

Eau contenant une très forte quantité de sodium (S4). Elle est généralement impropre à l'irrigation, sauf pour un degré de salinité moyen ou faible, lorsque l'usage de gypse ou d'autres amendements permet d'utiliser une telle eau.

3^e stade - Bore

Examinez le tableau 1, qui indique la tolérance relative au bore d'un certain nombre de cultures. Cette liste est divisée en trois groupes intitulés : « Tolérant, semi-tolérant et sensible ». Dans chaque groupe, les cultures les plus tolérantes sont indiquées en haut et les plus sensibles en bas.

En haut et en bas de chaque colonne, il y a un chiffre pour indiquer les parties par million (p.p.m.) de bore contenu dans l'eau d'irrigation. La quantité de bore indiquée en haut de la colonne peut provoquer quelques dégâts aux plantes les plus sensibles de ce groupe. Par exemple, supposons que l'analyse d'eau indique 2,0 p.p.m. de bore. Cette quantité de bore sera trop élevée pour les plantes à forte sensibilité. Les plantes figurant en haut de la liste de celles qui sont semi-tolérantes seront légèrement endommagées, tandis que celles qui figurent en bas de la liste le seront plus gravement. Il est probable que toutes les plantes de la liste de la catégorie tolérantes pourront être irriguées avec de l'eau contenant 2,0 p.p.m. de bore sans être gravement endommagées.

4^e stade - Bicarbonate

Soustraire les milliéquivalents par litre de calcium plus magnésium, indiqués dans l'analyse d'eau, des milliéquivalents par litre de carbonate plus bicarbonate. Si le résultat est compris entre 0 et 1,25, l'eau est probablement saine. Si la valeur est comprise entre 1,25 et 2,50, l'eau est de qualité moyenne, mais peut être utilisée avec succès à condition d'employer de bonnes méthodes et d'employer des amendements appropriés (voir chapitre X). Si la valeur est supérieure à 2,50, l'eau ne convient probablement pas à l'irrigation.

TABLEAU I

Quantités limites de bore pouvant être contenues
dans les eaux d'irrigation destinées aux cultures
ayant un degré différent de résistance au bore

Tolérantes	Semi-tolérantes	Sensibles
4,0 p.p.m.	2,0 p.p.m.	1,0 p.p.m.
Tamaris Athel Tamaris aphylla Asperge Palmier (Phoenix canariensis) Palmier dattier (P. dactylifera) Betterave à sucre Betterave semi-fourra- gère Betterave potagère Luzerne Glaiéul Fève Oignon Navet Chou Laitue Carotte	Tournesol (indigène) Pomme de terre Coton (Acala et Pima) Tomate Pois Radis Pois fourrager Véronique Olivier Orge Blé Maïs Millet Avoine Zinnia Potiron Poivre Patate douce Haricot de Lima	Pacanier Noyer (noir, de Perse ou Anglais) Artichaut de Jérusalem Haricots en grains Orme d'Amérique Prunier Poirier Pommier Vigne (Sultanina et Malaga) Figuier Kadota Kaki Cerisier Pêcher Abricotier Mûrier Oranger Avocatier Pamplemoussier Citronnier
2,0 p.p.m.	1,0 p.p.m.	0,3 p.p.m.

ATTENTION

Il est important d'examiner chacun de ces quatre stades : salinité, sodium, bore, bicarbonate.

Lorsqu'on évalue la qualité d'une eau d'irrigation en suivant les quatre stades indiqués ci-dessus, on part de l'hypothèse que :

1. Le sol absorbera facilement l'eau.
2. Le sol est facile à drainer.
3. Une quantité suffisante d'eau d'irrigation sera appliquée pour empêcher l'accumulation de sel dans la zone des racines.
4. Des cultures résistant bien au sel et au bore seront pratiquées.

Si ces conditions ne sont pas remplies, on peut se heurter à des difficultés. Pour obtenir des conseils sur les problèmes que pose la qualité de l'eau, il faut s'adresser à un représentant du Service de la Conservation des sols ou à votre vulgarisateur local.

CHAPITRE IX

UTILISATION DES EAUX SAUMATRES POUR L'IRRIGATION DANS LES RÉGIONS HUMIDES

par Jesse LUNIN, M.H. GALLATIN, C.A. BOWER et L.W. WILCOX,
*pédologues, Division de la Recherche de la Conservation
des Sols et des Eaux,
Service de Recherche Agronomique.*

Avant d'irriguer avec les eaux saumâtres dans des régions humides :

- **Renseignez-vous sur la teneur en sel de l'eau d'irrigation.**
- **Considérez la tolérance au sel de votre culture, et**
- **Consultez votre agent local, les techniciens des Services de conservation du sol ou le personnel de la Station Expérimentale de l'État si vous avez quelque doute au sujet de la teneur en sel du sol ou de l'eau d'irrigation.**

Que faut-il entendre par eau saumâtre ?

Les eaux saumâtres peuvent être contaminées par des acides, des bases, des sels ou des matières organiques, alors que les eaux salines ne contiennent que des sels dissous. Le long de la côte orientale, l'eau de mer est le principal élément de contamination de l'eau saumâtre.

Quelles sources d'eau saumâtre utilise-t-on pour l'irrigation ?

Le long de la côte orientale, les étangs salés constitués par l'endiguement des petites arrivées marémotrices d'eau de mer sont l'une des sources habituelles d'eau saumâtre (fig. 1).



1. Eau de mer apportée par la marée qui a été endiguée pour l'irrigation.

Des puits qui sont périodiquement ou constamment saumâtres fournissent aussi de l'eau d'irrigation. Dans d'autres régions, les agriculteurs utilisent l'eau provenant de baies, de bras de mer, de cours d'eau et de rivières qui se jettent dans des étangs salés et qui sont soumis aux fluctuations de la marée. La quantité de corps étrangers contenus dans ces eaux peut varier considérablement, aussi est-il important que l'eau soit analysée fréquemment pour en déterminer la teneur en sel pendant la période d'irrigation. Des réservoirs de retenue sont souvent construits pour accumuler l'eau d'irrigation là où le débit de la source originale est insuffisant pour répondre aux demandes en périodes de pointe (fig. 2).

Comment les sels s'accumulent-ils dans le sol et comment peut-on les éliminer ?

Les sels peuvent s'accumuler dans les sols des régions humides si l'on utilise des eaux saumâtres pour l'irrigation. Dans les régions humides, la majeure partie de l'eau d'irrigation est appliquée par aspersion. En raison de la quantité limitée d'eau disponible pour l'irrigation dans de nombreuses régions et de la quantité réduite d'équipements

d'arrosage en service, une application moyenne consiste en 2,5 à 4 cm d'eau. Comme la teneur en humidité du sol au moment de l'irrigation est faible, cette hauteur d'eau d'irrigation ne pénétrera pas dans le sol au-delà de 15 à 22 cm. En conséquence, si on procède à des applications légères, les sels contenus dans l'eau d'irrigation risquent de rester dans la couche superficielle du sol. S'il ne tombe pas de pluie entre les irrigations, une seconde irrigation doublera la teneur en sel de la couche superficielle.



2. *Un réservoir de retenue ou mare utilisé pour l'irrigation.*

Les eaux de pluie doivent plus que saturer le sol pour provoquer un lessivage sensible du sel. La quantité et l'intensité des pluies déterminera le mouvement du sel dans le profil du sol. Les averses légères ont peu d'effet. Dans des régions à pluviosité relativement forte, les pluies d'hiver entraînent généralement les sels hors de la zone des racines si le drainage est satisfaisant. Un bon drainage est indispensable pour l'enlèvement des sels. A défaut de drainage, le risque d'accumulation de sel à la surface du sol s'accroît.

Action de l'accumulation de sel sur le sol

Le degré auquel le sel agit défavorablement sur les sols des régions humides fait toujours l'objet de recherches. Cependant, si de grandes quantités de sel s'accumulent dans le sol, elles peuvent être nuisibles à la croissance des plantes. Lorsque le sel est lessivé du sol par les pluies, de faibles quantités de sodium (l'un des principaux éléments constitutifs du sel présent dans l'eau de mer) peuvent rester sous forme adsorbée ou solidement fixée. Si la quantité de sodium présent sous cette forme s'accumule dans le sol en quantités appréciables, la structure de celui-ci devient médiocre. Les sols qui contiennent des quantités relativement importantes de sodium adsorbé sont beaucoup moins perméables à l'air et à l'eau et tendent à former une croûte dure lorsqu'ils sont secs. Dans des conditions moyennes pour l'irrigation dans des régions humides, il est douteux que le sodium adsorbé soit une source de difficulté.

Action du sel sur les plantes

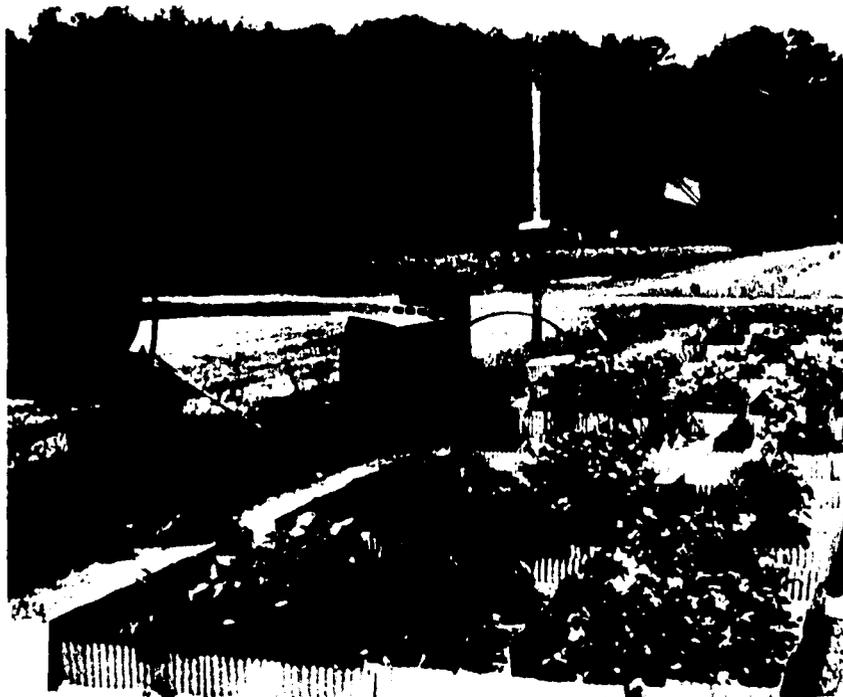
Une forte accumulation de sel dans le sol agit de deux façons différentes sur la croissance des plantes. Tout d'abord, lorsque la concentration de sel dans le sol augmente, la quantité d'eau utilisable par les plantes diminue de plus en plus. La perte d'eau du sol par évaporation et par absorption par les plantes à la suite d'une irrigation avec de l'eau saumâtre augmente la teneur en sel de l'eau qui reste dans le sol, et diminue ainsi l'humidité disponible. Pour cette raison, les plantes cultivées sur des sols salés ont besoin d'être irriguées plus fréquemment que celles qui sont cultivées sur un sol ayant une faible teneur en sel. Des plantes qui poussent dans des conditions de salinité relativement élevée sont rabougries et ont tendance à avoir une couleur bleu-gris. Une réduction de la croissance peut aussi se produire lorsque la salinité du sol est modérée, selon la tolérance au sel des plantes cultivées (fig. 3).

En second lieu, les plantes peuvent être atteintes par la toxicité directe d'un ou de plusieurs des constituants du sel ajouté par l'eau d'irrigation. Les constituants toxiques causent fréquemment des dommages aux arbres fruitiers, mais leur effet sur la plupart des cultures en plein champ et des cultures maraîchères est négligeable.

Quantités de sel tolérées par les cultures

La croissance des plantes diminue généralement lorsque la salinité du sol augmente. Certaines plantes sont plus tolérantes que d'autres à la salinité. Les plantes de grande culture peuvent être divisées en trois groupes : bonne tolérance au sel, tolérance modérée au sel et tolérance médiocre au sel. Dans la liste suivante, les plantes sont classées par ordre de tolérance décroissante au sel dans chaque groupe.

(4) Richards, L.A., Availability of Water to crops on saline soils (Eau disponible pour les cultures sur les sols salins). U.S. Department Agr. Agr. Information, bulletin 210, 10 pp., illus. 1959.



3. Parcelles utilisées pour les études sur les eaux saumâtres.

BONNE TOLÉRANCE AU SEL

Cultures de plein champ :

Orge
Betterave
Coton

Cultures fourragères :

Salicorne

Chiendent pied de poule

Orge fourragère

Cultures maraîchères :

Betteraves potagères

Chou

Asperges

Epinards

TOLÉRANCE MODÉRÉE AU SEL

Cultures de plein champ

Seigle
Blé
Avoine
Sorgho
Maïs

Cultures fourragères :

Mélilot blanc
Paspal
Millet (Soudan grass)
Luzerne
Fétuque élevée

Blé fourrager et orge fourragère	Poivron
Dactyle pelotonné	Courge
Vesce	Carotte
Cultures maraîchères :	Oignon
Tomate	Pois
Broccoli	Concombre
Chou	Cultures fruitières :
Pomme de terre	Figuier
Laitue	Vigne
Maïs doux	Melon

TOLÉRANCE MÉDIOCRE AU SEL

Cultures de plein champ :	Oranger
Haricots de plein champ	Trèfle ladino
Cultures fourragères :	Cultures maraîchères :
Trèfle blanc	Radis
Cultures fruitières :	Céleri
Poirier	Haricots verts
Pommier	Pamplemoussier
	Prunier
	Abricotier
	Pêcher
	Citronnier

Comment déterminer la salinité des eaux d'irrigation

Une méthode rapide pour déterminer la salinité des eaux consiste à mesurer la conductivité électrique. L'eau pure est faiblement conductrice du courant électrique, mais l'eau qui contient des sels dissous est conductrice ; la conductivité électrique (CE) augmente proportionnellement à l'accroissement de la teneur en sel de l'eau. La conductivité électrique se mesure généralement en millimhos par centimètre à 25 °C. Dans la plupart des cas, 1 millimho est équivalent à 640 parties par million (p.p.m.) de sels en solution. Consultez votre agent local, les techniciens du Service de Conservation des sols ou des représentants de la Station expérimentale agricole de l'Etat pour vous aider à déterminer la teneur en sel de votre eau.

Quantité d'eau saumâtre qu'un cultivateur peut utiliser

La quantité d'eau saumâtre qui peut être utilisée dépend de la concentration du sel dans l'eau, du nombre d'irrigations entre les pluies

qui lessivent le sol, de la tolérance au sel de la culture, et de la teneur en sel du sol avant l'irrigation. Le tableau I donne une indication du nombre d'irrigations possibles avec des eaux de concentrations différentes en sel pour les cultures classées dans les trois groupes de tolérance au sel. Ce guide est fondé sur deux hypothèses : 1) il n'y a pas entre-temps des pluies suffisamment importantes pour provoquer un lessivage et 2) il n'y a pas d'accumulation de sel dans le sol au début de la période d'irrigation. Si les pluies qui lessivent le sol se produisent entre les irrigations, l'effet du sel ajouté est réduit au minimum. Si le sel s'est déjà accumulé dans le sol, comme cela peut se produire lorsqu'une culture d'automne est irriguée sur une terre qui a reçu de l'eau saumâtre pour une culture de printemps, le sol doit être analysé pour déterminer la teneur en sel. En conséquence, cette recommandation doit être modifiée.

TABLEAU I

Nombre possible d'irrigations avec de l'eau saumâtre
entre des pluies qui lessivent le sol
et pour des cultures de tolérances différentes au sel.

Eau d'irrigation		Irrigations pou. des cultures ayant :		
Quantité totale de sels	Conductivité électrique	Bonne tolérance au sel	Tolérance modérée au sel	Tolérance médiocre au sel
<i>Parties par million</i>	<i>Millimhos par centimètre à 25°</i>	<i>Nombre</i>	<i>Nombre</i>	<i>Nombre</i>
640	1	11	15	7
1 280	2	7	7	4
1 920	3	5	5	2
2 560	4	4	3	2
3 200	5	3	2-3	1
3 840	6	2-3	2	1
4 480	7	2	1-2	—
5 120	8		1	—

Dans la plupart des régions humides, les pluies d'hiver normales sont généralement suffisantes pour lessiver les sels qui se sont accumulés du fait de l'utilisation d'eau saumâtre pendant l'été précédent.

Précautions à prendre en utilisant de l'eau saumâtre pour l'irrigation

Lorsqu'on utilise de l'eau saumâtre pour l'irrigation, il est nécessaire de connaître sa teneur en sel ou sa conductivité électrique. Lorsque la concentration en sel varie, par suite de changements saisonniers ou

dans les marées, qui remontent dans certaines rivières ou cours d'eau, il est indispensable de connaître la teneur effective en sel de l'eau au moment de l'irrigation. Il faut tenir compte de la tolérance au sel de la culture pour déterminer si une eau saumâtre peut servir à l'irrigation.

Si des sols ont été irrigués précédemment avec de l'eau saumâtre et que leur teneur résiduelle en sel est inconnue consultez votre agent régional ou envoyez un échantillon de sol directement au laboratoire d'analyse des sols de l'Etat. Le laboratoire analysera le sol et recommandera le nombre d'irrigations avec de l'eau saumâtre qui peuvent être faites sur la culture pratiquée. Les sols à irriguer avec une eau saumâtre doivent être bien drainés intérieurement.

CHAPITRE X

AMENDEMENTS CHIMIQUES POUR AMÉLIORER LES SOLS SODIQUES

par C.A. BOWER,

*Division de Recherche de la Conservation des Sols et des Eaux,
Service de Recherches Agronomiques*

Le présent chapitre :

- 1. Décrit les amendements chimiques et leur action sur les sols sodiques**
- 2. Indique comment déterminer le besoin des sols en amendements**
- 3. Traite de l'opportunité des applications des taux et des méthodes d'application des divers amendements.**

Mode d'action des amendements

Les amendements fournissent du calcium soluble qui remplace le sodium fixé aux particules de sol.

Les particules de sol ont une charge électrique négative en surface et elles adsorbent (attirent et retiennent) les constituants des sels chargés positivement, appelés cations. Les cations communs sont le calcium, le magnésium et le sodium. Le calcium et le magnésium sont les principaux cations que l'on trouve dans les sols normaux et productifs et ils ont un effet favorable sur l'état physique du sol. Si les sols sont entrés en contact avec des eaux d'irrigation ou des eaux de nappe phréatique à forte teneur en sodium, ils contiennent généralement du sodium adsorbé ainsi que du calcium et du magnésium également adsorbés. Le sodium adsorbé a un effet nuisible sur le sol.

Chaque sol a une capacité raisonnablement définie d'adsorption des cations. Le pourcentage de cette capacité qui est satisfait par le sodium est appelé pourcentage de sodium échangeable. Lorsque le pourcentage de sodium échangeable dépasse 10 à 20, le sol se trouve dans un état physique médiocre, surtout si la teneur en sel soluble est faible. Les sols à texture grossière peuvent tolérer un pourcentage plus

élevé de sodium échangeable que les sols à texture fine, avant que leur état physique se détériore. De même, les sols ayant une forte teneur en matières organiques peuvent tolérer un pourcentage plus élevé de sodium échangeable que les sols ayant une faible teneur en matières organiques.

Bien que les cations adsorbés dans les sols soient unis chimiquement aux particules de sol, ils peuvent être remplacés par, ou échangés contre d'autres cations dissous dans l'eau du sol. L'application d'amendements chimiques a pour objet de fournir du calcium à l'eau du sol pour remplacer le sodium adsorbé.

Lorsque l'eau d'irrigation et un amendement qui fournit du calcium soluble sont appliqués sur un sol ayant des particules dispersées et des pores de petites dimensions, le calcium remplace le sodium adsorbé et permet aux particules de s'agréger afin de former des pores de plus grosse dimension. L'agrégation du sol calcique est facilitée par le mouillage et le séchage alternés, ainsi que par l'action des racines des plantes qui poussent.

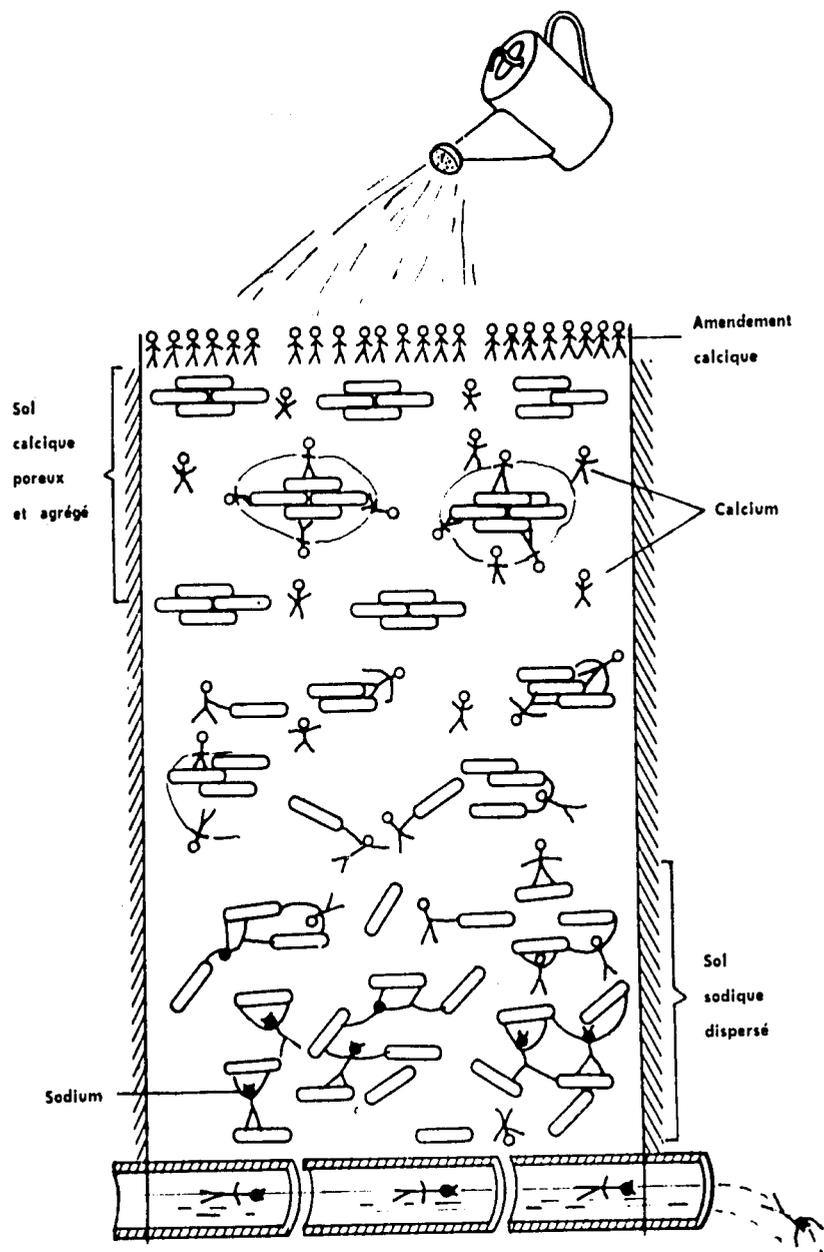
Amendements chimiques employés sur les sols sodiques

Le gypse et le soufre sont les amendements chimiques les plus couramment utilisés pour améliorer les sols sodiques.

D'autres amendements, moins couramment utilisés, sont le chlorure de calcium, le calcaire, l'acide sulfurique, les sulfates de fer et d'aluminium et la bouillie sulfocalcique. Tous ces amendements, lorsqu'ils sont utilisés dans de bonnes conditions, ont pour caractéristique commune de fournir du calcium soluble.

Gypse (sulfate hydraté naturel de calcium). Le gypse est un minéral blanc qui se trouve en grandes quantités dans des gisements naturels. Généralement, il faut le broyer avant de l'appliquer sur le sol. Le gypse est soluble dans l'eau à raison de 0,25 % et il est donc une source directe de calcium soluble. Il peut être acheté en qualités courantes, tel qu'il sort de la mine avec une pureté inférieure à 50 % et en qualité supérieure ayant une pureté égale ou supérieure à 95 %. Le degré de finesse influe sur le taux de dissolution du gypse. Pour un gypse de qualité supérieure, il faut que 75 % au moins des particules traversent un tamis à mailles de 100.

Le soufre, destiné à être appliqué sur le sol est une poudre jaune dont le degré de pureté varie entre 50 % et plus de 99 %. Il n'est pas soluble dans l'eau et ne fournit pas directement du calcium. Lorsqu'il est appliqué sur un sol, le soufre est oxydé lentement par les micro-organismes en présence de l'air et de l'eau et se transforme en acide sulfurique. S'il y a de la chaux dans le sol, elle réagit avec l'acide sulfurique pour former du gypse et de petites quantités de bicarbonate de calcium. Le soufre finement broyé réagira plus rapidement dans le sol que le produit à monture grossière, mais ce dernier est plus facile à appliquer et moins irritant pour la peau et les yeux.



Lorsque l'eau d'irrigation et un amendement qui fournit du calcium soluble sont appliqués à un sol ayant des particules dispersées et des pores de petites dimensions, le calcium remplace le sodium adsorbé et permet aux particules de s'agréger afin de former des pores de plus grosse dimension. L'agrégation du sol calcique est facilitée par le mouillage et le séchage alternés, ainsi que par l'action des racines des plantes qui poussent.

Le chlorure de calcium est un sel très soluble qui fournit directement du calcium. Son degré de pureté est généralement supérieur à 95 %.

Le calcaire (carbonate de calcium) se trouve en gisements dans de nombreux endroits et il faut le broyer avant de l'utiliser comme amendement pour le sol. Il est pratiquement insoluble dans les sols alcalins, mais il peut se dissoudre lentement dans les sols acides. Le taux auquel il se dissout et fournit du calcium soluble dépend de son degré de finesse. Les écumes de défécation des sucreries sont une source appréciable de carbonate de calcium pour les applications sur les sols, en raison de la finesse des particules. La chaux est parfois appliquée sur les sols non calcaires en même temps que des amendements acides ou formant de l'acide.

L'acide sulfurique est un liquide huileux et corrosif d'une pureté d'environ 95 % en général. Après application sur des sols contenant de la chaux, il réagit immédiatement avec la chaux pour former du gypse et fournit ainsi indirectement du calcium soluble.

Le sulfate de fer (coppérasine) et le **Sulfate d'alumine** (alun) sont des matières solides et granuleuses qui généralement sont très pures et sont solubles dans l'eau. Lorsqu'ils sont appliqués sur un sol, ils se dissolvent dans l'eau du sol et se décomposent pour former de l'acide sulfurique qui, à son tour, fournit du calcium soluble par réaction avec la chaux.

Bouillie Sulfocalcique (polysulfure de calcium) est un liquide alcalin, jaune brun, qui, généralement, contient 24 % environ de soufre. La teneur en calcium est généralement égale au quart de celle du soufre et l'action de la bouillie dans le sol dépend principalement de sa teneur en soufre. De même que le soufre à l'état libre, il doit d'abord être oxydé en acide sulfurique, puis il réagit avec la chaux pour produire un sel de calcium soluble.

Votre sol a-t-il besoin d'un amendement chimique ?

Il se peut qu'il en ait besoin si sa condition physique est médiocre ou s'il est salin.

La meilleure façon de déterminer le besoin en amendement consiste à faire des analyses chimiques pour déterminer le sodium adsorbé.

Les sols en mauvais état physique absorbent lentement l'eau, forment des croûtes solides en séchant et sont difficiles à labourer. Si cette situation est due à la présence de sodium adsorbé (attaché) sur des particules de sol, l'application d'un amendement donnera de bons résultats. Certains sols, qui ne contiennent pratiquement aucun sodium adsorbé, sont en état physique médiocre en raison de leur forte teneur en argile, ou d'un manque de matière organique, ou parce qu'ils ont été cultivés à l'état humide. Ces sols ne bénéficient pas de l'application d'amendements.

Un grand nombre de sols salés contiennent un excès de sodium adsorbé et peuvent cependant être dans un état physique satisfaisant, en

raison de la présence de sels solubles. Cependant, lorsqu'on enlève les sels solubles par lessivage, le sodium adsorbé demeure généralement dans le sol et aggrave l'état physique du sol à moins que l'on n'applique un amendement.

On peut supposer qu'il y a présence de sodium adsorbé si un dépôt noir de matière organique apparaît à la surface du sol lorsqu'il sèche, mais la seule façon certaine de déceler un excès de sodium adsorbé consiste à faire analyser des échantillons de sol. Votre vulgarisateur local, le technicien du service local de conservation des sols, ou un laboratoire commercial, peuvent vous aider à prélever des échantillons de sol et à les faire analyser. Demandez que votre sol soit analysé pour doser le sodium adsorbé (échangeable). Si l'on dénote la présence d'une quantité appréciable de sodium adsorbé, il faut aussi analyser les échantillons de sol pour en déterminer la teneur en gypse et en chaux, ainsi que le pH. Il arrive parfois que les sols sodiques contiennent suffisamment de gypse pour remplacer le sodium adsorbé par lessivage ; dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'appliquer un amendement. Les renseignements sur la présence ou l'absence de chaux dans le sol et sur le pH sont indispensables, car ils déterminent le type d'amendements qui peuvent être appliqués.

Types d'amendements qu'il faut appliquer

Le choix d'un amendement est gouverné par :

- 1. La teneur en chaux et la valeur du pH du sol,*
- 2. Le temps nécessaire pour que l'amendement réagisse dans le sol,*
- 3. Le coût de l'amendement par unité de calcium soluble qui est fourni soit directement, soit indirectement, par réaction avec la chaux du sol.*

Tous les amendements décrits, à l'exception de la pierre à chaux, peuvent être utilisés sur les sols sodiques contenant de la chaux. Il ne servirait à rien d'ajouter du calcaire au sol sodique contenant déjà de la chaux. L'application de soufre, d'acide sulfurique, de bouillie sulfocalcique et de sulfates de fer et d'alumine, sur des sols ne contenant pas de chaux a tendance à les rendre acides. Lorsque la quantité de ces acides ou amendements formant des acides risquerait de rendre le sol trop acide (pH égal ou inférieur à 6), le choix de l'amendement sera limité au gypse, ou au chlorure de calcium, à moins qu'on n'applique de la chaux. L'application de calcaire seulement sur des sols sodiques exempts de chaux a plutôt des effets bénéfiques, mais son efficacité n'est pas grande si le pH est égal ou inférieur à 7.

Malheureusement, les amendements meilleur marché réagissent plus lentement que les plus coûteux. En raison de sa forte solubilité dans l'eau, le chlorure de calcium est probablement la meilleure source de calcium soluble, mais il est rarement utilisé en raison de son prix élevé. L'acide sulfurique et les sulfates de fer et d'alumine sont aussi des amendements qui agissent rapidement. L'acide sulfurique est sou-

vent suffisamment bon marché pour être appliqué dans les champs, mais l'emploi de sulfates de fer et d'alumine est généralement trop coûteux. En raison de leur coût relativement faible, le gypse et le soufre sont les amendements les plus communément utilisés. Le taux de réaction du gypse est limité uniquement par sa solubilité modérée. En plein champ, l'application de 0,90 à 1,20 m d'eau d'irrigation par 0,4 hectare est nécessaire pour dissoudre 4 ou 5 tonnes de gypse de qualité supérieure.

Comme le soufre doit d'abord être transformé par oxydation en acide sulfurique par les micro-organismes du sol avant de pouvoir donner une réaction, il est un amendement à action lente. Le soufre, sous forme de bouillie sulfo-calciq, doit également être oxydé, mais la réaction est un peu plus rapide que dans le cas d'application de soufre à l'état libre, car la bouillie est appliquée en solution. La bouillie sulfo-calciq est l'un des amendements les plus coûteux. Le calcaire est relativement bon marché, mais il ne peut être utilisé avec profit que rarement car la plupart des sols sodiques contiennent déjà du calcaire. A moins que le sol ne soit nettement acide, la réaction de la pierre à chaux est lente.

Comment comparer le coût des amendements ?

Le coût relatif des amendements doit être déterminé d'après la quantité de calcium soluble qu'ils fournissent soit directement, soit indirectement, par réaction avec la chaux du sol.

Le tableau suivant indique les quantités des divers amendements nécessaires pour fournir 450 kg de calcium soluble lorsqu'on les applique sur un sol en bon état. Dans la plupart des cas, les valeurs indiquées sont valables pour des amendements d'une pureté de 100 %.

Quantités des divers amendements nécessaires pour fournir 450 kg de calcium soluble

Amendement	Pureté 1	Kg nécessaire pour fournir 1 000 livres (453 kg) de calcium soluble
	%	Kg
Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	100	1 950
Soufre (S)	100	360
Chlorure de Calcium ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	100	1 680
Pierre à chaux (CaCO_3)		1 130
Acide sulfurique (H_2SO_4)	95	980
Sulfate de fer ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)	100	3 150
Sulfate d'alumine ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$)	100	2 515
Bouillie sulfo-calciq	24 (exprimé en soufre 2)	1 520

1. Si les amendements ont une pureté différente de celle indiquée ci-dessus, il faut déterminer la quantité nécessaire pour fournir 1 000 livres (453 kg) de calcium soluble en divisant le pourcentage de pureté indiqué dans le tableau par le pourcentage de pureté du produit à appliquer et multiplier cette valeur par le nombre de kilos indiqués dans le tableau. Par exemple, si l'on utilise de la pierre à chaux ayant une pureté de 75 %, les calculs donneraient :

$$(100 : 75) \cdot 1 130 = 1,33 \cdot 1 130 = 1 469 \text{ kg.}$$

2. Comme les bouillies sulfo-calciques ont une composition chimique indéfinie, leur pureté est exprimée en teneur en soufre.

Quantités d'amendements qu'il faut appliquer

La quantité d'un amendement qu'il faut appliquer dépend essentiellement de la teneur du sol en sodium adsorbé et de la quantité de calcium soluble que l'amendement fournit par unité de poids. Les autres facteurs à considérer sont la qualité de l'eau d'irrigation et la texture du sol.

D'après les résultats des analyses chimiques de sols destinées à déterminer la teneur en sodium adsorbé, un agriculteur compétent peut calculer la quantité approximative de calcium soluble nécessaire à l'acre (0,4 ha) pour enlever le sodium adsorbé jusqu'à une certaine profondeur de sol. Cependant, il n'est généralement pas pratique, ni même nécessaire, d'enlever tout le sodium adsorbé de la zone des racines dans le sol par application d'un amendement. Les sols, en particulier s'ils ont une texture grossière, peuvent tolérer une certaine quantité de sodium adsorbé sans que leur état physique en souffre sensiblement et l'emploi d'eau d'irrigation de bonne qualité peut contribuer à enlever progressivement l'excès de sodium adsorbé. Une eau d'irrigation de bonne qualité du point de vue de l'enlèvement du sodium adsorbé est celle qui contient une forte quantité de calcium et de magnésium et dont le rapport calcium + magnésium/sodium est égal à 1 ou davantage.

Une bonne méthode est celle qui consiste à appliquer suffisamment d'amendement pour enlever la majeure partie du sodium adsorbé dans la couche supérieure de 15 à 30 cm de sol. Ceci améliore l'état physique de la surface du sol en peu de temps et permet de pratiquer les cultures. L'utilisation constante d'une eau d'irrigation de bonne qualité, ainsi que l'emploi de bonnes méthodes d'irrigation et de culture, contribuent à enlever davantage de sodium adsorbé surtout dans le sol sous-jacent.

En règle générale, les sols sodiques à texture fine ont besoin d'une plus grande quantité de calcium soluble que les sols à texture grossière. En règle générale, pour obtenir une amélioration sensible de l'état physique du sol, il faut appliquer sur les sols à texture grossière au moins 450 kg de calcium soluble à l'acre (0,4 hectare) et une quantité suffisante pour fournir 900 kg à l'acre (0,4 hectare) aux sols à texture fine. Les taux d'application suffisants pour fournir 900 à 1 800 kg de calcium soluble à l'acre (0,4 ha) sont couramment employés. A moins que l'on ne veuille pratiquer des cultures de très grande valeur, l'application de quantités d'amendements qui fournissent plus de 2 250 kg à 2 700 kg de calcium soluble à l'acre (0,4 ha) est rarement réalisable.

Votre vulgarisateur de comté ou un technicien du Service de la conservation des sols doit être consulté au sujet de la quantité d'amendement à appliquer, compte tenu de l'expérience locale. Après avoir choisi le type d'amendement à employer et la quantité de calcium soluble à fournir à l'acre (0,4 ha), il faut utiliser le tableau ci-dessus pour transformer les kilos de calcium soluble en kilos du type d'amendement choisi.

Manière d'appliquer les amendements

Le gypse, le chlorure de calcium, l'acide sulfurique, les sulfates de fer et d'alumine doivent être appliqués directement sur le sol, mais ils peuvent aussi être appliqués dans l'eau d'irrigation. Le soufre et la chaux doivent être appliqués directement sur le sol sous forme de poudre. La bouillie sulfo-calcique est généralement appliquée dans l'eau d'irrigation.

Le gypse, le soufre, le chlorure de calcium, le calcaire et les sulfates de fer et d'alumine sont normalement jetés à la volée sur le sol, puis incorporés dans celui-ci par labourage ou disquage. Lorsqu'on applique du soufre, il est particulièrement important de l'incorporer intimement au sol pour assurer une réaction satisfaisante. En raison des dangers que présente sa manipulation, l'acide sulfurique est généralement appliqué par le fournisseur qui utilise un équipement spécial pour le pulvériser sur la surface du sol.

Sauf lorsqu'on emploie du soufre, les sols sodiques doivent être lessivés à la suite de l'application des amendements. Le lessivage dissout et entraîne vers le bas les amendements et enlève aussi les sels solubles de sodium qui se forment lorsque le sodium adsorbé est remplacé par le calcium. Lorsqu'on applique du soufre, il faut attendre 2 ou 3 mois avant de lessiver afin que l'amendement puisse s'oxyder et former du gypse. Cependant il faut laisser le sol humide car l'eau est indispensable à l'oxydation du soufre.

Dans les sols salés on peut enlever davantage de sodium adsorbé si le sol est lessivé avant aussi bien qu'après application de l'amendement. Cependant il est presque toujours préférable d'appliquer l'amendement avant lessivage car le taux d'absorption de l'eau des sols salés et sodiques diminue généralement considérablement s'il n'y a pas présence de calcium soluble ou si celui-ci n'est pas fourni lors du lessivage des sels solubles.

Il est parfois commode d'appliquer les amendements qui sont solubles dans l'eau en les dissolvant dans l'eau d'irrigation. Il existe un équipement spécial pour mesurer les quantités d'amendements liquides ou solides incorporées à l'eau d'irrigation. Une méthode simple pour appliquer le gypse avec l'eau d'irrigation consiste à placer un sac rempli de l'amendement, ouvert sur le côté dans le fossé d'irrigation, de préférence à un déversoir où la turbulence de l'eau est très importante. Comme le gypse a une solubilité restreinte, il n'est pas pratique d'appliquer cet amendement dans l'eau d'irrigation lorsqu'il faut en apporter de grandes quantités au sol.

Points qui méritent une attention spéciale :

1. *Faites des tests, ne présumez pas.*
2. *Prélevez avec soin les échantillons de sol.*

3. *Ne vous attendez pas à ce que les amendements donnent des résultats immédiats.*
4. *Les amendements ne sont pas une panacée.*

Comme l'application des amendements entraîne généralement des dépenses très importantes, il est bon de déterminer le montant de l'amendement d'après une analyse chimique du sol. Il est utile de faire analyser votre sol tous les ans ou tous les deux ans, surtout si un amendement a été appliqué, afin de déterminer si le sodium adsorbé a diminué ou augmenté en quantité.

La valeur des analyses de sol dépend de la mesure dans laquelle l'échantillon est vraiment représentatif. Comme les sols imprégnés de sodium sont souvent très distants les uns des autres dans un même champ, il est généralement nécessaire de prélever plusieurs échantillons composés dans le champ en vue de déterminer la gamme des conditions du sol.

Après enlèvement du sodium adsorbé, les particules de sol doivent changer de structure et se réunir en granules avant que la condition physique du sol s'améliore. Ce processus demande du temps et il est provoqué par mouillage et séchage alternés, par l'action des racines des plantes qui poussent et par les matières organiques.

L'application d'un amendement ne remplace pas de bonnes façons culturales ni des méthodes d'irrigation rationnelles. Les applications d'amendements peuvent être en grande partie inefficaces si le sol n'est pas périodiquement lessivé et si la nappe phréatique ne reste pas à une profondeur suffisante pour empêcher un mouvement ascendant appréciable d'eau et de sels. Si l'eau d'irrigation contient une forte proportion de sodium et qu'elle apporte constamment du sodium adsorbé au sol, il sera nécessaire de procéder à des applications périodiques d'amendements.

CHAPITRE XI

LE RIZ EN TANT QUE CULTURE SUR LES SOLS SALÉS EN COURS D'APPROPRIATION ⁽⁵⁾

par George A. PEARSON, phyto-physiologiste,
et Alvin D. AYERS ⁽⁶⁾, ex-pédologue,
Soil and Water Research Division, Agricultural Research Service.

INTRODUCTION

La nécessité de trouver des terres supplémentaires pour les cultiver afin de nourrir les populations sans cesse croissantes a intensifié l'intérêt que portent les économistes, les agronomes et les organismes de planification du gouvernement aux divers types de terres non productives. En particulier dans les pays ayant des climats arides ou semi arides, la possibilité de répondre aux besoins futurs réside dans la mise en valeur de sols salés. Il s'agit de sols sur lesquels la plupart des plantes ne peuvent pas pousser normalement en raison de la présence de sels solubles en solution dans le sol (sols salés), de sodium échangeable à la surface des particules de sol (sols sodiques) ou les deux à la fois (sols salés et sodiques). Dans les cas extrêmes, il peut ne pas y avoir du tout de végétation.

La principale source de sel dans le sol est constituée par des minéraux naturels dont le sel est libéré par désagrégation. Il est douteux que la décomposition d'une roche puisse produire suffisamment de sel pour rendre un sol impropre à la culture. Cependant, la percolation de l'eau de pluie à travers le sol d'une région peut entraîner le sel et le transporter dans une autre région, où il peut s'accumuler et se concentrer par évaporation de l'eau. C'est ce qui s'est passé depuis plusieurs siècles et continue à se passer sur les plaines, les fonds de lac desséchés

(5) Contribution du U.S. Salinity Laboratory, Soil and Water Conservation Research Division, Agricultural Research Service, Riverside, Californie, en coopération avec l'Administration de Coopération Internationale.

(6) Actuellement directeur adjoint de l'European Regional Research Office, Agricultural Research Service, Rome, Italie.

et les bassins fermés. Dans certains cas, la salinité des sols s'explique par le fait que ceux-ci sont constitués par des sédiments déposés sous la mer au cours des siècles.

Un niveau élevé de la nappe phréatique constitue un risque grave de salinité du sol. L'évaporation de la couche superficielle ou l'absorption de l'eau par les racines des plantes près de la surface du sol tendent à produire un affaiblissement du taux d'humidité qui fait monter l'eau de la nappe phréatique et ce mouvement de l'eau peut entraîner des quantités supplémentaires de sel dans les couches supérieures du sol et les rendre plus salées. Le taux de salinisation dépend en partie de la concentration de sel dans l'eau du sol, de la profondeur de la nappe phréatique et des précipitations annuelles effectives. Plus la concentration de sel dans l'eau du sol est forte, plus le niveau de la nappe phréatique est élevé, et plus les précipitations annuelles sont faibles, plus le sol se sale rapidement. La précipitation effective est égale à la précipitation totale, moins l'eau de pluie qui ruisselle sur la surface du sol ou qui se perd par évapo-transpiration.

L'utilisation d'eau d'irrigation contenant une trop forte quantité de sel ou de l'eau d'irrigation, même de bonne qualité mal employée, peuvent rendre les sols salés. Toutes les eaux d'irrigation contiennent une certaine quantité de sel. Si la quantité d'eau appliquée n'est pas suffisante pour qu'une fraction assez importante de celle-ci passe au-delà de la zone des racines, une partie des sels contenus dans l'eau d'irrigation reste dans cette zone des racines. Le mouvement d'une quantité d'eau d'irrigation et de sel jusqu'à une profondeur située au-dessous de la zone des racines nécessite de plus fortes applications d'eau d'irrigation que celles qui sont nécessaires pour assurer la croissance des plantes. Ceci est particulièrement important dans les régions irriguées où les taux d'évaporation sont très élevés, ou bien dans lesquelles les pluies sont très faibles.

Dans certaines régions, y compris en Inde celles de grande culture de riz, la salinité du sol est provoquée par les inondations annuelles par l'eau de mer.

Le degré de salinité du sol peut s'exprimer en pourcentage de sel par unités de sol sec ou par le degré de concentration du sel dissous dans l'eau du sol. On préfère employer cette dernière valeur, car les résultats des expériences indiquent que les réactions des plantes sont étroitement liées à ce pourcentage. En général, la concentration de sel dans le sol est indiquée en parties par million ou par la conductivité électrique de la solution de sol. La conductivité électrique de la solution de sol est facile à déterminer au moyen d'un extrait de sol saturé et on l'appelle la conductivité électrique de l'extrait saturé (EC_s). Le processus utilisé pour faire cette mesure est décrit dans le Manuel du Département de l'Agriculture des Etats-Unis N° 60 (15) (3). Pour transformer les données relatives au pourcentage de sel dans un sol à

(7) Les chiffres en italique et entre parenthèses réfèrent aux ouvrages cités dans la Bibliographie.

l'état sec en concentration de sel dans la solution de sol, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques du sol en matière de rétention de l'humidité. En d'autres termes, non seulement il est nécessaire de connaître la quantité de sel dans une unité de volume de sol, mais il est nécessaire aussi de connaître la quantité d'eau dans laquelle le sel est dissous.

L'appropriation des sols salés nécessite une réduction de la teneur en sel soluble jusqu'à ce que les sels n'entravent plus sensiblement la culture des plantes. Le seul moyen pratique d'enlever ces sels du sol consiste à laver celui-ci avec de l'eau, processus couramment appelé le lessivage. Pour s'assurer qu'une quantité suffisante d'eau traversera un sol salin pour en enlever tout le sel en excédent, il est généralement nécessaire de laisser l'eau s'accumuler sur la surface (fig. 1).

Les sols peuvent devenir sodiques par l'utilisation d'eaux d'irrigation qui ont un rapport défavorable sodium/calcium. De même ils peuvent devenir sodiques à la suite de l'évaporation de nappes phréatiques élevées lorsque l'eau du sol a un tel rapport. Les sols sodiques peuvent être appropriés en y ajoutant une source de calcium soluble qui remplace le sodium sur les particules de sol. Il s'agit d'une réaction



1. L'accumulation de l'eau sur la surface du sol entraînera le sel avec l'eau.

d'échange, et le sodium ainsi que le calcium sont alors du sodium échangeable et du calcium échangeable. Après avoir été remplacé par du calcium, le sodium doit être éliminé de la zone des racines. Ainsi, la mise en valeur d'un sol sodique, de même que celui d'un sol salé nécessite une opération de lessivage.

Etant donné que la majorité des cultures ne peuvent pas survivre à une immersion prolongée, la production végétale est généralement impossible sur les sols salés en cours de lessivage. Dans une région où les sols sont salés mais qui peuvent par ailleurs convenir à la culture du riz, et pour lesquels on dispose d'eau d'irrigation à faible teneur en sel, la culture peut souvent être pratiquée pour fournir certains revenus pendant la durée du processus de lessivage.

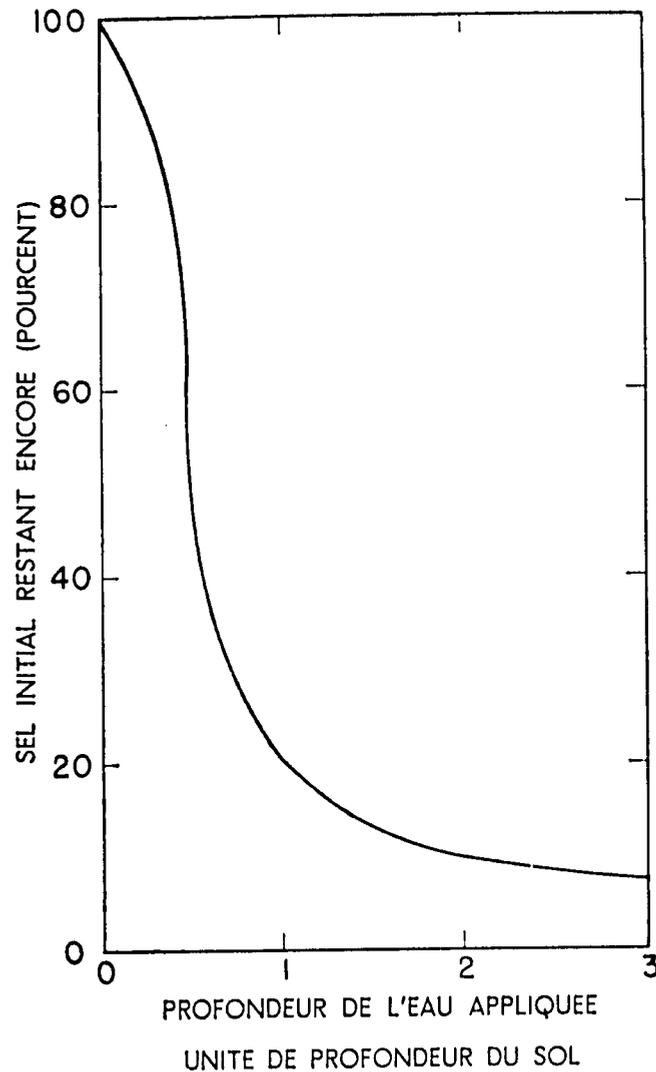
Mouvement des sels dans les sols submergés

L'eau qui contribue à lessiver le sol est la fraction de l'eau appliquée qui traverse effectivement la zone des racines. Cette eau, appelée eau de lessivage, est inférieure au volume total de l'eau appliquée en raison de l'évapo-transpiration et du ruissellement.

Les résultats d'une expérience de lessivage effectuée sur un sol salin dans la Coachella Valley de Californie par Reeve et associés (12, 13) indiquent que lorsqu'une unité de profondeur d'eau de lessivage a traversé une égale profondeur de sol, 20 % seulement de la quantité initiale de sel restent dans cette profondeur de sol et 10 % environ dans la partie supérieure (fig. 2). Lorsque 10 cm d'eau de lessivage sont passés, par exemple, 20 % seulement du sel initialement présent dans les 10 cm de sol de la surface subsistent et 10 % seulement de celui qui se trouvait dans les 5 cm supérieurs subsistent encore.

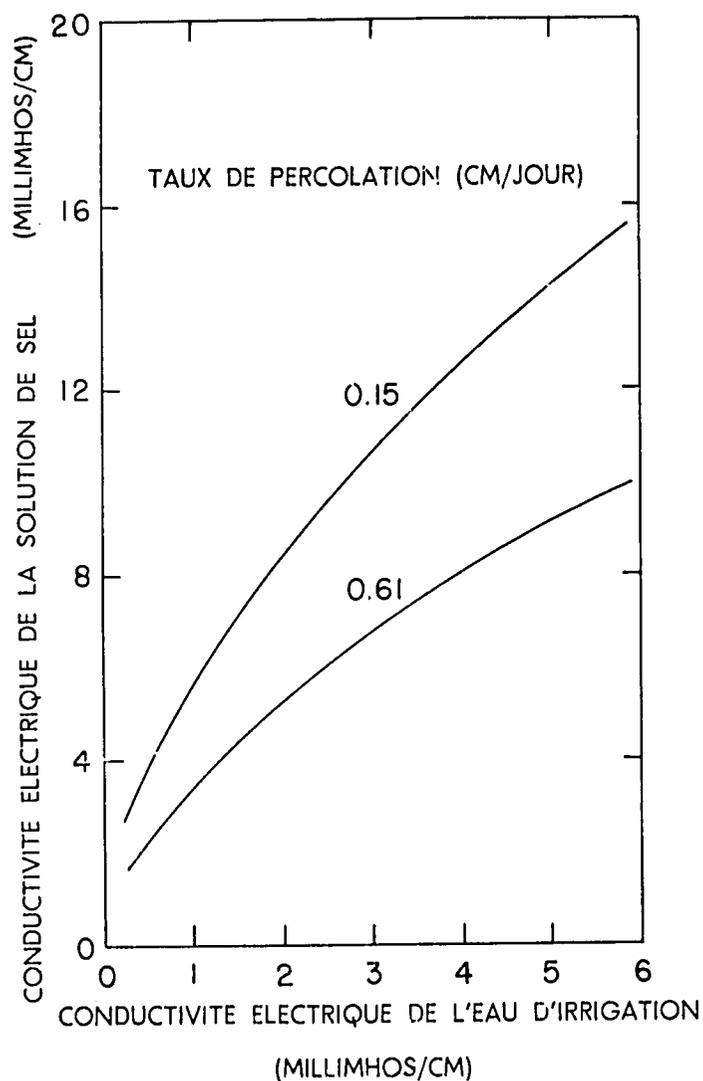
Le temps nécessaire pour réduire la salinité d'un sol à un niveau voulu par lessivage varie selon le taux de percolation, c'est-à-dire le taux auquel l'eau traverse le sol, et la quantité d'eau nécessaire pour enlever les sels en excès. Un sol qui sert à cultiver le riz a généralement, lorsqu'il est submergé, une faible perméabilité et un faible taux de percolation, soit en raison des conditions naturelles, soit en raison d'une déflocculation artificielle. Cette condition permet de produire du riz avec de plus faibles quantités d'eau, mais cela retarde aussi la rapidité de lessivage.

Une expérience a été faite au Laboratoire de salinité des Etats-Unis pour déterminer l'effet de la salinité initiale du sol, de la salinité de l'eau d'irrigation, et du taux de percolation sur la salinité finale du sol et la croissance du riz (9). Les résultats indiquent que les principaux facteurs qui déterminent la salinité finale du sol sont la teneur en sel de l'eau d'irrigation et le taux de percolation. Les sels solubles initialement présents dans le sol sont entraînés vers le bas et ont relativement peu d'effet sur sa salinité finale. On a constaté que la croissance du riz était liée à la concentration du sel dans la solution de sol à l'intérieur de la zone des racines.



2. *Rapport entre la profondeur de l'eau de lessivage appliquée sur un sol salin et le pourcentage de la teneur initiale en sel soluble restant dans les profondeurs proportionnelles du sol. (Données extraites d'une expérience effectuée par Reeve et associés.) (12, 13).*

⁴ Les courbes de la figure 3 indiquent : 1) que la conductivité électrique de la solution de sol est proportionnelle à la conductivité électrique de l'eau d'irrigation appliquée ; 2) que la conductivité de la solution de sol associée avec l'emploi d'une quantité donnée d'eau d'irrigation est plus élevée si la percolation est lente, et 3) que, dans tous les



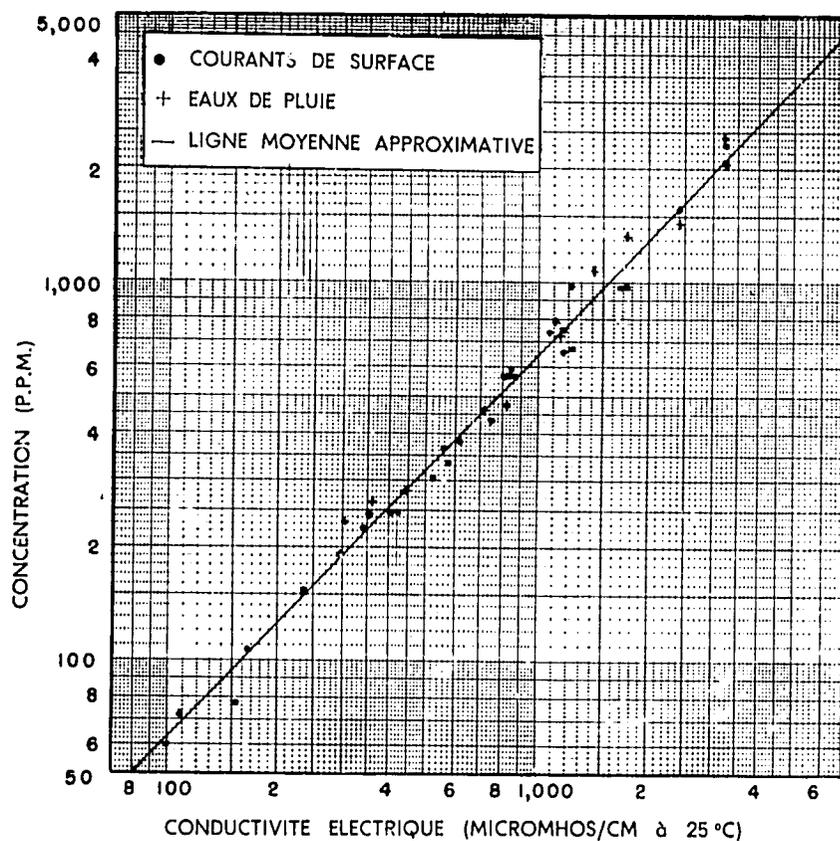
3. Rapport entre la conductivité électrique de l'eau d'irrigation appliquée et la conductivité de la solution de sol pour un taux de percolation de 0,15 et 0,61 centimètre par jour, au cours d'une expérience de culture du riz dans des récipients placés dans une serre (9).

cas, la conductivité de la solution de sol est plus élevée que celle de l'eau d'irrigation appliquée. La seconde et la troisième de ces relations sont dues à la perte d'eau par évapo-transpiration. Etant donné que les rapports indiqués sur la figure 3 ont été influencés par la quantité d'évapo-transpiration qui s'est produite lors de l'expérience décrite, ils

ne représentent pas nécessairement celle qui se produit dans d'autres conditions.

Comme la concentration du sel dans l'eau d'irrigation est parfois exprimée en partie par million, la relation générale entre la concentration de sel ainsi exprimée et la conductivité électrique des eaux de surface est indiquée sur la figure 4.

La conductivité électrique de l'eau d'irrigation qui pénètre dans la surface du sol est plus élevée que celle de l'eau d'irrigation appliquée en raison de la perte d'eau par évaporation. A son tour, la conductivité électrique de la solution de sol dans la zone des racines est supérieure à celle de l'eau qui entre dans la surface du sol, en raison de l'absorption et de la transpiration de l'eau dans les plantes.



5. Pourcentage d'eau d'irrigation ayant une conductivité électrique de 0 à 6 millimhos par centimètre, qui doit traverser la zone des racines d'un sol, afin que la conductivité électrique de la solution de sol (ECes) soit limitée à 4, 8, 12 ou 16 millimhos. (Données extraites d'une expérience effectuée par Reeve (12).

Ces pertes par évapo-transpiration ne comportent aucune élimination de sel en dehors de la faible quantité absorbée par les plantes. Lorsque le taux de percolation diminue, ces pertes s'accroissent relativement. Ceci augmente la différence entre la conductivité électrique de la solution de sol et celle de l'eau d'irrigation.

Les faibles taux de percolation qui sont caractéristiques des sols qui servent à cultiver du riz signifient que des proportions relativement faibles des eaux d'irrigation appliquées traversent la zone des racines. Les besoins en eau de lessivage, c'est-à-dire la fraction de l'eau d'irrigation qui doit traverser la zone des racines pour empêcher qu'il s'y accumule une quantité excessive de sel soluble, dépendent de la teneur en sel de l'eau d'irrigation appliquée et du degré de salinité qui peut être tolérée dans la solution de sol. Le pourcentage d'une eau appliquée ayant une conductivité électrique de 0 à 6 millimhos par centimètre qui doit traverser la zone des racines d'un sol pour limiter la conductivité de la solution de sol à chacun des quatre niveaux, est indiqué sur la figure 5.

La figure 5 indique que si, par exemple, on désire limiter la conductivité électrique de la solution de sol à 4 millimhos par centimètre dans un sol où 20 % seulement de l'eau appliquée traversent la zone des racines, la conductivité de l'eau appliquée ne doit pas dépasser 0,8 millimho ; cependant, dans un sol où 50 % de l'eau d'irrigation traversent la zone des racines, la même limite de salinité du sol peut être maintenue quand on applique de l'eau ayant une conductivité électrique aussi grande que 2 millimhos.

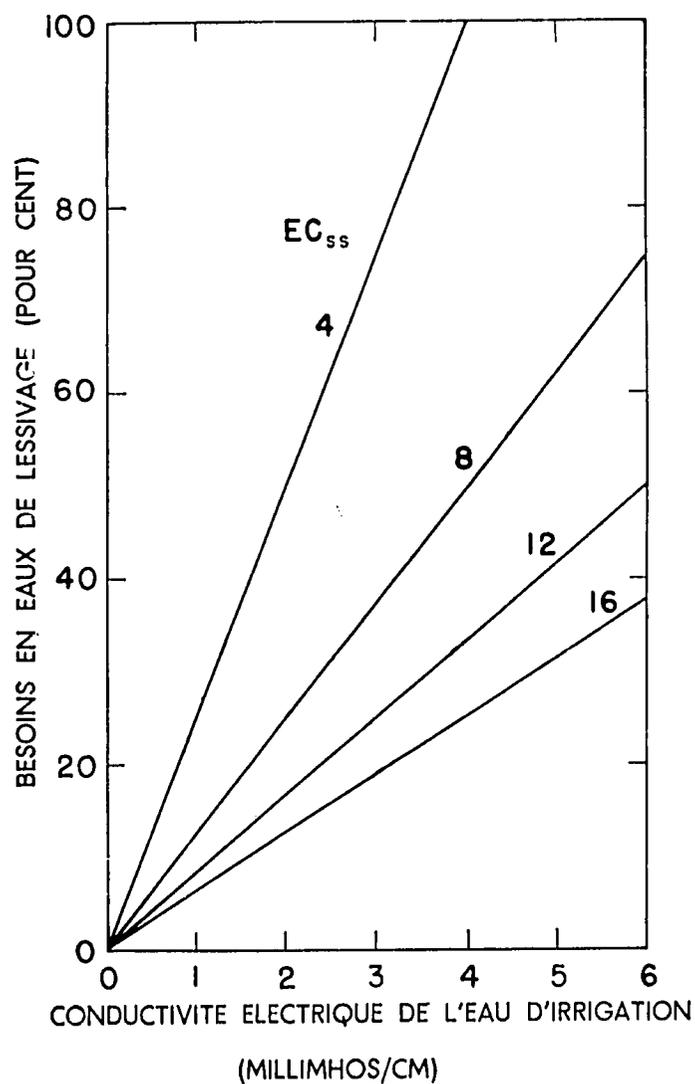
Effets de la salinité sur la croissance du riz

La pression osmotique d'une solution de sel est proportionnelle à sa teneur en sel. Une augmentation de la pression osmotique d'une solution de sol permet plus difficilement à la racine des plantes d'absorber l'eau pour remplacer celle qui a été perdue par transpiration. En conséquence, la croissance des plantes, y compris celle du riz, est retardée dans les sols salins.

La salinité retarde la germination et réduit le pourcentage final de germination (1, 2). Des données non publiées d'expériences de cultures sur sable effectuées au Laboratoire de salinité des Etats-Unis indiquent qu'une réduction de 50 % du taux de germination du riz dans les dix jours qui ont suivi la plantation était associée à une conductivité électrique légèrement supérieure à 20 millimhos par centimètre. (Les chiffres de réduction indiqués ici et plus loin représentent des différences entre la germination ou la croissance pour des valeurs de salinité indiquées et la germination ou la croissance maximale dans des conditions comparables et sur des sols non salés.) Parmi les 12 variétés de riz étudiées, on a constaté à cet égard de faibles différences. Les résultats indiquent que la tolérance du riz à l'égard du sel pendant la germination est comparable à celle des variétés les plus tolérantes d'orge (1). Kapp (6) signale qu'en appliquant 373 kg de sel à l'acre (0,4 ha) sur

un sol non salé avant la plantation du riz on a réduit le rendement en grains de 15 % environ. Il déclare que cette réduction du rendement semble être due principalement à une réduction de la germination et en partie à la destruction de quelques-unes des jeunes plantules.

Bien que le riz germe dans des sols très salés, les jeunes plants sont très sensibles au sel. Lorsqu'on a planté des grains de riz germés de la variété Caloro dans un sol salin, les germes se sont développés



4. Concentration de sel dans les eaux d'irrigation en partie par million, en fonction de leur conductivité électrique (15).

lorsque les valeurs de conductivité électrique de la solution de sel (millimhos par centimètre) allaient jusqu'à environ 4, puis ils ont commencé à pousser, mais ils ont dépéri lorsque les valeurs étaient comprises de 4 à 11 et ils ont cessé de se développer lorsque la valeur était supérieure à 11 (9). Les travaux préliminaires sur la tolérance au sel des jeunes plants de riz ont indiqué qu'elle peut différer profondément selon les variétés. Par exemple, en se fondant sur le nombre de plants qui ont survécu jusqu'à 2 semaines, Kala-Rata (Inde) est plus résistant au sel que Agami Montakhab I (Egypte), Asahi I (Japon) ou Caloro (Etats-Unis).

Lors d'expériences effectuées à la Station expérimentale agricole de l'Arkansas, Kapp (6) signale que la salinité du sol au moment de la plantation était beaucoup plus nuisible au riz qu'une salinité du sol de degré équivalent provoquée artificiellement lorsque les plants avaient 6 semaines. Del Valle et Babé (4) ont étudié l'effet sur le riz de la salinité du sol provoquée artificiellement 30, 60 et 90 jours après la plantation et ont constaté que la salinité est surtout nuisible si elle est provoquée très tôt. Lorsque les plants vieillissent, ils deviennent plus tolérants au sel. A 90 jours, ils étaient à peine affectés par des concentrations de sel dans le sol aussi élevées que 1 %. Ota et al (7) ont constaté que la diminution des rendements en grains était proportionnelle à la durée des traitements par du sel. Des études effectuées au Laboratoire de salinité des Etats-Unis ont aussi prouvé qu'au-delà du stade de la plantule, la tolérance au sel du riz augmente avec l'âge. Des jeunes plants cultivés dans des sols non salins pendant 3 ou 6 semaines ont survécu lorsqu'ils ont été transplantés dans des sols salins ayant une conductivité électrique de 0 à 14 millimhos par centimètre respectivement (9). Dans une autre expérience effectuée au Laboratoire (11) et au cours de laquelle on a provoqué artificiellement différents degrés de salinité dans le sol où étaient cultivés les plants de riz, ces niveaux ayant été maintenus jusqu'à maturation des plants, le poids total des épis était fonction du stade de développement auquel la salinité avait été provoquée. Lorsqu'on a maintenu une conductivité électrique de 3 millimhos par centimètre depuis le début du tallage (4 semaines après les semailles) jusqu'à maturité, le poids sec des épis a sensiblement diminué. Lorsqu'on a maintenu des conductivités de 4 à 8 millimhos par centimètre depuis le stade final du tallage ou le stade de la floraison (c'est-à-dire 9 ou 14 semaines après les semailles), jusqu'à la maturité, le poids a été sensiblement plus faible. La réduction de la croissance provoquée par une salinité donnée n'a pas varié directement en fonction de la longueur du temps pendant lequel les plants ont été cultivés dans ces conditions.

Il a été signalé par Shimoyama et Ogô (14), ainsi que par Iwaki (5) que la salinité augmentait le nombre de fleurons stériles par panicle de riz. Ota et Cie (8) ont constaté que la salinité provoquait une diminution du pourcentage de germination des grains de pollen de riz, ce qui entraînait un pourcentage plus élevé de fleurons stériles. La

salinité pendant la période de maturation des grains, selon les études d'Iwaki, avait peu d'effet sur le rendement (5).

En ce qui concerne la production de grains, des expériences préliminaires indiquent qu'Agami Montakhab I (Egypte) est un peu plus résistant au sel qu'Asahi I (Japon), Caloro (Etats-Unis) ou Kala-Rata (Inde) et que les trois variétés précitées ont à peu près le même degré de tolérance.

D'une manière générale, on peut dire que le riz est très tolérant au sel pendant la germination, mais qu'il y est très sensible pendant les premiers stades du développement de la plantule, que sa résistance s'accroît progressivement pendant la période de tallage pour redevenir sensible au moment de la floraison, pour être de nouveau tolérant pendant la période de maturation du grain. On a constaté en outre que certaines variétés de riz semblaient plus tolérantes au sel que d'autres. Une salinité extrême empêche de cultiver d'une manière rentable n'importe quelle variété de riz.

L'effet de la salinité sur la croissance du riz varie en fonction des différents éléments de la croissance — hauteur, nombre de talles, poids du grain, etc. (5, 9). La croissance végétative est moins affectée que la production de grains. Les niveaux de salinité représentés par les valeurs de conductivité électrique d'une moyenne de 11 millimhos par centimètre pendant toute la période de croissance réduisent la hauteur de moins de 20 %, le nombre de talles mûres de 45 %, le poids sec de paille de 55 %, le nombre de panicules de 70 %, le poids sec de grains plus la paille de 75 %, et le poids de grains seul de 95 % (9). L'effet marqué de la salinité sur les rendements en grains est probablement dû à la réduction du nombre des panicules et à la diminution de la germination du pollen. Une réduction de 50 % du rendement en grains pour la variété Caloro était associée à une conductivité électrique moyenne de 8 millimhos par centimètre sur des échantillons de solution de sol extraits de la zone des racines pendant toute la période de croissance (9).

Il est souvent difficile de déceler l'existence d'un problème de salinité dans une rizière avant l'apparition des grains. Ceci contraste avec les résultats obtenus avec l'orge (3). Alors qu'en présence de sel, les plants de riz grandissent assez bien mais produisent très peu de grains, les plants d'orge grandissent médiocrement mais produisent presque autant de grains que lorsqu'il n'y a pas de sel.

La tolérance relative au sel d'un grand nombre de plantes a été déterminée et la liste en a été dressée par le Laboratoire de salinité des Etats-Unis (15) sur la base du rapport entre le rendement et la conductivité électrique de l'extrait saturé EC_e dans la zone des racines. Une plante est classée comme sensible au sel si son rendement est réduit de 50 % à un niveau moyen de salinité saisonnière représentée par une conductivité électrique EC_e de 4 millimhos par centimètre. Etant donné qu'un sol contient à peu près la moitié de l'humidité que peut avoir un champ à saturation, la conductivité électrique de la solution de sol est environ deux fois plus élevée dans le sol d'un champ que dans un sol

saturé. En conséquence, les plantes sensibles au sel ($EC_e = 4$) qui sont cultivées normalement dans des sols dont la teneur en humidité est égale ou inférieure à celle que peut contenir le champ, peuvent supporter des niveaux de salinité représentés par des valeurs de conductivité électrique égale ou supérieure à 8 millimhos par centimètre dans l'humidité du champ. Sur cette base, le riz, qui est normalement cultivé dans un sol saturé, doit être considéré comme sensible au sel, car il ne peut tolérer que 8 millimhos par centimètre dans l'extrait saturé.

On a constaté que le riz était modérément résistant au sodium échangeable. Une diminution de 50 % du rendement en grains de la variété Caloro était provoquée par un pourcentage de sodium échangeable (PSE) de 38 (10). En l'absence d'un réel problème de salinité, il peut être possible de cultiver du riz pendant la période d'appropriation des sols contenant des proportions modérées de sodium échangeable (PSE), à condition que les exigences en matière de lessivage soient respectées.

Culture du riz et lessivage

En raison de la sensibilité du riz au sel pendant le stade initial de sortie des plantules, un champ qui doit être ensemencé en riz avec un semoir en ligne doit être pratiquement non salin en surface. Si les semences sont semées à la volée dans l'eau ou immédiatement avant la submersion, on peut tolérer une légère salinité en surface. En Asie, le riz est parfois cultivé dans un sol non salin en couches de pépinière, puis transplanté dans un sol salin lorsque les jeunes plants ont de 4 à 6 semaines ; ils peuvent alors tolérer une teneur en sel un peu plus élevée en surface que les plants plus jeunes. Les terres qui doivent être utilisées pour la transplantation du riz doivent être choisies soigneusement, aussi bien en ce qui concerne le drainage que l'absence de salinité du sol. Les sols à forte salinité dans lesquels le riz doit être transplanté peuvent parfois nécessiter un lessivage préliminaire de la couche de surface. Pour la plantation sur sol salin, il faut choisir les variétés de riz qui semblent relativement tolérantes au sel.

Le riz est une plante à racines relativement peu profondes. En conséquence, pour établir une rizière, il n'est pas nécessaire d'entraîner les sels à de grandes profondeurs. Un lessivage constant pendant toute la période de croissance du riz affecte le sol à des profondeurs considérables et peut permettre de cultiver une plante à racine profonde après la récolte du riz.

Pendant la première partie de la saison de croissance, lorsque le riz est le plus sensible au sel, l'irrigation des planches de semis et de la surface des sols salins sur lesquels le riz est cultivé doit si possible être faite avec de l'eau de pluie ou avec de l'eau contenant très peu de sel. Dans certaines régions, on peut utiliser à cet effet l'eau de la fonte des neiges. Plus tard, pendant la saison, la teneur en sel de l'eau utilisée pour le lessivage est susceptible d'augmenter par suite de la réduction du volume de l'eau dans une rivière ou de la nécessité de compléter l'eau

de la rivière par de l'eau de puits ayant une plus forte teneur en sel. Cependant, les plants sont capables de tolérer des degrés de salinité plus élevés. Dans des régions où l'évaporation est très forte, il peut se révéler nécessaire de remplacer fréquemment l'eau qui est à la surface du sol pour combattre l'augmentation de la salinité de l'eau de surface qui est due à l'évaporation avant que l'eau ne pénètre dans le sol.

Pour pouvoir effectuer certaines cultures dans des régions qui sont salines, il est nécessaire de lessiver périodiquement les sels se trouvant dans la zone des racines. Pour cette raison, le riz est parfois inclus dans une rotation des cultures, en tant que culture de lessivage. Un tel programme peut permettre de cultiver d'autres plantes, avec profit, en les alternant. La gravité du problème de la salinité détermine la fréquence avec laquelle le riz doit être inclus dans la rotation. Dans certaines régions, les sols peuvent avoir besoin d'être dessalés constamment. Dans ce cas il sera impossible de cultiver une plante autre que les variétés de riz les plus résistantes au sel.

RÉSUMÉ

L'appropriation des sols imprégnés de sel (sols salins, sodiques ou salins-sodiques) nécessite le lessivage du sel en excès dans la zone des racines, c'est-à-dire qu'il faut l'enlever avec de l'eau. Cette opération nécessite de faire séjourner l'eau à la surface. Le riz, en raison de sa tolérance à une submersion prolongée peut souvent être cultivé avec profit sur des sols en cours de lessivage si les conditions sont par ailleurs propices à cette culture et si l'on dispose d'eaux d'irrigation à faible teneur en sel.

D'une manière générale, le riz est très résistant au sel pendant la germination, mais devient très sensible pendant le stade initial de la plantule. Si sa tolérance s'accroît au stade du tallage et pendant la maturation, il redevient sensible au moment de la floraison. Certaines variétés semblent mieux résister au sel que d'autres.

Les sels solubles initialement présents dans la zone des racines d'un sol sont éliminés par l'eau de lessivage. La réduction de la salinité du sol dans la zone des racines à un niveau tolérable par les plantes dépend principalement du passage de l'eau d'irrigation à travers cette zone en quantité suffisante pour y empêcher l'accumulation de sel. Le degré final de salinité du sol soumis au lessivage varie selon la teneur en sel de l'eau d'irrigation et le taux de percolation. Le temps nécessaire pour réduire la salinité d'un sol à un niveau souhaitable, grâce au lessivage, varie en conséquence selon le taux de percolation et la quantité d'eau nécessaire.

Un champ qui doit être semé en riz au moyen de semoir en ligne doit absolument avoir un sol non salé en surface. Si les graines sont semées à la volée dans l'eau ou immédiatement avant la submersion, on peut tolérer une légère salinité de la surface du sol. En Asie, le riz est parfois cultivé en sol non salin dans des couches de semis,

puis repiqué dans un sol salin lorsqu'il a de 4 à 6 semaines. Le sol d'un champ à forte salinité peut avoir besoin d'être lessivé en surface avant le repiquage.

Le système racinaire du riz est relativement peu profond. En conséquence, il n'est pas nécessaire d'entraîner les sels à une grande profondeur pour cultiver le riz. Un lessivage constant pendant toute la période de croissance du riz atteint le sol à une profondeur très grande et peut permettre de cultiver après le riz une plante à racines profondes.

La croissance du riz est retardée par la salinité du sol. La production des grains en souffre beaucoup plus que la croissance végétative. Le riz peut produire la moitié de son rendement en grains seulement si la conductivité moyenne de la solution de sol pendant la période de croissance est égale ou inférieure à 8 millimhos par centimètre.

Sur des sols prédisposés à la salinité, le riz est parfois inclus dans la rotation des cultures afin de procurer des revenus aux exploitants pendant les lessivages périodiques. Un tel programme peut permettre de cultiver avec profit d'autres plantes entre-temps. Dans certaines régions, les sols peuvent devenir salins assez rapidement de sorte qu'ils doivent être constamment lessivés. Dans ce cas, il est impossible de cultiver aucune plante, sauf les variétés de riz les plus résistantes au sel. Une salinité extrême empêche de cultiver avec profit n'importe quelle variété de riz.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) AYERS, A.D. 1953. *Germination and emergence of several varieties of barley in salinized soil cultures*. Agron. Jour. 45 : 68-71.
- (2) AYERS, A.D. and HAYWARD, H.E. 1948. *A method for measuring the effects of soil salinity on seed germination with observations on several crop plants*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 13 : 224-226, illus.
- (3) AYERS, A.D., BROWN, J.W. and WADLEIGH, C.H. 1952. *Salt tolerance of barley and wheat in soil plots receiving several salinization regimes*. Agron. Jour. 44 : 307-310.
- (4) DEL VALLE, C.G., and BABÉ, E. 1947. *Tolerancia del arroz al cloruro de sodio en cultivos de aniego*. (Sodium chloride tolerance of irrigated rice.) Estac. Expt. Agron. Habana Bol. 66, 16 pp., illus.
- (5) IWAKI, S. 1956. *Studies on the salt injury in rice plant*. Ehime Univ. Mem. Sect. VI (Agr.), v. II, N° 1, 156 pp., illus. (In Japanese. English summary, pp. 141-149.)
- (6) KAPP, L.C. 1947. *The effect of common salt on rice production*. Ark. Agr. Expt. Sta. Bul. 465, 7 pp.
- (7) OTA, K., OGO, T., and SASAI, K. 1955. *Studies on the saline injury on crops. IX. On the influences of the saline irrigation water upon the shape of rice kernels*. Okayama Prefect. Agr. Expt. Sta. Spec. Bul. 51, pp. 21-26, illus. [In Japanese English summary, p. 26.]
- (8) OTA, K., YASUE, T., and IWATSUKA, M. 1956. *Studies on the salt injury to crops. X. Relations between the salt injury and the pollen germination in rice*. Gifu Univ. Faculty Agr. Res. Bul. 7, pp. 15-20, illus. [In Japanese. English summary, p. 19.]
- (9) PEARSON, G.A. 1959. *Factors influencing salinity of submerged soils and growth of caloro rice*. Soil Sci. 87 : 198-206, illus.

(10) PEARSON, G.A. and BERNSTEIN, L. 1958. *Influence of exchangeable sodium on yield and chemical composition of plants. II. Wheat, barley, oats, rice, tall fescue, and tall wheatgrass.* Soil Sci. 86 : 254-261, illus.

(11) PEARSON, G.A. and BERNSTEIN, L. 1959. *Salinity effects at several growth stages of rice.* Agron. Jour. 51 : 654-657, illus.

(12) REEVE, R.C. 1957. *The relation of salinity to irrigation and drainage requirements.* Third Cong. of Inter. Comm. on Irrig. and Drain. Trans. 5 : 10 175-10 187, illus.

(13) REEVE, R.C., PILLSBURY, A.F., and WHITCOX, L.V. 1955. *Reclamation of a saline and high boron soil in Coachella valley of California.* Hilgardia 24 : 69-91, illus.

(14) SHIMOYAMA, T., and OGO, T. 1956. *Studies on the saline injury on crops. II. On the effects on the growth and the harvest of the rice plant as produced by the saline irrigation at different growing periods.* Okayama Prefect. Agr. Expt. Sta. Spec. Bul. 54, pp. 21-28. [In Japanese. English summary, pp. 27-28.]

(15) U.S. SALINITY LABORATORY STAFF. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* U.S. Dept. Agr. Handb. 60, 160 pp., illus.

(1) Richards L.A., Bower C.A. et Fireman, Milton. *Tests for Salinity and Sodium Status of Soil and of Irrigation water.* (Essais pour déterminer la salinité du sol et sa teneur en sodium ainsi que celle de l'eau d'irrigation.) Circulaire 982 du Département de l'Agriculture des Etats-Unis.

(2) Les sols sodiques sont parfois appelés sols à sodium à alcali ou à alcali noir. Les zones restreintes constituées par des sols sodiques sont appelées taches alcalines.

(3) Pour se procurer ce Manuel, s'adresser au Superintendent of Documents, Government Printing Office, Washington 25 D.C., 2 dollars l'exemplaire.

(4) Richards, L.A., *Availability of Water to crops on saline soils.* (Eau disponible pour les cultures sur les sols salins.) U.S. Département Agr. Agri. Information Bulletin 210, 10 pp. illus. 1959.

(5) Contribution du U.S. Salinity Laboratory, Soil and Water Conservation Research Division, Agricultural Research Service, Riverside, Californie, en coopération avec l'Administration de Coopération Internationale.

(6) Actuellement directeur adjoint de l'European Regional Research Office, Agricultural Research Service, Rome, Italie.

(7) Les chiffres en italique et entre parenthèses réfèrent aux ouvrages cités dans la bibliographie.

CHAPITRE XII

SALINITÉ ET IRRIGATION

Lowell E. ALLISON

United States Salinity Laboratory, Riverside, California

TABLE DES MATIÈRES

I.	<i>Introduction</i>	101
II.	<i>Salinité des eaux d'irrigation</i>	101
	A. Classification des eaux	101
	B. Interprétation des analyses des eaux d'irrigation	104
III.	<i>Effets des sels sur les sols</i>	107
	A. Caractéristiques des sols salés	107
	B. Diagnostic des sols salés et sodiques	112
IV.	<i>Effet des sels sur les plantes</i>	115
	A. Effets généraux et spécifiques	115
	B. Tolerance des cultures au sel, sodium et bore	119
V.	<i>Récupération des terres salées</i>	125
	A. Lessivage en vue d'évacuer les sels solubles	126
	B. Lessivage en vue d'évacuer le bore	127
	C. Procédés de récupération	128
VI.	<i>Amenagement des sols salés</i>	132
	A. Lessivage pour combattre la salinité	132
	B. Drainage nécessaire pour lutter contre la salinité	133
	C. Procédés spéciaux de culture	135
	D. Amélioration qualitative de l'eau d'irrigation	136
	E. Méthodes et fréquence d'irrigation	137
VII.	<i>Conclusions</i>	138
	<i>Références</i>	139

I. INTRODUCTION

L'histoire nous apprend que la civilisation est née dans les régions qui pratiquaient l'agriculture irriguée. La Vallée du Nil, en Egypte, et une grande partie des terres de la Chine sont irriguées depuis plus de quatre mille ans et donnent toujours de forts rendements. Ce ne sont là que deux exemples de cultures irriguées pratiquées de longue date avec succès. Mais si des résultats excellents ont été enregistrés dans certaines régions, des échecs ont été enregistrés ailleurs, notamment en Mésopotamie où une magnifique civilisation s'est épanouie de bonne heure dans la vallée située entre le Tigre et l'Euphrate. Bien que l'effondrement de cette civilisation soit imputée à des causes nombreuses et variées, les plus grandes autorités semblent d'accord aujourd'hui pour l'attribuer à l'engorgement par l'eau et à la salinité des terres.

La salinité est la menace essentielle et toujours présente qui pèse sur l'agriculture irriguée en permanence. En 1958, il y avait 12 500 000 hectares de cultures irriguées dans les 17 Etats de l'Ouest et aux Iles Hawaï et, d'après Hayward (1958), 27 pour cent de ces terres sont, à des degrés divers, atteintes de salinité. Si cette salinité n'est pas combattue, la productivité diminue, la valeur des sols baisse et, dans bien des cas, ces terres sont complètement abandonnées. En fait, plus de 400 000 hectares irrigués, situés dans les 17 Etats de l'Ouest ont été abandonnés entre 1929 et 1939, en raison de l'accumulation de sel et de sodium. Cependant, la plus grande partie de ces terres a été remise en valeur.

Le présent rapport traite de l'aspect technique des problèmes que pose l'agriculture irriguée sur les terres salines et met surtout l'accent sur les facteurs ou pratiques qui présentent une importance particulière pour le développement de l'agriculture irriguée de caractère permanent.

II. SALINITÉ DES EAUX D'IRRIGATION

La plupart des eaux d'irrigation ont une teneur en sel qui va de 0,1 à 5 tonnes de sel pour 1 238 m³ d'eau (70 à 3 500 p.p.m.). C'est pourquoi il importe au plus haut point de connaître la qualité de l'eau car c'est d'elle que dépendent les pratiques en matière d'irrigation et de drainage, le choix des cultures et, dans une certaine mesure, celui d'autres façons culturales.

A. Classification des Eaux

Nos connaissances sur les qualités de l'eau ont été considérablement accrues par les travaux de Hilgard (1906, Kelley et coll. (1939); Kelley et Brown (1928); Scofield (1936); Scofield et Headley (1921); Scofield et Wilcox (1931), Eaton (1935, 1936, 1950), Doneen (1954), Thorne et Thorne (1951), Wilcox (1948, 1955) et du Personnel de l'U.S. Salinity Laboratory (1954). Bien que les diverses méthodes de classification des eaux d'irrigation proposées diffèrent quelque peu, elles concor-

dent dans une mesure raisonnable en ce qui concerne les critères et les limites.

D'après Christiansen et Lyster (1952), il ne s'agit pas tant de répondre à la question : dans quelle mesure cette eau convient-elle ? que de se demander : Que peut-on faire de cette eau ? Eaton (1958) et Kelley (1962) expriment une opinion assez semblable en se demandant s'il est judicieux d'attacher trop d'importance à une classification quelle qu'elle soit. Cependant, les éléments d'une classification permettent de prévoir assez sûrement les effets de l'eau d'irrigation sur le sol et les plantes.

Un certain nombre des caractéristiques, considérées comme souhaitables dans les premières classifications, figure aussi dans celle que recommande le personnel de l'U.S. Salinity Laboratory (1954) et Wilcox (1955), avec des informations nouvelles fournies par la recherche et les observations sur le terrain. Cette classification n'a, toutefois, qu'un caractère provisoire et ne doit servir qu'à l'orientation générale. Les quatre critères sur lesquels tout le monde se fonde pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation sont : 1) sa salinité totale, 2) sa teneur en sodium, 3) en bore et 4) en bicarbonate.

1. Teneur en sel

La teneur totale en sel est, sans doute, de tous les critères celui qui importe le plus pour la qualité de l'eau d'irrigation. Si l'on prend pour base la conductivité électrique (CE), les eaux se divisent en quatre classes : à faible salinité, à salinité moyenne, à haute salinité et à très forte salinité, et les points de séparation des classes se trouvent à 250, 750 et 2 250 micromhos/cm. Cette gamme comprend des eaux qui peuvent être utilisées pour l'irrigation de presque toutes les plantes sur la plupart des sols, jusqu'aux eaux qui ne conviennent pas à l'irrigation dans des conditions normales. Plus de la moitié des eaux d'irrigation utilisées dans les Etats de l'Ouest ont une conductivité inférieure à 750 mmhos/cm (500 p.p.m. de solides dissous) et moins de 10 pour cent des eaux ont une conductivité supérieure à 2 250 mmhos/cm (1 500 p.p.m. de solides dissous).

2. Teneur en sodium

Pour déterminer la teneur en sodium ou l'alcalinité des eaux d'irrigation, on utilise le taux d'adsorption de sodium (TAS), décrit à la Section III, B, 3 à propos des extraits de sols. Ce taux exprime l'activité relative des ions sodium dans les réactions d'échange des cations avec le sol. En tant qu'indice de la teneur de l'eau en sodium ou en alcalis, le TAS est plus précis que le pourcentage de sodium soluble (PSS), car il se rapporte plus directement à l'adsorption du sodium par le sol. Toutefois, les eaux d'irrigation se concentrant dans la zone des racines, le TAS indiquera un minimum mais pas nécessairement l'effet final d'une eau sur les disponibilités du sol en sodium.

Les eaux sont divisées en quatre classes du point de vue de leur teneur en sodium : faible, moyenne, élevée et très élevée, selon les

valeurs TAS et la conductivité électrique (CE). Lorsque CE représente 100 mmhos/cm, les pointes de démarcation des valeurs TAS sont situées à 4, 9 et 14. Du point de vue de la teneur en sodium, on trouve toutes sortes d'eaux, depuis celles qui peuvent servir à irriguer presque tous les sols, jusqu'à celles qui ne peuvent pas, d'une manière générale, être utilisées à ces fins.

3. Teneur en bore

A faibles concentrations dans la solution de sol, le bore a un effet très nocif sur les plantes. Etant donné qu'il tend à s'accumuler dans le sol à partir des faibles concentrations existant dans les eaux d'irrigation, on doit tenir compte de cet élément constitutif en évaluant la qualité de l'eau d'irrigation. La classification du Tableau I est fondée sur les limites initialement proposées par Scofield (1936).

TABLEAU I
Limites admissibles de la teneur en bore de plusieurs classes
d'eaux d'irrigation (a)

Classe selon la teneur en bore	Pour l'irrigation des		
	Cultures sensibles	Cultures semi-tolérantes	Cultures tolérantes
1	< 0,33	< 0,67	< 1,00
2	0,33 à 0,67	0,67 à 1,33	1,00 à 2,00
3	0,67 à 1,00	1,33 à 2,00	2,00 à 3,00
4	1,00 à 1,25	2,00 à 3,50	3,00 à 3,75
5	> 1,25	> 2,50	> 3,75

a) Valeurs en parties par millions

La toxicité spécifique du bore est examinée à la Section IV, B, 3. Le Tableau VI indique la tolérance relative de certains végétaux courants à l'action du bore que l'on trouve dans les eaux d'irrigation.

4. Teneur en bicarbonate

L'ion bicarbonate est important, en premier lieu, parce qu'il a tendance à précipiter le calcium et, dans une certaine mesure, le magnésium présents dans la solution de sol, en carbonates de calcium et de magnésium. L'eau ne contient que rarement des ions carbonate mais les ions bicarbonate peuvent représenter une proportion appréciable du total des anions présents dans les eaux d'irrigation. Dans nombre d'eaux tropicales, le bicarbonate est souvent le principal anion présent.

L'effet de la concentration d'ions bicarbonate sur la qualité de l'eau s'exprime en **carbonate de sodium résiduel (CSR)**, concept d'Eaton (1950), défini par l'équation ci-dessous :

$$\text{CSR} = (\text{CO}_3^{--} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$$

dans laquelle la concentration est exprimée en milliequivalents par litre.

Il ressort clairement de cette équation que la solution de sol ayant perdu le calcium et le magnésium par précipitation, la proportion relative de sodium qui reste dans l'eau augmente. Ainsi, la teneur en sodium telle qu'elle est définie par TAS (cf. Section II, B, 3) s'accroît.

Les études en laboratoires et sur le terrain (Wilcox et coll. 1954) ont abouti à la conclusion provisoire que les eaux contenant moins de 1,25 mé/l de CSR conviennent probablement à tous les usages. Les eaux contenant de 1,25 à 2,5 mé/l sont marginales et celles dont la teneur est supérieure à 2,5 mé/l de CSR sont impropres à l'irrigation. Il semble toutefois, qu'un bon aménagement permettrait d'utiliser avec succès certaines des eaux marginales pour l'irrigation. Ces pratiques comprendraient : 1) un lessivage approprié qui maintiendrait la teneur en bicarbonate de solution de sol à un niveau réduit, et 2) des applications de gypse ou de toute autre source de calcium soluble afin de maintenir un rapport favorable Ca:Na dans la solution de sol. L'une ou l'autre de ces pratiques tendrait à retarder l'accumulation de sodium dans le complexe d'échange.

5. Autres éléments

a) **Lithium.** — L'effet toxique du lithium sur les agrumes a été observé en Californie (Bradford 1963). Là où ce problème se pose, la teneur en lithium de l'eau d'irrigation est d'au moins 0,05 p.p.m. L'étude de 400 eaux prélevées sur tout le territoire californien montre que, dans un quart environ de celles-ci, la teneur en lithium atteint un niveau toxique (0,05 à 0,50 p.p.m.) et que la présence de cet élément s'accompagne d'une faible teneur en magnésium ou d'une forte teneur en sodium ou de l'une et de l'autre. Il est significatif que l'ordre de tolérance des plantes sensibles à la présence de lithium suit de près l'ordre de tolérance au sodium (Bingham et coll. 1964).

b) **Pollution.** — Nombre de déchets industriels déversés dans les cours d'eau peuvent avoir un effet nocif sur les plantes. Wilcox (1959) a fourni des informations sur un grand nombre de substances dont on connaît les effets nuisibles pour les plantes. Il convient de prendre de grandes précautions avant d'utiliser des eaux suspectes aux fins d'irrigation.

B. Interprétation des analyses des eaux d'irrigation

L'analyse d'une eau a pour but d'apprendre si elle convient à l'irrigation et, en outre, de suggérer les pratiques auxquelles il faudrait avoir recours. La possibilité d'utiliser une eau avec succès ne dépend pas seulement de sa qualité mais aussi des caractéristiques du sol du point de vue du drainage et des pratiques d'exploitation. Lorsque l'on évalue la qualité d'une eau en vue de l'irrigation, on doit tenir compte 1) de sa salinité, et 2) de sa teneur en sodium, puis des caractéristiques indépendantes telles que : 3) la teneur en bore ou autres éléments toxiques, 4) en bicarbonate, chacune d'entre elles pouvant modifier le classement qualificatif.

On trouvera au tableau II, l'analyse de plusieurs eaux dont les caractéristiques sont très différentes. La description de ces eaux indique les pratiques qui permettraient de les utiliser pour l'irrigation.

L'eau de la Columbia River (1) est une eau de montagne typique dont la teneur totale en sels est faible et qui contient principalement des ions calcium et bicarbonate. Elle ne présente aucun risque pour l'irrigation.

L'eau de la Colorado River (2) est très riche en calcium (gypsifère), de salinité modérément élevée, mais d'une faible teneur en sodium ($CE = 1\ 130$ mmhos/cm ; $TAS = 2,8$). Judicieusement employée, elle donne de bons résultats sur 240 000 hectares environ en Californie du Sud, pour toutes les plantes qui ne sont pas particulièrement sensibles au sel. Pour utiliser cette eau de manière satisfaisante, un bon drainage est indispensable.

L'eau de la Pecos River (3) a une salinité modérée à sa source, ($CE = 1\ 000$ mmhos/cm) dans le Nord de l'Etat de New Mexico mais elle se charge rapidement de calcium, de sodium, de sulfates et de chlorures et, en coulant dans la direction du Sud vers le Rio Grande, elle devient très salée ($CE = 8\ 620$ mmhos/cm à Orla au Texas). Cette eau est gypsifère ce qui est un atout du point de vue de l'irrigation. L'eau (3b) donne des résultats modérément satisfaisants dans la Pecos Valley Etat de New Mexico, où les sols sont perméables et bien drainés, mais son utilisation exige un fort lessivage pour combattre sa salinité.

L'eau de la Gila River (4) présente trois défauts majeurs pour l'irrigation : salinité très élevée ($CE = 8\ 160$ mmhos/cm), forte teneur en sodium ($TAS = 17$), et teneur élevée en bore (2,6 p.p.m.). Il est évident que cette eau ne peut servir à irriguer que des plantes très tolérantes au sel et au bore et sous réserve d'un lessivage très poussé. Elle ne peut être utilisée que sur des sols très perméables et bien drainés.

Les eaux de puits (5), (6) et (7) présentent les différences extrêmes de concentration et de composition que l'on observe souvent dans les eaux de pompage. Bien que peu salée, l'eau (5) contient un très fort pourcentage de bore ($TAS = 20$) et de bicarbonate ($CSR = 3,60$ mé/l). En raison de sa très forte teneur en calcium et en magnésium, la qualité de cette eau est sujette à caution pour l'irrigation. L'anion principal étant le bicarbonate, il faudrait ajouter du gypse soit dans l'eau, soit dans le sol, afin de prévenir une forte accumulation de sodium dans le complexe échangeur, ce qui entraînerait une perte de la perméabilité. Cette eau ne devrait être utilisée que sur des sols à texture grossière, et soumis à un lessivage au moins modéré afin de chasser les sels de sodium de la zone des racines.

L'eau (6) a une forte teneur en sel et en sodium, et le chlorure en est l'anion principal. En raison de la forte teneur en sodium ($TAS = 16$), il serait utile de faire de temps à autre des applications de gypse suivies d'un lessivage approprié pour parer à la perte de perméabilité. L'eau (7) ressemble à l'eau de la Gila River (4), mais elle ne contient pas de bore.

Afin d'illustrer un problème que posent fréquemment les eaux tro-

TABLEAU II

Analyses de quelques eaux d'irrigation typiques^{a, b}

Eau	Endroit où l'échantillon a été prélevé	CE × 10 ⁶ à 25 °C	Solides dissous (p.p.m.)	Milliéquivalents par litre								B			
				Ca	Mg	Na	K	CO ₃	HCO ₃	SO ₄	Cl	(p.p.m.)	TAS	TAF	CSR
(1) Rivière Columbia	Grand Coulee, Washington	140	85	1,06	0,35	0,03	0,03	—	1,21	0,26	0,02	0,04	0,1	0,11	0
(2) Rivière Colorado	Yuma, Arizona below Imperial Dam)	1130	753	4,59	2,14	5,05	0,13	—	2,77	6,25	2,71	0,18	2,8	1,0	0
(3) Rivière Pecon	a) Alamogordo Dam	1009	741	8,48	1,56	1,52	—	—	2,08	8,43	0,99	—	0,7	1,0	0
	b) Artesia, New Mexico	2500	1860	15,60	4,19	9,60	—	—	2,44	17,99	8,97	—	3,1	2,5	0
	c) Red Bluff Dam	8620	5900	24,50	12,09	60,46	—	—	1,97	34,14	60,10	—	14	8,0	0
(4) Rivière Gila	Gillepsie Dam, Arizona	8160	5690	14,87	10,94	60,90	0,31	—	3,18	27,90	56,96	2,6	17	7,6	0
(5) Eau de puits N° 85	Van Horn, Texas	500	476	0,10	0,16	5,20	0,10	—	3,80	1,70	0,50	—	19	0,4	3,60
(6) Eau de puits N° 55	El Paso, Texas	1950	1210	1,00	1,00	16,00	0,50	—	3,50	3,70	11,20	—	16	1,6	1,50
(7) Eau de puits N° 49	El Paso, Texas	6000	3775	22,20	4,80	30,90	0,30	—	7,30	18,50	34,50	—	8,4	5,4	0
(8) Ruizizi	Congo belge	—	918	0,45	5,78	4,72	1,87	3,48	7,89	1,00	0,71	—	2,7	1,2	5,14

^a Les analyses ont été tirées des ouvrages suivants : Eaux (1) à (4) : U.S.G.S. Water Supply Paper 1575 (1938) ; Eaux (5) à (7) : Texas Agr. Expt. Sta. Circ. 132 (1952) ; et Eau (8) : communication privée.

^b CE, conductivité électrique ; TAS, taux d'adsorption de sodium ; TAF, tonnes pour un acre/pied d'eau ; CSR, carbonate de sodium résiduel.

picales, il est question également ici des eaux du Ruzizi (7) au Congo belge. Cette eau extrêmement riche en bicarbonate et en carbonate n'est utilisée que pour l'irrigation de la canne à sucre en période sèche, dans une région où les précipitations annuelles atteignent 16 cm. Les sols à irriguer sont des latosols à texture grossière. La salinité de ce cours d'eau est modérée (pas d'indication concernant CE), et à teneur de sodium plutôt faible (TAS = 2,7), mais en raison de sa teneur élevée en carbonate et bicarbonate (CSR = 5,15 mé/l), sa teneur en calcium est extrêmement basse. Utilisée largement pour l'irrigation, elle pourrait donner lieu à de sérieuses difficultés, notamment sur des sols à texture fine ou moyennement fine, par suite de l'accumulation de sodium. Des troubles de nutrition pourraient également se produire en raison du très faible rapport calcium/magnésium qui est de 0,8. Dans de tels cas, il faudrait fournir au sol des quantités abondantes de gypse. Toutefois, on ne devrait pas se heurter à des difficultés considérables si l'eau en question n'est utilisée qu'en faibles quantités, à titre de complément, sur des sols à texture grossière et dans une région à forte ou moyenne pluviosité.

III. EFFET DES SELS SUR LES SOLS

A. Caractéristiques des sols salés

Les sols salés sont caractérisés par le fait qu'ils contiennent assez de sels solubles ou de sodium échangeable (ou les deux) pour freiner la croissance des plantes. En agriculture, on les considère comme une classe de sols difficiles dont les défauts doivent être atténués par des mesures et des façons culturales spéciales. La connaissance des caractéristiques chimiques et physiques des diverses espèces de sols salés est indispensable pour établir un diagnostic et choisir les procédés d'aménagement à appliquer (Richards et Hayward, 1957).

1. Source et composition des sels

En définitive, tous les sels entrant dans la composition des sols proviennent des minéraux primitifs que contiennent les roches exposées de la croûte terrestre. Les processus de désintégration chimique, y compris l'hydrolyse, l'hydratation, la solution, l'oxydation et la carbonation, font passer peu à peu ces sels constitutifs dans l'eau environnante. L'océan peut être la source de sels car certains dépôts marins ont été soulevés et leurs écoulements peuvent affecter les sources d'eau d'irrigation. Les « Mancos Shales » (schistes) que l'on trouve dans les Etats du Colorado, du Wyoming et de l'Utah sont des exemples de dépôts de sels marins. L'océan peut constituer une source directe de ce que l'on appelle sel cyclique, le long du rivage marin, par le jeu des embruns emportés par le vent (Teakle, 1937). Cependant, ce sont les eaux superficielles et les nappes d'eau souterraines qui constituent les principales sources de sel affectant l'agriculture irriguée.

Les sels solubles qui causent effectivement la salinité du sol se composent en proportions diverses des cations calcium, magnésium et sodium ainsi que des anions chlorure, sulfate, bicarbonate et parfois carbonate. Le potassium est plus rarement présent que les trois autres cations. Parmi les anions, le bicarbonate et le carbonate représentent généralement des quantités moindres que les chlorures et les sulfates. L'ion bicarbonate résulte de la dissolution de l'acide carbonique dans l'eau qui peut être d'origine atmosphérique ou biologique. Les ions bicarbonate et carbonate dépendent étroitement l'un de l'autre, car la quantité relative de chacun d'entre eux est fonction de la valeur du pH de la solution de sol. On ne trouve de quantités appréciables d'ions carbonate que dans des sols dont le pH est de 9 ou davantage.

Le bore mérite de retenir l'attention, en raison de son extrême nocivité pour les plantes, même à une concentration de quelques parties seulement pour un million, bien que ses sels ne contribuent pas de manière importante à la salinité totale du sol. La récupération des sols riches en bore est examinée à la Section V. B, et l'effet toxique du bore sur la croissance des plantes fait l'objet de la Section IV. B, 3.

2. Accumulation de sel et Alcalinisation

a) **Accumulation de sel.** — Les terres salées proviennent de l'accumulation des sels solubles dans la zone du sol où plongent les racines.

Les eaux d'irrigation contiennent des sels solubles en proportion qui varient entre 0,1 à 5 tonnes par pied/acre (1 238 m³)¹ et les arrosages annuels peuvent varier entre 9 177 et 15 295 m³ par hectare. Faute de lessivage, le sel contenu dans l'eau d'irrigation se dépose dans la zone des racines par suite de l'évapotranspiration ou de la consommation de l'eau par les plantes.

Un drainage insuffisant peut contribuer à donner aux terres irriguées un caractère salin. Il peut s'agir de l'existence d'une nappe phréatique élevée ou de la faible perméabilité du sol, ou de ces deux facteurs simultanément. Lorsque la nappe phréatique se trouve à quelque 1,20 à 1,50 mètre de la surface du sol, le mouvement ascendant de l'eau salée souterraine, combinée à l'évaporation de l'eau d'irrigation, peut aboutir à la formation d'un sol salé. Dans les cas extrêmes, le sel peut s'accumuler à la surface du sol, comme le montre la Fig. 1, le rendant totalement impropre à la production végétale.

La perméabilité restreinte du sol qui aboutit à l'engorgement par l'eau peut être due au fait que la texture du sol est très fine jusqu'à un point situé bien au-dessous de la zone des racines, ou à la présence d'une barrière imperméable au-dessous de cette zone. Cette barrière peut être soit une lentille argileuse (horizon argileux compact), une couche de caliche ou un horizon durci siliceux. De Sigmond (1924) considère que la formation des sols salés de Hongrie est due essentiellement à la présence d'une couche imperméable. Aux Etats-Unis, des

(1) Dans le texte original anglais, l'auteur utilise l'unité « pied/acre » (acre/foot) qui correspond à une quantité d'eau de 1 238 m³ par acre, soit 3 059 m³ par hectare.

milliers d'hectares irrigués comportent un plan d'eau élevé et doivent être drainés de façon appropriée pour que la production végétale soit rentable.

b) **Alcalinisation.** — Ce terme désigne le processus d'accroissement de la teneur du sol en sodium échangeable qui conduit à la formation d'un sol sodique. Il implique à la fois l'accumulation des sels et la modification de leur composition.

Les cations qui dominent dans les sols normaux des régions arides sont le calcium et le magnésium. Cependant, à mesure que les sels solubles des eaux d'irrigation s'accumulent et se concentrent de plus en plus dans le sol par suite de la consommation de l'eau et faute de lessivage, la composition des sels se modifie. Les limites de solubilité du sulfate de calcium, du carbonate de calcium et du carbonate de magnésium sont dépassées, ce qui provoque la précipitation du calcium et du magnésium. Il en résulte un accroissement correspondant de la proportion relative du sodium dans la solution de sol, c'est-à-dire que le pourcentage de sodium soluble (PSS) augmente. En raison de l'équilibre dynamique entre les ions solubles et adsorbés, le sodium remplace une partie du calcium et du magnésium initialement présents dans le complexe d'échange du sol (Kelley, 1951). D'une manière générale, la moitié au moins des cations solubles doit être du sodium ($PSS > 50$) pour que des quantités appréciables de cet ion puissent être absorbées par le complexe d'échange de cations. Dans certains sols salés on peut dire que pratiquement tous les cations solubles sont du sodium et c'est pourquoi le sodium est le principal cation adsorbé.

Tant que la solution de sol contient des sels solubles en quantités appréciables, le sol (salé-sodique) demeure flocculé et perméable et son pH est inférieur à 8,5. Si les sels solubles sont évacués par lessivage, le sol (sodique) peut devenir très imperméable en raison de l'effet de dispersion qu'exerce l'ion sodique adsorbé sur le complexe d'échange. Une partie du sodium hydrolyse le complexe d'échange formant des traces d'hydroxyde de sodium, et le pH s'élève parfois jusqu'à 10.

Arany (1956) a souligné l'importance des anions associés au sodium dans la formation des sols sodiques. Les sels de sodium alcalins (bicarbonate, carbonate, silicate) favorisent le remplacement presque complet du calcium par le sodium parce que les sels de calcium correspondants sont peu solubles. Inversement, les sels neutres, sulfate ou chlorure de sodium, ne provoquent qu'un remplacement partiel du calcium par le sodium. Aussi, l'alcalinisation est-elle plus rapide pour les sels basiques que pour les sels neutres.

3. Sols salés

Les sols salés contiennent des sels solubles en quantité telle qu'ils freinent la croissance de la plupart des plantes. Par définition, la conductivité électrique d'un extrait saturé (CE) de sol salé est supérieure à 4 mmhos/cm et le pourcentage de sodium échangeable (PSE) est inférieur à 15. Le pH du sol saturé est généralement inférieur à 8,5 mais si le sol est gypsifère, le pH ne dépasse que rarement 8,2. Les sols

salins correspondent à « l'alcali blanc » de Hilgard et au « solonchak » défini par les savants russes.

Les sels présents dans les sols salés sont principalement des sels neutres tels que les chlorures et sulfates de sodium, de calcium et de magnésium. Le sodium comprend rarement plus de la moitié des cations solubles et c'est pourquoi il n'est pas adsorbé en quantité significative dans le complexe échangeur du sol.

Les sols salés étant généralement floculés, leurs propriétés en matière de culture et leur perméabilité à l'eau sont souvent égales ou supérieures à celles des sols semblables mais non salés. Les possibilités limitées de croissance qu'ils offrent aux plantes sont en rapport presque direct avec la concentration totale en sels de la solution de sol et ne dépendent guère du genre de sels présents. Si l'on applique un système de drainage convenable et que l'excédent de sel est évacué par lessivage, les sols salés deviennent des sols normaux.

On reconnaît les sols salins aux efflorescences blanches qui les recouvrent (Fig. 1) ou à l'apparence huileuse de la surface dépourvue de végétation. Les plantes rabougries et souvent de tailles très variables dans un même champ, indiquent que le sol est salé. Leur feuillage est souvent vert foncé avec des brûlures au bout ou sur le pourtour des feuilles.

4. Sols salés et sodiques

Les sols salés et sodiques contiennent assez de sels solubles et de sodium adsorbé pour réduire le rendement de presque toutes les plantes. Pour plus de précision, disons que le pourcentage de sodium échangeable est supérieur à 15 et que la conductivité électrique de l'extrait saturé est supérieure à 4 mmhos/cm. Le pH du sol saturé est généralement inférieur à 8,5 mais s'il contient des quantités appréciables de gypse, le pH peut descendre jusqu'à 8,2.

Ces sols sont formés par le processus combiné de l'accumulation de sodium échangeable et de l'alcalinisation. Tant qu'ils contiennent un excès de sels, leur apparence (Fig. 1) et leurs propriétés sont généralement les mêmes que celles des sols salés. Si ces sols contiennent du gypse, le lessivage les transforme en sols non salés grâce à la substitution de calcium au sodium échangeable résultant de la dissolution du gypse au cours du lessivage. Toutefois, si le gypse fait défaut à ces sols et qu'il ne leur en est pas apporté sous forme d'amendements, le lessivage rend les sols fortement alcalins (pH supérieur à 8,5), les colloïdes se dispersent et les sols, ne se prêtant pas à la pénétration ainsi qu'au mouvement de l'eau, deviennent difficiles à travailler. Bien qu'un nouvel apport de sels solubles puisse rendre aux sols leur structure floculée, l'exploitation des sols salés et sodiques continue d'être difficile tant que la zone des racines n'est pas débarrassée de l'excès de sels et de sodium échangeable et que l'état physique du sol n'est pas redevenu satisfaisant.

5. Sols sodiques

Les sols sodiques contiennent suffisamment de sodium échangeable pour gêner la croissance de la plupart des plantes, mais ils ne contiennent pas de quantités appréciables de sels solubles. Par définition, le pourcentage de sodium échangeable est supérieur à 15 et la conductivité électrique est inférieure à 4 mmhos/cm. En général, le pH du sol saturé est supérieur à 8,5 et atteint parfois 10. Les sols sodiques correspondent à ce que Hilgard a appelé « alcali noir » et, dans certains cas, à ce que les savants russes désignent par le terme « solonetz ».

Le terme sodique est utilisé ici au lieu du terme alcali, ce dernier ayant diverses significations, parfois imprécises. Quelques chercheurs ont aussi désigné par le terme alcali des sols contenant des sels et du sodium échangeable (Hilgard, 1906) et dans ce cas sa signification est la même que le terme sol **سالى**. D'autres ont utilisé le terme « alcali » pour désigner les sols contenant principalement du sodium échangeable (US Salinity Laboratory Staff, 1954). En Irak, les agriculteurs emploient le terme alcali pour décrire tous les sols ayant l'apparence de cendres à la surface, quelle que soit leur composition chimique (Buringh, 1960). Le terme sodique décrit donc l'état du sol en fonction de sa cause, c'est-à-dire du sodium échangeable.

Dans le cas des sols sodiques, la solution de sol contient relativement peu de sels solubles et sa composition ionique diffère considérablement de celle des sols salés. Le cation dominant est le sodium parce qu'avec un pH élevé et en présence de l'ion carbonate, le calcium et le magnésium sont précipités en grande partie sous forme de carbonates de calcium et de magnésium. Les anions présents se composent principalement de chlorure, sulfate et bicarbonate avec une quantité faible ou modérée de carbonate, en fonction du pH du sol. Si l'on trouve des quantités discernables de carbonates dans l'extrait saturé, il est évident que le pH doit être supérieur à 9.

Le sodium échangeable a une incidence marquée sur les propriétés chimiques et physiques des sols sodiques. A mesure que la teneur en sodium échangeable augmente, le sol a tendance à se disperser, il devient moins perméable à l'eau et ne se prête guère aux façons culturales. Les sols sodiques sont généralement de consistance plastique et collante lorsqu'ils sont mouillés ; ils forment de grosses mottes et des croûtes en séchant. Cette tendance à se recouvrir d'une croûte constitue un sérieux obstacle pour les jeunes pousses et est souvent la cause de récoltes médiocres et de rendement réduits. On trouvera à la Section V, C, 5, la description d'une méthode spéciale pour la remise en valeur des sols à haute teneur en sodium.

6. Accumulation de sel due à l'évaporation

De grandes quantités de sel peuvent s'accumuler à la surface du sol par suite de l'évaporation d'un plan d'eau salée peu profond pendant la période où le champ est en jachère, entre deux récoltes. Plus cette période est longue et le climat aride, plus ce phénomène est marqué. Donnan et coll. (1954) et Bradshaw et Donnan (1953) recommandent

que les sols à texture fine, nouvellement récupérés qui ont un plan d'eau près de la zone des racines, soient maintenus constamment en culture (irrigués) afin d'empêcher que le sel ne remonte du plan d'eau à la surface par capillarité.

Les études récentes de Doering (1963) sur les pertes causées par l'évaporation dans l'Imperial Valley, montrent comment le sel s'accumule dans le sol pendant la période de jachère. On utilise à cette fin la formule révisée ci-après (US Salinity Laboratory Staff, 1954, p. 36) dans laquelle l'eau de la nappe phréatique (gw) est substituée à l'eau d'irrigation (iw).

$$CE_e = \frac{D_{gw} CE_{iw} d_w}{D_s PS d_s} 100$$

D_{gw} == profondeur de l'eau souterraine évaporée
 D_s == profondeur du sol dans lequel les sels s'accumulent
 CE_{gw} == CE de l'eau souterraine évaporée
 d_w == densité de l'eau
 d_s == densité de la masse du sol
 PS == pourcentage de saturation du sol.

Le sol étudié était de l'argile limoneuse jusqu'à une profondeur de 60 cm, sur du limon argilo-sableux, avec une nappe phréatique à 150 cm. La densité de la masse de ce sol d'argile limoneuse était de 1,4 g/cm³ et le pourcentage de saturation de 63. La perte d'eau, déterminée par la méthode d'accumulation de chlorure, concordant favorablement avec l'évaporation indiquée par un évaporomètre spécial, était d'environ 0,09 cm/jour, ou 33 cm/année. Pour une période de jachère d'été, de 4 mois, se situant entre deux cultures normalement pratiquées dans la rotation, la perte correspondante d'eau était de 11 cm. En se fondant sur une salinité de l'eau souterraine de CE = 10 mmhos/cm, ce qui n'est pas rare, on a calculé que l'accroissement en CE_e des 30 cm d'argile limoneuse constituant le sol de surface, serait 4,1 mmhos/cm pour la période de 4 mois. Il en résulte qu'au cours d'une période de jachère de 4 mois, la salinité du sol de surface peut doubler parce que le sel contenu dans un plan d'eau peu profond peut remonter par capillarité. On a avancé une hypothèse suivant laquelle tous les sels demeurent en solution. Si le gypse et/ou les carbonates de la solution précipitent, le changement de CE_e est réduit de manière correspondante. Quelques arrosages effectués pendant une période prolongée de jachère pourraient présenter des avantages car ils maintiendraient un équilibre salin plus favorable aux plantes sensibles au sel qui seraient cultivées par la suite.

B. Diagnostic des sols salés et sodiques

Un système de diagnostic efficace permettant d'évaluer la salinité et la teneur en sodium des sols doit tenir compte de l'humidité du terrain parce que les plantes réagissent à la concentration de sel dans la solution de sol qui reflète le degré de pression osmotique. Idéalement parlant, les mesures de salinité et de sodium seraient les plus précises

si on les effectuait sur des extraits de solution de sol dans les diverses conditions d'humidité rencontrées sur le terrain. Cette opération peut être réalisée avec un osmomètre à membrane à pression mais comme l'obtention de tels extraits est difficile, la méthode n'est pas utilisable pour les travaux courants (US Salinity Laboratory Staff, 1954). Une trousse pour mesurer la salinité et le sodium des eaux et des sols a été décrite par Richards et coll. (1956) et se trouve dans le commerce.

Plusieurs systèmes, utilisés actuellement, classent les sols selon leur teneur totale en sel. En Russie, on considère que les sols sont légèrement salés à 0,3 pour cent de sel, modérément salés à 0,7 pour cent, fortement salés à 1,0 pour cent, etc. Bien que ces systèmes indiquent la teneur totale des sols en sel, ils n'évaluent pas la salinité en fonction de la force à laquelle les plantes réagissent, celle de la pression osmotique exercée par la solution de sol.

1. Prélèvement des sols

En général l'activité principale des racines s'exerce dans les parties les moins salées du sol et c'est un fait qu'il ne faut pas oublier en déterminant la teneur en sel et en sodium du sol du point de vue de la réaction des végétaux. Des échantillons de sol de surface, prélevés au pied des plantes semées en ligne (billons), à un stade de croissance assez avancé, peuvent par exemple, contenir 5 pour cent de sel ou davantage ce qui représente une C.E. de 50 mmhos/cm ou même encore plus. Ceci correspond à l'accumulation de sel dû au mouvement ascendant de l'eau vers la crête où elle s'évapore et non à la concentration dans la zone active au-dessous des sillons d'irrigation. C'est pourquoi, en étudiant la croissance végétale par rapport à la salinité, on prélèvera les échantillons de sol dans la zone d'activité des racines (sillons) qui n'est pas contaminée par les incrustations de sel que l'on trouve à la surface.

Plus le nombre des échantillons de surface est grand, et plus leur sélection est faite avec soin, plus l'évaluation sera précise. Mais une certaine expérience permet d'obtenir des évaluations satisfaisantes par l'analyse d'un nombre relativement faible d'échantillons. Étant donné que la teneur en sel varie suivant la profondeur, il est recommandé de prélever quelques échantillons de profils par horizons génétiques ou, le cas échéant, par couches sédimentaires. Toutefois, on sait que le sel ne s'accumule pas nécessairement suivant les horizons génétiques. Faute de stratification dans le profil, on prélèvera un échantillon à la profondeur atteinte par le soc d'une charrue, généralement à 15 ou 18 cm, et les échantillons suivants pourront être prélevés à des intervalles de 15 à 45 cm, 45 à 90 et 90 à 180 cm, ou toute autre profondeur appropriée suivant la profondeur à laquelle se trouve la zone des racines et selon la nature du problème et les détails recherchés. La dimension de l'échantillon dépend du nombre de mesures à effectuer, mais un échantillon de 1 000 g de sol suffit généralement.

2. Détermination de la salinité

a) **Méthode de l'extrait saturé.** — Pour évaluer la salinité en relation avec la croissance des plantes, il est recommandé d'exprimer la conductivité de l'extrait saturé (C.E.) en mmhos/cm à 25 °C (US Salinity Laboratory Staff, 1954).

Le trait remarquable de cette méthode est que la concentration de sel dans l'extrait saturé est à peu près égale à la moitié de la concentration de la solution de sol à la limite supérieure (capacité de rétention au champ), et à un quart environ de la concentration à la limite inférieure (pourcentage de flétrissement permanent) de la gamme d'humidité nécessaire à la croissance des plantes. Ce rapport permet d'interpréter directement en degré d'humidité du terrain, les mesures de salinité (au point de saturation) ce qui est impossible lorsque l'on utilise des extraits dilués.

D'après ce procédé, on confectionne une pâte de sol saturé, en malaxant une certaine quantité de sol avec de l'eau distillée jusqu'à ce qu'on atteigne un point caractéristique de consistance. Ce point est assez précis et, avec un peu de pratique, plusieurs opérateurs peuvent obtenir des résultats suffisamment concordants. On se sert d'un filtre à aspiration afin d'obtenir la quantité d'extrait nécessaire pour effectuer les mesures de conductivité et pour déterminer, si on le désire, les cations et les anions solubles. Les valeurs C.E. par rapport à la croissance des plantes peuvent être déterminées par référence au tableau III.

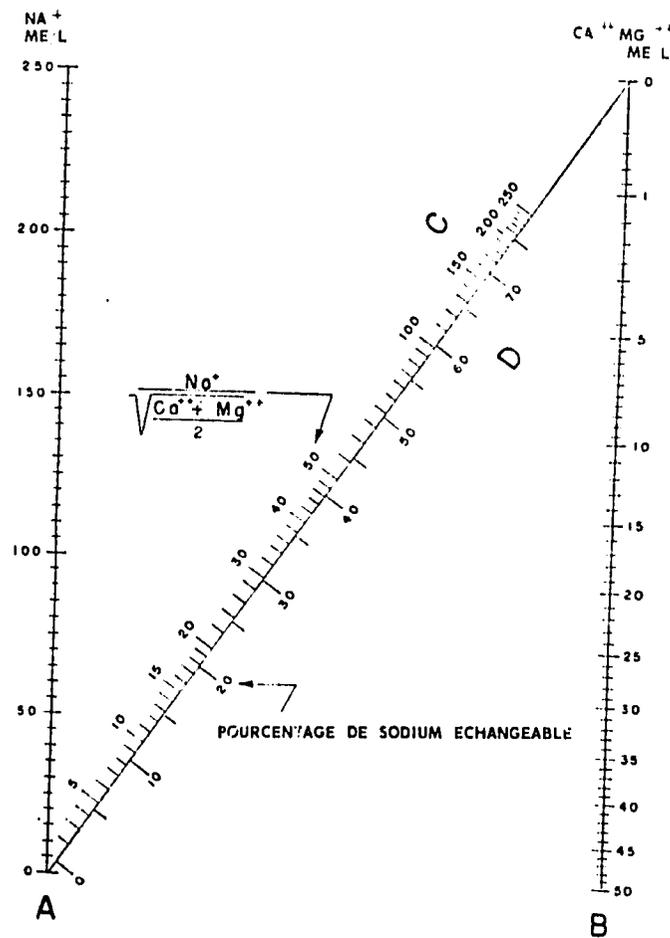
b) **Méthode de l'extrait dilué.** — L'évaluation de la salinité par les mesures de la C.E. effectuées sur des extraits dilués où les rapports sol/eau sont de 1:1, 1:5 ou 1:10, peut présenter certains avantages mais il faut discerner clairement les limites de cette méthode. Pour les déterminations rapides de salinité, ces dilutions élevées sont souvent commodes quand on effectue des échantillonnages répétés de sols d'une même texture (dans des expériences sur parcelle), en vue de déterminer les variations du degré de salinité dans le temps ou à la suite d'un traitement. Toutefois, les mesures de salinité effectuées sur des solutions plus diluées que les solutions saturées ne correspondent pas de façon satisfaisante aux données fournies au tableau IV sur la tolérance au sel.

Pour déterminer le pourcentage de sodium échangeable (PSE), les extraits dilués sont tout à fait insuffisants parce qu'avec un accroissement de la dilution, le calcium remplace le sodium dans le complexe d'échange, conformément au principe de la dilution de valence. Par conséquent, le pourcentage de sodium soluble (PSS) augmente avec la dilution et conduit à une réduction des valeurs du sodium échangeable. On obtient ainsi des valeurs pour le pourcentage de sodium échangeable qui s'écartent beaucoup plus de la teneur réelle en sodium du sol sous culture que celles qu'indiquent les évaluations faites d'après le pourcentage de saturation (PS).

3. Détermination du sodium.

On a utilisé pendant longtemps le pourcentage de sodium échan-

geable (PSE) pour indiquer la teneur en sodium des sols salins. En fait, la définition des sols sodiques est fondée sur la détermination du pourcentage de sodium échangeable (PSE). La détermination du PSE par les méthodes chimiques classiques exige que soient effectuées les différentes déterminations suivantes : 1) sodium soluble sur un extrait saturé de sol, 2) sodium total sur un extrait d'acétate d'ammonium de sol, et 3) capacité d'échange des cations du sol. Cette méthode demande beaucoup de temps et risque de provoquer des erreurs appréciables en raison de la nature indirecte de la détermination comme l'indique la formule : $PSE = (\text{sodium total} - \text{sodium soluble}) \times 100 / \text{capacité d'échange des cations}$.



- Graphique permettant de déterminer la valeur du taux d'adsorption de sodium (TAS) d'un extrait saturé et d'évaluer la valeur du pourcentage correspondant de sodium échangeable (PSE) du sol en équilibre avec l'extrait.

Des recherches récentes (US Salinity Laboratory Staff, 1954) ont montré que l'indice le plus sûr de la teneur en sodium est le taux d'adsorption de sodium (TAS). C'est une valeur calculée et définie par l'équation suivante :

$$\text{TAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}/2}}$$

où les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre. Ce rapport est fondé sur des équations d'échange de cations du type d'action de masse (Gapon, 1933).

Le trait particulier du TAS est qu'il tient compte des variations survenues aussi bien dans la concentration que dans la composition des sels de la solution de sol qui sont en équilibre avec le sol. Jusqu'à présent, aucune formule ou équation ne permettait de le faire. De plus, une étude récente, effectuée sur 218 échantillons provenant de 24 pays, (Bower, 1962) montre que l'on peut utiliser en toute confiance le taux d'adsorption de sodium (TAS) dans tous les pays arides du monde pour déterminer la teneur en sodium des sols salins.

Il suffit, pour déterminer le TAS, de préparer un extrait saturé du sol, de déterminer la concentration en milliéquivalents par litre des ions calcium, magnésium (titrage EDTA) et sodium (Photomètre à flamme) contenus dans l'extrait, et de porter ces concentrations dans le nomogramme de la Fig. 2. On interprète alors le pourcentage de sodium échangeable (PSE) à partir de la ligne TAS du nomogramme.

Indépendamment de la photométrie à flamme, le sodium peut être déterminé au moyen d'une électrode spéciale de verre (Bower, 1960).

IV. EFFET DES SELS SUR LES PLANTES

A. Effets généraux et spécifiques

Les sels exercent directement une influence sur la croissance des végétaux, (1) en accroissant la pression osmotique de la solution de sol, (2) en accumulant certains ions en concentrations nocives dans les tissus des plantes, et (3) en modifiant la nutrition minérale de la plante. Les réactions des plantes à la salinité ont été étudiées par Hayward et Wadleigh (1949), Grillot (1956), Bernstein et Hayward (1958) et Bernstein (1962).

1. Espèces d'ions et leurs fonctions

Les principaux ions que l'on trouve dans la solution de sol des terres salées sont le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les chlorures, sulfates et bicarbonates. Certains ions (calcium, magnésium, potassium et sulfate) apportent des éléments essentiels à la croissance tandis que d'autres (bore et lithium) peuvent être nocifs à concentrations très faibles.

Les savants soviétiques attachent une importance considérable à la composition des sels dans le sol en ce qui concerne la croissance des végétaux mais ils mettent l'accent sur la composition anionique (Bower et coll., 1962). Dans leurs ouvrages sur la science des sols, on rencontre ainsi fréquemment les termes de salinité chlorurée, salinité sulfatée. Par contre, les savants américains mettent l'accent sur la composition cationique des sels parce que l'on sait que les cations ont des réactions d'échange avec le sol et contrôlent, de ce fait, ses propriétés chimiques et physiques.

2. Pression osmotique et croissance des plantes

Gauch et Waddleigh (1944) ont démontré la réduction progressive du développement de haricots cultivés dans une solution à salinité croissante et les effets équivalents des sels de sodium et de calcium indépendamment de l'anion (Cl ou SO_4) présent. Ceci montre que c'est la concentration totale des particules dissoutes dans la solution, plutôt que leur nature chimique qui est la cause principale des effets inhibitifs des solutions salines sur la croissance des plantes cultivées.

En se fondant sur les observations de Hayward et Spurr (1943, 1944), on a attribué la réduction de croissance, associée à une augmentation de la pression osmotique (P_o) du milieu d'enracinement, à un aminuement de la pénétration de l'eau à une réduction des disponibilités en eau. Toutefois, des travaux récents de Bernstein (1961) indiquent que la capacité d'absorption d'eau est relativement peu affectée par la salinité. On impute le ralentissement de la croissance associé à la pression osmotique au fait que la pression osmotique des cellules en voie de développement augmente (ce qui dépend de l'accumulation de solutés) pour faire face à la pression osmotique croissante du milieu d'enracinement, tout en maintenant la turgescence. Cette théorie permet de supposer que la tolérance au sel pourrait être définie comme étant le degré que peut atteindre l'ajustement osmotique sans sacrifier la croissance.

3. Effets spécifiques des ions et autres effets.

Certains ions exercent des effets spécifiques qui freinent la croissance et les rendements, indépendamment des effets osmotiques. Ces effets spécifiques des ions peuvent être de nature toxique ou nutritive. On estime que l'effet toxique est dû à la présence d'un ion dans la solution qui cause directement un dommage à la plante. Le dommage s'accompagne généralement d'une accumulation de concentrations dangereuses de l'ion nocif dans les tissus de la plante dont la composition minérale peut ne pas subir d'autres variations importantes.

a) **Sodium et chlorure.** La toxicité des ions sodium et chlorure peut constituer le facteur principal des dommages provoqués par le sel aux cultures fruitières spécifiquement sensibles (Bernstein et Hayward, 1958). La toxicité directe de ces deux ions a été démontrée en ce qui concerne des fruits à noyaux, comme les pêches, les prunes, les abricots ainsi que d'autres cultures, par exemple, les agrumes, avocats, raisins,

fraises et mûres. Ces effets toxiques peuvent se produire à des concentrations osmotiques dans le substrat, inférieures à celles qui limitent normalement le rendement de ces cultures.

Le chlorure peut s'accumuler dans les feuilles à raison de 1 ou 2 pour cent du poids de matière sèche si l'anion se trouve dans le milieu d'enracinement en concentrations modérées seulement (700 p.p.m. à 1 500 p.p.m. dans l'humidité du sol ou solution nutritive). A de telles concentrations, les feuilles sont marquées de brûlures sur leurs bords puis tombent et ce processus est suivi d'apoplexie des rameaux et même de la mort de la plante. La sélection de porte-greffes qui n'accumuleraient que peu de chlorure et de bore offre des possibilités intéressantes pour l'amélioration des cultures fruitières.

L'accumulation de sodium dans les feuilles, à moins de 0,05 pour cent du poids de matière sèche, provoque des symptômes de brûlures analogues et des dommages importants. Lilleland et Coll (1945) ont observé des dommages causés par le sodium sur des amandiers croissant dans des sols essentiellement non salins, contenant moins de 5 pour cent de sodium échangeable.

b) **Bore.** Les effets spécifiques du bore sur la végétation sont examinés à la Section IV, B, 3.

c) **Bicarbonate.** Un excédent d'ions bicarbonate peut avoir un effet nocif sur les plantes qui sont plus ou moins sensibles selon les espèces. Par exemple, les haricots et le paspale dilaté sont très sensibles à la présence d'ions bicarbonate dans le substrat, tandis que *Chlorys gayana* et la betterave font preuve d'une tolérance relative (Wadleigh et Brown, 1952 ; Brown et Wadleigh, 1955 ; Gauch et Wadleigh, 1951). L'excès de bicarbonate peut provoquer la chlorose ; ce problème a été étudié par Brown (1956). L'ion bicarbonate ne se trouve que rarement en quantités suffisantes dans l'eau d'irrigation pour causer des effets directement toxiques, bien que l'on ait observé des cas de chlorose provoquée par le bicarbonate dans des vergers de pommiers dans l'Etat de Washington (Harley et Lindner, 1945).

d) **Effets sur la nutrition.** La salinité peut réfréner la croissance des végétaux parce qu'elle a un effet sur la nutrition de la plante. Etant donné que les besoins nutritifs des plantes ainsi que leur faculté d'absorption des éléments nutritifs varient très considérablement, les effets de la salinité sur leur nutrition diffèrent beaucoup d'une espèce à l'autre.

De fortes concentrations de sulfate ont généralement pour effet de réduire l'absorption de calcium en favorisant l'absorption de sodium (Hayward et Wadleigh, 1949). On sait que des symptômes d'insuffisance en calcium apparaissent sur certaines variétés de laitues en présence de concentrations élevées de sulfate (Doneen et Grogan, 1954). En causant l'absorption de l'ion sodium, le sulfate suscite la toxicité du sodium dans les espèces sensibles (Brown et coll., 1953). La salinité tend également à accroître l'incidence de la pourriture du sommet floral chez la tomate (Geraldson, 1960), maladie que l'on attribue aussi au manque de calcium en quantité suffisante. D'autre part, de fortes

concentrations de calcium peuvent empêcher les haricots et certaines variétés de carottes d'absorber les quantités de potasse dont ils ont besoin (Berstein et Hayward, 1958).

B. Tolérance des cultures au sel, sodium et bore

1. Tolérance relative des cultures au sel.

On entend par tolérance au sel, la faculté qu'ont les plantes de supporter des concentrations de sels solubles dans le milieu d'enracinement. Il importe d'avoir des informations sur la tolérance des cultures au sel lorsqu'il s'agit de diagnostiquer sur le terrain un dommage suspecté d'être causé par le sel, de sélectionner pour les sols salins des plantes tolérantes, et de déterminer les besoins concernant l'irrigation et le drainage ainsi que les pratiques culturales à appliquer dans le cas de sols salés. Le tableau III indique la réaction des cultures à la salinité croissante, exprimée en valeurs CE_e .

On a évalué la tolérance d'un grand nombre de plantes et ces données ont été exprimées au début comme étant le niveau de salinité (CE_e) qui réduirait le rendement de 50 pour cent (US Salinity Laboratory Staff, 1954, p. 64). Plus récemment, ces données qui concernent les plantes de grande culture, les légumes et les plantes fourragères ont été révisées et publiées sous la forme d'un bulletin de vulgarisation (Bernstein, 1958, 1959, 1960).

TABLEAU III
Réaction des plantes à différents niveaux de salinité

Effets de salinité généralement négligeables	Le rendement des cultures très sensibles peut diminuer	Rendement réduit de nombreuses plantes	Les plantes tolérantes seulement donnent des rendements satisfaisants	Rendements satisfaisants de quelques rares plantes très tolérantes
0	2	4	8	16

Conductivité électrique de l'extrait saturé en mmhos/cm
($CE_e \times 10^3$) à 25 °C

Le tableau IV donne des chiffres tirés de ces publications, sur les niveaux de salinité qui permettraient d'obtenir des rendements équivalents à 85 ou 90 pour cent des rendements de sols comparables non salins. La position de chaque plante dans ce tableau traduit sa tolérance relative au sel, avec des façons culturales pratiquées habituellement

lorsque la plante en question est cultivée en agriculture irriguée. Les végétaux sont portés sur la liste, pour chacun des groupes, par ordre de tolérance décroissante, mais une différence de deux ou trois places dans la colonne peut n'avoir aucune signification dans la plupart des cas. On a trouvé des différences variétales significatives entre *Cynodon dactylon*, l'orge et le brome lisse, tandis que dans le cas des cultures maraîchères, comme les haricots verts, laitues, oignons et carottes, les différences variétales n'ont pas de signification pratique.

En appliquant les informations du tableau IV, on n'oubliera pas que les conditions climatiques peuvent avoir une influence sur la sensibilité des plantes à la salinité. Les oignons, par exemple, sont plus sensibles à un niveau donné de salinité dans les régions chaudes et sèches que dans les régions plus fraîches et plus humides (Magistad et coll., 1943). Aussi, les informations sur les plantes tolérantes au sel doivent-elles être évaluées compte tenu des conditions dans lesquelles on les cultive.

a) **Stade de développement.** L'énumération des plantes en fonction de leur tolérance au sel (tableau IV) ne met pas en lumière certains problèmes particuliers parce qu'il y a des plantes qui sont spécialement sensibles à la salinité à tel ou tel stade de développement, et tolérantes à d'autres stades (Bernstein et Hayward, 1958 ; Bernstein, 1961). Le riz, par exemple, est tolérant pendant la germination mais devient sensible au sel au stade du jeune plant, et de nouveau quelque peu au moment de la fécondation (Pearson et Bernstein, 1959). Le maïs semble être sensiblement plus tolérant au stade de la germination que plus tard. En revanche, la betterave ne tolère qu'un niveau de salinité d'environ 4 mmhos/cm dans l'extrait saturé au stade de la germination mais peut facilement supporter le triple dès que les jeunes plants ont bien tallé.

TABLEAU IV

Tolérance relative des plantes à la salinité, par ordre décroissant de tolérance dans chaque groupe

Plantes	Tolérantes	Modérément tolérantes	Sensibles
De plein champ	12-8 mmhos /cm	8-4 mmhos /cm	3-2 mmhos /cm
	Orge Betterave à sucre Colza Coton	Seigle Froment Avoine Sorgho grain Sorgho fourr. Fèves de soja Sesbania	Fèves Maïs Riz Lin Tournesol Ricin Féverolles

	8-5 mmhos /cm	5-3 mmhos/cm		3-2 mmhos
Maraîchères	Betterave potagère Chou frisé Asperge Epinard	Tomate Brocoli Chou Chou-fleur Laitue Maïs Pomme de terre Patate douce	Igname Campanula piperi Carotte Oignon Pois Cantaloup Courge Concombre	Radis Céleri Haricots verts
Fourragères	12-6 mmhos /cm	6-3 mmhos/cm		3-2 mmhos /cm
	Distichlis spp. Cynodon dactylon Chiendent allongé Chlorys gayana Elyme du Canada Agropyrum smithii Fétuque élancée Orge (foin) Lotier corniculé	Méfilot Raygrass vivace Brome de montagne Phalaris tubéreuse Elyme inerme Trèfle porte-fraise Paspale dilaté Sorgho du Soudan Melilotus alba annua Luzerne Seigle (foin) Froment (foin)	Avoine (foin) Dactyle peletonné Bouteloua gracilis Fétuque des prés Phalaris arundinacea Lotier des marais Brome lisse Avena eliator Tragacathe Méfilot à petites feuilles	Trèfle blanc Vulpin des prés Trèfle Trèfle hybride Trèfle « Ladino » Pimprenelle Fruitières
Fruitières	8 mmhos /cm	6-3 mmhos/cm		3-1,5 mmhos /cm
	Dattier	Grenades Figues Olives Raisin	Oranges Pamplemousses Citrons Pommes Poires Prunes Prunes d'Agén Amandes	Pêches Abricots Rubus loganobaccus Mûres Framboises Avocats Fraises

Un grand nombre de plantes sont plus sensibles au stade du jeune plant qu'à des stades de croissance ultérieurs. Le riz peut germer dans

les conditions de salinité atteignant 10 ou 15 mmhos/cm mais les plants meurent généralement si la salinité dépasse 5 ou 6 mmhos/cm au stade du jeune plant (Pearson et Ayers, 1958). L'orge se comporte comme le riz et est plus sensible au stade du jeune plant qu'aux stades précédent ou suivant. Parfois, des pratiques spéciales sont nécessaires pour permettre à une culture de survivre durant le stade de tolérance minimale au sel. C'est ainsi que les champs de paddy sont quelquefois drainés et recouverts à nouveau d'eau fraîche afin d'abaisser le taux de salinité à l'époque critique de la floraison où le riz est particulièrement sensible. Des façons spéciales de buttage ont été inventées pour atténuer autant que possible l'accumulation de sel autour des semences en train de germer, ceci étant cause de la médiocrité des récoltes que donnent les plantes semées en ligne et irriguées par infiltration. Ces pratiques sont examinées à la Section VI, C.

2. Tolérance relative des plantes au sodium.

Les caractéristiques chimiques et physiques des sols sodiques ont été décrites à la Section III, A, 2-5, et les ouvrages traitant des facteurs qui influent sur la croissance des plantes dans de tels sols, ont été examinés (Bernstein et Hayward, 1958). On trouvera au tableau V, les données signalées récemment par Pearson (1960) sur la tolérance au sodium de plusieurs cultures agricoles importantes.

La réaction des plantes au sodium échangeable est compliquée par un certain nombre de facteurs, tels que les effets toxiques immédiats dans le cas des espèces sensibles au sodium, les effets indirects imputables à la détérioration structurelle dans les sols sodiques, et les effets sur la nutrition. Ratner (1935, 1944) a souligné que l'accroissement des quantités de sodium échangeable dans le sol fait souvent baisser le total du calcium absorbé par les plantes.

Les symptômes caractéristiques de brûlures apparaissent sur les plantes sensibles au sodium, telles que l'avocat, l'amandier, les agrumes et les fruits à noyaux, dès que l'accumulation de sodium dans les feuilles est trop forte (Martin et Bingham, 1954; Jones et coll., 1957). Ils peuvent également subir des dommages même lorsque le pourcentage de sodium échangeable est trop faible pour détériorer l'état physique du sol. Il semble que le sodium ait un effet toxique direct sur ces espèces, étant donné que l'on n'a découvert aucun signe de carence en calcium, ni aucun autre déséquilibre des éléments nutritifs.

Dans le cas des plantes normalement tolérantes au sodium, leur croissance peut être limitée par l'état physique défavorable des sols sodiques qui restreignent la transmission de l'humidité et l'aération et qui peuvent empêcher physiquement les racines de s'allonger et les semis de lever. Parmi les plantes tolérantes au sodium mais qu'une mauvaise structure du sol affecte en premier lieu, il faut citer les betteraves, *Chloris gayana*, le coton, la tomate et quelques autres céréales. En ce qui concerne les plantes modérément tolérantes, comme la luzerne, le trèfle, le paspale dilaté et quelques autres, la réduction de

leur croissance peut être attribuée non seulement à la structure défavorable du sol mais à des défauts de nutrition.

En se fondant sur les études qu'ils ont faites dans le district de Kanpour en Inde, Agarwal et Yadav (1956) suggèrent que le sodium échangeable et la salinité exercent un effet cumulatif sur la croissance des plantes. Plus récemment, Bernstein (1962) a trouvé que si le sol est maintenu dans de bonnes conditions physiques dans la zone des racines, par des conditionneurs synthétiques, le pourcentage de sodium échangeable exerce une profonde influence sur la croissance végétale lorsque les concentrations de sel sont faibles, mais non quand les concentrations de sel sont élevées dans le milieu d'enracinement. Lagerwerf et Holland (1960) ont découvert des effets analogues dans les cultures sur sable contenant des résines échangeuses pour stimuler les propriétés d'adsorption du sol.

TABLEAU V

Tolérance de diverses plantes au pourcentage de sodium échangeable (PSE)

Gamme des valeurs PSE affectant la croissance		Plantes	Effet sur la croissance dans les cultures de plein champ
Extrêmement sensibles	2-10	Fruits d'arbres à feuilles caduques Noix Agrumes Avocats	Symptômes de toxicité du sodium, à faible PSE
Sensibles	10-20	Haricots	Croissance réduite à faible PSE malgré une bonne structure du sol
Modérément tolérantes	20-40	Trèfle Avoine Fétuque élancée Riz Paspale dilaté	Croissance réduite par des facteurs de nutrition et une mauvaise structure du sol
Tolérantes	40-60	Ble Coton Luzerne Orge Tomate Betterave	Croissance réduite, due généralement à une déféctuosité du sol
Les plus tolérantes	> 60	Agropyrum cristatum Agropyron var. Chiendent élancé Chloris gayana	Croissance freinée, due généralement à une structure déféctueuse du sol.

Il n'y a donc pas d'effet cumulatif et lorsque le sol est salin mais avec une structure physique pas trop déféctueuse, le pourcentage de

sodium échangeable, s'il demeure dans des limites raisonnables, a un effet moins critique que lorsque le sol n'est pas salin. Cependant, dans un sol salé et sodique, les rendements peuvent être réduits par le degré de salinité.

3. Tolérance relative des plantes au bore.

Le bore est indispensable à la croissance des plantes, mais à très faibles concentrations. Il devient toxique dès que l'on en trouve quelques parties par million dans la solution de sol. Des études approfondies ont été consacrées à sa présence dans les eaux et les sols (Eaton, 1935 ; Wilcox, 1955, 1960 ; Kelley et Brown, 1928). Le tableau VI indique la tolérance relative au bore de différentes plantes telle qu'elle a été déterminée par Eaton (1935) et modifiée par Wilcox (1958, 1960) d'après des observations faites plus récemment sur le terrain.

En agriculture, c'est l'eau d'irrigation qui est la source principale de bore, étant donné que toutes les eaux naturelles en contiennent dans une certaine mesure. Les cours d'eau de surface ne sont que rarement contaminés, mais nombre d'eaux de puits contiennent un fort pourcentage de bore. Ces eaux provoquent des concentrations nocives de bore dans le sol lorsqu'elles servent à l'irrigation, surtout si le drainage laisse à désirer.

TABLEAU VI
Tolérance relative des plantes au bore

Tolérantes	Semi-tolérantes	Sensibles
4 p.p.m. "	2 p.p.m.	1 p.p.m.
Asperges	Pommes de terre	Pecan
Dattiers	Coton	Noix
Betteraves sucrières	Tomates	Haricots blancs var. Navy
Betteraves fourragères	Radis	Prunes
Betteraves potagères	Pois	Poires
Luzeine	Olives	Pommes
Fèves	Orge	Raisin
Oignons	Blé	« Kadota fig »
Navets	Maïs	Cerises
Choux	Sogho milo	Pêches
Laitues	Avoine	Abricots
Carottes	Potirons	Mûres
	Campanula piperi	Oranges
	Patates douces	Avocats
	Haricots de Lima	Pamplemousses
		Citrons
2 p.p.m. "	1 p.p.m.	0,3 p.p.m.

" Indique les limites de tolérance au bore dans les eaux d'irrigation.

On a trouvé des concentrations nocives de bore dans les sols de nombreuses régions arides du monde. Aux Etats-Unis, le bore se limite presque exclusivement aux régions arides irriguées de l'Ouest. Bien que la superficie totale des terres dans lesquelles la toxicité du bore pose un problème ne soit pas très étendue, les dommages sont parfois très graves. La classification des eaux en fonction de leur teneur en bore est donnée au tableau I.

Le bore est véhiculé jusqu'aux feuilles où il s'accumule aux extrémités et sur les bords. On décèle les dommages qu'il cause, aux dessins très caractéristiques qui apparaissent sur les feuilles de nombreuses plantes (Wilcox, 1960). La brûlure de l'extrémité qui commence par le jaunissement, puis le brunissement et finit par la mort de la feuille, attaque des plantes telles que le citronnier, l'oranger, le pamplemousse et le noyer noir. Les brûlures des extrémités et des bords de la feuille sont des symptômes caractéristiques que l'on trouve sur les céréales et les graminées comme l'avoine, le sorgho milo, le maïs, le blé et l'orge. Les brûlures des feuilles apparaissent sur un grand nombre de plantes à larges feuilles, y compris les buissons à petits fruits, la luzerne et le coton. Il y a, cependant, des plantes sur lesquelles on ne voit aucun des symptômes caractéristiques de l'empoisonnement par le bore. Parmi celles-ci se trouvent, entre autres, le raisin, les figues, les haricots, *campanula piperi*, les tomates, les pommes de terre, les avocats, les potirons, les pois, les radis, les tournesols, les navets et les betteraves.

Pour diagnostiquer les dommages causés par le bore, on préfère se fonder sur une analyse des tissus foliaires plutôt que sur les symptômes apparaissant sur les feuilles, d'autant plus que cette analyse est parfois plus précise que celle du sol et de l'eau. La teneur normale en bore des feuilles normales arrivées à maturité est d'environ 50 à 100 p.p.m. Les teneurs en bore de 20 p.p.m. au plus, indiquent une déficience tandis que des valeurs supérieures à 250 p.p.m. indiquent généralement une teneur toxique.

Lorsqu'il est prouvé que la teneur en bore atteint un degré nocif, il faut déterminer si l'excédent de bore est apporté par l'eau d'irrigation, le sol ou les engrais. Si c'est l'eau d'irrigation qui est contaminée, on peut parfois y ajouter des quantités suffisantes d'eau d'irrigation à faible teneur en bore pour que le mélange puisse être utilisé sans danger. Dans le cas où cela n'est pas possible, la seule solution consiste à planter des végétaux tolérants au bore, énumérés dans la colonne de gauche du tableau VI. Dans le cas où c'est le sol qui contient du bore, il faut procéder à sa remise en valeur par lessivage avec des quantités considérables d'eau, comme on l'indique à la section V, B.

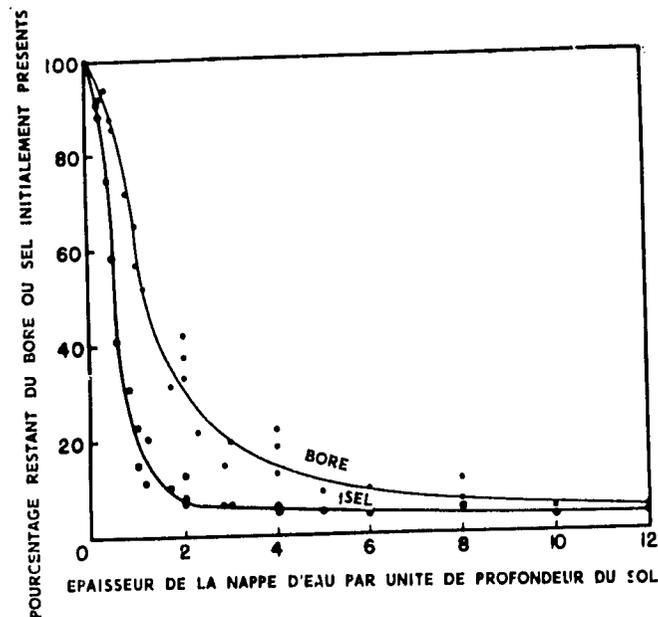
V. RÉCUPÉRATION DES TERRES SALÉES

De nombreuses études nous permettent de mieux comprendre les méthodes et les principes de la récupération des sols salés et sodiques (Hilgard, 1906 ; Harris, 1920 ; Kelley et Thomas, 1928 ; Burgess,

1928 ; Wursten et Powers, 1934 ; Snyder et coll., 1940 ; Reeve et coll., 1948, 1955 ; Kelley, 1937, 1951 ; Bower et coll., 1951 ; Overstreet et coll., 1951, 1955).

A. Lessivage en vue d'évacuer les sels solubles

La récupération par le lessivage prolongé des terres salées comprises dans les nouveaux projets d'aménagement régionaux ainsi que des terres irriguées autrefois dans le cadre d'anciens projets et abandonnées depuis, fait partie du programme global de l'agriculture irriguée. Sur les 40 400 hectares, qui pourraient être irrigués dans la Coachella Valley en Californie, un tiers, par exemple, devra faire l'objet d'un lessivage intensif avant de pouvoir être cultivé avec profit, et sur les 220 000 hectares actuellement irrigués dans l'Imperial Valley, la plupart des terres ont dû subir un lessivage important à une époque quelconque. De 1930 à 1940, 404 000 hectares ont cessé d'être cultivés aux Etats-Unis mais une grande partie de ces terres a été remise en valeur. De vastes superficies dans la région de Delta, dans l'Etat d'Utah, qui avaient été irriguées pendant de nombreuses années avant d'être abandonnées ont également été récupérées.



3. *Pourcentage du sel et du bore initialement présents qui reste dans le sol en fonction de l'épaisseur de la nappe d'eau de lessivage appliquée par unité de profondeur du sol (d'après Reeve et coll., 1955).*

La quantité d'eau nécessaire pour récupérer les terres salines a été déterminée d'après les expériences de lessivage effectuées dans l'Utah (Reeve et coll., 1948) et en Californie (Reeve et coll., 1955). Les résultats essentiels de ces deux expériences sont exprimés par la courbe de lessivage de la fig. 3. Cette courbe montre que si l'on veut faire baisser la teneur en sel du sol à 20 pour cent environ de la forte valeur initiale, il faut 3 060 m³ d'eau par hectare de 30 cm de sol. Ainsi, la récupération d'un sol fortement salé jusqu'à une profondeur de 20 cm, exige au moins 12 236 m³ par hectare en arrosage continu.

Les résultats de ces deux expériences de lessivages concordent d'une manière générale avec les résultats d'une analyse théorique récente dont le problème du lessivage fait l'objet (Gardner et Brooks, 1957); les données devraient donc trouver une application satisfaisante dans d'autres régions.

B. Lessivage en vue d'évacuer le bore

On trouve des sels de bore en concentrations dangereuses dans de nombreux sols arides du monde, y compris la Coachella Valley, Californie (Kelly et Browne, 1928; Reeve et coll., 1955). Lorsque la teneur en bore ne dépasse que légèrement le seuil de tolérance des végétaux, le bore et les sels solubles qui l'accompagnent peuvent être évacués par lessivage au moyen de 12 230 m³ d'eau environ par hectare, ce qui constitue le procédé de récupération habituellement appliqué dans notre vallée. Toutefois, au cours d'une expérience (Reeve et coll., 1955) effectuée sur un sol contenant 54 p.p.m. de bore dans l'extrait saturé, il a fallu au moins 3 fois plus d'eau pour évacuer les sels solubles et ramener la teneur en bore à un niveau inoffensif (1,8 p.p.m.) pour les plantes tolérantes au bore. Ces données, indiquées au tableau VII concordent avec les résultats exprimés par la courbe de lessivage du bore à la figure 3.

TABLEAU VII

Taux de lessivage des sels solubles et du bore ^{u)}

Traitement de lessivage	Dans l'extrait saturé	
	C _{Fc} × 10 ³	Bore (p.p.m.)
Aucun (initial)	64,0	54,0
1,20 m d'eau	4,2	6,9
2,40 m d'eau	3,4	2,4
3,60 m d'eau	3,3	1,5

^{u)} Selon U. S. Salinity Laboratory Staff (1954).

C. Procédés de récupération

1. Déversement.

Un déversement rapide d'eau sur la superficie du sol est un système pratiqué dans certaines parties du monde pour évacuer les accumulations superficielles de sels, désignés souvent par le terme : croûtes salées. Reeve et coll. (1955), ont effectué une série d'expériences afin de définir le degré d'efficacité d'une série d'épandage de surface avec l'eau de la Colorado River sur un sol d'argile limoneux, très fortement salin ($CE_c = 75$ mmhos/cm), dans la Coachella Valley. Etant donné que la quantité de sel évacuée ne représentait qu'un pour cent du sel dans la couche de surface du sol d'une épaisseur de 60 cm, on en a conclu que l'épandage en surface ne semblait pas présenter de valeur spéciale aux fins de récupération des sols suffisamment perméables pour pouvoir être lessivés de la manière habituelle.

2. Irrigation par submersion.

Une méthode qui ressemble à la méthode par calants est très largement utilisée pour lessiver les terrains fortement salins et de faible perméabilité. Elle exige, toutefois, un matériel lourd pour la construction des ados importants que nécessite le maintien sous l'eau du terrain pendant de longues périodes. Dans certains districts d'irrigation, les exploitants ne peuvent obtenir une attribution d'eau aux fins de lessivage qu'après une inspection officielle des ados en vue de déterminer si leur construction est satisfaisante. Cette pratique est dictée par les fâcheuses expériences qui ont été faites autrefois avec des talus mal construits, dont l'effondrement a sévèrement endommagé le système de drainage du district et souvent aussi les récoltes des exploitations voisines.

Si le terrain est convenablement nivelé, on peut utiliser des ados parallèles mais, dans le cas contraire, on doit construire des ados selon les lignes de niveau. Sur les sols très fortement salins et très peu perméables, surtout dans les régions très arides et à températures élevées, la salinité des eaux d'épandage peut doubler et même tripler lors de stations prolongées dans les bassins, allant jusqu'à 90 jours et, parfois même davantage, dans certains cas. C'est pourquoi, on laisse une certaine quantité de l'eau d'épandage se déverser à l'extrémité inférieure des bassins de manière à maintenir un équilibre satisfaisant de la salinité dans les eaux de lessivage. Lorsqu'un lessivage prolongé est nécessaire, on met généralement les bassins à sec au bout de 90 à 120 jours de submersion et l'on prélève des échantillons du sol lessivé pour vérifier le degré de dessalement et décider si un nouveau lessivage est nécessaire.

La méthode de lessivage par submersion a au moins deux inconvénients. La construction d'importants ados de 90 cm de haut parfois, et

de 1,8 à 2,4 m de large à la base, exige l'emploi de grandes et coûteuses machines et une main-d'œuvre abondante. En outre, de fortes quantités de sel s'accumulent quelques fois dans les ados. Lorsque ceux-ci sont détruits au moment du nivellement final, ce sel s'éparpille sur toute la superficie récupérée, de sorte que l'on voit apparaître des taches dispersées dans les cultures initiales. De plus, la terre sous les ados n'est pas toujours lessivée à fond et, de ce fait, les premières cultures qui suivent la récupération peuvent être rayées de bandes stériles. La construction des ados étant très onéreuse, les opérations de lessivage sont rarement interrompues pour modifier la position des ados et éviter l'apparition des bandes stériles. Il est évident que l'on ne devrait utiliser que les plantes les plus tolérantes (tableau IV) sur les terres dont la récupération est difficile.

3. Méthode par submersion et infiltration.

Cette méthode combine les méthodes d'irrigation au moyen des rigoles et au moyen des bassins. On l'a appliquée avec succès dans la Coachella Valley en Californie, où le terrain qui est presque de niveau dans le fond de la vallée, a des textures variant du sable limoneux au limon et dont le sol sous-jacent contient des lentilles d'argile discontinues qui retardent le mouvement descendant de l'eau. Comme c'est le cas pour la méthode par submersion, le sol doit être nivelé (plan dans une direction, avec une pente dans l'autre direction de 0,1 pour cent au plus) et doté d'un réseau de drainage souterrain.

Pour commencer, le sol est labouré à une profondeur de 45 cm, de façon à retourner toute croûte salée qui pourrait s'y trouver, puis il est aplani au moyen d'un instrument approprié puis on creuse des rigoles de niveau. De petits ados étroits, deux fois plus hauts environ que les billons, sont construits dans l'axe de la pente à une distance de quelque 12 m les uns des autres. Les ados sont alternativement coupés de diguettes perpendiculaires toutes les six rigoles à peu près, de telle sorte que l'eau qui est amenée au point le plus élevé du champ zigzague lentement d'un ado principal à l'autre en descendant lentement la pente. L'eau ne doit jamais submerger les billons et doit s'écouler lentement ; elle doit mettre environ une semaine pour atteindre la partie la plus basse d'un champ de 16 hectares. Quand une nappe d'eau de 1,20 m d'épaisseur a été ainsi appliquée, sans ruissellement, on assèche les bassins. Quand ils sont secs, on les herse pour égaliser les ados et les billons, puis on les aplatit et les laboure de nouveau à une profondeur de 45 cm. Ce second labour enfouit le sel qui aurait pu s'accumuler dans les billons et les ados pendant le premier lessivage. Après l'égalisation, les billons et les ados sont rétablis comme précédemment, mais décalés par rapport à leur position initiale. La terre est lessivée de nouveau sous 6 à 12 000 m³ d'eau par ha suivant le cas, pour supprimer efficacement les sels qui se trouveraient dans la zone des racines et les évacuer dans les conduits souterrains.

Cette méthode combinée pour améliorer les terres difficiles à récu-

pérer, a l'avantage d'être plus efficace à moindre frais, et de demander moins de temps que la méthode classique par submersion qui utilise pour le lessivage des ados permanents de dimensions importantes. En outre, on évite ainsi les bandes de terre stériles qui sont dues au lessivage insuffisant sous les ados. Les ados de faible dimensions peuvent être construits avec un petit tracteur que l'on trouve normalement dans toutes les fermes.

La méthode par submersion et filtration donne semble-t-il d'excellents résultats dans la Coachella Valley où la texture du sol s'échelonne entre la texture grossière et la texture moyenne, mais il est douteux qu'elle réussisse aussi bien sur les sols profonds à texture fine et moins perméable de l'Imperial Valley.

4. Tranchées.

On a utilisé avec succès dans la Coachella Valley le procédé des tranchées (fig. 4) pour la récupération de petites zones éparses dans des champs remis en valeur par d'autres moyens qui résistent à l'amélioration après un lessivage sous 12 000 m³ d'eau, effectué de la manière usuelle. La résistance de ces sols est due à la présence de lentilles argileuses dans le sous-sol, situées généralement trop profondément pour être désagrégées par une sous-soleuse ou une charrue taupe. Ces lentilles ont une forme irrégulière et leur superficie varie généralement entre un demi et plus de deux hectares.

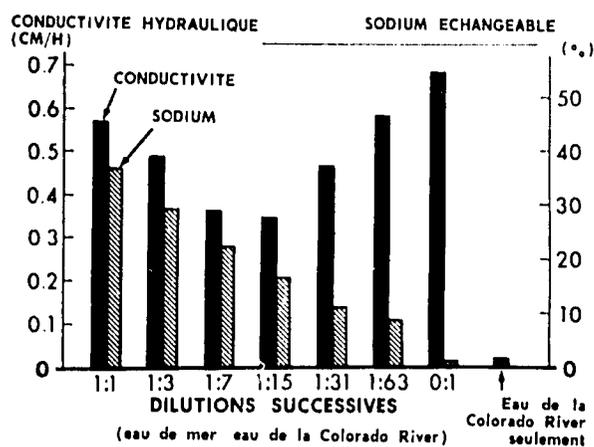
Ces zones réfractaires sont coupées de tranchées d'une profondeur de 1,50 m, creusées à 2,40 m d'intervalle, dans la direction parallèle aux conduits de drainage. On creuse ces tranchées qui ont une largeur de 20 cm, au moyen d'un outil comprenant une chaîne à godets, fixé à l'arrière d'un petit tracteur agricole. On laisse les tranchées ouvertes pendant plusieurs jours, ou en tout cas assez longtemps pour que leurs parois sèchent et se craquèlent, après quoi elles sont comblées à nouveau en travaillant la zone affectée avec une fouilleuse, dans la direction perpendiculaire aux tranchées. Ce matériau de remplissage inconsistant est tassé par de l'eau courante au fond de la tranchée. Quand la terre de remplissage a eu le temps de s'égoutter et de se tasser, on achève le nivellement de la surface entaillée par les tranchées, on dresse des levées et on effectue un fort lessivage comme précédemment. Cette méthode a donné de très bons résultats pour achever de lessiver certaines portions de terrain quand les lentilles argileuses se trouvaient à moins de 1,50 m de la surface, c'est-à-dire au-dessus du niveau du fond de la tranchée, et que l'espace situé entre le fond de la tranchée et les conduits de drainage en poterie laisse bien passer l'eau.

5. Utilisation d'eau à forte teneur en sel.

Les sols sodiques sont difficiles et même parfois impossibles à récupérer en raison de leur perméabilité extrêmement réduite. La récupération complète n'est possible que s'il y a un mouvement de l'eau au travers du sol⁽¹⁾ qui permet la substitution du calcium au

sodium dans le complexe décharge et ⁽²⁾ évacue le sodium qui se trouve dans la zone des racines.

De récentes études effectuées par Reeve et Bower (1960), en laboratoire et sur le terrain, ont prouvé que l'on peut récupérer des sols à forte teneur en sodium en un temps relativement court, en saturant tout d'abord le sol d'eau très saline, comme l'eau de mer ou toute autre du même genre, de manière à flocculer rapidement le sol et à le rendre perméable. Il est essentiel, toutefois, que le taux d'adsorption de sodium (TAS) de la première eau (saline) de lessivage soit sensiblement plus faible que le taux d'adsorption de sodium de l'extrait saturé du sol à lessiver. Dans le cas contraire, il y aura plutôt adsorption qu'évacuation de sodium. Le principe du taux d'adsorption de sodium appliqué à l'accumulation de sel et à la récupération des terres salines est étudié à la Section III, B, 3. Le premier lessivage est suivi de lessivages successifs avec des dilutions d'eau à salure élevée et d'eau d'irrigation. Chaque lessivage successif, à commencer par la première dilution de l'eau salée avec de l'eau d'irrigation, doit être poursuivi jusqu'à ce que le taux d'adsorption du sodium du sol soit en équilibre avec le taux d'adsorption de sodium de l'eau diluée, après quoi on peut continuer le lessivage avec une dilution du degré immédiatement inférieur. Si l'eau salée est trop diluée, il peut se produire une perte de perméabilité et l'opération de récupération se trouve arrêtée. On voit combien un contrôle technique très attentif est indispensable dans ce type de récupération si l'on veut avoir de bons résultats.



5. Conductivité hydraulique et pourcentage de sodium échangeable du sol par rapport aux lessivages successifs avec des dissolutions différentes d'eau de mer. (D'après Reeve et Bowers, 1960).

La figure 5 indique l'évolution de la perméabilité après les lessivages successifs avec de l'eau de mer diluée ainsi que l'évacuation du sodium contenu dans le complexe d'échange après une série de dilu-

tions. Il convient d'ajouter que l'eau de la Colorado River utilisée seule n'a pas accru la perméabilité de ce sol fortement sodique dans des proportions suffisantes pour que sa récupération soit possible.

VI. AMÉNAGEMENT DES SOLS SALÉS

A. Lessivage pour combattre la salinité

Le rapport existant entre la quantité de sel apporté dans une zone donnée (exploitation ou projet d'irrigation) par l'eau d'irrigation et la quantité de sel expulsée par l'eau de drainage a été désignée, par Scofield (1940) par le terme « bilan salin » de la zone. Pour que ce bilan soit favorable, il faut que l'élimination de sel soit égale ou supérieure à l'apport. Les études sur l'équilibre salin de grandes régions irriguées, entreprises initialement par Scofield, ont été développées par Wilcox (1963). Les connaissances relatives au « bilan salin » ont été approfondies par Hill (1961), Klintworth (1952) et Eaton (1954).

La fraction d'eau d'irrigation qui doit passer au travers de la zone des racines pour combattre la salinité à n'importe quel niveau spécifié, a été définie par le U.S. Salinity Laboratory Staff (1954) sous le nom de « **leaching requirement** » (minimum de lessivage nécessaire) (LR) qui peut être calculé grâce à l'équation (3) :

$$LR = \frac{D_{iw}}{D_w} = \frac{CE_{iw}}{CE_{dw}} \quad (3)$$

Le LR est exprimé dans la deuxième partie de cette formule en tant que rapport entre la conductivité de l'eau d'irrigation appliquée (CE_{iw}) et la conductivité de l'eau de drainage (CE_{dw}) nécessaire au maintien de la salinité à un niveau déterminé (équilibre salin favorable) dans le bas de la zone des racines. Il peut être exprimé en fractions ou en pourcentages. Ce concept est le plus utile quand on l'applique à des taux d'écoulement réguliers. Les valeurs CE_{dw} représentent le maximum de salinité toléré par les espèces végétales cultivées.

Les données du Tableau IV sur la tolérance au sel permettent de définir le besoin de lessivage de chaque plante. Dans le cas du coton qui peut tolérer une valeur de $CE_{dw} = 8$ mmhos/cm, le LR est égal à $CE_{iw}/8$. C'est ainsi que pour les eaux d'irrigation dont la conductivité est de 1, 2 et 3 mmhos/cm respectivement, le besoin de lessivage sera de 12, 25 et 38 pour cent. Ce sont des valeurs maximales étant donné que l'évacuation du sel, due à la pluviosité, aux plantes, à la précipitation des sels comme le carbonate de calcium ou le gypse dans le sol, est rarement égale à zéro. S'il est convenablement tenu compte de ces facteurs, ils tendraient à réduire la valeur prévue minimum de lessivage nécessaire.

Kelley et coll. (1949) ont constaté que si la précipitation devient inférieure à 38 cm, il faut des quantités de plus en plus importantes d'eau d'irrigation pour assurer le lessivage nécessaire. Dans de nombreuses

régions arides, les chutes de pluie qui sont efficaces du point de vue du lessivage (total de la chute de pluie, moins les pertes par ruissellement et évaporation) se situent souvent au-dessous de 25 cm et souvent même de 12,5 cm. Cette quantité ne suffit pas pour avoir une incidence appréciable sur les minima de lessivage nécessaires (Eaton 1954). En faisant abstraction de l'évacuation des sels par la pluie, les plantes et la précipitation chimique, la formule LR fournit une marge de sécurité justifiée qui est nécessaire pour assurer la productivité de l'agriculture irriguée.

Dans la mesure du possible, il conviendrait de ne pas recourir à des valeurs LR supérieures à 25 pour cent car elles gaspillent l'eau, aboutissent à une réduction de l'efficacité de l'irrigation et exigent un drainage plus poussé. C'est de la faible perméabilité du sous-sol que peut dépendre et dépend souvent, en fait, la possibilité d'atteindre de hautes valeurs LR pour les plantes sensibles au sel. Le coût de l'eau et les quantités disponibles pour l'irrigation sont d'autres facteurs qui peuvent avoir un effet décisif à cet égard. Dans le cas contraire, la solution à adopter est de cultiver des plantes tolérantes au sel et qui ont des besoins de lessivages moins importants, ce qui permet d'économiser l'eau d'irrigation.

B. Drainage nécessaire pour combattre la salinité

Les problèmes de drainage se posent souvent dans les régions irriguées où l'amenée et le deversement de l'eau présentent des déficiences ; ils sont causés parfois aussi par des écoulements sous surface provenant de régions trop irriguées situées à des niveaux plus élevés (Israelson et Hansen, 1962). Nombre de sols salins et sodiques se sont formés comme suite à un drainage limité par la faible perméabilité du sol sous-jacent ou à la présence d'un plan d'eau élevé dans un sol sous-jacent ailleurs perméable (Thorne et Peterson, 1954 ; Kelley, 1951 ; Magistad et Christianson, 1944 ; Fireman et coll., 1950 ; Fireman et Hayward, 1955 ; U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

1. Drainage nécessaire.

Dans les régions arides, le drainage a essentiellement pour objet la lutte contre la salinité. Pour évaluer le drainage nécessaire il faut tenir compte et de l'efficacité du système construit, et de la quantité d'eau à évacuer (Reeve, 1957 ; Edminister et Reeve, 1957).

Dans le cas des terres irriguées, un système de drainage est approprié s'il a essentiellement pour objet de contrôler la hauteur du plan d'eau (à une profondeur de 1,50 m ou davantage) de manière à maintenir un équilibre salin satisfaisant dans la zone des racines de culture. Si on laisse le plan d'eau s'élever jusqu'à 0,9 à 1,2 m de la surface du sol, les terres irriguées avec de l'eau salée deviennent rapidement improductives par suite de l'accumulation des sels dans la zone des racines. La profondeur du plan d'eau doit être réglée de telle manière que la remontée par capillarité de l'eau souterraine saline vers la zone des racines soit rendue impossible ou, tout au moins, considérablement réduite.

Dans les terres irriguées, on trouve souvent simultanément de fortes teneurs en sels et des plans d'eau très variables. Les racines qui s'étendent et se développent pendant une période où le plan d'eau se retire peuvent être gravement endommagées et souvent même tuées si le plan d'eau remonte et inonde les racines. Lorsque l'eau est saline, l'effet nocif d'un plan élevé est souvent encore plus sérieux en raison des sels qui s'accumulent dans la zone des racines et de la pression de l'humidité qui en résulte et à laquelle les plantes sont soumises. La présence d'un plan d'eau saline à une certaine profondeur au-dessous de la zone des racines n'a guère de conséquence, si ce n'est qu'elle peut affecter le mouvement ascendant des sels jusqu'au voisinage des racines en pleine croissance.

Pearson et Goss (1953) ont démontré l'effet nocif d'une forte teneur en sel et d'un plan d'eau élevé sur des arbres à grape-fruit cultivés dans des lysimètres qui sont équipés en vue de l'ajustement du plan d'eau (Allison et Reeve, 1955). Avec une forte teneur en sel, un plan d'eau situé à 60 cm seulement au-dessous de la surface du sol a causé une diaprure visible des feuilles, suivie de leur jaunissement, puis de leur détérioration progressive. Une teneur élevée ($CE_e = 9$ à 11 mmhos/cm) a provoqué le brunissement et des marques de brûlures, puis la chute des feuilles. Cependant, un traitement contre la teneur élevée en sel, combiné à un plan d'eau élevé et variable a provoqué l'apoplexie des rameaux ainsi que la défoliation des plantes.

Lorsque des plans d'eau très élevés sont causés par la présence de lentilles ou d'horizons argileux durcis, il faut souvent briser ces couches imperméables par des sous-solages, des labours profonds ou par d'autres moyens. Les labours profonds ont souvent été utiles, mais pas toujours, dans Imperial Valley, en Californie, où les sols sont de texture fine, profonde et stratifiée, avec des lentilles sableuses. On a vu à la Section V, C, 4, comment a été établi avec succès un réseau de drainage au moyen de tranchées au travers des lentilles argileuses dans les sols à texture moyenne de la Coachella Valley.

2. Quantité d'eau à drainer.

Pour qu'un système de drainage soit approprié, il faut qu'il fasse perdre au sol l'équivalent de la quantité d'eau qui doit passer par la zone des racines pour y maintenir un équilibre salin satisfaisant. De ce point de vue, l'équation ⁽³⁾ indiquant les minima de lessivage nécessaires mentionnée à la Section VI, A, permet de fixer la limite inférieure du drainage. Toutefois, la quantité totale d'eau qui doit être effectivement drainée s'accroîtra par suite des défauts d'amenée et d'épandage ainsi que par les autres sources d'eau excédentaire qui causent l'existence d'un plan d'eau élevé.

La quantité minimale d'eau à évacuer de la zone des racines exprimée, en terme de consommation et de besoins de lessivage, est la suivante :

$$D_{dw} \text{ (min.)} = \frac{CE_{iw}}{CE_{dw} - CE_{iw}} D_{rw} \quad (4)$$

On obtient ainsi une limite inférieure pour la quantité d'eau à drainer, D_{dw} (mini.), exprimée en équivalent de la teneur en sel de l'eau d'irrigation CE_{iw} et autres conditions déterminées par la culture et le climat, notamment l'utilisation de l'eau par consommation, D_{ew} , et la tolérance au sel des végétaux. La tolérance au sel de la plante (tableau IV) est prise en considération dans le choix des valeurs admissibles de salinité des eaux de drainage, CE_{dw} .

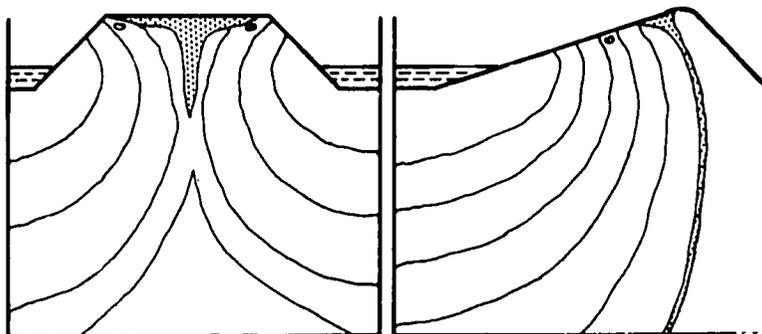
On peut calculer, en se fondant sur cette formule, les besoins minimaux de drainage pour la culture de la luzerne dans une région aride, comme l'Imperial Valley en Californie, par exemple. L'eau d'irrigation de la Colorado River a une conductivité électrique de 1,1 mmhos/cm et la luzerne a des besoins de consommation de 170 000 m³/ha environ, avec une tolérance au sel de 5 mmhos/cm (cf. tableau IV). En utilisant ces données dans l'équation (4), la quantité minimale de l'eau à retirer au-dessous de la zone des racines (besoin de drainage) est approximativement de 49 000 m³/ha par an. Par conséquent, il lui faut 219 000 m³/ha d'eau d'irrigation par an, dont 170.000 pour la consommation et 49 000 pour les besoins de drainage et de lessivage.

C. Procédés spéciaux de culture

Les plantes semées en ligne et irriguées par infiltration ne lèvent pas toujours de manière satisfaisante, à cause du sel qui s'accumule dans la rangée de semences et empêche la germination. Cependant, des lits à semis convenablement confectionnés réduisent l'accumulation du sel autour des semences, comme l'indique la figure 6 (Bernstein et Fireman, 1957).

Lorsque le dessus des lits est plat, le sel présent dans le sol se déplace vers la partie arrosée et s'accumule en couche mince sur le dessus de ces lits et au-dessous de leur centre à l'endroit où les périmètres mouillés se rencontrent. Des niveaux de salinité de 5 à 10 fois supérieurs à la salinité initiale du sol sont atteints au milieu des billons ce qui exclut la possibilité d'obtenir une bonne croissance à cet endroit. Toutefois, l'apparition satisfaisante des plantules peut être obtenue le long des bords du billon où la salinité est réduite au minimum. Les lits convexes se prêtent beaucoup moins au semis en double rangée que les lits plats. Pour avoir des résultats satisfaisants, il faut que l'infiltration de l'eau dans les lits de semis à deux rangées soit uniforme à partir des sillons alternés, faute de quoi le sel se place près de l'un ou l'autre bord, suivant la différence du taux d'infiltration, et empêche la germination des semences.

Dans le cas des lits de semis en pente, le périmètre mouillé chasse devant lui le sel de manière efficace, laissant un sol non salin autour des pousses, malgré des valeurs de salinité dépassant 25 mmhos/cm dans l'extrait saturé. Les lits de semis en pente limitent donc de manière très sensible les dommages que le sel causerait aux semences et permet de ne pas lessiver très vigoureusement, avant de semer, les sols à salinité prohibitive.



6. *Arrosage et accumulation de sel (zone pointillée) dans le cas des lits à dessus plat et des lits à pente (graphique modifié d'après Bernstein et Fireman, 1957).*

D. Amélioration qualitative de l'eau d'irrigation

La qualité de certaines eaux qui ont un fort effet alcalinisant (TAS élevé) mais qui ne contiennent que peu de sels au total (comme l'eau n° 5 du tableau II) peut être améliorée par l'accroissement de leur teneur en calcium. On peut utiliser à cette fin une simple machine (Doneen, 1947) qui verse du gypse en poudre dans l'eau courante du tuyau d'alimentation ou canal d'aménée. On trouve de telles machines dans le commerce. Le bouillonnement de l'eau courante maintient le gypse en suspension jusqu'à ce qu'il soit dissous. On obtient ainsi une eau à haute teneur en calcium (ce qui abaisse le TAS ou la teneur en sodium). L'emploi d'eaux ainsi traitées a amélioré la perméabilité des sols abîmés antérieurement par l'emploi d'eau d'irrigation non traitées et riches en sodium. Des machines servant à mesurer au compteur les engrais et autres amendements ajoutés à l'eau d'irrigation ont été décrites par Fullner (1950).

Une autre manière d'améliorer la qualité des eaux d'irrigation est de mélanger des eaux à forte teneur en sel avec de l'eau à faible teneur en sel. Ceci est facile à faire surtout dans les régions où l'on pompe l'eau principalement en vue de l'irrigation. Il peut arriver parfois qu'une eau de pompage contienne plus de nitrate qu'il n'en faut pour engraisser les plantes ce qui a un effet fâcheux sur les rendements. On peut corriger ce défaut en mélangeant ces eaux à des eaux contenant de très faibles quantités de nitrate.

Des études sur le dessalement des eaux de l'océan sont en cours dans des institutions publiques et des institutions privées. On travaille actuellement sur divers procédés de dessalement (électrolyse, distillation) mais, jusqu'ici, aucune méthode pratique et économique n'a été mise au point.

E. Méthodes et fréquence d'irrigation

Du point de vue de la lutte contre la salinité, ce qui importe, c'est la méthode utilisée pour l'irrigation et la quantité d'eau déversée. Lorsque le taux de salinité est très faible, on peut utiliser avec succès la méthode par infiltration. Toutefois, à mesure que la salinité augmente, la forme des billons ou lits de semis, et la position de la semence par rapport à la hauteur de l'eau dans le sillon doivent retenir l'attention, comme on l'a mentionné dans la Section VI, C. Quand la teneur en sel est encore plus forte, la meilleure méthode d'irrigation est la méthode par calants, comme pour la luzerne. Cette méthode assure la plus grande uniformité de la nappe d'eau et réduit le mieux l'accumulation de sel dans la zone des racines. Dans tous les cas, si l'on veut combattre la salinité de façon à obtenir la production végétale maximale, il est essentiel que la quantité d'eau d'irrigation soit supérieure aux besoins de consommation et qu'elle soit conforme à la tolérance des végétaux.

L'irrigation par aspersion assure une répartition et une pénétration uniformes et garantit de ce fait la meilleure utilisation de l'eau ainsi que la lutte contre la salinité car elle supprime une grande partie des gaspillages qui accompagnent les méthodes d'irrigation de surface. La répartition uniforme de l'eau distribuée par aspersion empêche également l'accumulation en surface des sels dans les lits, billons et ados. Cependant, le risque de mouiller le feuillage pose un problème sérieux dans le cas des plantes qui absorbent du sodium et du chlorure en quantités nuisibles, comme nous l'avons indiqué à la Section IV, A, 3. A cet égard, certaines plantes, comme les fruits à noyaux et les agrumes sont très sensibles à l'absorption de substances nocives par les feuilles, tandis que d'autres, comme les fraises et les avocats résistent très bien aux arrosages en pluie.

La fréquence des arrosages a une profonde influence sur la réaction des plantes lorsque l'eau est saline (Ayers et coll., 1943), surtout parce que le sel conditionne la pression osmotique de la solution de sol. Le rapport entre la pression osmotique et la concentration de sel dans la solution de sol ainsi que ses effets sur la croissance des végétaux ont été mentionnés à la Section IV, A, 2. Après un arrosage, la teneur du sol en humidité est à son maximum et la concentration de sel est à son point le plus bas, les conditions favorables à la croissance végétale sont donc réunies. A mesure que le sol sèche par suite de l'évapotranspiration, la concentration de sel augmente progressivement à mesure que le sol devient de plus en plus sec, avant l'arrosage suivant. C'est pourquoi, de longs intervalles entre les arrosages aggravent l'effet de la salinité sur la croissance. Inversement, des arrosages plus fréquents qui conservent au sol un degré élevé d'humidité, prévient les fortes concentrations de sel dans la solution de sol et tendent à réduire les conséquences fâcheuses d'un degré donné de salinité. Aussi, dans le cas de la plupart des plantes, il convient d'irriguer les sols salins lorsque leur teneur en humidité est considérablement supérieur au point de flétrissement permanent.

VII. CONCLUSIONS

On s'est souvent demandé si l'agriculture irriguée pouvait avoir un caractère permanent, surtout lorsque l'on se remémore les échecs historiques survenus dans diverses parties du monde. Néanmoins, le fait que l'irrigation est pratiquée en Egypte et en Chine depuis plus de 4 000 ans nous prouve que l'irrigation peut avoir un caractère permanent si elle est appliquée dans de bonnes conditions.

D'après les leçons du passé, il est évident que l'existence d'une agriculture irriguée bien portante dépend d'une série de facteurs interdépendants, comprenant les sols, les eaux, les végétaux et l'homme. Qu'un de ces chaînons fasse défaut et il en résulte des épreuves et même des catastrophes pour l'exploitation irriguée. C'est l'homme qui porte, en premier lieu, la responsabilité de nombreux désastres qui ont frappé l'irrigation (les civilisations) dans le passé.

En ce qui concerne le sol, on connaît relativement peu de terres d'une certaine superficie qui ne puissent pas être irriguées avec de bons résultats, uniquement à cause de leurs caractéristiques physiques. Il faut, naturellement, que l'on dispose de quantités suffisantes d'eau de bonne qualité et que l'irrigation soit réalisée suivant une méthode appropriée. Cette méthode peut comprendre, notamment, l'installation d'un système efficace de drainage lorsque les sols sont profonds, à texture fine et peu perméables.

On possède assez d'information sur ce sujet pour pouvoir récupérer des sols à forte salinité ou à forte teneur en sodium. Dans les deux cas, le succès de l'opération dépend, évidemment, d'un drainage souterrain approprié qui permette d'évacuer le sel se trouvant dans la zone des racines.

Les eaux d'irrigation varient considérablement quant à la teneur en sel (facteur de concentration), au pourcentage de sodium (facteur de composition) et à la teneur en bore (facteur phytotoxique). Mises à part quelques eaux qui ne conviennent pas du point de vue qualitatif, presque toutes les eaux de surface de l'Ouest des Etats-Unis et un grand nombre d'eaux souterraines suffisamment abondantes, sont utilisées pour l'irrigation avec de bons résultats. L'augmentation de la salinité de certaines eaux superficielles, imputable à leur utilisation et réutilisation plus complètes, cause une inquiétude croissante aux exploitants des régions irriguées situées en aval car ils se trouveront sans doute obligés de modifier, en fin de compte, leurs installations et leurs méthodes d'exploitation en ce qui concerne le lessivage, le drainage et les espèces végétales cultivées.

Les plantes les plus rentables ont été classées du point de vue de leur réaction à la salinité, en fonction de la conductivité électrique d'un extrait de sol saturé. Ces mesures fournissent une excellente base de calcul lorsqu'il s'agit de déterminer le lessivage qui est nécessaire pour maintenir un équilibre salin approprié dans la zone des racines et un

maximum de rendement. Le « minimum de lessivage nécessaire » établit un rapport entre la faculté qu'a la plante considérée de supporter la salinité dans la zone des racines et le degré de salinité de l'eau utilisée pour l'irrigation et sert, ainsi, à déterminer les pratiques qu'il convient d'adopter dans le domaine de l'irrigation.

Aux Etats-Unis comme dans d'autres pays avancés, la recherche et l'instruction ont permis, au cours des dernières décennies, d'approfondir les problèmes physiques et chimiques que pose l'agriculture irriguée. Ces connaissances s'étendent à travers le monde jusqu'aux pays en voie de développement et devraient contribuer sensiblement à satisfaire les besoins en produits d'alimentation et en fibres, de populations de plus en plus nombreuses.

En nous fondant sur ce que la science sait actuellement des problèmes posés par les sols et l'eau, ainsi que des pratiques d'exploitation, il ne semble pas y avoir de raison valable pour que l'agriculture irriguée, une fois établie, ne puisse pas être pratiquée avec succès de manière permanente.

Références

- Agarwal, R.R., and Yadav, J.S.P. 1956. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 4, 141-145.
- Allison, L.E., and Reeve, R.C. 1955. *Soil Sci.* 79, 81-91.
- Arany, S. 1956. *Congr. Intern. Sci. Sol. 1956 Rappt.* 6B, pp. 655-659.
- Ayers, A.D., Wadleigh, C.H., and Gauch, H.G. 1943. *Plant Physiol.* 18, 151.
- Banerjee, S. 1959. *Soil Sci.* 88, 45-50.
- Bernstein, L. 1958. *U.S. Dept. Agr. Agr. Inform. Bul.* 194.
- Bernstein, L. 1959. *U.S. Dept. Agr. Agr. Inform. Bull.* 205.
- Bernstein, L. 1960. *U.S. Dept. Agr. Agr. Inform. Bull.* 217.
- Bernstein, L. 1961. *Am. J. Botany* 48, 909-918.
- Bernstein, L. 1962. *Proc. Paris Symp. UNESCO Arid Zone Res. 1960 XVIII*, pp.139-174. UNESCO, Paris, France.
- Bernstein, L., and Fireman, M. 1957. *Soil Sci.* 83, 249-263.
- Bernstein, L., and Hayward, H.E. 1958. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 9, 25-46.
- Bingham, F.T., Page, A.L., and Bradford, G.R. 1964. *Soil Sci.* 98 (July issue).
- Bower, C.A. 1960. *Trans. 7th Intern. Congr. Soil Sci. Madison, Wisconsin, 1960* Vol. 2, pp. 16-21.
- Bower, C.A. 1962. Unpublished data.
- Bower, C.A., Swarner, L.R., Marsh, A.W., and Tileston, F.M. 1951. *Oregon State Coll. Agr. Expt. Sta. Tech. Bull.* 22.
- Bower, C.A., Haise, H.R., Legg, J., Reeve, R.C., Carlson, R., Dregne, H.E., and Whitney, R.S. 1962. *U.S. Dept. Agr., Agr., Res. Serv. Rept. Tech. Study Group* 41 pp.
- Bradford, G.R. 1963. *Soil Sci.* 96, 77-81.
- Bradshaw, G.B., and Donnan, W.W. 1953. Unpublished data.
- Brown, J.C. 1956. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 7, -171-190.
- Brown, J.W., and Wadleigh, C.H. 1955. *Botan Gaz.* 116, 201-209.
- Brown, J.W., Wadleigh, C.H., and Hayward, H.E. 1953. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 61, 49-55.
- Burgess, P.S. 1928. *Arizona Univ. Agr. Expt. Sta. Bull.* 123.
- Buringh, P. 1960. « Soils and Soil Conditions in Iraq ». Iraq Ministry of Agriculture, Iraq.

- Christiansen, P.D., and Lyerly, P.J. 1952. *Texas Agr. Expt. Sta. Circ.* 132.
- de Sigmund, A.A.J. 1924. *Soil. Sci.* 18, 379-381.
- Doering, E.J. 1963. *Soil Sci.* 96, 191-195.
- Doneen, L.D. 1954. *Trans. Am. Geophys. Union* 35, 943-950.
- Doneen, L.D. 1947. Unpublished data.
- Doneen, L.D., and Grogan, R.G. 1954. Unpublished data.
- Donnan, W.W., Bradshaw, G.B., and Blaney, H.F. 1954. *U.S. Dept. Agr., Soil Conserv. Serv. Tech. Publ.* 120.
- Eaton, F.M. 1935. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 448.
- Eaton, F.M. 1936. *Trans. Am. Geophys. Union Pt. II*, 512-516.
- Eaton, F. M. 1950. *Soil Sci.* 69 123-133.
- Eaton, F.M. 1954. *Texas Agr. Expt. Sta. Misc. Publ.* 111.
- Eaton, F.M. 1958. *Calif. Citrograph* 44, 20-22.
- Edminister, T.W., and Reeve, R.C. 1957. *Yearbook Agr. (U.S. Dept. Agr.)* pp. 378-385.
- Fireman, M.F., and Hayward, H.E. 1955. *Yearbook Agr. (U.S. Dept. Agr.)* pp. 321-327.
- Fireman M.F., Mogen, C.A., and Baker, G.O. 1950. *Idaho Univ. Agr. Expt. Sta. Res. Bull.* 17.
- Fullmer, F.S. 1950. *Better Crops Plant Food* 34, 8-14.
- Gapon, F.N. 1933. *J. Gen. Chem. USSR (English Transl.)* 3, 114-152.
- Gardner, W.R., and Brooks, R.H. 1957. *Soil Sci.* 83, 295-304.
- Gauch, H.G., and Wadleigh, C.H. 1944. *Botan. Gaz.* 105, 379-387.
- Gauch, H.G., and Wadleigh, C.H. 1951. *Botan. Gaz.* 112, 259-271.
- Geraldson, C.M. 1960. *Sunshine State Agr. Res. Rept.* 1, 10-11.
- Grillot, G. 1956. Reviews of Research. UNESCO Arid Zone Research, IV, pp. 9-35. UNESCO, Paris.
- Harley, C.P., and Lindner, R.C. 1945. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 46, 35-44.
- Harris, F.S. 1920. « Soil Alkali, Its Origin, Nature and Treatment », Wiley, New York.
- Hayward, H.E. 1958. Unpublished data.
- Hayward, H.E., and Spurr, W.B. 1943. *Botan. Gaz.* 105, 152-164.
- Hayward, H.E., and Spurr, W.B. 1944. *Botan. Gaz.* 106, 131-139.
- Hayward, H.E., and Wadleigh, C.H. 1949. *Advan. Agron.* 1, 1-38.
- Hilgard, E.W. 1906. « Soils, Their Formation, Properties, Composition and Relation to Climate and Plant Growth », Macmillan, New York.
- Hill, R.A. 1961. *J. Irrigation Drainage Div., Am. Soc. Civil Engrs.* 87, 1-5.
- Israelson, O.W., and Hansen, V.E. 1962. « Irrigation Principles and Practices », 3rd ed. Wiley, New York.
- Jones, W.W., Martin, J.P., and Bitters, W.P. 1957. *Proc. Am. Soc. Hort. Sci.* 69, 189-196.
- Kelley, W.P. 1937. *Calif. Univ. Agr. Expt. Sta. Bull.* 617.
- Kelley, W.P. 1951. « Alkali Soils, Their Formation, Properties and Reclamation », Reinhold, New York.
- Kelley, W.P. 1962. *Soil Sci.* 95, 385-391.
- Kelley, W.P., and Brown, S.M. 1928. *Hilgardia* 3, 445-458.
- Kelley, W.P., Brown, S.M., and Liebig, G.F., Jr. 1939. *Soil Sci.* 49, 95-107.
- Kelley, W.P., Laurence, B.M., and Chapman, H.P. 1949. *Hilgardia* 18, 635-665.
- Kelley, W.P., and Thomas, E.E. 1928. *Calif. Agr. Expt. Sta. Bull.* 455.
- Klintworth, H. 1952. *Farming S. Africa* 27, 45-51.
- Lagerwerff, J.V., and Holland, J.P. 1960. *Agron. J.* 52, 603-608.
- Lilleland, O., Brown, J.G., and Swanson, C. 1954. *Almond Facts* 9, 1, 5.
- Magistad, O.C., and Christianson, J.E. 1944. *U.S. Dept. Agr. Circ.* 707.
- Magistad, O.C., Ayers, A.D., Wadleigh, C.H., and Gauch, H.G. 1943. *Plant Physiol.* 18, 151-166.

- Martin, J.P., and Bingham, F.T. 1954. *Soil Sci.* 78, 349-360.
- Overstreet, R., Martin, J.C., and King, H.M. 1951. *Hilgardia* 21, 113-127.
- Overstreet, R., Martin, J.C., Shultz, R.K., and McCutcheon, O.P. 1955. *Hilgardia* 24, 53-68.
- Pearson, G.A. 1960. *U.S. Dept. Agr. Agr. Inform. Bull.* 216.
- Pearson, G.A., and Ayers, A.D. 1958. Unpublished data.
- Pearson, G.A., and Bernstein, L. 1958. *Soil Sci.* 86, 254-261.
- Pearson, G.A., and Bernstein, L. 1959. *Agron. J.* 51, 654-657.
- Pearson, G.A., and Goss, J.A. 1953. *Proc. Rio Grande Valley Hort. Inst.* 7, 1-6.
- Ratner, E.I. 1935. *Soil Sci.* 40, 459-471.
- Ratner, E.I. 1944. *Pochvovedenie* 4-5, 205-207.
- Reeve, R.C. 1957. *Proc. 3rd Congr. Intern. Comm. Irrigation Drainage, San Francisco, Calif., 1957* pp. 10 175-10 187 (preprint).
- Reeve, R.C., and Bower, C.A. 1960. *Soil Sci.* 90, 139-144.
- Reeve, R.C., Allison, L.E., and Peterson, D.F., Jr. 1948. *Utah State Agr. Coll. Expt. Sta. Bull.* 335.
- Reeve, R.C., Pillsbury, A.F., and Wilcox, L.V. 1955. *Hilgardia* 24, 69-91.
- Richards, L.A., and Hayward, H.F. 1957. *Proc. 1st Intersoc. Conf. Irrigation Drainage, San Francisco, Calif., 1957* pp. 93-96.
- Richards, L.A., Bower, C.A., and Fireman, M.F. 1956. *U.S. Dept. Agr. Cir.* 982.
- Scofield, C.S. 1936. *Smithsonian Inst. Ann. Rept. 1934-1935*, 275-287.
- Scofield, C.S. 1940. *J. Agr. Res.* 61, 17-39.
- Scofield, C.S., and Headley, F.B. 1921. *J. Agr. Res.* 21, 265-278.
- Scofield, C.S., and Wilcox, L.V. 1931. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 264.
- Snyder, R.S., Kulp, M.R., Baker, G.O., and Marr, J.C. 1940. *Idaho Univ. Agr. Expt. Sta. Bull.* 233.
- Teakle, L.J.H. 1937. *Australia (West.) Dept. Agr.* [2] 14, 115-123.
- Thorne, J.P., and Thorne, D.W. 1951. *Utah State Agr. Coll. Expt. Sta. Bull.* 346.
- Thorne, D.W., and Peterson, H.B. 1954. « *Irrigated Soils* », 2nd ed. McGraw-Hill (Blakiston), New York.
- U.S. Salinity Laboratory Staff. 1954. *U.S. Dept. Agr. Agr. Handbook* 60, 160 pp.
- Wadleigh, C.H., and Brown, J.W. 1952. *Botan. Gaz.* 113, 373-392.
- Wilcox, L.V. 1948. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 962.
- Wilcox, L.V. 1955. *U.S. Dept. Agr. Circ.* 969.
- Wilcox, L.V. 1958. *U.S. Dept. Agr. Agr. Inform. Bull.* 197.
- Wilcox, L.V. 1959. *Am. Soc. Testing Mater. Spec. Tech. Publ.* 273, 58-64.
- Wilcox, L.V. 1960. *U.S. Dept. Agr. Agr. Inform. Bull.* 211.
- Wilcox, L.V. 1963. *U.S. Dept. Agr. Tech. Bull.* 1 290.
- Wilcox, L.V., Blair, G.Y., and Bower, C.A. 1954. *Soil Sci.* 77, 259-266.
- Wursten, J.L., and Powers, W.L. 1934. *J. Am. Soc. Agron.* 26, 752-762.