

Distribution limitée

Reproduction provisoire sans graphiques

UNESCO/N /AZ/81

PARIS, le 15 décembre 1952

Traduit de l'anglais

INDEXÉ

ORGANISATION DES NATIONS UNIES  
POUR L'EDUCATION, LA SCIENCE ET LA CULTURE

PROGRAMME DE LA ZONE ARIDE

CROISSANCE DES PLANTES EN MILIEU SALIN

Rapport examinant les problèmes biologiques relatifs aux plantes  
qui peuvent supporter l'eau salée ou saumâtre  
et l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation,  
en particulier en Australie, dans l'Inde et l'Hémisphère occidental

par H.E. Hayward  
Directeur du United States Salinity Laboratory

Riverside, Californie, U.S.A.  
mai 1952

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
Introduction .....	3
Classification des sols salins et alcalins .....	4
Sols alcalins .....	4
Sols salins .....	4
Qualité de l'eau pour l'irrigation .....	5
Bases physiologiques de la tolérance au sel .....	8
Bases physiologiques de la tolérance aux alcalis .....	10
Effets des sols salins et alcalins sur la croissance des plantes .....	12
Influence sur l'osmose et l'humidité du sol .....	13
Influence toxique d'ions particuliers .....	16
Sodium .....	16
Calcium .....	17
Magnesium .....	17
Potassium .....	18
Chlorures .....	18
Sulfates .....	19
Bicarbonates .....	20
Nitrates .....	21
Tolérance au sel et germination .....	22
Spécificité dans la tolérance au sel .....	25
Importance du problème du sel dans les régions géogra- phiques considérées :	30
Australie .....	31
Inde et Pakistan .....	33
Amérique du Sud et Centrale .....	37
Argentine et Chili .....	37
Pérou et Equateur .....	38
Brésil .....	39
Mexique .....	39
Amérique du Nord .....	40
Canada .....	40
Etats-Unis d'Amérique .....	43

CROISSANCE DES PLANTES EN MILIEU SALEINTRODUCTION

Dans les régions où il y a suffisamment de pluies pour permettre l'agriculture, il est exceptionnel qu'un excès de sels solubles s'accumule dans le sol. Etant donné que l'eau de pluie est essentiellement dépourvue de sels, les matières solubles du sol sont entraînées par lessivage, en dehors de la zone des racines, dans les eaux de drainage et les ruisseaux. D'autre part, là où la pluviosité est faible ou fait défaut, des conditions d'aridité ou de semi-aridité prédominent, et les sols tendent à devenir salés parce qu'il ne passe pas assez d'eau à travers le profil pour lessiver les sels qui s'accumulent. Ces sels proviennent essentiellement de la désintégration progressive des rochers, des minerais et des matériaux de ce genre sous l'action des éléments atmosphériques au cours du processus de formation du sol, mais parfois les sels peuvent s'être accumulés quand la région était recouverte par un océan ou un lac salé (92,96,110).

Les terrains salés se rencontrent aussi dans des zones côtières où ils ont été constitués par des marécages, et tiennent leur sel de l'eau de mer qui les a recouverts et s'est évaporée dans des bassins ou des estuaires. Les terrains côtiers salés peuvent avoir une action semblable à celle qui résulte de l'aridité sur la croissance des plantes, et dans certains cas la réaction défavorable des plantes à la salinité peut être plus accusée, car les sels de l'eau de mer n'augmentent que très peu la fertilité du sol. Il en est parfois autrement lorsque les terrains côtiers salés sont situés à proximité des embouchures ou des deltas des fleuves et reçoivent les sédiments fins qu'ils ont apportés. Ces terres de deltas peuvent être très fertiles et productives quand elles sont débarrassées de leurs sels.

En général les terrains salés sont fertiles ; quand on s'est débarrassé des sels nocifs par des pratiques agricoles appropriés, ils peuvent s'avérer excellents pour l'agriculture si l'on dispose d'eau en qualité et en quantité satisfaisantes. C'est ce qui s'est produit dans l'Ouest des Etats-Unis où l'expérience a montré que les terrains salés sont habituellement fertiles lorsque on les irrigue pour la première fois. Toutefois, si l'on continue à pratiquer l'agriculture d'irrigation, des déficits d'éléments fertilisants se manifestent dans l'ordre suivant : azote, phosphore et potassium.

Le problème du sel n'est pas nécessairement limité aux zones salines et alcalines inutilisées par l'homme jusqu'à présent, et qu'il faut irriguer parce qu'en agriculture la salinité est étroitement liée à l'irrigation et à la qualité de l'eau ; il peut être aggravé par l'homme. Comme l'a montré Scofield (199), "l'utilisation d'eau d'irrigation salée implique le danger que des sels solubles s'accumulent dans le sol irrigué à son détriment". Certes une partie du sel peut être enlevée par la récolte, une partie peut s'accumuler à la surface du sol, sécher et être éliminée par le vent, mais la proportion de sels enlevés de cette façon est faible comparée aux quantités qui sont susceptibles d'être ajoutées si on emploie des eaux d'irrigation salées (51, 142). De la sorte, lorsqu'on apporte plus de sel qu'on n'en retire, des sols légèrement salés peuvent devenir fortement salés en raison d'un bilan du sel défavorable habituellement provoqué par l'utilisation d'eau d'irrigation à forte salinité, une irrigation impropre au lessivage et un drainage médiocre (92, 199).

Le présent rapport a pour but de passer en revue les recherches concernant les problèmes biologiques relatifs à la croissance des plantes en milieu salé ou

alcalin. Dans les sections qui suivent, on décrira la classification des sols salins et alcalins, ainsi que les relations entre la qualité de l'eau et la croissance des végétaux. La partie principale du rapport traitera des recherches relatives à : 1) la base physiologique de la tolérance au sel et aux alcalis, 2) l'effet qu'ont sur la croissance des plantes le sol et les eaux salées et alcalines, 3) la tolérance au sel en ce qui concerne la germination, et 4) la spécificité de la tolérance au sel. Dans la conclusion, on examinera l'importance du problème du sel en Australie, dans l'Inde, dans l'Hémisphère occidental, ainsi que les sols salés ou alcalins qu'on rencontre dans ces régions.

#### CLASSIFICATION DES SOLS SALES ET ALCALINS

Le but de ce rapport n'est pas d'exposer en détail les caractéristiques chimiques et physiques des sols salins et alcalins ou la façon dont il faut les traiter pour les améliorer ou les irriguer ; mais il est nécessaire d'en faire une brève classification qui servira de base de référence au cours de l'exposé relatif à la croissance des végétaux en milieu salin ou alcalin.

Il n'existe pas de terminologie ou de système de classification bien définis pour les sols salins, et les spécialistes ne sont pas en complet accord sur ce point. Magistad (144), et plus récemment Kelley (125) ont passé en revue les écrits publiés sur la formation et la classification des sols salins et alcalins, y compris les systèmes proposés par de Sigmond (206), Gedrois (76), Kowda (129), Kelley (124), Hilgard (110) et d'autres auteurs.

En raison des différences de signification des termes utilisés dans la bibliographie, le United States Salinity Laboratory (230) a publié une terminologie et une description des sols salés et alcalins que Richards (187) a exposées à la réunion du Congrès international de la Science du Sol qui s'est tenue à Amsterdam. Les termes définis dans cette publication sont donnés ci-dessous :

Sol alcalin - Sol contenant assez de sodium libérable\* pour provoquer l'inhibition de la croissance de la plupart des plantes cultivées, et qui peut contenir en outre des quantités appréciables de sels solubles. On distingue deux catégories de sols alcalins :

(A) Sols alcalins non salins - Contenant assez de sodium libérable pour inhiber la croissance de la plupart des plantes cultivées, mais ne contenant pas de concentrations appréciables de sels solubles. Le pourcentage de sodium échangeable est supérieur à 15, la conductivité de l'extrait de saturation est inférieure à 4 millimhos par centimètre à 25°C, et le pH du sol saturé dépasse généralement 8,5.

(B) Sols alcalins salins - Contenant à la fois assez de sodium libérable pour inhiber la croissance de la plupart des plantes cultivées et des sels solubles en quantités appréciables. Le pourcentage de sodium échangeable est supérieur à 15, la conductivité de l'extrait de saturation est supérieure à 4 millimhos par centimètre à 25°C, et le pH du sol saturé est généralement inférieur à 8,5.

Sol salin - Sol non alcalin qui contient des sels solubles en telles quantités qu'ils inhibent la croissance de la plupart des plantes cultivées. La conductivité de l'extrait de saturation est supérieure à 4 millimhos par centimètre à 25°C, le pourcentage de sodium échangeable est inférieur à 15, et le pH du sol saturé est en général inférieur à 8,5.

WS/112.52 \* Quelques pédologues comprennent le potassium échangeable avec le sodium dans les considérations sur les sols alcalins (180,206).

Le terme pourcentage de sodium échangeable indique le degré de saturation en sodium du complexe d'échange du sol et sa définition est la suivante :

$$\frac{(\text{Sodium échangeable en milliéquivalents par } 100 \text{ gm. de sol}) \times 100}{(\text{Capacité d'échange de cations en milliéquivalents par } 100 \text{ gm. de sol})}$$

Le degré de salinité ou teneur du sol en sel soluble peut être déterminé gravimétriquement en pesant le résidu d'évaporation d'un extrait à l'eau du sol, chimiquement par détermination des principaux ions dans l'extrait à l'eau du sol, ou par mesure de la conductivité électrique. La première méthode n'est pas suffisamment précise pour permettre d'interpréter la réaction de la plante ; et la seconde, bien que très sûre, est longue et onéreuse. La méthode généralement la plus répandue pour déterminer la salinité des sols est peut-être celle que décrivent Davis et Bryan (46) et qui consiste à mesurer la résistance électrique de la pâte de sol saturé dans une coupelle électrode standard.

Il est toutefois admis que la pression osmotique de la solution du sol est probablement le meilleur indice qui rende compte de la réaction de la plante à la salinité du sol (187, 230). Pour apprécier la tolérance au sel des plantes cultivées, Scofield (200) utilisait l'échelle de salinité suivante basée sur la conductivité électrique de la solution extraite de la pâte de sol saturé.

Toutes les cultures prospèrent Aucune trace d'attaque par le sel	Les plantes sensibles végètent. Des halophytes peuvent donner satisfaction	Croissance des végétaux réduite Rendement habituellement médiocre	Seules quelques plantes survivent
0	4	8	15
Conductivités-Millimhos par cm.			

Cette échelle correspond à une tolérance moyenne au sel. Il y a des exceptions, et elles sont notées dans une section suivante, mais cette classification est très utile pour les besoins de l'agronomie, et la conductivité de l'extrait de saturation est utilisée dans les définitions données ci-dessus (230).

L'échelle du pH mesure la concentration effective de l'ion hydrogène et est utilisée comme un indice d'acidité ou d'alcalinité des sols. Bien qu'il y ait une relation positive générale entre le pH et le pourcentage de sodium échangeable des sols, le pH est profondément influencé par d'autres facteurs tels que les cations absorbés, la quantité d'eau dans le sol, la structure du sol, la pression de CO<sub>2</sub>, les carbonates alcalins de la terre, le gypse, les sels solubles, la matière organique et le type d'argile (64). Pour cette raison, il ne semble pas que pour indiquer un sol alcalin le pH soit un criterium aussi utilisable que le degré de saturation du sol par le sodium échangeable.

#### QUALITE DE L'EAU D'IRRIGATION

Toutes les eaux naturelles utilisées pour l'irrigation contiennent des sels minéraux en solution qui proviennent des roches ou des matières solides à travers lesquelles elles ont filtré. Les matières dissoutes les plus communes sont les chlorures, les sulfates, les bicarbonates de calcium, de magnésium, de sodium, et c'est la concentration et la proportion de ces sels qui déterminent la possibilité d'utiliser une eau pour l'irrigation. D'autres constituants comme le bore, qui a

un effet toxique sur les végétaux, peuvent se trouver en moindres quantités dans l'eau d'irrigation.

Si l'eau utilisée pour l'irrigation contient les constituants désignés ci-dessus en quantités excessives, la croissance des végétaux peut en être affectée de trois manières : (1) sous l'action de modifications défavorables des caractéristiques physiques du sol, (2) à l'augmentation de pression osmotique des solutions du sol peut correspondre une diminution pour le végétal de l'humidité du sol physiologiquement utilisable, (3) l'accumulation de certains ions dans les solutions du sol peut avoir un effet toxique spécifique sur l'activité physiologique de la plante.

Des études sur les caractéristiques chimiques de l'eau du sol et de l'eau de ruissellement pour déterminer les normes de qualité de l'eau d'irrigation ont été faites par Cassidy (40), Thorne et Thorne (226), Jensen en collaboration avec d'autres auteurs (117), Eaton (56), Wilcox et ses collaborateurs (253, 254).

Suivant Wilcox, les principaux critères pour déterminer la qualité de l'eau sont les suivantes : (1) la concentration totale en sels dissous, (2) le pourcentage de sodium, (3) la concentration en bore. Comme on trouve moins fréquemment de bore dans les eaux naturelles, plusieurs types de classification des eaux basés sur les deux premières caractéristiques ont été proposés. Wilcox (253) a classé les eaux d'irrigation en cinq catégories d'après la concentration totale et le pourcentage de sodium (figure 1). Thorne et Thorne (226), utilisant les mêmes critères, ont établi 25 catégories de qualité pour lesquelles la probabilité d'établissement des conditions d'alcalinité dans le sol correspond aux taux du pourcentage de sodium.

Figure 1 - Non reproduite dans ce document.

Greene (79) utilise dans son système la concentration (en milliéquivalents par litre) et le % de Sodium, mais n'établit pas de catégories d'eau distinctes. Il indique que de l'eau contenant plus de 30 milligrammes-équivalents de sel par litre est habituellement impropre à l'irrigation, et il déclare que le % de sodium "peut atteindre 60 à 70 % des équivalents basiques totaux avant d'exercer une action vraiment défavorable sur le sol".

La conductivité électrique constitue un indice commode et communément employé de la teneur totale en sels de l'eau d'irrigation, et, en général, quand la conductivité électrique est inférieure à 1.000 micromhos par centimètre, on peut s'attendre à ce que l'accumulation des sels dans le sol ait peu d'inconvénients ; mais quand la conductivité dépasse 3.000 micromhos/cm, l'accumulation des sels sera probablement dangereuse (146, 230, 253). La richesse en sel s'exprime aussi en milliéquivalents par litre, parties par million (p.p.m.), ou en termes du poids total de sel par rapport à la profondeur de l'eau recouvrant une superficie de terrain donnée.

Le second critère pour juger de la qualité de l'eau est important, car une forte proportion de sodium dans l'eau d'irrigation entraîne une forte proportion de sodium dans la solution du sol et dans son complexe d'échange. Il en résulte des modifications défavorables des propriétés physiques du sol. Les sols à forte

teneur en sodium ont tendance à être "amorphes" ou dispersés, et leur perméabilité est généralement diminuée. On ne peut fixer de limite précise pour le pourcentage de sodium, car des sols de différents types réagissent différemment à une eau qui a un taux de sodium déterminé, mais si le taux de sodium est inférieur à 60 il est peu vraisemblable que l'on rencontre des difficultés. Fireman et Magistad (61) déclarent que "la perméabilité diminue fortement quand la concentration en sel est réduite à la suite du filtrage par une eau riche en sodium", mais soulignent que "comme les sols réagissent différemment à la même eau, il est erroné d'indiquer un pourcentage précis de sodium au-dessus duquel l'irrigation aura des effets défavorables. Il semblerait préférable d'indiquer une série de pourcentages". Wilcox (253) a indiqué que la limite acceptable de Sodium était de 40 à 60 %, Magistad et Christiansen (146) donnent 60 à 75 % comme limite pour des eaux de la classe 2, et Eaton (53) déclare que les eaux qui ont plus de 65 % du total des bases en sodium sont de qualité douteuse.

Le Bore en tant que facteur de la qualité de l'eau a été très étudié par Eaton, Scofield, Wilcox, et d'autres auteurs (53, 58, 202, 253). Des concentrations de Bore de 0,67 p.p.m. seulement peuvent être toxiques pour les plantes cultivées les plus sensibles et celles qui sont le plus tolérantes sont en grand danger d'être endommagées lorsqu'on utilise pour l'irrigation de l'eau qui contient plus de 2 à 3 p.p.m. de Bore (230, 253).

En 1894, Hilgard (110) et Loughridge (136) montrèrent la relation qui existe entre la présence de carbonate ou de bicarbonate de sodium dans les eaux d'irrigation et la formation de sols alcalins. Stabler (211), Scofield et Headley (201), Hill (111) reconnurent aussi l'importance des carbonates dans les eaux d'irrigation ; récemment Eaton (56), Jensen (117), Fireman (en collaboration) (62), et Wilcox (253) ont à nouveau attiré l'attention sur cette question. Eaton étudie les carbonates et bicarbonates dans les eaux d'irrigation à deux points de vue :

- (1) la relation entre ces ions et la formation d'alcali noir, et
- (2) la relation entre la quantité de ces ions dans une eau et l'ampleur des modifications du pourcentage de sodium qui peuvent se produire à mesure que l'eau d'irrigation devient solution du sol et se concentre sous l'action de l'évaporation et des prélèvements d'eau des plantes. Il souligne que : "si une provision d'eau fournie contient plus de carbonates et bicarbonates que de calcium et de magnésium, lorsque l'évaporation et les prélèvements des plantes ont provoqué la précipitation du calcium et du magnésium sous forme de carbonates, le résidu de carbonate est lié au sodium". C'est ce qu'il appelle "carbonate de sodium résiduel, et il propose de prendre en considération dans les analyses, d'eaux d'irrigation, le pourcentage de sodium "trouvé" et le pourcentage de sodium "possible", aussi bien que le carbonate de sodium résiduel. 1/

1/ Le pourcentage de sodium trouvé est calculé suivant la formule :

$$\frac{\text{Na} \times 100}{\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg}}$$

et le pourcentage de sodium possible suivant :

$$\frac{\text{Na} \times 100}{\text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} - \text{CO}_3\text{H}}$$

où les concentrations sont exprimées en équivalents.

## BASES PHYSIOLOGIQUES DE LA TOLERANCE AUX SELS

Pour maintenir une agriculture prospère sur des sols qui contiennent des quantités moyennes de sels, il est nécessaire de choisir des plantes qui fournissent des rendements satisfaisants dans ces conditions. Ceci implique l'étude de la base physiologique de la tolérance aux sels.

Hayward et Wadleigh (100) ont évalué la tolérance aux sels d'une espèce ou variété de trois façons différentes. Premièrement, on peut définir la tolérance au sel comme la capacité qu'a une plante de se maintenir dans des conditions de salure croissantes. Par exemple, une espèce déterminée peut cesser presque ou complètement de croître pour des doses fortes de salure de substratum, mais elle survit. Dans ce cas, le pouvoir de survivre, indépendamment de toute croissance, dans un sol de plus en plus salé, mesure la tolérance aux sels. Ce critère est utilisé en écologie botanique pour rendre compte des milieux halophytiques, car les espèces les plus capables de subsister dans un habitat salin constituent sa végétation stable. (120, 196, 203, 213).

Deuxièmement, la tolérance au sel peut être considérée comme la base de la capacité de production d'une plante pour un niveau déterminé de salure. D'après ce critère, on peut faire des essais de culture portant sur plusieurs variétés d'une plante donnée dans un sol ayant un certain degré de salure, et la variété la plus productive est désignée comme la plus tolérante aux sels. Cette méthode d'appréciation peut conduire à une évaluation différente de la précédente, car une variété susceptible d'avoir une bonne production pour des taux modérés de salure n'est pas toujours capable de survivre à des doses plus fortes d'accumulation des sels. Les agronomes considèrent cette méthode d'évaluation comme particulièrement utile pour comparer les rendements des lignées et variétés d'une plante donnée (13, 22, 155).

Un troisième critère de tolérance aux sels est la production relative d'une plante cultivée pour un degré déterminé de salure du sol par comparaison avec son comportement sur un sol analogue, mais non salé. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet plus facilement que les précédentes des comparaisons entre les espèces. L'évaluation de la tolérance aux sels sur la base du rendement relatif ne conduit pas nécessairement au même ordre de classement que l'appréciation sur la base de la survivance à de fortes doses de sel, mais elle fournit une base plus utilitaire de sélection des plantes à cultiver sur des sols modérément salés. Dans les essais sur la tolérance aux sels, les résultats concernant les rendements relatifs devraient être complétés par des données sur les rendements absolus, car une variété peut avoir un rendement relatif médiocre dû à une croissance exceptionnellement vigoureuse sur le sol non salé, et n'en avoir pas moins la plus forte production de toutes les variétés essayées à un certain degré de salure. Pour les besoins agricoles, la méthode préférée paraît être la définition de la tolérance aux sels selon la production relative par comparaison avec un milieu non salé (11,71).

Lorsqu'on étudie les raisons physiologiques des degrés divers de tolérance aux sels que l'on rencontre chez les plantes cultivées, il est utile de connaître les caractéristiques des halophytes naturels. Uphof (231) a passé en revue les écrits relatifs aux caractéristiques physiologiques des halophytes, particulièrement en ce qui concerne la pression osmotique, la transpiration, la pression d'aspiration, l'absorption de sel et la germination. La physiologie de ce groupe de plantes n'est pas bien connue, et certains chercheurs ont confondu halophytisme et xérophytisme car halophytes et xérophytes ont la même adaptation anatomique et physiologique au manque d'eau. Schimper (197) d'après



ses observations soutient qu'un accroissement de la teneur en sel des plantes augmente la pression osmotique de leur sève, et par conséquent leur capacité à absorber de l'eau. Toutefois, les recherches anatomiques de Chemerson (42) ont démontré que l'on devait considérer les deux groupes de plantes comme physiologiquement distincts.

Une caractéristique physiologique importante des halophytes est que la pression osmotique des liquides cellulaires a tendance à atteindre des valeurs relativement élevées. Fitting (65), utilisant une méthode indirecte de mesure de la pression osmotique, a trouvé des valeurs atteignant 100 atmosphères pour des plantes poussant en sol sec ou très salin, tandis que celles poussant en sol humide non salin avaient des pressions osmotiques de 10 à 20 atm. La pression osmotique pour les diverses espèces tendait à varier en même temps que la rareté physiologique de l'eau dans un milieu donné. Ceci a été vérifié par Harris (en collaboration) (88,91), Keller (123) et d'autres auteurs. Suivant l'influence du milieu où vit la plante, il peut y avoir de fortes variations de la pression osmotique des liquides cellulaires. Par exemple, Harris (en collaboration) (91) a observé des variations de 31,2 à 153 atm. pour la pression osmotique des liquides des feuilles d'Atriplex confertifolia, de 22,5 à 61,8 atm. chez Allenrolfea occidentalis, de 22,7 à 39,8 atm. chez Scarcobatus vermiculatus, et de 36,8 à 51,9 atm. chez Salicornia utahensis.

On a trouvé que ces variations de pression osmotique étaient associées aux variations du taux des chlorures ; mais Keller (123) a noté que certains halophytes pouvaient régler la concentration de sel dans leurs liquides cellulaires indépendamment de la salure du milieu. Il a montré que les Salicornes pouvaient contenir des concentrations de NaCl inférieures ou supérieures à celles que l'on trouve dans le sol suivant le degré de salure. Iljin (114,115) a insisté sur le rôle de l'ion sodium, et a dit que l'on devait seulement considérer comme halophytes les plantes dont le protoplasme est résistant à des accumulations relativement fortes de sodium dans le suc cellulaire. Les caractéristiques physiologiques qu'il considère comme importantes chez les halophytes sont : (1) l'aptitude à créer des pressions osmotiques assez élevées pour compenser l'accroissement de pression osmotique du substratum salé, (2) la faculté d'accumuler des quantités considérables de sels dans les liquides cellulaires et de régler cette accumulation, (3) un protoplasme relativement résistant aux effets de l'accumulation du sodium dans le suc cellulaire.

Hayward et Wadleigh (100) ont rendu compte des recherches effectuées à l'U.S. Salinity Laboratory concernant l'application des critères ci-dessus à l'évaluation de la tolérance relative au sel des plantes cultivées. Par exemple, Brown et Cooil ont cultivé de la luzerne dans des terrains artificiellement salés en utilisant la méthode décrite par Wadleigh et Fireman (241). Les pressions osmotiques moyennes des solutions du sol dans les différents terrains étaient respectivement 0,9 ; 4,2 ; 6,6 ; et 8,2 atm., et les pressions osmotiques des tissus cellulaires des sommets des luzernes étaient 12,3 ; 14,5 ; 17,9 et 19,9 atm. L'accroissement des chlorures dans les sommets de luzerne pouvait expliquer l'augmentation de pression osmotique des liquides cellulaires. En affectant le coefficient 100 à la production du terrain témoin, (Pression oms. 0,9 atm.) les productions des autres terrains étaient respectivement 62,5 ; 32,4 ; et 21,5. Il y avait donc diminution nette de la production, même pour une petite variation du gradient osmotique net entre la solution du sol et les sommets des plantes.

La luzerne est une des plantes cultivées les plus tolérantes au sel, et les résultats ci-dessus font penser que sa tolérance est en relation avec : (1) l'absorption de sel, (2) l'accroissement de pression osmotique dans les liquides cellulaires qui résulte de l'accroissement de salure du sol, (3) le maintien d'une différence entre les pressions osmotiques respectives de la sève de la plante et de la solution du sol. Les études de Ayers et Kolisch à l'U.S. Salinity Laboratory indiquent que cette théorie n'est pas valable pour toutes les plantes fourragères (100). Ils ont utilisés du trèfle rouge (Trifolium pratense), cultivé dans un sol irrigué avec une eau contenant 0, 2500, 5000, et 7500 p.p.m. de sels que l'on avait ajoutés. Les pressions osmotiques de la sève obtenue par broyage étaient pour les trois premiers traitements 11,5; 20,6; et 23,7 respectivement. L'eau la plus salée avait tué les plantes (7500 p.p.m.). Toutes les plantes irriguées avec de l'eau à 5000 p.p.m. finirent par mourir, et un petit nombre seulement survécut au traitement à 2500 p.p.m.. Ainsi donc, bien qu'on ait observé un accroissement de pression osmotique des liquides cellulaires plus fort pour le trèfle rouge que pour la luzerne, sur des sous-sols comparables, celui-ci a une tolérance aux sels très médiocre. Ceci même à penser que la faculté qu'a une plante d'adapter sa pression osmotique interne peut ne pas être un bon indice de la tolérance aux sels pour toutes les plantes.

Les preuves complémentaires de la tolérance au sel de plantes de culture dont il est question dans les sections suivantes renforcent les conclusions d'Iljin (114, 115) en ce qui concerne les trois qualités d'halophytisme mentionnées ci-dessus. Bien qu'il soit nécessaire de réunir encore de nombreuses données, il est clair que le manque de tolérance au sel des plantes de culture peut avoir un rapport avec leur incapacité à régler convenablement la ration de sel, et avec la sensibilité spécifique du protoplasme à l'accumulation de sels dans les tissus.

#### BASE PHYSIOLOGIQUE DE LA TOLERANCE AUX ALCALIS

Les renseignements concernant la base physiologique de la tolérance des plantes aux sols alcalins sont peu nombreux. Contrairement à ce qui se passe pour les sols salés, en ce qui concerne la résistance aux alcalis il y a des variations considérables parmi les halophytes. Hilgard (110) fait remarquer que Allenrolfea occidentalis et Salicornia subterminalis sont deux des halophytes les plus tolérants au sel, mais ils ont une tolérance relativement médiocre à "l'alcali noir" (alcali). Mais Sarcobatus vermiculatus et Sporobolus airoides, tolérants au sel, ont aussi une tolérance remarquable à l'"alcali noir". Des études de Fireman et Hayward (60) ont montré que le pourcentage de sodium échangeable du sol est beaucoup plus élevé sous Sarcobatus vermiculatus, et un peu plus élevé sous Atriplex confertifolia, que dans les terrains nus adjacents ou sous des plantes telles que Artemisia tridentata.

Il convient de distinguer trois types de sols en ce qui concerne l'évaluation de la tolérance des plantes aux sols alcalins : (a) sols riches en Na échangeable, mais à pH moyen, (b) sols riches en Sodium échangeable, avec un pH égal ou supérieur à 8,5, (c) sols riches en Sodium échangeable, avec une accumulation considérable de carbonate titrable.

C'est ce dernier type qui correspond au cas des sols à "alcali noir" décrits par Hilgard (110). Il déclare que "le dommage causé directement à la végétation se produit surtout sur quelques centimètres à partir de la surface, par corrosion de l'écorce, généralement près de la couronne de la racine. C'est quand les sels contiennent une forte proportion de carbonate de soude que cette corrosion est la plus forte; la soude dissout alors aussi l'humus ce qui donne naissance à des taches noires dans le sol, que l'on appelle vulgairement "alcali noir".

Bien qu'on ait peu de preuves matérielles à ce sujet, il semble probable que la tolérance d'une espèce à de fortes doses de Na absorbé ou échangeable est modifiée par le pH du sol et l'accumulation de  $\text{CO}_2$  soluble. Breazeale et Mc George (33) ont montré que la présence de Na échangeable est fréquemment associée avec des valeurs élevées du pH du sol, et Mc George (139) indique que cette situation provoque des désordres physiologiques chez les agrumes. Les analyses du sol ont mis en évidence une augmentation de la valeur du pH du sol sous les arbres atteints; les feuilles et les fruits des arbres en sols alcalins calcaires avaient moins de Ca et plus d'alcalinité soluble à l'eau. Cependant Breazeale (32) a étudié la toxicité des sols à alcali noir, et a conclu que dans la plupart des cas  $\text{CO}_2\text{Na}_2$  s'y trouve en quantités suffisantes pour être toxique. Il attribue l'infertilité<sup>2</sup> de ces sols à une médiocre perméabilité à l'eau et à d'autres anomalies de nutrition.

Dans une autre étude sur la tolérance des plantes aux alcalis, Breazeale (31) a montré les effets améliorants du Ca, et Ratner (182) a prouvé que la croissance des plantes est inhibée dans les sols riches en Na à cause de faibles disponibilités en Ca. Il déclare : "La destruction des plantes cultivées expérimentalement en pots dans lesquels il y a une forte quantité de Na échangeable s'explique difficilement (dans le cas de sols non carbonatés) par la réaction alcaline du milieu, par l'accumulation de soude, ou par des propriétés physiques défavorables du sol. On peut penser qu'une des causes possibles de destruction de la vie végétale est la destruction dans le sol de l'équilibre du calcium, et en particulier une insuffisance du Calcium qui est un des éléments de la nutrition des plantes". Dans ses études sur l'effet physiologique de l'alcalinité du sol et le rôle améliorant des racines sur les Solonetz, Ratner (183) conclut que "la présence de Sodium dans le complexe absorbant a un effet inhibiteur puissant sur l'absorption de Calcium échangeable par les plantes". Il a trouvé que les plantes étaient incapables de tirer du Ca de Lahernoziums qui étaient saturés de Na à 50 %; et que, pour une plus forte saturation de Na, les plantes abandonneraient du Ca au sol et absorberaient du Na en échange.

Puri (180) a trouvé que le traitement  $\text{CaCl}_2$  et le lessivage  $\text{CaCl}_2$  augmentaient la production de blé dans les sols alcalinisés du Pendjab. Sur un sol Montgomery à 67 % de saturation (Na + K), ce traitement a réduit le Na remplaçable à environ 20 % et a accru la production de 32 à 1000 livres par acre. Gedroix (77) a fait des expériences sur l'avoine, le sarrasin, et la moutarde, dans des sols saturés de diverses bases y compris Na, et a trouvé qu'on n'obtenait pas une croissance normale si le Ca échangeable ne constituait pas une part prépondérante de la capacité d'échange. Bower et Turk (26) ont obtenu la preuve que des sols naturels contenant une forte proportion de Sodium échangeable pouvaient ne pas fournir un apport suffisant de Ca et peut être de Mg à la luzerne.

Thorne (225) dans des études sur la croissance et la nutrition des tomates a trouvé que la production diminuait lorsque le taux du Na échangeable dépassait 40 % de la capacité d'échange de l'argile, et que le plus fort taux de Na toléré par les plantes se situait entre 60 et 70 % de la capacité totale d'échange. La proportion de Na dans les plantes augmentait et celle de Ca diminuait pour des proportions croissantes de Na échangeable. Van Itallie (223) a étudié Lolium multiflorum en cultures en pots traitées aux carbonates de Ca, Mg, K, et Na. Il a trouvé que la croissance de cette espèce était défavorablement affectée par un pourcentage de Sodium échangeable de 26 et empêchée à un pourcentage de 51. L'accumulation de Ca, Mg, et K dans les sommités des plantes diminuait à mesure qu'on augmentait la proportion de Na échangeable fournie au sol.

Bower et Wadleigh (27) ont étudié l'influence de différents taux de Na échangeable sur la croissance et l'accumulation des cations du haricot rouge nain, des betteraves potagères, Chloris gayana, et Paspalum dilatatum. Ils ont utilisé des méthodes de culture en serre sous contrôle, avec un sous-sol constitué par un mélange de sable et de résine synthétique permettant l'échange des cations et des anions. On appliquait six taux de Na échangeable (0, 15, 30, 45, 60 et 75 % de la capacité d'échange en cations). Le reste de la capacité d'échange en cations était saturée par Ca et Mg, le rapport Ca:Mg étant 3:1. Le pH de toutes les cultures était approximativement 6,5. Il y avait de grandes variations dans la tolérance des différentes espèces à la présence de Na échangeable. Les haricots étaient particulièrement sensibles au Sodium, et leur croissance diminuait fortement pour des pourcentages de Sodium échangeable aussi faibles que 15. Par contre Chloris gayana, les betteraves potagères étaient très tolérants au sel, et des réductions importantes de croissance ne se sont produites que pour les taux de Na les plus élevés que l'on a employés. On déterminait à la récolte le taux de Ca, Mg, K et Na, pour chaque espèce, dans les racines et les sommités, et on a trouvé que dans l'ensemble Ca, Mg et K dans les plantes avaient tendance à diminuer à mesure qu'on fournissait au sous-sol des proportions plus élevées de Na. Mais l'amplitude des diminutions de Ca, Mg, et K et l'importance de l'accumulation de Na variaient beaucoup entre les espèces étudiées et entre les racines et les sommités des plantes. Parmi les espèces étudiées, les moins sensibles étaient celles qui accumulaient de fortes quantités de Na dans les sommités. Bien que cette relation n'existe pas pour les racines, ces observations font penser qu'il est possible que les espèces les plus tolérantes à des taux élevés de Na échangeable soient celles qui normalement absorbent des quantités considérables de Na, tandis que les espèces les plus sensibles sont celles qui normalement tendent à exclure Na.

#### INFLUENCE DES SOLS SALINS ET ALCALINS SUR LA CROISSANCE DES PLANTES

L'influence des sols salins et alcalins sur la croissance des plantes est en liaison avec :

- (1) l'augmentation de pression osmotique de la solution du sol qui entraîne une diminution concomitante de la disponibilité physiologique en eau pour la plante;
- (2) l'accumulation dans la plante de quantités toxiques de divers ions à la suite de l'augmentation de ces ions dans la solution du sol plus concentrée.

ACTION DE LA PRESSION OSMOTIQUE ET DE L'HUMIDITE DU SOL

L'expérience indique que l'accumulation de sels neutres dans le sous-sol ralentit la croissance des végétaux surtout à cause de l'augmentation de pression osmotique dans la solution du sol et de la diminution concomitante de l'eau disponible pour la plante. Magistad (144) a repris les travaux effectués sur ce sujet, et a étudié avec ses associés (145) les réactions de plusieurs plantes cultivées sur sable où des quantités assez fortes de chlorures et de sulfates étaient ajoutées à une solution nutritive de contrôle. Sous l'effet des traitements au sel, les pressions osmotiques des solutions s'échelonnaient de 0,4 à 4,4 atm. Dans la plupart des cas ils ont trouvé que la réduction de croissance était fonction linéaire des concentrations osmotiques croissantes du sous-sol; et que la réduction était en grande partie indépendante de la nature des sels ajoutés, chlorures ou sulfates, pourvu qu'ils fussent fournis sur la base d'une même pression osmotique (Figure 2). Toutefois pour certaines plantes, les sels de Cl étaient légèrement plus toxiques que  $SO_4$  à même concentration.

Figure 2 - Non reproduite dans le document.

Eaton (52,55) a étudié les effets de la concentration en sels et de la toxicité des ions sur la croissance des plantes; il a noté une réduction de croissance correspondant à des concentrations accrues dans le sous-sol et aussi quelques effets toxiques attribuables aux ions Cl et  $SO_4$ . Toutefois il n'a pas trouvé de maximum pour lequel les effets toxiques fussent prononcés, et il conclut que : "la limite de tolérance d'une plante quelconque semble être un concept intangible, car la mort se produit lentement pour toute une gamme de concentrations, et par des jours particulièrement chauds, les plantes cultivées sur des solutions salines peuvent mourir rapidement".

Gaugh et Wadleigh (73) ont étudié les effets de fortes concentrations de sels sur la croissance des haricots en utilisant plusieurs sels différents à des concentrations correspondant à une pression osmotique de 0,5 (témoin) à 4,5 atm. Ils ont constaté que la diminution de croissance était fonction linéaire des augmentations de pression osmotique du sous-sol, et que la croissance était indépendante de ce qu'une pression osmotique donnée était obtenue par addition de NaCl,  $CaCl_2$ , ou  $SO_4Na_2$ . Les sels de Magnésium avaient un effet toxique qui s'ajoutait à celui qui pouvait être attribué à la pression osmotique. Doughty et Stalwick (50) ont étudié l'effet de l'augmentation de la concentration de sels sur la croissance de la luzerne, de l'avoine, et du blé cultivés dans des sols salins au Canada. Ils ont utilisé six sols contenant de 0,157 à 1,095 % de sels solubles dans l'eau. Il y avait une diminution générale de la récolte pour des concentrations de sels de plus en plus fortes; et, dans les conditions de leur expérience, la limite supérieure d'une récolte normale était à peu près 0,4 % de sels solubles à l'eau; tandis que la diminution de production allait de 33 à 77 % pour une concentration de sels de 1,096. Ils ont trouvé que la luzerne était plus tolérante au sel que l'avoine ou le blé.

Les études de Gaugh et Magistad (71) complètent le tableau des relations entre la croissance des végétaux et la concentration saline. Ils ont cultivé de la luzerne sur sable, en ajoutant NaCl à la solution nutritive pour obtenir des

concentrations allant de 0,5 à 4,5 atm. Le rendement relatif était réduit de 100 % (témoin) à 54 % pour 4,5 atm., le taux de réduction de la production étant d'environ 10 % pour un accroissement de pression osmotique de 1 atm. D'autres études concernant l'action des sous-sols salins sur la croissance des végétaux ont été publiées par Ayers en collaboration (13), Bernstein et Ayers (22), Hayward et Long (94), Nightingale et Farnham (164) et Wadleigh et Gauch (242).

Le taux d'entrée de l'eau dans les racines, en relation avec la pression osmotique du sous-sol, a été étudié par Rosene (192), Tagawa (217), Hayward et Spurr (97,98), Eaton (54), Long (135), et d'autres auteurs (80, 127). Rosene (192), utilisant des racines adhérentes d'Allium cepa, découvrit que les sous-sols de pressions osmotiques de 4,2 à 5,7 atm. "représentent la gamme des concentrations critiques de sucrose et de  $\text{NO}_3\text{K}$  qui compensent les facteurs internes mis en oeuvre pour fixer la vitesse du transport de l'eau à travers la frontière épidermique de la région des racines". L'absorption de l'eau cessait quand la concentration du sous-sol atteignait 6,5 atm. Tagawa (217) a observé une chute brusque de l'absorption d'eau par des plantules intactes de haricot quand la concentration du sous-sol atteignait 2,4 atm. Hayward et Spurr (98) ont fixé des potomètres à des racines intactes de maïs et ont mesuré le taux d'entrée de l'eau en liaison avec les pressions osmotiques du sous-sol qui s'échelonnaient de 0,8 à 6,8 atm. Ils ont trouvé que ce taux était inversement proportionnel à la pression osmotique, et pratiquement indépendant de ce que l'accroissement de pression osmotique était créé par  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{SO}_4\text{Na}_2$ , du sucrose ou du mannitol. L'entrée d'eau cessait quand la pression osmotique du sous-sol était maintenue à 6,8 atm. (Fig. 3)

Figure 3 - Non reproduite dans le document.

Eaton (54) et Long (135) utilisant la technique des racines séparées ont montré que le taux d'entrée de l'eau dans les racines est inversement proportionnel à la disponibilité physiologique de l'eau mesurée par la pression osmotique de la solution nutritive.

Les études mentionnées ci-dessus étaient basées sur des techniques de culture en milieu aqueux où la pression osmotique du sous-sol pouvait être contrôlée avec assez de précision. Un tel contrôle est impossible dans un sol additionné de sels à cause des variations de la teneur du sol en sels et en humidité. Les fluctuations normales de l'humidité du sol entre les périodes de pluies ou d'irrigations s'accompagnent de modifications de la pression osmotique de la solution du sol, qui sont dues aux mouvements des sels solubles à mesure que l'eau pénètre dans le sol et y progresse. Wadleigh et Fireman (241) ont montré que des variations accentuées dans la teneur en sels du sol peuvent se produire, à la suite de mouvements d'eau, dans la zone des racines. Utilisant des terrains d'expérience salés uniformément à 0,2 % de sel (sur la base du sol sec) et ensuite irrigués par sillons, ils ont trouvé que le retrait de l'eau était le plus fort sous les sillons; et qu'il y avait une relation inverse entre la distribution de sel et la diminution de l'eau dans la zone des racines.

Wadleigh et Ayers (238) ont proposé la notion de "force totale d'humidité du sol" qu'ils définissent comme la somme de la pression osmotique de la

solution du sol et de la tension d'humidité du sol exprimées en atmosphères; et Wadleigh (237) a mis au point une méthode mathématique pour intégrer les variables affectant les disponibilités en humidité dans la zone des racines. Ces variables sont (a) la variation de la distribution des sels dans la masse du sol et son effet sur la variation de pression osmotique de la solution du sol pour une teneur déterminée en eau; (b) la variation de pression osmotique en fonction de la modification de la teneur en eau; (c) la variation de la tension d'humidité du sol en fonction du taux d'humidité; (d) la variation du taux d'humidité dans la masse du sol à un instant donné; et (e) la variation avec le temps de la teneur totale du sol en eau dans la zone des racines.

La tension d'humidité du sol correspondant à sa capacité de rétention lorsqu'il est en place est d'environ  $1/10$  à  $1/3$  d'atm., et Richards et Weaver (189, 190) ont trouvé que la croissance de la plupart des plantes cesse quand la tension d'humidité du sol atteint environ 15 atm., ce qui représente approximativement le "pourcentage permanent de flétrissement". A la suite de nombreuses études Veihmeyer et Hendrickson (106, 107, 234, 235) considèrent que la "gamme disponible" d'humidité du sol est délimitée par la "capacité en place" et le "pourcentage permanent de flétrissement", et considèrent que dans ces limites l'humidité du sol en place est "également disponible" pour la plante dans un sol non salin. C'est là une notion utile, mais l'humidité retenue hors de la plante par une force de 15 atm. n'est pas aussi facilement disponible que celle qui est retenue par une force de seulement  $1/3$  atm. Dans la plupart des sols, l'eau disponible est absorbée du sol avant que la tension d'humidité atteigne 2 ou 3 atm. (100, 147, 237). Ceci, et d'autres relations entre l'humidité du sol et la croissance des plantes, a été discuté dans une étude critique de Richards et Wadleigh (188).

Comme il a été dit ci-dessus, la force totale d'humidité du sol est fonction de la salinité, ce qui a ensuite une influence importante sur la croissance et la tolérance au sel relative des végétaux. Wadleigh et Gauch (244) ont trouvé que l'allongement des feuilles de coton s'arrêtait lorsque la force totale d'humidité d'un sol salin atteignait environ 15 atm., et que le taux quotidien de croissance des feuilles était fonction de l'intensité de cette force. Cependant il y a des variations pour diverses espèces de plantes si l'on considère la force d'humidité du sol pour laquelle les symptômes d'un déficit marqué en eau se manifestent de façon évidente (247). Wadleigh et son équipe (238, 246) ont trouvé que la croissance végétative des haricots et du guayule (Parthenium argentatum) était en relation assez étroite avec la force moyenne d'humidité si d'autres facteurs ne limitaient pas la croissance. Ceci restait vrai que cette force fût due surtout à la tension d'humidité ou à la pression osmotique de la solution du sol.

Ayers et ses collaborateurs (14) ont étudié les relations qui existent entre la concentration en sels et l'humidité du sol en utilisant des haricots dans du sol additionné de NaCl à 0, 1000, 2000 et 4000 p.p.m. L'eau fournie aux plantes correspondait à des tensions d'humidité du sol faible, moyenne, et élevée. La croissance et la production des haricots se trouvèrent réduites à mesure de l'augmentation de la tension d'humidité du sol au moment des arrosages, et aussi en raison de l'addition progressive de NaCl au sol. La réduction de croissance la plus prononcée se produisit pour un traitement combiné à forte tension et à teneur élevée en sel, par conséquent à force totale d'humidité du sol élevée (Fig. 4).

En résumé, il est évident que l'un des principaux effets de taux modérés de salure du sol est de limiter l'apport d'eau aux plantes en augmentant la pression osmotique de la solution du sol. Cet effet est intensifié par une augmentation de la tension d'humidité du sol, et les actions combinées de la force totale d'humidité et des conditions de croissance des plantes. Ainsi, un sol peut devenir assez salin pour empêcher même la croissance des halophytes, de même qu'il peut devenir trop sec pour permettre la croissance des xérophytes; et, dans certaines conditions, la salure et la sécheresse se combinent pour limiter la croissance de la plante.

#### EFFETS TOXIQUES D'IONS DETERMINES

Comme l'a montré Harris (84), l'action nocive des sels n'est pas toujours proportionnelle à la pression osmotique du sous-sol salin. Selon l'espèce, chacun des divers éléments existant dans les solutions salées peut avoir un effet toxique spécifique sur la plante en plus de celui qu'on peut attribuer à la pression osmotique de la solution du sol. Les écrits traitant de l'effet toxique des ions sur la croissance des végétaux ont été revus par Magistad (144), Mibashan (154) et Hayward et Wadleigh (100). Les ions qui peuvent s'accumuler dans les sols salés sont :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , et  $\text{NO}_3^-$ .

#### Sodium

Bertrand (24) déclare que Na est toujours présent dans les tissus végétaux, mais parfois en quantités inférieures à 0,1 gr. par kg. de matière sèche. Cependant il apparaît que certaines plantes accumulent du sodium tandis que d'autres ont tendance à en éliminer.

Figure 4 - Non reproduite dans le document.

En se basant sur l'analyse de 77 espèces de plantes indigènes du New-Jersey et de 24 variétés de plantes cultivées, Wallace et ses collaborateurs (249) ont découvert que la teneur en Na des espèces indigènes variait de 0,00 à 2,04 % du poids sec, et les variétés cultivées de 0,00 à 3,00 %. Collander a trouvé (43) que la plupart des halophytes étaient très riches en Na, tandis que le sarrasin, le maïs, et le soleil étaient remarquables par leur manque presque total de Na. Hayward et ses collaborateurs (95) ont noté que les racines de pêcher peuvent accumuler dix fois la quantité de Na que l'on trouve dans les feuilles et les branches avec des valeurs de 0,36 % dans les petites racines; et Gauch et Wadleigh (74) ont noté de fortes accumulations de Na dans les racines et de faibles concentrations dans les tiges et les feuilles. Des effets toxiques spécifiques peuvent être provoqués par l'exclusion de Na quand se produisent en même temps des accumulations d'anions provenant du sous-sol, mais il ne semble pas que l'on doive classer ces cas comme relevant de la toxicité du sodium.

On a relativement peu d'observations permettant de préciser la toxicité spécifique de l'ion Na pour les plantes poussant dans les sols salins, mais Lilleland et ses collaborateurs (134) ont observé sur l'amandier, en Californie, une brûlure de l'extrémité des feuilles directement provoquée par la teneur en Na de la feuille. Cependant la solution du sol n'avait une teneur élevée ni en



sel ni en Na, et le symptôme observé pourrait bien indiquer une nature alcaline du sol plutôt qu'une salinité. Ayers et ses collaborateurs (10) ont décrit deux types de brûlure de la feuille de l'avocatier qui ont été attribués à l'accumulation de Na ou de Cl. Les symptômes des dégâts dus à Na étaient des taches nécrosées ou écorchées près de la marge ou à la face interne de la feuille, tandis que dans le cas de dégâts dus à Cl, la brûlure commençait à l'extrémité de la feuille et progressait vers la base du limbe et parfois le long des marges. Il est possible que l'accumulation de Na dans la plante soit associée à un abaissement de l'accumulation des autres cations au point de créer une balance cationique défavorable (Ratner 182, 183).

### Calcium

L'ion Ca peut être toxique quand il s'accumule à fortes concentrations dans les solutions salines du sol, mais sa toxicité varie avec les espèces végétales. Par exemple Wadleigh et Gauch (243) ont montré que le guayule avait une tolérance relativement plus grande à un sous-sol salin produit par  $\text{CaCl}_2$  qu'à ceux produits par d'autres sels neutres. D'autre part, Nasaewa (151) a publié que, dans le cas des cultures de lin sur sol, des applications de  $\text{CaCl}_2$  étaient plus toxiques que des applications de NaCl. Comme dans le cas de cultures additionnées de  $\text{CaCl}_2$ , l'ion Cl s'accumulait aux niveaux supérieurs des plantes, et que Ca était lui aussi présent en fortes quantités, elle attribua la réaction de la plante à la toxicité du Cl et à un rapport Ca/K défavorable. Wadleigh et ses collaborateurs (245) ont effectué des recherches sur la composition minérale de Dactylis glomerata cultivé sur des sols additionnés de divers sels et ont trouvé que de très fortes concentrations de l'ion Ca dans la solution du sol peuvent être mortelles pour cette graminée quand l'anion associé est soit Cl soit  $\text{NO}_3$ . Comme l'addition de  $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$  ne provoqua qu'une faible accumulation d'une petite quantité de Cl, ils conclurent que la toxicité du Cl n'était pas en cause. Lehr (132) dans ses recherches sur l'importance du sodium dans la nutrition de la plante a noté que la présence de Ca en quantités relativement fortes a un effet très nuisible sur la production du feuillage et des racines chez la betterave fourragère. La plante traitée au calcium est caractérisée par une couleur bleu-vert et une croissance rabougrie qui sont neutralisées par l'absorption de Na.

Gaugh et Wadleigh (72, 242) ont étudié l'absorption des éléments nutritifs par les haricots rouges nains cultivés sur sous-sols salins. Ils ont utilisé deux séries de cultures en solutions aérées, une série à laquelle on ajoutait NaCl, l'autre  $\text{CaCl}_2$ . En plus de la culture nutritive de base (de pression osmotique 0,5 atm.) on ajoutait dans chaque série à la solution nutritive de base quatre doses de sels de pressions osmotiques de 1, 2, 3 et 4 atm. Ils ont trouvé que les plantes des séries à  $\text{CaCl}_2$  avaient une croissance moins rapide que celles des séries à NaCl, et ont attribué la différence surtout à une croissance des racines plus médiocre dans les séries à  $\text{CaCl}_2$ . Les plantes où NaCl, où Na prédominait dans les racines, absorbaient au total de plus fortes quantités de N, P, et K que les plantes à  $\text{CaCl}_2$ . Ils suggèrent que l'action différentielle des ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$  sur l'hydratation des colloïdes peut entrer en ligne de compte et que l'effet inverse de Na par rapport à Ca sur la perméabilité des cellules aux sels peut être un facteur de première importance pour expliquer les résultats obtenus.

### Magnésium

On a reconnu que de fortes accumulations de Mg dans le sous-sol étaient toxiques pour les plantes en plus de toute inhibition liée à la pression osmotique : Sigmond (207), Trelease et Trelease (288), et Wadleigh et Gauch (243). Ces derniers ont trouvé que le guayule était tué quand on ajoutait à une solution nutritive assez de  $\text{MgCl}_2$  pour produire une pression osmotique de 1 atm., tandis

que dans des conditions semblables les haricots rouges accusaient une réduction de croissance d'environ 10 % seulement. Trelease et Trelease (228) déclarent que les dégâts causés au blé par le Mg varient surtout en fonction du rapport Mg/Ca, bien que ces dégâts puissent être influencés par d'autres produits chimiques; et Gauch(70) associait la nocivité du Mg à un apport insuffisant de Ca. Ratner (182) indique que des quantités de Mg remplaçable supérieures à la normale créent un équilibre Ca-Mg défavorable, et cite les résultats obtenus par des chercheurs russes qui précisent que lorsque Mg constitue 50 à 60 % de la capacité d'échange en cations, il n'y a pas de diminution de rendement; mais au dessus de ce taux il peut y avoir une diminution nette de la croissance.

### Potassium

Des accumulations de K dans la solution du sol sont peu fréquentes, mais peuvent se produire. Dans ce cas, il est peu vraisemblable que l'on observe des effets inhibiteurs spécifiques de la réaction de la plante dus à un excès de K si cette accumulation est partiellement compensée par Ca. On a noté des cas où des quantités relativement fortes de K ont produit des symptômes de chlorose du fer - Walsh et Clarke (250) -. Boynton et Burrell (30) ont décrit des taches sur les feuilles du pommier dues à une déficience en Mg qu'ils ont attribuées à l'effet antagoniste d'une forte teneur en K à la surface des racines ou dans l'arbre. Miyake (158) déclare que : "les sels de potassium, de magnésium ou de calcium constituent des poisons pour le riz quand on les applique séparément, mais l'effet nocif disparaît plus ou moins complètement quand on les mélange en proportions convenables."

Il est évident que les cations diffèrent de façon marquée dans leur effet sur les propriétés physiques des constituants colloïdaux du protoplasme. Des effets antagonistes se révèlent entre diverses paires de cations, par exemple entre  $Ca^{++}$  et  $Mg^{++}$ ; et entre des cations monovalents et divalents - Lundegardh (137). Il n'entre pas dans le but du présent rapport de passer en revue la question de l'antagonisme, mais de nombreux chercheurs ont noté que la croissance de la plante est réduite par une proportion défavorable des ions - Collander (43) et Osterhout (167, 168).

### Chlorures

L'effet toxique de l'ion Cl a été noté par de nombreux chercheurs, mais ils ont eu parfois tendance à considérer que la toxicité du Cl était synonyme de l'effet défavorable d'une forte salinité du sol. Toutefois, pour de nombreuses espèces, on a observé que les sels de Cl n'inhibent pas davantage la croissance que des concentrations isosmotiques de sels de  $SO_4$  - Eaton (55), Hayward et Long (93), Magistad et ses collaborateurs (145). Eaton a découvert que les boutures de citronnier, les haricots "navy" (*Phaseolus vulgaris*) et le sorgho nain, cultivés sur sable, étaient plus sensibles à Cl qu'à  $SO_4$  à pressions osmotiques égales, tandis que les tomates et les betteraves à sucre avaient une meilleure tolérance au Cl. Harper (83) signale que le pacanier est gravement endommagé quand la teneur en Cl des feuilles dépasse 0,6 % et a observé des dégâts sur les feuilles de pacanier, d'orme et d'hickory quand la dose de Cl du sol sec dans la zone des racines est supérieure à 200 p.p.m. Cooper et Gorton (44) ont découvert que la brûlure des feuilles est associée à l'accumulation de Cl chez l'avocatier, l'arbre à pamplemousse, la sapote blanche et l'Eugenia. Le taux de Cl des feuilles d'avocatier présentant des brûlures de l'extrémité allait de 0,22 à 1,48 % du poids sec. La brûlure des feuilles de pamplemousse se produisait plus rarement à des concentrations inférieures à 0,7 % de Cl et les feuilles

les plus sévèrement brûlées avaient habituellement une concentration d'environ 2,0 %.

Hayward et ses collaborateurs (95) ont découvert, à la suite d'une étude de 5 ans sur le pécher que, à pressions osmotiques égales, les solutions chlorurées entraînaient une plus forte réduction de la croissance des végétaux et étaient plus toxiques que les solutions sulfatées. Une réduction de croissance et de production due à une augmentation progressive de la concentration de NaCl dans la solution du sol a été signalée par Wadleigh et Ayers (238) et Bernstein et Ayers (22) pour les haricots; par Ravikovitch et Bidner (184, 185) pour la vigne et le trèfle; par Heller et ses collaborateurs (105) pour la tomate; par Millington et ses collaborateurs (155) pour l'avoine et l'orge; par Doughty et Stalwick (50) pour la luzerne, l'avoine et le blé.

Garner et ses collaborateurs (69) en travaillant sur le tabac ont fait des recherches sur la toxicité du Cl. Lorsqu'il y avait dans les feuilles de tabac une forte accumulation de Cl à la suite de l'emploi d'une dose massive de KCl comme engrais, ils ont trouvé une réduction prononcée de la teneur en acide malique dans les feuilles, et ils ont noté également que l'activité amylolytique normale était troublée et que les feuilles se gorgeaient d'amidon. Basslavskaja (18) a observé que l'accumulation de l'ion Cl dans les feuilles de pomme de terre gênait la photosynthèse en provoquant une réduction de leur teneur en chlorophylle, même s'il y avait une augmentation du rapport amidon-sucré. Schuphan (198) a dit qu'il n'était pas possible de généraliser l'effet du Cl sur le métabolisme des hydrates de carbone car les espèces ont à l'ion Cl des réactions très variées.

L'augmentation de pression osmotique du sous-sol peut avoir pour effet de réduire la croissance et la production d'une plante cultivée sans provoquer des symptômes spécifiques de lésion (13, 55). Dans ce cas, il peut y avoir une réduction de la taille des feuilles, de la longueur et du diamètre des tiges résultant d'une inhibition de l'activité des méristèmes primaires et secondaires - Hayward et Long (93, 94). Dans quelques exemples, de fortes accumulations de Cl ont tendance à augmenter l'épaisseur et la succulence des feuilles (93, 232, 255). Boyce (29) a étudié l'hypertrophie due au sel des plantes des dunes et a reconnu qu'elle était liée à la tolérance de la plante à d'importants dépôts de sel résultant de la pulvérisation de sel sur les feuilles. Quand elles étaient soumises à de fortes concentrations de sel, les espèces les plus tolérantes étaient caractérisées par une plus grande succulence et une capacité à accroître l'épaisseur du mésophylle.

Dans de nombreux cas, on peut observer des signes évidents de dégâts dus au Cl. Le plus commun est une brûlure de l'extrémité, roussissement ou nécrose du tissu de la pointe de la feuille qui peut s'étendre le long de la marge et plus tard intéresser de la moitié aux 2 tiers et dans certains cas la surface entière de la feuille. Ceci peut être précédé par un début de chlorose et de jaunissement de la feuille. Dans le cas de brûlures graves, la chute de la feuille se produit. La mort des petites branches est aussi un symptôme habituel, la croissance des racines peut être ralentie et il peut y avoir une réduction de la production et de la taille des fruits (22, 44, 126, 184).

#### Sulfates

Les observations faites sur un grand nombre de plantes cultivées indiquent que de fortes concentrations de l'ion  $SO_4$  sont toxiques. Ceci a été signalé pour

le lin (99), la tomate (55), Dactylis glomerata (245), le poireau (198), le citronnier (81). Hayward et Spurr (99) ont trouvé que, à concentrations osmotiques égales,  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  inhibait davantage la production de graines de lin que  $\text{NaCl}$  ou  $\text{CaCl}_2$ ; et Wadleigh et ses collaborateurs (246) rendent compte de résultats semblables pour le guayule (Parthenium argentatum). Eaton (55) a trouvé que, en milliéquivalents  $\text{SO}_4$ , paraissait être moitié moins toxique de  $\text{Cl}$  pour certaines plantes. Haas et Thomas (81) ont observé la marbrure des feuilles de citronnier avec une coloration jaune ou bronzée, quelques brûlures et une chute accentuée des feuilles quand il y avait une concentration importante de  $\text{SO}_4$  dans la solution du sol.

Harris et ses collaborateurs (89,90) ont noté des différences concernant l'accumulation des ions  $\text{Cl}$  et  $\text{SO}_4$  dans les liquides cellulaires des feuilles de différentes variétés de coton. Les variétés égyptiennes de coton ont tendance à accumuler beaucoup plus de  $\text{Cl}$  dans leurs tissus que les variétés américaines à fibres courtes, et la même tendance a été observée en ce qui concerne  $\text{SO}_4$ . Lyon (138), travaillant sur deux races de tomates et sur la génération  $\text{F}_1$ ,<sup>4</sup> a constaté que la race Red Currant était moins touchée par de fortes concentrations de  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  que les deux autres en ce qui concerne le poids sec des racines, le poids frais<sup>2</sup> des fruits et le poids moyen des fruits mûrs.

Bien qu'on n'ait que des renseignements incomplets sur les raisons pour lesquelles l'ion  $\text{SO}_4$  a des effets inhibiteurs sur la croissance de certaines espèces, il est évident que de fortes concentrations de  $\text{SO}_4$  peuvent limiter l'activité de l'ion  $\text{Ca}$  dont dépend l'absorption cationique<sup>4</sup> de la plante. Des analyses de feuilles de haricot (74), de pêcher (95) et de Dactylis glomerata (245) ont montré que les tissus contenaient moins de  $\text{Ca}$  et plus de  $\text{Na}$  et de  $\text{K}$  lorsque  $\text{SO}_4$  était l'anion prédominant dans le sous-sol que lorsque c'était  $\text{Cl}$ . Ces résultats font penser que les effets spécifiques défavorables de  $\text{SO}_4$  peuvent être dus à la perturbation d'un équilibre cationique favorable dans la plante.

### Bicarbonates

On pense que l'ion  $\text{CO}_3\text{H}$  est très toxique pour les plantes, mais il est très difficile de mettre ceci en évidence à cause des relations entre l'ion  $\text{CO}_3$  et le pH; Breazeale (32) déclare que  $\text{CO}_3\text{HNa}$  se trouve rarement en concentrations toxiques dans les sols alcalins et que<sup>3</sup> sa toxicité exprimée par rapport à  $\text{Na}$  est à peu près la moitié de celle de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ . Heller et ses collaborateurs (104) ont étudié les tomates en culture sur sable en utilisant  $\text{NaCl}$  et  $\text{CO}_3\text{HNa}$  en concentrations de 100 à 3000 p.p.m. Les résultats qu'ils ont obtenus indiquent que  $\text{CO}_3\text{HNa}$  était plus toxique que  $\text{NaCl}$ , et qu'il provoquait une inhibition très nette de l'absorption de  $\text{Ca}$  par les plantes. Harley et Lindner (82) ont indiqué que des vergers de pommiers irrigués avec de l'eau relativement riche en  $\text{CO}_3\text{H}$  avaient tendance à devenir chlorotiques; et ils ont trouvé que la situation<sup>3</sup> pouvait être améliorée en irriguant ensuite avec de l'eau pauvre en  $\text{CO}_3\text{H}$ . Ils ont observé aussi une forte incrustation de  $\text{CO}_3\text{Ca}$  et  $\text{CO}_3\text{Mg}$  sur les racines des arbres des vergers qui avaient été irrigués pendant un certain temps avec de l'eau riche en bicarbonates de  $\text{Ca}$  et  $\text{Mg}$ . Ils pensent que ces dépôts peuvent produire des symptômes de chlorose en agissant sur la nutrition minérale de l'arbre.

Gauch et Wadleigh (72) ont trouvé la preuve d'une nette spécificité de la tolérance à l'ion  $\text{CO}_3\text{H}$  dans leurs études sur deux graminées, Chloris gayana et

Paspalum dilatatum. L'addition à une solution nutritive de 12 milliéquivalents par litre de  $\text{CO}_2\text{H}$  n'avait aucun effet sur la croissance de Chloris gayana, mais était extrêmement toxique pour Paspalum dilatatum, provoquant une grave chlorose ou la mort de la plante. Wadleigh et Brown (239, 240) ont étudié l'effet de  $\text{CO}_2\text{H}$  sur les haricots rouges nains et sur les betteraves rouges potagères, en utilisant des solutions nutritives auxquelles on avait ajouté 8, 16 et 32 milliéqu./l. de  $\text{CO}_2\text{HNa}$ . Toutes les solutions étaient préparées au pH 8,0. Les résultats obtenus montrent la différence des réactions à  $\text{CO}_2\text{H}$  suivant les différentes espèces de plantes. Chez les haricots, les fortes concentrations de  $\text{CO}_2\text{H}$  entraînaient une inhibition marquée de la croissance et une chlorose prononcée. Les traitements entraînaient un ralentissement de l'"activité" du fer, un abaissement du taux de Ca des feuilles et une augmentation de leur taux en K. La croissance des betteraves était moins influencée par l'ion  $\text{CO}_2\text{H}$  que de nombreuses espèces étudiées. Des doses croissantes de  $\text{CO}_2\text{H}$  ne provoquaient qu'une diminution relativement faible de la croissance avec peu de signes macroscopiques de chlorose, bien qu'il y ait eu une certaine diminution de la concentration des feuilles en chlorophylle, accompagnée d'une augmentation de la teneur en bêtaïne. Il y avait une accumulation très nette de Na et d'oxalate.

Steward et Preston (212) ont effectué des recherches concernant l'action de l'ion  $\text{CO}_2\text{H}$  sur l'absorption et le métabolisme du bromure en utilisant des rondelles de pomme de terre dans des solutions aérées. A pH constant, l'augmentation de la concentration externe de  $\text{CO}_2\text{HK}$  diminuait à la fois la synthèse des protéines et l'accumulation de bromure. Des preuves indirectes montraient que  $\text{CO}_2\text{HK}$  diminuait aussi la respiration et le métabolisme des hydrates de carbone. Les études citées montrent que l'effet défavorable de  $\text{CO}_2\text{H}$  sur la réaction de la plante est dû à l'absorption et au métabolisme des ions et qu'il peut y avoir des différences marquées dans la toxicité de  $\text{CO}_2\text{H}$  suivant les espèces végétales.

### Nitrates

L'ion  $\text{NO}_3$  peut s'accumuler à des taux assez élevés dans certains sols naturellement salins et cet état de choses est caractérisé par le développement de "dépôts de nitre" (101, 195, 215). Delley (125) a passé en revue les théories concernant la formation de ces dépôts et déclare que "aucune explication vraiment satisfaisante n'a été donnée jusqu'à présent sur l'origine des énormes dépôts de nitrates au Chili ou dans d'autres endroits." Larson (130) a décrit un sol à salinité alcaline dans la vallée de Yakima, état de Washington, dans lequel  $\text{NO}_3$  constituait 55 % des anions dans le profil du sol jusqu'à une profondeur d'un mètre environ, et 21 à 63 % des anions dans l'eau de la nappe phréatique.

Il est habituellement difficile de faire une distinction nette entre un effet spécifique de l'ion  $\text{NO}_3$  et les effets concomitants produits par la pression osmotique du sous-sol ou les cations complémentaires, mais on connaît plusieurs exemples d'inhibition de croissance produite par de fortes doses de  $\text{NO}_3$ . Chapman et Liebig (41) ont constaté que la croissance des plantules d'orange était considérablement ralentie dans des solutions contenant 840 p.p.m. d'azote nitrique. Leonard et ses collaborateurs (133), utilisant des solutions nutritives d'azote, ont dit que les feuilles de la patate douce devenaient vert sombre et que quelques-unes d'entre elles tombaient lorsqu'on appliquait la solution à 200 p.p.m. Les feuilles produites avec la solution à 800 p.p.m., et surtout avec celle à 1600 p.p.m., étaient chlorotiques, et ces dernières mouraient avant la fin de l'expérience. Le poids frais de l'appareil végétatif,

racines comprises, diminuait de façon nette à la dose de 400 p.p.m. d'azote. Eaton et Rigler (57) ont cultivé du coton à des taux d'N allant de 14 à 396 p.p.m. et ont constaté que de fortes concentrations de  $\text{NO}_2$  réduisaient la croissance végétative et le nombre de capsules formées. Les plantes cultivées au taux d'N le plus élevé étaient moins grandes d'environ 25 % que celles cultivées aux taux intermédiaires (56 et 224 p.p.m.). L'observation ancienne de Headdon (101), qui rapportait que l'accumulation de  $\text{NO}_2$  dans le sol provoquait la production de betteraves à sucre de qualité inférieure à cause d'une faible teneur en sucre, a été vérifiée de nombreuses fois.

#### TOLERANCE AU SEL ET GERMINATION

La capacité qu'ont une espèce végétale ou une variété données de germer et d'établir leur plantule est souvent le facteur limitatif en matière de production agricole; et, en milieu salé, cette phase du cycle vital de la plante peut être la phase critique. Les sols et les eaux salés peuvent agir de deux façons sur la germination :

(1) il peut y avoir assez de sel dans le milieu où se trouve la graine pour augmenter la pression osmotique de la solution du sol au point de retarder ou d'empêcher l'absorption de l'eau nécessaire, et

(2) certains sels ou ions qui s'y trouvent peuvent être toxiques pour l'embryon et la plantule.

Harris (84), Magistad (144) et Uhvits (229) ont passé en revue les écrits publiés sur cette question et soulignent que dès 1896, des chercheurs du Wyoming et d'ailleurs travaillaient sur la question de l'action d'une forte pression osmotique de la solution du sol (34, 35, 208, 214). Leurs études montrèrent que la germination était retardée par les sels en solution et que l'importance du retard de la germination et des dommages aux graines et plantules était en raison directe de la pression osmotique de la solution saline. Avec la plupart des substances en solution employées, l'augmentation de pression osmotique provoquait une diminution du gonflement des graines. Si la pression osmotique était suffisamment élevée, aucune germination ne se produisait; mais on remarqua que les diverses espèces de plantes agricoles montraient des tolérances aux sels différentes pour une concentration saline déterminée. Stewart (214) remarqua que les céréales avaient une tolérance aux sels supérieure à celle des légumineuses et établit la liste de leur tolérance aux sels relative dans l'ordre décroissant suivant : orge, seigle, blé, avoine. Pour les légumineuses, il donnait l'ordre de tolérance suivant : pois, trèfle rouge, luzerne, trèfle blanc. Harris (84) fit des essais de germination sur un grand nombre de plantes cultivées pour des concentrations de sels allant de zéro à 10.000 p.p.m. (1 % du poids sec), en utilisant plusieurs sels, isolément ou en combinaison. Il constata de grandes différences entre les plantes en ce qui concerne la germination en sous-sol salin et établit une liste des plantes étudiées dans l'ordre de tolérance décroissante suivant : orge, avoine, blé, luzerne, betterave à sucre, maïs, pois fourragers.

Des études plus récentes ont confirmé ces premiers travaux (9, 12, 159, 193, 194, 205, 229). Shive (205) employa une méthode de culture sur sable, sel par sel, pour étudier la germination des haricots et du maïs à des pressions osmotiques de 0,5 à 8,0 atm., et conclut que "le retard de germination est directement lié à la quantité d'eau absorbée par les graines, qui, à son tour, dépend de la

concentration des solutions du sol". Rudolfs (193, 194) a utilisé des graines préalablement trempées qu'il faisait germer sur papier filtre avec un seul sel à des pressions osmotiques allant jusqu'à 7 atm. Sauf dans le cas de quelques-unes des solutions plus faibles, la germination et la croissance des racines diminuaient en fonction inverse de la concentration des sels. Millington et ses collaborateurs (155) ont poursuivi en Australie occidentale des études de germination contrôlée en sols salins sur l'avoine, l'orge, le blé et le seigle, pour des concentrations en sels allant de 0,10 à 0,30 % de NaCl. Ils ont constaté que le seigle avait la meilleure germination pour les conditions de salure les plus accentuées, mais qu'il avait une tolérance relativement médiocre durant la suite de sa croissance et de son développement. Les orges fourragères montrèrent la plus forte capacité à la fois pour la germination et pour la croissance d'hiver en sols salins.

L'évaluation du taux de salinité conditionnant la germination des graines sur le terrain est difficile, car l'humidité du sol et la concentration en sels changent continuellement à cause de l'évaporation, des mouvements capillaires de l'eau, des pluies ou de l'irrigation. Ayers et Hayward (12) ont décrit une méthode de laboratoire pour mesurer les effets de la salinité du sol sur la germination qui comporte l'humidification et la salinisation d'un sol non salin, de façon à obtenir un pourcentage d'humidité du sol et un taux de salinité déterminée. On détermine le taux d'humidité du sol et la richesse en sel de l'extrait de saturation, et ces données permettent de calculer la pression osmotique de la solution du sol dans l'essai de germination. Des quantités de sol préconditionné sont placées dans de grands plats de culture après avoir été pesés; on plante un nombre déterminé de graines et les cultures sont placées dans une pièce à température constante pour éliminer la variable température. Cette façon de procéder réduit aussi à un minimum la variation de l'humidité du sol, ce qui est important en matière de germination de graines (148, 113).

Avec cette technique, Ayers et Hayward (9, 12) ont étudié la luzerne, l'orge, les haricots rouges, le maïs, les oignons et les betteraves à sucre à des taux de salinité allant de 0,05 à 0,4 % du sol sec. Les pressions osmotiques des solutions du sol, calculées d'après la conductivité électrique de l'extrait de saturation et le taux d'humidité du sol au moment de l'ensemencement, allaient de 0,7 à 25,3 atm. Aucune graine n'a germé au taux de 0,4 %, mais pour l'orge (California, Marriouitt) on obtint 80 % de germination au taux de 0,3 % de sel (pression osm. de 20 atm.). On eut avec la luzerne 80 % de germinations avec 0,1 % de sels ajoutés (pression osm. 7,3 atm.), mais la germination des betteraves à sucre était réduite de 50 % au taux de sel de 0,08 % (pression osm. de 5,8 atm.)

Figure 5 - Non reproduite sur le document.

Le maïs qui, aux stades ultérieures de sa croissance, est moins tolérant que les betteraves à sucre ou la luzerne, donna une germination satisfaisante (93 %) pour une pression osmotique de 10 atm. Ceci laisse penser qu'il peut ne pas y avoir de corrélation positive entre les tolérances aux sels lors de la germination et pendant les phases ultérieures de la croissance. Un grand nombre de chercheurs ont étudié les effets toxiques des sels ou des ions sur la germination et le développement de l'embryon et de la plantule. Harris et Pittman (86, 87) ont constaté que les sels de Cl étaient très toxiques, ceux de SO<sub>4</sub> l'étaient moins et ceux de CO<sub>3</sub> intermédiaires; mais ils ont montré que la toxicité

de NaCl et  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  semble dépendre de la concentration du sel et du pourcentage d'humidité existant, alors que la toxicité de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  est plus largement influencée par la présence de matière organique. Harris<sup>(84)</sup> constata que la toxicité relative des sels solubles s'établissait dans l'ordre décroissant suivant : NaCl,  $\text{CaCl}_2$ , KCl,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{NO}_3\text{K}$ ,  $(\text{NO}_3)_2\text{Mg}$ ,  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ ,  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  et  $\text{SO}_4\text{Mg}$ . En ce qui concerne les antagonismes, il conclut que l'effet de sels mélangés n'était pas aussi grand dans le sol que dans les cultures sur solutions. Stewart (214) reconnut que les carbonates basiques étaient les sels les plus toxiques et indiqua que  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  était moins nocif que NaCl. Kearney et Harter (121) ont fait des expériences sur des plantules de maïs, de sorgho, d'avoine, de coton et de betterave à sucre, cultivées en milieu liquide, et en utilisant des concentrations critiques de sels de Na et de Mg. Le taux critique était déterminé comme "la concentration pour laquelle la moitié des extrémités des racines des plantules qui y avaient été soumises pendant 24 heures ne survivaient plus quand on les remettait ensuite dans l'eau". Ils constatèrent que le maïs était le plus résistant en solutions pures et le coton le moins, et notèrent que de grandes différences par rapport à la toxicité peuvent exister entre les espèces végétales, même lorsque elles appartiennent à la même famille. La présence d'un excès de  $\text{SO}_4\text{Ca}$  diminuait considérablement la toxicité des sels de Mg et Na. Rudolfs (194) a noté les réponses différentielles à différents sels employés seuls dans des tests de germination avec des graines de 10 espèces de plantes préalablement trempées. Toutes les graines étaient sérieusement endommagées dans des solutions de  $\text{CO}_3\text{K}$  et des anomalies se produisaient lorsqu'on utilisait ce sel ou  $\text{SO}_4\text{Mg}$ .  $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$  avait un effet défavorable sur la germination et le développement de la racine pour toutes les graines sauf le maïs.

Uhvits (229) a étudié l'effet de la pression osmotique sur l'absorption de l'eau et la germination des graines de luzerne en utilisant des concentrations de NaCl et de mannitol allant de 1 à 15 atm. de pression osmotique. Elle a trouvé que la germination était virtuellement inhibée pour des concentrations de 12 à 15 atm., et que la réduction et le retard de germination étaient plus importants sur les sous-sols à NaCl que sur ceux à mannitol. Cette différence de réaction faisait penser à un effet toxique de NaCl et ses résultats indiquent que, pour de fortes concentrations, les valeurs totales d'absorption étaient plus fortes avec le mannitol qu'avec NaCl. En se basant sur le poids sec, la quantité de chlore des graines soumises au traitement au NaCl passait de 0,4 % à l'eau du robinet, à 1,18 et 1,79 % respectivement sur les sous-sols à 3 et 15 atm. D'autres preuves de la toxicité du chlore ont été obtenues par l'étude de la guérison des plantes. Des graines transportées d'un sous-sol de NaCl à 12 atm. dans l'eau du robinet ont eu un rétablissement beaucoup plus rapide que celles transportées après le même temps du bain de NaCl à 15 atm. Le pourcentage de graines défectueuses était plus fort sur le sous-sol de NaCl à 15 atm. que sur celui à 12 atm. et le nombre de plantules anormales était plus grand pour toutes les concentrations de NaCl que pour les concentrations correspondantes de mannitol.

L'action du sel sur la germination est fonction de la température. Uhvits (229) a reconnu qu'une augmentation légèrement inférieure à 3°C. dans la serre tempérée diminuait le pourcentage de germination pour toutes les concentrations du traitement au sel, les différences étant plus importantes pour les fortes concentrations. Ahi et Powers (1) signalent que la température est un facteur dominant de la germination et de la croissance des plantes en milieu salin et alcalin. Ils ont procédé à des essais de germination sur Trifolium fragiferum



et sur la luzerne avec des substrats contenant de 306 à 11200 p.p.m. de sels, et à des températures contrôlées de 30, 40 et 50°C. Il y avait une nette diminution du pourcentage de germination avec l'augmentation de la température ou de la concentration saline. A 90°F., il n'y avait pratiquement aucune germination quel que fut le taux de sel; mais à 55°F., 47,7 % des graines de Trifolium fragiferum et 38 % des graines de luzerne germaient. Le travail d'Ogasa (166) sur l'action de solutions de chlore sur le soja à hautes et basses températures confirme les résultats ci-dessus. Il a constaté que la limite de concentration des solutions de NaCl permettant la germination était de 200 milliég./l pour les températures élevées (30°C.) et 300 milliég./l pour les températures basses (15°C.).

Il n'est pas possible d'obtenir des résultats aussi nets des études de germination sur le terrain que des expériences de culture et en serre faites sur sol et dans l'eau, étant donné que plusieurs facteurs peuvent ne pas être contrôlés. Mais les terrains d'expérience fournissent d'utiles informations en ce qui concerne la façon de travailler les sols salins. Kovda et Mamyeva (128) ont étudié les limites de toxicité des sels dans les sols de Hongrie en ce qui concerne la germination et la levée de la luzerne. Ils ont trouvé que la luzerne lève et se développe de façon satisfaisante à une concentration en sels de 0,1 à 0,2 % du sol sec; lève mais se développe mal de 0,5 à 0,6 % et ne lève pas ou meurt rapidement après avoir levé de 0,7 à 1,5 %. Ils soulignent que dans les endroits très salés il est nécessaire d'abaisser la concentration en sel par irrigation de sorte que la couche cultivée ne contienne pas plus de 0,5 % de sel. Heald et ses collaborateurs (103) ont noté que l'on n'obtenait pas une production rémunératrice de betteraves à sucre en sols salins parce que l'on n'obtenait pas une densité suffisante des plantes et qu'elles avaient une croissance ralentie. La salinité de leurs terrains d'expérience allait de 2000 à 10000 p.p.m. Sans lessivage, germination et rendements étaient faibles; mais, avec une opération d'irrigation avant la levée, la densité était augmentée de 20 ou 30 à 70 betteraves par 100 pieds de ligne et à 80 avec trois irrigations avant la levée.

#### SPECIFICITE DE LA TOLERANCE AUX SELS

La base physiologique de la tolérance aux sels et l'action de sous-sols salins ou alcalins sur la croissance et la germination ont été examinés dans les sections qui précèdent. Il nous reste à examiner la spécificité des espèces et variétés végétales en ce qui concerne la tolérance aux sels. Il existe de nombreuses publications à ce sujet, mais beaucoup d'entre elles ne font pas de distinction entre les sols salins et alcalins et les résultats sont souvent indiqués en pourcentages de sel par rapport au sol sec sans référence à l'humidité du sol, ce qui rend impossible le calcul de la pression osmotique de la solution du sol.

Les premières recherches ont mis en évidence les différences entre les tolérances aux sels des diverses espèces et variétés de plantes cultivées lorsqu'elles étaient examinées dans des conditions constantes de salinité. Buffum (34) montra que "la quantité d'alcali du sol qui est nocive pour les plantes dépend de sa composition, de la nature du sol, de la profondeur à laquelle on trouve les sels et de l'espèce cultivée". Loughridge (136) fit des recherches sur la tolérance aux sels d'arbres fruitiers, de légumes, de céréales et de plantes fourragères dans les conditions d'une culture agricole et indiqua leur tolérance relative aux sels par la plus forte quantité de sels dans laquelle la plante ne réagissait

pas. La quantité de sels était exprimée dans chaque cas en livres de sels totaux par acre et pour une profondeur de 4 pieds. Il indiqua aussi les valeurs de tolérance maxima pour chacun des trois sels les plus communs dans les sols de l'Ouest des Etats-Unis  $SO_4Na_2$ ,  $CO_3Na_2$  et  $NaCl$ . Hilgard (110), en revoyant ce travail, remarque que "les chiffres de tolérance seraient très différents, en présence d'autres sels, de ceux qui seraient obtenus pour chaque sel séparément ou pour la moyenne calculée de telles déterminations séparées, prises proportionnellement". Harris (85) reconnut aussi la difficulté de déterminer la tolérance relative aux sels des plantes sur la seule base de la quantité de sels que diverses plantes ont pu supporter, et il fit remarquer que "le sol, l'humidité, le climat et peut-être d'autres facteurs modifient souvent la tolérance relative des différentes plantes dans une certaine mesure, de sorte que de légères différences de tolérance ont peu ou pas de signification".

Une des premières tentatives de classification des plantes cultivées d'après la tolérance au sel a été celle de Kearney et Scofield (122), qui publièrent une étude sur le choix des plantes cultivées pour les terres salines en se basant sur le pourcentage en poids de sels solubles rapporté au poids sec total de la profondeur de sol atteinte par les racines. Ils ont établi les catégories de salinité suivantes : excessive, plus de 1,5 %; très forte, 1,0 à 1,5; forte, 0,8 à 1,0; moyennement forte, 0,6 à 0,8; moyenne, 0,4 à 0,6; faible 0,1 à 0,4; et négligeable, moins de 0,1. Toutefois ils ont reconnu qu'une classification en pourcentages du sol sec ne tient pas compte des relations de l'eau et du sol, et ils ont indiqué que "c'est la concentration dans la solution du sol et non la quantité totale de sels présents dans le sol qui détermine l'action sur la croissance de la plante". En conséquence en établissant les catégories ci-dessus, ils ont pris comme hypothèse que "le sol contient une quantité d'eau favorable à la croissance de la plante considérée". Leur rapport traitait de la tolérance aux sels relative des plantes entrant dans les catégories suivantes : fourrages, racines, céréales, plantes à fibres, légumes de jardins et de culture maraîchère, arbres et arbustes y compris les arbres fruitiers, d'ornement et les essences d'alignement. Ils trouvèrent de fortes variations dans la tolérance aux sels chez les divers membres de ces groupes de plantes.

Le U.S. Salinity Laboratory a inclus dans son programme de recherches des études sur la tolérance aux sels et a fait publier des listes donnant la tolérance aux sels de plantes cultivées (96, 146, 230). Dans la publication la plus récente (230), les plantes de culture fruitière, agricole, potagère et fourragère sont classées en tolérance bonne, modérée et médiocre en utilisant la conductivité électrique de l'extrait de saturation du sol (EC) pour évaluer la salinité du sol et sa relation avec la croissance de la plante. En utilisant cette mesure on pouvait penser qu'un EC de 4 millimhos par centimètre (0,1 % de sol dans un sol de texture moyenné) provoquerait une inhibition nette dans la croissance des plantes de tolérance médiocre. Des plantes moyennement tolérantes peuvent croître normalement quand le EC ne dépasse pas 8 millimhos/cm., la croissance est généralement réduite si le EC est compris entre 8 et 15 millimhos/cm., et, à de rares exceptions près, aucune plante sauf des halophytes indigènes ne peut se comporter normalement à des valeurs de EC supérieures à 15 millimhos (Fig.6).

Figure 6 - Non reproduite dans le document.

Parmi les plantes fourragères, les graminées et les légumineuses peuvent présenter un degré élevé de tolérance aux sels, mais il existe à cet égard des différences spécifiques accentuées (75, 85, 122, 146). Les graminées les plus tolérantes aux sels sur lesquelles des expériences ont été faites aux États-Unis sont : Alcali sacaton, Sporobolus airoides; Distichlis spicata; Pucinellia Nuttaliana; Cynodon Dactylon; Chloris gayana; Agropyron Smithii. Au Canada, Mc Kenzie et Bolton (143) ont essayé un certain nombre de graminées dans des sols lourds et salins, et ils ont découvert que les mieux adaptées au sol et aux conditions climatiques étaient Agropyron Trachycaulum, Bromus sp., Agropyron cristatum, Festuca sp., et Phalaris arundinacea. En Australie, Millington et ses collaborateurs (155) ont essayé des espèces de pâturage dans des sols salinisés et ont trouvé que Pholiurus incurvis, Hordeum marinum et Lolium rigidum avaient une tolérance aux sels relativement bonne. Ils signalent aussi que couch grass, Cynodon Dactylon, a une tolérance moyenne aux sels. Burvill (38,39) signale aussi que Pholiurus incurvis a une bonne tolérance; et pour les terres salées bien alimentées en eau, il signale une plante grimpante, Paspalum vaginatum ainsi que Sporobolus virginicus comme pleins de promesses.

La luzerne, les mélilots blancs et jaunes, le lotier, Trifolium fragiferum et le trèfle var. Hubam figurent parmi les légumineuses fourragères dont la tolérance aux sels est moyenne. (85, 122, 230). La luzerne, Medicago sativa, est une plante fourragère de première importance et a été étudiée à fond pour la détermination de sa tolérance aux sels (1, 50, 55, 71, 85, 122, 143, 145, 155, 161). On a noté que la luzerne devient plus tolérante aux sels avec l'âge, mais ceci peut être difficile à établir, étant donné son inaptitude à germer dans des sous-sols très salins (12, 122, 161). On a lieu de penser qu'il y a des différences selon les variétés d'espèces pour la tolérance aux sels, mais on a peu de documentation sur ce sujet (100).

Ayers (7) a indiqué que le lotier, Letus corniculatus var. tenuifolius a une forte tolérance aux sels et peut supporter des températures d'été élevées. Il a un meilleur rendement pour des taux de sels moyens et élevés (5000 et 7500 p.p.m. de sels ajoutés) que le gros trèfle, le trèfle hybride, le trèfle rouge, le trèfle ladino, et Trifolium fragiferum, dans l'ordre où ils sont mentionnés. Les renseignements concernant Trifolium fragiferum sont contradictoires. Dearney et Scofiels (122) et Ahi et Powers (1) l'ont considéré comme remarquable, mais Gauch et Magistad (71) ont trouvé que, en ce qui concerne le rendement réel, la luzerne et le trèfle ladino produisent respectivement 1,3 et 1,9 fois autant de fourrage que Trifolium fragiferum. Ces rapports sont fondés sur des études faites dans des endroits différents et dans des conditions variables de climat et d'humidité du sol; elles servent à souligner le fait que la tolérance aux sels d'une variété donnée peut être modifiée de façon appréciable par d'autres facteurs du milieu. La possibilité d'avoir des différences de tolérance au sein d'une même espèce est illustrée par l'étude de cinq lignées de Trifolium fragiferum où Gauch et Magistad (71) trouvèrent des différences nettes entre des lignées provenant de diverses régions de l'Ouest des États-Unis.

On a fait de nombreuses études concernant la tolérance aux sels des céréales (11, 38, 50, 85, 122, 146, 149, 155, 160, 162, 163, 169). Bien que les comptes rendus diffèrent en ce qui concerne leurs tolérances relatives, l'U.S. Salinity Laboratory a classé par ordre de tolérances décroissantes : l'orge, le seigle, le blé et l'avoine pour les fourrages et : l'orge, le seigle, le blé, l'avoine, le riz et le maïs pour les céréales-grains (230). Ayers et ses collaborateurs

(11) ont éprouvé la tolérance de quatre variétés d'orge et de deux variétés de blé dans des terrains artificiellement salinisés ; ils ont noté que l'orge était très tolérant à condition que le taux de salinité soit relativement bas pendant le développement de la plantule. Quand on l'irriguait avec une eau contenant 10.000 p.p.m. de sels, la production de grain de l'orge Atlas était égale à 96 % de la production du terrain témoin. Millington et ses collaborateurs ont indiqué de bons résultats avec cette variété (155) et Marshall (149) a obtenu une bonne densité et une maturation satisfaisante d'orge Regal dans un sol contenant une moyenne de 0,89 % de sels (secs à l'air) dans les 45 centimètres superficiels. Les données recueillies par Marshall indiquent que le blé est plutôt moins tolérant que l'orge et plus tolérant que l'avoine, mais il n'a pas pu mettre en évidence des différences selon les variétés.

On considère que le riz a une tolérance aux sels moyenne et il est réputé bien pousser en Egypte où la richesse du sol en sels atteint 1 % (surtout NaCl) (122). Kapp (118) a reconnu dans l'Arkansas que 5700 p.p.m. de NaCl empêchaient la formation du grain, mais ne produisaient qu'une faible réduction de la paille. La germination était réduite par cette concentration. Le maïs, *Zea mays*, est la céréale la plus sensible et ne peut donner une production satisfaisante même sur des sols légèrement salins (85, 122). Wadleigh et ses collaborateurs (247) ont reconnu que le maïs Mexican June était moins tolérant que la luzerne et plus que les haricots.

La betterave à sucre a une bonne tolérance aux sels quand les semis ont réussi (85, 122, 146). On a noté dans la section précédente la sensibilité relative de cette plante aux stades de la germination et de la plantule (1). Shaw (204) a trouvé que certaines betteraves pouvaient supporter des concentrations en sels égales à 0,43 % du sol sec à une profondeur de 60 centimètres et Kearney et Scofield (122) disent qu'on ne peut obtenir une bonne densité de betteraves si le sol contient plus de 0,5 % de sels. Harris (85) souligne que la qualité des betteraves à sucre peut être réduite par l'augmentation de la salinité à cause de son action sur la production du sucre. Eaton (55) en expérimentant sur les betteraves à sucre U.S. N°1 indique un fort degré de tolérance au Cl, mais non aux sulfates, 50 milliéquivalents par litre de SO<sub>4</sub> provoquant une plus forte réduction de production que 150 milliéquivalents par litre de Cl ajoutés à une solution nutritive.

Les plantes cultivées offrent une vaste gamme de tolérance aux sels, mais la plupart de celles que l'on a essayées ne paraissent pas capables de supporter des conditions de forte salinité (230). La betterave rouge, l'asperge, et la tomate ont montré une bonne tolérance aux sels, tandis que le chou, le chou-fleur, le brocoli, la laitue, les oignons et certains cucurbitacés ont montré une tolérance modérée ou moyenne. Les haricots et les radis sont très sensibles aux sels. Bernstein et Ayers (22) ont expérimenté six variétés de haricots verts et ont vu que de tous les légumes essayés, ils avaient le plus faible degré de tolérance au sel. Il y avait des différences statistiques nettes entre les productions des variétés, mais ces différences n'étaient pas assez fortes pour avoir une importance pratique. La production moyenne de toutes les variétés

---

(1) voir page

cultivées sur des parcelles irriguées avec de l'eau contenant 3000 p.p.m. de sels en mélange était seulement 42 % de celle du témoin et à 6000 p.p.m. la production des haricots était réduite à 13 %. Des expériences semblables avec la laitue ont montré qu'elle avait une tolérance aux sels modérée et on a trouvé des différences statistiques nettes entre les tolérances relatives des six variétés étudiées (13). Quand on irriguait avec de l'eau contenant 3550 p.p.m. de sels, la production moyenne des six variétés était de 65,7 % de celle du témoin et avec de l'eau à 9550 p.p.m., de 41 %. Bernstein et ses collaborateurs (23) ont étudié la tolérance des pommes de terre White Rose à des traitements dans lesquels l'eau d'irrigation contenait des parties égales en poids de NaCl et CaCl<sub>2</sub> pour des taux allant de 2000 à 6000 p.p.m. Ils reconnurent que les pommes de terre avaient une tolérance aux sels moyenne et produisaient 79, 64 et 42 % de tubercules par rapport au témoin pour les taux de 2000, 4000 et 6000 p.p.m. de sels respectivement.

Parmi les plantes à fibres, le coton est très tolérant aux sels et a une bonne croissance même dans des conditions de forte salure (122). Les variétés égyptiennes ou à fibres longues sont plus tolérantes que les variétés à fibres courtes. Kearney (119) dit que le coton peut supporter 0,4 à 0,6 % de sels sans dommage et Wadleigh et ses collaborateurs (247) ont trouvé que les racines de cotonnier pouvaient pénétrer aisément et sans dommage un sol contenant 0,25 % de sel. Wadleigh et Gauch ont étudié la production de 12 variétés de coton pendant une période de trois ans et disent que les variétés américano-égyptiennes (SXP, Amsak et Sakel), Acala 1517 et Acala P-18 ont montré de façon constante une bonne tolérance, alors que les lignées Stoneville, tout en donnant de bons rendements relatifs sur des substrats salés, montraient toujours des signes très nets d'intoxication par les sels.

Le lin a une tolérance aux sels moyenne (99, 119). Kearney et Scofield (122) signalent de bonnes récoltes là où la salinité ne dépasse pas 0,4 %. Hayward et Spurr (99) ont étudié le lin du Pendjab en culture sur sable et en serre, à des concentrations osmotiques de 1,5 à 4,5 atm., en ajoutant isolément NaCl, CaCl<sub>2</sub> et SO<sub>4</sub>Na<sub>2</sub> à un sous-sol nutritif. A de fortes concentrations, les productions relatives de graines étaient réduites de 25 à 62 % et, à la plus forte concentration de SO<sub>4</sub>Na<sub>2</sub>, on n'obtenait aucune graine mûre.

On a peu de renseignements sur les cultures fruitières. Le palmier dattier est un des végétaux cultivés les plus tolérants (85). Magistad et Reitemer (147) signalent une croissance des dattiers dans la vallée de Coachella en Californie, où la solution du sol a une teneur en humidité approchant le pourcentage de flétrissement, contenait 15.000 p.p.m. de sels, soit une concentration osmotique de 7 atm. Les figuiers, les grenadiers, les oliviers et la vigne sont modérément tolérants, tandis que les agrumes, les pommes, les poires et les fruits à drupes sont généralement considérés comme ayant une tolérance au sel moyenne à médiocre (146, 230). Loughridge a observé (136) la croissance vigoureuse de variétés de vignes perses dans des sols ne contenant pas moins de 0,28 % de sels. Ravikovitch et Bidnor (184) ont étudié l'effet de la salinité sur le chasselas et le muscat de Hambourg et ils ont constaté de graves dégâts quand le total des sels solubles dépassait 0,23 % dans les 30 premiers centimètres du sol. Hayward et ses collaborateurs (95) indiquent que la pêche var. alberta est sensible à une concentration moyenne de sels, ils déclarent que l'on peut s'attendre à ce que les rendements diminuent au bout de quelques années si la pression osmotique du sous-sol dépasse 2 atm. Lilleland et ses collaborateurs (134) ont noté des différences, selon les variétés, dans la toxicité du Na pour les amandes, la variété du Texas

étant plus sensible que les Non pareil et Nec plus ultra. Wadleigh et ses collaborateurs (248) ont étudié six variétés de fruits à noyaux cultivés sur de vastes cultures sur sable et en plein air; et, en prenant comme référence la croissance de la première année, ils ont trouvé qu'un excès de  $\text{CaCl}_2$  dans la solution de culture était plus nocive que  $\text{NaCl}$  à pressions osmotiques égales. Les poires et les pommes semblent tolérer les sels un peu mieux que les drupes (110), tandis que les agrumes y sont très sensibles, particulièrement à  $\text{NaCl}$  (Kelley et Thomas) (126), Loughridge (136). Les citrons sont les plus sensibles et les oranges sont intermédiaires entre les citrons et les pamplemousses.

Cooper et Gorton (45) ont étudié la tolérance aux sels de 20 souches différentes du pamplemousse Shary Red et ont constaté que la mandarine var. Cleopatra était plus tolérante que Citrus aurantium, tandis que Citrus sinensis var. Florida, l'orange à trois feuilles et le cédrat étaient moins tolérants que Citrus aurantium. D'autres arbres fruitiers sensibles aux sels sont Juglans regia, le mûrier et l'avocatier (8, 122).

Les arbres forestiers et les essences d'ombre présentent divers degrés de tolérance aux sels. Snyder et ses collaborateurs (209) ont remarqué que les conifères étaient moins tolérants que les arbres à feuillage caduc. Treize espèces d'arbres à feuillage caduc furent étudiées et celles qui montrèrent la plus forte tolérance furent Populus alba var. nivea, le saule pleureur, Eleagnus angustifolia et l'orme de Sibérie. Harper (83), dans ses études sur les arbres de l'Oklahoma, a trouvé que le pacanier, l'orme et l'hickory étaient plus sensibles au Cl que Quercus macrocarpa et le frêne.

Il y a deux points à souligner en ce qui concerne la spécificité dans la tolérance au sel. Tout d'abord, il est évident qu'il existe des différences nettes dans la tolérance relative aux sels des divers genres, espèces et variétés des plantes agricoles. En second lieu une appréciation correcte de la tolérance nécessite que l'on prenne en considération d'autres critères tels que l'humidité du sol et le climat. Il est clair également que, à cause de la spécificité dans la tolérance, il importe de sélectionner de façon adéquate les plantes à utiliser dans les sols marginaux du point de vue salinité.

#### IMPORTANCE DU PROBLEME DU SEL DANS LES RÉGIONS GÉOGRAPHIQUES ÉTUDIÉES

On a passé en revue dans les sections précédentes les problèmes biologiques relatifs à la croissance des plantes en sols salins et alcalins; et l'on a discuté les facteurs qui influencent la tolérance des plantes aux sels et aux alcalis. Le but de la dernière section est de décrire l'étendue du problème du sel dans les régions géographiques affectées à l'auteur et d'appeler l'attention sur les travaux effectués à propos du problème du sel et qui n'ont pas été publiés.

## AUSTRALIE (1)

Le problème du sel en Australie est limité en gros à la partie sud du pays, Australie occidentale, Australie méridionale, Victoria et le district de Riverrina de la Nouvelle-Galles du Sud; mais on trouve aussi des sols salins d'importance limitée dans d'autres régions y compris la partie inférieure de la vallée du Burdekin dans le North Queensland. Prescott (177) a reconnu 18 zones de sols dans sa carte des sols de l'Australie, dont trois sont caractérisés par une certaine salinité.

Les sols type Solonetz, où l'horizon B présente une nette structure prismatique, occupent une faible surface, environ 19.000 milles carrés sur la carte, soit 0,6 % de la surface totale. On les rencontre surtout en Australie Occidentale et dans la partie supérieure du Sud-Est de l'Australie méridionale. On en rencontre de petites étendues dans les vallées sous-côtières du Queensland, jusque vers Townsville au Nord.

On rencontre des sols bruns solonisés dans les parties les plus sèches de l'Australie Occidentale, de l'Australie méridionale et dans ces parties de Victoria et de la Nouvelle-Galles du Sud où la pluviosité est faible et ne dépasse pas 45 cm. (6). Prescott a indiqué que la zone de salinité maxima du sol se trouve un peu au nord de la côte sud et correspond dans une large mesure à la limite des sols bruns solonisés. Il estime que ce groupe de sols couvre 425.000 km carrés, soit 5,5 % de la surface totale. On a désigné ces sols sous le nom de type "mallee" parce que la végétation caractéristique est un eucalyptus branchu qui porte ce nom. Ils sont de couleur brune ou grise, riches en calcaire et fortement alcalins et le lessivage tend à constituer du Na échangeable. Le taux en sels solubles peut être élevé et s'augmente avec la profondeur dans un sol vierge. Le chlorure de Na forme une partie à peu près constante des sels et le gypse est souvent présent (178, 224). Teakle (222) a publié des écrits sur les sols solonisés ou alcalins de l'Australie Occidentale; il note que l'on trouve dans le sous-sol du Na et du Mg échangeables en proportions approximativement égales d'environ 40 %. Le calcium est en moyenne de 15 % et dépasse rarement 25 %, la réaction du sol est fortement alcaline (pH 8-9). La teneur en sels solubles peut ne pas être élevée en surface, mais dépasse souvent 0,25 % en dessous de 60 centimètres.

Le troisième groupe des sols qui peuvent présenter un certain degré de salinité comprend les sols gris et bruns de texture lourde. On les trouve dans une zone semi-aride qui est décrite par Prescott (177) comme "un grand arc portant du Wimmera dans Victoria et formant la masse des sols de plaine de Riverrina, des Western Darling Downs, des ondulations des Downs du Queensland du

---

(1) L'auteur désire exprimer ses remerciements aux personnes suivantes qui l'ont aidé à préparer cette section : J.A. Prescott, Directeur, Waite Institute; J.K. Taylor, chef et John Hutton, Division of soils, C.S.I.R.O., Adelaide; G.D. Hubble, Division of Soils, Plant and soils Laboratory, Brisbane; G.H. Burvill, Commissioner of Soil Conservation, Perth; E.S. West, Officer-in-charge, Irrigation Research Station, Griffith; L.G. Vallance, Assistant Director, Bureau of Sugar Experiment Stations, Brisbane; S.B. Dickinson, Director of Mines, Adelaide; R.W. Prunster, Officer-in-charge, Regional Pastoral Laboratory Deniliquin, N.S.W.; et A.C. Orvedal, Division of Soil Survey, U.S. Department of Agriculture.

Nord-Ouest, le Barkly tableland et les Victoria River Downs dans le Northern Territory et les sols alluviaux plus lourds des fleuves Ord et Fitzroy dans les Kimberleys (W.A.). Ces sols couvrent 700.000 km carrés, soit 9,1 % de la superficie totale. Ce sont uniformément des argiles lourdes, grises ou brunes, et le profil est faiblement alcalin en surface et moyen ou fort en profondeur. Suivant Taylor (6), il y a une accumulation de sels, en particulier dans les plaines du sud. On trouve des quantités faibles ou moyennes de chaux, avec parfois en dessous un horizon contenant du gypse. La présence du gypse est caractéristique de certaines régions du Queensland. Ces sols comprennent quelques uns des meilleurs pâturages d'Australie.

Barley (1) du Regional Pastoral Laboratory, Deniliquin, N.S.W., a rendu compte de la structure des sols halomorphiques de la Riverine Plain. L'analyse de trois types de sols indique qu'il s'agit de sols alcalins à plus de 12 % de saturation Na K, et il y a plus de Mg que de Ca dans le complexe d'échange des cations. Il déclare que "les colloïdes de nombreux sols de Riverina se dispersent quand la salinité est réduite par l'irrigation en nappe. Le traitement au gypse, les cycles d'humidité et de sécheresse, l'immersion, le développement des racines et des microorganismes ont une influence visible sur la structure du sol".

Burvill (37,38) a examiné le problème du sel en Australie occidentale et explique la salinité du sol en prenant en considération la production de sels solubles dans l'eau par la décomposition des minéraux et le dépôt cyclique de sels apportés par les pluies. Tenkle (221,222) a apporté des preuves à l'appui de la théorie cyclique. Pennefather (173) a montré que l'apport de sels le plus important dans la zone du blé en Australie est lié à l'inondation de vallées relativement plates qui contiennent une bonne partie des meilleures terres à blé. Il estime que 280.000 à 400.000 hectares sont menacés de salinité. La Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization a publié de nombreux bulletins sur les sols où l'on parle des sols salins en Australie (16, 170, 172, 176, 177, 178, 220, 224).

Outre les régions de faible pluviosité où l'on pratique la culture en terrain sec, la salinité constitue un problème important dans les districts d'irrigation de la Nouvelle-Galles du Sud, de Victoria et de l'Australie méridionale. C'est particulièrement vrai le long des fleuves Murray et Murrumbidgee où l'irrigation excessive et le relèvement du plan d'eau ont provoqué des accumulations de sels et causé des dégâts aux vergers et aux vignobles (172, 224). Toutefois, l'eau de ces fleuves est pauvre en sels et le rapport Ca/Na est favorable, si bien qu'en peut espérer contrôler la salinité du sol par un drainage adéquat. Lyon (2) a écrit sur l'eau du fleuve Murray; il note que sa qualité a été bonne depuis que le débit a été régularisé par des barrages et des lacs

---

(1) Barley, K.P. Structure building in halomorphic soils. Communication présentée à l'Australia Grassland Conference, Canberra, New South Wales, sous les auspices de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. 1951. Polycopié.

(2) Lyon, A.V. 1950. Injurious soil salts. Communication présentée à la Technical Conference on Irrigation, Griffith, New South Wales, sous les auspices de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Polycopié.



de retenues à écluse. Le chlorure a varié de 10 à 160 p.p.m., avec une moyenne de 57 p.p.m. ; et le total des sels a varié entre 30 et 200 p.p.m. avec une moyenne de 90 p.p.m. A Mildura la teneur en Bore a varié entre 0,05 et 0,10 p.p.m. au cours de ces dernières années. La composition des sels des eaux de drainage présente des caractéristiques fixes. Il y a relativement beaucoup de sulfates et de bicarbonates et Cl n'est pas l'anion dominant. Le chiffre du total des sels solubles est habituellement 2 à 6 fois le chiffre de NaCl calculé d'après la concentration en ions Cl.

Bien que l'utilisation d'eaux souterraines saumâtres pour l'irrigation soit limitée, le South Australian Geological Survey a accumulé sur les eaux souterraines salines un grand nombre de renseignements qui ont été résumés par Ward (251). Il a fixé des limites de tolérance aux sels solubles de l'eau d'irrigation qui vont de 1.000 à 3.000 p.p.m., à condition que l'eau soit fournie à des sols perméables et bien drainés ; et il a établi la liste de la tolérance relative d'un certain nombre de plantes cultivées sous irrigation. Il signale que les haricots, la laitue, les concombres, les tomates et les agrumes ont une tolérance faible, et la luzerne une tolérance forte. Barnes (17) a fait une étude semblable sur les eaux souterraines du bassin du Murray et signale qu'une majorité de plantes agricoles, à l'exception des haricots, des agrumes et des fruits à noyaux, pousse de façon satisfaisante avec de l'eau d'irrigation contenant 2.150 p.p.m. de sels totaux si le sol est perméable et a un bon drainage en profondeur. Comme Ward, il considère comme douteuse l'eau à plus de 3.000 p.p.m., mais il note un cas où on a cultivé de la luzerne pendant au moins deux ans avec de l'eau contenant 4.700 p.p.m. de sels solubles. Perkins (174) a publié une importante communication sur la qualité de l'eau pour l'irrigation en Australie méridionale qui concerne l'approvisionnement en eau près d'Adélaïde.

Outre les études de Millington et ses collaborateurs (155), de Burvill (38) et de Burvill et Marshall (39) qui sont analysées par ailleurs, I/, il existe un grand nombre de rapports sur la tolérance aux sels de plantes indigènes et cultivées. Baldwin et ses collaborateurs (16) ont étudié les relations entre la végétation et la salinité du sol, et ont fait une liste de tolérance aux sels pour 28 plantes cultivées et indigènes en % de NaCl dans les 15 premiers cm. de sol. Les plantes que mange le bétail sont notées, et plusieurs d'entre elles peuvent tolérer jusqu'à 0,6 % ou plus de NaCl : Atriplex semibaccatum (1,2 %), Hordeum murinum et H. maritimum (1,2 %), Danthonia semiannularis (0,8 %), Lolium sp (0,8 %) Medicago hispida (0,8 %), avoine, Avena sativa (0,7 %), Chloris acicularis et O. truncata (0,6 %), Festuca myuros (0,6 %), Cynodon Dactylon (0,6 %) et Trifolium tomentosum (0,6 %). Penman et Provan (171) ont étudié la tolérance aux sels des agrumes et déclarent qu'on obtient des dégâts et un retard dans la croissance quand la concentration de NaCl dans les 90 premiers cm. du sol atteint 0,05-0,06 % et que la mort se produit à 0,1 %. Thomas (223) a établi un rapport entre le taux de Cl des feuilles de vigne et l'état de santé de la plante ; il indique qu'il se produit de sérieux dommages lorsqu'il y a plus de 1 % de Cl dans la feuille.

#### INDE ET PAKISTAN

Dans l'Inde et au Pakistan on rencontre des sols salins et alcalins surtout dans les régions suivantes : (1) toute la vallée de l'Indus ; (2) les vallées et

I/ Voir la section : Spécificité dans la tolérance aux sels.

bassins fluviaux de l'Inde occidentale et du Pakistan ; (3) la vallée du Gange approximativement à l'ouest du 80e degré de longitude est ; (4) les hautes terres du plateau du Deccan, en particulier entre les fleuves Tapti, Godavini et Bhima ; (5) les marais salants de la Côte et des deltas du Gange, de l'Indus, du Cauvery et du Mahanadi ; et (6) les plateaux côtiers salés le long du Rann de Cutch.

On a pris conscience du problème du sel dans l'Inde dès 1876, quand fut établie la "Commission reh" (1) chargée de rechercher les causes de la dégradation des terres du district d'Aligarh qui se trouve au sud-est de Delhi, entre le Gange et la Jumna. Hilgard (109, 110) a étudié le rapport de la Commission qui discute les conditions dans lesquelles le reh se constitue dans les provinces et qui contient des recommandations pour y remédier. Le reh est formé de sels de Na très solubles qui remontent en surface sous l'action de la capillarité et de l'évaporation. L'accumulation du reh est accélérée là où le niveau de l'eau est près de la surface, et la Commission trouva que la création de canaux d'irrigation était la principale cause de l'extension du reh. Elle recommanda d'approfondir les canaux pour abaisser la nappe phréatique, de réduire l'utilisation de l'eau pour éviter une sur-irrigation, et d'effectuer un drainage profond pour évacuer l'eau en excès dans le sous-sol et les sels du reh.

Cangulee (67) a exposé les problèmes des sols alcalins ou usar dans les régions arides ou semi-arides. Il déclare ensuite : "on peut raisonnablement penser qu'une très grande partie de la vaste région reconnue dans les statistiques officielles comme terres incultes récupérables autres que jachères est imprégnée de sels alcalins". Le Na est l'élément le plus commun dans les sols de l'Inde, sous forme de chlorures, sulfates et carbonates. Des quantités excessives de NaCl et CO<sub>3</sub>Ca produisent ce qu'on appelle les sols d'alcali noir de la plaine Indo-Gangétique, et on trouve presque partout un alios dans les régions où l'on a des sols alcalins. Ces alios limitent la perméabilité de l'eau ainsi que l'amélioration du terrain.

Eu égard à la tolérance aux sels, Gangulee donne la liste d'un certain nombre de graminées que l'on trouve dans les régions à alcalis et qui comprend : Tetrapogon tetrastachys ; Kar Usara, Sporobolus pallidus ; Kans Saccharum spontaneum ; Andropogon laniger et A. intermedius ; Anjam, Pennisetum cenchroides ; Narri, Diplachne fusca ; et Dub, Cynodon Dactylon.

Les plantes fourragères qui ont donné de bons résultats sont : Shaftal, Trifolium resupinatum ; Serji, Melilotus indica ; Wal, Dolichos lablab ; Guar, Cyamopsis psoraloides ; et Chowli, Vigna catiang. Le trèfle égyptien (Berseem), Trifolium alexandrinum a réussi dans le Sind et dans certaines parties du Pendjab.

Leather (15) a étudié les (terres alcalines) des Provinces Unies, et n'est pas complètement d'accord avec la "Commission du reh". Il déclare que l'alcali est un produit du sol lui-même et n'est pas déposé par l'eau des canaux ; il n'a trouvé aucune différence effective entre le sol de l'usar qui avait été irrigué depuis longtemps et celui qui n'avait jamais été soumis à cette influence. Dans le voisinage de Bhadan les sols contiennent CO<sub>3</sub>Na, CO<sub>3</sub>HNa, mais pas d'autres sols

- (1) Le terme reh est utilisé pour désigner des sels alcalins, ou un sel très soluble commun dans beaucoup de sols de l'Inde. Il cite Frelcker qui évalue à 10.500 ou 13.000 kilomètres carrés la superficie de usar dans les seules provinces du Nord-Ouest, et Hill qui dit qu'en 1903 il y en avait plus de 800.000 hectares dans toute l'Inde.

alcalins. Une régénération peut être effectuée par l'application de Gypse mais le coût de l'opération est très élevé. Des analyses plus récentes (1948) de sols alcalins des environs de Lucknow, U.P., ont révélé une très forte teneur en sels solubles, surtout dans les 45 premiers cm., beaucoup de Na soluble et échangeable, et une réaction du sol très élevée (pH de l'extrait du sol de 1 à 10 : 10,0 à 10,9). Le pourcentage de Xa échangeable était voisin de 100 à la plupart des profondeurs (1).

Auden et ses collaborateurs (5) ont publié des écrits sur les sels de Na dans les sols reh des Provinces Unies. Ils considèrent que les termes reh, kalar et thur sont synonymes ; ils définissent le reh comme une croûte salée que l'on trouve sur les alluvions dans lequel  $\text{CO}_2\text{Na}_2$  est généralement en excédent de  $\text{SO}_4\text{Na}_2$ . Les principaux facteurs de la formation des sels du reh sont : (1) des saisons sèches et humides alternées, (2) des pentes faibles de l'ordre de 1/1000e, (3) une nappe phréatique voisine de la surface, (4) des roches riches en sels de soude, (5) une certaine qualité de l'eau souterraine et de l'eau d'irrigation, (6) des réactions d'échanges de base. Ils sont vagues en ce qui concerne l'origine du NaCl que l'on trouve dans ces sols.

Basu et ses associés (19,20,21) ont souligné la complexité du problème des sols salins dans l'Etat de Bombay, et la nécessité d'une étude critique de la pédogénèse responsable de leur formation. Basu (19) déclare que les causes de la formation des sols salins dans la région Bombay-Deccan sont : (1) l'aridité du climat combinée à la grande profondeur du sol, (2) les conditions topographiques qui ont une influence sur la formation du sol de surface à cause de l'entraînement par l'eau des sels des régions voisines, (3) la proximité d'eau salée dans le sous-sol, (4) l'imperméabilité du sous-sol, et (5) des couches salifères dans le sous-sol.

De nombreux sols du Deccan sont caractérisés par l'imperméabilité, l'extrême dureté, et occasionnellement la présence de sels indésirables en surface. De tels sols, connus sous le nom de chopan sont considérés comme impropres à l'irrigation et à la culture de la canne à sucre.

Ils sont caractérisés par une forte saturation en Na de la partie superficielle du sol, et tous possèdent une zone d'accumulation de sels dans leur profil. Basu et Tagare (21) ont fait des recherches sur le traitement et la remise en état de ces sols alcalins ; ils ont trouvé que, si l'horizon B était bien drainé, l'irrigation, le fumage, la culture suivie de jachères aidaient à réduire le Na colloïdal et à augmenter la proportion de Ca colloïdal. Quant l'horizon B était imperméable, il était impossible de cultiver avec succès aucune plante irriguée sans amender le sol. Les meilleurs résultats étaient obtenus avec des mélanges de soufre et de fumier à la dose de 1 1/4 tonne et 5 tonnes respectivement par hectare. Les molasses (25 T/hectare) étaient utiles, mais moins efficaces que le mélange soufré.

Mann et Tamhane (148) ont effectué des recherches sur la zone du canal Nira dans la province de Bombay et ont conclu que la formation d'un sol salé était liée à l'existence du canal, et à l'élévation du niveau de l'eau par l'irrigation sans drainage adéquat. Le lavage au moyen de petits drains coupant les canaux naturels de drainage suffit habituellement à remettre en état en une

---

(1) Analyses effectuées par le U.S. Salinity Laboratory à la demande du Dr C. Maya-Das, anciennement Director of Agr.U.P. Lucknow.

seule année les sols noirs salés si bien qu'on peut y faire pousser de la canne à sucre. On peut utiliser pendant la remise en état du riz tolérant au sel provenant du Konkan après qu'on a enlevé une partie du sel. Les plantes les plus tolérantes aux sels étaient : le wal, Dolichos lablab ; le chowli, Vigne catiang; et l'ambadi, Hibiscus cannabinus.

Le problème du sel au Pakistan doit être traité dans un autre rapport<sup>(1)</sup> mais les conditions sont si semblables à celles de l'Inde que l'on donnera brièvement les références de quelques publications caractéristiques. Tamhane (218) a étudié les terres salées ou kalar du Sind, le long des rives de l'Indus. Le sel principal dans le kalar blanc est NaCl, mais il y a une quantité appréciable de  $SO_4Na_2$ . Le carbonate de Na qui constitue le kalar noir n'est pas commun dans les sols du Sind. Il attribue la formation de kalar à une pluviosité faible, à l'évaporation excessive due à des températures très élevées pendant les périodes sèches, et au manque de drainage en profondeur pendant la saison des crues (juin à septembre).

Le Pundjab Irrigation Research Institute a fait paraître plusieurs publications importantes relatives au problème du sel. Mehta (153) a étudié la formation et la remise en état des thur (sols salins) et a proposé une classification des sols en 5 types d'après le taux de sels solubles et le pH. Les thur peuvent être remises en état par une ou deux récoltes de riz, et on peut obtenir ensuite d'excellentes récoltes de coton, de blé, et de canne à sucre même pendant 8 ans sans altération. Taylor, Puri et Asghar (3,181,219) ont étudié les sols des zones du Pendjab irriguées par canaux en ce qui concerne leur classification, leur altération et leur remise en état ; il conclut que les mesures physicochimiques constituent une meilleure base de classification des sols alcalins du Pendjab que les caractères morphologiques. Ils soulignent l'importance des sels de Ca pour la remise en valeur dans toutes les régions où le pH dépasse 8,5, et insistent sur la nécessité de prêter attention à la qualité des eaux d'irrigation. Ils étudient trois critères : (1) la totalité des matières en suspension dans l'eau, (2) le rapport Na/Ca dans la solution, (3) la qualité du sol à irriguer.

Puri (180) a étudié le rapport entre Na échangeable et la production végétale dans deux sols du Pendjab ; il a remarqué que la quantité de Na échangeable est le facteur qui limite la production du blé ; et Mehta (152) a établi une relation entre la production de riz et la teneur en sels et l'alcalinité du sol. Il a noté qu'un sol avec un fort pH et une teneur en sels relativement forte paraît donner une plus forte production qu'un sol ayant un fort pH avec une faible teneur en sels, et il attribue la différence à l'effet des sels sur les propriétés physiques du sol. Hoop et Mehta (112) ont étudié le rapport entre les caractéristiques du sol et la flore naturelle du Sud-Ouest du Pendjab ; ils déclarent que certaines plantes indigènes peuvent être utilisées comme des indicateurs constants des propriétés du sol, y compris l'alcalinité et la teneur en sels solubles.

---

(1) Grillot G. Les problèmes biologiques relatifs aux plantes tolérant l'eau salée ou saumâtre et à l'utilisation d'une telle eau pour l'irrigation en ce qui concerne l'Europe, l'Afrique, et le Moyen-Orient et principalement les pays arides et semi-arides.

Dhir (47) a traité le problème des eaux de surface et des eaux souterraines dans les régions arides et semi-arides de l'Inde et du Pakistan ; il conclut que "on a sans aucun doute accordé l'attention qu'il méritait au problème de la salinité qui est étroitement lié à d'autres problèmes des zones arides, mais aucune solution n'est encore en vue", c'est plutôt l'adaptation des pratiques agricoles courantes à la qualité de l'eau dans ces zones que des tentatives de dessalage sur une vaste échelle qui constitue la méthode ayant le plus de chances de donner des résultats dans un délai raisonnable.

### AMERIQUE DU SUD ET AMERIQUE CENTRALE (1)

On a peu de renseignements concernant particulièrement le problème du sel dans l'Amérique du Sud et l'Amérique centrale ; mais, au cours des dernières années, un effort a été fait pour obtenir des renseignements sur l'étendue des sols salins ou des alcalins afin de les aménager et d'étendre la superficie cultivable par irrigation, lessivage et d'autres méthodes de régénération.

#### ARGENTINE ET CHILI

Vessel (236) a préparé une carte générale des associations du sol de l'Argentine et du Chili, et Storie et Mathews (216) ont fait une étude préliminaire des sols du Chili. Leurs deux rapports indiquent qu'il y a des sols salins et alcalins dans les régions arides et semi-arides.

En Argentine, on rencontre les sols type solonetz et selonchak dans les parties Nord et Ventre-Nord du pays, dans le Chaco et la Pampa, et, jusqu'à un certain point, dans les bassins et les chaînes des pré-Andes. On trouve des sols châtain-rouges dans la partie occidentale de la pampa, dans la région chaude semi-aride, et ils sont parfois interrompus par des dépressions peu profondes de solonchak et de marais salants. Les solonetz s'étendent largement dans les parties Est et Nord-Est de la région. On rencontre les sols brun-rouges dans le bassin des pré-Andes et l'Ouest du Chaco, on trouve de larges plaines salées dans la partie Nord de cette région. On trouve des sols alluviaux salins le long du rio Bermejo et des solonchak et des solonetz leur sont normalement associés. Les solonchak dominent à Mar Chiquita, marais salants du Sud-Est du Chaco, et à Salinas Grande, vaste plaine salée dans le bassin et la chaîne des pré-Andes.

On trouve aussi des sols alluviaux calcaires et salins le long des principaux cours d'eau de la région chaude et aride qui comprend l'Atacama et le Nord du Chili. C'est un des endroits les plus secs du globe, et, d'après James (116) on n'a même jamais enregistré de pluie à Calama, derrière la chaîne cotière. Les dunes de sable sont très étendues et on trouve des sols salins ou solonchak dans les dépressions. Dans l'Atacama, il y a cinq zones distinctes entre Pisagua et Taltal où on trouve de riches gisements de nitrate de Na dans les couches de caliche qui peuvent varier en épaisseur de quelques centimètres à 2 ou 3 mètres. Ils contiennent aussi NaCl et quelques iodures (116).

---

(1) L'auteur désire exprimer ses remerciements aux personnes suivantes qui l'ont aidé à préparer cette section : A.A. Bitancourt, Director, Instituto Biológico de Sao Paulo, Brésil ; Jose Guimeraes Duque, Chief, Agricultural-Industrial Service, Fortaleza-Ceara, Brésil ; et Jose Vivas, Ministerio Fomento, Lima, Pérou.

Storie et Mathews (216) ont décrit des sols salins dans les environs d'Iquique. Ils sont brun-gris, riches en chaux, avec une teneur faible à modérée en sels solubles; pour rendre ce type de sols propre à la culture, on doit fournir de l'eau pour l'irrigation et faire disparaître par lessivage les sels en excès. Une station agricole expérimentale a été établie à Iquique en 1944 et on y a commencé quelques études sur la remise en valeur des sols salins-alcalins par lessivage et irrigation. Le Directeur, Enrique Froehlich (1) fait savoir que le reboisement avec un arbre très résistant au sel, le Tamarugo, est en cours; des expériences ont été entreprises avec des arbres fruitiers, des oliviers et plusieurs légumes. Il apparaît que le facteur critique est la qualité de l'eau souterraine qui peut varier de bonne (400 p.p.m. de sels totaux et peu de Na) à impropre (plus de 2.000 p.p.m. avec un excès de Na). Il semble que les sols du centre nord du Chili reposent sur des sous-sols calcaires, et ils ont une réaction alcaline (pH 7,5 à 8,0). Il n'y a pas de sols salins dans le Sud du Chili.

#### PEROU ET EQUATEUR

Le problème du sel au Pérou et dans l'Equateur est comparable à celui qui existe dans le Nord du Chili et il est essentiellement limité aux régions côtières semi-arides où la pluviosité est inférieure à 25 centimètres. D'après James (116) il y avait un peu plus d'un million d'acres de terres cultivées dans la région côtière du Pérou en 1942. Cette terre irriguée est située dans les quelques oasis bordant les rivières qui prennent naissance sur les pentes Ouest des Andes. Ces rivières creusent souvent des lits profonds jusqu'à l'Océan, mais la plupart d'entre elles n'ont pas un cubage suffisant pour continuer à travers le désert et se jettent dans l'Océan toute l'année. C'est pourquoi les oasis sont généralement situées en arrière du rivage. Les cultures les plus importantes sont le coton, la canne à sucre et le riz. Anderson (2) dans un rapport préliminaire sur les sols de la région côtière du Pérou, souligne qu'une agriculture rentable a été sérieusement réduite, dans les parties basses de la plupart des vallées par la salinité et l'alcalinité. Il déclare que l'on rencontre des sols salins, salins-alcalins et alcalins non-salins; et qu'il est besoin d'irrigation, de lessivage et de drainage pour résoudre ce problème complexe. Dans certains cas, la mise en valeur peut nécessiter l'emploi d'amendements chimiques.

En Equateur comme au Pérou, on trouve surtout des sols salins et alcalins dans les plaines côtières, au Sud et en dessous du fleuve Esmeraldas jusqu'à Machala; mais il y a une région aride et saline dénommée Salinas et située entre deux chaînes des Andes. Un projet d'irrigation est en cours de réalisation dans la péninsule de Santa Elena, dans la région côtière de la province de Guayas où règne la sécheresse et des études préliminaires du sol ont été faites par Pena 2/ et Miller. Elles indiquent que certains des sols sont alcalins (pH supérieur à 8,0); et qu'il y a des sols salins dans le voisinage de San Pedro, et au Nord-ouest d'Ancon où on trouve des schistes jaunes.

---

1 - Communication personnelle de Enrique Froehlich L. Iquique, Chili

2 - Communication personnelle de Julio Pena, H. Quito, Equateur.

## BRÉSIL

Bien que les Etats-Unis du Brésil occupent presque la moitié du continent Sud-américain, le problème du sel n'y est pas grave. La pluie est généralement adéquate pour le lessivage du sol et les déficiences du sol ne se rencontrent que dans une petite partie du Nord-Est de l'intérieur que l'on appelle Sertao (116). Cette région borde la côte nord de Natal et est sujette à des sécheresses renouvelées. Freise (66) a établi pour cette zone une carte des "calamités" montrant les cycles de sécheresse; il insiste sur le besoin d'irrigation. Le Agro-Industrial Service à Fortaleza-Ceara a entrepris l'étude des sols que l'on rencontre dans les régions semi-arides du Nord-Est du Brésil (1). Les recherches ont été limitées aux bassins d'irrigation où le Gouvernement fédéral a construit des réservoirs pour fournir l'eau d'irrigation. Il se forme généralement des sols salins et alcalins, le sel le plus répandu étant NaCl. On a étudié environ 125.000 hectares (308.875 acres), et 25 à 30% des sols sont salins ou alcalins. On a noté trois étapes dans le processus de salinisation ou d'alcalinisation des sols qui correspondent aux sols salins, salins-alcalins, et légèrement salins-alcalins décrits par Sigmond (206). On a aussi travaillé le problème de la qualité de l'eau d'irrigation et l'on signale que quelques uns des réservoirs contiennent de l'eau saumâtre qui doit être utilisée avec précaution. En ce qui concerne la tolérance au sel, un palmier, Copernicia cerifera, qui produit de la cire, et le cotonnier sont considérés comme les végétaux cultivés les plus adéquats.

## MEXIQUE

On trouve des sols salins dans toutes les régions agricoles du Nord du Mexique, dans les Etats de Sonora et Sinaloa le long de la côte Ouest dans l'Etat de Durango, et dans d'autres régions du centre - nord du Mexique. On rencontre un problème peu ordinaire de salinité dans le bassin du Mexique où le drainage du lac Texcoco, à l'Est de Mexico City a provoqué la mise à découvert du lit desséché dont le sol est si riche en sels que toute végétation est impossible sans une mise en valeur onéreuse comportant un traitement chimique (116). Le sol est salin-alcalin, riche en sels (3% ou plus dans certains cas), avec un pH élevé. Une analyse du sol du lit du lac a révélé 5,4% de sels solubles et un pH de 9,6. Les chlorures étaient présents en petites quantités, les sulfates abondants, probablement sous forme de  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  et il y avait un peu de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ .

Dans les régions de culture du Nord, on trouve des sols salins dans le District de Mexicali au sud de l'Imperial Valley de Californie; dans l'Etat de Chihuahua, le long de Rio Grande au Sud de El Paso, Texas, le long du Rio Salado, au sud-ouest de Laredo, Texas; et le long du cours inférieur du Rio Grande, dans l'Etat de Tamaulipas. La salinité, l'alcalinité, et la faible quantité d'eau disponible pour l'irrigation et le lessivage ont créé un sérieux problème du sel dans ces régions. On a peu de faits précis sur les caractéristiques chimiques des sols de cette région.

---

1 - Communication personnelle de J.G. Duque, Chef de l'Agro-Industrial Service, Fortaleza-Ceara, Brésil.

L'analyse 1/ de deux sols de la région de Rio Casa Grandes, Etat de Chihuahua indique qu'ils sont fortement alcalins (pH 8,9) et très riches en Na, avec un pourcentage de Na échangeable de 89. La chaux est peu abondante, et le gypse absent. Cette région est une vaste plaine à crues avec de nombreuses parties dénudées et l'essentiel de la végétation est constitué par une savane à Sporobolus et Hilaria, mélangés parfois de "mosquite", Prosopis. Puertas Fabila (179) a signalé des sols alcalins dans les Etats de Nuevo Leon et de Coahuila. Vingt échantillons de sols prélevés près de Monterrey, N.L. ont donné une réaction moyenne de pH 8,12, et un échantillon provenant de Torreon Coah. avait un pH de 8,15. Un travail expérimental sur les sols salins et alcalins est en cours dans le district de Laguna, près de Torreon.

Sur la côte ouest, les bonnes terres ont été si bon marché et si abondantes en raison de l'eau disponible pour l'irrigation, que les sels ne constituent pas un problème sérieux. Mais dans les régions de Ciudad Obregon, Sonora et Culiacan, Sinaloa, beaucoup des sols sont fins avec une faible perméabilité et, à la suite d'une utilisation excessive de l'eau et du drainage insuffisant, beaucoup de sols ont vu leurs sels minéraux lessivés. Les eaux superficielles et souterraines de la côte ouest sont généralement de bonne qualité avec une faible teneur en sels, mais quelques puits sont saumâtres. Dans un puits près de Caborca, Son., Na représentait 75% du total des cations, mais le total des sels était faible (environ 200 p.p.m.) A Cartagena, Durango, l'eau d'irrigation utilisée pour les plantations de guayule contenait environ 5000 p.p.m. de sels totaux, Na constituant 55% des cations. 2/ On étudie la qualité de l'eau d'irrigation au Monterrey Institute of Technology, et Hernandez (108) a publié un rapport sur les relations du sol et de l'eau dans lequel il attire l'attention sur l'action des eaux fortement salées. Le coton semble être une des plantes les plus tolérantes aux sels, le riz est également très tolérant aux sels dans la vallée du Yaqui, Sonora; et on cultive la canne à sucre dans le district de Culiacan, Sinaloa. On cultive aussi le blé, les légumes et les fruits sous irrigation dans le Nord du Mexique. Puertas Fabila (179) recommande aussi la betterave à sucre, le sorgho, et l'orge. Robles Cutierrez (191) déclare que le sorgho, Sorghum vulgare est bien adapté à la salinité dans les régions semi-désertes du Mexique.

#### AMERIQUE DU NORD

##### CANADA 3/

Le problème du sel au Canada existe surtout dans la région des grandes plaines et dans les provinces de l'Alberta et du Saskatchewan. Wilcox (252) indique que les sols des régions intérieures semi-arides de la Colombie britannique ont tendance à avoir un taux de sel relativement élevé. Mitchell et Moss (157) ont classé les principaux profils de sols des grandes plaines du

---

1 - Par le U.S. Salinity Laboratory

2 - Communication personnelle de E.M. Long Hermosillo, Son. Mexique.

3 - Des remerciements pour l'aide apportée à la préparation de cette section sont présentés à J.D. Newton, Univ. of Alberta Edmonton Alta; J.L. Doughty, Swift Current Exp. Sta., Sask; A. Leahy, Central Exp. Farm, Ottawa  
WS/112.52



Canada et ils considèrent les sols bruns, brun-foncé (ou châtaîns) et noirs (tchernozioms) comme les types zonaux formés sous la prairie. Dans chacun de ces types, il se rencontre des solonetz, fréquemment associés avec des solonchak. Des surfaces importantes de sols type solodi-solonetz et solodi, accompagnées de parties "glacées" en surface sont associées à des formations de schistes marins ou de dépôts côtiers saumâtres qui sont à l'origine des sels solubles trouvés dans l'horizon A ou dans les horizons B inférieurs. Bowsor et Mass (28) ont proposé un système d'évaluation et de classification des sols pour l'irrigation des terres de l'Ouest du Canada qui est basé sur celui qui a été utilisé pour les relevés du Saskatchewan et de l'Alberta. La salinité est un des sept facteurs qu'ils utilisent dans leur système d'évaluation; et ils soulignent que, bien qu'ils soit difficile de prévoir l'importance et l'étendue des dommages qui peuvent résulter de l'application d'eau d'irrigation la quantité de sel existant dans le sol et l'uniformité ou le manque d'uniformité de la roche-mère en sont des facteurs importants. En général, ils classent comme impropres à l'irrigation les sols qui contiennent plus de 1% de sels solubles dans l'eau (ce qui exclut  $\text{SO}_4, \text{Ca}$ ) dans les deux premiers pieds, et comme dangereux ceux qui dans la même épaisseur, ont un pH supérieur à 8.8.

Mitchell (156) a décrit les caractéristiques chimiques des sols du Saskatchewan, et dit que l'on trouve fréquemment des sols salins et des couches du sous-sol salinisées. Les sels solubles sont communément des sulfates de Ca, Mg, Na; les chlorures sont relativement rares; et  $\text{CO}_3, \text{Na}_2$  se rencontre peu fréquemment. On a cartographié environ 360.000 hectares<sup>3</sup> comme zones à sols alcalins, la plus grande partie de cette surface se trouvant dans les zones plus arides à sols bruns et bruns noirs de la partie sud ouest de la Province. Dans la partie est, la principale zone de sols salins se trouve dans la zone plus humide des sols noirs.

Il y a eu plusieurs publications importantes sur la tolérance aux sels relative des plantes cultivées sous irrigation au Saskatchewan. Mc Kenzie et Bolton (143) ont étudié toute une série de plantes y compris des graminées et les luzernes; ils ont conclu que les plantes fourragères vivaces étaient les mieux adaptées aux sols salins lourds. Marshall (149) et Doughty et Stalwick (50) ont étudié la tolérance des céréales et de la luzerne. L'orge est indiquée pour les sols salins de l'Ouest du Canada, et la luzerne est plus tolérante que l'avoine ou le blé. Des expériences réalisées en serre au Swift Current Soil Research Laboratory indiquent que des concentrations de sels solubles à l'eau inférieure à 0,4% n'ont provoqué qu'une légère réduction dans la production de 5 récoltes successives de luzerne. (49)

Les eaux d'irrigation utilisées dans cette région proviennent surtout du ruissellement à la fonte des neiges. Elles contiennent peu de sels totaux (500 à 800 p.p.m.), il y a une certaine quantité de bicarbonates, peu ou pas de carbonates et la concentration de Cl dépasse rarement quelques p.p.m. (1) Ayers (15), à la Swift Current Station, a étudié la perméabilité du sol en tant que facteur de la migration des sels dans les terres irriguées; il a trouvé que la remontée du plan d'eau peut résulter de fuites excessives des canaux d'amenée, de la diminution de la perméabilité dans la direction de l'écoulement

---

(1) Communication personnelle de J.L. Doughty, Swift Current Exp. Sta. Sask.

de la topographie ou de la combinaison de ces facteurs. Dans des cas semblables l'augmentation de la concentration en sels était liée à la diminution de la perméabilité du sel.

Les sels salins et alcalins de l'Alberta ont été étudiés par Wyatt et ses collaborateurs (256), Mac Gregor et Wyatt (141) et Odynsky (165). Odynsky expose que les solonetz sont fréquents et que les zones dans lesquelles 20% au moins des sols sont des solonetz représentent au total environ 2.800.000 hectares dans cette partie de l'Alberta qui se trouve au Sud et à l'Est d'Edmonton et à l'est du 5ème méridien. Ils s'étendent davantage dans les zones où la couche géologique est constituée de schistes marins saumâtres et de grès. Il considère que les sols solonetz sont inférieurs pour la culture et déclare que le succès de l'irrigation semble dépendre pour beaucoup de la nature et de la profondeur de la formation qui se trouve sous l'horizon B.

Wyatt et ses collaborateurs (256) ont fait le relevé de la région Blackfoot-Calgary et indiquent qu'en général les sols ont une teneur en sels relativement forte. En sol sec il n'y a pas de problème mais sous l'effet de l'irrigation les sels tendent à migrer et la concentration des eaux d'infiltration chargées de sels rend improductives quelques unes des parties basses. L'excès d'irrigation et la submersion aggravent le problème surtout si le drainage est insuffisant. L'approvisionnement en eau est satisfaisant et généralement de bonne qualité dans cette région, mais de temps en temps on creuse des puits qui contiennent une eau chargée de sels. Marshall et Palmer (150) ont étudié les effets de 20 ans d'irrigation sur la nature et la situation des sels solubles dans les sols de l'Alberta. Les résultats recueillis de 1917 à 1937 montrent que la plus forte concentration de sels se produit au dessous d'une profondeur de 60 centimètres et qu'il y a eu une diminution générale de la quantité de sels en même temps qu'un mouvement lent vers le bas. Bien que l'élimination des sels fut lente durant cette période, la situation était favorable en égard au type de sels, car Ca restait le cation prédominant.

Mc Gregor et Wyatt (141) ont étudié les propriétés des sels solonisés des zones de sels bruns et noirs de l'Alberta, en ce qui concerne l'échange des bases et concluent que "les sols de l'Alberta que l'on appelle solonetz ne font pas partie des véritables sols alcalins, car ils sont alcalinisés à un bien moindre degré". Le Ca était l'ion dominant dans le complexe d'échange Mg était nettement moins abondant, et la quantité de Na était inférieure à celle de Ca ou de Mg échangeable. Atkinson et ses collaborateurs (4) ont étudié des sols fortement alcalins dans les plaines du fleuve salé, au sud ouest de Fort-Smith, près de la frontière Nord de l'Alberta, dans lesquels la teneur en sels solubles variait de faible à forte et la réaction du sol de pH 8,5 à pH 9,6. Ils déterminèrent que la proportion de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  par rapport aux autres sels solubles présents, était, plutôt que la quantité même de  $\text{CO}_3\text{Na}_2$ , le facteur important pour déterminer la valeur du pH du sel.

Palmer (195) a rendu compte de la toxicité des sels alcalins dans certains sols irrigués de l'Alberta. En présence de sulfates ou de carbonates, l'ordre de tolérance était: (Lolium sp.) (Bromus sp.) (Poa pratensis) (Festuca sp.) et (Trifolium sp.). L'orge était un peu plus tolérante que le blé après germination et le lin était très sensible aux alcalis.  $\text{CO}_3\text{Na}_2$  et NaCl étaient plus toxiques que  $\text{SO}_4\text{Na}_2$  ou  $\text{SO}_4\text{Mg}$  et  $\text{SO}_4\text{Ca}$  n'était pas toxique, même aux concentrations maxima. D'après Newton (1) les eaux utilisées pour l'irrigation sont généralement bonnes. Il cite les analyses de 4 eaux d'irrigation typiques

provenant de grandes rivières de l'Alberta qui contenaient environ 200 p.p.m de sels totaux.

## ETATS UNIS D'AMERIQUE

Les problèmes concernant les sols salins et alcalins sont de première importance dans l'Ouest des Etats Unis. La topographie, la composition des minéraux constituant le sol, le climat aride ou semi aride et l'extension rapide de l'irrigation, tout cela a contribué à rendre critique le problème du sel. Au cours des 60 dernières années, ont paru de nombreuses publications consacrées à cette question (34, 36, 59, 62, 63, 68, 78, 85, 96, 102, 110, 124, 125, 146, 187, 200, 227, 230)

Il y a plus de 8 millions d'hectares de terres irriguées dans les 17 Etats de l'Ouest et en outre 12 millions d'hectares sont classés comme irrigables. Bien que dans les régions où l'on pratique la culture irriguée certains des sols ne soient pas salins et qu'il y ait peu de risques d'avoir des dégâts causés par le sel, l'accumulation de sel est un danger permanent pour la production agricole sur une grande partie de la surface irriguée (96, 146). Les zones dangereuses sont disséminées dans tout l'ouest mais le problème est d'actualité dans les vallées intérieures de Californie (San Joaquin, Sacramento, Coachella, Imperial); le grand bassin comprenant une grande partie de l'Utah et du Nevada; le bassin hydrographique du Colorado comprenant les parties du Wyoming, de l'Utah, du Colorado, de l'Arizona et de la Californie; le bassin hydrographique du Rio Grande comprenant des parties du New Mexico et du Texas; des parties du bassin de la Columbia River dans le Washington et l'Idaho; et des parties étendues du bassin du Missouri dans la région des grandes plaines à l'Est des Rocheuses (85). Le U.S. Salinity Laboratory et la Division of Soil Survey ont publié des manuels qui décrivent les caractéristiques des sols salins et alcalins que l'on rencontre dans ces régions; et beaucoup d'entre eux sont décrits dans les publications énumérées au paragraphe précédent et dans les bulletins de la Division of Soil Survey dont ils donnent la liste dans leurs manuels (210, 230).

Les travaux effectués aux Etats Unis sur la qualité de l'eau, la tolérance aux sels, l'action des sols salins et alcalins sur la croissance des plantes, ont été examinés dans les précédentes sections de ce rapport, mais on doit mentionner les études concernant l'amélioration et la mise en valeur de ces sols.

Reeve et ses collaborateurs (186) ont procédé à l'étude du lessivage dans les sols salins-alcalins de la région du Delta (Utah) qui ne contenaient pas moins de 2% de sels dans les 30 premiers centimètres (en % du poids sec) et des quantités appréciables de Na échangeable. On a utilisé trois traitements de lessivage consistant dans l'application de 1, 2 et 4 pieds d'eau. Après ce traitement, on a semé du blé Wasatch et la production a augmenté en raison directe des quantités d'eau appliquées aux taux moyens de 4, 7, 8, 8 et 10, 2 boisseaux par pied (1) et par acre d'eau appliquée pour les trois degrés de lessivage. Ces sols contenaient du gypse en quantités variant de 2 à 23 tonnes par acre et par pied et le lessivage réduisit de façon appréciable le pourcentage de Na échangeable. Heald et ses collaborateurs (103) ont étudié l'action du lessivage et de l'irrigation avant levée des semis, dans les sols salins, sur la production des betteraves à sucre et ils ont obtenu des résultats favorables tant sur la germination que sur la croissance ultérieure. La densité était augmentée de 25 betteraves

I - Aux Etats Unis, on mesure les récoltes de céréales en unités de volume et non en unités de poids. L'unité est le boisseau qui équivaut à 35 litres (NDT)  
WS/112.52

par 100 pieds de rangée à 80 betteraves avec trois irrigations avant levée des semis et, à cet accroissement de densité a correspondu un accroissement de production allant de 4 à 20 tonnes par acre. Le lessivage d'hiver effectué en inondant avec 12 à 24 inches d'eau a augmenté la production de 4 à 25 et 32 tonnes par acre respectivement. Larson (130) a rendu compte de bons résultats obtenus aussi avec des irrigations abondantes (4 à 6,7 pieds d'eau) dans les terres salées de la Yakima valley, Washington, avec un rendement moyen de 24,2 tonnes de betteraves à sucre par acre.

La mise en valeur de sols alcalins par des amendements a fait l'objet de publications, de Bower et ses collaborateurs montrent que les principes d'amélioration des sols alcalins comprennent: (1) la création d'un système de drainage si l'on a une nappe phréatique voisine du sol, (2) le remplacement de Na absorbé par Ca dans le complexe d'échange du sol, (3) l'évacuation des sels en excès par lessivage et (4) le regroupement et l'agglomération des particules du sol pour améliorer sa structure. Gardner (68) a insisté sur ce dernier principe. Les traitements comprenaient l'application de chaux, de soufre, de gypse et de fumier, à divers taux et en différentes combinaisons. Tous les traitements, sauf celui à la chaux ont augmenté le taux d'infiltration du sol de façon significative. Le remplacement de Na échangeable le plus notable se produisit dans les sols traités au soufre, au soufre additionné de fumier, au gypse et au fumier additionné de gypse. La richesse en sels minéraux de toutes les parcelles a diminué avec la chaux ce qui indique un certain degré de lessivage. Les parcelles furent ensemencées avec un mélange graminées - légumineuses et irriguées par aspersion. On a obtenu une tonne de plus par acre et par an avec le traitement au fumier et au fumier additionné de chaux et 1/2 tonne de plus avec le fumier additionné de gypse. On n'a pas obtenu d'augmentation nette avec la chaux additionnée de gypse et le soufre a abaissé la production pendant les deux premières saisons de végétation.

Mc George (140) a étudié le soufre comme correctif et reconstituant du sol; il recommande son utilisation pour les sols alcalino-calcaires. Il l'a trouvé très efficace pour contrôler et mettre en valeur des sols alcalins dans l'Arizona et il recommande des applications de 125 à 2500 kilos par hectare selon la situation du Na, la composition physique et la structure du sol. Powers (175) cite des mises en valeur réussies de sols alcalins dans l'Oregon par applications de soufre (600 à 1800 kilos par hectare) et il a noté qu'il faut moins de soufre quand on l'utilise en combinaison avec du fumier de ferme. Snyder et ses collaborateurs (209) ont fait des recherches pendant une période de 7 ans, sur la mise en valeur des sols alcalins dans l'Idaho en utilisant le lessivage et divers traitements chimiques. Ils ont remarqué que la submersion fréquente par ruissellement superficiel donnait des résultats très bons sur les types médiocres de sols alcalins, mais ils ont insisté sur le fait que le drainage du sol était le facteur limitatif d'une mise en valeur rentable. Les traitements chimiques au gypse, au soufre et à l'acide sulfurique produisaient des améliorations notables du sol, mais en général, le prix de revient était excessif sauf lorsque la surface à traiter était petite.

Enfin, il convient de mentionner le concept de bilan des sels dans une zone irriguée, qui a été développée par Scofield (199). Il a étudié deux régions irriguées par le Rio Grande et une par le Colorado près de Yuma, Arizona. Il qualifie de bilan des sels d'une zone irriguée la relation entre la quantité de sels dissous qui lui sont fournis dans l'eau d'irrigation et la quantité de sels retirés par les eaux de drainage. Le bilan des sels est favorable quand la sortie de sels égale ou dépasse les rentrées, mais est défavorable quand les rentrées dépassent les sorties. Il a donné des méthodes

WS/112.52

pour déterminer et calculer les quantités de sels qui entrent dans la zone irriguée ou qui en sortent et des chiffres se rapportant au bilan des zones étudiées pour un certain nombre d'années. Il a fait des expériences de laboratoire avec de l'eau d'irrigation ayant une concentration donnée de sels dissous pour déterminer: (1) quelle proportion de l'apport d'eau doit être attribuée au lessivage de la zone des racines pour éviter l'accumulation de sels solubles dans cette partie du sol, et (2) quelle proportion des sels dissous dans l'eau d'irrigation est retirée de la solution par la plante cultivée ou par le sol. Scofiel déclare que "ces faits qui proviennent soit d'observations sur le terrain, soit d'expériences contrôlées, peuvent permettre de mieux comprendre les relations des facteurs qui concernent, dans une zone irriguée, les sels dissous ou solubles et le problème d'un drainage satisfaisant"

Liste des abréviations utilisées dans les citations des références

Agr.	Agriculture, agricole	Exptl.	Expérimental
Ann.	Annales	Hour.	Journal
Austr.	Australie, australien	Proc.	Travaux
Bot.	Botanique	Publ.	Publication
Bul.	Bulletin	Res.	Recherche
Circ.	Circulaire	Sci.	Science, scientifique
Dept.	Département	Tech.	Technique
Expt.	Expérience	Trans.	Procès verbaux

titres abrégés des journaux

abréviation            journal            pays d'édition