

UTILISATION DES EAUX SALINES POUR L'IRRIGATION

J.-H. DURAND

Pédologue

Docteur ingénieur

Maître de Recherches

Institut national de la Recherche agronomique
CRA du Sud-Ouest - Domaine de la Grande Ferrade
33 - Pont-de-la-Maye

INTRODUCTION

La nécessité d'irriguer les cultures dans certaines conditions climatiques et la diminution des eaux disponibles pour l'irrigation rendent impérative l'utilisation d'eaux aussi salines que possible.

Le but de l'irrigation est de créer, pour la plante, un milieu adapté à son écologie par des apports d'eau aux moments où elle en a besoin. Ces apports massifs, destinés à augmenter la capacité de production du sol, vont profondément modifier le milieu et l'évolution du sol par l'augmentation de l'humidité et des apports de sels (AUBERT, 1963). Ces changements pourront, s'ils sont provoqués inconsidérément, ruiner le sol par son engorgement ou par sa salinisation.

L'étude des eaux d'irrigation apparaît donc sous forme d'un triptyque sol-eau-plante. La combinaison

sol-eau produit un milieu auquel la plante cultivée devra être adaptée.

L'homme n'étant maître ni de la salinité de l'eau disponible ni de la constitution du sol qu'il est possible d'irriguer, il lui faudra prévoir le milieu dans lequel les plantes devront vivre afin d'y adapter les cultures ou, à la limite, réduire l'importance du projet élaboré ou même y renoncer.

Deux problèmes se posent donc :

1. Evolution réciproque de l'eau et du sol.
2. Milieu dans lequel la plante va vivre.

Leur résolution devra permettre de répondre à la question : disposant d'une eau de salinité déterminée, comment choisir les terrains qui seront irrigués et les plantes qui y seront cultivées ?

Ce rapport comportera donc cinq parties :

1. Expression des résultats des analyses d'eau et de sol.
2. Tolérance des plantes aux sels.
3. Evolution de la salinité du sol et de ses solutions sous l'action de l'eau saline.

4. Evolution du complexe absorbant sous l'influence de l'eau d'irrigation.

5. Qualité des eaux d'irrigation et choix des sols irrigables.

Il ne traitera pas du besoins en eau des plantes malgré l'importance de cette question, mais il indiquera, sommairement, comment pallier les inconvénients d'une trop forte salinité des eaux.

I. - EXPRESSION DES RÉSULTATS DES ANALYSES D'EAU ET DE SOL

Depuis la parution de l'ouvrage de RICHARDS (1963), l'expression de la salinité des eaux et des terres est exprimée en conductibilité électrique spécifique à 25°C ou, pour employer un anglicisme, en conductivité électrique à 25°C, notée CE 25°C.

En effet les solutions d'électrolyte étant conductrices de l'électricité, il était tentant d'essayer de relier la concentration de ces solutions à leur conductibilité, c'est ce qui a été fait en mesurant cette valeur à 25°C, température à laquelle, pour les concentrations habituelles des eaux d'irrigation, la relation liant cette conductibilité à la concentration est simple :

$$CE\ 25^{\circ}C = 100\ m.é.$$

CE 25°C étant exprimé en micromhos et m.é représentant le nombre de millivalences par litre, positives ou négatives, de la solution. Lorsque la concentration de la solution augmente, cette relation devient de plus en plus fautive, les transports d'électricité se faisant par les ions dont le nombre relatif, fonction de la nature du sel dissous, diminue avec la concentration (TREADWELL, 1932). Le but recherché en faisant

cette mesure est d'avoir une idée de la salinité de la solution étudiée ; malgré ses défauts, cette méthode répond parfaitement au but fixé en raison de sa fidélité et de sa rapidité d'exécution. Les pages qui suivent lui apporteront d'autres justifications.

Cette mesure est faite directement sur l'eau d'irrigation. Pour les échantillons de sol, il faut d'abord dissoudre les sels qu'ils contiennent dans l'eau distillée. Certains laboratoires préconisent l'extrait saturé (RICHARDS, 1953) pour lequel l'échantillon amené à saturation par des additions successives d'eau distillée est placé sur un büchner et soumis au vide ; la faible quantité d'eau qui est alors recueillie est l'extrait saturé sur lequel se mesure la CE 25°C. D'autres laboratoires préfèrent opérer avec des solutions plus diluées : extrait au 1/5 ou 1/10, plus faciles à obtenir et à manipuler mais dont les résultats doivent être rendus comparables à ceux de l'extrait saturé. Cette correspondance est facile à réaliser si la capacité du sol pour l'eau est connue, elle exige alors un calcul par échantillon. En gardant présent à l'esprit qu'il s'agit de reconnaître si un sol est ou non salin, un

TABLEAU 1

Echelle de salinité des sols

Degré de salinité	Non salin	Légèrement salin	Salin	Très salin	Extrêmement salin
m.é. % g		2,5	5	10	20
CE 25°C (*) :					
— extrait 1/10	250	500	1 000	2 000	
— extrait 1/5	500	1 000	2 000	4 000	
— extrait saturé (Riverside) ..	2 000	4 000	8 000	16 000	

(*) en micromhos.

coefficient de correspondance a pu être calculé expérimentalement pour l'extrait 1/10 (PLEVEN, 1956) : la valeur de l'extrait saturé est en moyenne 7 fois plus élevée que celle de l'extrait 1/10. Le tableau suivant donne l'échelle de salinité des sols, calculée d'après ces différents extraits.

Bilan ionique

Le bilan ionique des eaux d'irrigation et des solutions salines est intéressant à connaître pour déterminer l'origine de la salure. Dans ce cas, il faut doser Ca, Mg, Na, K, Cl, SO_4 , CO_3 et CO_3H . Pour classer les eaux et les sols, Ca, Mg, Na et K sont en général suffisants. Les résultats s'expriment alors en m.é. par litre pour les eaux, ou par 100 g pour les sols.

pH

Il mesure l'acidité et s'exprime en unités pH ; seul le premier chiffre après la virgule a une valeur dont il peut être tenu compte.

Bore

Son absence peut provoquer des carences et son abondance des accidents. Il n'est dosé que rarement mais il est bon de le faire.

Complexe absorbant

Son analyse doit être faite sur les sols à des fins

de contrôle de l'irrigation, pour éviter l'alcalinisation et, au besoin, la corriger. Ses résultats s'expriment de manière classique.

Matières organiques

Bien qu'elles soient rarement dosées dans l'eau d'irrigation, elles peuvent avoir une importance pour l'évolution des sels qu'elle contient et en particulier des sulfates — s'expriment en mg d'oxygène.

De ces considérations, il faut retenir que, malgré ses inconvénients, l'expression de la salinité d'une eau en conductibilité électrique est une méthode pratique dont les résultats sont faciles à interpréter car :

- elle peut être étalonnée pour une région et permet de suivre l'évolution des eaux de cette région avec une meilleure approximation que par d'autres dosages et une plus grande facilité d'exécution ; elle permet aussi de comparer des eaux différentes mais d'origines voisines ;
- la conductibilité électrique des solutions est reliée à leur pression osmotique par une relation simple et, in fine, c'est la valeur de cette pression osmotique qui est la plus intéressante à connaître ;
- enfin, la pratique a montré que les résultats qu'elle donne sont suffisants pour les buts poursuivis en irrigation.

II. - TOLÉRANCE DES PLANTES AUX SELS

L'eau apporte toujours au sol une certaine quantité de sels dont la culture irriguée doit s'accommoder. C'est ce qui rend nécessaire l'étude rapide de la nutrition des plantes et de leur résistance aux sels.

21. - Notions sur la nutrition de la plante

21.1 Nutrition minérale

Bien qu'elle soit importante pour l'agriculture, la nutrition minérale de la plante n'intéresse pas essentiellement l'irrigation. Il suffit de savoir que :

- l'absorption de l'eau s'effectue de façon indépendante de celle des sels qu'elle renferme ;
- l'absorption des sels n'est pas un simple phénomène de diffusion ;
- elle se fait sous forme ionique ;

- elle est élective ;
- enfin, elle peut fort bien se faire directement sans que les substances aient à passer par l'état de solution (JENNY et OVERSTREET, 1939).

Néanmoins et ceci est important à savoir, si les éléments dissous ne pénètrent pas dans la plante avec la concentration qu'ils ont dans les solutions du sol, cette concentration joue un grand rôle sur l'alimentation du végétal.

21.2 Importance de l'eau pour les plantes

Cette importance se manifeste aussi bien dans la comparaison de la production des années successives que dans la distribution écologique des végétaux sur le globe.

Le suc végétal est toujours riche en eau et la fonction chlorophyllienne ne peut s'exercer qu'en sa

présence ; les premiers produits de la photosynthèse peuvent être considérés comme le résultat de la condensation de gaz carbonique et d'eau.

L'eau provoque la turgescence des cellules qui caractérise leur vitalité et permet aux phénomènes d'osmose de se produire, constituant ainsi une régulation de la nutrition minérale aux dépens des sels dissous par l'eau.

Elle joue aussi un rôle de régulateur thermique des tissus et, sous le climat de la France, 1 kg d'eau produit 3 g de matières sèches dans lesquelles restent fixés 1,5 g d'eau. La différence traverse la plante et s'évapore par les stomates.

Enfin, l'eau du sol agit directement sur la nutrition par les dissolutions qu'elle provoque et son action sur l'activité des microbes nitrificateurs.

21.3 Absorption de l'eau

La plante peut absorber de l'eau de deux façons :

a) par les organes aériens, elle est alors absorbée par les feuilles, mais cette quantité reste toujours faible ;

b) par les racines qui fournissent la quasi totalité de l'eau nécessaire. Cette absorption d'eau est un phénomène d'osmose et c'est cela qui est extrêmement important pour l'agriculture irriguée et l'utilisation des eaux d'irrigation.

La pression osmotique représente pour la plante un mécanisme lui permettant de s'adapter aux conditions d'humidité : elle croît dans les feuilles et les racines quand l'humidité du sol diminue.

Dans une solution saline, si l'élasticité des parois cellulaires était infinie, la plante absorberait de l'eau jusqu'au moment où la pression osmotique du suc cellulaire et celle de la solution saline seraient égales ; dans l'eau pure, cette absorption ne s'arrêterait pas. En réalité, il existe une contre-pression exercée par la paroi de la cellule du fait de sa turgescence. Lorsque l'absorption de l'eau augmente, le volume cellulaire augmente en même temps que la pression osmotique du suc cellulaire diminue ; lorsque pression et contre-pression sont égales, l'absorption cesse. Les sels, qui modifient l'élasticité de la paroi cellulaire, modifient de ce fait la valeur de sa contre-pression et la capacité d'absorption de l'eau ; les sels de calcium, par exemple, la diminuent.

Dans le sol, le phénomène est plus complexe : l'eau y est retenue avec une énergie variable qui agit vis-à-vis de la plante comme une force antagoniste qui dépend de la teneur en colloïdes du sol, c'est une fonction décroissante de la proportion d'eau. L'eau utilisable

d'un sol est celle qui est retenue par une force inférieure à la succion de la plante. D'une manière générale, quand le taux d'humidité du sol s'abaisse, l'eau est retenue plus énergiquement et, par conséquent, est moins facilement utilisable par la plante.

La quantité d'eau qu'un sol est susceptible de fournir à la végétation est égale à la différence entre la quantité retenue par le sol (sa capacité de rétention après une irrigation, correspondant à $pF = 3$) et celle qui correspond au point de flétrissement ($pF = 4,2$) (VEIHMEYER et HENDRICKSON, 1931). Cette réserve est maximum pour la classe texturale des limons.

Pour que l'approvisionnement en eau soit satisfaisant, il faut que sa mobilité soit suffisante. Le flétrissement peut en effet s'observer pour une quantité d'eau relativement élevée mais de faible mobilité. Au niveau des racines, il y a un maximum de dessiccation et il peut arriver que la circulation soit trop lente pour compenser l'absorption par la plante qui se fane.

Trois données essentielles se font jour :

- l'absorption d'eau se fait par osmose ;
- l'eau du sol doit être suffisamment mobile pour assurer l'alimentation de la plante ;
- la teneur en eau du sol la plus favorable aux récoltes est peu différente de sa limite de drainage.

Si l'absorption de l'eau se fait par osmose, un phénomène physique vient compliquer ce mécanisme en présence de colloïdes (PASCAL, 1952) : dans l'osmose, si des ions diffusibles sont en présence de chaque côté d'une membrane, l'équilibre s'établit lorsque les pressions osmotiques sont égales des deux côtés. La présence d'ions non diffusibles d'un côté d'une membrane qui les bloque rend nécessaire l'introduction d'un terme correctif pour connaître la distribution des ions diffusibles de chaque côté. Ce phénomène de blocage des ions est connu sous le nom de phénomène de Donnan. Il faut tenir compte de ce phénomène dans l'absorption d'eau et de sels par les plantes, les cellules contenant toutes des sels non diffusibles. Il joue ainsi un grand rôle dans la nutrition minérale.

22. - Résistance des plantes aux sels et à la sécheresse

La résistance des plantes aux sels et leur résistance à la sécheresse sont deux notions qui doivent être nettement séparées l'une de l'autre, mais qu'il est difficile de définir indépendamment.

Pour bien comprendre la différence entre les deux notions, il faut imaginer une plante se nourrissant aux dépens d'une solution saline, aérée mais non renouvelée, où aucune toxicité ne peut se développer et ne subissant pas d'évaporation. La plante prendra ses aliments dans la solution qui se concentre progressivement. A un moment donné, la plante aura une pression osmotique équivalente à celle de la solution et ne pourra plus y puiser d'eau. La concentration de cette solution exprimera la **tolérance de la plante aux sels**. Pendant un certain temps, la plante continuera à vivre dans un milieu physiologiquement sec, puis elle se fanera et se desséchera. Le temps qui s'écoule entre le moment où la plante ne prend plus d'eau et celui où elle se fane définitivement est sa résistance à la sécheresse. Cette résistance dépend non seulement de la plante, mais aussi de la sécheresse et de la température de l'atmosphère, ce n'est pas un caractère spécifique de la plante. Il est bien connu, en Afrique du Nord, que l'action desséchante du sirocco peut être combattue par des irrigations plus fréquentes et plus abondantes.

Les plantes absorbant l'eau pas osmose, cette absorption est conditionnée par la différence de la pression osmotique de leur sève et de la solution du sol. Or, la pression osmotique d'une solution est reliée à sa conductibilité électrique par des formules simples :
 $p. os = 0,00036 \times CE \ 25^{\circ} C \times 16^{\circ}$ (THORNE et THORNE, 1951)

ou $p.os = 0,321 \times CE \ 25^{\circ} C \times 10^{\circ}$ (CAMPBELL et al., 1948)

qui toutes deux donnent des résultats comparables avec $p. os$ en atmosphère et $CE \ 25^{\circ} C$ en $m.mhos/cm^2$ à $25^{\circ} C$. Il paraît donc logique d'exprimer la tolérance des plantes aux sels par la conductibilité électrique des solutions du sol, facile à mesurer. Cette conductibilité électrique varie avec l'humidité du sol, mais comme l'optimum d'humidité pour les récoltes est voisin de la limite de drainage ou de la capacité de rétention du sol, c'est ce point qui semble le plus susceptible de donner des résultats comparables entre eux. La méthode de l'extrait saturé (RICHARDS, 1954) qui mesure la salinité des solutions du sol à sa limite de drainage est donc justifiée et donne des chiffres comparables entre eux, ce qui est souhaitable (GRILLOT, 1953).

L'étude de la salinité des eaux de drainage des parcelles cultivées en irrigation permet, dans une certaine mesure, d'arriver à connaître la résistance des plantes aux sels. A la suite d'une étude menée dans le courant de l'été 1955 dans divers périmètres irrigables d'Algérie, un certain nombre de données a été recueilli sur la concentration de l'eau des drains de diverses cultures. Ces drains n'excèdent pas 1 m de profondeur, il est possible d'admettre que l'eau qui s'y écoule représente la solution du sol dans

laquelle les plantes puisent leur eau. La concentration de la solution en fin d'écoulement représente donc une concentration admissible par les plantes de la parcelle drainée. Il est donc logique d'admettre que cette concentration est tolérée par les plantes et peut servir de mesure de leur tolérance aux sels aussi bien que celle de l'extrait saturé des sols. Si cette hypothèse est valable pour les arbres et les plantes à enracinement profond, il n'en est pas de même pour les plantes à enracinement superficiel. Pour ces plantes, une enquête menée dans l'oued R'hir a permis d'obtenir un certain nombre de résultats de cet ordre. En effet, dans cette région, les eaux d'irrigation sont toutes très salines et la culture de certaines plantes est possible dans certains oasis et non dans d'autres où les eaux d'irrigation sont plus chargées. La conductibilité des eaux d'irrigation des oasis où la culture de ces plantes est possible donne une idée de leur tolérance aux sels.

La notion de tolérance des plantes aux sels présente quelques variantes s'il s'agit de récolter des fruits ou des feuilles. En effet, pour les fruits, il faut qu'ils soient appétissants alors qu'il suffit que les feuilles soient utilisables. Les tomates cultivées en milieu salin présentent, à partir de 150 m.é. de chlore, des symptômes de la pourriture du pistil (blossom end rot) due à la difficulté qu'éprouve la plante pour absorber l'eau dans un milieu salin trop concentré (EATON, 1942). Dans ce cas, une partie de l'eau des fruits est aspirée par les feuilles, d'où pourriture du tissu pistillaire désorganisé. Les fruits sont inconsommables, bien que la plante puisse encore végéter.

La tolérance des plantes aux sels présente trois aspects suivant la manifestation considérée (NOVIKOFF, 1946) :

a) Germination des graines

NOVIKOFF a étudié ce phénomène in vitro. Il a fait germer des plantes potagères dans des solutions de plus en plus concentrées de chlorure de sodium, de chlorure de calcium et de chlorure de magnésium. L'étude de ces résultats, exprimés en m.é./l, montre que:

- au début, les résultats obtenus avec ces trois sels sont toujours très voisins les uns des autres, confirmant l'absorption de l'eau par osmose, puis des phénomènes de durcissement des téguments interviennent et freinent l'absorption, surtout pour les solutions de chlorure de calcium ;
- les graines les plus sensibles donnent des résultats très voisins jusqu'à la concentration où elles ne germent plus, ce sont les graines dont le pourcentage de germination dépasse 50 % jusqu'à 5 atmosphères ;

TABLEAU N° 2
TOLERANCE DES PLANTES AUX SELS

<p>I. — Arbres fruitiers et d'ornement. Palmier dattier théorique 60 000 ² observée 31 000 (EL ARFIANE) ³ Olivier 10 350 (St-Denis-DU-SIG) Tamarix 9 000 (TOUGGOURT) Eucalyptus 8 800 (EL ARFIANE) Abricotier 7 000 (DJAMA-RANOU) Grenadier 7 000 Oranger 6 500 (RELIZANE) Figuier 5 000 (AYATA) Pommier nain 5 000 (MRAIER) Pêcher 5 000 — Vigne (muscat) 5 000 — Pomelo 3 500 (5)</p>	<p>Topinambourg 13 à 14 500 (Nov.) Aubergine 10 à 11 500 (Nov.) Choux-fleur 10 à 11 500 (Nov.) Pomme de terre Tomate Tournesol Dolique 7 500 (Nov.) Haricot de lima Melon Patates douces 3 500 (5) Pois Soja Fenouil 4 500 (MRAIER) Carthame 8 à 12 000 (5) Persil arabe — Concombre 4 000 (Riv.) Fraisier 4 000 (Nov.) Haricot < 2 000 (5) Broccoli 4 à 6 000 (5)</p>	<p>V. — Culture florale. Laurier rose 8 900 (TOUGGOURT) Capucine 8 800 (EL ARFIANE) Belle de nuit Pin d'amour Geranium Capucine Chrysanthème Narcisse Asparagus divers Giroflée Soucis Mesembrythemum Dahlia 6 800 (DJAMA-RANOU) Zinia Oeillet Rosier 2 000 (5)</p>	<p>Avena sp. (fourrage) Dactylis glomerata Bouteloua gravilis Frestuca olatior Phragmitas communis Lotus major Bromos inermis Arrhenatherum elatius Astragalus cicer Melilotus indica Astragalus falcatus 4 000 Trifolium repens Alopecurus pratensis Trifolium hybridum Trifolium pratense Trifolium repens ladino Sanguisorbo minor 2 000</p>
<p>II. — Légumes. Choux 8 800 (EL ARFIANE) 12 000 (Riv.) Piment de cayenne 10 à 11 500 (Nov.) Radis rose et noir 13 à 14 500 (Nov.) Carotte 2 500 (5) 10 à 11 500 (Nov.) Navet 10 à 11 500 (Nov.) Oignon 13 à 14 500 (Nov.) Fève 7 500 (Nov.) Artichaut 11 000 (Nov.) Ail 3 500 (5) Tetragone 11 à 12 000 (Riv.-Nov.) Asperge 11 à 12 000 (Riv.) Betterave rouge 12 000 (Riv.) 13 à 14 500 (Nov.) Blette 10 à 11 500 (Nov.) Chicorée 10 à 11 500 (Nov.) Scarolle Laitue 2 à 3 000 (5) Romaine Rave Courge Roquette Céleri Ciboule Menthe Pastèque 13 à 14 500 (Nov.)</p>	<p>III. — Céréales. Seigle 10 000 (Riv.) Orge 8 800 (EL ARFIANE) Blé 4 500 (MRAIER) 10 000 (Riv.) Avoine 10 000 (Riv.) Riz 4 000 (HAMADENA) 9 000 (Riv.) Sorgho 12 000 (5) 8 000 (Riv.) Maïs 5 à 6 000 (5) 8 000 (Riv.) Maïs sucré 2 500 à 4 000 (5) 7 000 (Riv.)</p>	<p>VI. — Fourrages. Sporobolus airoides 18 000 Distichlis sp. Puccinellia muttalliana Cynodon dactylon Chloris gayana Bromus catharticus Elymus canadensis Agropyron smithii Lotus corniculatus Hedysarum cororarium (LAC FETZARA) Trifolium resupinatum (LAC FETZARA) Trifolium squarosum (LAC FETZARA) 12 000 Melilotus alba Melilotus officinalis Lolium perenne Bromus carinatus Hordeum vulgare (5) Trifolium fragiferum Paspalum dilatatum Sorghum vulgare Melilotus alba annua Luzerna commune Frestuca arundonacea Secale sp. (fourrage) Triticum sp.</p>	
<p>IV. — Cultures industrielles. Coton 13 200 (HAMADENA) 14 000 (Riv.) Colza (5) 14 000 (Riv.) Betterave à sucre 10 à 12 000 14 000 (Riv.) Sisal 8 800 (EL ARFIANE) Tournesol 6 500 (Riv.) Ricin 6 000 (Riv.) Tabac 4 500 (EL OUED) Henné 4 500 (MRAIER) Ramie 4 500 (Nov.) Canne à sucre 3 à 5 000 (5) Lin 3 à 4 500 (5)</p>			

(1) Cette tolérance, exprimée en cté à 25°C de la solution du sol, peut ne pas être la tolérance maximum.

(2) Calculée d'après la pression osmotique de la sève : 25 atm. sans tenir compte du phénomène de DONNAN.

(3) Les noms entre parenthèses indiquent le lieu de l'observation.

(4) A l'exception des 3 fourrages du Lac Fetzara, la résistance aux sels de tous les fourrages cités a été trouvée dans l'ouvrage de Riverside.

(5) D'après BERNSTEIN (1965).

— les graines qui germent à plus de 50 % dans les concentrations produisant des pressions osmotiques de plus de 5 atmosphères donnent des résultats de germination dans le chlorure de calcium inférieurs aux autres, les résultats de germination dans le chlorure de magnésium restant généralement les plus élevés.

- b) La croissance de la plante
- c) La production de récolte

Ces deux aspects, difficiles à séparer, sont traités ensemble. Dans le cas de la production de fruits, la

plante vivant dans une certaine concentration de sels peut ne pas produire de récolte. Les résultats de NOVIKOFF montrent que, pour le piment et la tomate, les plantes sont malades à partir de 5 atmosphères en solution de ClNa pur, tandis qu'elles ne le sont pas en solution plus ou moins équilibrée. Ces constatations traduisent une toxicité du chlorure de sodium moins forte en présence de Ca qui joue alors un rôle antagoniste (MAUME et DULAC, 1929).

Les observations au champ, les résultats de laboratoire et la littérature permettent de classer les plantes d'après leur tolérance aux sels. (Tableau n° 2).

III. - ÉVOLUTION DE LA SALINITÉ DU SOL ET DE SES SOLUTIONS SOUS L'ACTION DE L'EAU SALINE

La salure du sol et la salinité de ses solutions sont deux notions tout à fait différentes. En effet, la salure du sol s'exprime en CE 25°C d'un extrait salin ; elle correspond à la quantité de sels solubles retenus par le sol. La salinité des solutions du sol dépend de son humidité, c'est dans ces solutions que la plante puise l'eau dont elle a besoin et c'est leur salinité qui s'opposera à cette absorption. Pour l'agriculture, cette notion est donc la plus importante.

21. - Evolution de la salure du sol

L'eau qui arrive sur le sol, soit par la pluie soit par l'irrigation, remplit ses pores, s'infiltré et percole ; quand l'arrivée d'eau cesse, l'eau des pores disparaît et seule reste dans le sol l'eau retenue par des phénomènes de surface, dont la quantité définit la **capacité de rétention du sol**. Dans la tranche de sol considérée, la surface du sol ne va se dessécher et le gradient d'humidité qui va s'établir provoquera l'existence d'un gradient de capillarité et un mouvement de l'eau de bas en haut. Si l'eau est salée, du sel se déposera vers la surface, ce phénomène étant accentué par la thermodialyse. Si cette circulation est gênée par une perméabilité trop faible ou une texture grossière, il peut y avoir rupture de capillarité et formation d'une zone moins salée à une certaine profondeur. Si le sol est couvert de végétation, le

maximum de dessiccation se produit au niveau des racines actives des plantes ; ce phénomène s'accompagne du dépôt des sels dissous.

Dans l'ordre des textures de plus en plus grossières, les forces d'attraction sont de plus en plus faibles et le lessivage du sol est d'autant plus facile que sa texture est plus grossière. Le lessivage est en relation avec la perméabilité, elle-même conditionnée par la texture. Une autre propriété intervient : le gonflement des argiles, qui dépend lui-même de l'état ionique de leur complexe absorbant. Ce phénomène prend l'allure suivante : quand l'eau est ajoutée à de l'argile, elle diminue d'abord le volume puis l'argile gonfle et son volume augmente alors, mais cette augmentation n'est pas proportionnelle au volume d'eau ajouté. De ces données, il est possible de conclure que les sols sableux ont une faible capacité de rétention et qu'ils seront vite lessivés puisqu'ils sont perméables, les sols à texture moyenne auront une capacité de rétention d'eau moyenne et leur lessivage sera peu important et les sols à texture fine ou très fine retiendront bien l'eau et ne seront pas lessivés, surtout si leur complexe absorbant est sodique ou magnésien.

En l'absence de nappe permanente, les sols sableux risquent donc peu de se saler par l'irrigation puisqu'ils ne retiennent pas l'eau ; les sols à texture moyenne gardent de l'eau dans leurs horizons superficiels, cette eau a tendance à migrer vers le haut, attirée par la force capillaire, puis à s'évaporer et à déposer ses sels, il faudra donc prévoir d'autant plus d'eau de

lessivage que l'eau utilisée est plus chargée en sels ; les sols à texture très fine retiennent bien l'eau et la laissent d'autant moins s'infiltrer que leur texture est plus fine, irrigués avec de l'eau salée ils peuvent se transformer en saline, chaque irrigation laissant sur le sol la quantité de sels contenue dans l'eau utilisée. Ces phénomènes rendent nécessaire un bon drainage qui, malgré tout, laissera dans le sol une certaine quantité de sels dont devront s'accommoder les plantes cultivées. Une première conclusion s'impose donc : la **culture irriguée doit s'accommoder** d'une certaine salure du sol.

Le problème est alors de connaître la quantité de sels retenue par le sol au bout de N arrosages. L'application de la loi de dilution ou du lavage des précipités (TREADWELL, 1939) permet d'obtenir une solution approchée de ce problème (BRYSSINE et CHEROTSKY, 1951). Un certain nombre d'hypothèses sont nécessaires :

- la concentration des sels se fait uniformément dans toute la masse d'eau retenue dans le sol ;
- l'adsorption négative des anions est négligeable ; ce phénomène disparaît quand les valeurs électro-positives libres du complexe sont satisfaites, ce qui est le cas très rapidement et cette hypothèse est justifiée. Dans ces conditions, si :

C représente la concentration des sels dans l'eau d'arrosage, en g/l ;

S la teneur en sels du sol, en g/kg de terre sèche ;

R le volume d'eau d'arrosage retenu dans le sol, en l/kg de terre sèche ; ce volume est égal à la différence entre la capacité de rétention du sol et son humidité avant l'arrosage ;

Q le volume d'eau d'arrosage en l/kg de terre sèche et par arrosage ;

n le nombre d'arrosages ;

X_n la quantité de sels retenue dans le sol après n arrosages ;

en posant :

$$K = \frac{CQ}{\frac{Q}{R} - 1}$$

(K est la quantité limite de sels apportés par l'eau d'arrosage retenue par le sol (X_n), le calcul conduit à :

$$X_n = \frac{S - K}{\left(\frac{Q}{R}\right)^n} + K$$

X_n est donc une fonction exponentielle, dont l'étude des variations montre qu'en définitive, que le sol soit salé ou non, après un certain nombre d'arro-

sages, il contiendra une quantité de sels K, dont la valeur peut se calculer par la formule :

$$K = \frac{CQ}{\frac{Q}{R} - 1}$$

Cette valeur ne dépend que de trois éléments : la teneur en sels de l'eau d'irrigation, le volume des arrosages Q et la quantité d'eau retenue par le sol. **Elle ne dépend pas de la teneur initiale du sol en sels solubles** et ceci est un résultat très important.

Si C est très petit (eau parfaitement douce, eau de pluie), K = 0 et X = S (—), la quantité de sels

retenue après le n^{ième} arrosage diminue rapidement avec le nombre d'arrosages puisque Q > R ; il y a lessivage. C'est un paramètre du périmètre d'irrigation imposée par la nature, il est impossible de le faire varier et, quand sa valeur augmente, la valeur de K augmente rapidement et gouverne le choix des sols et des cultures.

R peut varier mais, compte tenu du fait qu'il faut éviter de léser les cultures, dans des limites assez étroites qui sont le point de flétrissement et la capacité de rétention du sol pour l'eau ; plus R sera petit, c'est-à-dire plus la teneur en eau du sol sera voisine de sa capacité de rétention ou plus les irrigations

seront fréquentes, plus $\frac{Q}{R}$ sera grand et par consé-

quant plus K sera petit. Des arrosages fréquents provoqueront donc une plus faible salure, à volume et nombre égaux, que des arrosages très espacés.

Q dépend de l'homme et peut donc varier comme il le désire ; la courbe de variation de K en fonction de Q est une branche d'hyperbole qui a pour asymptote verticale Q = R, montrant que plus la dose d'arrosage est forte, moins il y a de sels dans le sol.

Connaissant C, la capacité de rétention du sol pour l'eau et son point de flétrissement, il serait possible de construire la famille de courbes correspondant aux diverses valeurs de R. Elles montreraient que plus l'irrigation se fait tôt dans le temps, c'est-à-dire plus la terre est humide au moment de l'irrigation, moins la quantité d'eau qu'il faut y appliquer pour obtenir une même teneur en sels est importante.

Cette méthode permet, théoriquement, de :

- prévoir les conditions de salage et de dessalage du sol et d'estimer la quantité de sels solubles accumulés au cours des irrigations ;
- choisir approximativement les volumes et le nombre d'arrosages pour maintenir la salure du sol

au taux fixé et de juger si les volumes d'arrosages correspondant à la capacité de rétention du sol peuvent ou non conduire à un taux de salure excessive ;

- calculer les doses et le nombre des arrosages pour amener la salure du sol à un taux déterminé.

22. - Corrections à apporter à ces résultats

SCHLOESING (in DEMOLON, 1944) a extrait et étudié les solutions du sol ; il a observé les phénomènes qui se produisent en faisant percoler de l'eau distillée à travers du sable ou de la terre mouillée avec une solution connue de chlorure de sodium. Le percolat était recueilli par petites fractions successives et il a pu remarquer que les premières fractions, représentant 40 % du volume total, passaient sans être diluées.

Dans la nature, il est possible d'observer des phénomènes très voisins. Dans la concentration des eaux de drainage après les irrigations, lorsque la consommation de l'eau par les plantes est régulière et n'est perturbée par aucun phénomène accidentel, climatique ou autre, l'eau des drains conserve pendant toute la période de drainage une concentration identique, elle est chassée du sol sans mélange avec l'eau d'irrigation. Les courbes obtenues par SCHOFIELD (1935), de l'humidité d'un sol en fonction du pF lorsqu'il se dessèche ou s'humecte, sont différentes et montrent que, lorsque le sol s'humecte, à un pF donné correspond une humidité inférieure à celle qu'il aurait à ce même pF en se desséchant. Le sol mouillé à sa partie supérieure verra donc l'eau qu'il retenait devenir plus mobile, sans que l'humidité augmente puisqu'il passe de la dessiccation à l'humectation. Une certaine quantité d'eau du sol peut donc alors s'écouler sans être mélangée à l'eau ajoutée.

Il semble donc que les conclusions de BRYSSINE soient un peu sévères et doivent être modifiées qualitativement :

- l'irrigation n'intervient que lorsque le sol est sec et le volume apporté est inférieur ou égal à la quantité nécessaire pour satisfaire sa capacité de rétention, il n'y a pas de percolation et à chaque irrigation le sol retient tous les sels contenus dans l'eau apportée, le sol se sale indéfiniment ;
- l'irrigation n'intervient que lorsque le sol est sec et le volume apporté est supérieur à la quantité

qu'il faudrait pour satisfaire sa capacité de rétention, une partie percole ; dans ce cas, les calculs de BRYSSINE s'appliquent et la teneur en sels du sol tend vers la valeur K calculée ;

- l'irrigation intervient quand le sol est encore humide, que le volume apporté soit ou non supérieur à celui qu'il faudrait pour satisfaire la capacité de rétention du sol, la solution du sol concentrée est chassée et remplacée par l'eau d'irrigation. Le sol retient un volume d'eau correspondant à sa capacité de rétention et les sels qui y sont dissous. La hauteur de sol intéressée varie, bien entendu, avec le volume de l'irrigation, la perméabilité du sol et celle du terrain sous-jacent. Elle n'est pas chiffrable.

Ces résultats sont intéressants à connaître pour la plante, il est encore plus intéressant de connaître la salinité des solutions du sol irrigué quand elles quittent la zone prospectée par les racines.

23. - Evolution de la salinité des solutions du sol

Le véritable problème de l'évolution de la salinité des sols irrigables est de connaître la solution où la plante puisera l'eau qui lui est nécessaire. Cette absorption d'eau se faisant pas osmose, la plante aura à fournir un travail d'autant plus important que les solutions dont elle disposera seront plus concentrées. L'expérience a montré que les plantes ne peuvent pas absorber d'eau dans des solutions de concentration égale à la moitié de celle de l'eau de mer, soit environ 300 m.é. l (GREENE, 1948) ; pour le palmier dattier, cette concentration est reportée à 450 m.é. mais à cette teneur en sels il commence à souffrir. L'eau d'irrigation appliquée sur le sol s'infiltré et reste à la disposition de la plante pendant un certain temps qui dépend de la perméabilité du sol, une partie est retenue, satisfaisant sa capacité de rétention. La solution qui constitue l'eau d'irrigation va se concentrer sous l'influence conjuguée de l'évaporation par la surface et de l'absorption par les plantes qui ne prélèvent qu'une fraction négligeable des sels dissous. D'après les études américaines au champ et en lysimètres, les eaux d'irrigation, en l'absence de toute précipitation ou dissolution de sels provenant du sol, sont de trois à dix fois plus concentrées quand elle quittent la zone racinaire que lorsqu'elles sont appliquées sur le sol. Cette augmentation de la concentration dépend de la perméabilité

du sol et, par conséquent, de sa texture et de son complexe absorbant. Elle varie suivant les sols et c'est ce facteur de multiplication qu'il faut connaître. En Algérie, des études ont été faites de 1954 à 1958 sur les bases suivantes :

- la tolérance des plantes aux sels est donnée le plus souvent en conductibilité électrique à 25°C de l'extrait saturé du sol, qui est à peu de chose près celle de la solution du sol à sa limite de drainage ;
- l'eau qui s'écoule dans les drains en fin d'écoulement correspond à peu près à la solution du sol à la limite de drainage ; il est donc possible, en construisant la courbe de la conductibilité électrique de l'eau des drains en fonction du temps entre deux irrigations successives, de trouver la concentration de l'eau à la limite du drainage, surtout si le drain cesse de couler avant la deuxième irrigation ;
- les différentes cultures ayant des besoins en eau différents, la limite de drainage sera atteinte plus ou moins vite suivant la culture pratiquée, mais la concentration finale de l'eau des drains ne dépendra pas de la plante mais du sol ;
- si le climat varie suivant le point d'observation choisi, l'évapotranspiration produite ne se manifesterà que sur la concentration finale de l'eau des drains.

Les travaux de DUTIL (192) ont montré que l'évaporation du sol se limite aux 50 premiers centimètres, ce qui justifie ces raisonnements.

Un certain nombre de parcelles irriguées et drainées par des canaux à ciel ouvert ont été choisies

dans divers périmètres irrigués. L'eau d'irrigation a été prélevée le jour de l'irrigation et l'eau du drain chaque jour jusqu'à cessation du drainage ou jusqu'à l'irrigation suivante. Sur chaque échantillon, les dosages de Ca + Mg, de Na et la mesure de la conductibilité électrique à 25°C ont été faits. Les profils des sols irrigués ont été observés et les résultats des différents dosages comparés en tenant compte des données qui viennent d'être exposées.

Quatre emplacements ont été observés dans les périmètres d'Oranie, un cinquième dans un secteur cultivé en riz et quatre à la station expérimentale d'EL ARFIANE.

Les résultats obtenus dans tous les cas montrent la constance de la concentration de l'eau de drainage entre deux irrigations successives si la période qui sépare deux irrigations n'est pas excessive et l'augmentation relative de la teneur en sodium de l'eau de drainage par rapport à celle de l'eau d'irrigation. Ils permettent également de calculer le facteur de multiplication de la concentration de l'eau quand elle va du bassin d'irrigation au drain. Ces derniers résultats sont consignés dans le tableau n° 3.

Pour le limon argileux, la valeur de 5 du facteur de multiplication est un peu exagérée mais donne une bonne marge de sécurité ; il en est de même pour le limon, dont le facteur de multiplication 4 pris par interpolation est certainement un peu fort. Ce tableau ne constitue donc qu'une première approximation. Le facteur 5 obtenu à Hamadena pour la culture du coton est peut-être la conséquence de la floculation de l'argile du sol par les sels qu'il contient.

Les observations précédentes ont été faites sur des cultures irriguées et drainées. En culture irriguée non drainée, il est probable que les eaux qui attei-

TABEAU 3
Facteur de multiplication de la concentration en fonction de la texture du sol

Textures	Facteur x adopté	Lieu d'observation, facteur x, culture	
Sable	1,5	El Arfiane (N Sahara)	1,2 à 1,8 - Palmiers
Limon sableux	2,5	Ain Zerig (Tunisie)	2,5 - Culture maraîchère (72)
Limon	4	Interpolation	
Limon argileux	5	St-Denis-du-Sig (Oran)	3,4 - Oliviers
		Relizane (Oran)	2,3 - Agrumes
Argile	5 à 10	Perregaux (Oran)	10 - Coton
		Hamadena (Oran)	5 - Coton
		Hamadena (Oran)	2,5 - Rizière (à titre indicatif)

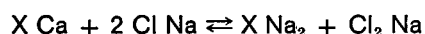
gnent la nappe phréatique ne sont pas plus concentrées que celles qui sont exportées par les drains, en effet la profondeur correspond à peu de chose près à la tranche de sol prospectée par les racines et l'eau qui s'infiltrera plus bas ne se concentrera plus.

La constance de la concentration des eaux de drainage observée dans certains cas vient à l'appui des expériences de SCHOESING et il semble que l'eau d'irrigation chasse devant elle, sans mélange appréciable, les solutions du sol plus concentrées.

IV. - ÉVOLUTION DU COMPLEXE ABSORBANT SOUS L'INFLUENCE DE L'EAU D'IRRIGATION

Il suffit de se rappeler l'influence de l'état ionique du complexe absorbant sur les propriétés physiques des sols pour comprendre l'importance de son évolution pour l'avenir des sols irrigués. Un sol qui contient du sodium absorbé à un taux dépassant 15 à 20 % de sa capacité d'échange, présente des propriétés physiques défavorables à la culture : gonflement, imperméabilité par défloculation. Les sols contenant du magnésium absorbé semblent présenter des propriétés physiques qui se rapprochent de celles des sols sodiques mais, en général, c'est le sodium qui produit le plus mauvais effet. Si l'évolution de l'état ionique du complexe absorbant d'un sol est difficile à prévoir avec exactitude, il est possible, par contre, de connaître sa tendance évolutive.

L'absorption des cations par les colloïdes du sol est assimilable à une action de surface et les échanges qui se produisent entre l'eau d'irrigation et le sol se schématisent par la réaction d'équilibre :



Ce qu'il faut chercher à connaître, c'est la quantité de sodium (ou de magnésium) que fixera le sol en équilibre avec la solution provenant de la concentration de l'eau d'irrigation qui lui est apportée.

41. - Equilibre solutions du sol, complexe absorbant

Les rapports d'équilibre entre les sels des solutions du sol et les cations absorbés ont été étudiés par de nombreux auteurs. La plupart ont essayé d'appliquer la loi de GUDBERG et WAAGE aux équilibres sol-solution du sol et ont été conduits à des formules, dans lesquelles apparaissent les coefficients d'activité

des corps considérés (DAVIS, 1945 ; GAPON, 1933 ; GUGGENHEIM, 1945 ; SCOFIELD, 1936 ; VANSELOW, 1932). La diversité des solutions proposées atteste de la difficulté du problème à résoudre.

La formule proposée par GAPON est la plus employée, probablement parce-qu'elle est la plus simple et c'est elle que proposent GREENE (1948) et le Laboratoire de Riverside (1954).

GAPON, étudiant les terrains salés d'U.R.S.S., a montré qu'il existait une relation entre le taux de sodium échangeable d'un sol en équilibre avec sa solution saline et celui de cette solution. Cette relation dépend de l'expression :

$$SAR = \frac{Na^+}{\left(\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2} \right) \frac{1}{2}}$$

appelée sodium absorption ratio, SAR ou taux d'absorption de sodium, TAS, dans laquelle Na^{++} , Ca^{++} et Mg^{++} sont les teneurs en m.é. de la solution du sol. Cette expression est liée au pourcentage de sodium échangeable d'un sol à l'équilibre avec sa solution saline par la relation :

$$ESP = \frac{100 (-0,0126 + 0,01475 SAR)}{(\% \text{ de Na échang.}) 1 + (-0,0126 + 0,01475 SAR)}$$

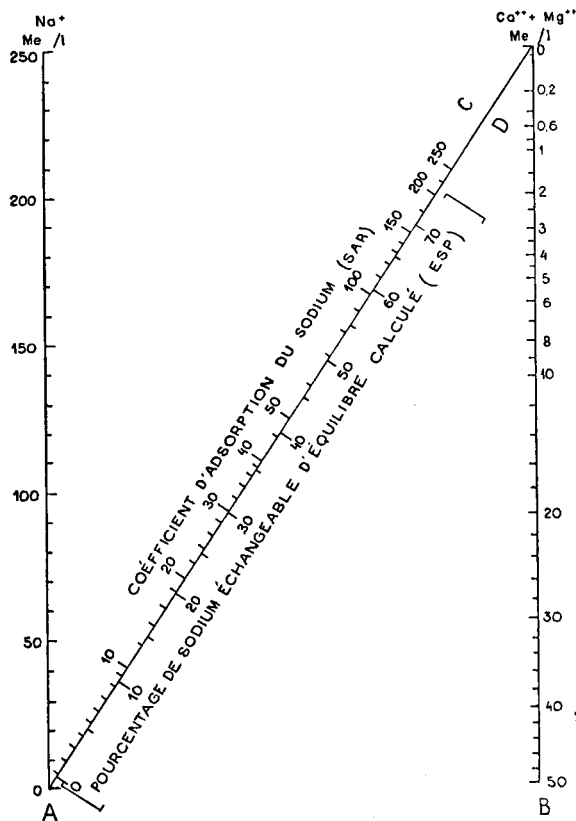
D'après ces données et en considérant l'eau d'irrigation comme une solution du sol, le danger de fixation du sodium par le sol peut être estimé par la valeur du taux d'absorption de sodium. Ce rapport peut se calculer à l'aide du nomogramme de la figure n° 1, qui donne en même temps le sodium échangeable du sol à l'équilibre. Il faut s'attendre à ce que cet équilibre ne soit pas réalisé, la solution du sol étant toujours plus concentrée que l'eau d'irrigation ; de plus, la solution du sol varie dans le temps et en fonction du climat ; enfin, elle varie encore suivant

le point du profil considéré. En admettant qu'il est possible de négliger les précipitations de sels solubles et leur absorption par les racines, l'eau d'irrigation se concentre donc sans changer de composition relative, en particulier le pourcentage de sodium reste constant par rapport aux autres cations ; par contre, le taux d'absorption de sodium augmente proportionnellement à la racine carrée de la concentration totale. Si celle-ci est doublée, le TAS est multiplié par 1,41, si elle est quadruplée, il est multiplié par 2. Si l'on ne cherche que la tendance évolutive du sol, cette formule peut rendre de grands services (REEVE et BOWER, 1960). Ainsi, l'analyse de l'eau du forage au Maestrichien de Bambey (Sénégal) donne, comme valeur du TAS : 35, ce qui permettrait de prévoir que son utilisation pour l'irrigation disperserait les colloïdes du sol et le colmaterait, c'est ce qui est arrivé, même dans les terres à textures grossières sur lesquelles elle était distribuée.

FIGURE n° 1

-16 bis-

Nomogramme pour déterminer la valeur du SAR de l'eau d'irrigation et des sols et pour estimer la valeur correspondante du ESP d'un sol à l'équilibre avec l'eau



42. - Test empirique proposé

Au laboratoire, un essai rend compte de l'action de l'eau d'irrigation sur le complexe absorbant du sol : 100 g de terre sont agités pendant 10 mn avec 250 cm³ de l'eau d'irrigation correspondante et laissés en contact une nuit. Filtrer et doser sur le filtrat Ca, Mg et Na. La composition cationique relative de cette eau par rapport à celle de l'eau d'irrigation permet de voir si il y a augmentation ou diminution du sodium dans le sol. Le tableau n° 4 donne quelques résultats de cet essai.

Interprétation. — La concentration globale de la solution augmente mais la teneur relative en Na diminue : il y a donc libération de cations, les cations Ca et Mg étant libérés plus abondamment que le Na. Il y a donc danger d'évolution vers l'alcalinisation du sol et il y a intérêt à ajouter du Ca au sol sous forme de plâtre ou de gypse. Calculé par la formule de GAPON, le TAS de l'eau d'irrigation serait de l'ordre de 5, elle ne serait pas trop dangereuse à utiliser ; le test précédent infirme ce résultat et des accidents sont parfois constatés dans les terrains irrigués avec cette eau qui disperse les colloïdes des sols sur lesquels elle est appliquée.

43. - Seuil de concentration de l'eau (Quirk et Schofield, 1955)

Dans les lignes précédentes, l'eau d'irrigation a été étudiée en fonction de sa salinité et des effets que cette salinité peut avoir sur le sol. Le danger examiné est celui de la présence de sels en excès. Avec une eau trop peu saline, le sol peut perdre sa perméabilité et devenir réducteur. Le mécanisme de diminution de la perméabilité du sol est dû à la mise en œuvre de trois processus.

- le gonflement des colloïdes minéraux, bloquant complètement ou en partie les pores conducteurs ;
- la destruction des agrégats du sol, due à un gonflement inégal de l'argile dans la masse du sol ; les matières organiques préviennent en partie cette destruction ;
- la défloculation, qui intervient comme conséquence du gonflement lorsque les distances sépa-

TABLEAU N° 4
Résultats de l'essai d'évolution du complexe absorbant

Eau utilisée et sol	Teneurs en m.é./1			Na %	Tendance évolutive du complexe
	Ca+Mg	Na	Total		
Eau de Relizane	15,6	15,2	30,8	49,5	Fixation de Na « « «
B. 886 - Limon argileux	28,75	15,9	44,65	35,5	
B. 887 - Limon sableux	32,5	23,2	55,7	41,5	
B. 888 - Argile sableuse	22,5	16,5	39,0	42,0	
B. 889 - Argile	25,0	18,2	43,2	42,0	

rant les particules sont suffisantes pour que les forces d'attraction ne puissent plus s'opposer aux forces de répulsion.

Ce danger ne sera que signalé ici.

44. - Carbonate de soude résiduel

Le carbonate de soude résiduel (EATON, 1950) est par définition la teneur en m.é. de CO_3^- et de CO_3H restant lorsque tous les ions Ca et Mg ont été combinés à ces anions.

$$(\text{CO}_3\text{Na}_2 \text{ résiduel}) = \text{CO}_3^- + \text{CO}_3\text{H} - (\text{Ca}^{++} \text{ et } \text{Mg}^{++})$$

Dans les eaux fortement bicarbonatées, le calcium et le magnésium tendent à précipiter sous forme de carbonates lorsque l'eau se concentre et la proportion de sodium augmente, le sol risque donc d'absorber plus de sodium. Pour EATON, les eaux contenant moins de 1,25 m.é./1 de carbonate de soude résiduel n'auraient aucune influence sur le sol, celles qui en contiendraient plus de 2,5 m.é./1 seraient dangereuses. Dans une note récente, KELLEY (1962) a repris cette question et est arrivé aux conclusions suivantes :

- l'utilisation d'eau d'irrigation contenant un excès de CO_3H par rapport à Ca + Mg conduit à des concentrations relativement élevées de CO_3HNa dans les solutions du sol, mais généralement pas à des teneurs en carbonate de soude significatives pour l'agriculture ;
- la précipitation de carbonate de chaux, conséquence de l'utilisation d'eau bicarbonatée, tend à

augmenter le taux de Na de la solution du sol mais là où le drainage est suffisant, la concentration de la solution du sol est maintenue à un niveau peu élevé par le lessivage qui se produit normalement au cours de la pratique de l'irrigation (PRATT, BRANSON et CHAPMAN, 1960) ;

- dans de nombreux types de sols, le Na absorbé est bien plus important que celui qui est dissous par CO_3 ; le pH de ces sols est élevé, le Ca devient peu abondant et leurs propriétés physiques sont défavorables. Les effets du Na absorbé ne sont pas identiques dans tous les sols. Bien que, normalement, Na absorbé soit immédiatement déplacé par Ca, il peut arriver qu'il ne soit qu'en partie déplacé par le gypse.

Il semble donc que le carbonate de soude résiduel ne doit pas être considéré comme un facteur limitant l'utilisation de l'eau.

V. - QUALITÉ DE L'EAU D'IRRIGATION ET CHOIX DES SOLS IRRIGABLES

Les données des chapitres précédents permettent de proposer une solution aux questions de la qualité de l'eau d'irrigation et du choix des sols irrigables.

51. - La qualité des eaux d'irrigation ou la classification des eaux pour l'irrigation

Le laboratoire de Riverside (RICHARDS et al., 1954) a donné une solution à ce problème reposant sur deux conditions principales.

51.1 La salinité de l'eau

Qui permet de déterminer quatre classes d'eau, d'après la relation entre la conductibilité spécifique à 25° C, CE 25° C de l'eau d'irrigation et celle de l'extrait saturé du sol :

— C1 - CE 25° C < 250 micromhos/cm/cm

Eaux utilisables pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols, avec peu de chances d'apparition de salinité dans le sol. Un léger lessivage est nécessaire, mais il se produit en irrigation normale sauf en sol très peu perméable.

— C2 - CE 25° C comprise entre 250 et 750 micromhos/cm/cm

Eaux utilisables avec un léger lessivage. Les plantes modérément tolérantes aux sels peuvent pousser dans la plupart des cas, sans pratique spéciale de contrôle de la salinité.

— C3 - CE 25° C comprise entre 750 et 2 250 micromhos/cm/cm

Eaux inutilisables pour les sols à drainage restreint. Même avec un bon drainage, des pratiques spéciales de contrôle de la salinité peuvent être nécessaires et les plantes ayant une bonne tolérance aux sels peuvent seules être cultivées.

— C4 - CE 25° C > 2 250 micromhos/cm/cm

Eaux inutilisables normalement pour l'irrigation. Exceptionnellement, elles peuvent être utilisées sur

des sols très perméables avec un bon drainage et l'eau d'irrigation sera appliquée en excès pour assurer un fort lessivage du sol. Les plantes cultivées devront être très tolérantes aux sels.

Le bore peut gêner la croissance des plantes, soit par excès soit par défaut. L'excès est plus à craindre en sol irrigable que le défaut ; à cet égard, le tableau n° 5 donne les 5 classes d'eaux proposées (SCOFIELD, 1936) et la tolérance relative des plantes au bore (EATON, 1944). Ces classes d'eaux seraient à réviser car elles ne tiennent pas compte du sol et de la concentration que l'eau y subit (elle-même fonction de sa texture), elles ne constituent qu'une approximation, acceptable en l'absence d'une autre mieux adaptée. En Algérie, les eaux utilisées les plus chargées en bore sont celles du forage Albién d'Ouarzla qui contiennent 0,325 mg/l et celles d'Adrar avec 0,525 mg (BOULINEAU, 1961). Outre ces différents sels, les eaux des forages peuvent contenir de l'hydrogène sulfuré en quantités toxiques, mais le danger qu'il présente est très limité : il s'évade dès le jaillissement de l'eau à l'air libre.

51.2 Danger d'alcalinisation du sol

Estimé en fonction du sodium absorbable par le sol, dont le résultat est de lui conférer de mauvaises propriétés physiques. Là encore, quatre classes ont été distinguées d'après le taux d'absorption de sodium et la concentration de l'eau.

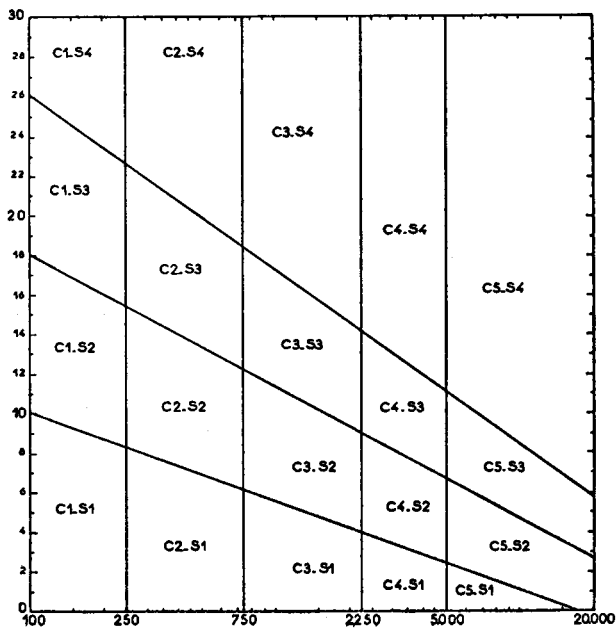
En effet, si théoriquement des eaux ayant le même taux d'absorption de sodium donnent au sol le même pourcentage de sodium échangeable à l'équilibre, la vitesse à laquelle cet équilibre est atteint dépend de la concentration de l'eau, c'est-à-dire, de sa conductibilité spécifique. Le diagramme de la figure n° 2 donne cette classification. Les courbes de séparation des quatre classes ont été déterminées empiriquement pour tenir compte du facteur additionnel concentration. (Figure 2).

Figure 2 —>

TABLEAU 5

Classes d'eaux d'irrigation d'après leur teneur en bore et tolérance relative des cultures

Classe	Cultures Tolérantes	Cultures semi-tolérantes	Cultures sensibles
	B en mg/l :	B en mg/l :	B en mg/l :
1	1,00	0,67	0,33
2	1,00 à 2,00	0,67 à 1,33	0,33 à 0,67
3	2,00 à 3,00	1,33 à 2,00	0,67 à 1,00
4	3,00 à 3,75 3,75	2,00 à 2,50 2,50	1,00 à 1,25 1,25
	Tamaris Asperge Palmier dattier Betterave à sucre Betterave fourragère Betterave de jardin Luzerne Glaieul Fève Oignon Navet Choux Laitue Carotte	Soleil Pomme de terre Coton Tomate Pois de senteur Radis Petit pois Olivier Orge Blé Maïs Melon Avoine Zinnia Citrouille Poivrier Patate douce	Pacanier Noyer Noyer de Perse Artichaut Haricot Ormeau américain Prunier Poirier Pommier Vigne Figuier Plaqueminier Cerisier Abricotier Mûrier Oranger Avocatier Citronnier Pomélo



Le diagramme de la figure n° 2 est celui proposé par le laboratoire de Riverside, modifié pour être utilisé d'une manière plus générale par l'addition de la classe C5, cette dernière correspondant à des salinités supérieures à celles des eaux utilisées aux Etats-Unis. Les quatre classes déterminées sont :

- S1 - Eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation, bien que certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées (Avocatier) ;
- S2 - La danger d'alcalinisation du sol est appréciable dans les sols à texture fine et à forte capacité d'échange, surtout dans des conditions de faible lessivage, à moins que du gypse ne soit présent dans le sol. Cette eau est utilisable sur les sols à texture grossière ou les sols organiques ayant une bonne perméabilité ;

TABLEAU N° 6
Analyses d'eau d'irrigation

	Date de prélèvement	CE 25° C en micromhos	Ca + Mg en m.é.	Na en m.é.	Na %	TAS (ou SAR)	Qualité Riverside	Utilisation
— ALGERIE								
Barrage des Zarderas (P.I. du Saf-Saf	22.12.55	710	5,5	2,0	26,5	5,5	C2 - S1	A
Tafna	14. 2.55	520	4,1	0,7	14,5	0,5	C2 - S1	D
Relizane	15. 7.55	2 880	15,6	15,2	49,5	6,0	C4 - S2	AM
Perregaux	22. 7.55	1 800	13,0	8,0	38,0	3,0	C3 - S1	AM
St-Denis-du-Sig	27. 7.55	3 600	22,3	18,0	44,5	3,5	C4 - S2	OM (A)
Hamadena	9. 6.55	2 160	10,5	11,1	51,4	5,0	C3 - S2	IMR
Laghouat Od Mzi	16.11.55	1 470	12,3	4,3	26,0	1,8	C3 - S1	PMD
Oued Fodda	18.11.55	1 220	9,5	5,3	55,8	2,5	C3 - S1	AM
El Arfiane	27. 1.56	8 900	62,1	51,7	45,5	9,3	C4 - S4	PFMD
Sidi Yahia	18.10.55	10 320	61,8	60,8	49,5	11,0	C4 - S4	PFM
— SENEGAL								
Bambey (Maestrichien) .	26.10.62	3 000	1,0	25,2	96,1	35	C4 - S4	Essais
M'Boro	22. 5.62	875	2,0	4,9	71,0	5	C3 - S1	M
— MADAGASCAR								
Andoba	26. 5.62	290	2,9	0,4	12,1	1	C2 - S1	R

Utilisations :

A = agrumes	F = arbres fruitiers
O = oliviers	P = phéniculture
M = maraîchage	R = Riziculture
I = culture industrielle	D = divers, dont fleurs

— S3 - Eaux pouvant provoquer l'apparition d'une alcalinité dangereuse dans la plupart des sols, leur emploi exigera la mise en œuvre d'un aménagement spécial : bon drainage, fort lessivage, addition de matières organiques ;

— S4 - Le danger d'alcalinisation est fort, de telles eaux sont utilisables pour l'irrigation si leur faible salinité permet l'addition de calcium soluble ou si le sol en contient suffisamment.

Le tableau 6 donne les analyses d'un certain nombre d'eaux d'irrigation utilisées en Afrique du Nord, au Sénégal et à Madagascar. L'examen de ce tableau montre que, sur les 14 eaux analysées, cinq sont inutilisables et 4 ne sont utilisables qu'avec de fortes restrictions.

Les rendements en agrumes obtenus dans les différents périmètres d'Algérie sont donnés dans le tableau 6, en fonction de la conductibilité de l'eau d'irrigation et du sol. Ils permettent de constater que le rendement diminue lorsque la CE 25° C augmente et si, dans le périmètre du Saf-Saf, des rendements de 250 q/ha sont courants, le périmètre de Perrégaux

— dont le rendement est de 160 q/ha — est considéré comme le périmètre type pour l'agrumiculture, ainsi d'ailleurs que le périmètre de Relizane, tandis que celui de St-Denis-du-Sig est le périmètre oléicole par excellence. A Relizane et à St-Denis-du-Sig, l'eau d'irrigation est, d'après Riverside, réputée inutilisable normalement pour l'irrigation, alors qu'elle est utilisée et que les agriculteurs considèrent que les rendements obtenus sont satisfaisants pour les cultures maraîchères et industrielles et même pour les agrumes. Il est évident que si les américains ont proposé les normes définies précédemment c'est qu'ils disposent d'eaux permettant d'obtenir des rendements plus élevés, les incitant à la sévérité. La culture irriguée des plaines de Relizane et de St-Denis-du-Sig constitue une richesse pour le pays et l'utilisation de ces eaux chargées ne doit pas être négligée, d'autant plus que le sol est riche en calcaire, ce qui empêche son alcalinisation. Dans un cadre général, le classement des eaux d'irrigation d'après les normes américaines paraît sévère, d'autres éléments doivent intervenir : le sol sur lequel l'eau sera distribuée, la tolérance aux sels de la culture envisagée et l'aspect économique et humain du problème (qui

peut permettre de s'accommoder de rendements médiocres). Il ne doit pas être considéré d'une manière absolue.

L'eau de Bambey (Sénégal), dont la CE 25° C est de 3 000 micromhos a été utilisée pour l'irrigation de sables humifères non calcaires ; elle les a stérilisés parce que la proportion de sodium est trop élevée (TAS = 35), l'humus est dispersé de même que le peu d'argile contenu dans le sol, les pores se colmatent et le terrain se sale de plus en plus. Cet exemple, comparé à celui de St-Denis-du-Sig, montre l'importance de la présence de calcaire dans le sol et de sodium dans l'eau d'irrigation. Dans ce cas précis, les normes américaines indiquent exactement le danger de l'utilisation de l'eau de Bambey en irrigation.

En définitive, le classement des eaux d'après la CE 25° C, proposé par les américains, peut être conservé mais sans indication de qualité et avec l'addition d'une classe. Les subdivisions suivantes sont proposées :

- C1 - CE 25° C < 250 micromhos/cm/cm - eaux non salines
- C2 - 250 < CE 25° C < 750 micromhos/cm/cm - eaux à salinité moyenne
- C3 - 750 < CE 25° C < 2 250 micromhos/cm/cm - eaux à forte salinité
- C4 - 2 250 < CE 25° C < 5 000 micromhos/cm/cm - eaux à très forte salinité
- C5 - 5 000 < CE 25° C < 20 000 micromhos/cm/cm - eaux à salinité excessive

La limite des 20 000 micromhos/cm/cm a été choisie en tenant compte de la tolérance du palmier dattier (var. Deglet Nom) aux sels : 30 000 micromhos/cm/cm et de la concentration que subit l'eau d'irrigation dans le sable en climat aride : une fois et demie à El Arfiane. Les eaux dont la CE 25° C est supérieure à 20 000 sont inutilisables pour l'irrigation.

A noter que ce classement par la CE 25° C ne concerne pas l'effet de l'eau sur le complexe absorbant mais seulement l'action qu'elle peut produire sur la salinité des solutions du sol. Ces limites doivent évidemment être interprétées en fonction du danger d'alcalinisation du sol (exemple de l'eau de Bambey).

Pour les dangers d'alcalinisation, le classement en fonction du taux d'absorption de sodium reste utilisable, la présence de calcaire dans la terre ayant pour effet de retarder sa défloculation par le sodium.

De ces diverses considérations, il résulte que l'eau d'irrigation n'a pas une qualité propre, elle est de telle ou telle classe ; il ne faut parler de qualité d'une eau d'irrigation qu'en fonction du sol qui la recevra et de la culture qui sera pratiquée, sans oublier certains facteurs économiques ou mêmes sociaux. C'est donc au pédologue et non au chimiste qu'il appartient

de déterminer la qualité de l'eau d'irrigation, pour laquelle la qualité biologique peut même parfois intervenir (SKALDA et VALENTA, 1962).

52. - Le choix des sols irrigables

Pour choisir les sols irrigables, il faut donc connaître : le sol, l'eau et la tolérance des plantes aux sels.

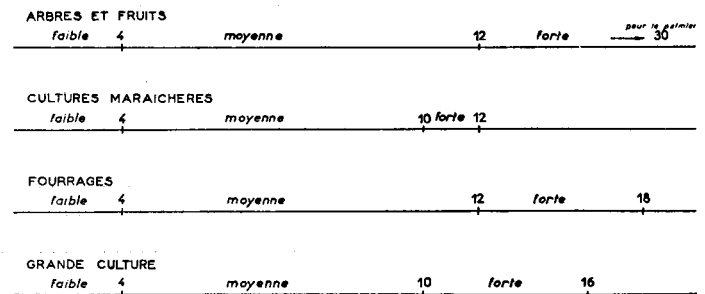
La façon la plus simple d'apprécier un sol pour l'irrigation est de déterminer sa texture, qui dépend essentiellement de sa granulométrie (et aussi de sa teneur en matières organiques), de l'état ionique de son complexe absorbant et de la nature de l'argile. En général cependant, l'appréciation de la texture du sol se fait par sa granulométrie. La structure du sol est aussi un facteur de choix des sols irrigables, mais son effet est de corriger les appréciations obtenues par la texture ; la structure peut être améliorée par des façons culturales convenables. La présence de calcaire ou de gypse joue un rôle identique, l'un et l'autre conditionnant la structure.

Le tableau n° 2 donne les limites de tolérance des plantes aux sels, telles qu'elles ressortent de la littérature et de l'observation. Les limites de tolérance relative des divers types de cultures sont données en CE 25° C dans la figure n° 3.

— FIG. N°3 —

Limite de tolérance relative des cultures

Les chiffres correspondent à la conductivité de la solution du sol en millimhos cm 25° c



Le choix des sols irrigables peut alors se faire de la façon suivante, il conditionne en même temps le choix de la culture :

TABLEAU N° 7

Limite supérieure admissible de CE 25°C de l'eau en fonction de la tolérance de la culture aux sels et de la texture du sol

Texture	Limite supérieure de la CE 25° de l'eau d'irrigation en micromhos/cm
I — Plantes peu tolérantes aux sels.	
Limite 4 000 micromhos/cm à 25° :	
Sable	2 500
Limon sableux	1 600
Limon	800
Limon argileux	525
Argile (irrigation normale)	400
Argile (irrigation continue)	800
II — Plantes moyennement tolérantes aux sels.	
Limite 10 000 micromhos/cm à 25° :	
Sable	6 500
Limon sableux	4 000
Limon	2 800
Limon argileux	2 000
Argile (irrigation normale)	1 000 à 1 250 suivant le cas
Argile (irrigation continue)	2 000
III — Plantes très tolérantes aux sels :	
Sable	20 000 (théoriquement)
Palmier	15 500 (expérimentalement)
Culture maraîchère	8 000
Fourrages	12 000
Grande culture	10 000
Limon sableux	6 à 10 000
Palmier	4 500
Culture maraîchère	7 000
Fourrages	6 000
Grande culture	6 000
Limon (3,5)	8 000
Palmier	3 500
Culture maraîchère	5 000
Fourrages	4 500
Grande culture	4 500
Limon argileux (5)	6 000
Palmier	2 400
Culture maraîchère	3 500
Fourrages	3 000
Grande culture	3 000
Argile (5 à 10)	3 000
Palmier	1 200
Culture maraîchère	1 800
Fourrages	1 800
Grande culture	1 600

N.B. — Le drainage est indispensable dans tous les cas, il doit être d'autant plus serré qu'on se rapproche plus de la limite d'utilisation de l'eau et les doses d'irrigations, plus élevées.

— Pour des plantes faiblement tolérantes aux sels, la solution du sol doit avoir une conductibilité spécifique inférieure à 4 000 micromhos/cm/cm à 25° C, l'eau utilisable la plus concentré pour la culture de ces plantes dans les sables devra avoir une CE 26° C inférieure à 4 000 : 1,5 = 2 650 micromhos (1,5 étant le coefficient de multiplication de la concentration de l'eau dans le sol) soit, en arrondissant : 2 500 micromhos. Ce même raisonnement, appliqué aux différentes textures et aux différentes tolérances, permet de dresser le tableau n° 7.

53. - Utilisation des eaux très salines pour dessaler les terres

L'utilisation des eaux très salines pour dessaler des terres a longtemps été préconisée. En effet, à partir d'une certaine salinité, les eaux percolent facilement dans les terrains, même lorsque ceux-ci sont très argileux. Mais la grande difficulté est d'arriver à faire

circuler ces eaux très salines sans leur laisser la possibilité de saler à nouveau les sols qu'elles ont traversés.

Des essais en ce sens ont été effectués en laboratoire, en employant la technique du test de percolation (HENIN et al., 1960) sur des terres très argileuses, salées et non salées. Alors qu'avec de l'eau permutée la valeur de K des échantillons non salés, au bout de 24 heures, oscillait entre 0,09 et 0,22 cm/heure et était nulle pour les terres salées, avec une eau de 14 100 micromhos de CE 25°C elle oscillait entre 0,7 et 1,76 cm/heure pour les terres non salées et entre 0,44 et 0,5 cm/heure pour les terres salées. Les taux de salinité des terres non salées n'avaient pas bougé et restaient aux alentours de 30 micromhos de CE 25°C de l'extrait 1/10, alors que ceux des terres salées allaient de 108 à 1 280 micromhos avec l'eau permutée. Avec l'eau à 14 100 micromhos, les taux de salinité des différentes terres — salées ou non — s'établissaient entre 1 100 et 1 350 micromhos. Dans ces cas, le drainage était parfaitement réalisé et l'écoulement pouvait se poursuivre sans colmatage. Mais que se passerait-il sur le terrain ?

CONCLUSION

L'utilisation des eaux salines pour l'irrigation est possible à condition de garder présents à l'esprit les risques d'une certaine salure du terrain. Pour choisir les cultures, il faudra tenir compte de ce fait, ainsi que de leur tolérance aux sels et des propriétés physiques du terrain, ces dernières conditionnant le niveau de cette salinité.

Les terrains irrigués par des eaux salines devront être drainés convenablement et recevoir des doses d'arrosage supérieures aux doses strictement néces-

saires aux besoins des plantes, afin d'assurer le départ des solutions concentrées par l'absorption de l'eau par les plantes.

Enfin, il est sans doute possible d'utiliser des eaux fortement salines pour dessaler les terrains salés, à condition que ces eaux circulent librement et ne puissent pas contaminer à nouveau le terrain qu'elles auront dessalé. Le problème de la mise en œuvre de cette technique reste posé.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT G., 1963 — Transformation des sols de la zone aride sous l'influence des irrigations - *Wasserwirtschaft in Africa*, 75-82.
- BOULINEAU S., 1961 — Contribution à l'étude de quelques oligo-éléments (fer, manganèse, bore) de sols de zones arides d'Algérie - *Sols Africains*, vol. VI, n° 2 et 3, 273-288.
- BRYSSINE G., 1954 — Notions de Pédologie appliquée - IV. Méthodes d'analyses - *Publ. Sce Rech. Agron. et Expér. Agric. Empire Chérifien*.
- BRYSSINE G., CHEROTSKY, 1951 — Note sur la relation entre la salure du sol, celle de l'eau d'arrosage et le régime des irrigations - 70° congr. A.F.A.S., Tunis, C.R. IV, 71-76.
- CAMPBELL R.B., BOWER C.A., RICHARDS L.A., 1948 — Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion. Concentration for soil extracts - *Soil Sc. Soc. Amer., Proc. (Madison)*, vol. 13, 66-69.
- DAVIS L.E., 1945 — Simple Kinetic theory of ionic exchange for ions of unequal charge - *J. Phys. Chem.*, n° 49, 473-479.
- DEMOLON A., 1944 — Principes d'Agronomie - I. Dynamique du Sol - Dunod, Paris.
- DUTIL P., 1962 — Etude du bilan de l'eau des sols en cas lysimétriques sur les Hauts Plateaux Constantinois - Résultats des cinq premières années d'observations - *Publ. S.E.S. appl. à l'Hydraul., Sect. Pédologie et Agrol., E.G.* n° 8, Birmandreis - 118 p.
- EATON F., 1942 — Toxicity and accumulation of chloride and sulfate salts in plants - *J. Agric. Res.*, n° 64, 357-397.
- EATON F., 1944 — Deficiency, toxicity and accumulation of boron in plants - *J. Agric. Res.*, n° 69, 237-277.
- EATON F., 1950 — Significance of carbonates in irrigation waters - *Soil Sc.*, vol. 69, 123-133.
- GAPON E.N., 1933 — Théorie de l'adsorption par échange dans les sols - *Zhur. Obschch Khim (Moscou)*, n° 3, 144-152. (En russe).
- GREENE H., 1948 — Using salty land - Etude agricole, F.A.O. n° 3, Washington DC.
- GRILLOT G., 1953 — L'eau, le sel et les cultures, problème pédologique - *Soc. Sc. Nat. et Phys. Maroc*, t. VI-VII, 3-27.
- GUGGENHEIM E.A., 1945 — Statistical thermodynamics of mixtures with zero energie of mixture - *Roy. Soc., London, Proc.*, A. 183, 203-213.
- HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960 — Le profil cultural. Principes de physique du sol - *Soc. Edit. Ing. Agri.*, Paris, 320 p.
- JACKSON M.-L., 1960 — Soil chemical analysis - London, Constable & Co, 498 p.
- JENNY H., OVERSTREET P., 1939 — Cation interchange between plant roots and soil colloids - *Soil Sc.*, Baltimore, vol. 47, 257-272.
- KELLEY W.P., 1962 — Sodium carbonate and adsorbed sodium in semi arid soils - *Soil Sc.*, Baltimore, vol. 494, n° 1, 1-5.
- MAUME L., DULAC J., 1929 — Le problème de la toxicité et de l'antagonisme en physiologie végétale - *Ann. Sc. Agron., fr. et étrang.*, Paris, juil.-août, t. 46, n° 4, 400-443.
- NOVIKOFF V., 1946 — Notes sur l'utilisation des eaux salées - *Ann. S.B.A.T.*, vol. 19.
- PLEVEN J., 1956 — Comparaison de l'extrait saturé d'un sol et de son extrait salin 1/10 - *Travaux sect. Pédol. & Agrol. S.E.S.*, Birmandreis, Bull. n° - inédit.
- PRATI P.F., BRANSON R.L., CHAPMAN H.D. 1960 — Effect of crop, fertilizer and leaching on carbonate precipitation and sodium accumulation in soil irrigation with water containing bicarbonate - 7th Intern. Congr. Soil Sc. Proc., Madison, vol. II, com. I, 185-192.
- QUIRK J.P., SCHOFIELD R.K., 1955 — The effect of electrolyte concentration on soil permeability - *J. Soil Sc.*, vol. 6, n° 2, 163-178.
- REEVE R.C., BOWERS C.A., 1960 — Use of high salt water as a flocculant and source of fivalent cation for reclaiming sodic soils - *Soil Sc.*, Baltimore, vol. 90, n° 2, 139-144.
- RICHARDS L.A., 1954 — Diagnosis and improvement of saline and alkali soils - *Agric. Handbook*, n° 60, U.S. dépt of Agric.
- SCHOFIELD R.K., 1935 — The pF of the water in soils - *C.R. III° Congr. Intern. Soil Sc.*, vol. II, 37-48.
- SCOFIELD C.S., 1936 — The salinity of irrigation water - *Smiths Inst. Annu. rep.*, 275-287.
- SKALDA V., VALLENTA J., 1962 — Qualité de l'eau d'irrigation - *Vodni Hospodarstvi*, n° 5, 217-218.
- THORNE J.P., THORNE D.W., 1951 — Irrigation waters of Utah. *Utah Agric. Exper. Str. Bull.* n° 346.
- TREADWELL F.P., 1932 — Manuel de chimie analytique - t.1 - Analyse qualitative - Dunod, Paris.
- TREADWELL F.P., 1939 — Manuel de chimie analytique - t. 2 - Analyse quantitative - Dunod, Paris.
- VANSELOW A.P., 1932 — Equilibria of the base exchange reaction of bentonites, permutites, soil colloids and zeolites - *Soil Sc.*, n° 33, 95-133.
- VEIHMAYER F.J., HENDRICKSON A.H., 1931 — The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils - *Soil Sc.*, Baltimore, n° 32, 181-193.